

BRU
GGE



Risico- en kwetsbaarheidsanalyse Stad Brugge onder
klimaatsverandering

Documentbeschrijving

Titel

Risico- en kwetsbaarheidsanalyse van stad Brugge onder klimaatsverandering

Auteurs

Sumaqua

Studie uitgevoerd in opdracht van

Stad Brugge

Publicatiedatum

November 2021

Vragen in verband met dit rapport

Voor vragen in verband met dit rapport kan u contact opnemen met de projectcoördinator Veronique Soulliaert (veronique.soulliaert@brugge.be) of de uitvoerder van de studie (vincent.wolfs@sumaqua.be).

Colofon

Dit rapport is het resultaat van een risico- en kwetsbaarheidsanalyse van het ganze grondgebied van stad Brugge. Deze analyse werd in 2 fasen uitgevoerd: de binnenstad (met financiering van het Interreg project Water Resilient Cities), en vervolgens de overige delen van het grondgebied. De resultaten van de analyse van de binnenstad zijn ook in een afzonderlijk rapport beschikbaar. Voorliggend rapport combineert de resultaten van beide fasen, en beschrijft bijgevolg het ganze grondgebied.

Versiebeheer

Versie	Datum
1.0	22/03/2020
2.0	22/01/2021
3.0	2/9/2021
4.0	18/11/2021
4.1	14/12/2021
4.2	20/12/2021

Opmerkingen

Eerste draft. Foto's, logo's, ... nog te veranderen.

Revisie. Foto's, logo's, ... nog te veranderen.

Revisie.

Revisie. Aanpassing van de fluviale overstromingskaarten.

Revisie. Verduidelijking overstromingskaarten.

Beperkte tekstuele revisie overstromingskaarten.










Samenvatting

Dit rapport maakt deel uit van het opstellen van een doelgericht klimaatadaptatieplan voor stad Brugge. Voorliggend document beschrijft de resultaten van de risico- en kwetsbaarheidsstudie op het ganse grondgebied. Deze studie onderzoekt de mogelijke impacts en gevolgen van klimaatverandering. Om die mogelijke negatieve impact van klimaatverandering op te vangen en tegelijk de opportuniteiten aan te grijpen om de leefbaarheid en klimaatweerbaarheid van de stad te verhogen, werd een klimaatadaptatieplan opgesteld. Voor de binnenstad werd een afzonderlijk plan opgemaakt omdat het sterk verschillend karakter van de binnenstad een aangepaste aanpak vraagt. De klimaatadaptatieplannen zijn terug te vinden in aparte documenten.




Onderstaande tabellen tonen samenvattend de belangrijkste klimaatimpacts. Deze werden aan de hand van de meest actuele klimaatmodellen begroot. De waarden in deze tabellen beschrijven de klimaatverandering tegen 2100, terwijl er verder in het rapport ook projecties voor 2030 en 2050 beschouwd worden. Gelet op de lange levensduur van infrastructuur wordt voorgesteld om vooral op het jaar 2100 te focussen.




Merk op dat het maken van exacte voorspellingen over klimaatverandering niet mogelijk is. Daarvoor is er te veel onzekerheid, onder andere over de toekomstige uitstoot van broeikasgassen. Deze studie gebruikt daarom verschillende klimaatscenario's conform de internationale literatuur rond klimaatverandering. De waarden in de onderstaande tabellen beschrijven de waarschijnlijke bovengrens aan verandering en bijhorende gevolgen voor grondgebied Brugge. De werkelijke evolutie zal vermoedelijk tussen de huidige toestand en de hieronder beschreven toestand liggen.

Klimaattoestanden		<p>Neerslag</p> <ul style="list-style-type: none"> • Winters worden natter: neerslagvolumes kunnen tot 30 % stijgen, terwijl het aantal natte dagen gelijk blijft. • Zomers worden droger: neerslagvolumes kunnen tot 40 % dalen, net als het aantal droge dagen. • Onweersbuien worden heviger: gedurende het hele jaar nemen de neerslagintensiteiten toe tot 30 %
		<p>Temperatuur</p> <ul style="list-style-type: none"> • De gemiddelde temperatuur stijgt met 1 °C tot 4.5 °C in de wintermaanden en met 1.5 °C tot 6.5 °C in de zomermaanden. • De minimale en maximale temperaturen nemen in dezelfde mate toe. • Het aantal vorstdagen zal sterk dalen.
		<p>Verdamping</p> <ul style="list-style-type: none"> • De verdamping zal in alle maanden van het jaar toenemen: tot 20 % in de lentemaanden en tot 45 % tijdens de zomermaanden.

	<p>Zeespiegelstijging</p> <ul style="list-style-type: none"> • De zeespiegel stijgt tegen 2100 met 20 tot 80 cm. • In het meest extreme scenario wordt zelfs rekening gehouden met een stijging van 200 cm.
---	--

De tabellen in sectie 2.4 van dit rapport bevatten meer cijfers over de te verwachten klimaattoestanden.

Klimaat-effecten	 <p>Stedelijke wateroverlast</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hevigere onweersbuien in de zomer zullen tot frequentere en meer uitgestrekte wateroverlast leiden. • Overstromingen die in het huidige klimaat eens per 100 jaar voorkomen, kunnen tegen 2050 elke 5 à 6 jaar voorkomen, en tegen 2100 elke 3 à 4 jaar. Dit wordt veroorzaakt door het vaker voorkomen van extremere zomeronweders in de toekomst. • De overstroomde oppervlakte neemt toe met een factor 2 tot 4, afhankelijk van de herhalingsperiode. • Circa 6% van het ganse grondgebied wordt getroffen door pluviële overstromingen met een terugkeerperiode van 100 jaar in het toekomstige klimaat, versus 3% in het huidige klimaat. Deze gebieden zijn gekarteerd en beschreven in voorliggend rapport.
	 <p>Overstromingen vanuit waterlopen</p> <ul style="list-style-type: none"> • De grotere neerslagvolumes zullen in de wintermaanden leiden tot meer periodes met verhoogde afvoer. Rivieroverstromingen in Brugge die nu eens per 100 jaar voorkomen (kans 1 op 100), kunnen tegen 2050 met een kans van 1 op 25 voorkomen en tegen 2100 zelfs met een jaarlijkse kans van 1 op 12. • De binnenstad van Brugge lijkt goed beschermd, dankzij de keerstuw op het kanaal Gent-Oostende in Beernem. Enkel aan de Handelskom stijgt de kans op kritieke overstromingen, maar de oppervlakte blijft beperkt. • Andere delen van het grondgebied zijn wel gevoeliger voor rivieroverstromingen. In het bijzonder is er een sterke toename in overstroomde oppervlakte te verwachten langs de Kerkebeek (Sint-Michiels). De overige gebieden zijn gekarteerd en beschreven in het rapport.
	 <p>Kustoverstromingen</p> <ul style="list-style-type: none"> • De huidige zeevering is nog niet bestand tegen stormen met een 1000-jarige terugkeerperiode. Hierdoor kunnen grootschalige overstromingen optreden. • De overstroomde oppervlakte bij dergelijke storm neemt toe van 4450 hectare in het huidige klimaat, tot 6000 hectare en 7000 hectare in respectievelijk 2075 en 2115. De overstromingskaarten zijn terug te vinden in dit rapport. Het Masterplan Kustveiligheid omvat maatregelen om de kust te beschermen tegen stormen van deze omvang. Dit plan is in uitvoering. Bijkomend loopt momenteel het Complex Project Kustvisie, dat het vervolg is op het Masterplan Kustveiligheid. Dit vervolgproject richt

	<p>zich op het ontwikkelen van een lange termijn aanpak van de Vlaamse kustbescherming, met 2100 als tijdshorizon. Het uitgangspunt voor het ontwikkelen van deze aanpak is dat rekening gehouden moet worden met extremere zeespiegelstijgingen dan tot nu toe het geval was in de bestaande beleidsplannen.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Daarnaast zorgt de stijgende zeespiegel zorgt voor een verminderde uitwateringscapaciteit van het kanaal Gent-Oostende. Vooral tijdens hoge afvoeren kan dit problematisch zijn.
	<p>Droogte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lagere neerslagvolumes en hogere verdamping leiden tot meer droogte: uitzonderlijke droogte (die nu eens per 20 jaar voorkomt) kan tegen 2100 tot 10 keer vaker voorkomen dan vandaag. Extreme droogte (die nu slechts eens per eeuw voorkomt) zelfs tot 20 keer. Het zijn dus vooral de meer extreme situaties die vaker zullen voorkomen. • De beschikbare hoeveelheden oppervlaktewater daalt: tijdens de zomer kan deze tot 40 % lager liggen. • Waternod in de polders neemt toe van 8 mm tot 14 mm in 2100. • Regenwaterputten in typische configuraties zullen tegen 2050 dubbel zo lang en tegen 2100 3 keer zo lang droog staan als vandaag.
	<p>Hittestress</p> <ul style="list-style-type: none"> • De stijgende temperaturen zorgen voor meer hittegolfdagen: van gemiddeld 5 per jaar nu naar 48 tegen 2100. • De gemiddelde temperatuur in de zomermaanden kan stijgen van 18.7 °C tot 24.9 °C. Omwille van het hitte-eilandeffect ligt deze stijging hoger in stedelijk dan in landelijk gebied. In het noorden van Brugge is de hittestress in 2100 beperkter dan in sectoren oost, west en centrum, maar nog steeds problematisch.
	<p>Verziltiging en waterkwaliteit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Een historische analyse van verziltingsgegevens geeft aan dat er geen grote veranderingen waarneembaar zijn in de afgelopen decennia, behalve langs de opgehoogde havengronden (Dudzele) en langs het Boudewijnkanaal. Daar treedt zilte kwel op. • De stijging van de zeespiegel zal wellicht een smalle strook van 200 à 300 m langs de kust verder verziltten, maar de impact meer landinwaarts is wellicht beperkt. • Klimaatverandering vermindert de aanvoer van zoetwater, waardoor de huidige delicate balans tussen zoet en zilt water wel verstoord kan worden. Bijkomend onderzoek is nodig. • De algemene waterkwaliteit zal afnemen t.g.v. klimaatverandering doordat rioleringen vaker overstorten, er minder aanvoer is van (regen)water en hogere temperaturen die bepaalde processen negatief beïnvloeden.

Een gedetailleerde beschrijving over de herkomst van deze cijfers en een meer uitgebreide analyse kan gevonden worden in Hoofdstukken 2 tot en met 3 van voorliggend rapport.

De veranderende klimaattoestanden en –effecten zullen een impact hebben op onze maatschappij en de omliggende ecosystemen. Deze impacts worden in detail besproken voor verschillende sectoren en domeinen, namelijk gezondheid en welzijn, schade aan gebouwen, infrastructuur, werk en economie, energie en drinkwater, natuur en milieu en recreatie en toerisme in hoofdstuk 4.

Om die mogelijke negatieve impact van klimaatverandering op te vangen en tegelijk de opportuniteiten aan te grijpen om de leefbaarheid en klimaatweerbaarheid van het ganse grondgebied te verhogen, werden klimaatadaptatieplannen opgesteld. Voor de binnenstad werd een afzonderlijk plan opgemaakt omdat het sterk verschillend karakter een aangepaste aanpak vraagt.

Inhoudstafel

Samenvatting	iii
Inhoudstafel	viii
1 Inleiding	1
1.1 Wat is klimaatverandering?	1
1.2 Omgaan met klimaatverandering: mitigatie en adaptatie.....	2
1.3 Aanpak van de studie & leeswijzer.....	4
1.4 Overzicht deelrapporten	5
2 Te verwachten klimaatverandering	3
2.1 De toekomst voorspellen: klimaatmodellen en bijhorende scenario's.....	3
2.2 Interpretatie: onzekerheid omtrent modelresultaten	5
2.3 Klimaattoestanden.....	6
2.4 Samenvattende tabellen.....	13
3 Effecten van klimaatverandering	17
3.1 Inleiding.....	17
3.2 Wateroverlast als gevolg van intense neerslag	18
3.3 Overstromingen vanuit waterlopen	29
3.4 Overstromingen vanuit de kust	41
3.5 Droogte: freatisch grondwater	44
3.6 Droogte: bodemvocht	50
3.7 Droogte: oppervlaktewaterbeschikbaarheid	53
3.8 Hittestress en temperatuurstijging.....	56
3.9 Verzilting.....	63
4 Risico's en kwetsbaarheden	67
4.1 Inleiding.....	67
4.2 Gezondheid en welzijn	67
4.3 Schade aan gebouwen	74
4.4 Infrastructuur	79
4.5 Werk en economie.....	83
4.6 Energie en drinkwater.....	86
4.7 Natuur, landbouw en milieu	87
4.8 Recreatie en toerisme	97
5 Conclusies.....	101
6 Referenties.....	103

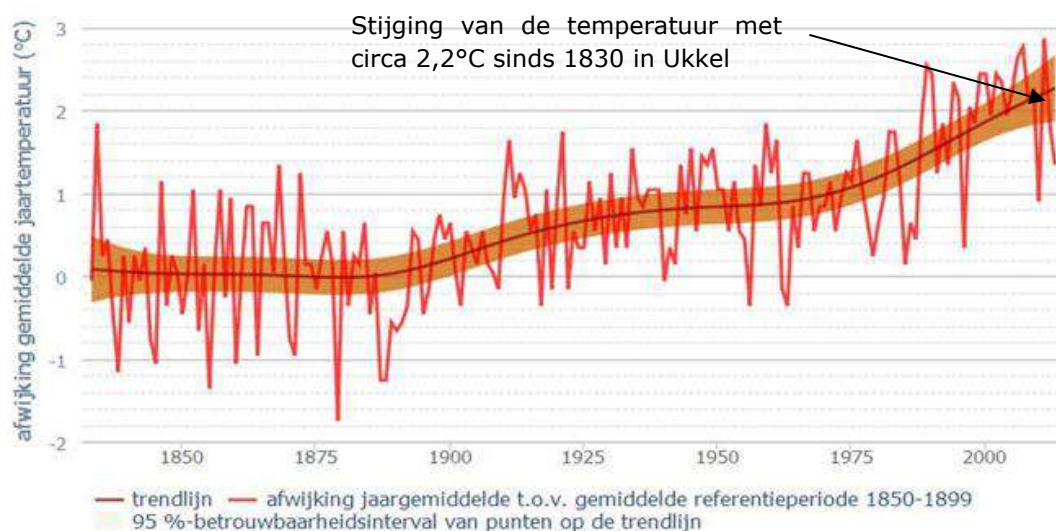


1 Inleiding

1.1 Wat is klimaatverandering?

Het klimaat wordt gedefinieerd als de statistiek van het weer over een periode van (minstens) 30 jaar. Een inherente eigenschap van klimaat is bovendien dat het variabel is in de tijd. Het vertoont van nature belangrijke schommelingen die zich vaak over eeuwen heen uitspreiden. De periode van de 15^e tot halweg de 19^e eeuw staat in de Lage Landen gekend als de "Kleine IJstijd". De temperatuur in onze landen lag toen gemiddeld 1 à 2 graden lager dan de huidige temperaturen (klimatologische periode tussen 1960 en 1990; bron: Buisman, 2000). Historisch onderzoek van het Nederlandse KNMI heeft bijvoorbeeld ook uitgewezen dat het laatste kwart van de 16^e eeuw het koudste was in de afgelopen duizend jaar. **De laatste decennia verandert het klimaat echter aan een veel sneller tempo.** Deze snelle verandering is toe te schrijven aan de toename van broeikasgassen in de atmosfeer. Broeikasgassen, zoals CO₂, H₂O en CH₄, zijn deels van nature in de atmosfeer aanwezig. Menselijke activiteiten, zoals het verbranden van fossiele brandstoffen, leiden tot een toename van de totale hoeveelheid broeikasgassen. Deze broeikasgassen absorberen warmtestraling en geven die geleidelijk weer af in de atmosfeer. Hierdoor neemt de temperatuur op aarde toe, en verandert ons klimaat. Dit uit zich niet enkel in temperatuursveranderingen, maar bijvoorbeeld ook in veranderende neerslag- en verdampingspatronen.

Klimaatverandering is vandaag in Vlaanderen al duidelijk zichtbaar. Onderstaande figuur toont de historische trend in de jaargemiddelde temperatuur te Ukkel, waar het KMI de temperatuur dagelijks meet sinds 1830. Sinds het begin van de vorige eeuw blijkt de **temperatuur er reeds met meer dan 2,2°C gestegen te zijn.** Deze stijging is overigens groter dan de wereldwijd gemiddelde stijging in temperatuur.



Figuur 1. Stijging van de gemiddelde jaartemperatuur t.o.v. de gemiddelde jaartemperatuur in de referentieperiode 1850-1899. (bron: MIRA Klimaatrapport 2015).

Het MIRA Klimaatrapport 2015 (MIRA, 2015) beschrijft de waargenomen veranderingen in het klimaat in meer detail. Figuur 2 vat de **belangrijkste waargenomen klimaattrends** tot 2014 samen (MIRA, 2015).



Figuur 2. Klimaatrends gedetecteerd in België tot in 2014 (bron: MIRA Klimaatrapport 2015).

1.2 Omgaan met klimaatverandering: mitigatie en adaptatie

Klimaatverandering heeft een grote impact op onze maatschappij en de ecosystemen. Het is bijgevolg van groot belang dat het beleid bij het nemen van beslissingen rekening houdt met de huidige en toekomstige klimaatverandering. Maatregelen in verband met klimaatverandering kunnen daarbij in twee categorieën opgedeeld worden: mitigatie en adaptatie.

Mitigatie staat voor het proberen stabiliseren van klimaatverandering zelf. Het *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), een internationaal erkende organisatie voor het verzamelen en

beoordelen van wetenschappelijk onderzoek naar klimaatverandering, omschrijft mitigatie als “menselijke activiteiten om de bronnen van broeikasgassen te reduceren, of middelen om de opname van broeikasgassen te stimuleren”. Voorbeelden van mitigatieacties zijn het promoten van vervoer dat geen of minder gebruik maakt van fossiele brandstoffen, het gebruik van groene energie, het beter isoleren van gebouwen, het minder eten van vlees, etc. **Adaptatie** omvat de aanpassing van natuurlijke en menselijke systemen aan klimaatverandering, om de impact en gevaren ervan op te vangen, maar ook om eventuele opportuniteiten te onderschrijven. Voorbeelden van adaptatiemaatregelen zijn het voorzien van meer groene zones en groendaken in een stedelijke omgeving (om onder andere hittestress en overstromingen te vermijden), het aanleggen van bufferbekkens langs rivieren en rioleringen, etc.

Vlaanderen zet sterk in op een **duale strategie die zowel op mitigatie als adaptatie focust**. Hoe sterk we nu reeds inzetten op mitigatie, een adaptatiebeleid is vandaag reeds nodig. De effecten van het veranderende klimaat zijn immers nu al voelbaar. Bovendien zet klimaatverandering zich aan een hoog tempo voort en is het niet iets dat zomaar gestopt kan worden. Aanpassingen aan onze maatschappij zijn dus nodig om hiermee om te kunnen gaan. Daarnaast geldt natuurlijk dat hoe meer we inzetten op mitigatie, hoe kleiner de effecten en gevolgen van klimaatverandering in de toekomst zullen zijn, en dus hoe makkelijker of hoe minder ingrijpend we ons hieraan kunnen aanpassen. In het ideale geval wordt gestreefd naar win-win situaties bij de mitigatie- en adaptatiestrategieën, zodat het een het andere versterkt. Een goed geïsoleerd huis zal bv. een lagere energievraag hebben voor verwarming (mitigatie), en zal er tegelijk voor zorgen dat bewoners minder last ondervinden van de stijgende zomertemperaturen (adaptatie).

Mitigatie en adaptatie spelen echter op **verschillende tijdshorizonten**. Mitigatiestrategieën worden best op korte termijn uitgerold, aangezien de uitstoot van broeikasgassen zo snel mogelijk beperkt moet worden om de toekomstige klimaatverandering in te perken. Adaptatiemaatregelen worden daarentegen best stapsgewijs geïmplementeerd, afhankelijk van de mate waarin de toekomstige klimaatverandering zich voort zet. Nu reeds acties ondernemen om bestand te zijn tegen de klimaatverandering die tegen 2100 voorspeld wordt, is niet opportuun. Daarvoor zijn de onzekerheden te groot, en de investeringen te hoog. Het is echter wel verstandig om duurzame en efficiënte maatregelen te ontwerpen die rekening houden met de toekomstige klimaatverandering en de onzekerheid hieromtrent. De maatregelen dienen dus best effectief en efficiënt te zijn bij alle mogelijke scenario's, rekening houdende met het tijdspad van klimaatevolutie en de afschrijfperiodes van infrastructuur. 'No regret' maatregelen waarvan men later geen spijt kan krijgen, dragen hierbij de voorkeur weg. Ook dient er gewerkt te worden met flexibele en adaptieve oplossingen die verder aangepast kunnen worden in functie van de werkelijke toekomstige klimaatevoluties. Hoe dat concreet kan gebeuren vormt het onderwerp van het klimaatadaptatieplan.

De stad Brugge nam deel aan het Europese '**Water Resilient Cities**' project (WRC). Het doel van dit project is om historische steden weerbaar te maken tegen het veranderende klimaat en de hevige regenval. Zulke steden zijn meestal dichtbebouwd, sterk verhard en hebben slechts een beperkte ruimte voor ondergrondse buffering van water, wat hen kwetsbaar maakt voor wateroverlast. Bovendien worden historische steden dikwijls gebonden door reglementering met betrekking tot bescherming van de historische omgeving, waardoor traditionele strategieën om om te gaan met hevige regenval niet altijd toepasbaar zijn. Het WRC-project ging daarom op zoek naar nieuwe en doeltreffende oplossingen van het SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems) type. Oplossingen die inpasbaar zijn in de beschikbare ruimte, een grote impact hebben op de buffercapaciteit, maar tegelijk ook een ruimer positief effect hebben op steden. Dit rapport is een eerste stap bij het selecteren en ontwerpen van dergelijke oplossingen. Het omvat een risico- en kwetsbaarheidsanalyse voor het ganse grondgebied van Brugge, met een focus op water, in functie van de toekomstige klimaatverandering. Deze analyse zal toelaten om de kwetsbare punten aan te duiden en zal later ook dienen als basis voor het opstellen van een klimaatadaptatieplan.

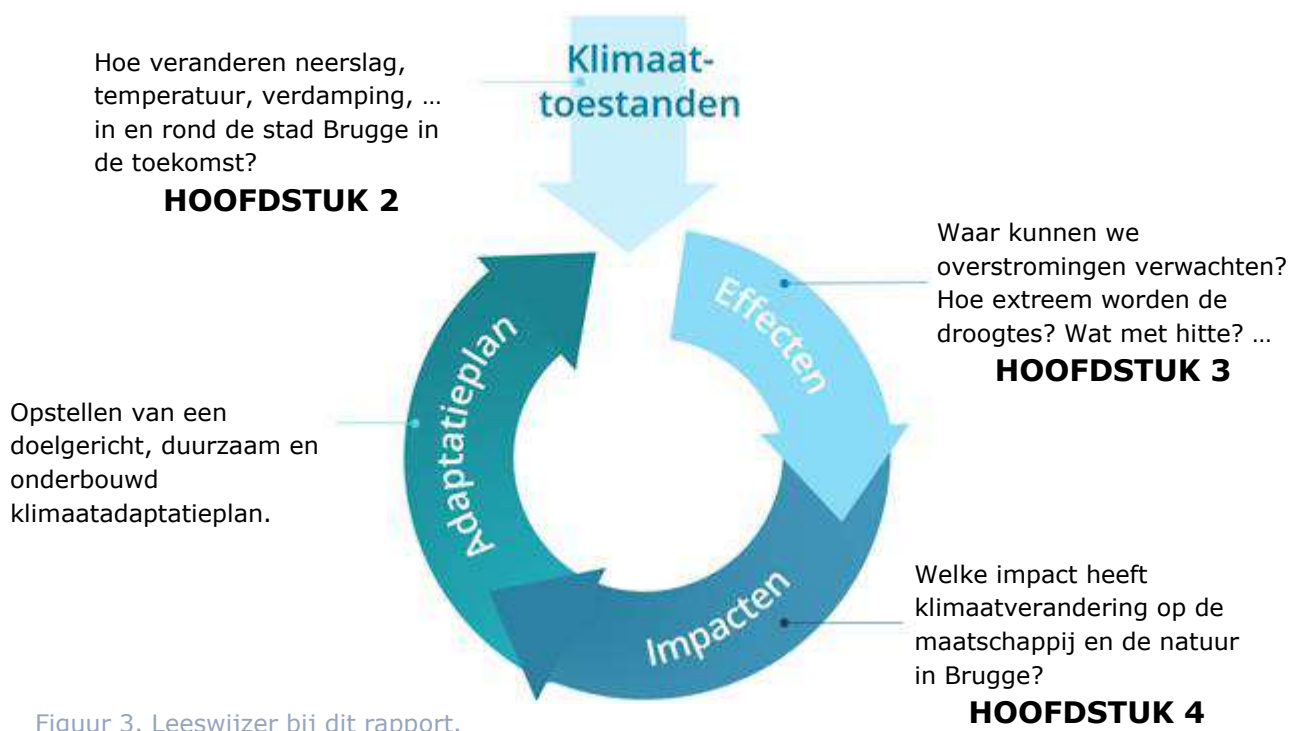
1.3 Aanpak van de studie & leeswijzer

Deze studie omvat een risico- en kwetsbaarheidsanalyse voor het ganse grondgebied van Brugge en de directe omgeving. Op basis van deze risicoanalyse wordt in een volgende stap een doelgericht adaptatieplan ontwikkeld. De risicoanalyse helpt hierbij om de belangrijkste actiepunten te identificeren. Zo kunnen de adaptatiemaatregelen zich specifiek toespitsen op het reduceren van de grootste kwetsbaarheden en risico's.

Om het opzet van de studie te verduidelijken, worden de belangrijkste begrippen verduidelijkt:

- **Klimaattoestanden** (ook wel de "primaire klimaateffecten" genoemd): dit zijn de atmosferische-meteorologische variabelen zoals temperatuur, neerslag, verdamping, relatieve vochtigheid, windsnelheid, zeeniveau, CO₂ concentratie, etc., en de invloed van de klimaatverandering op deze variabelen. De klimaattoestanden worden uitgebreid toegelicht in **Hoofdstuk 2**.
- **Klimaateffecten**: dit zijn de effecten van de veranderende klimaattoestanden op het land, zoals de veranderende waterhuishouding (overstromingen, stedelijke wateroverlast, droogte of waterbeschikbaarheid, etc.), het hitte-eilandeffect en dergelijke. De klimaateffecten en hoe ze berekend zijn, worden toegelicht in **Hoofdstuk 3**.
- **Klimaatimpacts**: dit zijn de socio-economische gevolgen van de veranderende klimaattoestanden en -effecten. Het zijn dus de gevolgen op de maatschappij en het ecosysteem. De belangrijkste klimaatimpacts zijn beschreven in **Hoofdstuk 4** van dit rapport.

Figuur 3 toont de opbouw van de studie. Op basis van de beschikbare klimaatmodellen en -simulaties worden de relevante klimaattoestanden berekend. Voorbeelden van klimaattoestanden zijn de veranderingen in temperatuur, neerslag, zonnestraling, windsnelheid, etc. De resultaten worden samengevat in Hoofdstuk 2. Op basis van deze klimaattoestanden worden vervolgens de klimaateffecten berekend, zoals hoeveel vaker overstromingen optreden en het optreden van hittestress. Hoofdstuk 3 beschrijft de belangrijkste klimaateffecten. Hierna worden de impacts begroot van klimaatverandering. Hiervoor worden klimaattoestanden en -effecten gecombineerd met lokale socio-economische gegevens (hoofdstuk 4). Deze resultaten vormen vervolgens de input voor het opstellen van adaptatieplannen. Dit is een iteratief proces: adaptatieplannen hebben immers ook een invloed op klimaateffecten. Het uitbouwen van groenblauwe infrastructuur in een stedelijke omgeving leidt immers tot verminderde overstromingen, en dus andere klimaateffecten. Deze iteratieve cyclus wordt uitgewerkt in een apart rapport.



Figuur 3. Leeswijzer bij dit rapport.

1.4 Overzicht deelrapporten

Stad Brugge gaat voor een doeltreffend, gedragen en haalbaar klimaatadaptatiebeleid. Hiertoe heeft Stad Brugge via **twee trajecten** een klimaatadaptatieplan opgemaakt, telkens met bijhorende risico- en kwetsbaarheidsanalyses.

In het kader van het Europese Interreg-project **Water Resilient Cities** werd een risico- en kwetsbaarheidsstudie uitgevoerd voor de **historische binnenstad**, gevolgd door de opmaak van een klimaatadaptatieplan voor de binnenstad. De binnenstad vraagt door zijn unieke opbouw en erfgoed een andere aanpak en focus dan de overige sectoren van Brugge. De resultaten van de risico- en kwetsbaarheidsstudie en het klimaatadaptatieplan van de historische binnenstad werden in twee afzonderlijke rapporten beschreven:

- Risico- en kwetsbaarheidsanalyse voor de historische binnenstad van Brugge onder klimaatverandering.
- Klimaatadaptatieplan historische binnenstad Brugge

Daarnaast heeft stad Brugge een risico- en kwetsbaarheidsanalyse uitgevoerd voor het **ganse grondgebied** (uitgezonderd de historische binnenstad). De resultaten van de risico- en kwetsbaarheidsanalyse van de binnenstad en de rest van het grondgebied werden gecombineerd in 1 allesomvattend rapport. Voorliggend rapport beschrijft deze resultaten.

Tot slot werd een klimaatadaptatieplan opgemaakt voor het ganse grondgebied (uitgezonderd de historische binnenstad, aangezien die in een apart klimaatadaptatieplan behandeld wordt). Dat plan staat beschreven in volgend rapport:

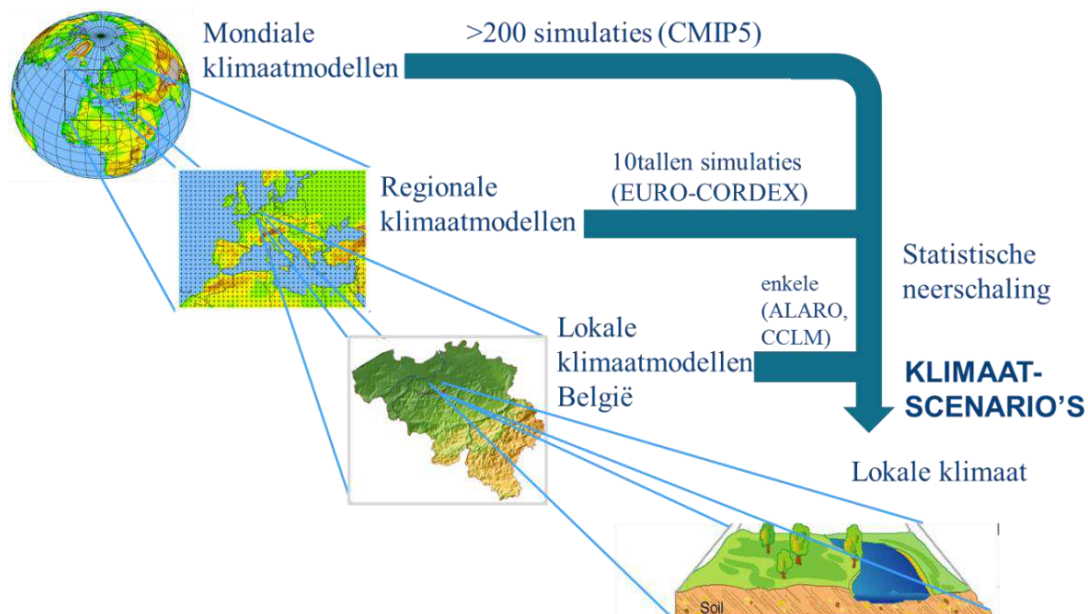
- Brugge, (2021). Klimaatadaptatieplan Brugge. Studie uitgevoerd door Sumaqua in opdracht van Stad Brugge.



2 Te verwachten klimaatverandering

2.1 De toekomst voorspellen: klimaatmodellen en bijhorende scenario's

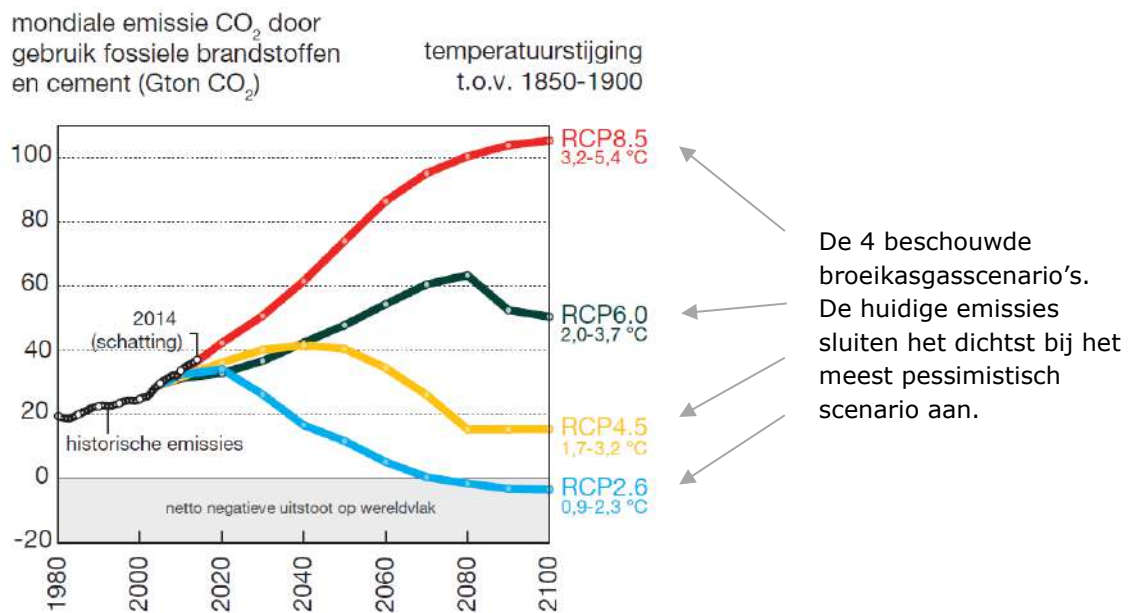
Om de toekomstige klimaatverandering in te schatten, wordt gebruik gemaakt van de resultaten van klimaatmodellen. In deze opdracht werden de meest recente simulatieresultaten met globale, regionale en lokale klimaatmodellen voor België gebruikt. Deze zijn gebaseerd op de nieuwste generatie klimaatmodellen, op basis van het World Climate Research Programme – Phase 5 (CMIP5). De resultaten van deze klimaatmodellen worden ook gebruikt in het 5^{de} klimaatrapport van het IPCC. De resolutie van deze mondiale klimaatmodellen is echter onvoldoende voor een nauwkeurige analyse van klimaatverandering op regionale en lokale schaal, zoals benodigd voor deze studie. Daarom zijn de resultaten verder aangevuld met de resultaten van meer lokale klimaatmodellen, na zogenaamde dynamische neerschaling. Enerzijds zijn dit de resultaten voor het Europese grondgebied via het EURO-CORDEX project en anderzijds de resultaten voor het Belgische grondgebied via het CORDEX.be project. Tot slot werden statistische technieken gebruikt voor een verdere neerschaling van de resultaten tot het grondgebied van de stad Brugge. De details van deze methode zijn niet opgenomen in dit rapport, maar kunnen teruggevonden worden in publicaties van het KU Leuven & Sumaqua team (bijvoorbeeld Willems & Vrac, 2011; Ntegeka et al., 2014; Van Uytven en Willems, 2018). De neerschaling is nodig om de resultaten van de klimaatmodellen, die gemiddeld zijn over gridcellen met grootte van 150 tot 300 km voor de mondiale klimaatmodellen, 25 tot 50 km voor de Europese klimaatmodellen en 3 tot 10 km voor de Belgische klimaatmodellen, te vertalen naar lokale klimaatinformatie. Dit principe is geschetst in Figuur 1. **De resultaten van een groot aantal simulaties met mondiale klimaatmodellen, meerdere simulaties met regionale Europese klimaatmodellen en een paar simulaties met hoge-resolutie Belgische klimaatmodellen werden gecombineerd en verwerkt tot een beperkt aantal klimaatscenario's die geldig zijn voor de stad Brugge.**



Figuur 4. De resultaten van mondiale, regionale Europese en lokale Belgische klimaatmodellen werden gebruikt om lokale klimaatscenario's af te leiden.

Een belangrijke randvoorwaarde voor deze klimaatmodellen zijn de hypothesen over de toekomstige uitstoot van broeikasgassen. Deze broeikasscenario's zijn dezelfde als deze die het IPCC momenteel gebruikt, de zogenaamde "Representative Concentration Pathways" (RCPs). Ze zijn gebaseerd op vier mogelijke scenario's voor de netto inkomende zonnestraling (stralingsforcering) in het jaar 2100: 2.6 W/m² (RCP2.6), 4.5 W/m² (RCP4.5), 6.0 W/m² (RCP6.0) en 8.5 W/m² (RCP8.5). Op basis van deze vier scenario's heeft men verhaallijnen ontwikkeld voor de verschillende factoren die de uitstoot van broeikasgassen beïnvloeden, zoals demografische, socio-economische, technische en sociale ontwikkelingen. De stralingsforcering is de hoeveelheid extra energie beschikbaar gemaakt aan de top van de atmosfeer door verschillende factoren die het klimaat beïnvloeden. Wanneer bijvoorbeeld de concentratie van broeikasgassen stijgt, zal een groter deel van de warmtestraling die door het aardoppervlak wordt uitgezonden in de atmosfeer worden geabsorbeerd. Dit deel van de warmtestraling bereikt dus niet meer de top van de atmosfeer waardoor de totale uitgezonden warmtestraling gereduceerd wordt. Dit resulteert in een positieve stralingsforcering, waardoor de aarde opwarmt.

De CO₂-uitstoot gelinkt aan bovenstaande scenario's wordt grafisch voorgesteld in Figuur 5. Uit de beschrijving in bovenstaande paragraaf kan men stellen dat RCP8.5 een extreem scenario is. Echter, wanneer men de historische waarden van CO₂ uitstoot naast de toekomstscenario's legt (Figuur 2), lijkt dit extreem scenario helemaal niet onrealistisch. In tegendeel, het is nu wel al duidelijk dat **de recente mondiale emissies van broeikasgassen bijna naadloos aansluiten op het meest extreme scenario (RCP8.5)**.



Figuur 5. Wereldwijde CO₂ uitstoot per RCP-scenario, samen met de historische waarden tot 2014 (bron: MIRA, 2015 o.b.v. Peters et al., 2013).

Meer specifiek worden de vier RCP-scenario's als volgt omschreven:

- **RCP8.5:** Dit is het meest extreme scenario en wordt gekenmerkt door groeiende broeikasgasemissies over de tijd, wat leidt tot een stralingsforcering van 8.5 W/m² in 2100. In de wetenschappelijke literatuur stemt dit overeen met scenario's met hoge broeikasgasconcentraties. RCP8.5 is een hoog energie-intensief scenario met een hoge groei van de wereldbevolking tot ongeveer 12 miljard in 2100 en lage technologische ontwikkeling. Huidige emissies van broeikasgassen sluiten aan op dit scenario.
- **RCP6.0:** Dit is een scenario waarin de stralingsforcering vlak na 2100 stabiliseert tot 6.0 W/m². Hierbij horen een reeks aan technologieën en strategieën om energieverbruik en broeikasgasemissies te beperken. Er is echter nauwelijks een vermindering van de

broeikasgasemissie per eenheid energie. In het scenario wordt een midden-projectie voor groei in de wereldbevolking tot ongeveer 9 miljard in 2100 verondersteld.

- **RCP4.5:** Dit is een scenario waar de stralingsforcering vlak na 2100 stabiliseert. Dit scenario wordt gekenmerkt door een grotere range aan technologieën en strategieën om broeikasgasemissies te beperken dan in RCP6.0. In het scenario wordt een midden-projectie voor populatie tot ongeveer 9 miljard in 2100 aangenomen. Het voornaamste verschil met het RCP 6.0 scenario is de veronderstelde sterke vermindering van de broeikasgasemissie per eenheid energie. Kenmerkend voor RCP4.5 is het verondersteld gebruik van bio-energie en koolstofopvang en -opslag.
- **RCP2.6:** Dit scenario is een zogenaamd 'piek-en-afname' scenario, waar de stralingsforcering eerst piekt tot waarden van 3.1 W/m² en daarna afneemt tot 2.6 W/m² in 2100. Om deze niveaus te bereiken zijn substantiële reducties in de emissies van broeikasgassen noodzakelijk. In het scenario wordt een midden-projectie voor bevolkingsgroei tot ongeveer 9 miljard in 2100 aangenomen. Kenmerkend voor RCP2.6 is dat emissies laag zijn door het gebruik van bio-energie en dat koolstofopvang en -opslag zullen leiden tot negatieve emissies.

Voor elk van deze RCP-scenario's zijn de resultaten van de verschillende klimaatmodellen verwerkt en statistisch geanalyseerd. Vervolgens werd voor een aantal meteorologische variabelen, de zogenaamde klimaattoestanden, de verandering berekend voor het klimaat in 2030, 2050 en 2100 t.o.v. het huidige klimaat. Deze relatieve of absolute veranderingen voor het klimaat in 2100 zijn in §2.3 weergegeven via box-plots voor elk van de 4 RCP-scenario's afzonderlijk.

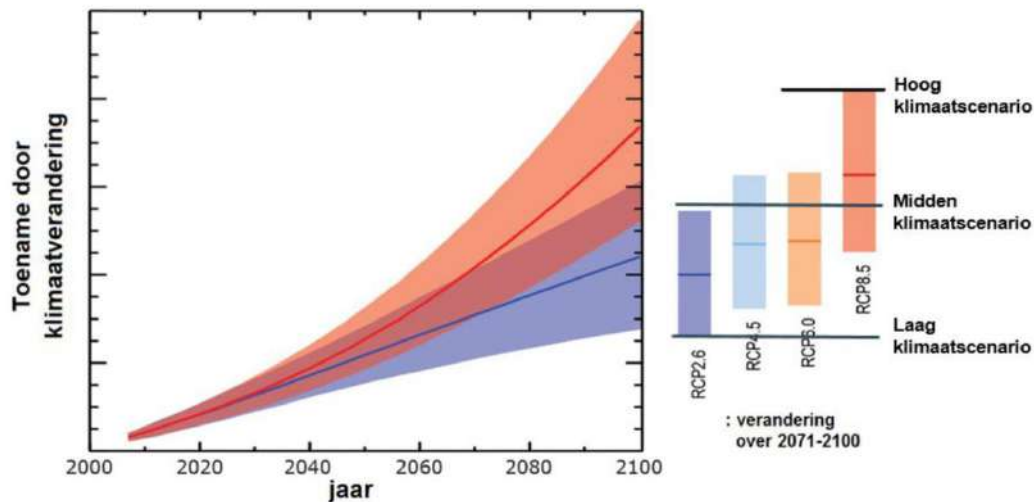
Voor bepaalde effectberekeningen van de klimaatscenario's, namelijk deze die gebaseerd zijn op hydrologische en hydraulische modellen, zijn de klimaatscenario's vertaald naar overeenkomstige veranderingen in tijdreeksen. Hiervoor werden de historische tijdreeksen van neerslag, temperatuur en potentiële evapotranspiratie, zoals lokaal waargenomen in en rond Brugge, aangepast aan de klimaatscenario's.

2.2 Interpretatie: onzekerheid omtrent modelresultaten

De voorspelde toekomstige klimaatverandering is onderhevig aan **twee soorten onzekerheden**. Enerzijds is er de **onzekerheid in de toekomstige broeikasgasemissies**. Deze wordt weergegeven door de **vier RCP-scenario's** (zie eerder). Het is belangrijk op te merken dat wij geen waarschijnlijkheid of kans kunnen toekennen aan de verschillende broeikasgasscenario's. De vier scenario's dienen dus met een gelijke kans behandeld worden. De scenario's worden daarom alle vier doorgerekend, waarbij de realiteit, met hoge waarschijnlijkheid, ergens binnen het bereik van deze gesimuleerde scenario's zal liggen.

Anderzijds is er de **onzekerheid op de klimaatmodellen**. De klimaatmodelresultaten zijn immers niet perfect nauwkeurig en kunnen verschillen van klimaatmodel tot klimaatmodel of van simulatie tot simulatie. Dit tweede type onzekerheid wordt hieronder in §2.3 gevisualiseerd via **box-plots**. Deze plots geven de grenzen weer waarbinnen alle klimaatmodelresultaten vallen (met en zonder statistische uitbijters), alsook de grenzen waaronder 25%, 50% en 75% van de klimaatmodelresultaten zich bevinden.

Figuur 6 illustreert deze twee typen onzekerheden. De figuur illustreert ook dat de veranderingen groter zijn voor perioden die verder in de toekomst liggen, maar gepaard gaan met een grotere onzekerheid. Het hoog klimaatscenario, zoals dat in het MIRA2015 Klimaatrapport werd gedefinieerd en eveneens in het VMM Klimaatportaal wordt gebruikt, is de bovengrens van de 95%-betrouwbaarheidsband indien alle vier de RCP-scenario's worden gecombineerd. Het midden klimaatscenario is het scenario dat overeenkomt met de 50-percentielwaarde wanneer alle RCP-scenario's gecombineerd worden. Let wel: het midden scenario is niet noodzakelijk het meest waarschijnlijke scenario! Alle RCP-scenario's kunnen zich – volgens de huidige kennis van de klimaatverandering – met eenzelfde kans voordoen.



Figuur 6. Schematische weergave van de twee typen onzekerheden bij de toekomstprognoses: de onzekerheid in de toekomstige uitstoot aan broeikasgassen (vier RCP-scenario's weergegeven in andere kleuren) en de onzekerheid in de klimaatmodelresultaten per RCP-scenario (weergegeven via de onzekerheidsbanden).

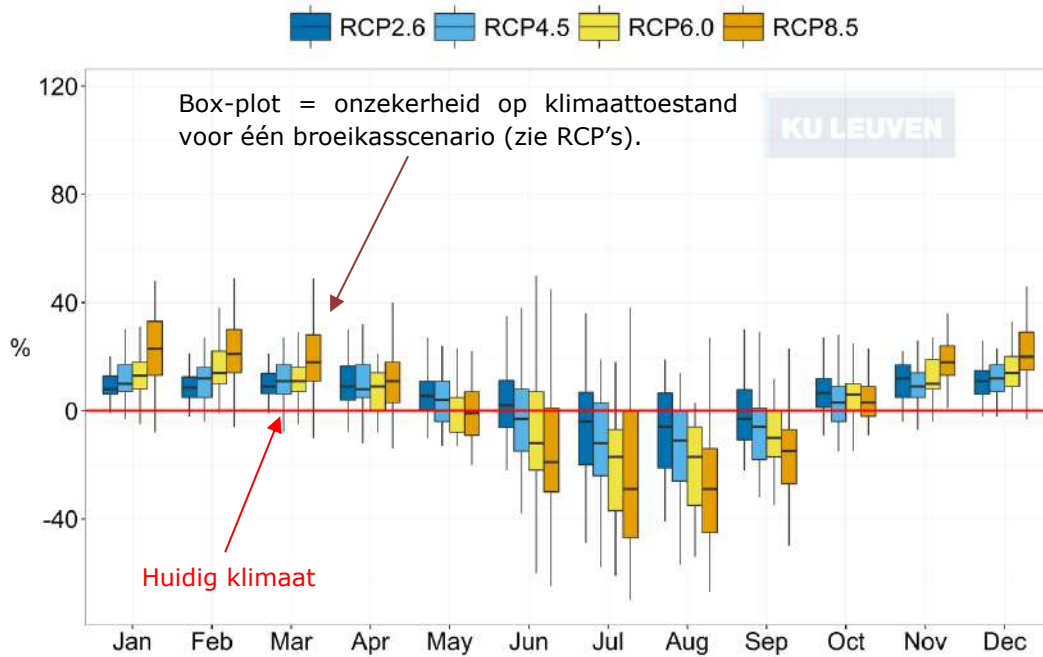
De veranderende klimaattoestanden, weergegeven als veranderingen van het huidig klimaat tot 2050 of 2100, kunnen ook geïnterpreteerd worden als de klimaatverandering over een periode van 50 of 100 jaar in de toekomst. Als referentieperiode werd de laatste 30 jaar beschouwd. Klimaat wordt immers gedefinieerd als de statistiek van het weer over een periode van (minstens) 30 jaar. Vermits er geen metingen zijn in de toekomst, wordt klassiek **de laatste 30 jaar beschouwd als beste benadering van het huidig klimaat**. Enkel de metingen van 2015 nemen zou geen goed idee zijn, omwille van de beperkte hoeveelheid informatie in één jaar. Vermits het jaar 2000 middenin die periode van de laatste 30 jaar ligt, komt "30, 50 en 100 jaar in de toekomst" (t.o.v. de referentie van de laatste 30 jaar) op hetzelfde neer als 2030, 2050 en 2100 (als de "middenjaren" van de beschouwde 30-jarige perioden).

2.3 Klimaattoestanden

Onderstaande paragrafen bespreken de "klimaattoestanden", oftewel de verandering van een toestand onder klimaatverandering. Deze paragrafen tonen dus de resultaten van de klimaatmodellen. Op het eind van dit hoofdstuk worden de belangrijkste cijfers voor neerslag, temperatuur en verdamping voor de stad Brugge samengevat in afzonderlijke tabellen (zie §2.4).

2.3.1 Maandgemiddelde neerslag

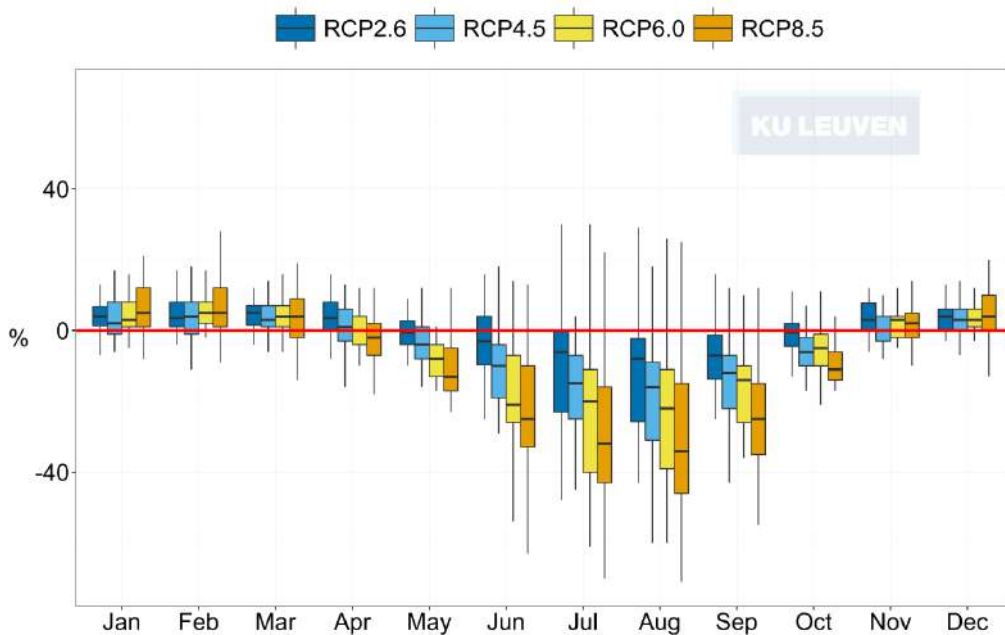
Het neerslagpatroon doorheen het jaar zal veranderen. **De algehele trend is dat zomers droger worden en dat in de winter meer neerslag zal gaan vallen**. Voor de meer extreme RCP-scenario's zijn de stijging in de winter en de daling in de zomer meer uitgesproken. Tijdens de wintermaanden ligt de toename in neerslag over 100 jaar tussen 0% en grootteorde 30% (afhankelijk van het RCP-scenario en het klimaatmodel). Voor de zomermaanden gaat het om een afname met grootteorde 40% of minder. Ook werd de RCP-afhankelijkheid van de klimaatscenario's bestudeerd. Hierbij werd de methode gevolgd, zoals beschreven in Van Uytven & Willems (2018).



