

OFFICIAL

BRUGGE



# Assessment of the Climate Change Risks and Vulnerabilities in the Historic Centre of Brugge

OFFICIAL

## Document Description

### Title

Assessment of the Climate Change Risks and Vulnerabilities in the Historic Centre of Brugge.

### Authors

Sumaqua

### Study commissioned by

Stad Brugge

### Means of reference

Sumaqua, 2018. 'Assessment of the Climate Change Risks and Vulnerabilities in the Historic Centre of Brugge'. Study conducted by Sumaqua for stad Brugge under the Interreg Water Resilient Cities project.

### Publication date

March 2019

### Questions about this report

If you have any questions about this report please contact the project coordinator Veronique Soulliaert ([veronique.soulliaert@brugge.be](mailto:veronique.soulliaert@brugge.be)) or the study's author ([vincent.wolfs@sumaqua.be](mailto:vincent.wolfs@sumaqua.be)).



BRU  
GGE







OFFICIAL

## Foreword

Climate change is a matter of fact. In Flanders the temperature has already risen by 2.2 °C in the last 130 years. For the next 80 years the models forecast that temperatures in the centre of Brugge will rise by 4.5 °C in the winter and possibly 6.5 °C in the summer. There can be no doubt that this will have a knock-on effect. In 2017 and 2018 we had an exceptional drought, the damaging effects of which were visible even in Brugge. There was a deterioration of the water quality in the canals, swans had to be evacuated from the waterways and farmers could only watch as their crops perished in the fields. It is expected that rain storms will be more extreme in the future, and that this will lead to flooding.

As a town, however, we won't let this get the better of us. We are taking effective action, locally, to counter climate change. We are investing in ways to make sustainable energy savings in the town's civic properties, seeking new ways in partnership with our residents to increase the number of solar panels and wind turbines on our territory and testing out 'smart' applications. We are also taking steps to adapt the town to these climate changes and so mitigate the impact as effectively as possible.

These are all important measures which we, the town, should be taking. But to place the initiatives on a firm footing we commissioned Sumaqua to carry out two comprehensive studies. The first study, the document you see before you, assesses the risks and vulnerabilities of the historic town centre. The second outlines a climate adaptation plan, based on a number of adaptation options. These studies received EU funding under the European Water Resilient Cities project. The assessment shows that water is a key factor, as it has been throughout the history of the town. Today too, in other words, the centre's many watercourses are both a blessing and a vulnerability.

The climate adaptation plan you see before you gives a coherent vision and shows the necessary ambition. It contains more than 50 specific measures in the short and medium term. With this plan we are issuing a clear signal that the town aims to be a frontrunner in climate adaptation in Flanders.

The climate adaptation plan is more than a stack of paper. It contains ideas to draw citizens in and take part in a variety of actions. It establishes links between citizens and associations, local town services, local industry and experts.

The study you have in your hand is the result of a close collaboration between the local town services and a group of external experts. I would like to thank everyone who has put their weight behind it. Together we will create a more sustainable and climate-robust Brugge, to make it an even better place in which to live, work and rest.

**Minou Esquenet**

*Alderman for climate change and energy, environment policy, smart city and facility management*









## Summary

This report is part of a climate adaptation plan for the historic town centre of Brugge, which was set up specifically to look at water. The present document reports the results of the risk and vulnerabilities study for the historic centre of Brugge, a study which investigates the potential impacts and effects of climate change. To mitigate the potentially negative impact of climate change and at the same time take every opportunity to increase life quality and climate resilience in the town centre, a climate adaptation plan was drawn up. That plan was set out in a separate document.






The tables below summarise the most significant and maximum climate impacts to be expected. The estimates have come from the most recent climate models. The values in these tables refer to climate change by the year 2100, whereas further in the report we also consider projections for 2030 and 2050. Given the long life of the infrastructure we suggest that the focus be maintained on the year 2100.

Please note that it is impossible to make a precise forecast of climate change. This is because there is too much uncertainty over matters such as future emissions of greenhouse gases. For that reason, the study uses several climate scenarios found in the international literature on climate change. The values in the tables below show the maximum potential change and corresponding impact on the historic centre of Brugge. The actual trend will probably lie somewhere between the current situation and the maximum situation forecast.