Figuur 7. Procentuele verandering in maandgemiddelde neerslag over een toekomstperiode van 100 jaar.

2.3.2 Aantal natte dagen

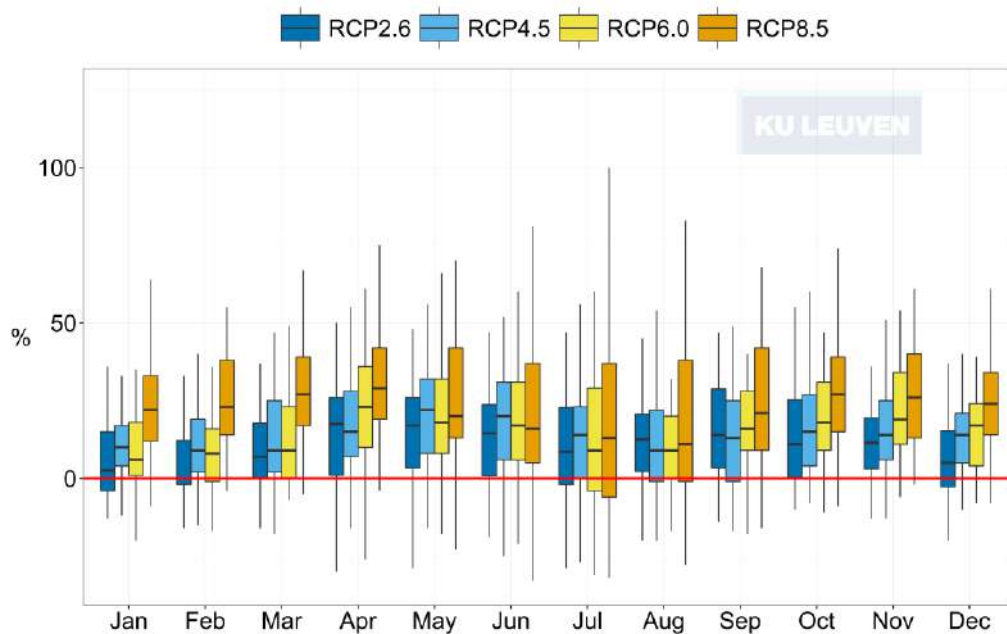
De daling van de zomerneerslagvolumes is het gevolg van een **daling in het aantal natte dagen**. Wanneer een natte dag wordt gedefinieerd als een dag met meer dan 0.1 mm neerslag, dan daalt het aantal natte dagen in de zomermaanden tussen 0% en grootteorde 45% afhankelijk van het beschouwde RCP scenario. In de wintermaanden kan een lichte stijging van het aantal natte dagen verwacht worden.



Figuur 8. Procentuele verandering in het gemiddelde aantal natte dagen per maand over een toekomstperiode van 100 jaar.

2.3.3 Extreme neerslagintensiteiten

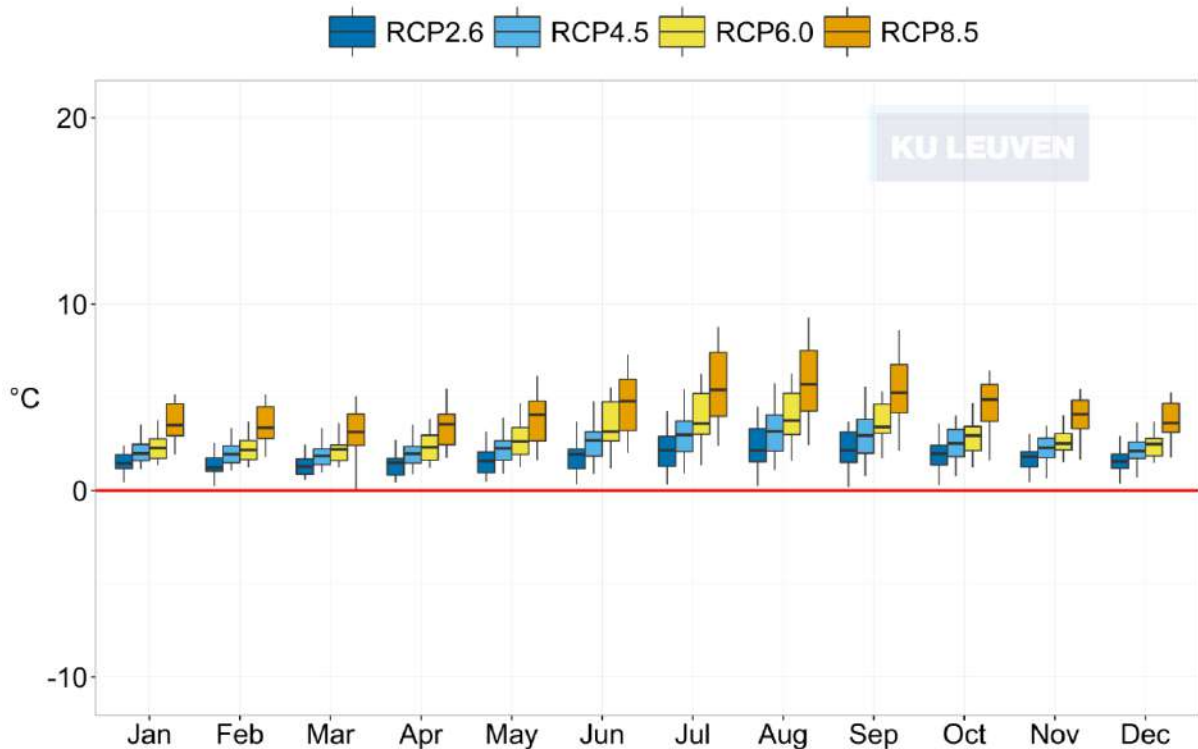
Extreme regenbuien zullen heviger worden dan in het huidig klimaat, zowel in de zomer- als in de wintermaanden. Extreme dagneerslag met een terugkeerperiode van 20 jaar kan toenemen tussen 0 en grootteorde 50% in de zomermaanden en tussen 0 en grootteorde 30% in de wintermaanden.



Figuur 9: Procentuele verandering in dagneerslagintensiteit voor een terugkeerperiode van 20 jaar over een toekomstperiode van 100 jaar.

2.3.4 Daggemiddelde temperatuur

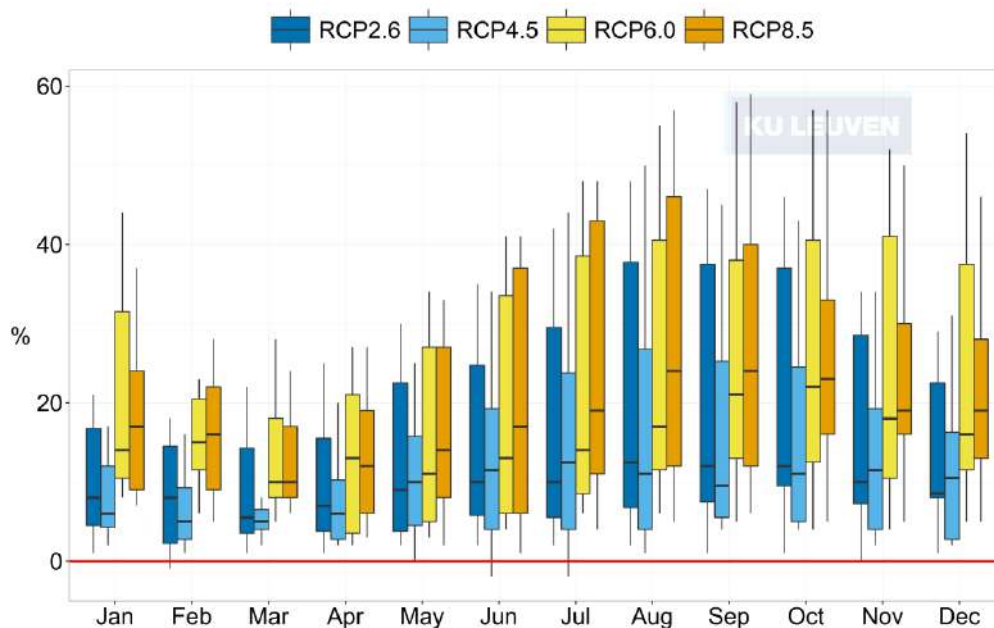
De maandgemiddelde dagtemperatuur stijgt voor alle maanden van het jaar. In de wintermaanden is deze toename in grootteorde tussen 1 °C en 4,5 °C. In de zomermaanden is deze toename groter: in grootteorde tussen 1,5 °C en 6,5 °C. Hoe hoger het broeikasscenario (tot RCP 8.5), hoe hoger de stijging in verwachte daggemiddelde temperatuur.



Figuur 10. Toename in maandgemiddelde maximumtemperatuur over een toekomstperiode van 100 jaar.

2.3.5 Verdamping

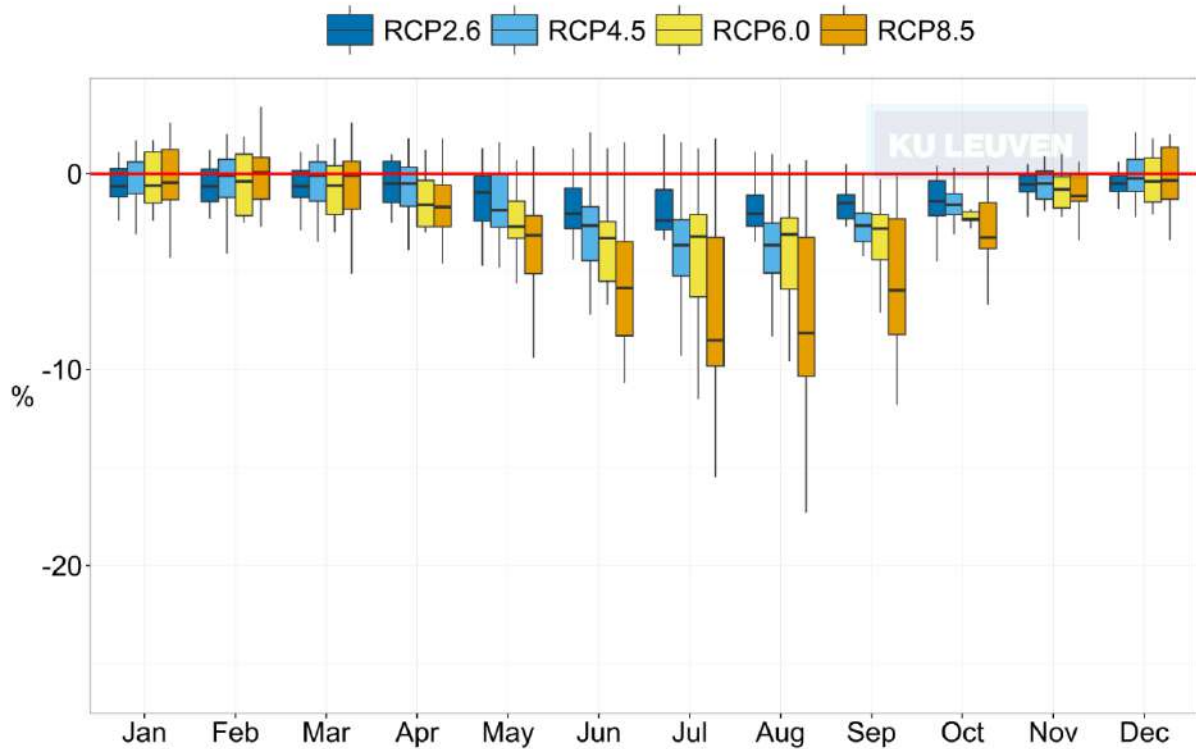
Door de temperatuurstijging zal de verdamping toenemen. Voor de zomermaanden juni t.e.m. september betekent dit een toename tussen grootteorde 5% en 50%, terwijl deze voor de lentemaanden wat lager is tussen grootteorde 0 en 20%.



Figuur 11. Procentuele toename in maandgemiddelde potentiële evapotranspiratie over een toekomstperiode van 100 jaar.

2.3.6 Relatieve vochtigheid

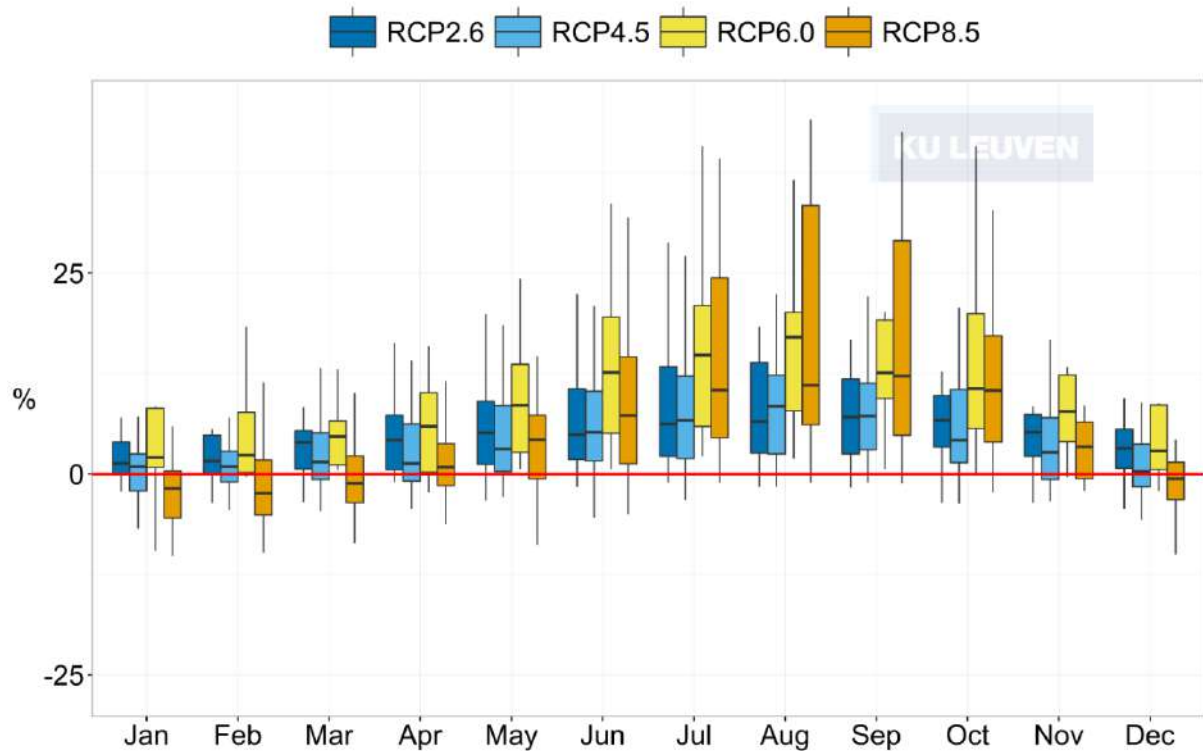
Door de temperatuurstijging in de zomer zal de relatieve vochtigheid afnemen, vooral in de zomer. Voor de zomermaanden juni t.e.m. september zorgt dit voor een afname van grootteorde -5% tot -10%. In de andere maanden is deze afname minder uitgesproken.



Figuur 12: Procentuele afname in maandgemiddelde relatieve vochtigheid over een toekomstperiode van 100 jaar.

2.3.7 Zonnestraling

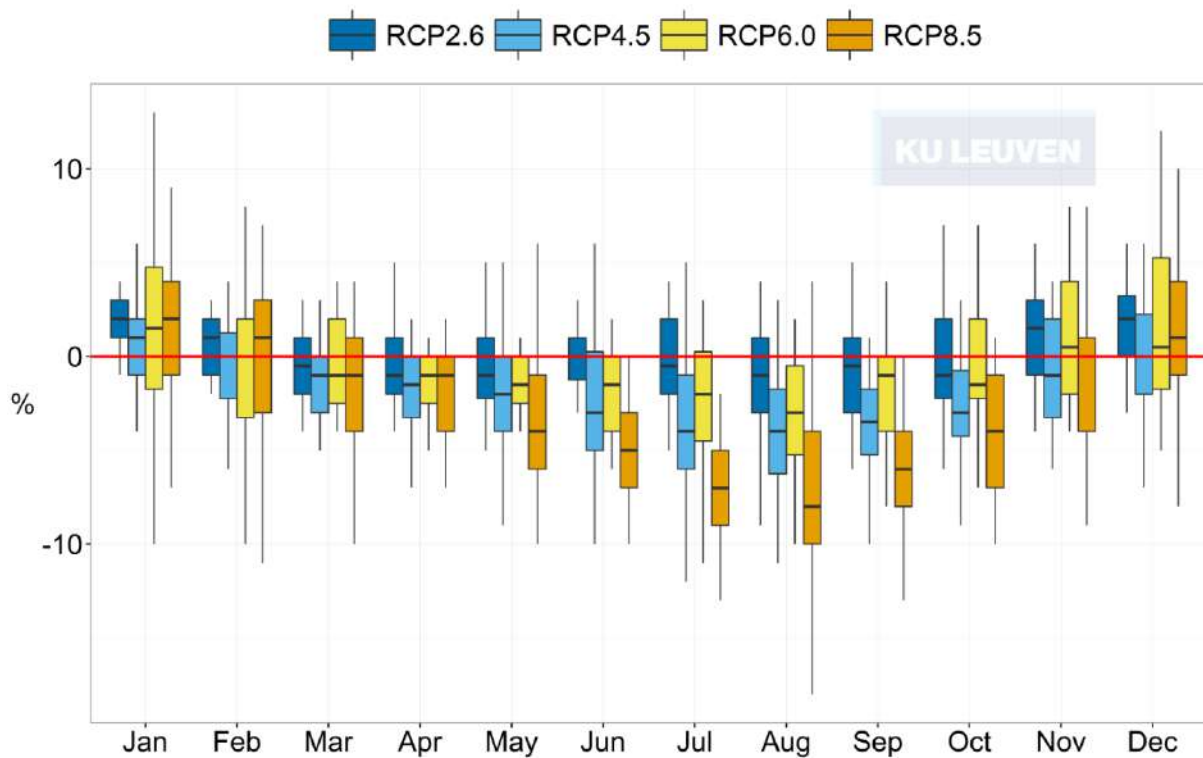
De broeikasgassen (en dus klimaatverandering) hebben ook een impact op de intensiteit van zonnestraling. Vooral in de zomer is een sterke toename mogelijk van de zonnestraling: grootteorde 5% tot 25%. In de overige maanden is de verwachte toename beperkt.



Figuur 13: Procentuele toename van de zonnestraling over een toekomstperiode van 100 jaar.

2.3.8 Windsnelheid

Verwacht wordt dat klimaatverandering een beperkte impact heeft op de gemiddelde windsnelheid (gemeten over een dag). De resultaten wijzen in een maximale verandering van +5% tot -10%.



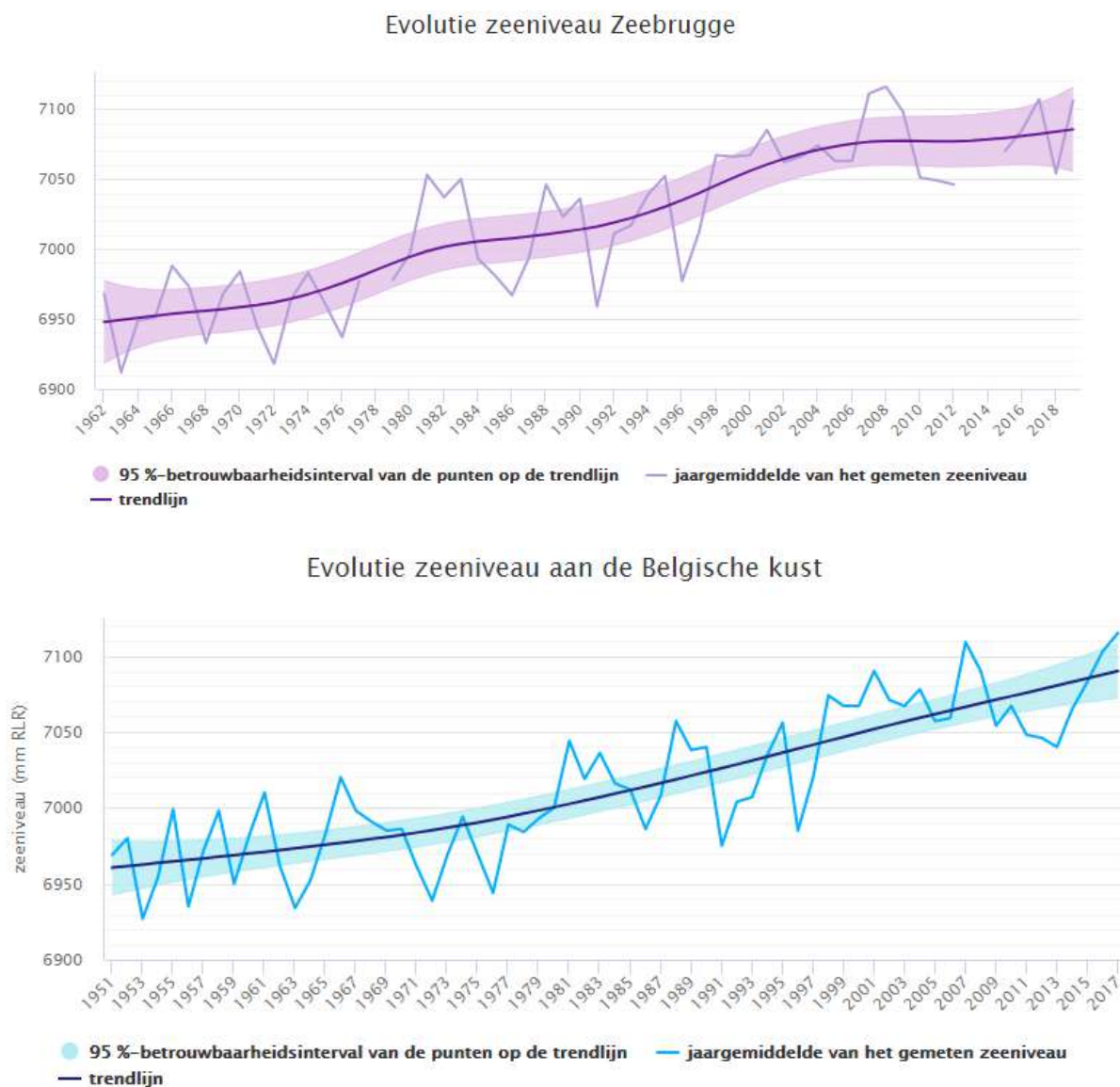
Figuur 14: Procentuele verandering van de gemiddelde dag-windsnelheid over een toekomstperiode van 100 jaar.

2.3.9 Zeespiegelstijging

De historische waterstanden en zeespiegelstijging, ook astronomisch tij en stormopzet afzonderlijk, langs de kust werden door Willems (2014) bestudeerd voor Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge.

In Zeebrugge steeg de trendlijn van het zeeniveau met 119 mm tussen 1967 en 2019, oftewel zo'n 2,29 mm/jaar. In Oostende steeg de trendlijn met 134 mm tussen 1951 en 2019. Oostende is het meetpunt aan de Vlaamse kust met de langste ononderbroken meetreeks, en wordt daarom typisch gebruikt in Vlaanderen voor het detecteren van langetermijntrends. Uit die analyses blijkt dat het zeeniveau aanvankelijk relatief traag steeg (met 1 mm/jaar), maar sinds het midden van de jaren 60 nam de stijging gestaag toe tot ruim 2,5 mm/jaar eind jaren 90. Ook de laatste jaren blijft de stijging aanhouden, maar het stijgtempo is licht teruggevallen tot 2,4 mm/jaar. De stijging in Zeebrugge is gelijkwaardig.

Het is een vaststaand feit dat de zeespiegel stijgt. Naast de invloed van de klimaatverandering is het zeeniveau echter ook onderhevig aan een natuurlijke schommeling met een interval van 18,61 jaar, het zogenaamde "nodale getij". Dit wordt veroorzaakt door een variatie van de hoek tussen de aarde, de zon en de maan. Dit nodaal getij beïnvloedt bijgevolg ook de waargenomen trends.



Figuur 15. Historische toename in gemiddelde zeespiegel te Zeebrugge en Oostende.

De toekomstige zeespiegelstijging situeert zich tussen +20 cm (afgerond tegen 2100) en +80 cm voor het hoge impactscenario (Weisse et al., 2014). Een "worst case" scenario (een soort "extreem" hoge impactscenario; dus met extreem lage kans op voorkomen) is +2 m. Naast de zeespiegelstijging neemt de watertemperatuur toe. Afgelopen eeuw is het water aan de Belgische kust gemiddeld met 3.4°C gestegen.

2.4 Samenvattende tabellen

Deze paragraaf vat de belangrijkste te verwachten veranderingen samen voor neerslag, verdamping en temperatuur. Zoals eerder al aangegeven zijn de resultaten van klimaatmodellen onzeker. Daarom combineren we in deze studie verschillende modellen en scenario's, conform internationaal onderzoek naar klimaatverandering. De resultaten in onderstaande tabellen geven steeds de meest extreme evolutie weer. Verwacht wordt dat de realiteit zich tussen het huidig klimaat en de hieronder genoemde cijfers zal bevinden. Om zich voldoende voor te bereiden op klimaatverandering is het echter nodig dat het beleid rekening houdt met deze extreme cijfers. Indien de wereld blijft voortdoen zoals vandaag, en er dus geen significante reductie van broeikasgassen optreedt, is de kans groot dat dit extreme scenario zich zal voltrekken.

Tabel 1. Te verwachten verandering van neerslag.

	Huidig klimaat	Toekomstig klimaat		
		2030	2050	2100
Extreme dagneerslag terugkeerperiode 5 jaar [mm/dag]	57	72.4	81.5	90.6
Extreme dagneerslag terugkeerperiode 1 jaar [mm/dag]	33.5	39.2	42.5	45.9
Jaargemiddelde neerslag [mm]	874	1032	1128	1224
Gemiddelde winterneerslag [mm]	224	268	295	322
Gemiddelde zomerneerslag [mm]	236	173	135	97

Tabel 2. Te verwachten verandering van verdamping.

	Huidig klimaat	Toekomstig klimaat		
		2030	2050	2100
Jaargemiddelde Evapotranspiratie [mm]	565	667	729	791
Wintergemiddelde Evapotranspiratie [mm]	39	48	53	59
Lentegemiddelde Evapotranspiratie [mm]	171	212	227	193
Zomergemiddelde Evapotranspiratie [mm]	258	299	325	348

Herfstgemiddelde Evapotranspiratie [mm]	97	118	131	143
---	----	-----	-----	-----

Tabel 3. Te verwachten verandering in temperatuur.

	Huidig klimaat	Toekomstig klimaat		
		2030	2050	2100
Jaargemiddelde gemiddelde dagtemperatuur [°C]	10.4	13.7	15.4	17.0
Jaargemiddelde maximale dagtemperatuur [°C]	14.0	17.1	18.7	20.3
Jaargemiddelde minimale dagtemperatuur [°C]	6.9	10.1	11.6	13.2
Wintergemiddelde gemiddelde dagtemperatuur [°C]	3.6	6.8	8.3	9.8
Zomergemiddelde gemiddelde dagtemperatuur [°C]	18.7	20.3	21.7	24.9
Aantal hittegolven gemiddeld per jaar	0.8	2.2	3.9	9.8
Aantal extreem warme dagen (≥ 25 °C) gemiddeld per jaar	31	68.6	91.6	114.6
Aantal tropische dagen (≥ 30 °C) gemiddeld per jaar	4.5	23.5	35.5	47.5
Aantal vorstdagen (<0 °C) gemiddeld per jaar	14	1	0	0



3 Effecten van klimaatverandering

3.1 Inleiding

De gevolgen van de veranderende klimaattoestanden of meteorologische karakteristieken noemen we klimaateffecten. Deze effecten zullen op uiteenlopende manieren en in verschillende mate merkbaar en voelbaar worden. Sommigen van hen kunnen momenteel zelfs al geobserveerd worden. De meeste opvallende effecten zijn de veranderingen in de waterhuishouding en de toename van het aantal warme en tropische dagen.

De risicoanalyse in dit rapport zal zich focussen op de volgende klimaateffecten, specifiek toegepast op het grondgebied van stad Brugge. Tussen haakjes zijn ook telkens de meest relevante klimaattoestanden meegegeven:

- Wateroverlast door intense neerslag (stijging zeer intense neerslag in zomermaanden)
- Overstromingen vanuit waterlopen (toename neerslagvolume in wintermaanden)
- Droogte (afname neerslaghoeveelheden in zomer en toename verdamping)
- Hitte (temperatuurstijging)
- Zeespiegelstijging (temperatuurstijging)
- Verzilting (droogte en zeespiegelstijging)

Het inschatten van de veranderende klimaateffecten gebeurt doorgaans aan de hand van computermodellen en statistische technieken. De hierboven besproken klimaattoestanden, zoals de veranderende neerslagpatronen en stijgende temperaturen, worden daarbij telkens als randvoorwaarde voor de modellen gebruikt. Via berekeningen en simulaties worden deze vervolgens omgezet naar natuurlijke processen en effecten, zoals wij die ondervinden en kunnen observeren.

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten, en de onderliggende modellen en methodes die gebruikt zijn om de beschouwde klimaateffecten te begroten, vertrekkende van de veranderende klimaattoestanden. Om de technisch-wetenschappelijke details van deze beschrijvingen zoveel mogelijk te beperken, zullen enkel de belangrijkste elementen, principes en redeneringen toegelicht worden. Op die manier kan de lezer toch voldoende inzicht verwerven in de fysische mechanismes die instaan voor de vertaling van klimaattoestanden naar klimaateffecten. Waar mogelijk is gebruik gemaakt van de resultaten van eerder (gedetailleerd) onderzoek. Indien deze resultaten (nog) niet beschikbaar zijn, is gebruik gemaakt van vereenvoudigde en/of benaderende analyses, aangezien gedetailleerde modelstudies niet mogelijk waren in het tijdsbestek van dit onderzoek. Belangrijk om op te merken hierbij is dat dit hoofdstuk enkel de effecten van klimaatverandering kwantificeert. Andere ontwikkelingen, zoals bijvoorbeeld veranderingen in landgebruik, bijkomende verharding of adaptieve maatregelen, worden niet in beschouwing genomen. **De resultaten dienen dus geïnterpreteerd te worden als een soort 'stress test' voor klimaatverandering, d.i. indien men geen adaptatiemaatregelen zou nemen.**

Eveneens van belang bij het interpreteren van de resultaten in dit hoofdstuk is dat de analyses en berekeningen telkens uitgevoerd zijn voor het klimaatscenario met de hoogste impact. Afhankelijk van het beschouwde klimaateffect zal dit een ander scenario zijn. Voor elk klimaateffect wordt dus eerst nagegaan welk scenario de grootste impact heeft. Hierbij kan verondersteld worden dat het doorgerekende scenario de meest extreme impact geeft en het huidige klimaat de laagste impact. De uiteindelijke impact zal bijgevolg ergens tussen beide scenario's liggen. Op dit moment bestaat

er nog te veel onzekerheid op zowel de klimaatmodellen als de uitstootscenario's van broeikasgassen om meer exacte voorspellingen te maken. Het laat ons wel toe om een beeld te krijgen van de spreiding op de resultaten.

De tekst geeft per klimaateffect eerst een beschrijving van de berekeningswijze, gevolgd door een synthese van de belangrijkste resultaten.

3.2 Wateroverlast als gevolg van intense neerslag

Door klimaatverandering kunnen extreme buien vaker voorkomen. Bovendien zullen dergelijke buien ook intenser worden. Die intense buien kunnen leiden tot wateroverlast doordat de rioleringen het water niet meer kunnen slikken, of door rechtstreekse afwatering van (verharde) oppervlakken. Deze buien komen voornamelijk voor in de zomer. Een typisch voorbeeld zijn de zomeronweders, waarbij in een korte tijd zeer veel neerslag kan vallen. Deze sectie bespreekt de wateroverlast ten gevolge van intense neerslag, en is dus verschillend van rivieroverstromingen. Rivieroverstromingen worden beschreven in §3.3 en komen voornamelijk voor na langere periodes met veel neerslag (bijna uitsluitend in het hydrologisch winterseizoen).

3.2.1 Berekeningswijze

Voor de historische binnenstad zijn er meer gegevens beschikbaar om de impact van klimaatverandering op pluviale overstromingen te karteren dan voor de rest van het grondgebied. Zo beschikt de rioleringsbeheerder bijvoorbeeld over een gedetailleerd hydrodynamisch rioleringsmodel voor de historische binnenstad, dat recentelijk werd opgemaakt. Voor verschillende randgemeenten loopt momenteel een gelijkaardig traject om ook zo'n gedetailleerde modellen op te maken. Die modellen waren echter nog niet beschikbaar in het kader van deze studie. Voorliggende klimaatimpactstudie heeft alle beschikbare data en modellen maximaal proberen te gebruiken. Daarom worden de historische binnenstad en de rest van het grondgebied apart besproken in de paragrafen hiertonder.

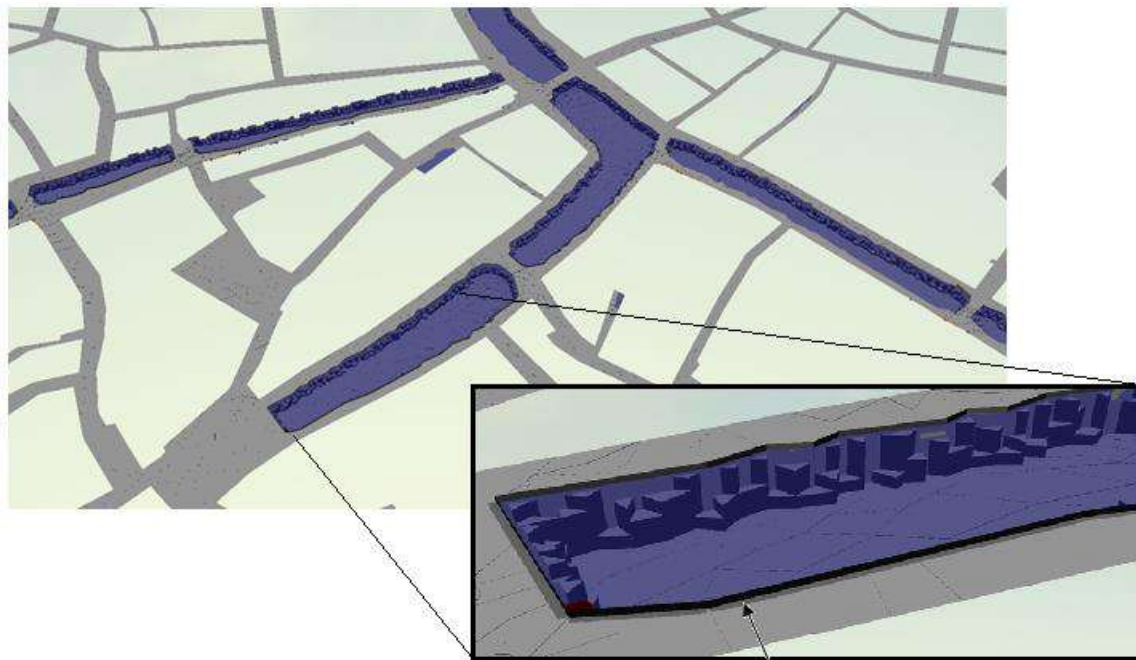
3.2.1.1 Historische binnenstad: gedetailleerde simulaties

Om wateroverlast ten gevolge van intense neerslag te berekenen zijn simulatiemodellen nodig. In het kader van het Interreg 2Seas project "Water Resilient Cities" werd door het studie bureau Hydroscan in opdracht van rioleringsbeheerder Farys een gedetailleerd rioleringsmodel van de historische binnenstad van Brugge opgemaakt (in de InfoWorks ICM software). Dit model werd voor deze studie ter beschikking gesteld door Farys. Het model bevat (nagenoeg) elke rioleringsleiding in de historische binnenstad (3175 leidingen met een totale lengte van 110.2 km), elk mangat (3009) en alle overstorten (75 berekeningsknopen, waarbij soms meerdere knopen 1 overstortconstructie voorstellen). De totale gedekte oppervlakte in het model is 527 hectare, waarvan 444 hectare als effectief afwaterend naar de riolering beschouwd wordt, verdeeld over 2983 afstromingszones. Dit model is dus een zeer gedetailleerde voorstelling van het ondergrondse rioleringsstelsel van de historische Brugse binnenstad.

In deze studie werd dit model uitgebreid zodat ook overstromingen nauwkeuriger gesimuleerd kunnen worden in dit model. Het oorspronkelijke model zoals aangeleverd door Farys was immers opgemaakt in een 0D/1D-configuratie, waardoor overstromingen in de stedelijke omgeving slechts ruwweg gesimuleerd kunnen worden. Zo bevatte het model geen ruimtelijk gedetailleerde informatie over de topologie (de hoogteligging) van de straten en huizen. In het kader van deze studie werd daarom een rekenraster geconfigureerd om overstromingen op het land te simuleren. Hiertoe werd het model uitgebreid met volgende data (ter beschikking gesteld door AGIV):

- Landgebruikskaart met een resolutie van 1x1 meter
- Informatie van het kadaster (GRB)
- Digitaal hoogtemodel met een resolutie van 1x1 meter

Via gedetailleerde analyses werden deze data geïmplementeerd in het rioleringsmodel van de Brugse binnenstad. Hierbij werden de nodige correcties aangebracht om het model zo realistisch mogelijk te maken, zoals het implementeren van bruggen en onderdoorgangen (van de reien), en het definiëren van de muurtjes rond de reien (zie bv. Figuur 16)



Implementatie van muren rond de reien

Figuur 16. 3D beeld van de modelimplementatie, waarbij ook de gedefinieerde muren rond de reien zichtbaar zijn.

Ook werden verschillende modelimplementaties getest voor het afbakenen van gebouwen. Finaal werd een meer conservatieve implementatie van de gebouwen en perceelsgrenzen verkozen. Hierdoor zullen mogelijks (iets) hogere overstromingshoogtes gesimuleerd worden in de Brugse straten dan in werkelijkheid zullen optreden.

Figuur 17 toont het verkregen model met rekenraster voor de oppervlakte. Meer informatie over de modeluitbreidingen, uitgevoerde analyses en aannames is terug te vinden in de uitgebreide technische nota (referentie: BRU.T1.05092018).

In het opgebouwde model werden neerslagreeksen gesimuleerd van het huidig en het toekomstig klimaat. Uit deze simulaties werden vervolgens overstromingskaarten afgeleid voor de Brugse historische binnenstad. Concreet werden overstromingen gesimuleerd die zich gemiddeld eens in de 2, 5, 20, 50 en 100 jaar voordoen. De resultaten worden besproken in de volgende paragraaf. Een belangrijke opmerking is dat, ondanks de graad van detaillering, het model vanzelfsprekend nog onzekerheid bevat op de resultaten. De gesimuleerde overstromingen kunnen dus (over het algemeen beperkt) afwijken van de realiteit. Het model houdt bijvoorbeeld geen rekening met lokale verstoppingen van straatkolken, geblokkeerde leidingen, en dergelijke. De resultaten moeten dus ook met de nodige omzichtigheid geïnterpreteerd worden. Desondanks geeft het model de meest waarschijnlijke resultaten weer die verkregen kunnen worden met alle beschikbare data voor de gesimuleerde neerslag.



Figuur 17. Aangepast 1D-2D simulatiemodel waarbij een rekenraster voor de oppervlakte werd toegevoegd.

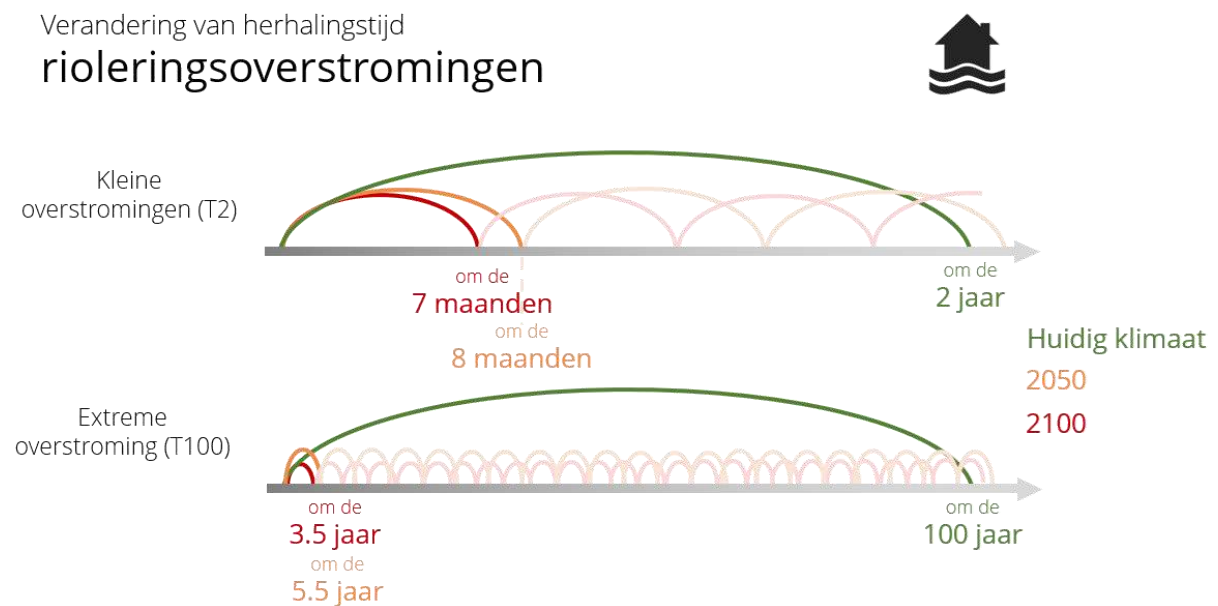
3.2.1.2 Gans grondgebied: pluviale overstromingskaarten

Voor de **rest van het grondgebied van Brugge** zijn dergelijke rioleringsmodellen nog in opmaak, en niet beschikbaar bij het uitvoeren van voorliggende risico- en kwetsbaarheidsanalyse. In plaats daarvan werden de **pluviale overstromingskaarten** gebruikt, zoals opgemaakt door de Vlaamse Milieumaatschappij in het VLAGG-project. Die kaart geeft de gebieden weer die een verhoogde kans op wateroverlast vertonen ten gevolge van directe afstroming van neerslag. De kaart toont dus niet de overstromingen door het buiten de oevers treden van waterlopen na periodes van langdurige neerslag. Die analyse is vervat in §3.3 "Overstromingen vanuit waterlopen".

Voor een uitgebreide beschrijving van de gevolgde methodologie bij de opmaak van de pluviale overstromingskaarten wordt verwezen naar VMM (2018b). In wat volgt wordt een korte samenvatting gegeven van de gevolgde aanpak. De kaarten zijn opgemaakt door het toepassen van verschillende neerslagbuien (hyetogrammen) op een fijnmazig tweedimensionaal raster voor gans Vlaanderen (het digitaal hoogtemodel Vlaanderen). Vervolgens wordt voor elke cel de neerslagafstroming gesimuleerd, waarbij het overtollig water van de ene naar de andere cel wordt doorgegeven. Buien met een terugkeerperiode van 10, 25, 100 en 1000 (aangeduid als T10, T25, T100 en T1000) worden gesimuleerd voor het huidig en het toekomstig klimaat (hoogzomer 2100). De gehanteerde klimaatveranderingsreeksen zijn conform de rest van deze risico- en kwetsbaarheidsanalyse. Infiltratie en afvoer via de riolering worden niet expliciet opgenomen, maar deze werden impliciet in rekening gebracht door een aanpassing van de neerslaghyetogrammen. Zo werd rekening gehouden met de (1) ruimtelijke variabiliteit van neerslag, (2) correctie in gebieden met riolering door het aftrekken van een bui met terugkeerperiode van 2 jaar van het hyetogram in de veronderstelling dat deze door de riolering opgevangen wordt, en (3) correctie voor landelijke gebieden om bij meer extreme terugkeerperioden een betere overeenkomst te verkrijgen met de gemeten afvoeren van rivieren. Daarnaast werd het digitaal hoogtemodel aangepast om ook hydraulische structuren te vervatten, zoals bijvoorbeeld duikers.

3.2.2 Resultaten

Ten gevolge van klimaatverandering zal wateroverlast langs rioleringen vaker optreden. Overstromingen die nu eens per 2 jaar voorkomen, kunnen tegen 2050 mogelijks eens om de 8 maanden voorkomen, en tegen 2100 eens om de 7 maanden. Dergelijke overstromingen zijn beperkt in omvang, en veroorzaken over het algemeen weinig schade. Extremere overstromingen die nu eens per 100 jaar voorkomen, kunnen tegen 2050 mogelijks elke 5.5 jaar gebeuren, en tegen 2100 elke 3.5 jaar. Dergelijke overstromingen veroorzaken significante schade en hinder. Deze zeer sterke toename in voorkomingsfrequentie van extremere wateroverlast wordt verklaard doordat voornamelijk de meest extreme regenintensiteiten het sterkst toenemen. De verandering in overstromingsfrequentie wordt ook getoond in Figuur 18.



Figuur 18: Verandering van voorkomingsfrequentie van rioleringsoverstromingen.

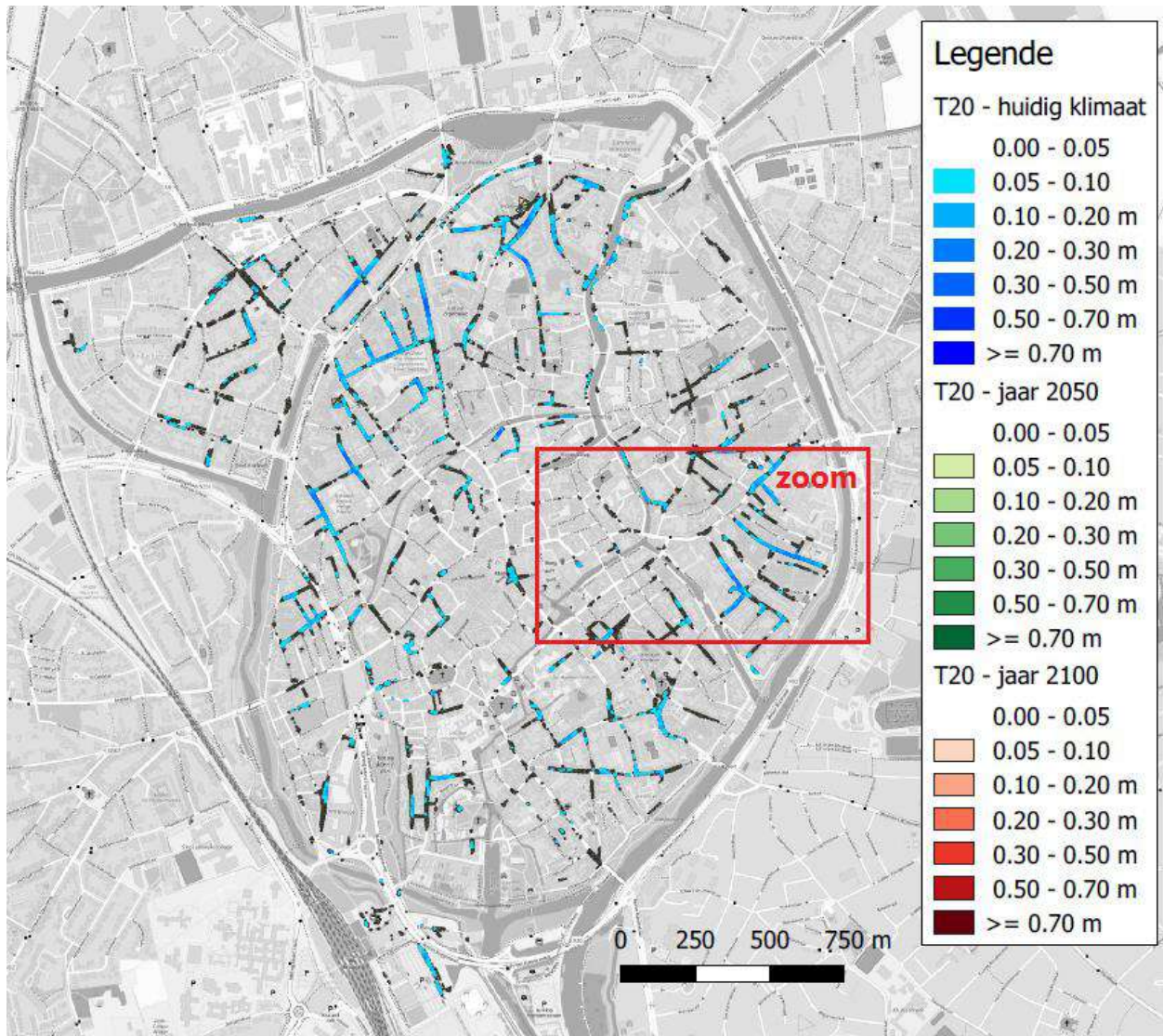
Naast de verandering van de frequentie van wateroverlast, worden de uitgestrektheid van overstromingen (bij eenzelfde terugkeerperiode) groter. Dit wordt in onderstaande paragrafen nader besproken.