<b>Climate Conditions</b>		<p><b>Precipitation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Winters get wetter: precipitation volumes could rise by up to 30%, while the number of wet days remains the same.</li> <li>• Summers get drier: precipitation volumes could fall by up to 40%, as could the number of dry days.</li> <li>• Rainstorms get heavier: throughout the year precipitation intensities increase by up to 30%</li> </ul>
		<p><b>Temperature</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• The average temperature rises by 1 °C to 4.5 °C in the winter months and by 1.5 °C to 6.5 °C in the summer months.</li> <li>• The minimum and maximum temperatures increase by the same rate.</li> <li>• The number of frost days drops significantly.</li> </ul>
		<p><b>Evaporation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaporation increases in all months of the year: up to 20% in the spring months and up to 45% in the summer months.</li> </ul>

	<p><b>Sea level rise</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• The sea level in Ostend rises by 20 to 80 cm by 2100.</li> <li>• In the most extreme scenario the rise is even estimated at 200 cm.</li> </ul>
---	--

The tables in section 2.4 of this report give more figures on the climate conditions to be expected and do so for various future scenarios under consideration.

Climate Effects		<p><b>Urban flooding</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Heavier rainstorms in the summer cause more flooding in the town centre.</li> <li>• The flood area increases by a factor of 2 to 4, depending on storm frequency.</li> </ul>
		<p><b>Flooding from rivers</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• In the winter the higher volumes of rainfall will lead to more periods of increased drainage.</li> <li>• The town centre of Brugge appears to be well protected, thanks to the flood controls on the Ghent-Ostend canal in Beernem.</li> <li>• The chance of critical flooding is heightened only at Handelskom, but the flood area is limited.</li> </ul>
		<p><b>Drought</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lower rainfall levels and higher evaporation lead to more droughts: exceptional droughts may be up 10 times more frequent by 2100 than they are today. Extreme droughts up to 20 times.</li> <li>• The quantities of available surface water reduce: in the summer they could be up to 40% lower.</li> </ul>
		<p><b>Heat stress</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rising temperatures result in more heatwave days: up from today's average of 5 per year to 48 by 2100.</li> <li>• The average temperature in the summer months may rise from 18.7 °C to 24.9 °C. Due to the heat island effect this rise is higher in urban areas than in rural areas.</li> </ul>
		<p><b>Sea level rise</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• The rising sea level reduces the drainage capacity of the Ghent-Ostend canal. This can be particularly problematic during periods of high drainage.</li> </ul>

A detailed description of the origin of these figures and a more in-depth assessment can be found in Chapters 2 to 4.

Changing climate conditions and effects will have an impact on our society and surrounding ecosystems. A detailed discussion of these impacts is given for a number of sectors and areas, such as health and welfare, damage to buildings, infrastructure, work and economy, energy and potable water, nature and environment and recreation and tourism.

To mitigate the potentially negative impact of climate change and at the same time take every opportunity to increase life quality and climate resilience in the town centre, a climate adaptation plan was drawn up. That plan was set out in a separate document.

# Table of contents

Foreword .....	i
Summary.....	iii
Table of contents .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1 Introduction .....	1
1.1 What is climate change?.....	1
1.2 Dealing with climate change: mitigation and adaptation .....	2
1.3 Study approach & map.....	4
2 Anticipated climate change.....	3
2.1 Forecasting the future: climate models and scenarios .....	3
2.2 Interpretation: uncertainty of model results .....	5
2.3 Climate conditions .....	6
2.4 Summary tables.....	12
3 Effects of climate change .....	15
3.1 Introduction.....	15
3.2 Flooding as a result of intense rainfall .....	16
3.3 Flooding from rivers.....	21
3.4 Drought .....	24
3.5 Heat stress and rising temperatures .....	27
3.6 Sea level rise .....	30
3.7 Salinisation.....	32
4 Risks and vulnerabilities.....	34
4.1 Introduction.....	34
4.2 Health and welfare .....	34
4.3 Damage to buildings.....	38
4.4 Infrastructure .....	41
4.5 Work and economy.....	42
4.6 Energy and potable water.....	43
4.7 Nature and environment .....	44
4.8 Recreation and tourism .....	48
5 Conclusions .....	51
6 References .....	53