3.2.2.1 Historische binnenstad

Met het uitgebreide en gedetailleerde rioleringsmodel (zie §3.2.1.1) werden overstromingen gesimuleerd die gemiddeld eens per 2, 5, 20, 50 en 100 jaar voorkomen in het huidige klimaat. Daarnaast werden ook neerslagbuien gesimuleerd onder het toekomstig klimaat. **Klimaatverandering zorgt voor toenemende neerslagextremen, waardoor verwacht wordt dat er in de toekomst vaker en meer uitgestrekte overstromingen zullen voorkomen.** Eventuele mitigerende maatregelen die in de toekomst genomen worden, zoals het voorzien van bijkomende buffering, infiltratievoorzieningen en afkoppelingen, zijn nog niet mee opgenomen in deze simulaties. Concreet werd de neerslag gesimuleerd bij het klimaat van het jaar 2050 en 2100. Zoals uitgelegd in §3.1 worden enkel de resultaten getoond van het hoge impactscenario. **De werkelijke overstromingen zullen dus vermoedelijk tussen deze van het huidige klimaat en de gesimuleerde overstromingen liggen.**

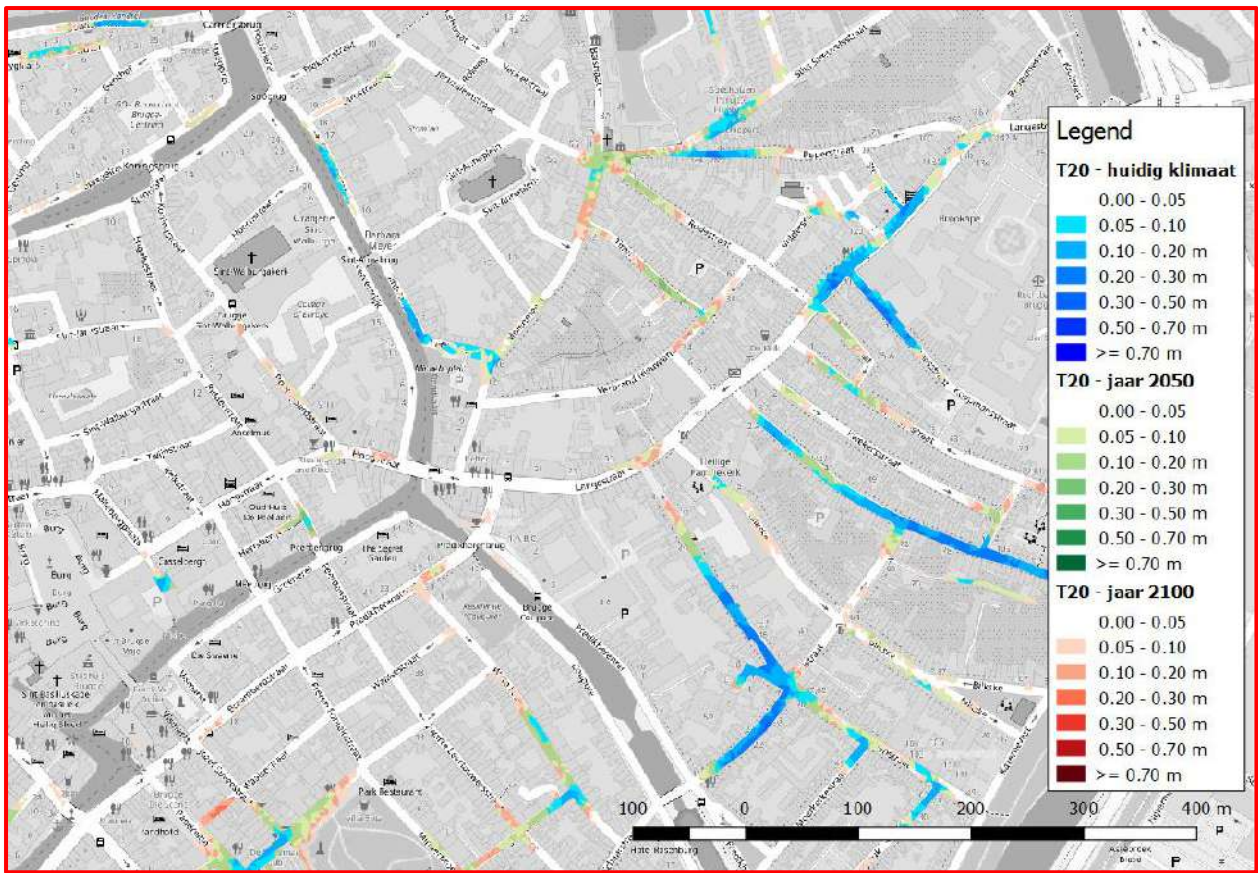
Figuur 19 toont de overstromingen die gemiddeld eens om de 20 jaar voorkomen onder het huidige klimaat, en het klimaat van het jaar 2050 en 2100. De kaart geeft de te verwachten overstromingsdieptes op straat weer. Overstromingsdieptes kleiner dan 5 cm worden niet getoond. Op deze kaart is te zien dat verschillende straten in de Brugse binnenstad reeds in het huidige

klimaat te kampen krijgen met wateroverlast. De overstromingsdieptes blijven over het algemeen relatief beperkt, hoewel er lokaal grotere waterdieptes mogelijk zijn (>50 cm). Door klimaatverandering zullen de overstromingen echter verder in omvang toenemen. Ook op plaatsen waar vandaag geen overstromingen zijn, kan wateroverlast optreden.



Figuur 19. Kaart met de overstromingen door intense neerslag die gemiddeld eens per 20 jaar voorkomen onder het huidige klimaat, en het beschouwde klimaat in 2050 en in 2100.

Figuur 20 zoomt in op het gebied tussen de Ringvaart en de Jeruzalemkerk. Hierbij is bijvoorbeeld te zien dat het plein voor de Jeruzalemkerk door klimaatverandering wel gemiddeld eens per 20 jaar kan overstromen, terwijl dit plein in het huidige klimaat nog gevrijwaard is van overstromingen. Dit fenomeen doet zich niet enkel aan de Jeruzalemkerk voor, maar op zeer veel locaties in de Brugse binnenstad. Via de online kaartenatlas kan de lezer zelf verkennen welke gebieden het meest kwetsbaar zijn voor wateroverlast door klimaatverandering.



Figuur 20. Zoom van de kaart uit Figuur 19. Kaart met overstromingen die gemiddeld eens per 20 jaar voorkomen onder het huidig klimaat, en het beschouwde klimaat in 2050 en 2100.

Als samenvatting geeft Tabel 4 de overstroomde oppervlakte weer in de Brugse binnenstad voor gebeurtenissen die gemiddeld eens om de 2 (T2), 20 (T20) en 100 (T100) jaar voorkomen. Hieruit is duidelijk te zien dat de overstroomde oppervlakte significant toeneemt door klimaatverandering: de oppervlakte die eens per 2 jaar overstroomt zal bijna verviervoudigen. De omvang van extreme overstromingen (T100) neemt eveneens sterk toe.

Tabel 4. Overstroomde oppervlakte voor verschillende terugkeerperioden (T2 = een overstroming gemiddeld om de 2 jaar; T20 = 20 jaar; T100 = 100 jaar) uitgedrukt in hectaren voor het huidig klimaat, en het klimaat in het jaar 2050 en 2100.

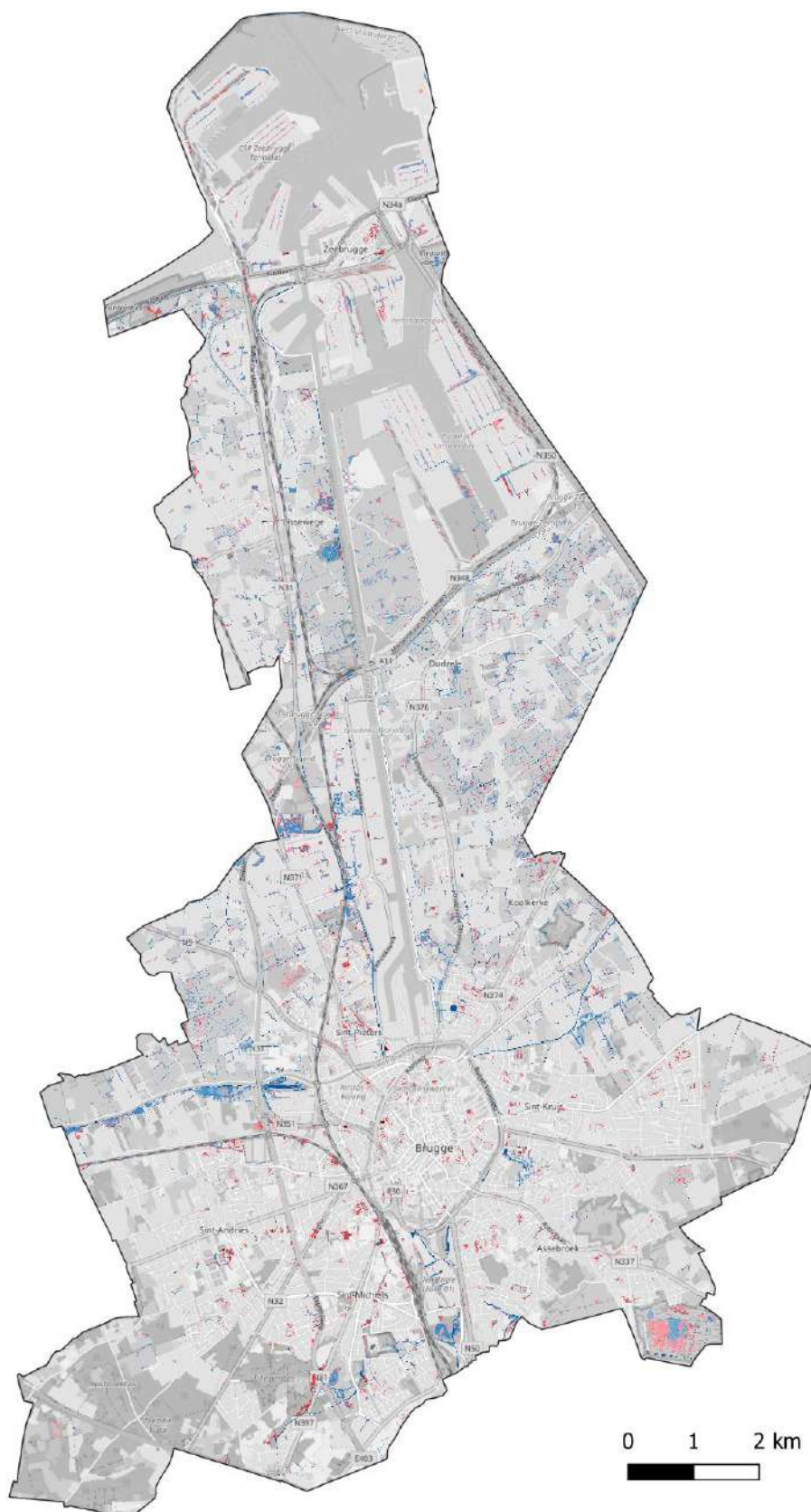
	Huidig klimaat	Jaar 2050	Jaar 2100
T2	2.20	4.97	8.43
T20	12.54	23.76	33.36
T100	22.14	37.22	48.49

Merk op dat naast de toename in overstroomde oppervlakte, overstromingen ook frequenter zullen voorkomen.

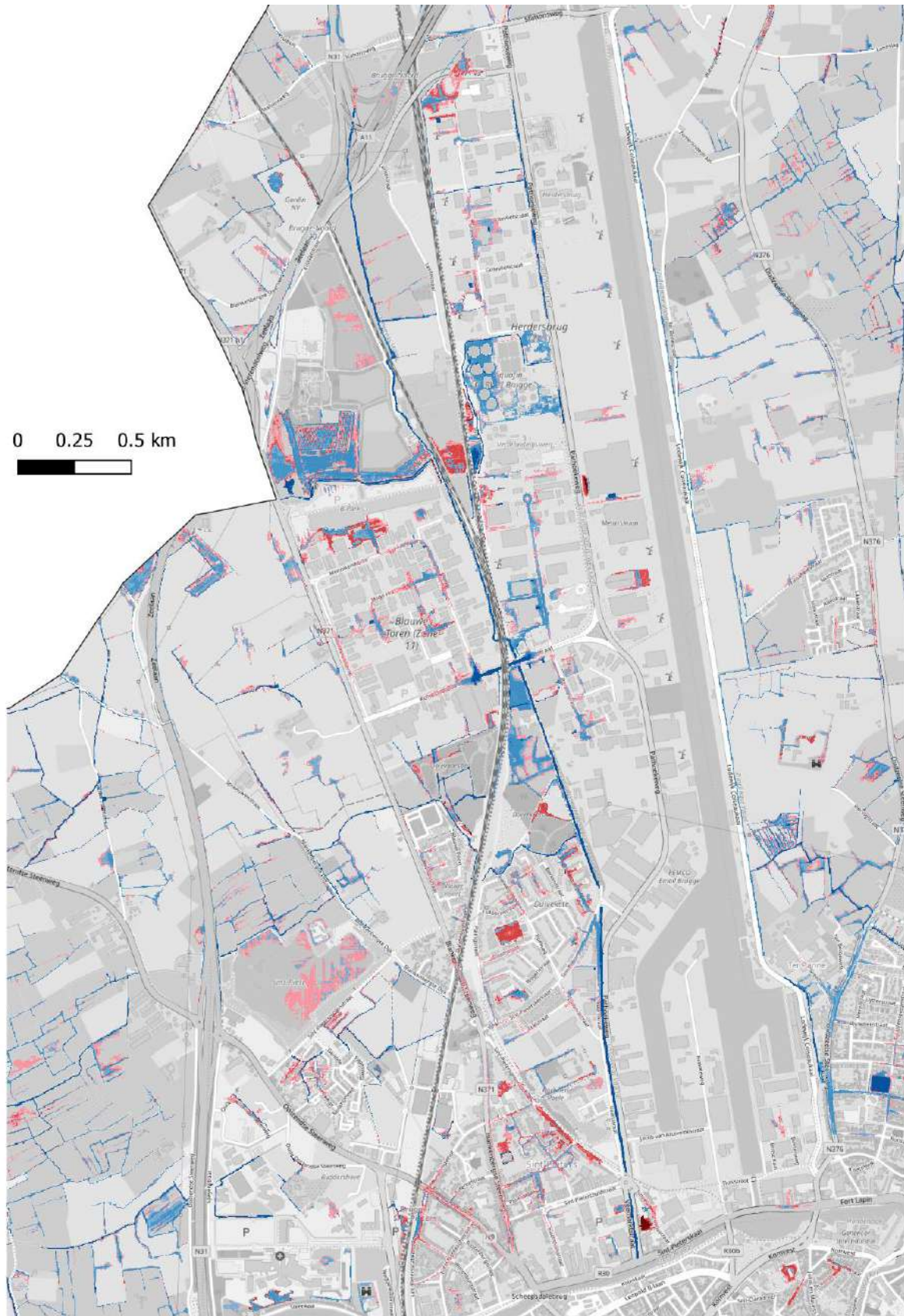
3.2.2.2 Gans grondgebied

Figuur 21 toont de pluviale overstromingskaart van gans het grondgebied Brugge die zich eens in de 100 jaar voordoet voor het huidig en het toekomstig klimaat (jaar 2100). Figuur 22 zoomt in op Sint-Pieters. Enkel overstromingsdieptes groter dan 5 cm worden getoond.

De overstromingsdieptes blijven over het algemeen relatief beperkt, hoewel er lokaal grotere waterdieptes mogelijk zijn (>50 cm). De gemiddelde waterdiepte (locaties met een waterdiepte kleiner dan 5 cm niet beschouwd) op overstroomde locaties bedraagt circa 26 cm. Door klimaatverandering zullen de overstromingen verder in omvang toenemen. Ook op plaatsen waar vandaag geen overstromingen zijn, kan wateroverlast optreden. **Klimaatverandering zorgt voor toenemende neerslagextremen, waardoor verwacht wordt dat er in de toekomst meer uitgestrekte overstromingen zullen voorkomen. De overstroomde oppervlakte bij een 100-jarige bui neemt toe van 469 hectare in het huidig klimaat tot 849 hectare in het jaar 2100 (+81%).** Dit laatste is ongeveer een 6% van het grondgebied van Brugge. Het grondgebied van de haven is niet mee opgenomen in deze analyse. Eventuele mitigerende maatregelen die in de toekomst genomen worden, zoals het voorzien van bijkomende buffering, infiltratievoorzieningen en afkoppelingen, zijn nog niet mee opgenomen in deze simulaties. De werkelijke overstromingen zullen dus vermoedelijk tussen deze van het huidig klimaat liggen en de gesimuleerde overstromingen.



Figuur 21: Overzichtskaart van de pluviale overstromingen (>5cm waterhoogte) met een herhalingsstijd van 100 jaar (T100) voor het **huidig (blauw)** en **toekomstig (2100, rood)** klimaat.



Figuur 22: Zoom op Sint-Pieters: kaart van de pluviale overstromingen (>5cm waterhoogte) met een herhalingstijd van 100 jaar (T100) voor het **huidig (blauw)** en **toekomstig (2100, rood)** klimaat.

Tijdens de opmaak van deze risico- en kwetsbaarheidsstudie werden pluviale overstromingen in Brugge opgevolgd om deze pluviale overstromingskaarten te valideren. Zo werd er grotere pluviale wateroverlast gerapporteerd ten gevolge van een bui op 30 augustus 2020. Onder andere van de Zandstraat (aan de kruising met de Pastoriestraat; Figuur 23) werden foto's gemaakt van wateroverlast, alsook aan de tunnel van de Kolvestraat (Figuur 24). Deze laatste locatie overstroomt overigens zeer vaak, en blijkt bijzonder kwetsbaar voor pluviale overstromingen. In totaliteit kreeg waren er ongeveer 200 meldinge voor wateroverlast in "Hulpverleningszone 1" ten gevolge van de bui van 30 augustus 2020. Enkel van bovenvermelde 2 locaties zijn er foto's beschikbaar.



Figuur 23: Pluviale wateroverlast Zandstraat (kruising met de Pastoriestraat) op 30 augustus 2020.

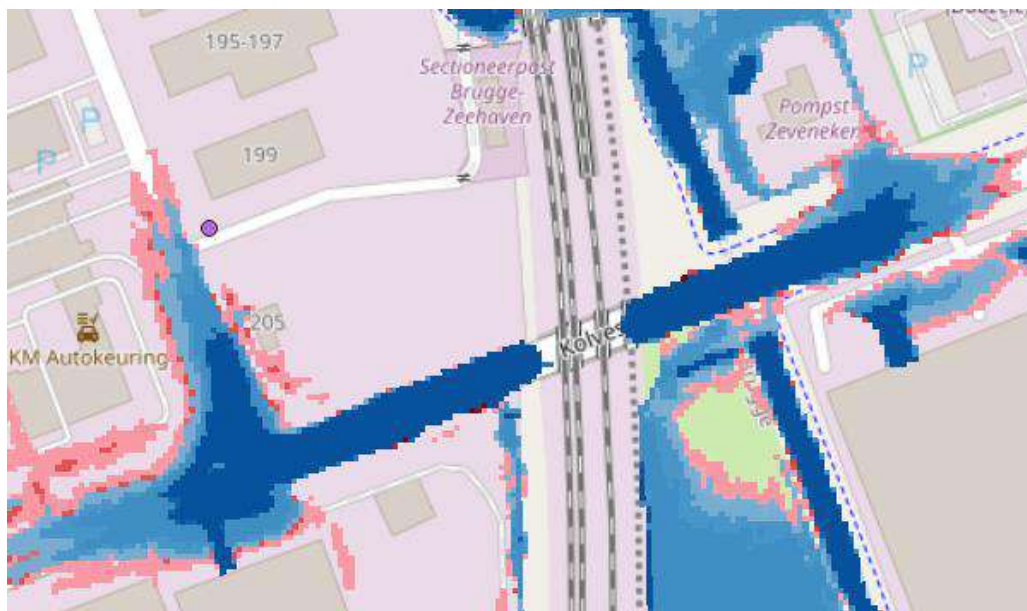


Figuur 24: Pluviale wateroverlast in de tunnel van de Kolvestraat op 30 augustus 2020.

Voor beide locaties tonen de pluviale overstromingskaarten concrete risico's op wateroverlast. Vooral voor de Zandstraat is de gelijkenis tussen realiteit en de overstromingskaarten treffend. Merk op dat de overstromingskaart overstromingen toont met een statistische herhalingsperiode van 100 jaar. De terugkeerperiode van de bui van 30 augustus 2020 werd niet bepaald, en kan bovendien zeer lokaal sterk verschillen. Een 1-op-1 vergelijking tussen realiteit en de overstromingskaart is dus niet mogelijk. Deze validatie a.d.h.v. de beschikbare foto's van 2 locaties geeft wel aan dat de overstromingskaart er in slaagt om de meer kwetsbare locaties aan te duiden.



Figuur 25: Pluviale overstromingskaart voor het huidige (blauw) en toekomstig (2100, rood) klimaat ter hoogte van de Zandstraat. Hier werd pluviale wateroverlast waargenomen op 30 augustus 2020.



Figuur 26: Pluviale overstromingskaart voor het huidige (blauw) en toekomstig (2100, rood) klimaat ter hoogte van de tunnel van de Kolvestraat. Hier werd pluviale wateroverlast waargenomen op 30 augustus 2020.

3.3 Overstromingen vanuit waterlopen

Overstromingen vanuit waterlopen doen zich voornamelijk voor in de wintermaanden (november t.e.m. maart), na periodes van langdurige neerslag. Deze grote hoeveelheden neerslag zullen namelijk leiden tot stijgende verzadigingsgraden van de bodem. Wanneer deze verzadigingsgraad te hoog wordt, zal de neerslag niet langer kunnen infiltreren en snel afstromen naar de rivieren, welke deze grote volumes niet langer aankunnen en buiten hun oevers zullen treden. Klimaatverandering kan leiden tot een stijging van de neerslaghoeveelheden tijdens de wintermaanden. Hierdoor **verwacht men een toename van het aantal en de omvang van overstromingen vanuit waterlopen.**

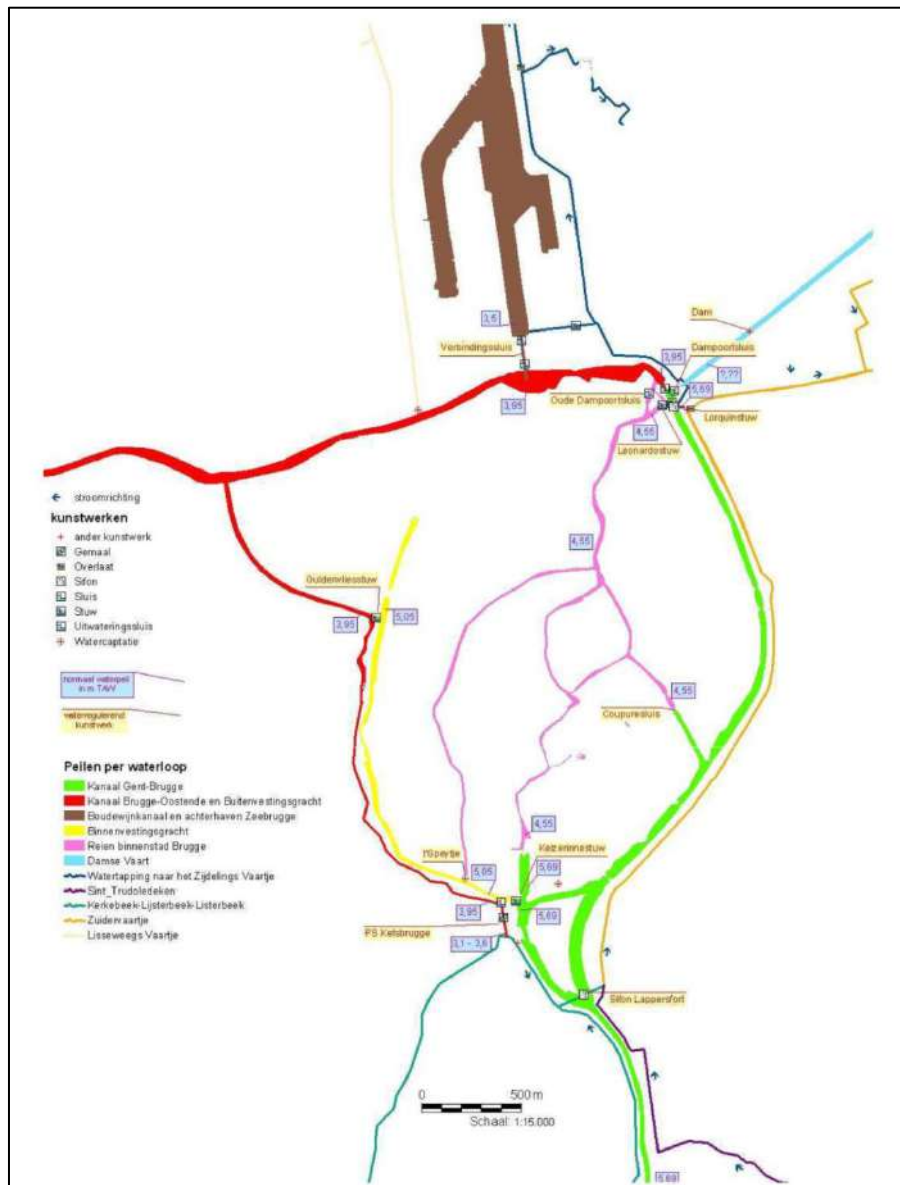
3.3.1 Waterlopen in Brugge

Onderstaande tekst beschrijft de belangrijkste waterlopen op grondgebied Brugge. Eerst worden de oppervlaktewaters van de historische binnenstad besproken, gevolgd door de overige lopen op de rest van het grondgebied.

De bevaarbare en onbevaarbare waterlopen **in en rond de historische binnenstad van Brugge** worden gekenmerkt door een groot aantal menselijke ingrepen. Het natuurlijke afstromingsproces van de waterlopen, waarbij het waterpeil in grote mate afhankelijk is van de recente neerslag, is compleet verdwenen. In de plaats is een **sterk gereguleerd en complex systeem** ontstaan waarin het waterpeil gestuurd wordt door verschillende hydraulische structuren zoals stuwen, sluisen en pompen. Het geheel kan opgedeeld worden in vijf vakken (zie Figuur 27):

- Het opwaartse pand van het **kanaal Gent-Oostende** (KGO, lichtgroen). Dit pand loopt van de Ringvaart rond Gent tot aan de Dampoortsluis in Brugge en wordt gevoed door de bovenlopen van Leie en Schelde (in Gent) en enkele kleinere onbevaarbare waterlopen tussen Gent en Brugge. De omvang van het opwaartse debiet zal in sterke mate afhangen van de stuwregelingen rond Gent. Tijdens periodes van hoge afvoer in het KGO wordt de keerstuw in Beernem gesloten, zodanig dat de hoeveelheid water die richting Brugge stroomt beperkt blijft. Dit moet alle gebieden die rond het opwaartse pand gelegen zijn beschermen tegen overstromingen.
- De **Binnenvestingsgracht** (geel). Deze waterloop transporteert het grootste deel van het water in het opwaartse pand van het KGO naar het afwaartse pand, langs de westelijke rand van de historische binnenstad. Via de Keizerinnestuw ter hoogte van het Minnewaterpark en de Guldenvliesstuw aan het Visartpark wordt het waterpeil in de binnenvestingsgracht op een min of meer constant peil gehouden.
- Het **afwaartse pand van het KGO** (rood) voert het water verder af richting Oostende en de zee. Tijdens hoogtij zal het waterpeil in het kanaal lager liggen dan op zee, waardoor er dus geen water kan afgevoerd worden. Het water moet in dergelijke situaties tijdelijk in het kanaal geborgen worden. De beschikbare capaciteit hiervoor is echter beperkt en kan in periode van hoge afvoeren opwaarts tot problemen leiden in het afwaartse pand.
- De **Kerkebeek en het Zuidervaartje** (donkergroen en lichtbruin). De Kerkebeek ontspringt in Zedelgem en stroomt via Loppem in noordelijke richting naar Brugge. Ter hoogte van het station van Brugge duikt de Kerkebeek samen met het Zuidervaartje via een sifon onder het KGO en stroomt ze verder richting Damme en het Leopoldkanaal. Bij hoge afvoeren is de capaciteit van de sifon echter onvoldoende en wordt het water via gemaal Ketsbrugge overgepompt naar de Buitenvestingsgracht, die in verbinding staat met het afwaartse pand van het KGO.
- De reien in de historische binnenstad (lila). Deze hebben enkele inlaatpunten in het zuidwesten van de binnenstad, ter hoogte van de Kapucijnenrei en de Bakkersrei. Vervolgens stroomt het water in noordelijke richting naar de Dampoort waar het water wordt geloosd in het afwaartse pand van het KGO. Het in- en uitlaten van water gebeurt met manuele schotbalkstuwen die gemiddeld eens per maand opnieuw ingesteld worden.

Door het beperkte debiet dat door de reien stroomt is er op vele plaatsen stilstaand water en kan het geheel beschouwd worden als een groot reservoir.



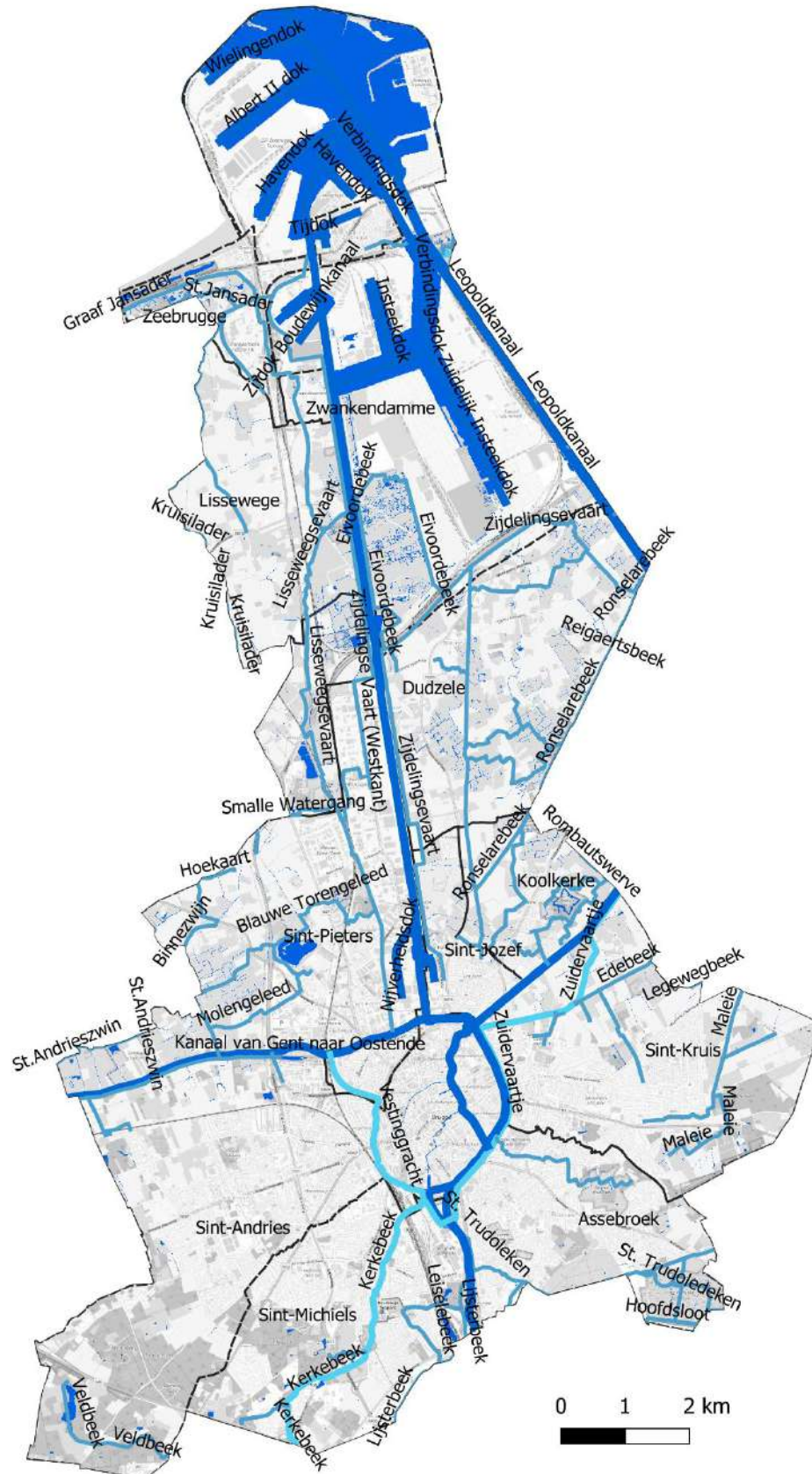
Figuur 27. Waterlopen in en rond het historische centrum van Brugge (CIW, 2009).

Buiten het historisch centrum en de onmiddellijk daaraan grenzende waterlopen (zoals de Binnenvestingsgracht, het Kanaal Gent-Oostende en de Vestingsgracht) stromen er verschillende kleinere en middelgrote waterlopen over het grondgebied. De belangrijkste worden hieronder (gegroepeerd) toegelicht, van zuid naar noord en zijn aangeduid op Figuur 28:

- De **Kerkebeek** en het **Zuidervaartje** werden hierboven reeds toegelicht.
- In het zuiden van Assebroek loopt **Sint-Trudoleken**. Het meest zuidoostelijke punt van Assebroek zijn meersen, en bijgevolg gevoelig voor overstromingen. Dergelijke overstromingen hebben echter ook een belangrijke hydrologische functie: ze houden water vast op het terrein bij overvloedige neerslag, waar het gedeeltelijk kan infiltreren. Op die manier worden de grondwatertafels aangevuld. Verwacht wordt dat winters ten gevolge van klimaatverandering natter worden, en dus dergelijke overstromingen frequenter zullen voorkomen. Het is dan van belang om ook "ruimte" te geven aan dit water, en het zo lang mogelijk proberen vast te houden en te laten infiltreren. Op die manier wordt de

grondwaterreserve aangevuld om de (langere) droge periodes in de zomer te overbruggen. Vanzelfsprekend moet zo'n waterbergende functie doordacht uitgewerkt worden, rekening houdend met de natuurtypes die er voorkomen en wenselijk zijn. Het Sint-Trudoleken wordt zijdelings gevoed door een aantal sloten, die de meersen deels afwateren. Het Sint-Trudoleken watert op zijn beurt af naar de **Lijsterbeek**.

- Op de grens tussen Sint-Michiels en Assebroek loopt de **Lijsterbeek**, die ook water ontvangt uit **Sint-Trudoleken**. Beide wateren af naar het Zuidervaartje, ongeveer ter hoogte van het meest zuidelijk punt van het ei van Brugge.
- In het uiterste zuidwesten van Sint-Michiels loopt de **Veldbeek**. Deze waterloop watert via de **Rollewegbeek** af naar de **Kerkebeek**. De Veldbeek is op Brugs grondgebied gevoelig voor wateroverlast.
- Centraal door Assebroek loopt de **Gemene Weidebeek**. De beek doorkruist enkele lageregelegen zones, die bijgevolg gevoelig zijn voor wateroverlast. De Gemene Weidebeek watert af naar het Zuidervaartje.
- In het oosten van Assebroek loopt de **Maleie**. Opwaarts wordt deze waterloop gekenmerkt door twee gelijknamige lopen, die ter hoogte van de Brieversweg samenstromen. In dit gebied stromen ook nog de kleinere waterlopen de **Edebeek** en de **Legewegbeek**.
- De gebieden ten noorden van het Kanaal Gent-Oostende wordt gekenmerkt door een groot aantal kleinere grachten en rivieren (polders). In Sint-Pieters gaat het onder andere om de **Blankenbergsevaart**, **Molengeleed**, **Blauwe Torengleed** en **Binnezwijn**. Op de grens met Sint-Jozef loopt de **Lissewegsevaart**, die in verbinding staan met de **Blauwe Torengleed**, de **Smalle Watergang** en de **Zijdelingse Vaart** (ten westen van het Boudewijnkanaal). De Lissewegsevaart staat uiteindelijk in Zeebrugge in verbinding met het **Boudewijnkanaal**. Langs de oostelijke kant van het Boudewijnkanaal vormen de **Rombautswerve** en de **Ronselarebeek** de twee belangrijkste waterlopen. De Ronselarebeek stroomt noordwaarts af, en staat in verbinding met verschillende kleine grachten en beken (de Hemelbeek, Waterhofstedegeleed, e.a.). Langs het Boudewijnkanaal loopt de Zijdelingse vaart, die ten noorden van de A11 overgaat in de **Eivoordebeek**.
- In Zeebrugge, tegen de grens met Blankenberge, lopen de **Graaf Jansader** en **Sint Jansader**. Beide stromen af naar de **Lange Smalle Watergang**, die op hun beurt afwateren naar de **Lissewegsevaart**.



Figuur 28: Belangrijkste waterlopen op grondgebied Brugge.

3.3.2 Berekeningswijze

De kaarten van rivieroverstromingen (de zogenaamde “fluviale overstromingen”) die in deze studie gehanteerd worden, zijn identiek aan de meest recente rivieroverstromingskaarten zoals publiekelijk gepubliceerd door de Vlaamse Milieumaatschappij. De kaarten werden geraadpleegd via de portaalwebsite www.waterinfo.be in november 2021 (“Overstromingsrichtlijn” > “Overstroombare oppervlakte – Fluviale overstromingen – Huidig en Toekomstig klimaat”), en werden één-op-één overgenomen van de Vlaamse Milieumaatschappij naar voorliggende studie. Deze kaarten tonen de overstromingen voor het huidig en toekomstig klimaat (2050, hoog-impactscenario; identiek aan de scenario’s zoals gehanteerd voor de overige types overstromingen), en dit voor grote (T10), middelgrote (T100) en kleine (T1000) kans op voorkomen. De kaarten werden recentelijk gepubliceerd door de Vlaamse Milieumaatschappij op de portaalwebsite Waterinfo en zijn publiekelijk raadpleegbaar, maar zijn nog niet formeel vertaald naar de Watertoets-kaarten. Voor de Watertoets, noodzakelijk bij aanvragen voor een omgevingsvergunning, blijft de Stad Brugge een beroep doen op de adviesinstanties VMM en de polderbesturen. Zij zijn de experts ter zake en geven advies op basis van die expertise. De Stad zal, zoals gebruikelijk, rekening houden met dat advies bij de verdere behandeling van de vergunningsaanvraag.

In het kader van het klimaatadaptatieplan wordt gefocust op de gebieden die met grote kans (T10, dus eens in de 10 jaar) overstromen. Merk op dat de getoonde fluviale overstromingskaarten naar een tijdshorizon 2050 kijken en niet naar 2100 zoals de rest van de studie. De kaarten met tijdshorizon 2100 zijn immers niet beschikbaar. Enkele analyses, o.a. rond de toename van piekdebieten, kijken omwille van consistentieredenen met de rest van de studie wel nog naar tijdshorizon 2100. De beschouwde tijdshorizon is bij de resultaten in voorliggend rapport telkens duidelijk aangegeven.

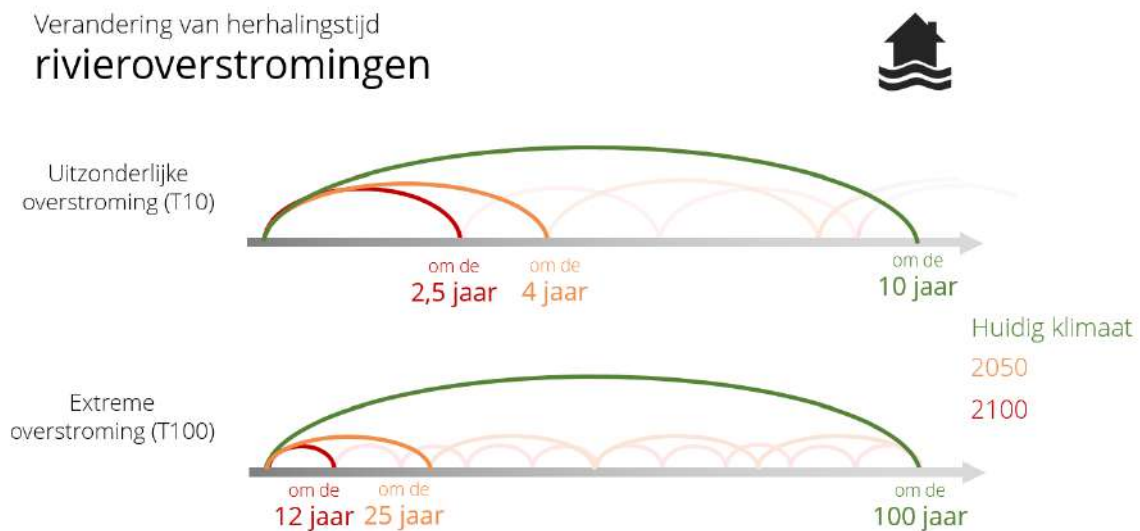
Deze kaarten werden door de Vlaamse Milieumaatschappij opgemaakt aan de hand van hydrodynamische modelsimulaties van de meest relevante onbevaarbare waterlopen. Op grondgebied Brugge betreft het de Kerkebeek met diens belangrijkste waterlopen (zoals de Lijsterbeek), het Molengeleed en het Blauwe Torengleed. De andere onbevaarbare waterlopen werden (nog) niet gemodelleerd door VMM, en daarvan zijn dan ook geen “fluviale” overstromingskaarten beschikbaar. De overige onbevaarbare waterlopen zijn echter kleiner, en zitten wel mee vervat in de “pluviale” overstromingskaarten (zie §3.2 “Wateroverlast als gevolg van intense neerslag”). **Voor het evalueren van overstromingsrisico’s ten gevolge van neerslag moeten bijgevolg zowel de pluviale als fluviale overstromingskaarten beschouwd worden.** Op die manier zijn wel de overstromingskaarten gebiedsdekkend voor Brugge beschikbaar.

Daarnaast werden ook overstromingskaarten geraadpleegd van de bevaarbare waterlopen. Het betreft in dit geval het Kanaal Gent-Oostende met het bijhorend Afleidingskanaal. Deze kaarten werden door het Waterbouwkundig Laboratorium opgemaakt aan de hand van een gedetailleerd hydrodynamisch simulatiemodel (MIKE11).

Naast deze gebiedsdekkende analyse voor gans Brugge werden ook bijkomende bronnen geraadpleegd. In het kader van het Riviercontract Kerkebeek werden bijkomende simulaties uitgevoerd voor het toekomstig klimaat. Waar mogelijk werden de resultaten aangevuld met bijkomende info uit die studies. Ook werden resultaten uit de overstromingsrisicobeheersplannen (ORBP) geconsulteerd.

3.3.3 Resultaten

Ten gevolge van klimaatverandering zal, net als bij pluviale overstromingen (zie §3.2.2), de kans op wateroverlast langs rivieren toenemen. Figuur 1 toont de te verwachten veranderingen in voorkomen van rivieroverstromingen. Overstromingen die nu eens per 10 jaar voorkomen, kunnen tegen 2050 mogelijk elke 4 jaar gebeuren, en tegen 2100 elke 2,5 jaar. De overstromingen met deze terugkeerperiode beperken zich tot enkele locaties (zie ook Figuur 2), en veroorzaken over het algemeen weinig directe economische schade doordat deze voornamelijk natuur treffen. Door de significante verandering van voorkomen van wateroverlast, kan dit wel een impact hebben op fauna en flora. Extremere overstromingen, die nu eens per 100 jaar voorkomen, kunnen tegen 2050 mogelijk elke 25 jaar voorkomen, en tegen 2100 elke 12 jaar. **Grote rivieroverstromingen (T100) kunnen dus 4 keer zo vaak voorkomen tegen 2050, en zelfs 8 keer zo vaak tegen 2100.** Er is bijgevolg een sterke toename te verwachten in het voorkomen van dergelijke extreme situaties (maar de toename blijft beperkter dan die van pluviale overstromingen, zie §3.2.2).



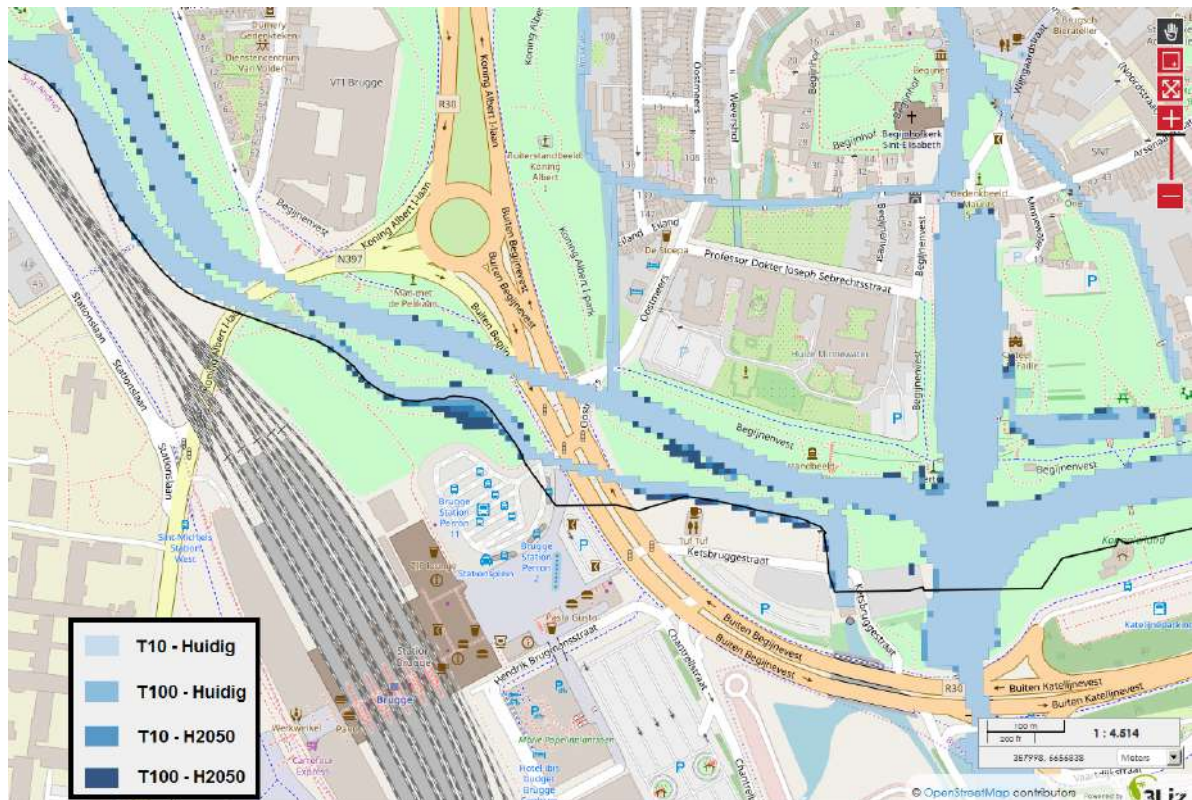
Figuur 1: Verandering van voorkomingsfrequentie van rivieroverstromingen.

3.3.3.1 Historische binnenstad en daaraan grenzend gebied

De reien blijken niet gevoelig te zijn voor overstromingen. Deze kunnen bij hoogwater van het KGO volledig en afdoend afgesloten worden. De voeding van de reien (zoals bijvoorbeeld de afvoer van regenwater van omliggende daken) is te beperkt om overstromingen te veroorzaken. Bovendien gebeurt dergelijke significante en plotse afstroming van daken quasi uitsluitend in de zomer (bij bijvoorbeeld hevige onweders), terwijl het KGO dan typisch zeer laag staat en er dus geloosd zou kunnen worden van de reien naar het KGO indien nodig.

Het KGO grenzend aan de binnenstad is echter wel overstromingsgevoelig op sommige locaties, hoewel weinig bebouwing bedreigd wordt. Een detail van deze overstromingskaarten voor het zuidwesten van de historische binnenstad is te vinden in Figuur 29. Op deze kaart zijn zowel het opwaartse pand van het KGO, de binnen- en buitenvestingsgracht en het Minnewaterpark getoond. In het noorden van het ei van Brugge, ter hoogte van de handelskom en net afwaarts van de sluis te Dampoort is er ook een (over het algemeen gering) risico op overstroming. De modellen

simuleren geen wateroverlast aan de sluis van Dampoort. Op basis van verschillende persoonlijke getuigenissen (van Brugse stadsdiensten en externe experts) werd echter aangegeven dat de zone rond het Sasplein recentelijk overstroomde vanuit het Kanaal Gent-Oostende. Dit punt was niet vervat in de beschikbare kaarten, en werd daarom manueel toegevoegd. Overstromingen ontstaan door een combinatie van een beperkte afwatering via het kanaal ter hoogte van Sas Slijkens (door hoogwater en/of opstuwing naar opwaarts door wind) en een groot opwaarts debiet. Momenteel loopt bij De Vlaamse Waterweg om de afwatering in Sas Slijkens (en de opwaartse gebieden) te verbeteren, en zo de overstromingen te beperken. De zone rond het Sasplein wordt daarbij specifiek bekeken.



Figuur 29. Overstromingskaarten bij terugkeerperiodes van 10 en 100 jaar voor het huidige klimaat en het hoog impact scenario voor 2050. Detail van de Brugse stationsbuurt.

3.3.3.2 Gans grondgebied

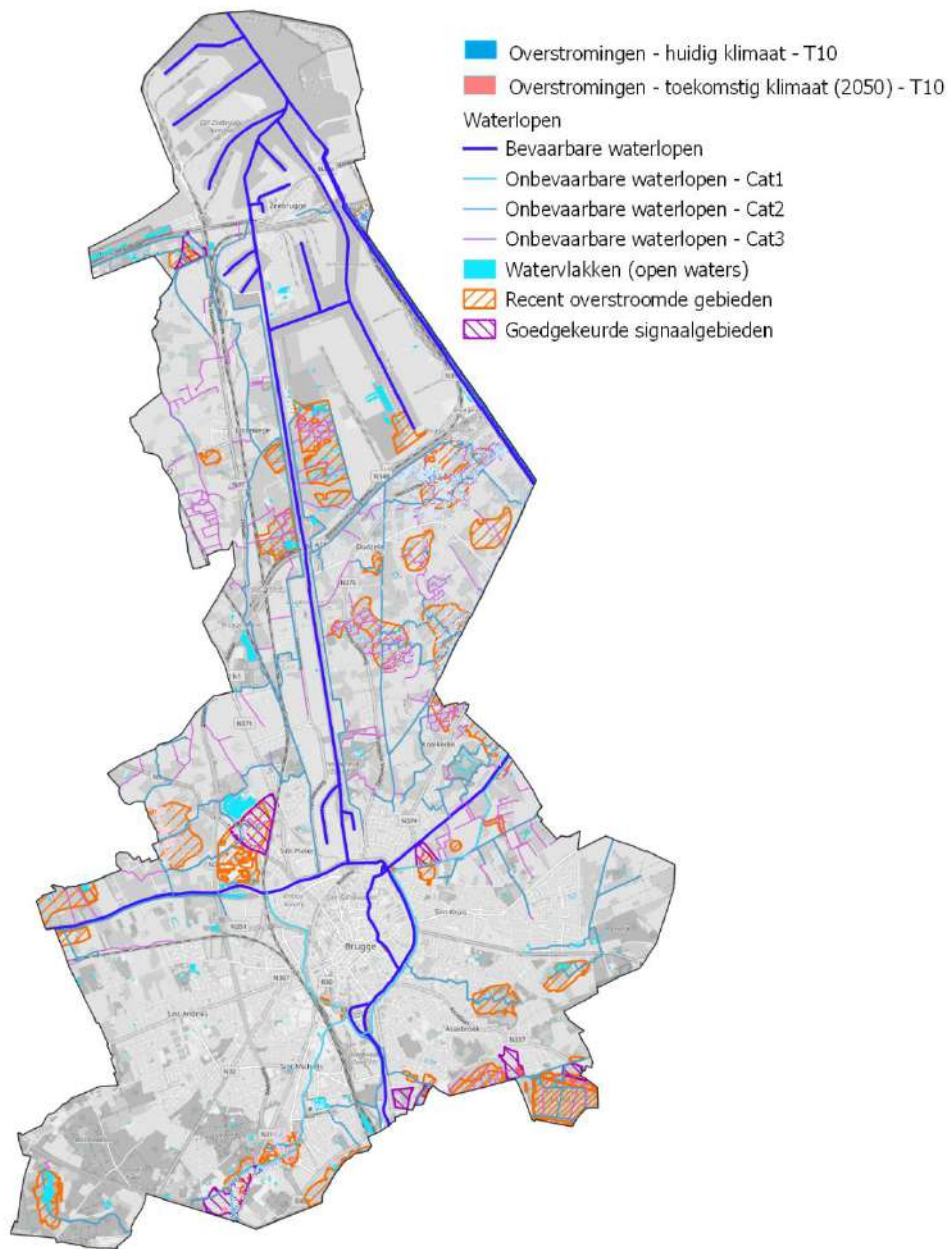
Figuur 30 toont de berekende overstromingskaarten met een herhalingsstijd van 10 jaar (T10) voor het huidige en het toekomstig (2050) klimaat. De kaart toont ook de signaalgebieden op Brugs grondgebied, en de geclassificeerde waterlopen.

De fluviale overstromingen zijn enkel gekarteerd rond de Kerkebeek, Lijsterbeek, Molengeleed en het Blauwetorengleed. Merk op dat dit de enige rivieren zijn die gemodelleerd werden door de VMM, en bijgevolg ook enkel fluviale kaarten voor deze waterlopen beschikbaar zijn. De overige (onbevaarbare) waterlopen overstromingen eveneens, maar die overstromingen worden getoond onder de "pluviale" overstromingen (zie §3.2 "Wateroverlast als gevolg van intense neerslag"). Om een integrale overstromingsrisicoanalyse ten gevolge van neerslagextremen uit te voeren, moet bijgevolg altijd gekeken worden naar zowel de pluviale (zie §3.2) als fluviale (§3.3; deze paragraaf) overstromingskaarten. Door beide te combineren wordt een goed zicht gekregen op de overstromingen ten gevolge van neerslag op het ganze grondgebied. Merk ook op dat de kaarten in het rapport enkel overstromingen beschouwen die met "grote kans" kunnen voorkomen. Deze

komen gemiddeld eens in de 10 jaar (T10) voor. De kaarten zijn online ook ter beschikking voor terugkeerperioden "middelgrote kans" (T100) en "kleine kans" (T1000). De kaarten zijn o.a. raadpleegbaar via www.waterinfo.be.

Eventuele mitigerende maatregelen die in de toekomst genomen worden, zoals het voorzien van bijkomende buffering en initiatieven in het kader van het Riviercontract Kerkebeek zijn nog niet mee opgenomen in deze simulaties. De werkelijke overstromingen zullen dus vermoedelijk tussen deze van het huidig klimaat liggen en de gesimuleerde overstromingen.

Verskillende (soms bebouwde) zones rond de Kerkebeek worden frequent getroffen, en ondervinden al overstromingen eens om de 10 jaar in het huidig klimaat. De overige zones worden pas in het toekomstig klimaat (jaar 2050) om de 10 jaar getroffen. Deze zones werden hoofdzakelijk bevestigd tijdens gesprekken met stadsdiensten en externe partners.

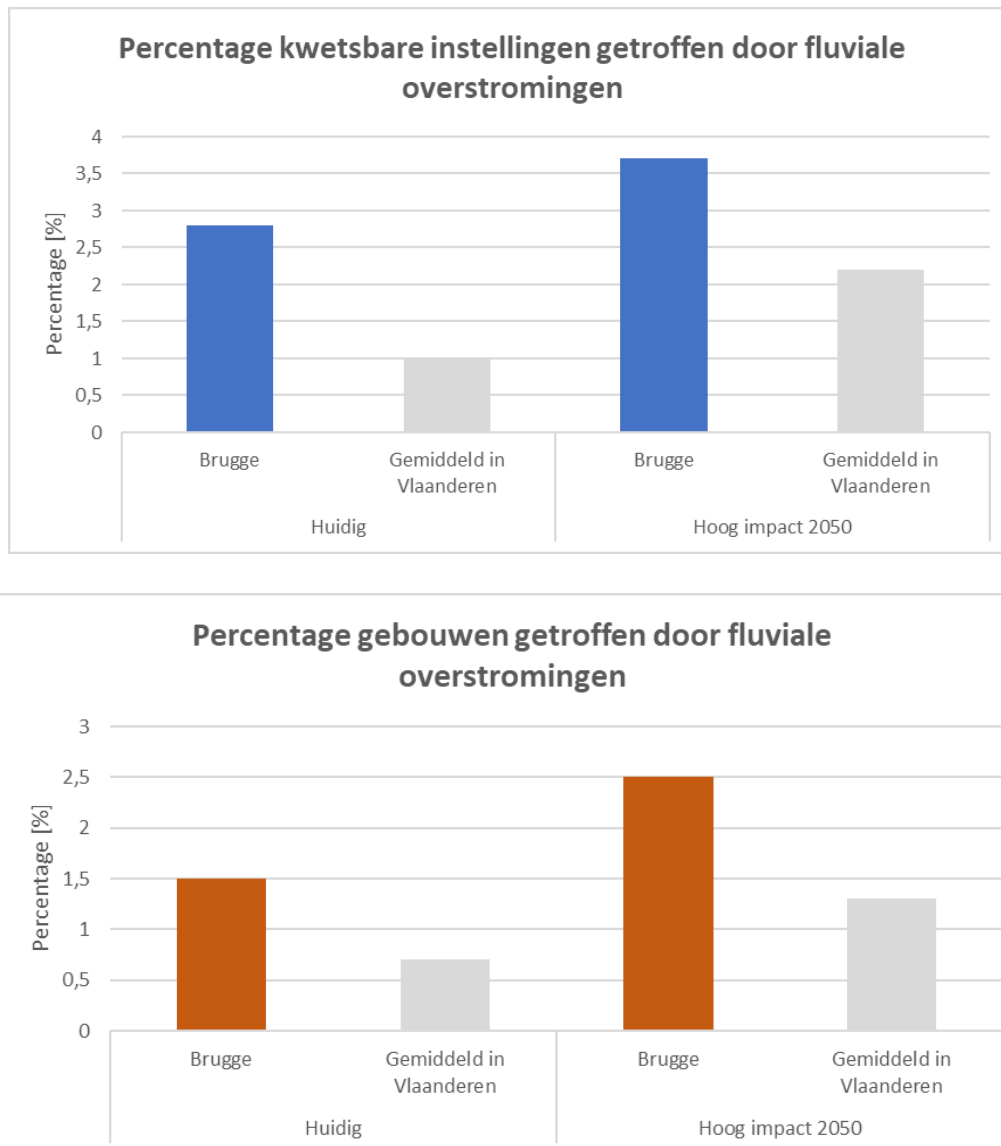


Figuur 30: Overzichtskartaal van de berekende rivieroverstromingen met een herhalingstijd van 10 jaar (T10) voor het huidig (blauw) en toekomstig (2050, rood) klimaat. We raden aan om de overstromingskaarten digitaal in hoge resolutie te bekijken.

Onderstaande figuren tonen het aandeel van de kwetsbare instellingen en alle gebouwen die getroffen worden door fluviale overstromingen met een kleine kans (T1000). Deze resultaten zijn raadpleegbaar op het Klimaatportaal van de Vlaamse Milieumaatschappij. In het huidig klimaat wordt ongeveer 2,8% van de kwetsbare instellingen in Brugge getroffen door fluviale overstromingen, en in het toekomstig klimaat (2050; hoog-impacts scenario) neemt dit toe tot 3,7%. Dit is hoger dan de gemiddelde cijfers voor Vlaanderen, waarbij respectievelijk 1% en 2,2% van de kwetsbare instellingen getroffen wordt. Het aandeel gebouwen die getroffen worden door fluviale overstromingen in Brugge neemt toe van 1,5% in het huidig klimaat tot 2,5% tegen 2050. Ook deze cijfers zijn hoger dan de Vlaamse gemiddeldes (respectievelijk 0,7% en 1,3%). Merk op dat

het aantal kwetsbare instellingen en gebouwen die getroffen worden door fluviale overstromingen kleiner is dan bij pluviale overstromingen. Bij toekomstige projecten moet dan ook rekening gehouden worden met beide types overstromingen.

Klimaatverandering zorgt voor uitgestrektere overstromingen: de overstromde oppervlakte bij een 10-jarige bui neemt toe van 554 hectare in het huidig klimaat, tot 1638 hectare in het jaar 2100 (+295%). Dit laatste is ongeveer 12% van het Brugse grondgebied. Het grondgebied van de haven is niet mee opgenomen in deze analyse.



Figuur 31: Statistieken van modelsimulatiesresultaten van kwetsbare instellingen en gebouwen getroffen door extreme rivieroverstromingen in Brugge.

Naast de wateroverlast langs de Kerkebeek, blijkt ook de bebouwing rond **Sint-Pietersplas** gevoelig voor wateroverlast. In het verleden traden ook problemen op met terugslagkleppen, drijfvuil, etc., wat bijkomende overstromingen veroorzaakte (IMDC, 2013). In 2013 voerde het studie bureau IMDC een studie uit naar de waterhuishouding in het gebied in het kader van het signaalgebied Sint-Pietersmolenwijk. In de studie werden geen modellen opgemaakt, maar werd op basis van een topografische analyse geconcludeerd dat de ROG-kaarten wellicht een overschatting zijn van wat in realiteit overstromde in het verleden. Vanaf een bepaalde overstromingshoogte ontstaat er immers een stroming richting de Sint-Pietersplas, wat de

overstromingshoogtes ten zuidwesten van de Sint-Pietersplas wellicht beperkt. De ROG-kaarten omvatten zones die topografisch veel hoger liggen, waaruit geconcludeerd werd dat de ROG-kaarten onnauwkeurig zijn.

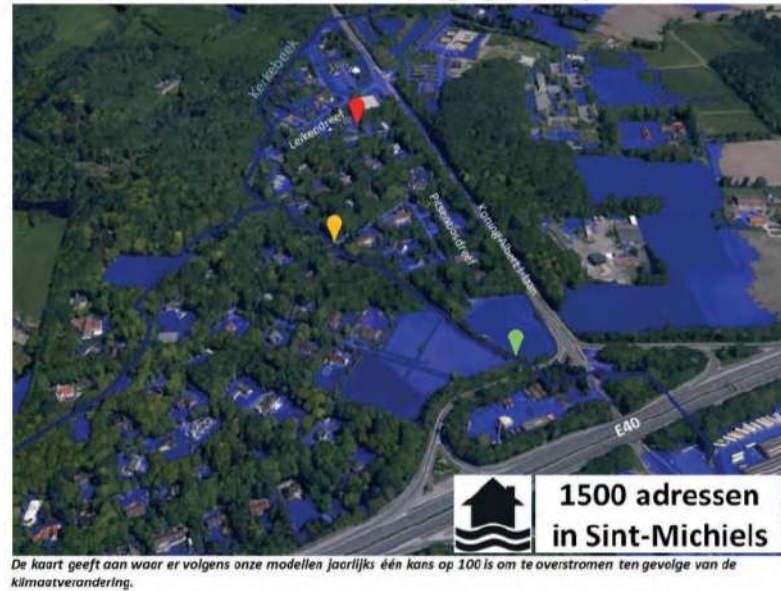
Het resultaat van de studie van IMDC (2013) leidde tot een lijst met voorwaarden voor het inrichten van het plangebied, zoals o.a. het voorzien van bijkomende berging van 21.600 m³ met behoud van een bergende oppervlakte van 4.7 hectare, alsook het opleggen van vertraagde afvoer van bronmaatregelen met een minimumcapaciteit van 330 m³ per hectare verharde oppervlakte met een lozingsdebiet van maximaal 10 l/s/ha, een bouwstop in de zones die "het frequentst overstromen" (de definitie hiervan is onduidelijk), en een aangepaste bouwwijze binnen de T100-contour. Het is echter onduidelijk of deze eisen ook reeds rekening houden met klimaatverandering. Aangezien de studie van IMDC (2013) hier geen melding van maakt, wordt aangenomen dat klimaatverandering niet in rekening gebracht werd. Bijgevolg zijn de opgelegde eisen mogelijks te beperkt. Bijkomend onderzoek met meer gedetailleerde hydrologische en hydrodynamische modellen is hiervoor nodig.

Naast deze gebiedsdekkende kaarten is er meer gedetailleerde informatie beschikbaar voor het stroomgebied van de Kerkebeek via het Riviercontract Kerkebeek (VMM, 2018c). Aanvullend op de T10-overstromingskaart (zie Figuur 30) is via het Riviercontract ook de T100-kaart beschikbaar voor het huidige en toekomstig klimaat voor een deel van de vallei van de Kerkebeek. Figuur 32 toont de overstromingsgebieden in Sint-Michiels net ten noorden van de E40. Figuur 33 toont de overstromingsgebieden net ten zuiden van het Boudewijnpark. Deze overstromingsgebieden zijn gesimuleerd door de VMM op basis van hydrodynamische riviermodellen. **Uit deze analyse is het duidelijk dat het overstroomd gebied sterk toeneemt ten gevolge van klimaatverandering. Vooral in de wijk net ten zuiden van het Boudewijnpark verhoogt het risico significant. In het huidige klimaat worden 50 adressen getroffen door een T100-overstroming, en in het toekomstig klimaat (2100) loopt dit op tot 1500 adressen.** De impact van wateroverlast op gebouwen wordt meer in detail besproken in deel 4 van dit rapport. Opnieuw houdt deze analyse geen rekening met de geplande en recentelijk (2017 en later) genomen maatregelen tegen wateroverlast.

Huidig klimaat: jaarlijks 1 kans op 100



Met klimaatverandering: jaarlijks 1 kans op 100



Figuur 32: Overstromingskaarten (T100) voor het huidige en toekomstig (jaar 2100) klimaat voor Sint-Michiels (bron: VMM, 2018c).

Huidig klimaat: jaarlijks 1 kans op 100



Met klimaatverandering: jaarlijks 1 kans op 100



Figuur 33: Overstromingskaarten (T100) voor het huidig en toekomstig (jaar 2100) klimaat voor Sint-Michiels net ten zuiden van het Boudewijnpark (bron: VMM, 2018c).

3.4 Overstromingen vanuit de kust

In §2.3.6 werd reeds besproken dat er in de afgelopen decennia een stijging van de gemiddelde zeespiegel langs de Belgische kust werd geobserveerd. Willems (2014) bestudeerde de hoogwaters, stormopzetten, trends en langjarige schommelingen in de zeespiegel en concludeerde hieruit dat de zeespiegel gemiddeld met 0.20 cm per jaar, of 20 cm per 100 jaar stijgt. Extrapolatie naar 2100 levert een stijging van de zeespiegel met 20 cm op. Als gevolg van de relatief trage reactie van oceanen en ijskappen kan echter verwacht worden dat de stijgende trend nog verder zal toenemen (Huybrechts, 2002). Zelfs al kan de broeikasgasuitstoot drastisch terug gedrongen worden en de temperatuurstijging binnen de perken gehouden worden, dan nog zal de zeespiegelstijging zich nog

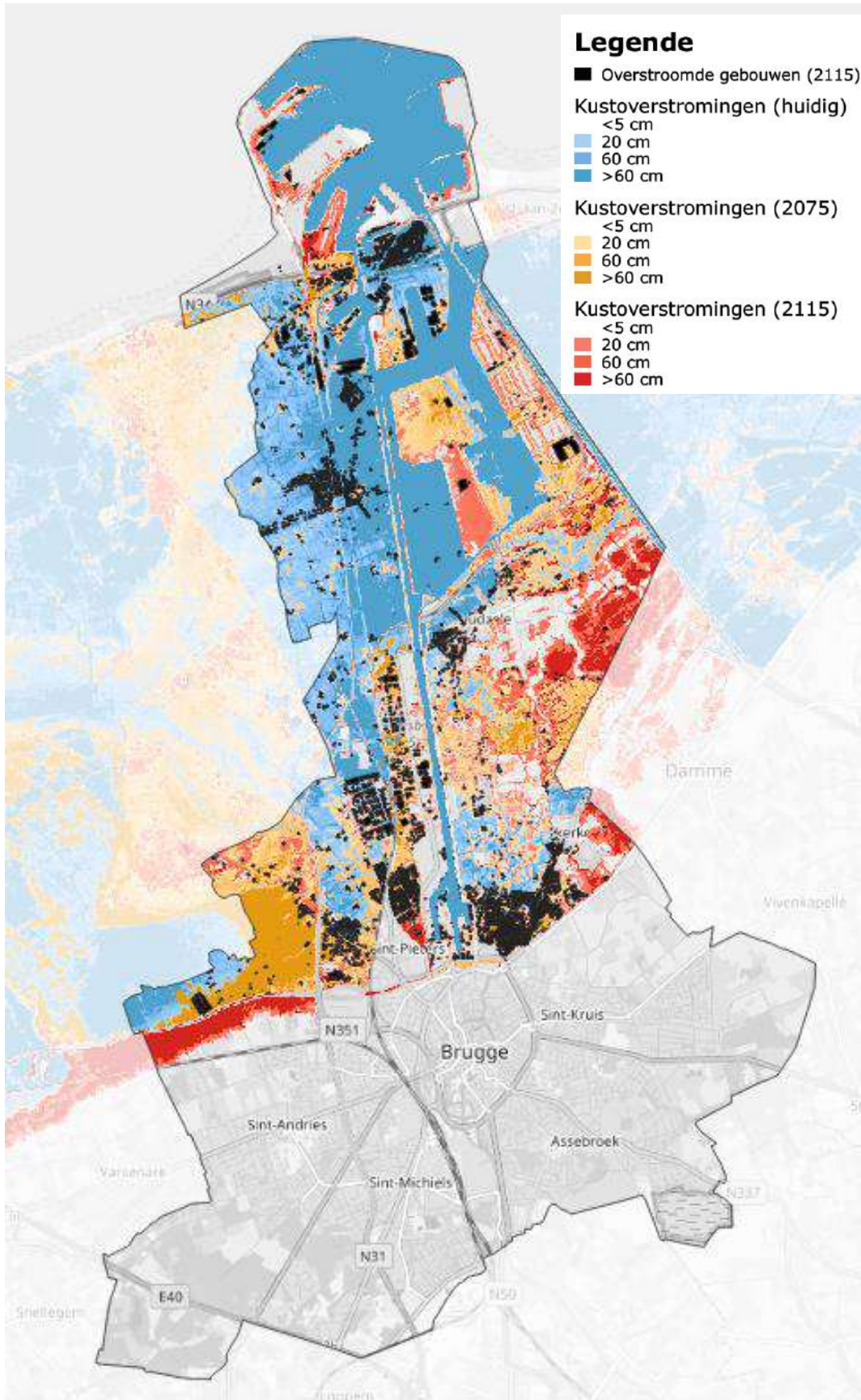
enkele eeuwen voortzetten. Daarom wordt in het **hoog impact scenario rekening gehouden met een zeespiegelstijging van 80 cm tegen 2100**. In het meest extreme, worst-case scenario wordt zelfs rekening gehouden met 200 cm. Daarnaast moet men er zich ook van bewust zijn dat de zeespiegelstijging ook niet zal stoppen in 2100. Als op lange termijn de ijskap van Groenland volledig zou wegsmelten, is een zeespiegelstijging van 7 meter mogelijk volgens prof. Patrick Meire (VRT, 2020). Dit is uiteraard een zeer pessimistisch scenario, maar ook tussenliggende scenario's met op de lange termijn stijgingen van grootteorde 3 à 4 meter zijn zeker niet uit te sluiten. Via het lopende project "Complex project Kustvisie" bereidt de Vlaamse Overheid zich voor op dergelijke langetermijnprognoses.

In het kader van de ORBP-plannen maakte het Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust kaarten aan voor overstromingen vanuit zee. Deze tonen de uitgestrektheid van overstromingen over de volledige kustzone voor een aantal stormvloedpeilen. Bij het opmaken van deze kaarten wordt niet expliciet rekening gehouden met de invloed van klimaatverandering. De kans dat extreme waterpeilen kunnen voorkomen zal echter toenemen als gevolg van de zeespiegelstijging. Om een maximum waterpeil van bv. 7 m TAW te bekomen, wordt momenteel uitgegaan van een stormopzet van 2 m bovenop een springtij van 5 m TAW. Door de stijging van de zeespiegelstijging zal het springtij in de toekomst hoger komen te liggen en zal een kleiner en dus frequenter stormopzet nodig zijn om een waterpeil van 7 m TAW te bereiken.

Figuur 34 toont de kustoverstromingskaart voor het huidig en het toekomstig klimaat (2075 en 2115) met een terugkeerperiode van 1000 jaar (T1000) met de toestand van de kustverdediging zoals in 2015. Deze overstromingen hebben een gemiddelde kans op voorkomen van 1 op 1000 in een jaar. Gelet op de bijzonder grote sociale, ecologische en economische impact van kustoverstromingen is het aangeraden rekening te houden met dergelijke hoge terugkeerperiode. Ook het Masterplan Kustveiligheid houdt rekening met deze terugkeerperiodes. Uit de kaarten blijkt dat het historisch centrum gevrijwaard blijft van overstromingen, maar de ganse zone ten noorden van het Kanaal Gent-Oostende en de Damse Vaart getroffen kan worden. In het huidig klimaat blijft de overstroming in hoofdzaak beperkt tot Zeebrugge, Lissewege en de lager gelegen gebieden in Zwankendamme, Lissewege, Dudzele, Sint-Pieters, Sint-Jozef en Koolkerke. In het toekomstig klimaat, echter, beslaan de overstromingen quasi het ganse grondgebied van deze deelgemeenten. **De overstromde oppervlakte (T1000) neemt toe van 4450 hectare in het huidig klimaat, tot 6030 hectare tegen 2075 en 7034 hectare tegen 2115.**

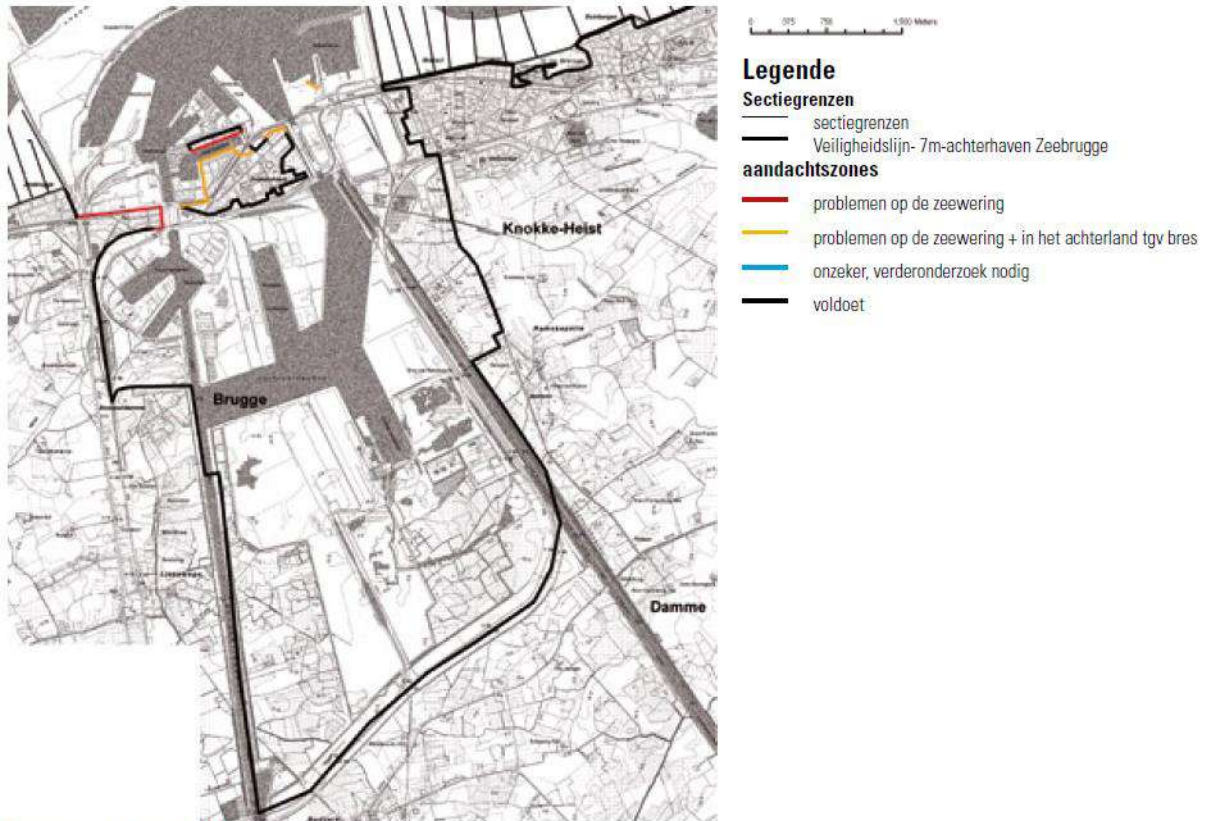
Belangrijk om op te merken is dat deze overstromingskaarten zijn opgemaakt met de zeewering langs de kust die in 2015 uitgebouwd was. Op verschillende locaties is de huidige zeewering niet bestand tegen stormen met een terugkeerperiode van 1000 jaar, waardoor grote oppervlaktes getroffen kunnen worden door overstromingen zoals getoond in Figuur 34. In Brugge blijken de strandhoofden wel bestand tegen dergelijke storm, maar vertoont de haven van Zeebrugge enkele zwaktes zoals samengevat op Figuur 35. Onder andere langs de Kustlaan tussen Zeebrugge dorp en Zeebrugge strand, de Visartsluis, de Rederskaai, Tijdok, Vismijn en de Vandammesluis zijn bijkomende verdedigingen nodig. **Deze verdedigingen zijn echter gepland in het Masterplan Kustveiligheid, dat een integrale veiligheid met terugkeerperiode 1000 jaar nastreeft. Na implementatie van deze maatregelen wordt verwacht dat er geen significante overstromingen optreden bij een storm met herhalingstijd 1000 jaar, en hierbij rekening houdend met de zeespiegelstijging tot het jaar 2050.** Voor stormen met terugkeerperiode groter dan 1000 jaar kunnen echter nog steeds (grootschalige) overstromingen voorkomen. Daarnaast onderzoekt het lopende dossier Complex Project 'Verbetering van de nautische toegankelijkheid tot de (achter)haven van Zeebrugge' de mogelijkheid om de huidige Visartsluis te vervangen door een nieuwe grotere sluis. Binnen deze studie tracht men om enkele zwakke punten weg te werken met betrekking tot kustverdediging.

De impacts van deze toename in overstromingsrisico's wordt verder toegelicht in deel 4 van dit rapport.



Figuur 34. Overstromingen vanuit de kust met een terugkeerperiode van circa 1000 jaar (T1000) voor het huidig (blauw) en toekomstig klimaat (2075 in het oranje; 2115 in het rood).

KUSTHAVENS HAVEN ZEEBRUGGE



Aandachtszones in de haven van Zeebrugge

Figuur 35: Verdediging en veiligheid van de haven van Zeebrugge.

De zeespiegelstijging als gevolg van klimaatverandering zal nog een tweede, onrechtstreeks, effect hebben op de waterlopen rond Brugge. Zoals eerder aangegeven gebeurt de uitwatering van het afwaartse pand van het kanaal Gent-Oostende gravitair. Tijdens hoge waterpeilen op zee is dit echter niet mogelijk. **Vooraf bij hoge afvoeren in het opwaartse pand kan dit tot problemen leiden aan de Handelskom, doordat de capaciteit van het kanaal beperkt is.** Door de zeespiegelstijging zal de periode waarin men kan uitwateren in Oostende korter worden, met mogelijke wateroverlast in Brugge tot gevolg. De uitwateringsstuw aan Sas-Slijkens in Oostende zal binnenkort gerenoveerd worden. Een toename van de afvoercapaciteit van deze stuw is dus van groot belang. **De Vlaamse Waterweg heeft recentelijk een studie opgestart rond deze problematiek.**

3.5 Droogte: freatisch grondwater

Droogte of waterschaarste is het tekort aan oppervlakte- en grondwater, na langdurige periodes met weinig of geen neerslag, gecombineerd met hoge verdamping. Het is dus, net als overstromingen, een direct gevolg van de hydrologische cyclus en wordt bepaald door de klimaattoestanden neerslag en verdamping. **Verwacht wordt dat de combinatie van het stijgende aantal droge zomerdagen, de afname van de neerslagvolumes in de zomer en de toegenomen verdamping zullen leiden tot meer extreme en meer frequente droogte.**

Deze en volgende paragrafen (§3.6 en §3.7) beschrijven tezamen de belangrijkste klimaateffecten op vlak van droogte: (1) freatisch (ondiep) grondwater, (2) bodemvocht (het water in de bovenste

lagen van de bodem; de circa 1 meter toplaag) en (3) oppervlaktewaterbeschikbaarheid. Vanzelfsprekend zijn deze 3 aspecten direct gecorreleerd aan elkaar, maar de onderliggende processen en impacts zijn verschillend.

Grondwater refereert naar de freatische (ondiepe) waterlaag in de bodem. Uit deze laag wordt water gecapteerd voor onder andere industrie en landbouw. Daarnaast heeft deze laag een directe impact op het bodemvocht. In tegenstelling tot het diep grondwater wordt het freatisch grondwater direct geïmpacteerd door langere periodes van droogte.

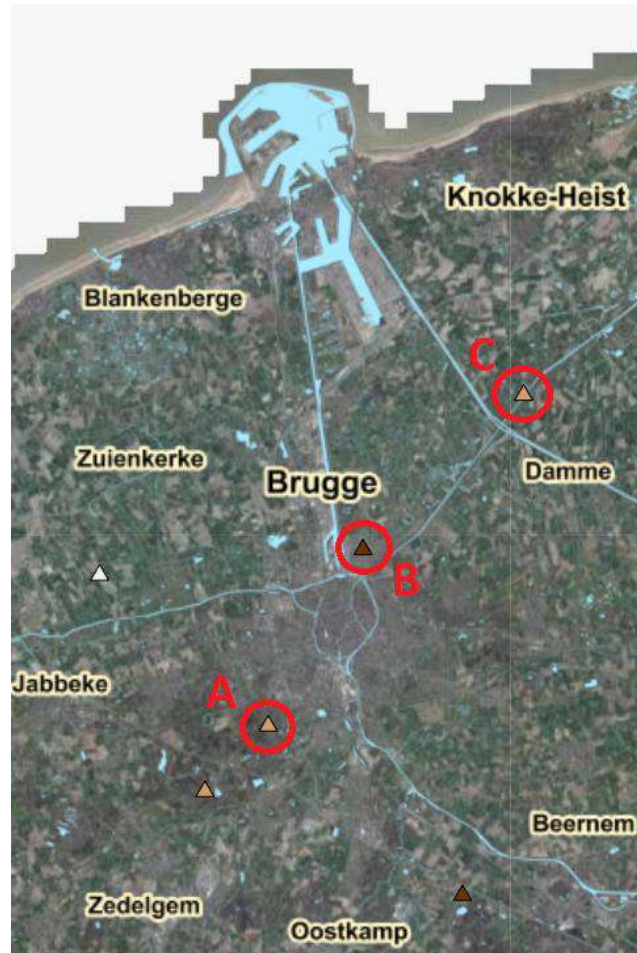
3.5.1 Berekeningswijze

Om de impact van droogte op het grondwater te bestuderen en illustreren, wordt gebruik gemaakt van de Grondwaterstandsindicator van VMM zoals gepubliceerd op de Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV), en simulatiemodellen achterliggend aan de grondwaterstandsindicator. Deze modellen werden opgesteld op basis van de bodemkarakteristieken van de Aardewerkdatabank, en vervolgens gekalibreerd aan de hand van peilmetingen in grondwaterputten op Brugs grondgebied. In dit model werd een 100-jarige tijdreeks gesimuleerd voor het huidig en toekomstig klimaat, gevolgd door een statistische nabewerking van de resultaten. Op die manier kan de impact van klimaatverandering op grondwaterstanden bestudeerd worden.

Er werden 3 locaties onderzocht: peilfilter 2006-007175 ter hoogte van de parking en speelweide van Tillegembos (locatie A op Figuur 36), de filter met nummer 1999-000994 ter hoogte van de Bommelbekestraat in Koolkerke (locatie B), en de filter met nummer 3-KPS-0001b in Monnekerede (locatie C). Merk op dat locatie C reeds ruim buiten het grondgebied Brugge ligt. Er zijn geen andere publieke filtermetingen van lange duur beschikbaar op het grondgebied Brugge, waardoor locatie C toch ook beschouwd werd in de analyse voor bijkomend inzicht.

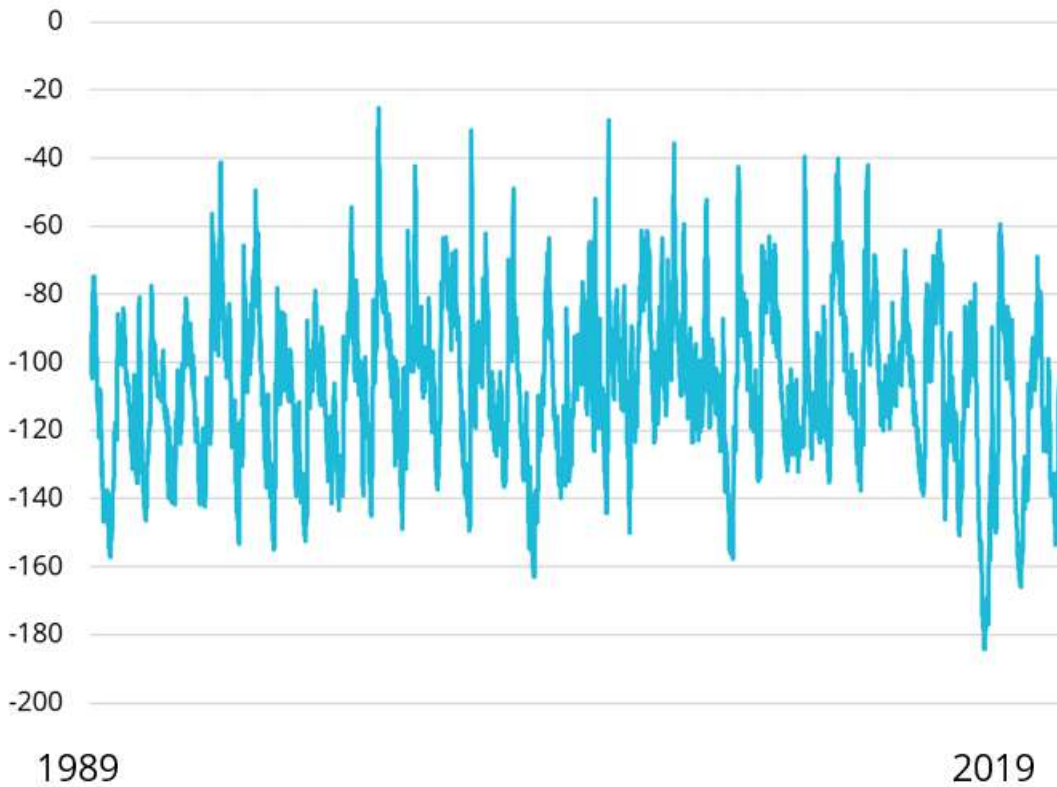
3.5.2 Resultaten

Figuur 36 toont de locaties waar grondwaterstanden opgevolgd worden in en rond Brugge door VMM. Vooraleer het toekomstig klimaat te onderzoeken, is het relevant om kort terug te kijken naar de voorbije droogteperiodes, aangezien deze een beeld schetsen van de mogelijk "normale" toestanden in de toekomst.



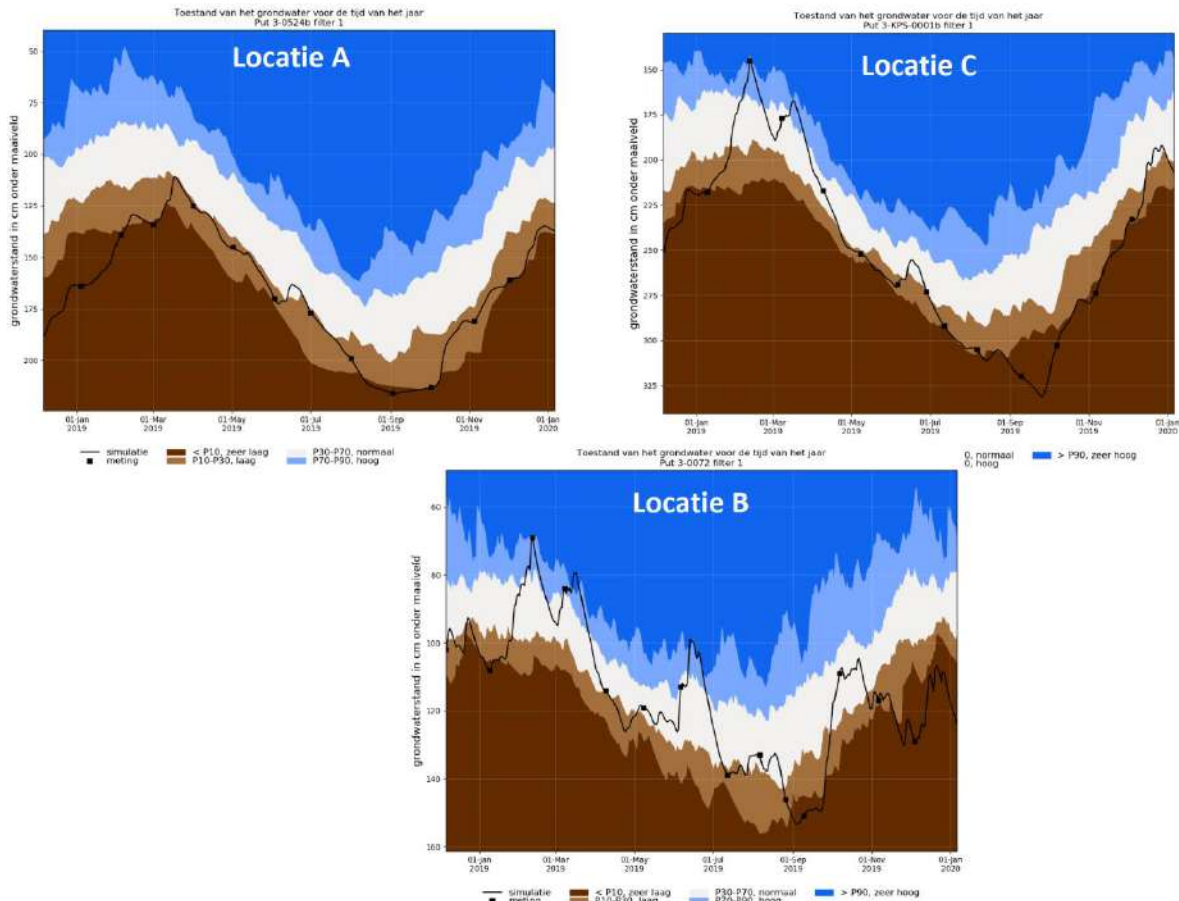
Figuur 36: Overzicht van de locaties waar de grondwaterstand opgevolgd wordt door VMM in en rond Brugge.

Figuur 37 toont de meetreeks van de grondwaterstand op locatie B sinds de start van de meting in 1989. De verticale as toont de diepte van het grondwater onder het maaiveld. Op basis van deze meetreeks is er **geen langetermijntrend waarneembaar**. De grondwaterstanden lijken te fluctueren rond een gemiddelde waarde van 1 m-mv. **Wel valt op dat de grondwaterstanden van 2017, 2018 en ook 2019 significant lager liggen**, en alleszins behoren tot de 5 jaren met laagst gemeten grondwaterstanden in de afgelopen 30 jaar. Naar alle waarschijnlijkheid heeft dit te maken met de lagere neerslaghoeveelheden gemeten in die jaren, en niet zozeer (bijkomende) grondwatercaptaties. Dit kan echter niet met zekerheid vastgesteld worden op basis van de gegevens zonder een meer gedetailleerde modellering.



Figuur 37: Gemeten grondwaterstanden in Brugge van 1989 tot heden (locatie B).

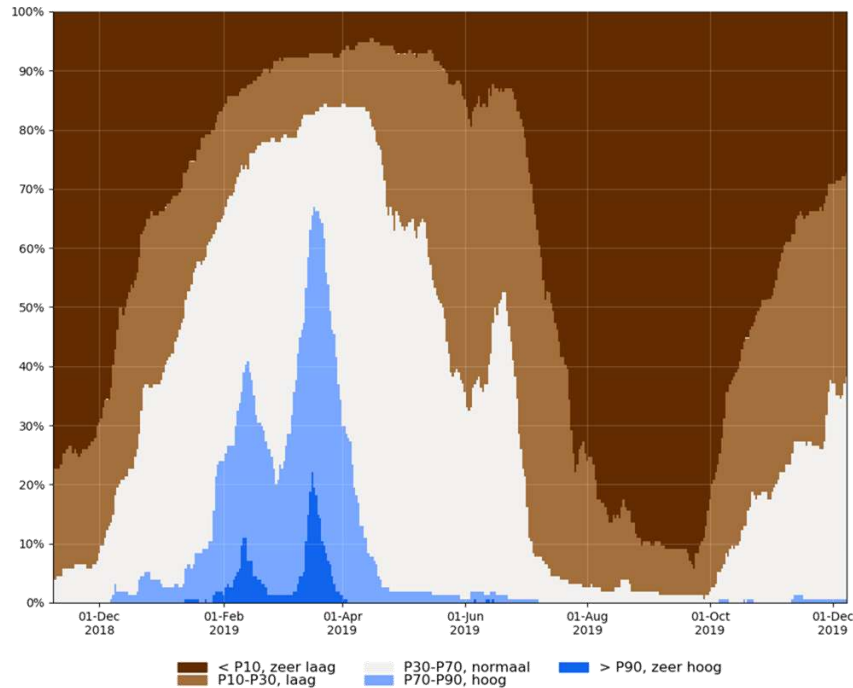
Figuur 38 toont de grondwaterstandsmetingen op locaties A, B en C (aangeduid op Figuur 36) van eind 2018 tot eind 2019. De zwarte lijn geeft de meting aan, terwijl de gekleurde banden aangeven welke grondwaterstanden voor die specifieke meetplaats normaal of extreem (droog of nat) zijn. Wanneer de zwarte lijn in een donkerbruin gebied loopt, bijvoorbeeld, is er sprake van een extreem lage grondwaterstand voor de tijd van het jaar. Een "extreme" toestand komt hierbij overeen met een percentiel 10-waarde, wat betekent dat slechts in 10% of minder van de (historische) metingen een lagere grondwaterstand geregistreerd werd op dat ogenblik van het jaar. Deze classificatie houdt dus rekening met seizoensvariaties. Uit is af te leiden dat de **grondwaterstanden in 2019 vaak "laag" (percentiel 30) of "extreem laag" waren**, met een kortstondig herstel tot "normale" of zelfs "natte" condities in februari-maart 2019 op locaties B en C (meer naar het noorden in Brugge), en herstel in juni en begin oktober op locatie B. **Ter hoogte van locatie A (Sint-Michiels) is de grondwaterstand jaarrond "laag" tot "zeer laag" gebleven voor de tijd van het jaar.**



Figuur 38: Gemeten grondwaterstanden in en rond Brugge op 3 locaties (zie Figuur 36), telkens vergeleken met de langjarige statistieken.

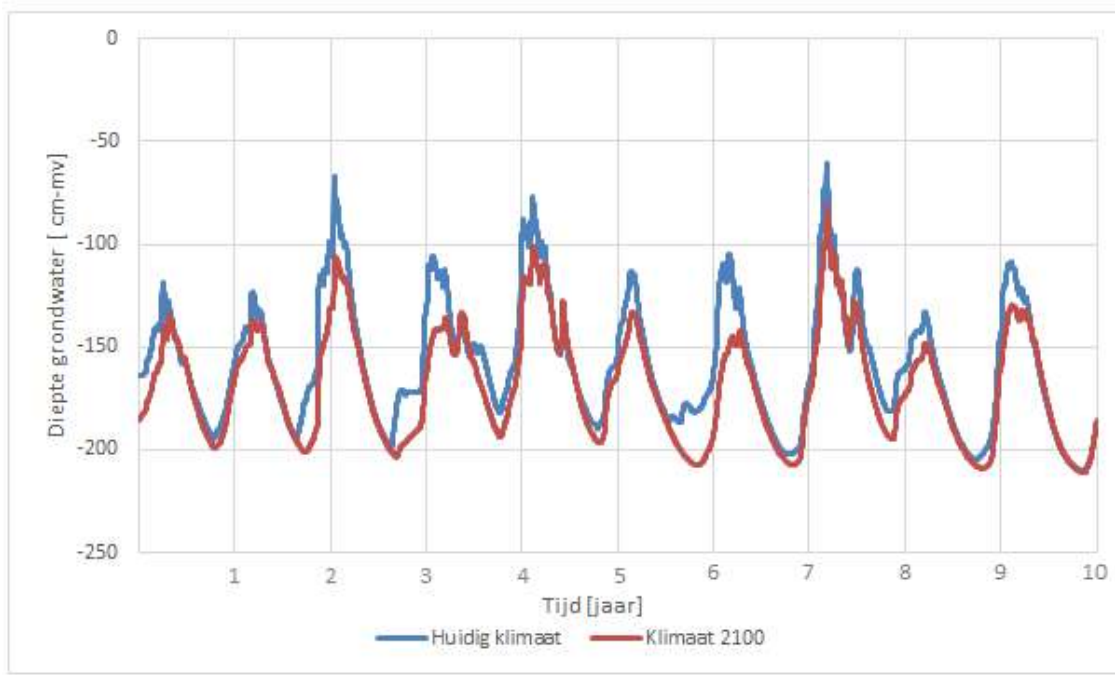
De stadsdiensten hebben geen weet van drooggevallen freatische winningen in de zomers van '17, '18 en '19 in sector oost. In sector west, daarentegen, is sprake van een verdrogingsprobleem in de buurt van de tunnelconstructies langs de gewestweg in Sint-Andries. Vooral de regio rond de Velodroomstraat wordt volgens inwoners en stadsdiensten getroffen door verdroging. Mogelijks wordt er constante drainage toegepast op de tunnelconstructies, die het grondwaterpeil significant verlagen. Het ontwerp van de tunnelconstructies omvat de bouw van buffers (zodat dergelijke drainage niet nodig is), maar het is niet zeker of deze ook correct gebruikt worden. Dit dient nagevraagd te worden bij de beheerders.

Deze lokale metingen in Brugge kunnen ook vergeleken worden met de globale toestand in gans Vlaanderen. Figuur 39 toont het droogteverloop op vlak van grondwater over gans Vlaanderen van eind 2018 tot eind 2019. De figuur toont het aantal meetlocaties in Vlaanderen die in een bepaalde droogteklasse vallen, van "extreem lage grondwaterstand" (donkerbruin, percentiel 10) tot "extreem nat" (donkerblauw, percentiel 90). Hieruit blijkt dat de geobserveerde grondwaterstanden in Brugge in lijn liggen met de rest van Vlaanderen. Er zijn enkele kortstondige afwijkingen waarneembaar, maar deze zijn niet significant en wellicht gerelateerd aan lokale neerslag.



Figuur 39: Droogteverloop van grondwaterstanden in gans Vlaanderen van eind 2018 tot eind 2019. Een donkerbruine kleur wijst op "extreem lage" grondwaterstanden.

Tot slot werd de waterdiepte gesimuleerd op locatie A (ter hoogte van Tillegembos). Figuur 40 toont de gesimuleerde grondwaterdiepte voor het huidige en toekomstig klimaat voor 10 opeenvolgende jaren. Voor het toekomstig klimaat werd het "laag klimaatscenario" gebruikt, dat lage neerslaghoeveelheden in de zomermaanden omvat. Dit "laag" klimaatscenario (in terminologie van de MIRA klimaatscenario's) geeft dus de hoge-impacts op vlak van beschikbaar water, en is dus het "strengste" uit de beschouwde scenario's op vlak van droogte. Uit de simulaties blijkt dat de grondwaterstand met gemiddeld 10 cm lijkt te dalen. In sommige periodes is een sterkere daling waarneembaar dan anderen. **Deze resultaten zijn echter niet te veralgemenen naar andere locaties binnen het grondgebied Brugge, aangezien deze daling zeer sterk afhankelijk is van de bodemeigenschappen. Een daling van 10 cm is significant voor Brugge, omdat de grondwaterstanden relatief ondiep zijn en de daling van 10 cm het beschikbare water voor opname door planten sterk kan verminderen. In bijzonder heeft dergelijke daling een grote impact op grondwatergebonden vegetaties, die bijvoorbeeld talrijk in de meersengebieden voorkomen. Ook kan kwel verminderen of zelfs wegvallen door dergelijke daling.**



Figuur 40: Gesimuleerde waterdiepte ter hoogte van Locatie A voor 10 willekeurige jaren voor het huidig en toekomstig klimaat.

3.6 Droogte: bodemvocht

Met bodemvocht wordt het water in de bovenste meter van de bodem bedoeld. Deze waterlaag is van belang voor alle niet-diepwortelende gewassen, zoals de meeste landbouwteelten en uiteenlopende soorten vegetatie.

3.6.1 Berekeningswijze

Momenteel worden voor heel Vlaanderen droogtekaarten opgesteld die focussen op bodemvocht, in het kader van het project "Kwantificering en kartering van droogte in Vlaanderen met hydrologische modeltoepassingen" dat uitgeschreven werd door de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). De resultaten hiervan waren bij het uitvoeren van deze studie nog niet beschikbaar, waardoor er hier gekozen werd voor het gebruik van een eenvoudige droogte indicator die echter als proxy beschouwd kan worden van het bodemvocht. Dit moet toelaten om op een eenvoudige manier een indicatie te geven van de toename van zowel frequentie als duur van droogte in de toekomst.

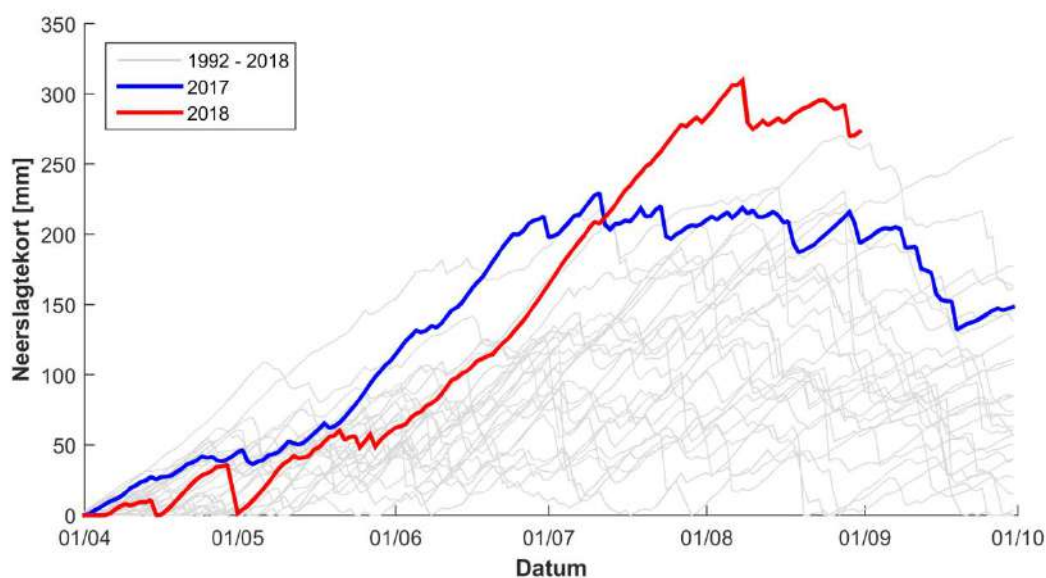
De droogte-proxyindicator (VMM, 2018a) maakt gebruik van het "doorlopend potentieel neerslagtekort of -overschot". Dit wordt berekend als het verschil tussen de hoeveelheid gevallen neerslag en de hoeveelheid potentiële verdamping. Dit verschil wordt vervolgens gesommeerd over alle dagen tussen 1 april en 30 september, d.i. de hydrologische zomer. Het vergelijken van deze som over verschillende zomers laat toe om een beeld te krijgen van het neerslagoverschot of -tekort. Deze droogte-proxyindicator is geldig voor gans het grondgebied van Brugge.

Daarnaast is het neerslagtekort berekend voor verschillende klimaatscenario's met tijdshorizonten 2030, 2050 en 2100. De hierbij gebruikte klimaatscenario's zijn afgeleid volgens het MIRA2015-klimaatrapport en dus ook conform met de scenario's gebruikt in deze studie. In een eerste stap van de analyse werd het neerslagtekort berekend voor het huidige klimaat en de toekomst op basis van respectievelijk historische metingen en klimaatscenario's. Vervolgens werden de grafieken van het neerslagoverschot voor de toekomst vergeleken met de historische, om na te gaan hoe de

frequentie van extreme droogtecondities in de toekomst zal verschuiven. Stel bijvoorbeeld dat het neerslagtekort dat momenteel eens om de 20 jaar voorkomt, in de toekomst samen valt met een lijn die gemiddeld om de 10 jaar voorkomt, dan kan besloten worden dit soort situaties zich in de toekomst tweemaal zo veel kunnen voordoen. Door dit uit te voeren voor meerdere terugkeerperiodes kan men een indicatie bekomen van de frequentie waarmee extreme en minder extreme droogte zich in de toekomst zullen voordoen.

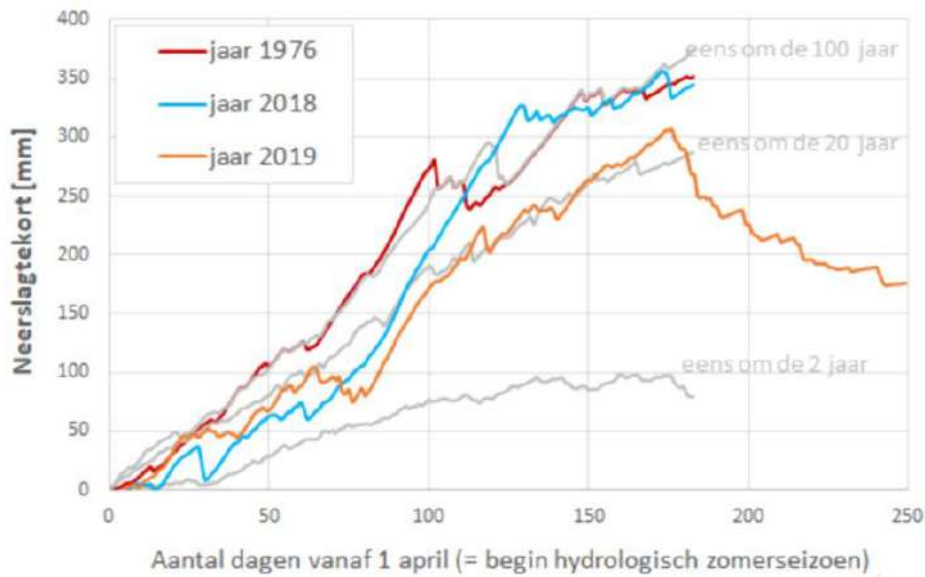
3.6.2 Resultaten

Figuur 2 toont de evolutie van het neerslagtekort in de buurt van Brugge voor de laatste 26 jaar. De recente droge zomers van 2017 en 2018 zijn in het vet aangeduid, aangezien beide uitzonderlijk waren en nog vers in het geheugen liggen. Gemiddeld wordt tijdens de beschouwde zomers een neerslagtekort van ongeveer 175 mm opgebouwd. In de zomer van 2017 schommelde het neerslagtekort meerdere maanden tussen 200 en 210 mm. Het neerslagtekort in 2018 bouwde zich iets trager op, o.a. door de neerslag in april en begin mei, maar bereikte in de eerste week van augustus een maximale waarde van meer dan 300 mm. **In de beschikbare metingen is de zomer van 2018 de droogste zomer.**



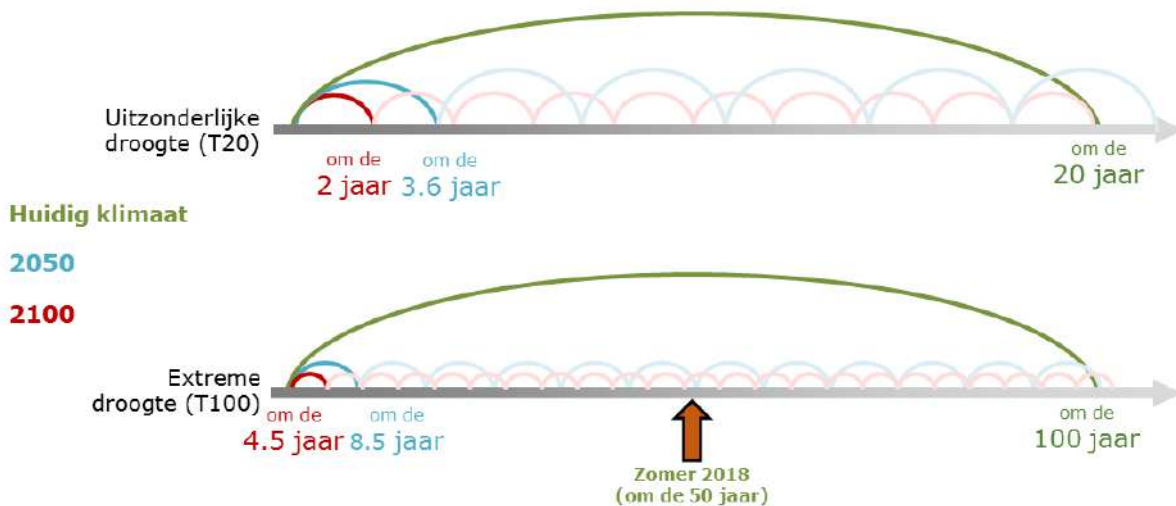
Figuur 2: Evolutie van het neerslagtekort in West-Vlaanderen tijdens de zomermaanden (april t.e.m. september) van 1992 tot 2018. De recente droge zomers van 2017 en 2018 zijn in kleur aangeduid.

Figuur 3 toont de langetermijnstatistieken berekend op basis van de metingen van het KMI in Ukkel. Voor Ukkel zijn langetermijnreeksen van 100 jaar beschikbaar, waardoor ook extremere situaties beter gekaderd kunnen worden. Hierbij zijn de zomers van 2018 en 2019 ter indicatie aangeduid. Hieruit blijkt dat, in het historisch klimaat, **de zomer van 2017 zich gemiddeld eens per 20 jaar voordoet, de zomer van 2018 een herhalingstijd heeft van 50 à 100 jaar, en de zomer van 2019 zich ook eens per 20 jaar voordoet.** Bijgevolg waren er 3 extreme zomers op rij op vlak van droogte. In het toekomstig klimaat zullen deze periodes van droogte vaker en vaker voorkomen (zie ook verder in deze paragraaf).



Figuur 3: Langetermijnstatistieken van neerslagtekorten in Vlaanderen, met aanduiding van de zomers 2018 en 2019.

Figuur 4 en Tabel 5 tonen de resultaten van de simulaties voor het toekomstig klimaat (2050 en 2100) voor terugkeerperiodes 2, 5, 20 en 100 jaar. Een droogte die in het huidige klimaat eens om de 20 jaar voorkomt, zal tegen 2050 elke 3 à 4 jaar voorkomen, en tegen 2100 elke 2 jaar. **Een extreme droogte met herhalingsstijd van 100 jaar, zal zich tegen 2050 elke 8 à 9 jaar kunnen voordoen, en tegen 2100 zelfs elke 4 à 5 jaar.** Met andere woorden, de droogteperiodes zoals die van 2017, 2018 en 2019 komen zeer frequent voor, en worden, op lange termijn, mogelijk zelfs het nieuwe "normaal".



Figuur 4: Verandering van de herhalingsstijd van uitzonderlijke en extreme droogte fenomenen.

Tabel 5: Verschuiving van de frequentie van extreme droogtecondities, voor de drie klimaatscenario's tegen 2030, 2050 en 2100, ten opzichte van het huidige klimaat.

Huidig klimaat	Jaar 2030	Jaar 2050	Jaar 2100
T2	1.7 jaar	1.4 jaar	1.1 jaar
T10	3.8 jaar	2.7 jaar	1.5 jaar
T20	5.4 jaar	3.6 jaar	2.0 jaar
T100	13.3 jaar	8.4 jaar	4.4 jaar

3.7 Droogte: oppervlaktewaterbeschikbaarheid

Als derde droogte-effect werd de oppervlaktewaterbeschikbaarheid onderzocht. Dit is de hydrologische aanvoer naar waterlopen, en de beschikbaarheid van water in regenwaterputten zoals die typisch in Vlaanderen voorkomen.

3.7.1 Berekeningswijze

Voor het begroten van **de hydrologische aanvoer** naar waterlopen in het huidig en toekomstig klimaat is gebruik gemaakt van **neerslagafstromingsmodellen**. Dit zijn relatief eenvoudige modellen die het neerslagafstromingsproces op gebiedsschaal modelleren en daarbij neerslag en verdamping gebruiken als randvoorwaarden. Het resultaat hiervan is een tijdreeks van debieten in de waterlopen. De parameters die ze hiervoor gebruiken, hebben geen directe link met de werkelijkheid. Ze kunnen echter wel geïnterpreteerd worden als een soort samenvatting van de gebiedseigenschappen (bv. reliëf, bodemtextuur, ...) die een invloed hebben op het neerslagafstromingsproces. Voor de gebieden die bijdragen aan het oppervlaktewater in en rond Brugge werden door het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse Overheid een aantal conceptuele neerslagafstromingsmodellen gekalibreerd (Leyssen et al., 2015). Deze modellen en hun parameters zijn hier gebruikt om in te schatten in hoeverre de beschikbare hoeveelheden oppervlaktewater zullen dalen. Er is hierbij gekeken naar het gemiddelde cumulatieve volume per hydrologische zomer. Dergelijke modellen waren niet beschikbaar voor de oppervlaktewaters in de polders. Poldersystemen reageren anders, en zijn meer gecorreleerd aan directe neerslag. Daarom is het, voor de polders, relevanter om te kijken naar de droogteproxy zoals voorgesteld in §3.6.

De provincie West-Vlaanderen maakte daarnaast een **waterbalansanalyse** op de polders langs de kust in het kader van het Interreg-project SCAPE (Provincie West-Vlaanderen, 2018). Hiertoe werd een massabalansmodel opgemaakt dat de waterbehoefte, -gebruik en het -aanbod analyseert voor het huidig en het toekomstig klimaat. De belangrijkste resultaten van deze studie werden overgenomen in voorliggende risico- en kwetsbaarheidsanalyse.

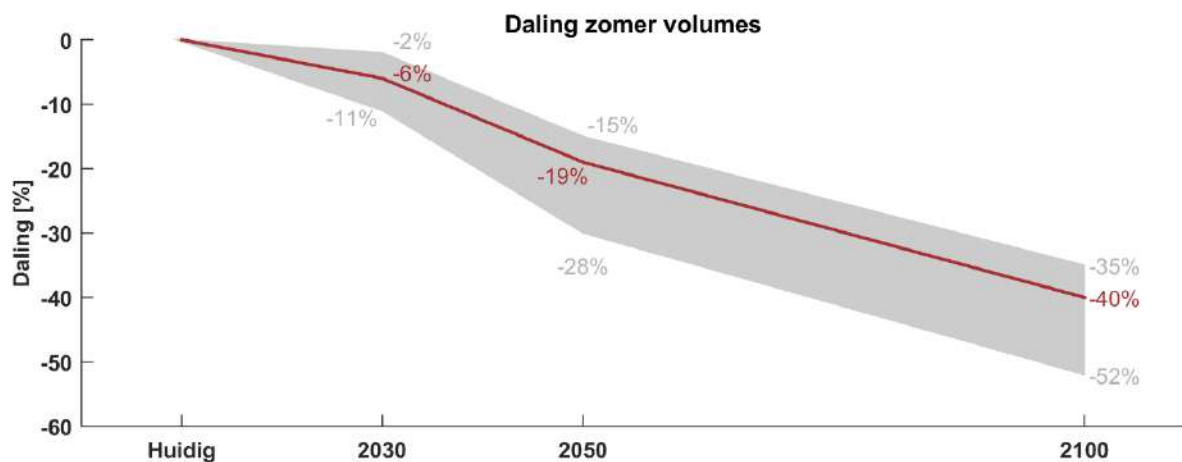
Voor het begroten van de waterbeschikbaarheid in **regenwaterputten** voor het huidig en toekomstig klimaat is gebruik gemaakt van de rekentool Sirio. Deze rekentool laat toe om langetermijnstatistieken te berekenen voor bronmaatregelen, waaronder bijvoorbeeld regenwaterputten en infiltratievoorzieningen. Hiertoe wordt een continue neerslag- en verdampingsreeks van 100 jaar gesimuleerd, en vervolgens statistisch geanalyseerd. Voor deze analyse zijn 2 "typische" configuraties gesimuleerd: een regenwaterput met een inhoud van 5.000 en 10.000 liter, telkens met een aangesloten dakoppervlakte van 80 m² en een verwacht hergebruik van 120 liter/dag. De resultaten zijn samengevat in §3.7.2.

3.7.2 Resultaten

3.7.2.1 Hydrologische aanvoer Kerkebeek en omgeving

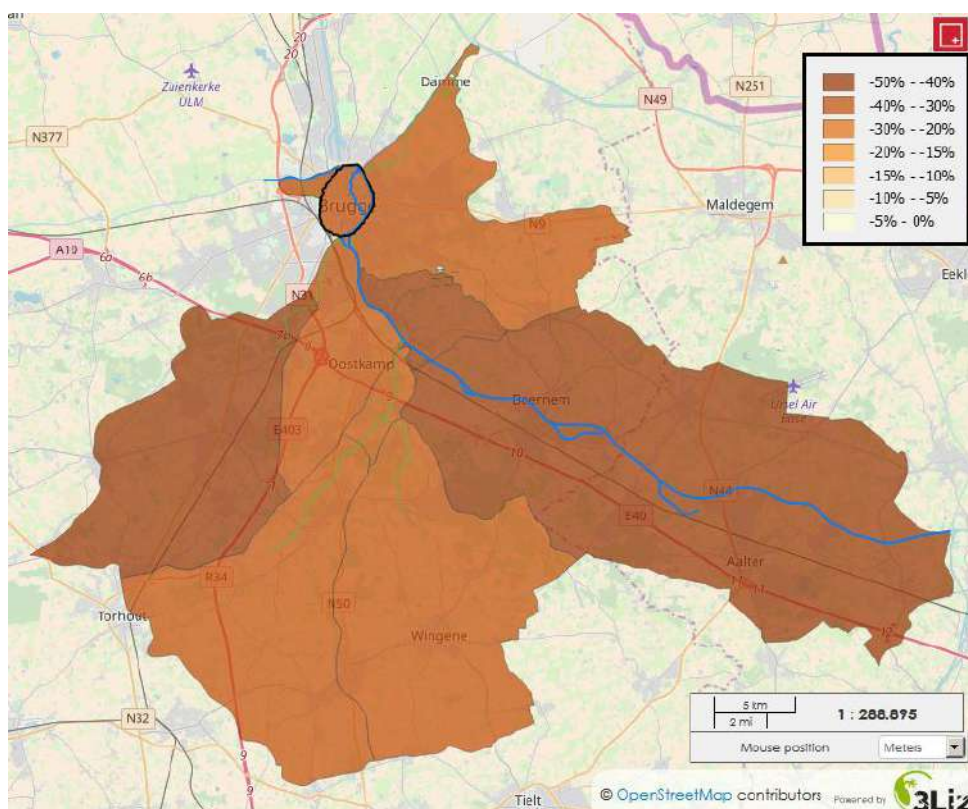
Figuur 41 toont de te verwachten afname van de zomervolumes voor 2030, 2050 en 2100 voor de waterlopen die niet in de polders gelegen zijn. Deze cijfers werden berekend op basis van de hydrologische modellen, zoals beschreven in §3.7.1.

De daling van de afstromingsvolumes is gekwantificeerd door voor elke hydrologische zomer (april t.e.m. september) het cumulatieve afstromingsvolume te berekenen. Vervolgens is van al deze zomers het gemiddelde genomen, zodat voor elk scenario één waarde overblijft. Deze waarde is vervolgens gebruikt om de procentuele verandering tussen de verschillende scenario's te berekenen. De resultaten hiervan zijn samengevat in Figuur 41. Voor 2030, 2050 en 2100 wordt telkens de minimale, de maximale en de gemiddelde daling getoond. Deze dalingen zullen nl. verschillen over de beschouwde gebieden omwille van verschillen in bijvoorbeeld landgebruik en bodemsamenstelling. De resultaten tonen dat **tegen 2050 een gemiddelde daling van 19 % verwacht wordt, welke kan toenemen tot 40 % in 2100**. Merk ook op dat de spreiding van de daling over de verschillende gebieden toeneemt naarmate er verder in de toekomst gekeken wordt.



Figuur 41: Afname waterbeschikbaarheid in de zomermaanden: procentuele daling van het gemiddelde cumulatieve volume.

Figuur 42 toont dezelfde resultaten, maar dan ruimtelijk verdeeld, voor de stroomgebieden die rechtstreeks afwateren naar het grondgebied Brugge.



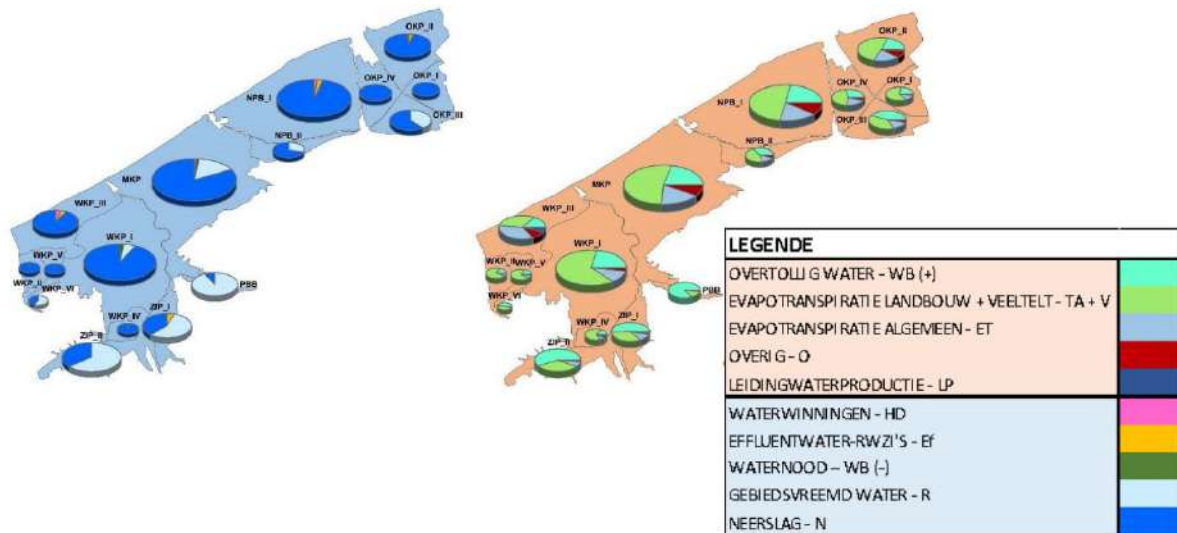
Figuur 42. Daling van het cumulatieve neerslagafstromingsvolume in de zomer in het 2100 scenario, t.o.v. het huidige klimaat. Gemiddeld wordt een daling met 40 % verwacht.

3.7.2.2 Waterbeschikbaarheid kustpolders

Provincie West-Vlaanderen maakte een waterbeschikbaarheidsanalyse op voor de kustpolders (Provincie West-Vlaanderen, 2018). Figuur 43 toont het wateraanbod en de –vraag voor de polders in de periode 2013-2017. Hieruit blijkt dat voor de polders op Brugs grondgebied (Oostkustpolder – deel III, Oostkustpolder – deel IV, en Nieuwe Polder van Blankenberge – deel I; respectievelijk afgekort als OKP-III, OKP-IV en NPB-I) de waterbeschikbaarheid quasi uitsluitend uit lokale neerslag bestaat. Enkel voor het Kanaal Gent-Oostende is er aanvoer van zonevreemd water (dat in tijden van droogte echter in hoofdzaak nodig is om de bevaarbaarheid te garanderen), en aan het Boudewijnkanaal is er effluent van de RWZI Brugge (dat echter ook in hoofdzaak gevoed wordt door neerslag, maar in tijden van droogte wel een constante droogweerafvoer levert). De watervraag bestaat voor het overgrote deel uit verdamping van landbouw en overig groen.

Prognoses opgemaakt in de studie geven aan dat er bijna een verdubbeling verwacht kan worden van de waternood (effectieve watertekorten voor captaties of inlaten) van 8 mm in het huidig klimaat naar 14 mm in het toekomstig klimaat van 2100. Dit in combinatie met een verwachte toename in beroeps- en pleziervaart, en waterbehoefte van natuur en landbouw maakt duidelijk dat ingezet moet worden op een effectief droogtebeleid om de risico's niet verder te laten oplopen.

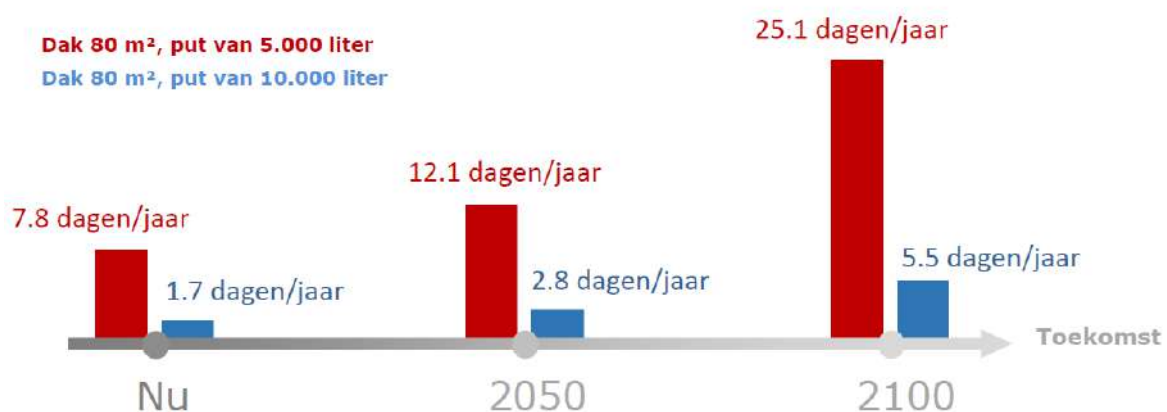
Het leidingwater in Brugge wordt door Farys in hoofdzaak aangevoerd vanuit het binnenland, en een kleiner aandeel vanuit het buitenland. Deze beperktere waterbeschikbaarheid in de polders heeft dus geen *directe* impact op leidingwaterproductie, maar kan mogelijks wel een *indirect* negatief effect hebben doordat meer oppervlaktewater vanuit het binnenland aangevoerd moet worden naar de polders in de toekomst.



Figuur 43: Overzicht van het wateraanbod (links) en de -vraag (rechts) voor de periode van 2013-2017 per polder.

3.7.2.3 Waterbeschikbaarheid regenwaterputten

Figuur 44 toont het gesimuleerd aantal dagen dat een particuliere regenwaterput leeg zal staan in een gemiddeld jaar, en dit voor het huidig klimaat en het klimaat in 2050 en 2100. Twee configuraties worden getoond: een regenwaterput met inhoud 5.000 en 10.000 liter, telkens met een aangesloten dakoppervlakte van 80 m² en een verwacht hergebruik van 120 liter/dag. **Uit de resultaten blijkt dat het aantal dagen met leegstand kan toenemen met ongeveer 40% tegen 2050, en een verdrievoudiging tegen 2100.** Voor hemelwaterputten met een grootte van 10.000 liter blijkt het aantal dagen leegstand zelfs onder het toekomstig klimaat beperkt: slechts 5.5 dagen per jaar. Voor hemelwaterputten van grootte 5.000 liter neemt het aantal dagen leegstand echter toe tot 25 in een gemiddeld jaar.



Figuur 44: Verwacht aantal dagen leegstand in een gemiddeld jaar van een particuliere regenwaterput.

3.8 Hittestress en temperatuurstijging

Hittegolven zijn in Europa de meest dodelijke weerextremen (Forziero et al., 2017). **De stijgende temperaturen zullen in de toekomst leiden tot een toename van het aantal, de duur en**

de intensiteit van hittegolven. Deze toename zal meer uitgesproken en sterker voelbaar zijn in dicht bebouwde gebieden. Het stedelijk hitte-eilandeffect zorgt er namelijk voor dat de temperatuur in steden gemiddeld enkele graden hoger ligt dan in landelijke omgevingen en dat het er 's nachts trager en dus minder afkoelt. In steden worden er bovendien meer (kwetsbare) personen blootgesteld aan de hogere temperatuur, waardoor ze extra gevoelig zijn voor dit klimaateffect. Naast de hittestress zullen de toegenomen temperaturen ook leiden tot een daling van de luchtkwaliteit, met eveneens negatieve gevolgen voor de volksgezondheid. Deze daling van de luchtkwaliteit zal ook in de steden het sterkst zijn, doordat de luchtverontreiniging onvoldoende verdund kan worden in smalle straten met hoge bebouwing.

3.8.1 Berekeningswijze

In het kader van het VMM-MIRA Hittekaartproject (Lauwaet et al., 2018) werden door VITO hittekaarten aangemaakt voor het Vlaamse en het Brussels hoofdstedelijke gewest. Hiervoor werd gebruik gemaakt van het stedelijke klimaatmodel *UrbClim*. Dit model berekent temperaturen voor volledig Vlaanderen bij een resolutie van 100m bij 100m. Deze relatief fijne resolutie laat toe om het lokale klimaat te simuleren en een onderscheid te maken tussen stedelijk en landelijke gebieden. Het model maakt hiervoor gebruik van tijdreeksen van grootschalige meteorologie en detailkaarten over het lokale terrein. Op basis van de modelresultaten kunnen inschattingen gemaakt worden over onder andere het aantal hittegolven, het aantal hittegolfdagen, maandgemiddelde temperaturen, en dergelijke.

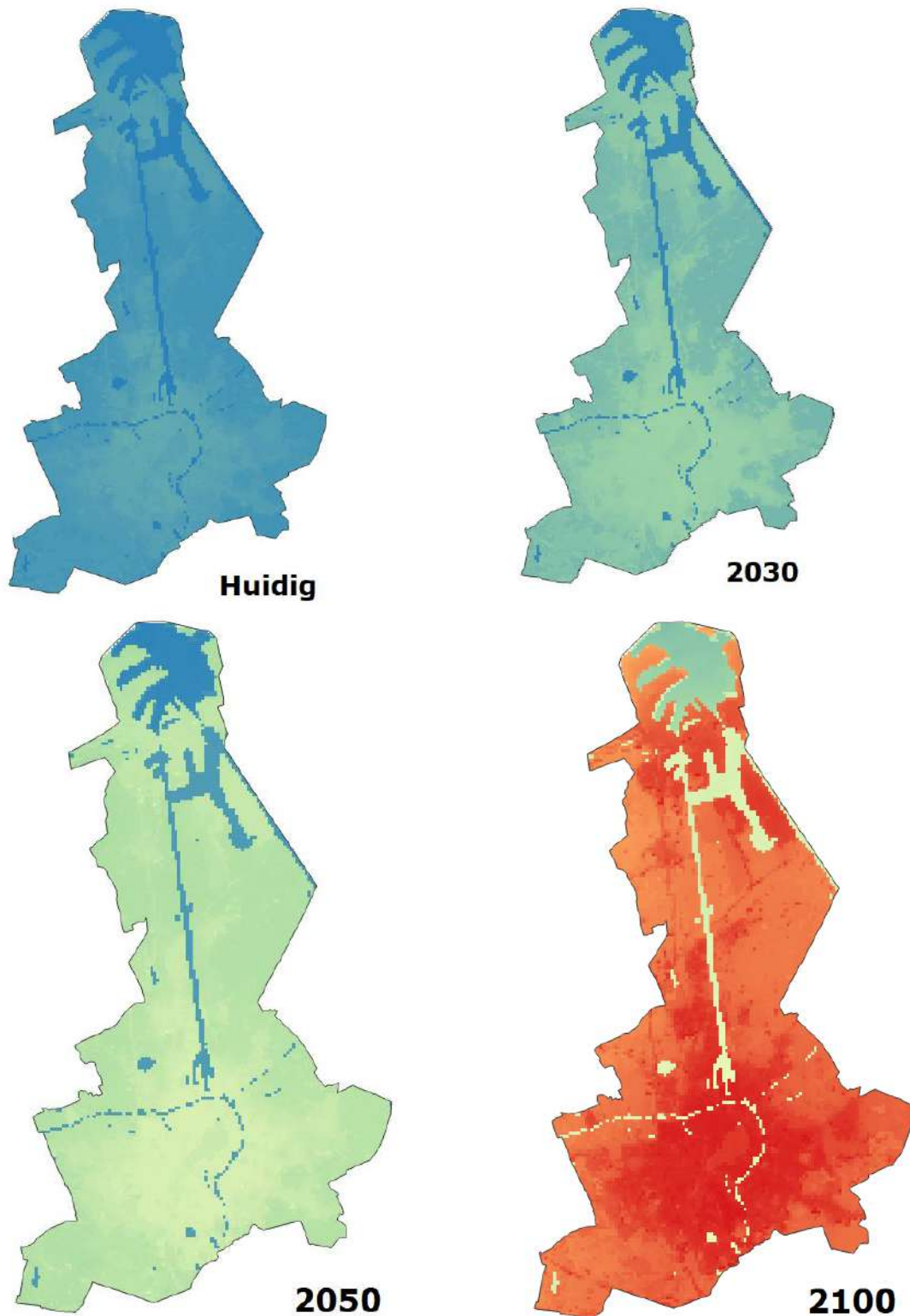
Het model werd in eerste instantie gebruikt om alle warme periodes (april tot september) tussen 2000 en 2016 door te rekenen. De resulterende kaarten dienen als referentie voor de huidige situatie, waarmee projecties voor de toekomst vergeleken kunnen worden. Ze tonen een duidelijk het verschil tussen stedelijke en landelijke gebieden en de regionale verschillen tussen bv. de kust en de provincie Limburg. Vervolgens werden ook kaarten aangemaakt voor toekomstprojecties voor de korte (2030), middellange (2050) en lange termijn (2100), op basis van klimaatscenario's uit het MIRA rapport en prognoses over het ruimtegebruik. Deze klimaatscenario's werden aangeleverd door de KU Leuven en zijn in overeenstemming met de scenario's die hierboven toegelicht werden.

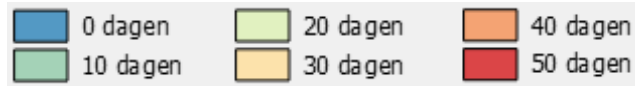
3.8.2 Resultaten

Figuur 45 en Figuur 46 tonen de resultaten van het VMM-MIRA Hittekaart project voor grondgebied Brugge, en ingezoomd op de historische binnenstad. De kaarten tonen respectievelijk het gemiddelde aantal hittegolfdagen per jaar, en de gemiddelde temperatuur tijdens de zomermaanden. Een hittegolf wordt hierbij gedefinieerd op basis van de specifieke gezondheidsdrempels voor ons land: een periode van minstens drie opeenvolgende dagen met een gemiddelde minimumtemperatuur hoger dan 18.2 °C en een gemiddelde maximumtemperatuur hoger dan 29.6 °C.

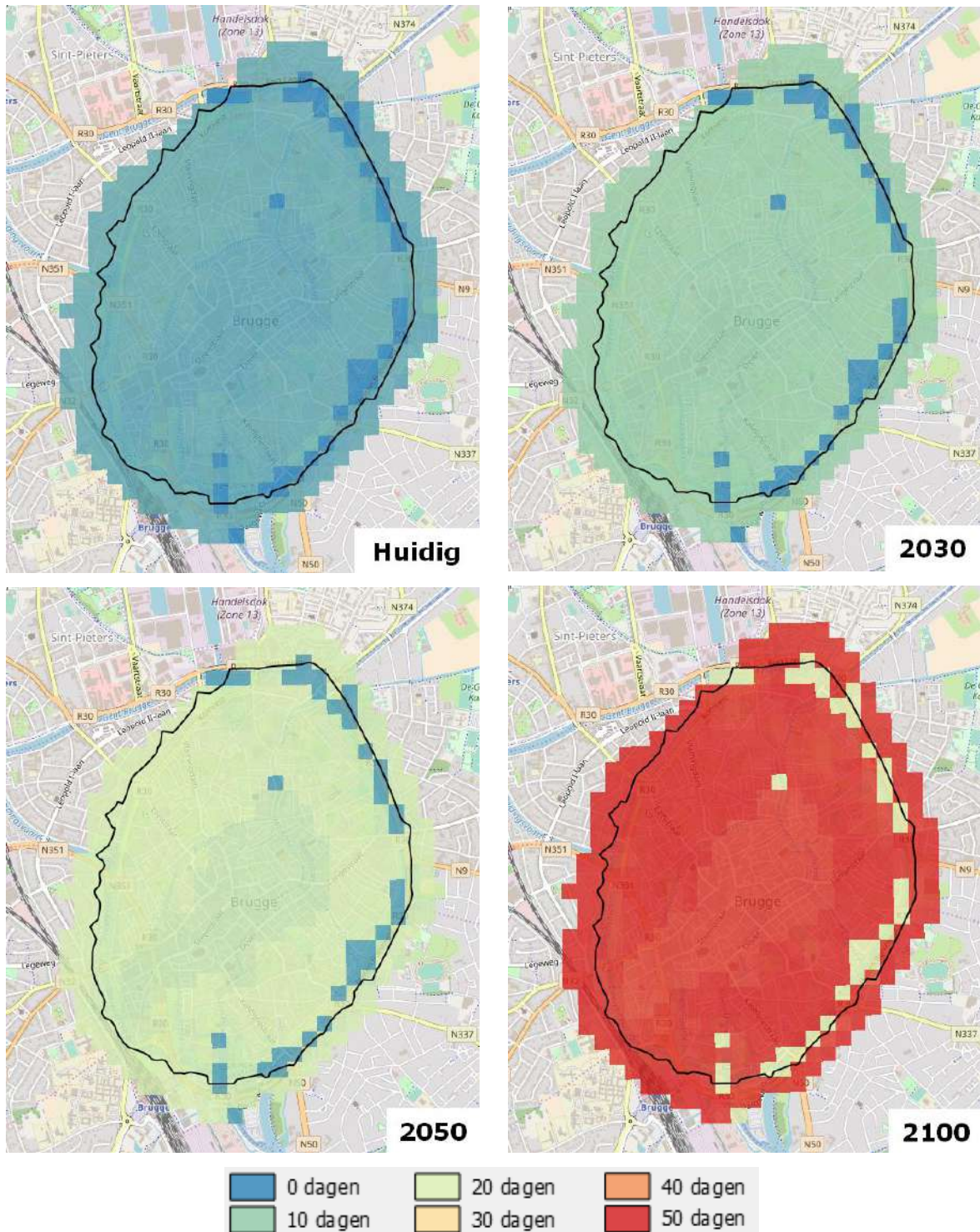
Uit de analyses blijkt dat het aantal hittegolfdagen significant toeneemt ten gevolge van klimaatverandering. Het gemiddeld aantal hittegolfdagen per jaar bedraagt in het huidig klimaat ongeveer 2 à 3 in de groene buitengebieden, en 5 in meer verstedelijkt gebied (waar een hogere verhardingsgraad is). **In de toekomst wordt een stijging gesimuleerd naar gemiddeld 11, 19 en 48 hittegolfdagen per jaar voor respectievelijk 2030, 2050 en 2100 in het verstedelijkt gebied.** In het buitengebied is de relatieve toename gelijkaardig, maar het aantal dagen blijft beperkter tot gemiddeld 7, 14 en 42. Vooral rond water is de temperatuur lager. Er is geen groot temperatuurverschil waarneembaar tussen de kust en het binnenland. Dit ligt in lijn met waarnemingen op uitzonderlijk hete dagen, zoals bijvoorbeeld in juli 2019. De kaarten op Figuur 45 tonen de ruimtelijke spreiding van de hittestress. Figuur 46 zoomt in op het historisch centrum. Het historisch centrum heeft iets hogere kenmerken dan het verstedelijkt gebied in de rand, maar ligt in lijn met de hierboven beschreven resultaten. De hittestresseffecten zijn quasi uniform verdeeld. Enkel aan het Minnewater en langs de Vesten zijn lagere temperaturen waarneembaar.

Figuur 47 en Figuur 48 tonen de **gemiddelde zomertemperatuur** voor respectievelijk gans het grondgebied Brugge, en het historisch centrum. De gemiddelde temperatuur tijdens de zomermaanden schommelt in het huidige klimaat rond 18.7 °C in verstedelijkt gebied. Deze gemiddelde temperatuur zal verder kunnen stijgen naar **20.3 °C, 21.7 °C en 24.9 °C voor de voorspellingshorizonten van 2030, 2050 en 2100**. In de buitengebieden blijft de temperatuuroename eerder beperkt tot 19,5°C, 20,9°C en 24°C.

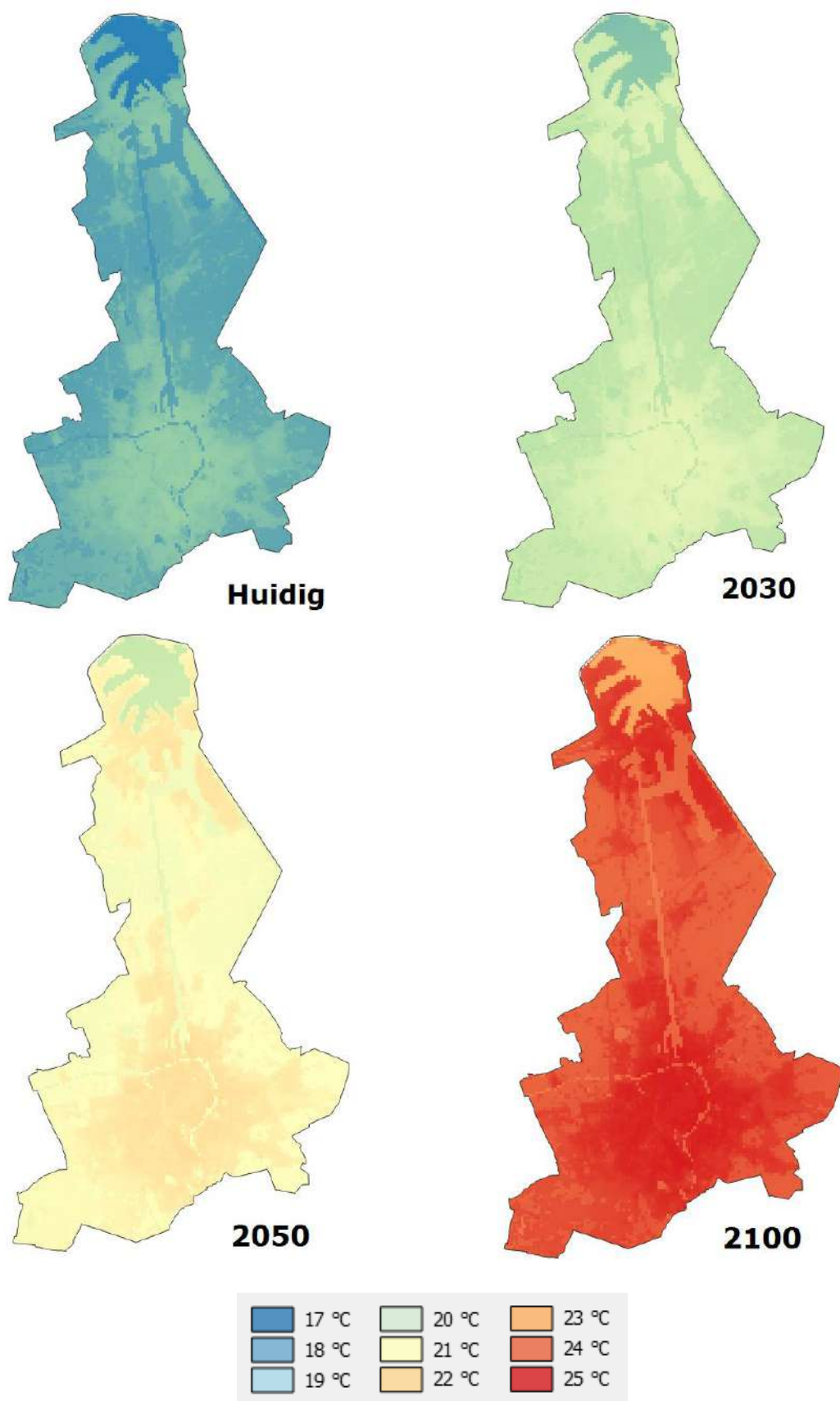




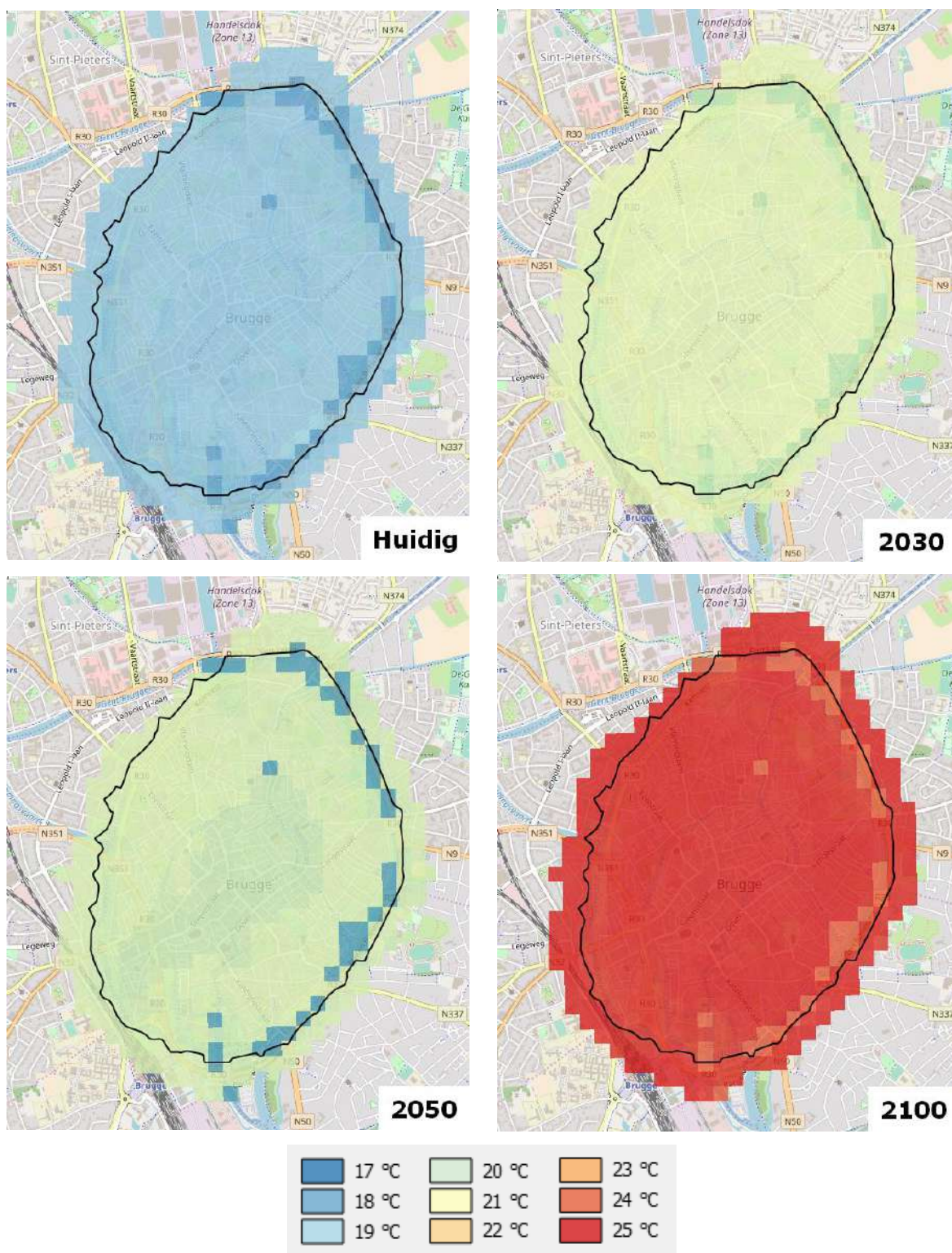
Figuur 45: Hittestresskaarten: gemiddeld aantal hittegolfdagen per jaar in het huidige klimaat (linksboven) en toekomstprojecties voor korte (2030), middellange (2050) en lange (2100) termijn.



Figuur 46. Hittestresskaarten: gemiddeld aantal hittegolfdagen per jaar in het huidige klimaat (linksboven) en toekomstprojecties voor korte (2030), middellange (2050) en lange (2100) termijn. De historische binnenstad van Brugge is met zwart omlijnd.



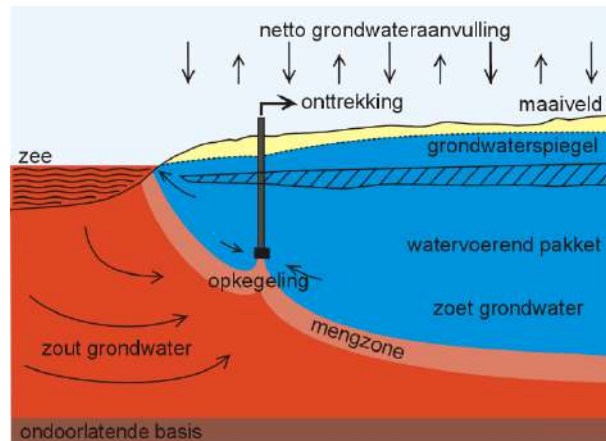
Figuur 47: Hittestresskaarten: gemiddeld temperatuur in de zomer in het huidige klimaat (linksboven) en toekomstprojecties voor korte (2030), middellange (2050) en lange (2100) termijn.



Figuur 48. Hittestresskaarten: gemiddeld temperatuur in de zomer in het huidige klimaat (linksboven) en toekomstprojecties voor korte (2030), middellange (2050) en lange (2100) termijn. De historische binnenstad van Brugge is met zwart omlind.

3.9 Verzilting

Grondwater in poldergebieden bestaat uit een opeenvolging van zoete, brakke en zoute grondwaterlagen (zie Figuur 49). Dit zoute water is waarschijnlijk een overblijfsel van zeewater dat achtergebleven is in de bodem nadat de zee zich in de loop der eeuwen stelselmatig terugtrok. Bovenop deze zoute grondwaterlagen zijn vervolgens zoete grondwaterlagen ontstaan door het infiltrerende regenwater. Wanneer de grens tussen zout en zoet water dichterbij de oppervlakte komt te liggen, spreken we van verzilting.

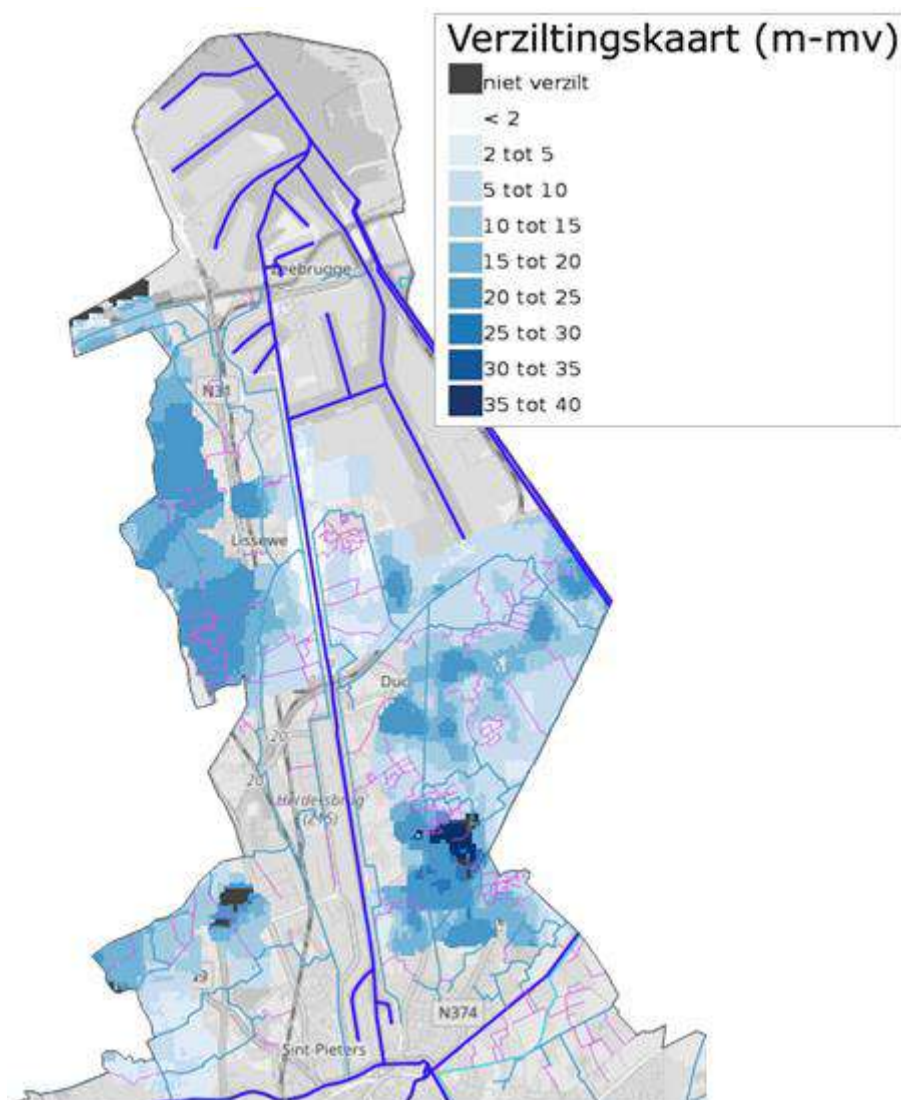


Figuur 49. Schematische weergave van verzilting in poldergebieden (Deltares, 2018).

Om de verzilting volledig in kaart te brengen, wordt eerst de historische evolutie beschreven in §3.9.1, en vervolgens wordt een inschatting gemaakt van de mogelijke toekomstige evoluties in §3.9.2.

3.9.1 Historische evolutie

Recent werd uitvoerig onderzoek gedaan naar de zoet-zoutwaterverdeling in de Vlaamse polders, o.a. via het Interreg TOPSOIL-project (waarin o.a. VMM participeert) en studies van het Departement Landbouw & Visserij (Zwaenepoel et al., 2016). **Beide studies concluderen dat de zoet-zoutwaterverdeling aan de Belgische kust vrij stabiel en goed gekend is.** In het kader van het TOPSOIL-project werden er uitgebreide metingen gedaan in 2014 en 2017 via helikoptervluchten om de verzilting in kaart te brengen. Het Brugs grondgebied en Heist werden voornamelijk gekarteerd tussen 2 en 4 april 2014 via een SkyTEM survey. Die resultaten zijn beschreven in Schaars (2014), Vandeveld et al. (2014) en VMM (2016). Deze projecten resulteerden in de verziltingskaart getoond in Figuur 50. Hierop is te zien dat de zoute laag zich op sommige locaties al op 2m-mv bevindt in de polders, maar op andere locaties pas start op 35 m-mv of dieper. Belangrijker is dat deze grens stabiel lijkt te zijn over de voorbije decennia. Vergelijking met de "oude" verziltingskaarten zoals opgesteld in de jaren '60 geeft een goede overeenkomst aan. Er is, zo concludeert het TOPSOIL project, **geen indicatie op grote veranderingen op vlak van verzilting van het grondwater in de afgelopen decennia, behalve in de achterhaven van Zeebrugge waar opgehoogde havengronden zorgen voor bijkomende zilte kwel in de lageregelegen polders (zie verder).** Een exacte vergelijking is niet mogelijk tussen beide kaarten, aangezien andere methodes gebruikt werden, en de oude kaart minder gedetailleerd is.

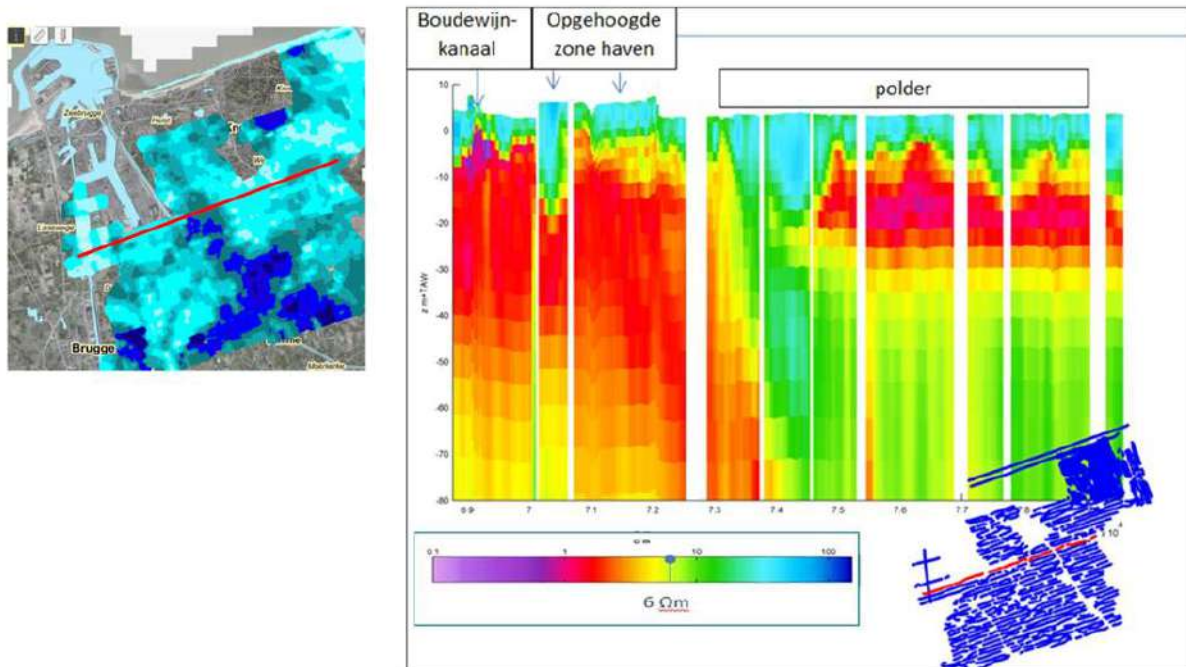


Figuur 50: Verziltingskaart, opgeleverd door het TOPSOIL project.

Op Brugs grondgebied zijn er evenwel **enkele evoluties waargenomen in verziltion** (o.a. VMM, 2016). De situatie wordt geschetst aan de hand van Figuur 51. Deze worden per gebied apart besproken. Aan de **westelijke oever van het Boudewijnkanaal** werden de bevindingen van de oude verziltionskaart bevestigd door de nieuwe metingen: zowel op de linker- als rechteroever van het kanaal wordt het grensvlak zoet-zout ondiep aangetroffen (zie ook Figuur 50 voor een preciezere weergave). Door obstakels was het niet mogelijk om per helikopter de situatie zeer grondig in kaart te brengen, en bijkomend onderzoek is dus aangewezen. Ter hoogte van Witte Molen en Monnikenwerve worden geen belangrijke verschillen waargenomen ten opzichte van de oude kaarten. De verziltionssituatie is op die locaties dus stabiel te noemen. Ter hoogte van hoeve Ter Doest tot aan de Herdersbrug is de verziltion op de westelijke oever echter breder: hier is een strook van 600 meter met ondiep grensvlak waargenomen, terwijl deze zone op de oude verziltionskaarten beperkter was. Dit kan echter ook verklaard worden doordat de oude kaart minder meetpunten had in deze zone, en dus mogelijks onnauwkeuriger was. Deze zone komt overeen met het natuurreservaat Ter Doest, waar ook zilte kwel voorkomt.

Aan de **achterhaven en in Dudzele** worden twee effecten waargenomen: **in het opgehoogd havengebied wordt een zoetere situatie vastgesteld dan vroeger, en een ziltere situatie voor het natuurreservaat Dudzeelse polder**. Het verzoeten van het opgehoogd havengebied is logisch, aangezien er zoetwaterlenzen ontstaan door infiltratie van hemelwater en een hoger drainageniveau. In het aanpalende lagergelegen gebied, in dit geval dus de Dudzeelse polder,

ontstaat zilte kwel. Het ondieper gemeten grondvlak geeft aan dat ook de polders gelegen ten zuiden van de achterhaven (ten noordoosten van Dudzele dorp) onderhevig lijken aan zilte kwel. Deze processen (verzoeting van opgehoogd havengebied en het ontstaan van zilte kwel) was reeds eerder voorspeld via modelsimulaties, en worden nu ook bevestigd door de metingen.



Figuur 51: Verziltingsprofiel dwars op het Boudewijnkanaal (VMM, 2016). Verzilting zorgt voor een verhoogde elektrische geleidbaarheid, en dus lagere weerstand. De paarse en rode zones op de rechterfiguur wijzen dus op meer verzilting. De linkerfiguur heeft een gelijkaardige kleurenlegende als Figuur 50

Samenvattend kan gesteld worden dat het Brugs grondgebied weinig zoetwaterlenzen kent. De belangrijkste zoetwaterlenzen bevinden zich ter hoogte van Lissewege, Dudzele-dorp en Kruisabele-Koolkerke. Er is een duidelijke relatie met het voorkomen van kreekruggronden, die mogelijks ingeschakeld kunnen worden om infiltratie te bevorderen. Het Boudewijnkanaal heeft door zijn hoog waterpeil en zilte waterkwaliteit de potentie om de nabije omgeving te verzilten. De situatie lijkt echter stabiel te zijn, maar bijkomend onderzoek is nodig om uitsluitsel te bieden (VMM, 2016). De belangrijkste evoluties op vlak van verzilting zijn waarneembaar in de achterhaven van Zeebrugge. Door de opgehoogde zones zijn zoetwaterlenzen ontstaan die bijkomende kweldruk creëren in het aanpalend poldergebied, waardoor daar meer zoute kwel voorkomt.

In de sectoren oost en west is verzilting nauwelijks aan de orde. Dit wordt ook bevestigd door de stadsdiensten tijdens interviews.

3.9.2 Toekomstig klimaat

Klimaatverandering kan die delicate balans tussen zoet- en zoutwater verstoren. Het zoete water in de bovenste lagen van de bodem kan onder druk komen te staan wanneer er onvoldoende water infiltreert in de bodem en door een stijgende zeespiegel. De zoete grondwaterlaag zal hierdoor verdunnen en de grens tussen zout en zoet water stijgt, wat niet wenselijk is.

Als gevolg van langdurige droogte zullen **grondwaterlagen onvoldoende aangevuld worden** en kan de hoeveelheid zoet water in de bodem dalen. Het zoute water kan hierdoor verder infiltreren vanuit zee en de grens tussen zout en zoet water stijgt richting het oppervlak. Om verzilting tegen

te gaan worden momenteel reeds grote volumes water vanuit het kanaal Gent-Oostende en de Damse vaart naar de polders gestuurd. Hiervoor wordt het peilbeheer zodanig ingesteld dat het water in de kanalen hoger ligt dan de grondwaterstanden in de omgeving, zodat water kan infiltreren (Baguis et al., 2012). Verwacht wordt dat dit in de toekomst moeilijker wordt, als gevolg van de dalende hoeveelheden oppervlaktewater. Tijdens zeer droge periodes wordt nu soms al zoute kwel geobserveerd in de polders. Gedetailleerde studies hierover zijn momenteel echter nog niet beschikbaar, waardoor het moeilijk is om hier concrete cijfers op te plakken.

Naast droogte zal **ook de zeespiegelstijging als gevolg van klimaatverandering een invloed hebben op de verzilting in de polders**. Omwille van de hogere druk vanuit zee zal er een stroming van zout water onder de zoetwaterlagen ontstaan. Dit zorgt voor een opwaartse stroom van zout water, waardoor het zoete water via grachten en beken zal wegstromen. Het resultaat hiervan is eveneens een versmalling van de zoete grondwaterlagen en een afname van de zoetwatervoorraden. Lebbe en Claus (2012) onderzochten de invloed van de zeespiegelstijging op verzilting in het grensgebied van de provincies Oost- en West-Vlaanderen en Zeeuw-Vlaanderen. Ze maakten hiervoor gebruik van een grondwatermodel dat vertrekt van de bodemsamenstelling en de topografie. **Zelfs in het worst case scenario, met een veronderstelde zeespiegelstijging van 85 cm per eeuw, blijft de invloed van zeespiegelstijging op verzilting beperkt**. Enkel in een smalle strook langsheen de Nederlandse en Vlaamse kust wordt een migratie van het zoutfront over 200 à 300 m landinwaarts voorspeld.

Naast bovenstaande factoren kunnen ook grote infrastructuurwerken, zoals bijvoorbeeld de geplande nieuwe zeeluis in Zeebrugge, een significante impact hebben op de verzilting. De realisatie van het Boudewijnkanaal en terreinophogingen in de haven hebben reeds een impact gehad op verzilting, zoals ook besproken in §3.9.1.

4 Risico's en kwetsbaarheden

4.1 Inleiding

De gevolgen van de veranderende klimaateffecten op de maatschappij en ecosystemen noemen we de **klimaatimpacts: de socio-economische gevolgen van de veranderende klimaattoestanden en klimaateffecten op onze samenleving**. In dit hoofdstuk zijn de verschillende socio-economische en ecologische kwetsbaarheden voor het grondgebied Brugge in kaart gebracht. Voor deze kwetsbaarheidsanalyse worden de ruimtelijke kaarten met klimaateffecten, zoals berekend in het vorige hoofdstuk, gecombineerd met geografische data van verschillende sectoren en domeinen. Opnieuw dient opgemerkt te worden dat de analyse uitgaat van kaarten die onze huidige maatschappij weergeven. Projecties over toekomstige veranderingen, zoals bijvoorbeeld landgebruik en bevolkingsdichtheid, worden buiten beschouwing gelaten. De analyse zal dus vooral de kwetsbaarheden onder klimaatverandering aanduiden, wanneer er geen werk wordt gemaakt van adaptatiemaatregelen.

De bespreking van de impacts van klimaatverandering op de maatschappij en samenleving is onderverdeeld per sector. De volgende sectoren werden geselecteerd voor dit rapport:

- Gezondheid en welzijn
- Schade aan gebouwen
- Infrastructuur
- Werk en economie
- Energie en drinkwater
- Natuur en milieu
- Toerisme en recreatie

Voor elke sector zijn een aantal indicatoren geselecteerd, waarmee een beeld wordt geschetst van de impacts van één of meerdere veranderende klimaateffecten op die bepaalde sector. Waar mogelijk wordt deze beschrijving verder tastbaar gemaakt met cijfermateriaal. Als uitgangspunt wordt vertrokken van het huidige klimaat, waarbij telkens een vergelijking wordt gemaakt met het hoog impact scenario. Indien onvoldoende kwantitatieve informatie beschikbaar is om te vergelijken, blijft de beschrijving beperkt tot een kwalitatieve beschrijving van de mogelijke toekomstige veranderingen.

De impacts van de veranderende klimaateffecten op de verschillende sectoren worden in de volgende secties voornamelijk in grote lijnen beschreven. Hiernaast werd eveneens een digitale kaartenatlas ontwikkeld. Deze atlas bundelt de kaarten met klimaateffecten (zie hoofdstuk 3) en kaarten met geografische informatie zoals landgebruik, bevolkingsdichtheid, openbare locaties, infrastructuur, enzovoort. Door het combineren van deze kaarten kan men een beter ruimtelijk inzicht krijgen in de klimaatimpacts, blootstellingsrisico's begroten en potentieel kwetsbare locaties aanduiden.

4.2 Gezondheid en welzijn

Dat de veranderende klimaateffecten een impact zullen hebben op de samenleving, en dus ook op de gezondheid en het welzijn van de inwoners, is onvermijdelijk. Extreme situaties (overstromingen, droogte, hittegolven, ...) zullen meer frequent en meer extreem voorkomen en bijgevolg meer personen treffen. In deze sectie wordt getracht om aan te geven in welke mate de bevolking getroffen wordt door elk klimaateffect. Dit gebeurt door het kruisen van enerzijds de kaarten met klimaateffecten uit het vorige hoofdstuk en anderzijds de demografische informatie. Deze informatie geeft de bevolkingssamenstelling weer (man, vrouw, leeftijd, ...) op schaal van de stadskwartieren of statistische sectoren. Er wordt bij de verschillende indicatoren telkens een

onderscheid gemaakt tussen het totale aantal en het aantal kwetsbare personen die getroffen worden.

4.2.1 Blootstelling aan wateroverlast

Wateroverlast wordt opgesplitst in (1) overstromingen door intense neerslag (riolerings-overstromingen of pluviale overstromingen), (2) overstromingen langs rivieren (de zogenaamde fluviale overstromingen) en (3) kustoverstromingen. Elk wordt hieronder apart behandeld.

Niet iedereen kan even goed omspringen met de gevolgen van wateroverlast. **Sommige personen zijn hier meer kwetsbaar voor**, omdat ze het moeilijker hebben om zich uit de voeten te maken, of omdat ze meer tijd en middelen nodig hebben om ervan te herstellen. Deze kwetsbare personen omvatten o.a. ouderen (65+) en alleenstaanden die meer moeite hebben om hun huis en inboedel te beschermen; kinderen en mindervaliden die afhankelijk zijn van anderen om zich te verplaatsen; en arme mensen die financieel onder druk komen te staan na het oplopen van schade. Verder kunnen mensen die geregeld te maken krijgen met overstromingen ook last ondervinden van stress, angst en depressies (Coninx et al., 2016).

4.2.1.1 Wateroverlast als gevolg van intense neerslag

Uit de analyse van klimaattoestanden bleek dat **overstromingen ten gevolge van intense neerslag** veel vaker kunnen voorkomen in de toekomst (zie ook §3.2.2): extreme overstromingen, die nu eens per 100 jaar voorkomen, kunnen tot bijna 20 en 30 keer zo vaak voorkomen tegen respectievelijk 2050 en 2100. Ook de uitgestrektheid van rioleringsoverstromingen kan sterk toenemen: van 469 hectare in het huidig klimaat tot 849 hectare tegen 2100. Mensen die wonen of werken in de buurt van locaties die vatbaar zijn voor overstromingen vanuit de rioleringen zullen hier hinder van ondervinden. Dit gaat vooral om schade, bijvoorbeeld door het onderlopen van kelders, maar ook om het onderbreken van dagelijkse activiteiten, de mogelijke chaos en de nasleep ervan. **De toename van zeer intense neerslagbuien in de zomer zal er toe leiden dat meer mensen risico lopen op wateroverlast:** ofwel door de toegenomen frequentie ofwel doordat gebieden die momenteel nog niet getroffen worden, in de toekomst wel getroffen kunnen worden.

Het is moeilijk te bepalen hoeveel mensen getroffen kunnen worden door dit type wateroverlast. Vaak zijn zeer lokale terreingegevens, zoals de aanwezigheid van een drempel of boordsteen, bepalend of er sprake is van "schade". Daarom wordt de cijfermatige impactanalyse beperkt tot het aantal kwetsbare instellingen, zoals ziekenhuizen, crèches, scholen en woonzorgcentra, die wellicht geïmpacteerd zullen worden. Dergelijke sites zijn vaak immers groter, en hun toegankelijkheid is cruciaal voor een goed functioneren. **In het huidig klimaat worden 6 "kwetsbare instellingen" getroffen door buien die eens per 10 jaar voorkomen, en tegen 2100 loopt dit aantal op tot 25.** De 6 getroffen instellingen in het huidig klimaat zijn uitsluitend crèches. Tegen 2100 worden daarnaast ook 2 woonzorgcentra (Sint-Jozef te Sint-Michiels, en Rvt Jeruzalem in de Stijn Streuvelsstraat), en de scholen KTA en Ter Groene Poorte getroffen. De exacte locaties met gesimuleerde wateroverlast zijn terug te vinden in de digitale kaartenatlas. **Over het algemeen wordt verwacht dat de impact op kwetsbare instellingen beperkt blijft.**

4.2.1.2 Wateroverlast als gevolg van rivieroverstromingen

De risicoanalyse toonde aan dat grote rivieroverstromingen (T100) tot 4 keer vaker kunnen voorkomen tegen 2050 en zelfs 8 keer vaker tegen 2100 dan vandaag. Tegelijk neemt de uitgestrektheid van overstromingen toe. Een 10-jaarlijkse overstroming neemt in omvang toe van 554 hectare tot 1638 hectare tegen 2100 (zie ook §3.3.3). Verschillende van deze zones treffen woonwijken, en kunnen dus een grote impact hebben op het welzijn. **Vooraf woonzones rond de Kerkebeek, Sint-Trudoleken, de Gemene Weidebeek, de regio rond het Julien Saelens sportcentrum, de Welvaartstraat en Invalidestraat, het Wiedauwbos en Sint-**

Pietersmolenwijk blijken gevoelig voor wateroverlast, en mogelijks veel burgers te treffen. Al deze zones zijn gekarteerd in de digitale kaartenatlas.

Enkel al in Sint-Michiels rond de Kerkebeek neemt het aantal woningen die getroffen kunnen worden door een overstroming (T100) toe van 50 adressen in het huidig klimaat, tot 1500 tegen 2100. Het is bijgevolg cruciaal dat gepaste maatregelen genomen worden om enerzijds deze gebieden bijkomend te beschermen tegen wateroverlast, en anderzijds te vermijden dat er nieuwe ontwikkelingen plaatsvinden in gebieden die in het huidig of toekomstig klimaat gevoelig zijn aan wateroverlast. Ook deze gebieden werden gekarteerd.

4.2.1.3 Wateroverlast als gevolg van kustoverstromingen

De overstroomde oppervlakte (T1000) ten gevolge van kustoverstromingen neemt toe van 4450 hectare in het huidig klimaat, tot 6030 hectare tegen 2075 en 7034 hectare tegen 2115 (zie § 3.4). Hiermee overstroomden bijna de volledige deelgemeentes Zeebrugge, Zwankendamme, Dudzele, Sint-Pieters en Koolkerke, en delen van Sint-Jozef en Christus-Koning. **Het spreekt voor zich dat de schade en impact op gezondheid en welzijn niet in te schatten is indien dergelijke gebeurtenis zich voordoet.** Bijgevolg moeten voldoende en robuuste maatregelen getroffen worden om dergelijk scenario te vrijwaren. Het Masterplan Kustveiligheid van de Vlaamse Overheid bevat doelgerichte maatregelen om de kans op overstromingen bij een terugkeerperiode van 1000 jaar te minimaliseren. De cijfers hierboven houden enkel rekening met de zeekering zoals aanwezig in 2015, en dus nog niet met de geplande acties uit het Masterplan Kustveiligheid.

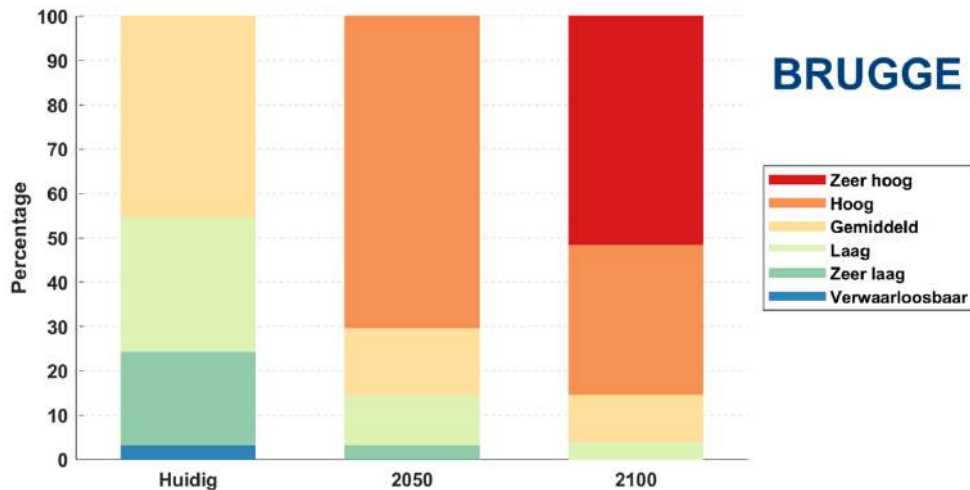
4.2.2 Hittestress

De stijgende temperaturen leiden tot een stijging van het aantal hittegolfdagen en een versterking van het hitte-eilandeffect. Stadscentra zullen meer opwarmen dan landelijke gebieden en bovendien koelt het er 's nachts veel minder af. Omdat mensen veel meer moeite hebben om hitte te verdragen dan bijvoorbeeld koude, kan dit leiden tot een onregelde thermische huishouding en zo hittestress veroorzaken. **Mensen ondervinden last van de hitte en krijgen het daardoor moeilijk om hun dagdagelijkse activiteiten naar behoren uit te voeren.** De mogelijke gevolgen hiervan zijn thermisch ongemak, benauwdheid, zonnslagen, flauwvallen, slapeloze nachten, verminderde concentratie en een toename van het aantal allergieklachten en luchtwegeninfecties. In de zomer van 2019 werden diverse activiteiten in Brugge sterk geïmpacteerd of afgelast. Zo waren er medische interventies nodig op treinstellen, en moesten topsportscholen hun opleiding aanpassen inperken.

Uit cijfers blijkt ook dat hitte leidt tot een disproportionele stijging van het aantal sterfgevallen en ziekenhuisopnames. Vooral oudere mensen zijn extra kwetsbaar voor hittestress, bovendien wonen deze mensen meestal nog in oude gebouwen die slechts beperkt geïsoleerd zijn, waardoor ze dus nog extra last ondervinden van de hitte. Daarnaast zijn ook jonge kinderen en mensen met mentale ziekten kwetsbaar voor de stijgende temperaturen, aangezien zij afhankelijk zijn van anderen om voldoende vocht op te nemen. Tot slot blijkt ook dat hitte kan leiden tot vroeggeboorte bij zwangere vrouwen, waardoor zij meestal ook tot de kwetsbare personen gerekend worden (Brouwers, 2016).

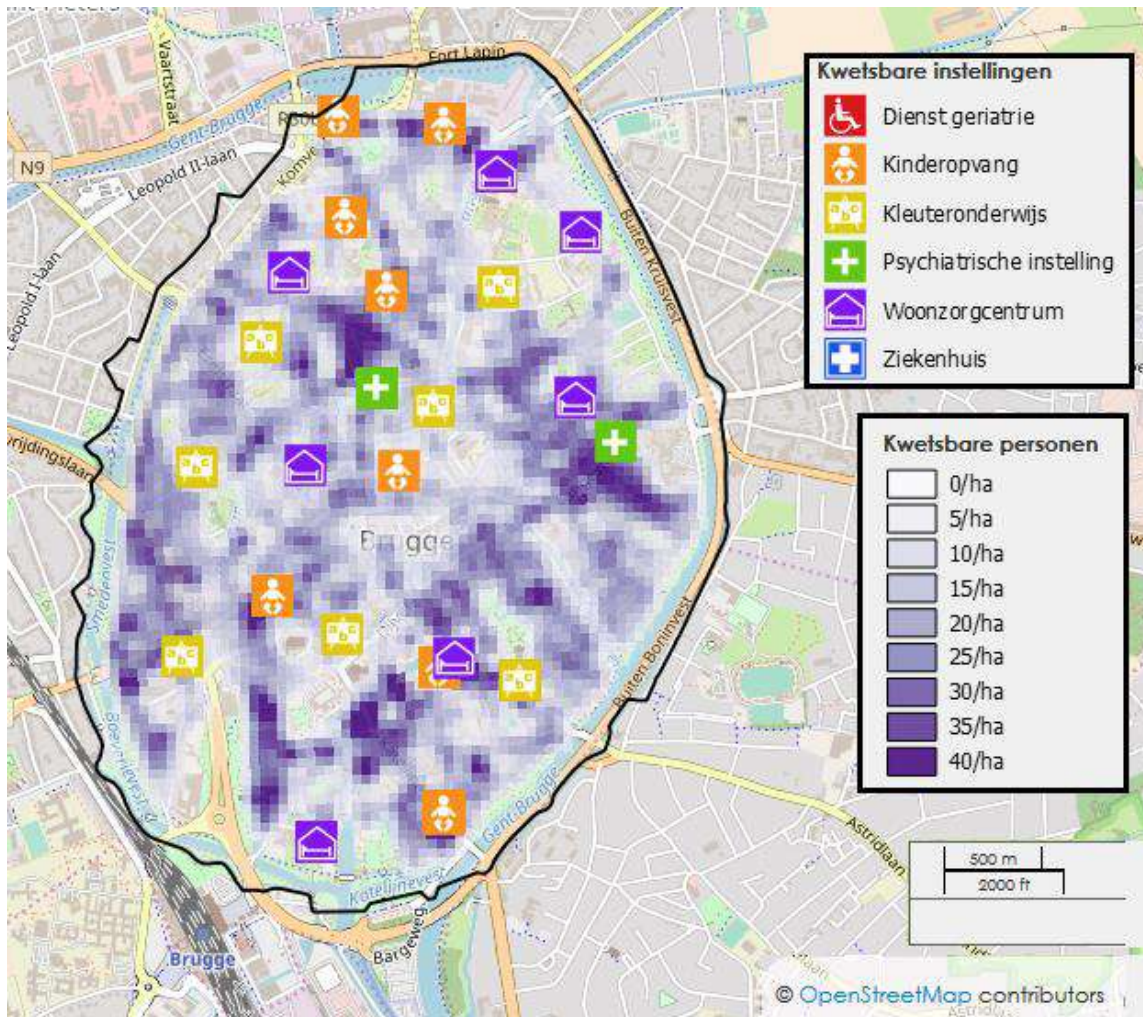
Het blootstellingsrisico aan hittegolven kan berekend worden als een combinatie van bevolkingsdichtheid en het gemiddeld aantal hittegolfdagen per jaar (cfr. Dugord et al., 2014). Op basis van deze analyse werd bepaald hoeveel mensen zich in een bepaalde "risicoklasse" bevinden inzake hittestress. Er werd hierbij geen onderscheid gemaakt tussen kwetsbare en minder kwetsbare bevolkingsgroepen. Figuur 52 toont de resultaten van deze analyse. Hieruit blijkt dat in het huidig klimaat een kleine helft van de bevolking een "gemiddeld" gezondheidsrisico heeft inzake hittestress, circa 30% een "laag" risico, en de overige bevolking een "zeer laag" of "verwaarloosbaar" risico. **In het huidig klimaat blijven de gezondheidsrisico's ten gevolge van hitte dus beperkt. Door klimaatverandering kan dit echter wijzigen, en kan 50% van de bevolking een "zeer hoog" gezondheidsrisico krijgen voor hittestress. Daarnaast loopt**

ongeveer 35% van de bevolking een "hoog" risico. Deze analyses werden herhaald voor de verschillende sectoren op Brugs grondgebied. In **sector Noord liggen de risico's significant lager** (30% "zeer hoog" en 30% "hoog" risico), **maar ook daar lijken maatregelen nodig die deze risico's beperken.** Logischerwijs liggen de risico's in sectoren Oost, West en Centrum hoger dan het gemiddelde van Brugge, hoewel de verschillen klein zijn.



Figuur 52: Relatieve verdeling van de verschillende blootstellingsrisico's voor hitte in het huidig en toekomstig klimaat voor gans het grondgebied Brugge.

Voor het historisch centrum werd een bijkomende analyse uitgevoerd die wel rekening houdt met kwetsbare personen en instellingen. Figuur 53 toont de resultaten van die bijkomende analyse. De kaart is opgesteld door informatie van de statistische sectoren en het centraal referentieadressenebestand (CRAB) te combineren. De kaart maakt bovendien een onderscheid tussen het totale aantal blootgestelde personen en het aantal kwetsbare personen. Deze laatste categorie omvat jonge kinderen (0 tot 5 jaar) en oudere mensen (65+). Tot slot zijn ook de gebouwen met verhoogde concentraties aan kwetsbare personen getoond, zoals kinderopvang, psychiatrische instellingen, ziekenhuizen en woonzorgcentra.



Figuur 53: Overzicht van de personen die extra kwetsbaar zijn voor hitte, in het stadscentrum van Brugge. De kaart toont informatie o.b.v. bevolkingsdichtheid en instellingen met verhoogde concentraties van dergelijke personen.

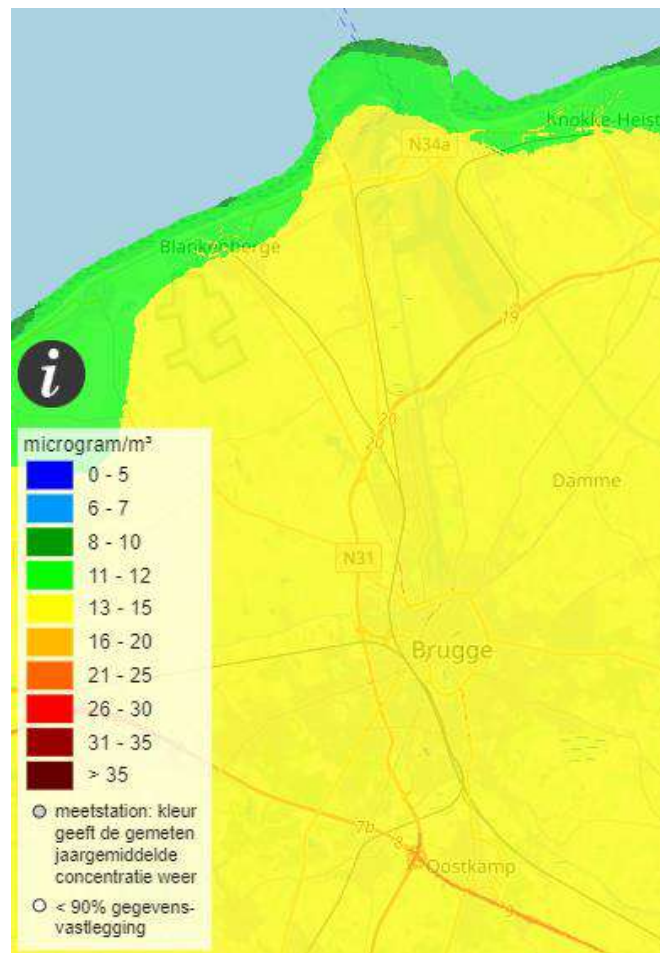
4.2.3 Daling luchtkwaliteit

Luchtverontreiniging bestaat uit een mengsel van verschillende stoffen, waarvan fijn stof, stikstofdioxiden, roet en ozon de belangrijkste zijn. Hoe kleiner de deeltjes, hoe dieper ze kunnen indringen in het menselijke lichaam en hoe schadelijker ze kunnen zijn. Luchtverontreiniging wordt in verband gebracht met diverse gezondheidsklachten. Dit kan gaan om luchtwegklachten, geïrriteerde ogen, vernauwing van de bloedvaten en verstoorde hartslag. Een goede luchtkwaliteit is dus van groot belang voor de gezondheid.

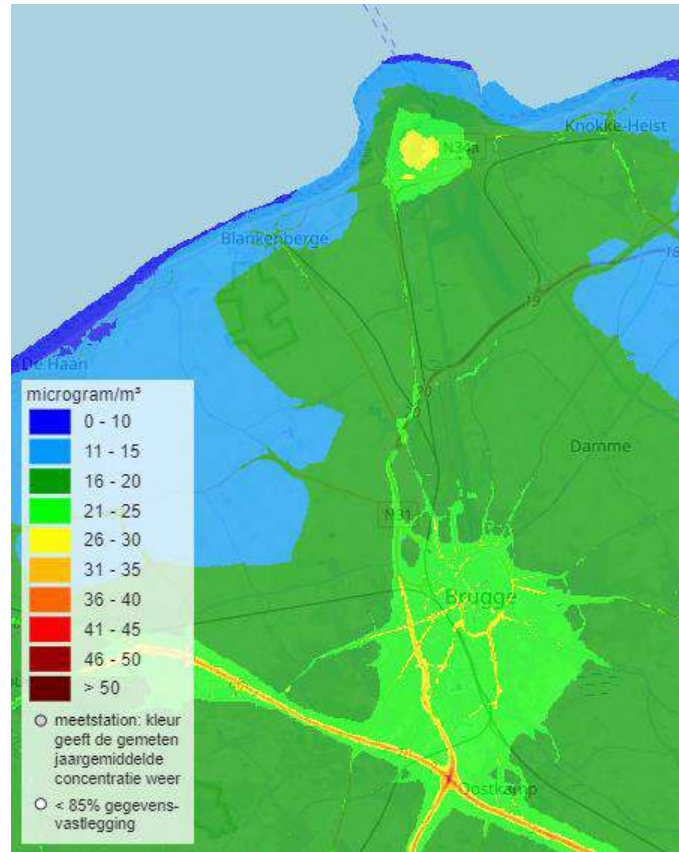
Algemeen wordt aangenomen dat **klimaatverandering de luchtkwaliteit zal verslechteren**, zeker in dichtbevolkte gebieden zoals steden. Dit is te wijten aan het verminderen van de processen die verontreiniging uit de lucht halen (bijvoorbeeld dispersie en neerslag), stijgende temperaturen en door veranderende chemische processen (Fiore et al., 1995). De veranderingen zijn momenteel zelfs al zichtbaar met stijgingen van de bevolkingsgemiddelde fijn stof en ozon concentraties, wanneer het pre-industriële en huidige klimaat met elkaar vergeleken worden (Orru et al., 2017). **Gedetailleerde studies over de impact van klimaatverandering op de luchtkwaliteit in Vlaanderen zijn momenteel nog niet voor handen.** Wel zijn er enkele studies op Europese schaal, waaruit veralgemeende conclusies voor heel België kunnen genomen worden. Deze studies (Geels et al., 2015; Orru et al., 2013) voorspellen **tegen 2050 een stijging van het aantal sterfgevallen met 15 tot 20%**. Dit ligt samen met Frankrijk, Engeland en Nederland significant

hoger dan het gemiddelde in Europa. Indien rekening gehouden wordt met de daling van de uitstoot, dan vervalt deze stijging.

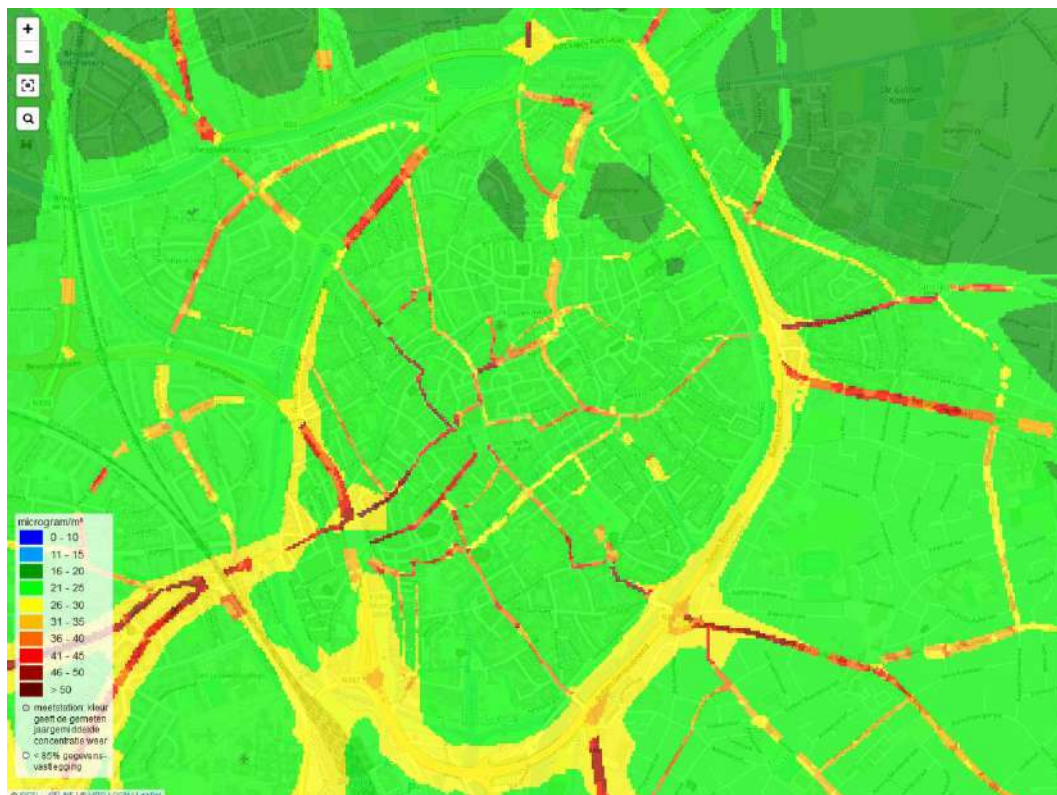
Om de luchtkwaliteit in Vlaanderen te berekenen gebruikt de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) een combinatie van modellen en metingen. Deze laten toe om de actuele kwaliteit te modelleren op een schaal van 4 bij 4 km en de jaargemiddelde luchtkwaliteit op straatniveau. Figuur 55 en Figuur 56 tonen de resultaten van deze modellen voor twee luchtkwaliteitsparameters op Brugs grondgebied voor het jaar 2018. Zoals verwacht kon worden, is de luchtkwaliteit in het historisch centrum lager dan in de meer landelijke gebieden op vlak van NO₂. Op vlak van fijn stof (PM_{2.5}) zijn de verschillen beperkter. Het valt eveneens op dat de locaties met **duidelijk lagere kwaliteit te vinden zijn ter hoogte van de drukste verkeersassen**. In straten met slechts beperkt verkeer ligt de hoeveelheid luchtverontreiniging duidelijk lager. **Men kan verwachten dat de locaties die nu reeds kwetsbaar zijn voor verhoogde concentraties**, in de toekomst kwetsbaarder zullen worden. De concentraties zullen vermoedelijk nog hoger liggen. Daarnaast zullen locaties waar de concentraties momenteel nog aanvaardbaar zijn, in de toekomst meer te lijden krijgen onder luchtverontreiniging.



Figuur 54. Jaargemiddelde fijn stof (PM_{2.5}) concentraties in en rond Brugge.



Figuur 55. Jaargemiddelde stikstofdioxide (NO₂) concentraties in en rond Brugge.



Figuur 56. Jaargemiddelde stikstofdioxide (NO₂) concentraties in en rond de historische binnenstad van Brugge.

4.2.4 Opkomst en toename van ziektes

Ten gevolge van klimaatverandering kunnen ook via vectoren overgedragen ziekten toenemen, doordat de ziekteverspreiders (zoals teken, muggen, zandvliegen, etc.) beter in ons toekomstig klimaat kunnen overleven. De volgende tekst geeft een kort overzicht van de mogelijke impacts op ziektes, en is gebaseerd op Brits et al. (2009), Europese Commissie (2009) en de website Klimaat.be. Veranderingen in de lengte van de seizoenen, de neerslag, de vochtigheid en de temperatuur kunnen dus de verspreiding en de overlevingskansen van zowel vectoren als ziekteverwekkers vergroten. De klimaatverandering zal dus waarschijnlijk indirect gevolgen hebben voor het bereik van bepaalde vectoren van infectieziekten. Een voorbeeld hiervan is de ziekte van Lyme die wordt overgedragen door teken. Deze ziekte is momenteel in uitbreiding in onze contreien, in Centraal-Europa en in de Baltische staten. De klimaatverandering wordt gezien als de hoofdoorzaak voor de verspreiding naar Noord-Europa van een bepaalde tekensoor. Ook dengue (ook gekend als knokkelkoorts) kan toenemen, evenals bilharzia of schistosomiasis waar waterslakjes als tussengastheer fungeren. Malaria kan ook vaker voorkomen in onze gebieden door een uitbreiding van het areaal van de muggensoorten die deze ziekte verspreidt. Het is mogelijk dat malaria zich ten noorden van de Middellandse zee zal uitbreiden.

4.3 Schade aan gebouwen

De veranderende klimaateffecten zullen niet enkel een impact hebben op de gezondheid en het welzijn van de inwoners van Brugge. Klimaatverandering zal ook een invloed hebben op gebouwen, bijvoorbeeld doordat ze te maken krijgen met wateroverlast. In wat volgt wordt voor elke klimaateffect besproken hoe gebouwen getroffen kunnen worden.

4.3.1 Wateroverlast

De stijging van extreme neerslagintensiteiten zal leiden tot een toename van wateroverlast. Opnieuw wordt onderscheid gemaakt naar het type overstroming (1) overstromingen door intense neerslag (riolerings-overstromingen of pluviale overstromingen), (2) overstromingen langs rivieren (de zogenaamde fluviale overstromingen) en (3) kustoverstromingen. Elk wordt hieronder apart behandeld.

4.3.1.1 Wateroverlast door intense neerslag

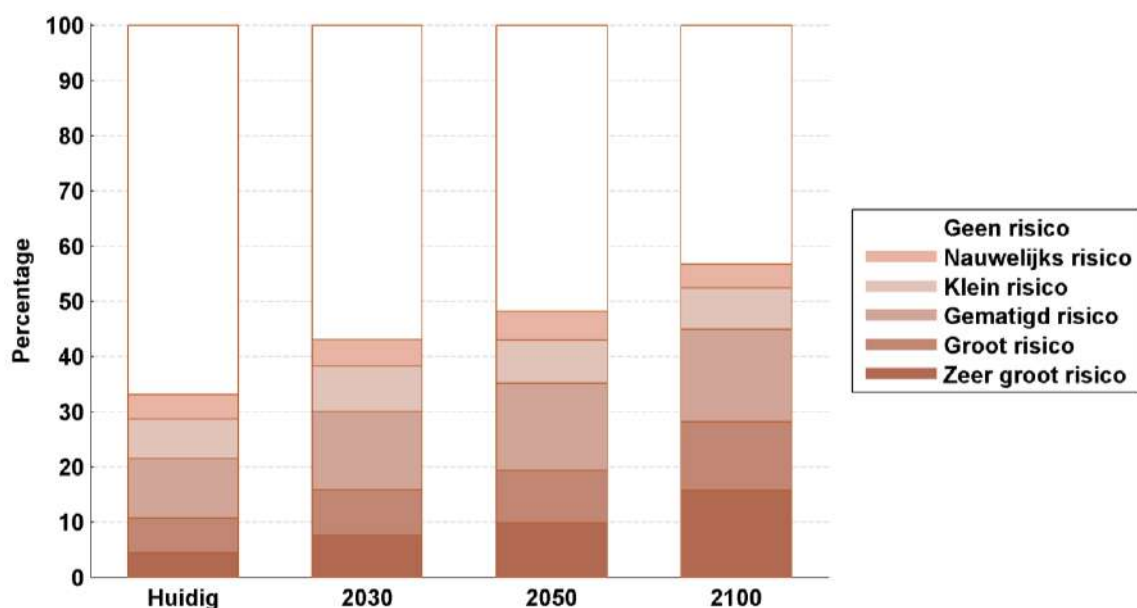
Eerder, in sectie 3.2.2, werd al berekend dat de overstroomde oppervlakte in de toekomst sterk kan toenemen: van 469 hectare in het huidig klimaat tot 849 hectare tegen 2100 voor een bui met herhalingstijd van 100 jaar. Logischerwijs zal ook het aantal getroffen gebouwen toenemen. Mogelijke gevolgen voor gebouwen die getroffen door stedelijke wateroverlast zijn het onderlopen van kelders, het binnensijpelen van water langs deur- en raamopeningen en beschadigingen aan het metselwerk.

Het totaal aantal gebouwen dat getroffen kan worden door intense neerslag is niet begroot. Lokale terreinaspecten, zoals de aanwezigheid van drempels of terreinverhogingen, kunnen immers bepalen of gebouwen al dan niet getroffen worden door wateroverlast. **Verwacht wordt dat het aantal getroffen gebouwen proportioneel zal toenemen met de overstroomde oppervlakte, en dus ongeveer zal verdubbelen tegen 2100.**

Voor het **historisch centrum werd wel een meer gedetailleerde analyse uitgevoerd**. Die overstromingskaarten ten gevolge van intense neerslag zijn immers opgesteld met een meer gedetailleerd en betrouwbaarder model. Om de impact op gebouwen in het historisch centrum in te schatten wordt gebruik gemaakt van een risicobenadering. In deze aanpak krijgt elk gebouw een risico toegekend en dit voor elk beschouwd scenario. Dit risico volgt uit het aantal keren dat het

gebouw getroffen wordt bij de verschillende terugkeerperiodes. Een gebouw dat enkel wateroverlast ondervindt bij een terugkeerperiode van 100 jaar ondervindt het kleinste risico, terwijl gebouwen die bij elke terugkeerperiode getroffen worden het grootste risico lopen. De locaties van getroffen gebouwen werden afgeleid door de overstromingskaarten (zie sectie 3.2.2) te kruisen met het grootschalig referentiebestand. Een gebouw wordt als getroffen beschouwd indien het in een perimeter van twee meter rond een gebied met wateroverlast ligt.

Figuur 57 toont de resultaten van deze analyse. Er wordt hierbij uitgegaan van een totaal van 13.659 hoofd- en bijgebouwen. Uit de resultaten blijkt dat **momenteel iets minder dan 70% van alle gebouwen in de Brugse binnenstad geen risico op wateroverlast loopt. Tegen 2050 is dit gedaald naar 50% en tegen 2100 naar iets meer dan 40%**. Tegelijkertijd zal ook het aantal gebouwen dat een groot risico op wateroverlast loopt stijgen: van ca. 5% in het huidige klimaat naar 10% en 16% in het hoog impact scenario van respectievelijk 2050 en 2100. In de online klimaatatlas is deze informatie ruimtelijk verdeeld weergegeven, zodat het blootstellingsrisico voor elk gebouw en elk scenario bekeken kan worden.



Figuur 57. Relatieve verdeling van de verschillende blootstellingsrisico's voor schade aan gebouwen door wateroverlast in de historische binnenstad, in het huidige en toekomstige klimaat.

In de voorgaande analyse werd geen onderscheid gemaakt naar het type gebouw dat getroffen wordt door de stedelijke wateroverlast. Het historische centrum van Brugge bevat echter een groot aantal beschermde gebouwen en monumenten, welke mogelijks extra kwetsbaar zijn voor dit type van wateroverlast of van historisch belang zijn. Tabel 6 vat samen hoeveel beschermde monumenten getroffen kunnen worden bij verschillende terugkeerperiodes en de vier scenario's. Hierbij is dezelfde definitie als eerder genomen: een gebouw of monument wordt als getroffen beschouwd als het zich binnen een perimeter van twee meter rond de wateroverlast contouren bevindt. Opnieuw kan een duidelijke stijging van het aantal getroffen monumenten vastgesteld worden.

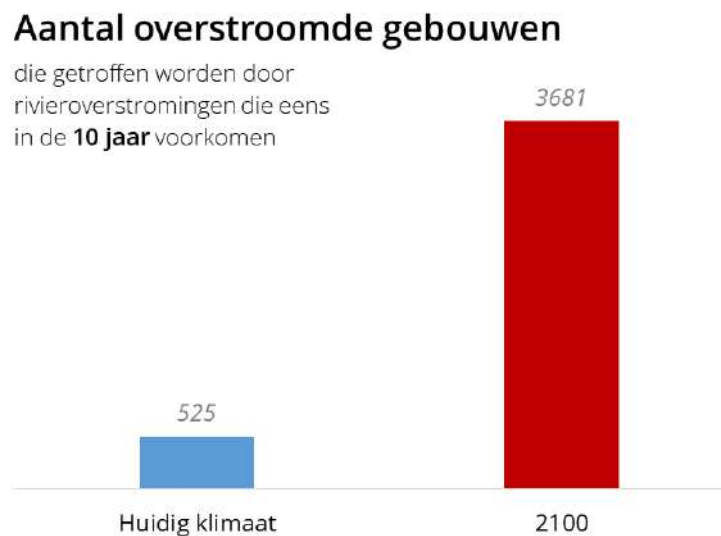
Tabel 6. Beschermde monumenten in de historische binnenstad die getroffen kunnen worden door stedelijke wateroverlast.

	Huidig klimaat	Jaar 2030	Jaar 2050	Jaar 2100
T2	14	28	37	68
T5	41	67	91	137
T20	99	145	176	242
T50	132	197	235	280

T100	159	236	255	311
-------------	-----	-----	-----	-----

4.3.1.2 Wateroverlast door rivieroverstromingen

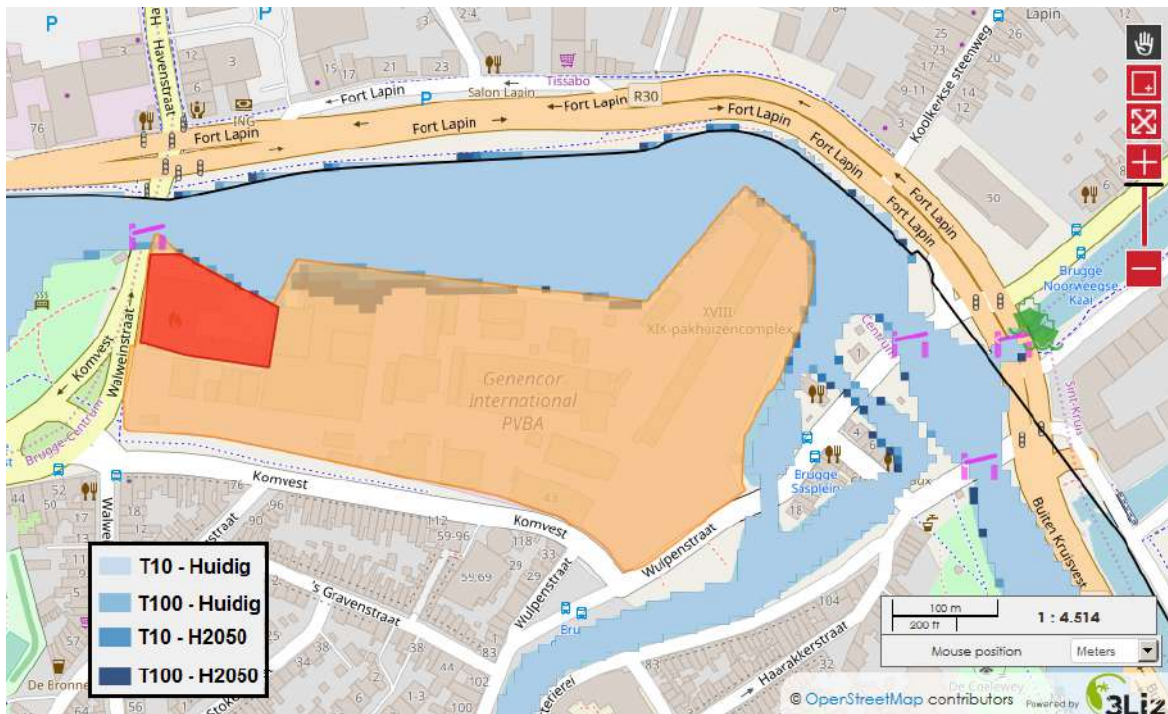
Door uitgestrektere rivieroverstromingen zullen ook meer gebouwen in de toekomst geïmpacteerd worden. Het aantal gebouwen dat gemiddeld eens per 10 jaar getroffen wordt door wateroverlast werd berekend door het grootschalig referentiebestand te combineren met de gesimuleerde overstromingen voor het huidig en het toekomstig klimaat. **Verwacht wordt dat het aantal gebouwen dat eens per 10 jaar getroffen wordt toeneemt van 525 tot 3681 voor gans het grondgebied Brugge.**



Figuur 58. Verwacht aantal gebouwen die eens per 10 jaar getroffen worden door rivieroverstromingen voor het huidig en het toekomstig (2100) klimaat.

Berekeningen voor extremere overstromingen (T100) konden niet gemaakt worden wegens een gebrek aan gegevens. Voor de Kerkebeek zijn deze cijfers wel afgeleid. Enkel in Sint-Michiels neemt het aantal getroffen gebouwen toe van grootteorde 50 tot 1500 voor overstromingen die eens per 100 jaar voorkomen. **Het spreekt voor zich dat de risico's voor waterschade door rivieroverstromingen dus bijzonder sterk toenemen.** Het Riviercontract van de Kerkebeek heeft een actieplan uitgestippeld om deze risico's te beperken en de woningen te vrijwaren van overstromingen.

Het **historisch centrum** lijkt gespaard te blijven van rivieroverstromingen, zowel in het huidige klimaat als volgens de voorspellingen horende bij het hoog impact scenario voor 2050 (zie ook §3.3.3). De bijhorende impacts op gebouwen zullen bijgevolg ook beperkt zijn. **De impacts lijken vooral voelbaar te worden ter hoogte van de Handelskom.** Net afwaarts van de Dampoortsluis in het kanaal Gent-Oostende, zullen de stijgende waterpeilen er voor zorgen dat het bedrijventerrein van Genencor International gedeeltelijk kan overstromen (zie Figuur 59). Afhankelijk van de activiteiten van het bedrijf kan dit leiden tot materiële schade, onderbroken productieprocessen of tijdelijke onbeschikbaarheid van de installaties. Een tweede belangrijke locatie die mogelijks getroffen wordt door overstromingen is de brandweerkazerne langs de Walweinsteat. De overstromingsdieptes lijken hier echter klein en vermoedelijk zal de hinder niet verder gaan dan het onder water komen van de parkeerterreinen.



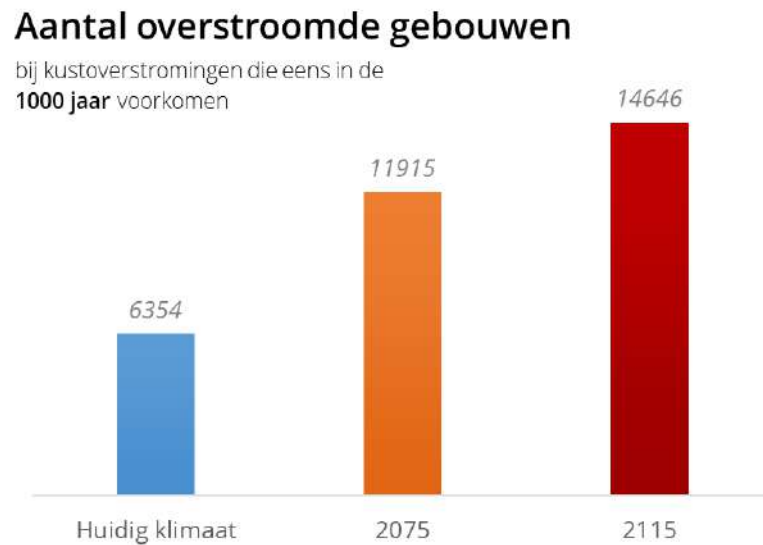
Figuur 59. Mogelijke impact van overstromingen in het noorden van de binnenstad van Brugge langsheen het afwaartse pand van het kanaal Gent-Oostende. Aangeduid op de kaart: bedrijventerrein Genecor International (oranje) en brandweerkazerne (rood).

4.3.1.3 Wateroverlast door kustoverstromingen

De overstromde oppervlakte (T1000) ten gevolge van kustoverstromingen neemt toe van 4450 hectare in het huidig klimaat, tot 6030 hectare tegen 2075 en 7034 hectare tegen 2115 (zie § 3.4). Hiermee overstroomden bijna de volledige deelgemeentes Zeebrugge, Zwankendamme, Dudzele, Sint-Pieters en Koolkerke, en delen van Sint-Jozef en Christus-Koning. Het aantal getroffen gebouwen werd berekend door het combineren van het grootschalig referentiebestand met de gesimuleerde kustoverstromingskaarten. **Het aantal getroffen gebouwen neemt toe van 6354 in het huidig klimaat tot 14646 in het klimaat van 2100. Vanzelfsprekend is de schade van dergelijke gebeurtenis onschatbaar.**

Een 1000-jarige overstroming moet geïnterpreteerd worden als een overstroming die een jaarlijkse kans op voorkomen heeft van 1 op 1000. Gelet op de enorme schade, betekent dit dat kustoverstroming alsnog een zeer groot risico betekent voor stad Brugge. Het risico wordt hierbij beschouwd als de kans op voorkomen (1 op 1000 in een jaar) vermenigvuldigd met de gevolgschade. Bijgevolg zijn er afdoende maatregelen nodig om de kans op een overstroming als de gevolgen ervan verder in te dijken.

Het Masterplan Kustveiligheid omvat een brede set maatregelen om de kust bestand te maken tegen een storm met terugkeerperiode van 1000 jaar inclusief de te verwachten zeespiegelstijging tegen 2050. Bij uitvoering van dat plan zou er voor een T1000 storm dus geen impact meer zijn op gebouwen t.g.v. kustoverstromingen tot alleszins het jaar 2050. De cijfers hierboven houden nog geen rekening met deze maatregelen.



Figuur 60. Verwacht aantal gebouwen die met een jaarlijkse kans van 1 op 1000 getroffen worden door kustoverstromingen voor het huidige en het toekomstig (2100) klimaat als er geen maatregelen getroffen worden.

4.3.2 Droogte

Ten gevolge van klimaatverandering komen langere en extremere periodes van droogte voor, met dalende grondwatertafels als gevolg. Deze kunnen in uitzonderlijke gevallen tot schade aan funderingen en gebouwen leiden, bijvoorbeeld wanneer gefundeerd werd op houten palen of op klei- of veengronden. Houten palen kunnen door de dalende grondwatertafel blootgesteld worden aan zuurstof (in de bodem), en vervolgens oxideren en rotten, waardoor hun draagvermogen afneemt. Klei- en veengronden zijn gevoelig voor (differentiële) zettingen bij droogte, waardoor scheurvorming kan optreden. Klassieke strookfunderingen zijn daarbij gevoeliger dan een algemene funderingsplaat. Ook enkel funderingen die minder diep aanzetten (tot circa 2,5 meter) zijn gevoelig voor dit soort zettingen ten gevolge van droogte, aangezien diepere lagen bijna niet geïmpacteerd kunnen worden door klimatologische droogte. Tijdens de droge zomer van 2019 werd er op verschillende plaatsen in Vlaanderen schade vastgesteld aan woningen ten gevolge van dergelijke zettingen. Dit doet zich evenwel voornamelijk voor in de streek rond Kortrijk, Ieper en de Vlaamse Ardennen. Brugge is door de zandgrond minder gevoelig aan scheurvorming door droogte.

Paalfunderingen met hout werden enkel in het verleden toegepast. De problematiek van paalfunderingen die hun draagvermogen verliezen door droogte zal zich bijgevolg eventueel enkel in het historisch centrum voordoen. De reien in de historische binnenstad worden op een min of meer constant peil gehouden, voornamelijk voor de toeristische scheepvaart. Daarnaast zorgt dit peil er ook voor dat de funderingen van de omringende gebouwen, die meestal op palen staan, niet beschadigd worden. Door de droogte, en de bijhorende daling van de hoeveelheid beschikbaar oppervlaktewater, is het in de toekomst mogelijk dat er onvoldoende water beschikbaar is om de reien te vullen of te verversen. Dit kan enerzijds zijn als gevolg van het gebrek aan water of doordat de kwaliteit van het water onvoldoende is (zie verder). Afhankelijk van het peilbeheer kan dit leiden tot een **daling van de waterpeilen in de reien, met mogelijks negatieve gevolgen voor de funderingen van de aanpalende gebouwen**. Ook verschilzettingen, grondverzakkingen en het inklinken van de ondergrond kunnen leiden tot schade aan ondergrondse constructies. Om hierover uitsluitsel te geven is echter een gedetailleerd waterbalansmodel nodig van Brugge en omgeving, welk momenteel niet voor handen is.

4.3.3 Hitte

De stijgende temperaturen kunnen een impact hebben op het grote aantal historische gebouwen in de binnenstad, aangezien deze hier waarschijnlijk niet op voorzien zijn. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk dat uitzetting van historische monumenten optreedt met schade tot gevolg of dat schade ontstaat aan schilder- en pleisterwerken. Dikwijls zijn deze gebouwen ook onvoldoende geïsoleerd, met sterke en ondraaglijke opwarming van het binnenklimaat tot gevolg.

4.4 Infrastructuur

Een groot deel van onze huidige infrastructuur is mogelijk niet voorzien op de veranderende klimaateffecten. De gevolgen kunnen variëren van **tijdelijke defecten of onbruikbaarheid tot grote herstel- en/of aanpassingswerken**. Vaak kan echter, mits beperkte ingreep zoals een kleine lokale terreinverhoging, kritische infrastructuur beschermd worden tegen wateroverlast. In deze sectie wordt kort overlopen wat de mogelijke impacts van klimaatverandering zijn en worden kwetsbaarheden aangeduid.

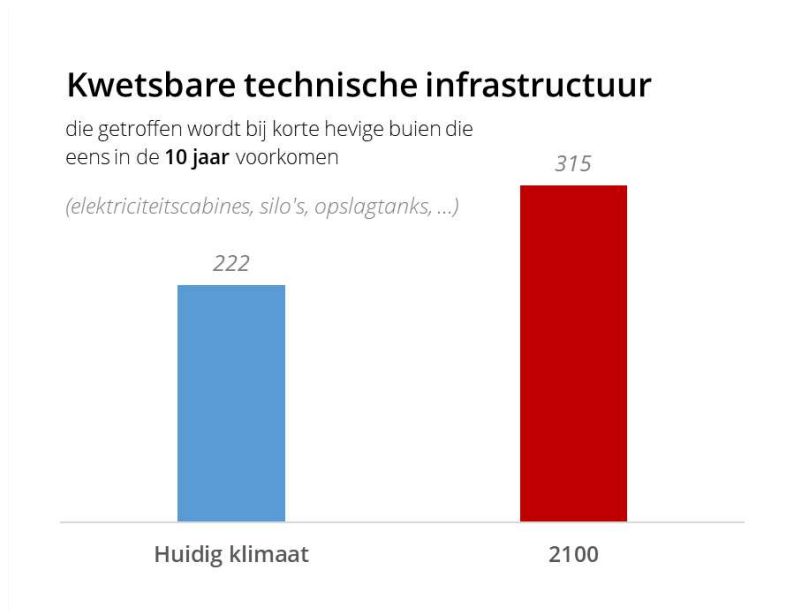
4.4.1 Stedelijke wateroverlast

Stedelijke wateroverlast kan niet alleen gewone gebouwen en beschermde monumenten treffen, maar ook technische structuren of constructies negatief beïnvloeden.

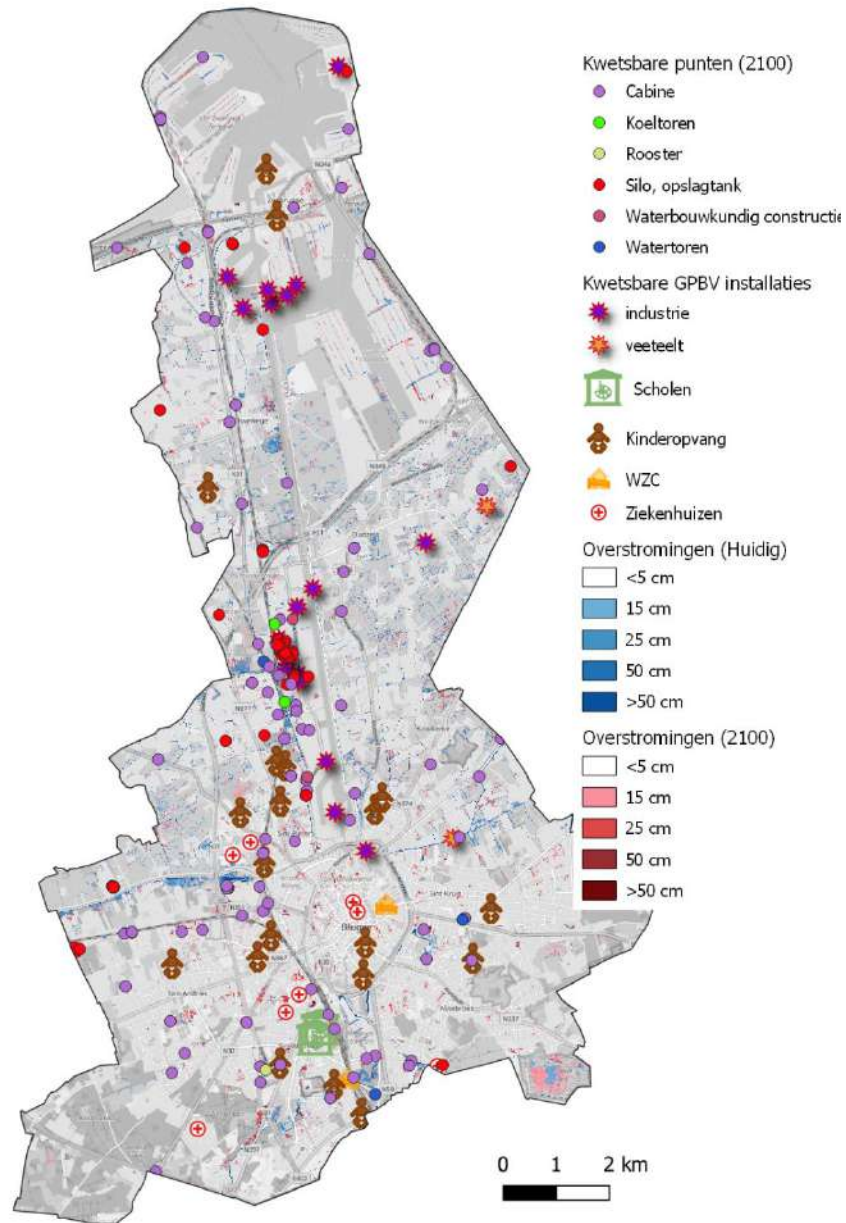
Daarom wordt een aparte analyse uitgevoerd om de impact te bepalen op (1) elektriciteitscabines, (2) koeltorens, (3) silo's en opslagtanks, (4) waterbouwkundige constructies, en (5) GPBV installaties van veeteelt en industrie.

Figuur 61 toont het aantal technische infrastructuurelementen die gelegen zijn in of vlak tegen een gebied dat gemiddeld eens per 10 jaar overstroomt ten gevolge van hevige buien in het huidig en toekomstig (jaar 2100) klimaat. Er is een duidelijke stijging waarneembaar van 222 naar 315 elementen. Figuur 62 toont deze technische infrastructuur, tezamen met kwetsbare instellingen (ziekenhuizen, crèches, WZC en scholen) die getroffen worden door stedelijke wateroverlast volgens de modelsimulaties. Merk op dat deze figuur enkel de technische infrastructuur en kwetsbare instellingen toont die volgens de simulaties direct geïmpacteerd worden door stedelijke wateroverlast. De niet-getroffen infrastructuur en instellingen worden dus niet getoond. De kaart toont dan ook geen overzicht van bijvoorbeeld alle scholen in Brugge.

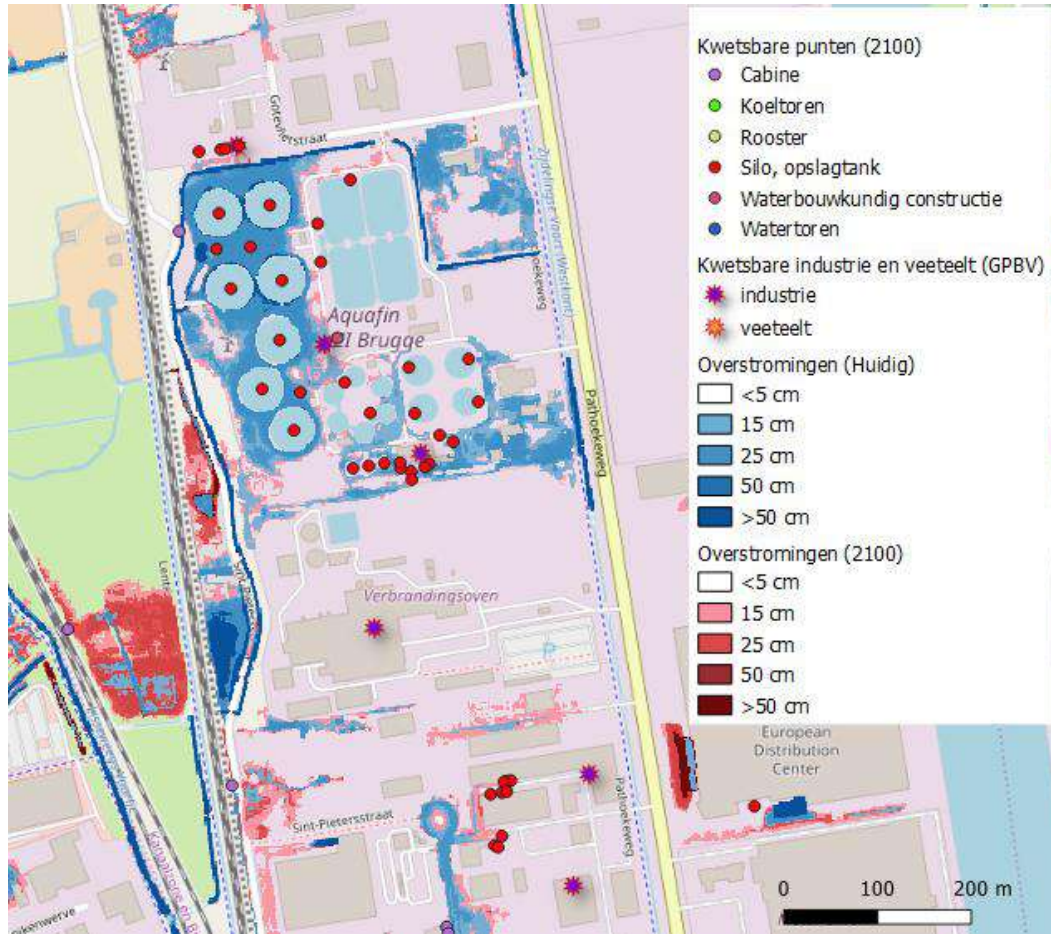
Indien dergelijke technische infrastructuur geraakt wordt door wateroverlast, kan dit verstrekende gevolgen hebben. Het overstroomen van silo's, opslagtanks of GPBV installaties kan grote consequenties hebben voor de natuur. De regio rond de RWZI van Brugge blijkt in het bijzonder kwetsbaar te zijn voor wateroverlast ten gevolge van extreme neerslag, zelfs bij buien met relatief lage terugkeerperiode (<T10). Dit wordt ook geïllustreerd in Figuur 63. Indien bijvoorbeeld elektriciteitscabines onvoldoende beschermd zijn tegen wateroverlast bestaat het gevaar op kortsluiting en het tijdelijk uitvallen van het elektriciteitsnet en mogelijk zelfs het langdurig buiten gebruik zijn ervan.



Figuur 61: Verwacht aantal technische infrastructuurelementen die met eens jaarlijkse kans van 1 op 10 getroffen worden door stedelijke wateroverlast voor het huidig en toekomstig (2100) klimaat.



Figuur 62: Overzicht van de technische infrastructuur en kwetsbare instellingen gelegen in of vlak langs gebied dat eens per 10 jaar overstroomt ten gevolge van intense regenbuien in het huidig en toekomstig (2100) klimaat. Merk op dat niet-getroffen infrastructuur en kwetsbare instellingen niet aangeduid zijn op de kaart.



Figuur 63: Overzicht van technische infrastructuur gelegen in of vlak langs gebied dat eens per 10 jaar overstromt ten gevolge van intense regenbuien in het huidig (blauw) en toekomstig (2100, rood) klimaat. Zoom op de RWZI van Brugge.

De Brugse binnenstad werd apart geanalyseerd. De binnenstad van Brugge gaat het om slechts **vijf cabines die nabij de locaties van mogelijke wateroverlast liggen**. Bovendien zijn ze enkel kwetsbaar bij zeer extreme neerslagevents (T100), waardoor de kans op falen beperkt blijft. De locaties van deze elektriciteitscabines zijn opgenomen in de digitale kaartenatlas.

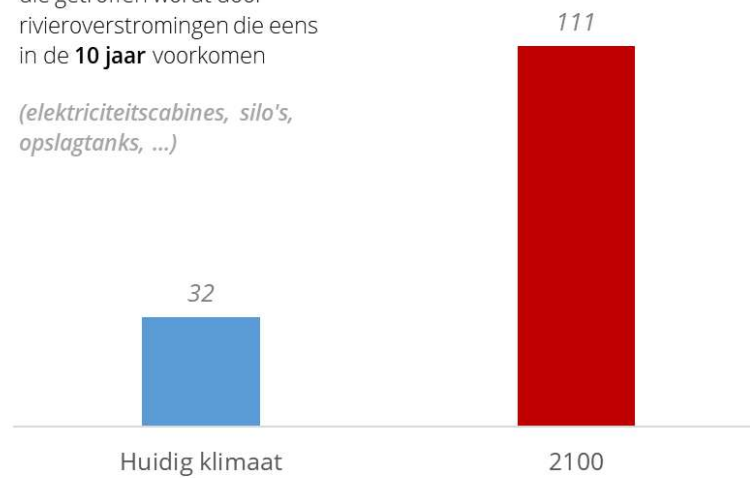
4.4.2 Overstromingen vanuit waterlopen

Klimaatverandering brengt vaker piekafvoeren, met frequenter en uitgestrektere rivieroverstromingen als gevolg. Hierdoor neemt het aantal technische infrastructuurelementen toe die bedreigd worden door wateroverlast. **Het aantal technische infrastructuur dat in of vlak tegen een gebied ligt dat gemiddeld eens per 10 jaar overstromt, neemt toe van 32 in het huidig klimaat tot 111 in het toekomstig klimaat.** De exacte locaties zijn allen opgenomen in de digitale kaartenatlas.

Kwetsbare technische infrastructuur

die getroffen wordt door rivieroverstromingen die eens in de **10 jaar** voorkomen

(*elektriciteitscabines, silo's, opslagtanks, ...*)



Naast de toename van de uitgestrektheid van de overstroomde gebieden, kan ook een toename van het aantal periodes met hoge afvoer op de waterlopen verwacht worden. Deze verhoogde afvoeren leiden niet noodzakelijk tot overstromingen, maar kunnen ook op andere manieren een impact hebben op economie en infrastructuur. **Hoge afvoeren zorgen bijvoorbeeld ook voor verhoogde stroomsnelheden, wat de scheepvaart bemoeilijkt. Om ongevallen en problemen te vermijden wordt de scheepvaart daarom tijdelijk aan banden gelegd**, wat kan leiden tot economische verliezen. Daarnaast blijkt uit gesprekken met De Vlaamse Waterweg (beheerder van het KGO) dat de kelders van beweegbare bruggen onder water kunnen komen te staan bij verhoogde afvoeren. Dit kan mogelijk leiden tot vertragingen voor de scheepvaart, wanneer de bruggen geblokkeerd geraken.

4.4.3 Hitte en temperatuurstijging

Een groot deel van onze huidige infrastructuur is mogelijk niet voorzien op lange periodes van hitte. De hogere temperaturen kunnen leiden tot verschillende verschijnselen waardoor de infrastructuur voor korte of langere periode onbruikbaar is. Voorbeelden hiervan zijn het smelten van de toplaag asfalt, waarbij schadelijke dampen kunnen vrijkomen, de vergrote kans op spoorvorming en het kromtrekken van trein- en tramrails. Andere effecten van extreme warmte zijn bewegende bruggen die vast komen te zitten of problemen met voegen bij vaste bruggen (Baguis et al., 2012). **Al deze aspecten zullen ervoor zorgen dat er vertragingen optreden en dat er meer onderhoud nodig is.** In Brugge lijkt dit vooral langsheen het kanaal Gent-Oostende van belang, waar de defecte bruggen tot verkeerschaos kunnen leiden. Zowel voor de scheepvaart als op de weg.

4.5 Werk en economie

Klimaatverandering zal vermoedelijk een negatieve impact hebben op industrie en economie, doordat de **productiviteit en dus ook de opbrengsten achteruit gaan**. Dit kan het gevolg zijn van industrieterreinen die onder water komen te staan of niet bereikbaar zijn, dalende reserves aan grond- en oppervlaktewater die gebruikt worden in het productieproces, dalende productiviteit van werknemers als gevolg van de hitte en het verlies (of verminderde opbrengst) van gewassen in de landbouw. Elk van deze aspecten wordt hieronder verder besproken. Voor landbouw wordt verwezen naar §4.7 "Natuur en milieu".

4.5.1 Wateroverlast

Bedrijven kunnen hinder ondervinden van stedelijke wateroverlast, wat kan gaan van het onder water komen te staan van de parking, over materiële schade tot het tijdelijk onderbreken van het productieproces. De uiteindelijke impact zal afhankelijk zijn de activiteiten van de bedrijven in kwestie.

Rivieroverstromingen treffen enkel het uiterste zuiden van industrieterrein ten Briele. In de Brugse binnenstad zijn er enkele bedrijven te vinden die mogelijks getroffen worden ter hoogte van de Kruisvest en langs de Werfstraat. Ook bedrijven aan Dampoort kunnen mogelijks problemen ondervinden van wateroverlast. Hoewel de modellen daar geen wateroverlast karteren, gaven verschillende betrokken experts van stad Brugge en externe partners aan dat daar problemen zijn opgetreden rond wateroverlast. De overige bedrijventerreinen (Waggelwater, Blauwe Toren, Herdersbrug, UK Gas Interconnector, de dokken van de haven en de dokken aan het zuidelijk punt van het Boudewijnkanaal) worden niet geïmpacteerd door wateroverlast vanuit rivieren of kanalen.

De schade en hinder ten gevolge van intense neerslag is meer verspreid, maar over het algemeen zijn er geen grote uitgestrekte overstromingszones in bedrijventerreinen. Uitzondering is echter het gebied rond de RWZI van Brugge, die wel als bijzonder gevoelig voor stedelijke wateroverlast gekarteerd wordt door de simulatiemodellen (zie ook Figuur 63).

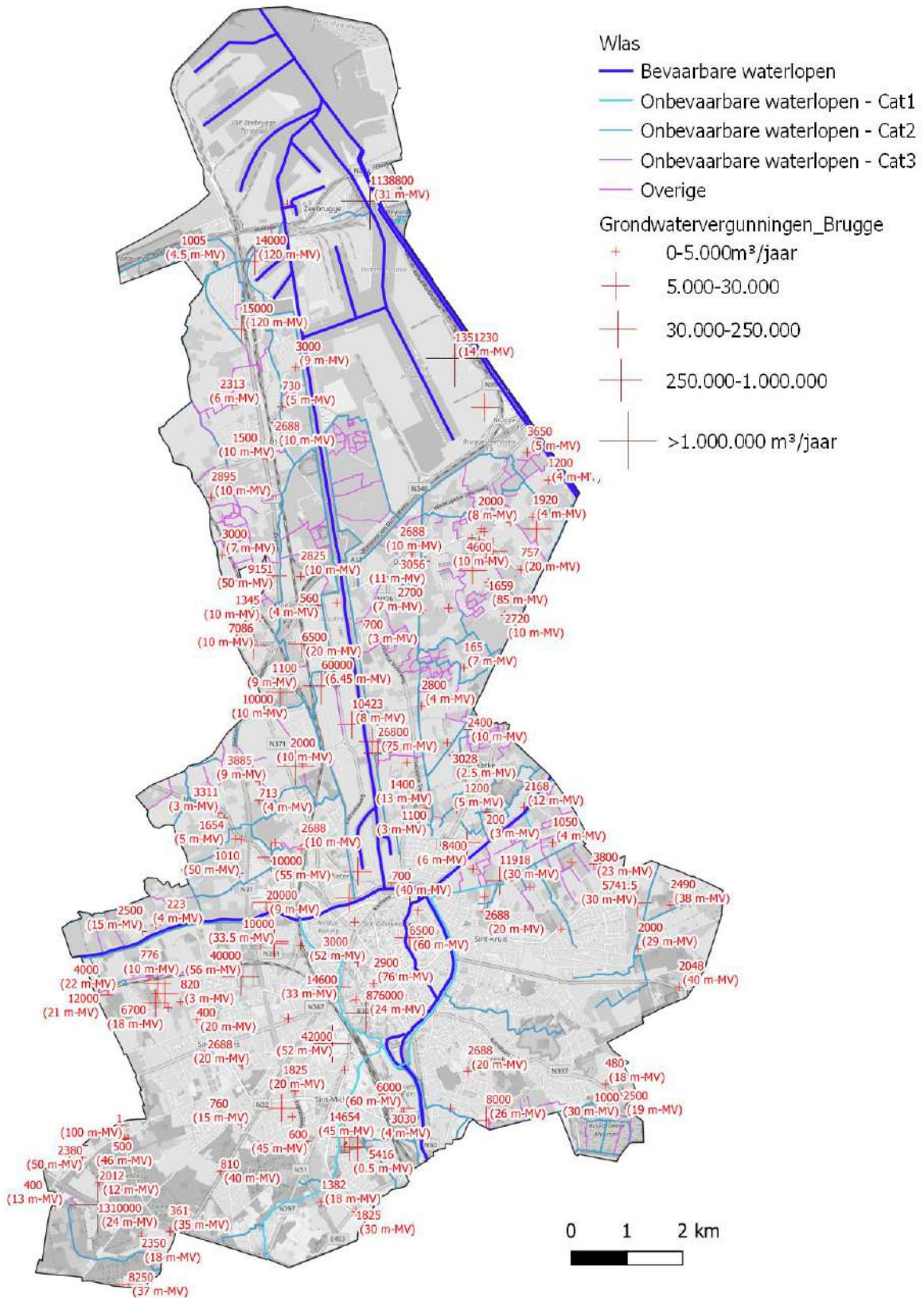
4.5.2 Veranderende werkomstandigheden

Hoge temperaturen en bijhorende hitte zullen er voor zorgen dat mensen hinder ondervinden bij het uitvoeren van hun dagelijkse activiteiten. De kans op onvoldoende nachtrust neemt toe met een daling van de concentratie tot gevolg. Daarnaast wordt het onmogelijk om bepaalde taken (bijvoorbeeld voor de groendienst of in de bouw) overdag uit te voeren, waardoor aangepaste werkschema's nodig zijn of tijdelijke werkloosheid moet ingeroepen worden. Al deze aspecten zullen ervoor zorgen dat **werknemers, zowel arbeiders als bedienden, minder productief zijn**, wat tot vertragingen en economisch verlies voor de werkgevers kan leiden.

Meestal wordt in deze context gebruik gemaakt van de Wet Bulb Globe Temperature (WGBT) index, die temperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid en hittestraaling combineert. Indien de WGBT een bepaalde drempelwaarde overschrijdt, die afhankelijk is van het type werk, is de werkgever verplicht om maatregelen te nemen. Dit kan gaan van het ter beschikking stellen van verfrissende dranken en beschermingsmiddelen, tot het installeren van verluchtingssystemen. In extreme gevallen kan de werkgever zelfs overgaan tot extra rusttijden of tijdelijke werkloosheid (FOD WASO, 2018). Omwille van de stijgende temperaturen en de bijhorende toename van het aantal hittegolfdagen, zal deze indicator zich in de toekomst steeds meer laten voelen.

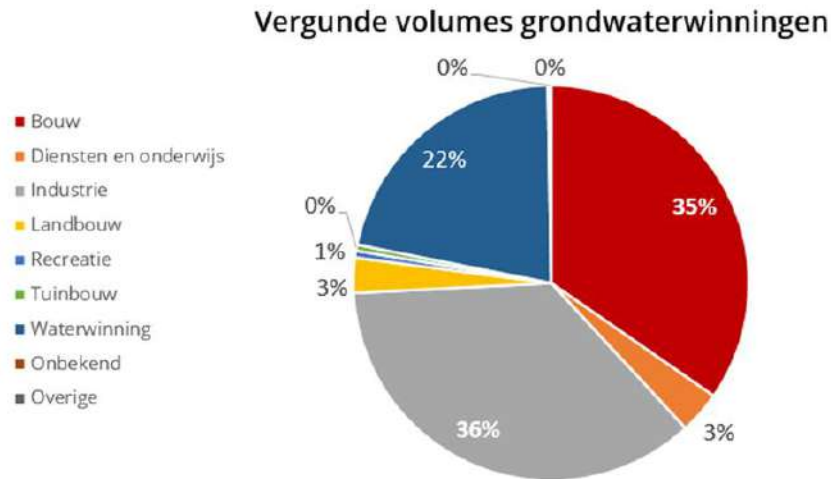
4.5.3 Daling waterbeschikbaarheid

Overall in Vlaanderen maken bedrijven voor hun watervoorziening gebruik van grond- en oppervlaktewater en in sommige gevallen zelfs van leidingwater. Dit water wordt gebruikt als koel- of proceswater. Het grondwater wordt opgepompt uit freatische of gespannen grondwaterlagen, welke nu reeds onder druk staan door overexploitatie. Daarom werd in het kader van deze analyse een overzicht gemaakt van alle gekende grondwatervergunningen op Brugs grondgebied. Hiertoe werden alle grondwatervergunningen verzameld die vallen onder de VLAREM-wetgeving (klasse 1, 2 en 3) via de Databank Ondergrond Vlaanderen. Deze database is een momentopname van eind november 2019. In totaliteit is er ongeveer een grondwaterwinvolume van 6.06 miljoen m³/jaar vergund. Figuur 64 geeft het overzicht van al deze grondwatervergunningen, tezamen met het vergund jaarlijks volume (m³/jaar) en de onttrekkingsdiepte onder het maaiveld (m-mv).



Figuur 64: Overzicht van de grondwatervergunningen die onder de VLAREM-wetgeving vallen (situatie november 2019), tezamen met het vergund jaarlijks volume (m³/jaar) en de onttrekkingsdiepte onder het maaiveld (m-mv).

Daarnaast werd een analyse uitgevoerd op de vergunde volumes om een overzicht te krijgen van het gebruik of onttrekken van grondwater per sector (zie Figuur 65). De industrie blijkt de grootste vergunningshouder te zijn in termen van volume met 36% van het totaal vergund volume in Brugge, nipt gevolgd door de bouwsector. Hierbij moet opgemerkt worden dat de bouwsector dit water vaak niet "verbruikt" of "nodig heeft", maar via vergunningsplichtige bemalingen onttrekt. Een tekort aan water heeft bijgevolg geen negatieve impact op dat type werken. Vanzelfsprekend is water daarentegen wel kritiek voor diverse toepassingen in de bouw.



Figuur 65: Overzicht vergunde volumes grondwaterwinningen die onder de VLAREM-wetgeving vallen, opgelijst naar volume per sector. In totaliteit is er ongeveer 6.06 miljoen m³/jaar vergund.

Ook het gebruik van oppervlaktewater voor industriële toepassingen zal in de toekomst onder druk komen te staan als gevolg van de dalende watervoorraden in de zomermaanden. Een bijkomend aandachtspunt hierbij is dat droogte en temperatuurstijging zullen leiden tot een daling van de waterkwaliteit en een stijging van de watertemperatuur. Hierdoor is het water zonder voorbehandeling mogelijks niet meer geschikt voor gebruik in industriële of landbouw toepassingen.

4.6 Energie en drinkwater

4.6.1 Verandering energievraag

De stijgende temperaturen zullen leiden tot verschuivingen in de energievraag. Tijdens de wintermaanden zal de buitentemperatuur licht stijgen. Hierdoor kan een daling van het energieverbruik verwacht worden omdat gebouwen minder verwarmd moeten worden. Aan de andere kant kan **tijdens de zomermaanden een stijging van de vraag naar actieve koeling verwacht worden. Het energieverbruik zal dus stijgen** omdat meer airconditioning installaties gebruikt zullen worden om leef- en werkruimtes te verkoelen. Een deel van deze energie gaat bovendien verloren doordat openbare gebouwen (bv. winkels) hun deuren openzetten om klanten te lokken.

De beschikbare informatie over energievraag is momenteel onvoldoende gedetailleerd om een verband tussen buitentemperatuur en energieverbruik af te ijken, waardoor het niet mogelijk is om voorspellingen te maken voor de toekomst.

4.6.2 Drinkwaterproductie

Het drinkwater in de stad Brugge wordt geproduceerd en geleverd door Farys. Dit water wordt grotendeels gewonnen uit oppervlaktewater buiten het distributiegebied en vervolgens via leidingen

aangevoerd. Uit metingen is gebleken dat hete en droge zomers gepaard gaan met een sterke stijging van het verbruik van leidingwater. Figuur 66 toont het dagelijkse verbruik aan leidingwater in Vlaanderen in de zomer van 2018 en vergelijkt dit met het maandgemiddelde verbruik in de periode 2013-2017. Deze cijfers tonen aan dat het verbruik in de maanden juli en augustus ca. 15 tot 20% hoger lag dan het gemiddelde. En dit ondanks de maatregelen en verspillingsverboden die opgelegd werden door de provincie en Vlaamse Overheid. De leegstand van regenwaterputten, waardoor mensen meer leidingwater moeten gebruiken, draagt hier vermoedelijk ook aan bij. De leegstand van hemelwaterputten voor enkele typische configuraties werd eveneens onderzocht. Die resultaten staan beschreven in §3.7.2.

De veranderende klimaateffecten zullen de drinkwaterproductie in de zomer op twee manieren onder druk zetten. Enerzijds zullen de beschikbare volumes oppervlaktewater overal in Vlaanderen en de omliggende regio's dalen. Anderzijds zullen de stijgende temperaturen vermoedelijk ook leiden tot stijgingen in het verbruik. Bovendien trekt de binnenstad van Brugge een groot aantal overnachtende toeristen aan, bij wie het moeilijker lijkt om restricties op te leggen.



Figuur 66. Verbruik leidingwater in Vlaanderen: vergelijking zomer 2018 met maandgemiddelden tussen 2013 en 2017. Bron: Indicator bevoorrading leidingwater (VMM).

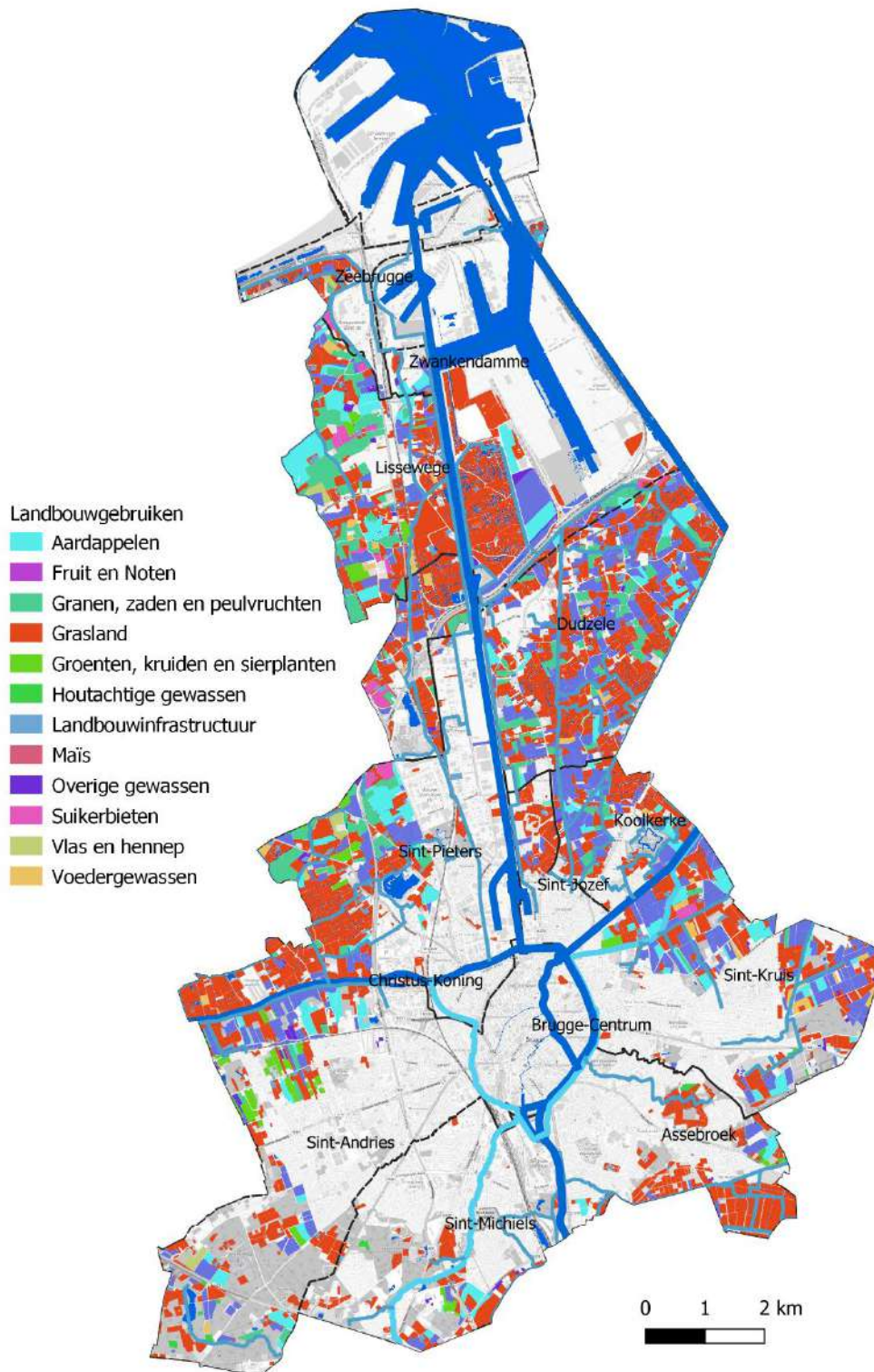
4.7 Natuur, landbouw en milieu

4.7.1 Aantasting biodiversiteit en droogtestress gewassen

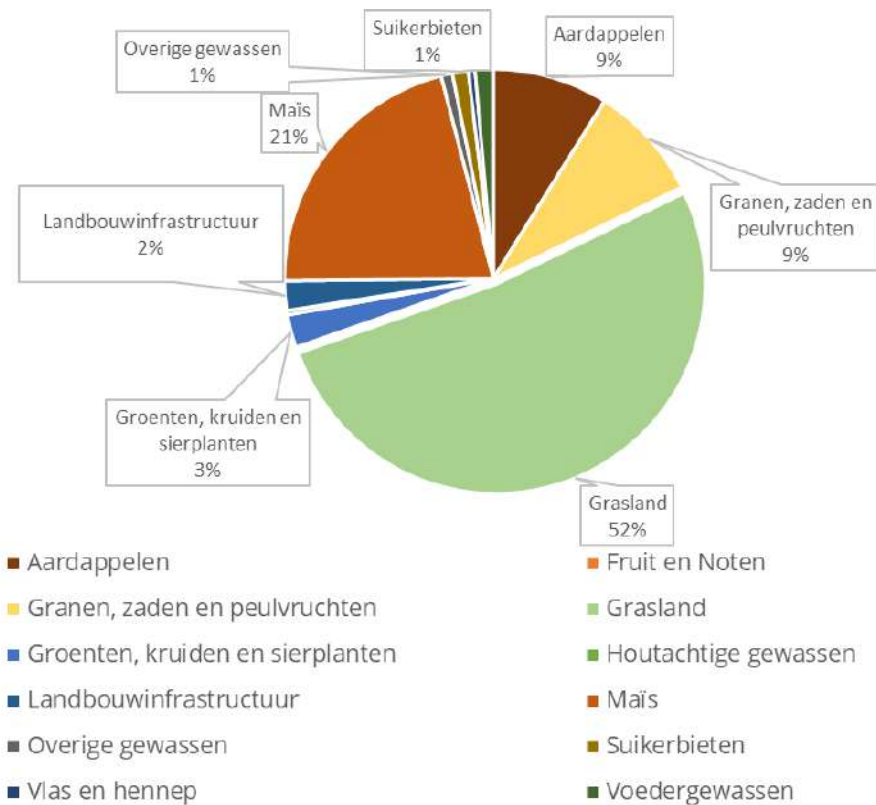
De belangrijkste impact van klimaatverandering op de natuur en ecosystemen is waarschijnlijk het verlies aan biodiversiteit. De levensomstandigheden van planten en dieren zullen veranderen als gevolg van de stijgende temperaturen, de langere periodes van droogte en de toegenomen kans op overstromingen. In de meeste gevallen zal dit een negatieve impact hebben op de habitats van flora en fauna, waardoor deze niet langer voldoen. **Soorten en populaties zullen verschuiven, inkrimpen of zelfs verdwijnen. In ons huidig versnipperde landschap is het voor heel wat soorten planten en dieren moeilijk om te migreren naar plaatsen waar het klimaat wel voldoet. Zeker wat de minder mobiele soorten betreft, is te verwachten dat dit zal leiden tot uitsterven van lokale populaties.** Het gevolg hiervan is een verlies van de huidige soorten. Dit fenomeen leidde in de hete en droge zomer van 2018 reeds tot problemen in Brugge: door de hoge watertemperaturen en/of zuurstoftekort in het Boudewijnkanaal kropen (de weliswaar uitheemse Chinese Wolhand-) krabben uit het water, met massale sterfte tot gevolg. Het afsterven van de Chinese Woldhandkrab is op zich geen waardevol verlies en in feite zelfs wenselijk, maar het toont wel dat (ook inheemse) fauna en flora sterk geïmpacteerd werden door de droogte. De zomer van 2018 werd ook gekenmerkt door een groot aantal wespen, doordat hun nesten amper beschadigd werden door de beperkte regenval. Omgekeerd werden er duidelijk minder vlinders

geobserveerd, omdat planten aan hittestress leden en de rupsen daardoor niet voldoende voedsel vonden. Tot slot werden ook problemen vastgesteld bij de groei van bomen en planten. Vooral de jong aangeplante bomen hadden het moeilijk, waardoor bewateren absoluut noodzakelijk was. Dezelfde verschijnselen werden waargenomen in de droge zomers van 2019 en 2020. Dit soort veranderingen en impacts toont dat onze fauna en flora zich moeten aanpassen om te kunnen overleven in een gewijzigd klimaat. De hogere temperaturen zullen bovendien onze contreien beter geschikt maken voor andere (uitheemse en ongewenste) soorten, die een bijkomende bedreiging kunnen vormen voor de inheemse soorten. De klimaatverandering zal dus de problematiek van invasieve uitheemse soorten versterken.

Naast de aantasting van de biodiversiteit wordt ook de **landbouw** sterk geïmpacteerd door klimaatverandering. Figuur 67 toont de landgebruikspcelen op grondgebied Brugge. Figuur 68 toont de verdeling van landgebruiken naar oppervlakte. Hieruit blijkt duidelijk dat grasland het dominerend type landgebruik is binnen landbouw: het beslaat net meer dan de helft van het totale landbouwareaal (52%). Maïs vormt het tweede grootste landgebruik (21%), gevolgd door aardappelen (9%) en granen (9%). Deze vier gewassen beslaan dus meer dan 90% van het Brugse landbouwareaal.



Figuur 67: Landbouwgebruikspcelen op grondgebied Brugge.



Figuur 68: Verdeling van de landbouwgebruikspercelen op gans het grondgebied Brugge.

De langere periodes van **droogte en hitte** die gepaard gaan met klimaatverandering kunnen een **grote negatieve impact hebben op gewasgroei**. Dergelijke meer extreme periodes veroorzaken significante droogtestress voor gewassen. De droge en hete zomers van 2017, 2018, 2019 en 2020 maakten die kwetsbaarheid eens te meer duidelijk. Teelten zoals grasland en maïs zijn gekend als minder droogtegevoelige teelten, maar zijn evenmin opgewassen tegen de droogteperiodes van afgelopen jaren. Teelten zoals aardappelen, bloemkool, erwt, fruit en noten zijn significant gevoeliger aan droogte. Volgende schadedossiers werden ingediend door landbouwers op Brugs grondgebied:

- 2017: 30 dossiers, waarvan 27 voor droogte en 1 voor verzilting en droogte gecombineerd. De door landbouwers aangegeven verliezen variëren per perceel, maar variëren vooral rond de 50%. De meest getroffen teelten stemmen overeen met de vaakst voorkomende teelten, zijnde weiland, (vroeg) aardappelen, maïs, en wintertarwe.
- 2018: 101 dossiers, waarvan 100 voor droogte en 1 voor verzilting. De aangegeven verliezen liggen hoger dan in 2017.
- 2019: 7 dossiers, waarvan 6 voor droogte en 1 voor verzilting. Er wordt in de aangegeven schaderapportering gemeld dat dit laatste perceel permanente verzilting ondervindt. De gerapporteerde droogteschade betreft aardappelen, maïs, grasland, wintertarwe (zeer beperkt) en suikerbieten.

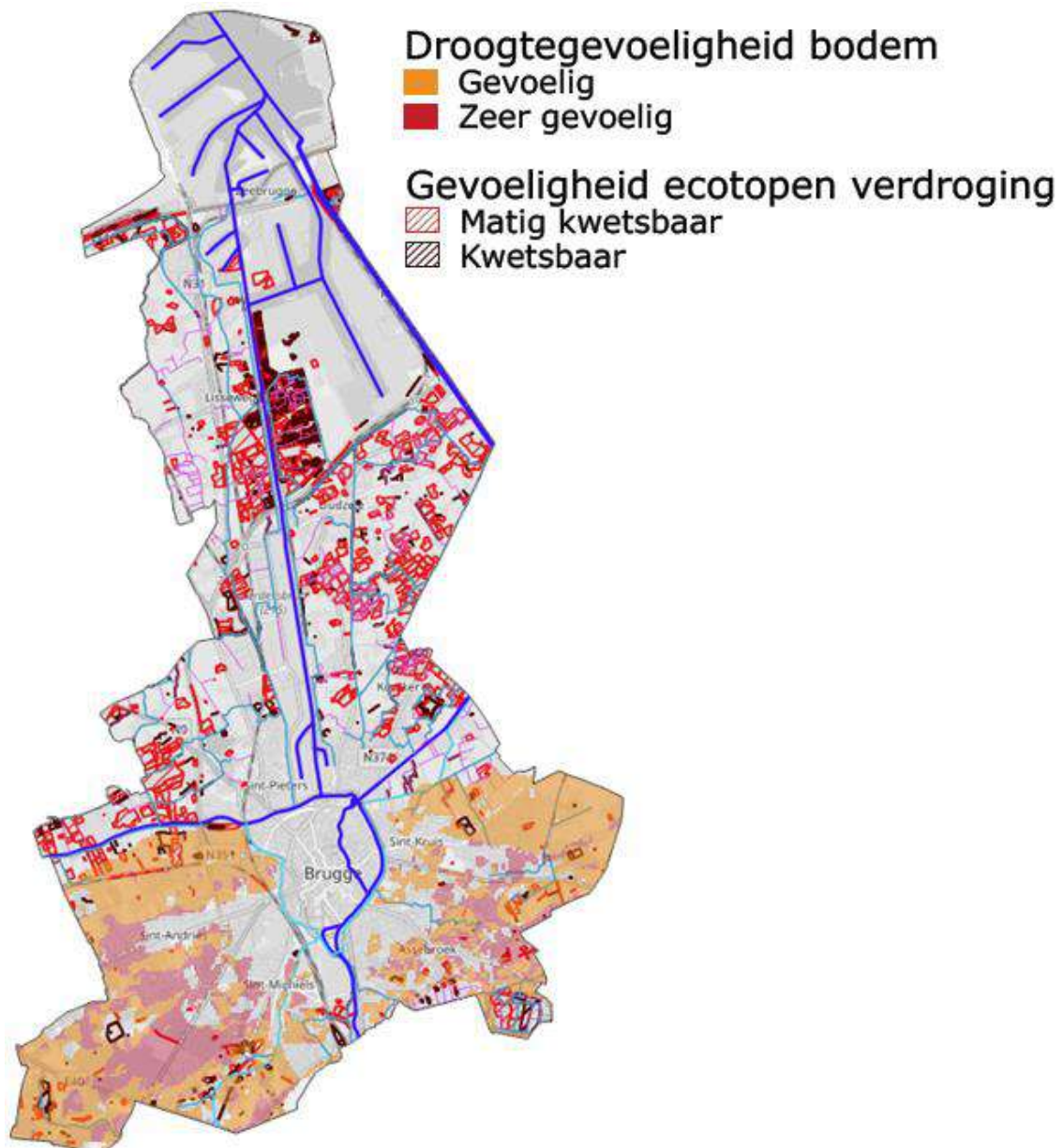
Ook worden kort de Vlaamse cijfers van uitbetaalde schade meegegeven (Willems et al., 2021):

- Periode 1 april - 30 mei 2017: voor 150 steden en gemeenten; 27,2 mio EUR aan schade in de landbouw uitbetaald voor de droogte van 2017; De geraamde schade door de droogte voor 2017 was 98 mio EUR; vooral in Provincies West- en Oost-Vlaanderen.
- Periode 2 juni - 6 augustus 2018: voor alle Vlaamse steden en gemeenten; in vergelijking met 2017 was in 2018 de schade groter aan de teelt zelf en ook de geografische regio met veel schade was ruimer; Alle Vlaamse provincies waren zwaar getroffen; De totale geraamde schade bedroeg 457 mio EUR.

- Periode 15 juni – 30 september 2019: voor 9 teelten: appels, peren, frambozen, rode bessen, kiwibes, wortelen, uien, bonen en knolselder, voor uitzonderlijke droogte en zonnebrand door hitte op 24 en 25 juli 2019; De totale geraamde schade bedroeg 20,7 mio EUR; vooral in westelijk deel van Vlaanderen; droogteschade had in 2019 minder een uniform patroon in verschillende teelten en verschillende regio's (dan het geval was in 2018); vele teelten konden hernemen door neerslag na warmste periode waardoor opbrengstverliezen beperkter bleven; hitte einde juli was zwaar en gecombineerd met de derde hittegolf eind augustus en de aanhoudende droogte in september zorgde dat bij een aantal gewassen (late aardappelen en industriegroenten (bonen, uien, wortelen, knolselder)) de schade groot is (min 30%), vooral in West-Vlaanderen; naast de droogte zorgde de hitte voor zonnebrandschade, vooral bij appels

Klimaatverandering heeft ook een **(beperkt) positief effect op gewasgroei**. De verhoogde CO₂ concentraties in combinatie met hogere intensiteiten zonnestraling bevorderen fotosynthese, wat kan leiden tot een toename van de gewasproductie. Voor graslanden zijn stijgingen tot grootteorde 10% of meer mogelijk, maar de grootte van het effect verschilt van gewas tot gewas (Kimball et al., 2002). Aardappelgewassen worden verondersteld sterk te reageren op toenames in de atmosferische CO₂-concentraties (Olesen en Bindi, 2002): Brits onderzoek toonde een toename tot 37% in gewasopbrengst aan via laboratoriumproeven voor sterk verhoogde CO₂-concentraties. Voor maïs daarentegen, een gewas met een C₄-fotosynthesecyclus, zijn de te verwachten CO₂-bemestingseffecten zeer beperkt.

De gevoeligheid van vegetatie aan droogte wordt ook sterk bepaald door het type bodem. Een vermindering van de hoeveelheid beschikbaar ondiep grondwater beïnvloedt rechtstreeks de vegetatie. Hogere (zomer)temperaturen in combinatie met lagere waterbeschikbaarheden zorgt voor verminderde fotosynthese, met een afname in groei en eventueel plantenmortaliteit als gevolg. Figuur 69 toont de **gevoeligheid van de bodem aan droogte**. Bodems met zandtexturen zijn bijvoorbeeld door hun hoge doorlatendheid gevoeliger voor droogte dan meer leemhoudende gronden. Zandbodems kunnen water immers minder goed vasthouden, waardoor dit sneller kan verdampen en percoleren naar de ondergrond. Aangezien de wijken Sint-Michiels en Assebroek op een zandrug gelegen zijn, zijn de bodems daar gevoeliger voor uitdroging. Jonge planten lopen in die regio's dus meer risico op verdroging dan bijvoorbeeld in de polders, waar bodems meer kleihoudend zijn.



Figuur 69: Droogtegevoeligheid bodem en ecotopen voor het ganse grondgebied van Brugge.

Naast de verminderde waterbeschikbaarheid in ondiepe bodemlagen op zich, zijn ook bepaalde soorten vegetatie hiervoor gevoeliger. De meeste plantensoorten zijn nauw verbonden met het vochtgehalte in de bodem en de chemische samenstelling van het grondwater. Voor grondwatergebonden vegetaties is het grondwaterregime sturend. Daalt de gemiddelde laagste grondwaterstand onder een minimale waarde, dan heeft dit het verdwijnen van een bepaalde vegetatie als gevolg (Vriens en Peymen, 2017). Verdroging kan ook resulteren in geochemische processen met onrechtstreeks bodemeutrofiëring en -verzuring tot gevolg, dan ook een impact kan hebben op ecotopen. Het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek stelde de **ecotoopkwetsbaarheidskaarten op voor verdroging** (zie Vriens en Peymen, 2017), waarbij op basis van de Biologische Waarderingskaart een kartering uitgevoerd werd die de gevoeligheid voor verdroging beschouwt. Deze houdt onder andere rekening met de tolerantie voor droogtestress, de gebondenheid aan grondwater- of oppervlaktewaters, de gevoeligheid van de vegetatie aan verdroging op zich, en andere. Bijna alle ecotopen die volgens de kaart aangeduid zijn als (matig) kwetsbaar voor verdroging bevinden zich in de polders, alsook in meersengebieden (zie Figuur 69). Enkele "kwetsbare ecotopen" op Brugs grondgebied zijn bijvoorbeeld veedrinkpoelen, rietlanden, eutrofe waters langs de kust en soortenrijke cultuurgraslanden met zilte elementen (bijvoorbeeld

natuurdomein Ter Doest). "Matig kwetsbare ecotopen" betreffen bijna uitsluitend "soortenrijk permanent cultuurgrasland", en her en der stuifduinen. Merk op dat dit niet betekent dat de soortenrijke cultuurgraslanden slechts "matig" kwetsbaar zijn: veel gebieden zijn, zoals ook gekarteerd op Figuur 69, wel degelijk "zeer" kwetsbaar. Van perceel tot perceel is een andere kwetsbaarheid mogelijk. De meersenvegetaties (Assebroekse Meersen, Gemene Weidebeek, e.a.) staan onder druk).

Ook buiten de zones die op deze kaart als kwetsbaar aangeduid staan, zijn nu reeds wijzigingen merkbaar. In onder meer Beisbroek stonden de afgelopen 2 jaren poelen en grachten droog die volgens de groenbeheerders, nooit eerder drooggefallen zijn. Voor zeldzame amfibieënsoorten als Vinpootsalamander en de Kamsalamander, is dit problematisch, maar ook de andere, meer algemene amfibieën komen in de problemen. Ook alle andere soorten die water nodig hebben, vb. om te drinken, is dit problematisch.

Gelijkaardige fenomenen zullen zich ook afspelen in andere streken en ecosystemen: ook in het zuiden van Europa zullen de stijgende temperaturen er voor zorgen dat ecosystemen wijzigen en dat soorten gaan migreren. Dit kan in Brugge en Vlaanderen leiden tot een toename van invasieve uitheemse soorten waaronder ziekteverwekkers en aantasters. De veranderende samenstelling van ecosystemen zal eveneens leiden tot nieuwe competitieverhoudingen tussen soorten, wat kan leiden tot nieuwe, mogelijks negatieve, interacties in die systemen. Denk bijvoorbeeld aan de oprukkende Aziatische hoornaar die in ons land bijennesten leegrooft.

De digitale kaartenbundel toont een uittreksel van de biologische waarderingskaart, voor het stadscentrum van Brugge en het ganse grondgebied. Deze kaart toont het voorkomen van belangrijke habitats volgens verschillende waarderingskaarten en kan bijgevolg ook geïnterpreteerd worden als een kwetsbaarheidskaart. Hoe waardevoller een bepaald gebied, hoe groter de kans dat de fauna en flora zullen lijden onder de veranderende klimatologische omstandigheden.

Tot slot heeft **verzilting** ook een impact op fauna en flora. De afgelopen decennia is er evenwel een delicaat evenwicht tussen zoet- en zoutwater (met uitzondering van de opgehoogde havengebieden en de onmiddellijk daar aan grenzende polders, zie §3.9), maar in de toekomst kan die balans ten gevolge van klimaatverandering en grote infrastructuurwerken verstoord worden. Bovenstaande kaarten vormen eveneens een indicatie voor de gevoeligheid aan verzilting.

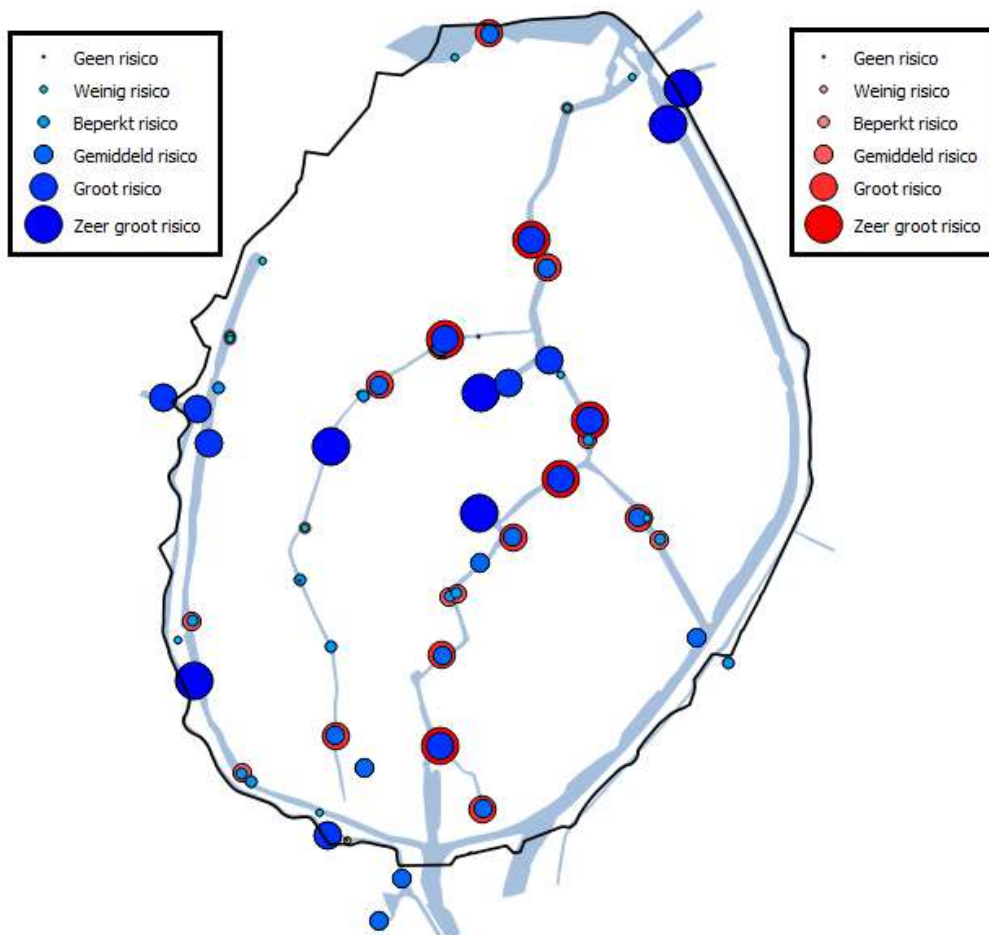
4.7.2 Daling waterkwaliteit

Waterkwaliteit is een complexe materie die afhankelijk is van een groot aantal factoren. Verwacht wordt dat de veranderende klimaateffecten op verschillende manieren een negatieve impact gaan hebben op de waterkwaliteit. In het geval van de Brugge zullen zowel (stedelijke) wateroverlast, droogte en temperatuurstijging een rol spelen. Omwille van de complexiteit van en de interacties tussen de vele waterkwaliteitsprocessen en klimaateffecten focust deze sectie zich eerder op een beschrijving van de te verwachten evolutie dan op het maken van concrete voorspellingen. De analyse is dus eerder kwalitatief en indicatief dan kwantitatief.

De stijging van extreme neerslagintensiteiten zal langs de ene kant leiden tot een verhoogde afvoer van fosfaten, nitraten en pesticiden, die afstromen van landbouwgrond, afkomstig zijn van menselijk afval en van depositie uit de atmosfeer. Langs de andere kant kunnen de toegenomen neerslagintensiteiten ook leiden tot een toename van het aantal en de omvang van overstort gebeurtenissen vanuit de riolering. Aangezien het rioleringsstelsel van Brugge momenteel nog grotendeels gemengd regen- en afvalwater afvoert, wordt er dus verontreinigd water overgestort in de kanalen en waterlopen. Bovendien stijgt het aantal droge dagen in de zomermaanden, waardoor de riolering minder gespoeld kan worden na relatief kleine neerslagbuien en er dus meer verontreiniging aanwezig is bij het begin van een overstort gebeurtenis. Het veranderende

neerslagpatroon in de zomermaanden zal dus op verschillende manieren leiden tot **een toename van de vuilvracht in het oppervlaktewater** en bijgevolg tot een daling van de kwaliteit ervan.

Uit ervaring van de stadsdiensten blijkt nu reeds dat de waterkwaliteit van de reien plaatselijk merkbaar daalt na overstort gebeurtenissen. Op basis van de resultaten van het rioleringsmodel (zie §3.2.1) en met behulp van een risicobenadering kan ingeschat worden op welke locaties de impact van rioleringsoverstorten het grootst zal zijn. Figuur 70 toont de resultaten van deze analyse: voor de verschillende overstorten is het risico weergegeven, zowel in het huidige klimaat als in het hoog-impact scenario voor 2100. Overstorten met grote debieten en/of kleine terugkeerperiodes krijgen hierbij een groot tot zeer groot risico, terwijl overstorten met een grotere terugkeerperiode en dus kleinere kans een veel lager risico toebedeeld krijgen. Uit de analyse blijkt dat vooral de reien in het centrum het grootste risico lopen op verontreiniging na overstorten van de riolering. Niet alleen door de omvang van de overstortvolumes, maar ook door het grote aantal overstort locaties. De binnen- en buitenvestigingsgracht en het kanaal lijken iets minder risico te lopen. Verwacht wordt ook dat de reien in het centrum in de toekomst nog meer getroffen zullen worden (rode bollen breder dan blauwe), terwijl het risico voor de waterlopen aan de rand van de stad min of meer gelijk blijft. Rekening houdende met het feit dat het water in de reien nagenoeg stilstaat, betekent dit een extra negatieve impact voor de kwaliteit van het water in de reien.



Figuur 70. Risico op overstorten van de riolering in de oppervlaktewateren in en rond de historische binnenstad van Brugge: in het huidige klimaat (blauw) en in het hoog impact scenario voor 2100 (rood).

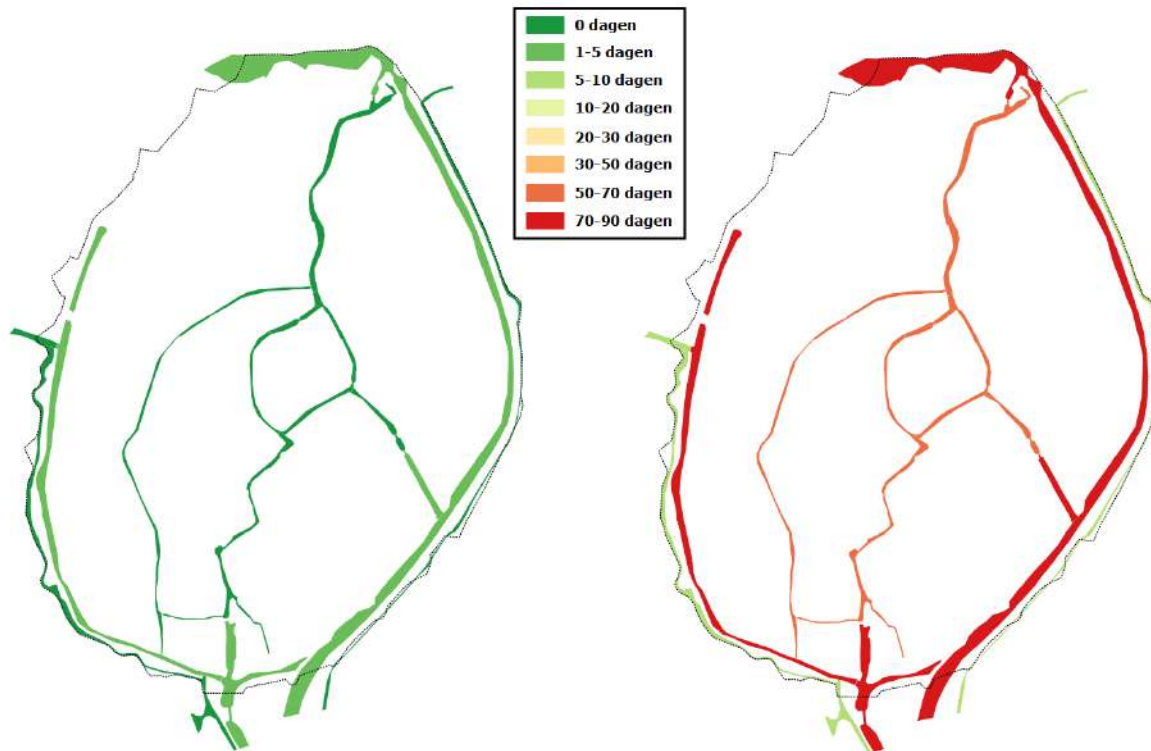
Voor het gebied buiten het stadscentrum was het niet mogelijk om dergelijke gedetailleerde analyse op te maken. Er zijn immers nog geen rioleringsmodellen beschikbaar die een voldoende betrouwbare inschatting mogelijk maken (deze zijn evenwel in opmaak).

Naast de toegenomen vuilvracht zal de waterkwaliteit ook te lijden krijgen onder de toegenomen droogte periodes. De daling van de neerslagvolumes en de stijgende verdamping in de zomer zullen leiden tot een daling van de debieten en volumes in de waterlopen, waardoor de vuilvracht minder verdund kan worden. Ook het zelfreinigend vermogen van de waterlopen zal achteruit gaan. De langere en meer frequente perioden van lage afvoer zullen leiden tot langere verblijftijden waardoor er minder zuurstof beschikbaar is om opgeloste stoffen af te breken. Ook de toename van het aantal riooloverstorten en de bijhorende verontreiniging kunnen leiden tot een daling van de hoeveelheid opgeloste zuurstof.

Voor de reien in de Brugse binnenstad en de poldergrachten zal dit nog versterkt worden door de specifieke eigenschappen van het systeem. De toevoer van water in deze waterlopen is namelijk beperkt waardoor de reien en poldergrachten, zeker in droge periodes, als een groot reservoir met stilstaand water beschouwd kunnen worden. Voor de Brugse reien heeft dit o.a. te maken met de beperkte waterbeschikbaarheid en het min of meer constante waterpeil dat ingesteld wordt om de scheepvaart te garanderen en de funderingen van huizen te beschermen. **De verblijftijden van het water in de reien en poldergrachten zullen dus sterk kunnen oplopen.** Het spoelen van de reien en poldergrachten met vers water kan hiervoor een oplossing bieden, al moet men hier in de toekomst ook rekening houden met de dalende waterbeschikbaarheid. Bovendien is het belangrijk dat het spoelwater van voldoende goede kwaliteit is. Uit ervaringen van de droge zomer van 2018 bleek de kwaliteit van de Kerkebeek en het kanaal Gent-Oostende onvoldoende. De stuwen op het kanaal werden toen volledig gesloten om voldoende diepgang te creëren, met nagenoeg stilstaand water tot gevolg.

Tot slot zullen ook de stijgende temperaturen een negatieve impact hebben op de waterkwaliteit. De stofwisseling en levenscyclus van vele aquatische soorten wordt beïnvloed door de watertemperatuur, die net als de luchttemperatuur zal stijgen. Ook de snelheid van bacteriële en chemische reacties hangt af van de watertemperatuur, wat kan leiden tot verschijnselen zoals eutrofiëring en botulisme. Eutrofiëring ontstaat wanneer organisch materiaal sneller afbreekt door meer actieve bacteriën. Dit heeft een sterke toename van voedingsstoffen in het water als gevolg en kan leiden tot een explosieve groei van blauwalgen, voornamelijk in stilstaand water (zie verder). Botulisme is een ziekte die voorkomt bij vissen en watervogels, veroorzaakt door de botulismebacterie die leeft in warm water met een tekort aan zuurstof. Het gif van de bacterie werkt verlammend op de spieren van vissen en watervogels, waardoor ze uiteindelijk niet meer kunnen bewegen en verdrinken. De rottende kadavers vormen een bron van besmetting, waarvan er sommige gevaarlijk zijn voor de mens. In beide gevallen wordt het contact met of het gebruik van het water ten sterkste afgeraden.

Het VLAREM II decreet definieert een aantal basismilieukwaliteitsnormen voor oppervlaktewater. Hierin wordt gesteld dat de maximale temperatuur van oppervlaktewater niet boven 25 °C mag uitkomen. Uit metingen blijkt dat de watertemperatuur gecorreleerd kan worden aan de gemiddelde luchttemperatuur over meerdere dagen in het verleden. Vertrekkende van de voorspellingen voor luchttemperatuur en dit verband kan een inschatting gemaakt worden van de watertemperatuur in de toekomst. Gegeven het feit dat de watertemperatuur een invloed heeft op bacteriële activiteit en de maximaal oplosbare zuurstofconcentraties lijkt dit een goed proxy voor de waterkwaliteit. De indicator geeft het gemiddelde aantal dagen per jaar waarop de VLAREM II norm overschreden wordt. Vooral in het kanaal Gent-Oostende lijkt dit problematisch te zijn, met reeds 5 dagen per jaar in het huidige klimaat en een stijging naar bijna 90 dagen in het hoog impact klimaatscenario voor 2100. De reien in de binnenstad overschrijden deze norm momenteel niet, maar zullen dit in de toekomst mogelijks wel doen: gemiddeld 7 dagen per jaar in 2050 en 51 dagen tegen 2100 (zie Figuur 71).



Figuur 71. Gemiddeld aantal dagen per jaar waarop de kritische watertemperatuur van 25 °C overschreden wordt, in en rond de Brugse binnenstad. Cijfers zijn getoond voor het huidige klimaat (links) en het hoog impact scenario voor 2100 (rechts). In de online klimaatatlas zijn eveneens kaarten te vinden voor 2030 en 2050.

Veralgemeend kan gesteld worden dat de kans zeer groot is dat **de waterkwaliteit van de oppervlaktewateren van Brugge negatief beïnvloed zal worden door klimaatverandering**. Bovendien spelen de drie meest relevante klimaateffecten (toename neerslagintensiteiten, toename droogte en stijging watertemperatuur) allen in de zomermaanden. Door deze samenloop kan een cumulerend effect optreden. Het concrete eindresultaat van al deze veranderingen is (zonder model) echter zeer moeilijk te voorspellen.

4.7.3 Aangroei blauwalgen

Blauwalgen, familie van de cyanobacteriën, zijn bacteriën die in water leven en net als planten aan fotosynthese doen. Onder de juiste omstandigheden, namelijk stilstaand en warm water met voldoende voedingsstoffen, kunnen blauwalgen sterk en snel aangroeien tot problematische hoeveelheden. Tijdens deze groei vormen ze een blauwgroene olieachtige laag op het oppervlak, welke kan samendrijven tot een dikke verachtige substantie. Wanneer de blauwalgen afsterven, produceren ze toxines die vrijkomen in de waterkolom en die bij hoge concentraties schadelijk kunnen zijn. Wanneer mensen in contact komen met het vervuilde water kan dit leiden tot hoofdpijn, zwelling van de oogleden, irritatie van de slijmvliezen, huidirritatie, misselijkheid, diarree en koorts (Vanormelingen, 2018). Excessieve blauwalgengroei kan ook leiden tot vissterfte en het inkrimpen en uitsterven van fauna en flora in de onderste delen van de waterkolom (Paerl & Paul, 2012). In de zomer van 2018 werden de bekende Brugse zwanen uit voorzorg van het water gehaald.

In de hete en droge zomers van 2017, 2018, 2019 en 2020 werden de oppervlaktewateren rond Brugge geteisterd door de aanwezigheid van Blauwalgen. In 2017 bestond de vrees dat de kwarttriatlon van Brugge niet zou kunnen doorgaan omwille van blauwalgen; en in de zomer van 2018 werd waterrecreatie op de reien en het kanaal voor enkele dagen verboden vanwege de blauwalgen. Er was in 2018 ook zo'n massale blauwalgengroei aan het Stil Ende dat zelfs de zwanen

verplaatst moesten worden. Dit wordt mede veroorzaakt door de slechte verhouding van stikstof en fosfor in het water. Vooral de aangevoerde hoeveelheden fosfor blijken te groot zijn, wat de bloei van algen stimuleert (Downing et al., 2001). In 2019 werden opnieuw op zeer veel locaties blauwalgen waargenomen in Brugse wateren (o.a. de Buitenvest, reien, het Kanaal Gent-Oostende, het Boudewijnkanaal, ...). Ook werden geregeld blauwalgen waargenomen in de Krulleput in het Tillegembos, waardoor de Koninklijke Brugse IJsberen verhuisden naar de vijver van de Koude Keuken. In het Stil Ende was er echter geen probleem meer met blauwalgen. Daar werd in 2019 een ultrasoon apparaat geplaatst (kostprijs 2200 euro) om blauwalg tegen te gaan. Er werd in het algemeen een positief effect op waterkwaliteit waargenomen, terwijl er geen merkbare negatieve impacts waren op vissen en ander onderwaterleven. Het ultrasoon toestel wordt nu permanent ingezet aan het Stil Ende. Zo nodig wordt ook een extra toestel geplaatst in de Coupure. Ook in 2020 werd er blauwalg waargenomen in Brugge, zoals op de Damse Vaart en de Brugse reien.

Verwacht wordt dat klimaatverandering wereldwijd zal leiden tot meer en langere condities die gunstig zijn voor de groei van blauwalgen (Paerl & Paul, 2012). Door de stijgende temperaturen zal de groei van blauwalgen gestimuleerd worden, aangezien deze actiever zijn bij hoge temperaturen, met een optimum rond 30 °C, en omdat het mogelijke groeiseizoen langer wordt. Explosieve algenbloei vraagt grote hoeveelheden CO₂ voor het fotosynthese proces, in die mate zelfs dat dit een limiterende factor kan worden. De uitstoot van broeikasgassen zal leiden tot hogere concentraties CO₂ in de atmosfeer en dus ook bijdragen aan de algengroei. Tot slot zal ook het veranderende neerslagpatroon bijdragen tot een grotere kans op algenbloei: de hogere neerslagintensiteiten zullen leiden tot een grotere toevoer van nutriënten en de langere droge periodes zorgen voor langere verblijftijden.

Zoals eerder al aangegeven zijn de reien zeer gevoelig voor blauwalgengroei, omwille van de specifieke karakteristieken van het systeem: traagstromend tot stilstaand water, weinig verswateraanvoer, hogere watertemperaturen en bij overstorten ook een zwaardere belasting van nutriënten (in bijzonder zorgen stikstof en fosfor voor een massale algengroei) en andere pollutanten op het systeem. Maar ook de andere oppervlaktewaters in Brugge blijken gevoelig voor blauwalg (zie hierboven voor een oplijsting van gekende locaties met een blauwalgenproblematiek).

4.8 Recreatie en toerisme

Klimaatverandering heeft tot slot ook een impact op toerisme en recreatie. Men kan verwachten dat dit in Vlaanderen een positieve impact zal zijn dankzij de hogere temperaturen en meer droge dagen. Deze impact zal voelbaar zijn bij recreatiegebieden, toeristische trekpleisters en horeca. Klimaatverandering zal in sommige gevallen echter ook een negatieve impacts op toerisme en recreatie kunnen hebben.

4.8.1 Toerisme aantrekkingskracht

De Tourism Climate Index (TCI) geeft een indicatie van de aantrekkelijkheid van een bepaald gebied, voor toeristen, aan de hand van een getalwaarde tussen 0 en 100. Hoe hoger deze score, hoe groter de kans dat het gebied toeristen zal aantrekken. Bij het berekenen van de index houdt men rekening met de volgende aspecten: thermisch comfort tijdens de dag, gemiddelde dagelijkse temperatuur en vochtigheid, totale regenval per maand, totaal aantal uren zonneshijns per dag en de windsnelheid. Voor de zomermaanden juni, juli en august wordt voor Vlaanderen een zeer goede score (70 – 80) voorspeld voor de periode 2070-2100 (Amelung en Moreno, 2009). Dit is het gevolg van de stijgende temperaturen en langere droge periodes. **Men kan dus verwachten dat de stad Brugge in de toekomst nog meer toeristen zal aantrekken.** Dit wordt bovendien versterkt doordat het zuiden van Europa met oncomfortabel hoge temperaturen zal kampen, waardoor mensen minder geneigd zijn om daar op vakantie te gaan. Wanneer het echter te warm wordt in de binnenstad, o.a. als gevolg van het hitte-eiland effect, dan zullen toeristen eerder naar de kust trekken om daar verkoeling te zoeken.

4.8.2 Toename recreatiedruk

De toegenomen toerisme aantrekkingskracht zal echter ook een keerzijde hebben. Om te ontsnappen aan hoge temperaturen zal de vraag naar groen-blauwe recreatie zones stijgen. Veel mensen gaan op zoek naar verkoeling in de schaduw, in de nabijheid van water, in zwembaden en zwembadcomplexen, bosrijke omgevingen, enz. **Door de stijging van het aantal hittegolfdagen zullen deze locaties dus onder druk komen te staan als gevolg van de grote aantallen bezoekers.** Enkele mogelijke voorbeelden voor het stadscentrum van Brugge zijn het Minnewaterpark, het Koningin Astridpark, de rondvaarten op de reien en de zwemzone in de Coupure. Uit ervaringen blijkt ook dat deze toegenomen vraag naar recreatie tot sociale overlast kan leiden. Denk bijvoorbeeld aan situaties waar mensen tijdens hete zomers 's avonds verkoeling zoeken in de parken, en andere buurtbewoners hierdoor te maken krijgen met geluidsoverlast. Ook aan de zwemzone ter hoogte van de Coupure werden er in de zomer van 2018 klachten genoteerd van omwonenden als gevolg van de toegenomen drukte. In 2019 moesten publieke zwembaden bezoekers weigeren wegens te veel drukte. Hetzelfde geldt voor de parken in de randgemeenten, alsook de natuurgebieden. Bij deze laatste kan bovendien de fauna en flora hinder ondervinden van bijkomende recreanten: planten worden vertrappeld, dieren verstoord, er kan een hogere mate van vandalisme optreden en mogelijk wordt er meer afval achtergelaten. **Een duidelijk en goed uitgewerkt beleid om de druk van recreanten op natuurgebieden te beperken wordt dus (nog) belangrijker.**

Naast deze sociale druk kunnen de recreatielocaties ook onder druk komen te staan als gevolg van de dalende waterkwaliteit. Vele hebben grote vijvers met relatief stilstaand water en zijn bijgevolg gevoelig voor onder andere eutrofiëring en hogere concentraties van pollutanten door de beperkte verdunning. Deze eutrofiëring kan, vooral in stilstaand water, leiden tot een explosieve aangroei van blauwalgen (zie eerder). In de extreem droge zomer van 2018 werden sommige vormen van recreatie, zoals kajakken, kanovaren en vissen, verboden op het kanaal Gent-Oostende als gevolg van de aanwezigheid van giftige blauwalgen. Ook de zwemzone ter hoogte van de Coupure werd tijdelijk gesloten.

In de opgeleverde kaarten zijn de gebieden die kunnen leiden onder de toegenomen recreatiedruk aangeduid. De kaarten bevatten alle soorten gebieden die hierboven besproken werden.

4.8.3 Pleziervaart

De impact van droogte op de pleziervaar rond Brugge, en bij uitbreiding West-Vlaanderen, zal zeer groot zijn. Door droogte en beperkte watervoorraden zal het aantal schuttingen van de sluizen beperkt worden, om de waterverliezen te limiteren. Concreet betekent dit dat slechts een beperkt aantal keren per dag geschut wordt, of dat dit samen met de beroepsvaart moet gebeuren. **In beide gevallen zal dit leiden tot lange wachttijden.** Indien dit fenomeen zich meer frequent gaat voordoen, kan gevreesd worden voor het verschuiven van de pleziervaart naar Zeeland of meer landinwaartse jachthavens. De economische verliezen voor de uitbaters van jachthavens en verhuurbedrijven zullen alleszins groot zijn.



5 Conclusies

Ons klimaat is aan het veranderen. Deze studie toont aan dat klimaatverandering een grote impact kan hebben op Brugge. Daarom is het belangrijk om ons nu reeds voor te bereiden op klimaatverandering. In het kader van het Europese 'Water Resilient Cities' project (WRC) werd eerder een risico- en kwetsbaarheidsanalyse uitgevoerd voor de historische binnenstad van Brugge, gevolgd door de opmaak van een doelgericht klimaatadaptatieplan om de gevolgen van klimaatverandering voor de historische binnenstad op te vangen. Voorliggend rapport bouwt verder op deze risico- en kwetsbaarheidsanalyse van de historische binnenstad, en breidt deze uit naar de rest van het grondgebied. **Dit rapport beschrijft bijgevolg de belangrijkste te verwachten impacts van klimaatverandering voor zowel de binnenstad als de andere sectoren van Brugge.** De risicoanalyse laat toe om kwetsbare punten te identificeren, en dient vervolgens als basis voor het opmaken van een klimaatadaptatieplan van het ganse grondgebied van Brugge. Het klimaatadaptatieplan wordt beschreven in een afzonderlijk document.

Deze studie becijferde klimaatverandering aan de hand van **klimaatmodellen en verschillende scenario's**. De exacte verandering van het klimaat is op dit moment niet te voorspellen. De onzekerheid op de modellen en de toekomstige broeikasgasuitstoot is daarvoor te groot. Dit rapport toont daarom het verwachte bereik van de veranderingen. Het begroten van de mogelijke impacts gebeurt aan de hand van het meest negatieve, of het hoge impact scenario. Dit scenario behoort tot de mogelijkheden en moet dus ook beschouwd worden in het beleid.

Klimaatverandering zal in Vlaanderen leiden tot verschuivingen in het **neerslagpatroon**: de wintermaanden worden natter, terwijl de zomermaanden droger worden, maar met hevigere onweersbuien. Deze tendensen zijn de laatste decennia reeds duidelijk waarneembaar, maar een analyse toonde aan dat de historische binnenstad van Brugge al zeker de afgelopen 10 jaar (toevallig) geen extreme neerslagbuien te verwerken kreeg. Daarnaast zal de **temperatuur** toenemen: met 1 °C tot 4.5 °C in de winter, en 1.5 °C tot 6.5 °C in de zomer tegen 2100. Hierdoor zal ook het aantal dagen met vorst afnemen. **Verdamping** neemt eveneens toe, voornamelijk in de zomermaanden. De studie houdt rekening met een **zeespiegelstijging** van 80 cm tegen 2100. De precieze cijfers en prognoses zijn op maandbasis terug te vinden in Hoofdstuk 2.

Als gevolg van deze veranderingen zullen stedelijke wateroverlast, overstromingen vanuit waterlopen, droogte en hittegolven meer frequent en meer extreem voorkomen. Als gevolg van de hevigere onweersbuien kan de geïmpacteerde oppervlakte door **rioleringsoverstromingen** tegen 2100 met een factor 2 tot bijna 4 toenemen, waardoor uitzonderlijke zomerbuien (met terugkeerperiode 100 jaar) tegen 2100 op 6% van het grondgebied wateroverlast veroorzaken. De extreme neerslag doet ook de rioleringsoverstorten vaker in werking treden, met een negatieve impact op de waterkwaliteit op de reien, waterlopen, polders en kanalen. De impact van **overstromingen vanuit waterlopen** lijkt beperkt te blijven in de historische binnenstad, dankzij de keerstuw op het kanaal Gent-Oostende in Beernem. Elders in Brugge kunnen significante rivieroverstromingen echter 4 keer vaker voorkomen in 2050 dan vandaag, en zelfs 8 keer vaker tegen 2100. Bovendien worden de rivieroverstromingen uitgestrekter. In het bijzonder is er een sterke toename in overstromde oppervlakte te verwachten langs de Kerkebeek indien geen maatregelen getroffen worden. De risicozones zijn gekarteerd in dit rapport. Ook het risico op **kustoverstromingen** neemt toe ten gevolge van klimaatverandering. De overstromde oppervlakte bij een 1000-jarige storm neemt toe van 4450 hectare in het huidige klimaat tot 6000 en 7000 hectare tegen respectievelijk 2075 en 2115 als de zeewering niet verder uitgebouwd wordt. Het Masterplan Kustveiligheid omvat echter een concrete set maatregelen om dit risico te minimaliseren, en is momenteel in uitvoering. Er wordt dan geen significante wateroverlast meer verwacht voor een terugkeerperiode van 1000 jaar. Kaarten van al bovenstaande beschreven types overstromingen zijn terug te vinden in Hoofdstuk 3.

Uitzonderlijke **droogte**, die momenteel eens om de 20 jaar voorkomt, kan tegen 2100 gemiddeld om de twee jaar voorvallen. Voor zeer extreme droogte, met een herhalingsjijd van 100 jaar, verschuift dit naar 4.5 jaar. Bovendien zullen de beschikbare hoeveelheden oppervlaktewater in de zomer met 40% kunnen dalen tegen 2100. Dit zal ook een weerslag hebben op de mogelijke waterinname naar de Brugse reien: de periodes waar geen inname mogelijk is nemen toe, met lagere waterstanden en een slechtere waterkwaliteit op de reien als gevolg. Een historische analyse van de **verzilting** geeft aan dat er de laatste decennia geen grote veranderingen waarneembaar zijn, behalve langs het Boudewijnkanaal en de opgehoogde havengronden. De dalende hoeveelheden oppervlaktewater en neerslag in de zomer zullen wellicht de huidige delicate balans verstoren en zorgen voor meer verzilting. De impact van de zeespiegelstijging op verzilting is wellicht beperkt.

Momenteel kent stad Brugge gemiddeld 5 **hittegolfdagen** per jaar, wat kan stijgen naar 48 tegen 2100. Ook de gemiddelde temperatuur in de zomermaanden zal stijgen van 18.7 °C naar 24.9 °C. In het noorden van Brugge is de impact beperkter, maar nog steeds problematisch. Meer gedetailleerde cijfers zijn terug te vinden in Hoofdstuk 3. Dit alles heeft ook een negatieve impact op de waterkwaliteit van alle oppervlaktewaters.

Deze veranderende omstandigheden, voornamelijk een toename van de extremen, zullen ongetwijfeld een impact hebben op mens en natuur. Het rapport beschrijft deze **impacts** aan de hand van zeven sectoren: gezondheid en welzijn, schade aan gebouwen, infrastructuur, werk & economie, energie & drinkwater, natuur & milieu en recreatie & toerisme. Dit gebeurt door middel van het kruisen van ruimtelijke kaarten met klimaateffecten, met geografische informatie van de verschillende domeinen en sectoren. Gezien het groot aantal gegevens zijn deze resultaten niet samengevat in de conclusies. De lezer wordt verwezen naar Hoofdstuk 5 voor meer informatie.

Klimaatverandering manifesteert zich gradueel. De hier beschreven impacts zullen zich niet allen morgen manifesteren. Maar het is wel **belangrijk om het beleid en acties reeds op de te verwachten klimaatverandering af te stemmen**. Gelet op de lange levensduur van infrastructuur en ruimtelijke planning, richt deze studie zich zowel op de te verwachten klimaatverandering tegen de jaren 2050 als 2100. Om Brugge weerbaar te maken tegen klimaatverandering, omvat het klimaatadaptatieplan gerichte acties in verschillende domeinen. Dit plan maakt stad Brugge climate-proof, en grijpt tegelijkertijd opportuniteiten aan om de leefbaarheid, natuur en andere aspecten te versterken en verbeteren.

6 Referenties

- Amelung, B., Moreno, A. (2009) *Impacts of climate change in tourism in Europe*. PESETA-Tourism study. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. ISBN 978-92-79-14561-2. <http://doi.org/10.2791/3418>
- Baguis, P., Boon, W., Kampkuiper, S., Rosenboom, R., Verbout, A., Verwij, L., van de Vijver, H. (2012). *Klimaat-effectschetsboek West- en Oost-Vlaanderen*. KMI en Bodemkundige Dienst van België vzw in opdracht van Provincies West-Vlaanderen en Oost-Vlaanderen.
- Brits, E., Verhagen, B., Dispas, M., Van Oyen, H., Van der Stede, Y., Van Nieuwenhuyse, A., (2009). Climate change and health – set-up of monitoring of potential effects of climate change on human health and on the health of animals in Belgium. December 2009, 54 pp.
- Brouwers, J. (2016). *Slachtoffers bij hittegolven*. Milieurapport Vlaanderen, Vlaamse Milieumaatschappij, Brussel. <https://www.milieurapport.be/milieuthemas/klimaatverandering/gevolgen-klimaatverandering/slachtoffers-bij-hittegolven>
- Buisman, J. (2000). *Duizend jaar weer, wind en water in de Lage Landen, deel 4*. Uitgeverij van Wijnen, Franeker. p. 784.
- CIW (2009). Het bekkenbeheerplan van het bekken van de Brugse Polders. Integraal waterbeleid in de praktijk. Commissie integraal waterbeleid.
- Coninx, I., De Rooij, B., Swart, R., Willems, P., Van Uytven, E., Tabari, H., Goosen, H., Koekoek, A., Van Bijsterveldt, M., Boone, P. (2016), *Klaar voor klimaatverandering - Opmaak van een risico- en kwetsbaarheidsanalyse in functie van klimaatadaptatie en uitwerken van adaptatiebeleid op maat van en voor de provincie Antwerpen*. Alterra Wageningen UR en KU Leuven voor Provincie Antwerpen
- Downing, J. A., Watson, S. B., McCauley, E. (2001). Predicting Cyanobacteria dominance in lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(10), 1905-1908, <https://doi.org/10.1139/f01-143>.
- Dugord, P., Lauf, S., Schuster, C., Kleinschmit, B. (2014). Land use patterns, temperature distribution, and potential heat stress risk – The case study Berlin, Germany. *Computers, Environment and Urban Systems*, 48, 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.07.005>
- Europese Commissie, Brussel, (2009). Witboek 'Aanpassing aan de klimaatverandering: naar een Europees actiekader – De effecten van de klimaatverandering op de gezondheid van mensen, dieren en planten' (COM(2009) 147 def.)
- Federale Overheidsdienst Werkgelegenheid, Arbeid en Sociaal Overleg. *Rechten van werknemers bij warm weer*. Geraadpleegd op 04/08/2018. Beschikbaar op: <http://www.werk.belgie.be/defaultTab.aspx?id=4702>
- Fiore, A.M., Naik, V., Leibensperger, E.M. (1995). Air quality and climate connections. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 65 (6), 645-685, <https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1040526>.

- Forzieri, G., Cescatti, A., e Silva, F. B., Feyen, L. (2017). Increasing risk over time of weather-related hazards to the European population: a data-driven prognostic study. *The Lancet Planetary Health*, 1(5), e200–e208. [http://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30082-7](http://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30082-7)
- Geels, C., Andersson, C., Hänninen, O., Lansø, A.S., Schwarze, P.E., Skjøth, C.A., Brandt, J. (2015). Future Premature Mortality Due to O₃, Secondary Inorganic Aerosols and Primary PM in Europe – Sensitivity to Changes in Climate, Anthropogenic Emissions, Population and Building Stock. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 2837-2869. <https://doi.org/10.3390/ijerph120302837>.
- Huybrechts, P. (2002). Sea-level changes at the LGM from ice-dynamic reconstructions of the Greenland and Antarctic ice sheets during the glacial cycles. *Quaternary Science Reviews*, 21, pp. 203-231.
- IMDC, (2013). Eindrapport watertoets Sint-Pietersmolenwijk, IMDC i.o.v. Brugse Maatschappij voor Huisvesting en Vivendo.
- Kimball, B.A., Kobayashi, K., Bindi, M., 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment, *Advances in Agronomy*, Vol. 77. *Advances in Agronomy*, pp. 293-368.
- Lauwaet D., De Ridder K., Maiheu B., Hooyberghs H., Lefebvre F. (2018), *Uitbreiding en validatie indicator hitte-eilandeffect*, studie uitgevoerd door VITO in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2018/01, VITO.
- Lebbe, L., Claus, J. (2012). SCALDWIN: *Analyse grensoverschrijdende verzilting grondwater in het poldergebied van de provincies Oost-Vlaanderen, West-Vlaanderen en Zeeland. Fase 2, Deelopdracht 3: Analyse toekomstige evolutie zoet-zoutwaterverdeling onder verschillende scenario's*. Universiteit Gent en Deltares voor Vlaamse Milieumaatschappij.
- Leysen, G., Franken, T., Fang, Z., Gullentops, C., Coen, L., Bogman, P., Coorevits, L., Blanckaert, J., Swings, J., Pereira, F., Vanderkimpen, P., Verwaest, T., Mostaert, F. (2015). *Overstromingsrisicobeheerplannen in Vlaanderen: Randvoorwaarden, Hydraulica, Statistiek van Dender, Leie, Bovenshelde, Gentse Kanalen, IJzer en Kanaal Charleroi*. Versie 4.0. WL Rapporten, 13_098. Waterbouwkundig Laboratorium & IMDC, Antwerpen.
- MIRA (Brouwers, J., Peeters, B., Van Steertegem, M., van Lipzig, N., Wouters, H., Beullens, J., Demuzere, M., Willems, P., De Ridder, K., Maiheu, B., De Troch, R., Termonia, P., Vansteenkiste, Th., Craninx, M., Maetens, W., Defloor, W., Cauwenberghs, K.) (2015), MIRA Klimaatrapport 2015 – Over waargenomen en nog verwachte klimaatveranderingen. Vlaamse Milieumaatschappij i.s.m. KU Leuven, VITO en KMI, Aalst, september 2015, 147 p.
- Ntegeka, V., Baguis, P., Roulin, E., Willems, P. (2014). Developing tailored climate change scenarios for hydrological impact assessments. *Journal of Hydrology*, 508C, 307-321. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.001>
- Oleson, J.E., Bindi, M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity. *European Journal of Agronomy*, 16, pp. 239-262.
- Orru, H., Andersson, C., Ebi, K.L., Langner, J., Astrom, C., Forsberg, B. Impact of climate change on ozone-related mortality and morbidity in Europe. *European Respiratory Journal*. 41 (2), 285-294. <https://doi.org/10.1183/09031936.00210411>.
- Orru, H., Ebi, K.L., Forsberg, B. (2017). The Interplay of Climate Change and Air Pollution on Health. *Current Environmental Health Reports*, 4(4), 504-513. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0168-6>.

- Paerl, H. W., Paul, V. P. (2012). Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research*, 46, 1349-1363. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.002>
- Peters, G.P., Andrew, R.M., Boden, T., Canadell, J.G., Ciais, P., Quéré, C. Le, Marland, G., Raupach, M.R., Wilson, C. (2013), The challenge to keep global warming below 2°C. *Nature Climate Change*, 3, 4-6.
- Provincie West-Vlaanderen (2018). Waterbehoefte, -gebruik en -aanbodanalyse van de kuststreek. Studie uitgevoerd door Antea Belgium i.o.v. Provincie West-Vlaanderen. 245 pp.
- Schaars, F. (2014). Elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht ter bepaling van de verziltingstoestand van het grondwater in het oostelijk gedeelte van de kustvlakte. Artesia rapport 13.34.92, Schoonhoven.
- Vandevelde, D. , Schaars, F., Viezzoli, A. & Gisseloe, P. (2014). Actualization of a 40 year old salinization map of the Eastern Belgian coast using airborne time-domain electromagnetic survey (SkyTEM). Proceedings, 23th Salt Water Intrusion Meeting, Husum, Germany.
- Vanormelingen, P. (2018). Blauwalgen: waar komen ze vandaan? <https://www.natuurpunt.be/nieuws/blauwalgen-waar-komen-ze-vandaan-20180808>
- Van Uytven, E., Willems, P. (2018). Greenhouse gas scenario sensitivity and uncertainties in precipitation projections for central Belgium. *Journal of Hydrology*, 558, 9-19.
- Vlaamse Milieumaatschappij (2016). Verziltingstoestand van het Oostelijk kustgebied. Resultaten van het elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht. D/2016/6871/030
- Vlaamse Milieumaatschappij (2018a). Impact van klimaatverandering op meteorologische droogte. Opdracht uitgevoerd door Sumaqua in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, maart 2018, 43 p.
- Vlaamse Milieumaatschappij (2018b). Aanmaak van een afstromingsgevoelige kaart voor Vlaanderen, 151 p.
- Vlaamse Milieumaatschappij (2018c). Riviercontract voor de vallei van de Kerkebeek.
- Vlaamse Milieumaatschappij (2019). TOPSOIL Airborne EM kartering van zoet en zout grondwater in Vlaanderen (FRESHM Vlaanderen). Onderdeel van het Interreg North Sea Region project TOPSOIL, 144 p.
- Vriens, L., Peymen, J. (2017). Ecotoopwetsbaarheidskaarten voor Vlaanderen. 2016 – versie 2. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2017 (19), Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel. DOI: doi.org/10.21436/inbor.12650809.
- VRT, (2020). Zeespiegel stijgt alarmerend (tot 1 meter in 2100): wat betekent dat voor ons? En ontdek tot waar het water kan komen. Artikel van Wim De Maeseneer, 3 september 2020, raadpleegbaar via vrt.be/vrtnws/nl/2020/09/02/stijgende-zeespiegel-in-belgie/. Geraadpleegd op 24 januari 2021.
- Willems, P. (2014). Actualisatie van de extreme-waarden-statistiek van stormvloeden aan de Belgische kust. KU Leuven - Afdeling Hydraulica, Rapport voor de Vlaamse Overheid - Waterbouwkundig Laboratorium, oktober 2014, 27 p.
- Willems,P., Vrac, M. (2011). Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *Journal of Hydrology*, 402, 193-205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.030>

Willems, P. et al. (2021). Tussentijds syntheserapport "Uitwerking van een reactief afwegingskader voor prioritair watergebruik tijdens waterschaarste". Studie uitgevoerd door KU Leuven, Sumaqua, KPMG, de Bodemkundige Dienst van België, Cycloop en Universiteit Antwerpen i.o.v. de Vlaamse Overheid.

Zwaenepoel, E., Danckaert, S., Van Gijseghem, D. (2016) *Klimaatverandering in de polders. Kiezen voor zoet of zilt?*, Departement Landbouw en Visserij, Brussel.