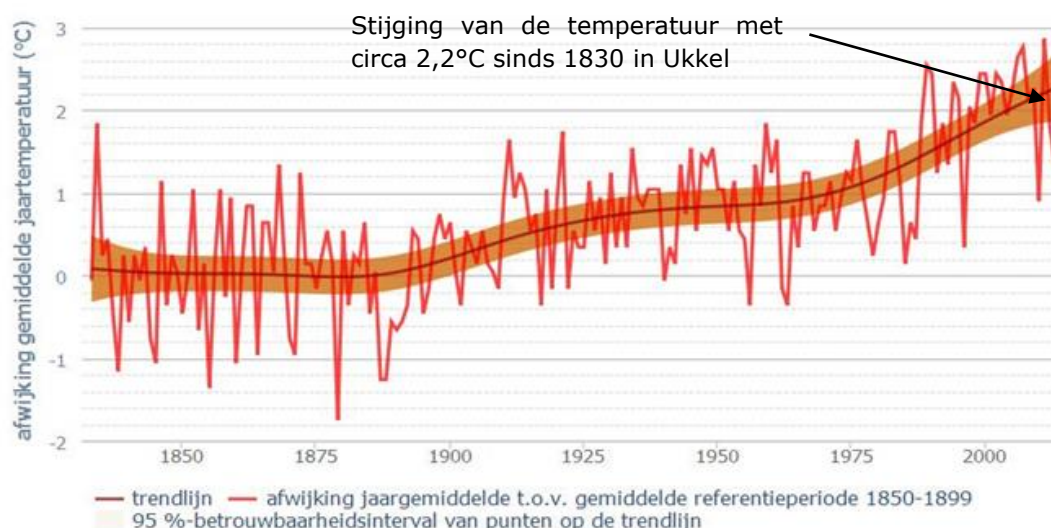


# 1 Inleiding

## 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<sup>e</sup> tot halweg de 19<sup>e</sup> 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 bv. ook uitgewezen dat het laatste kwart van de 16<sup>e</sup> 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 wellicht toe te schrijven aan de toename van broeikasgassen in de atmosfeer. Broeikasgassen, zoals CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub>, 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 bv. 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 neemt 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 gaat daarom op zoek naar nieuwe 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 de historische binnenstad 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 historische stadscentrum 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, CO<sub>2</sub> 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.



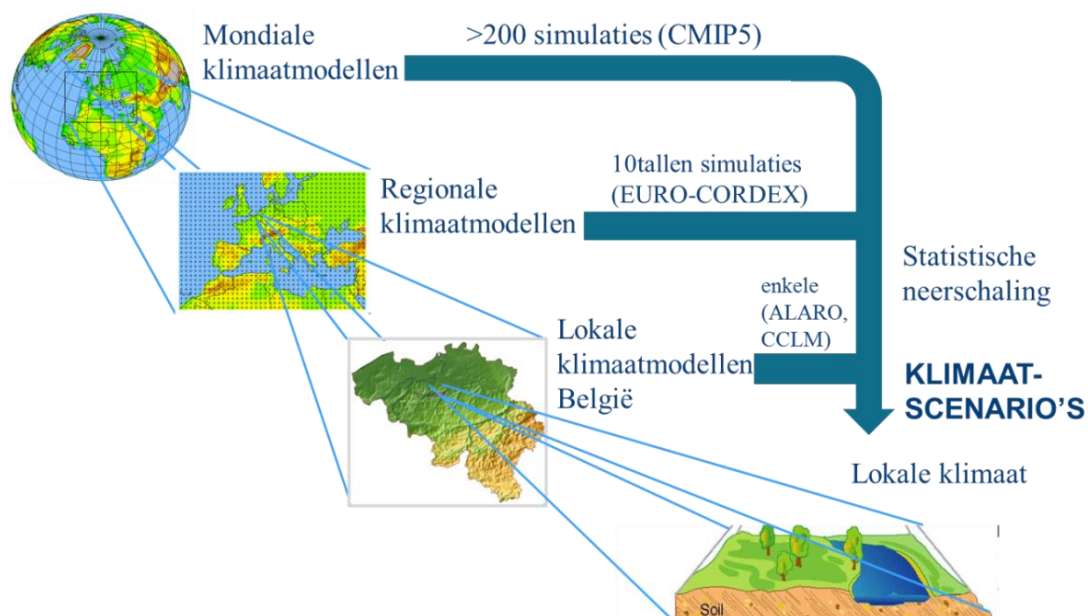
Figuur 3. Leeswijzer bij dit rapport.



## 2 Te verwachten klimaatverandering

### 2.1 De toekomst voorspellen: klimaatmodellen en bijhorende scenario's

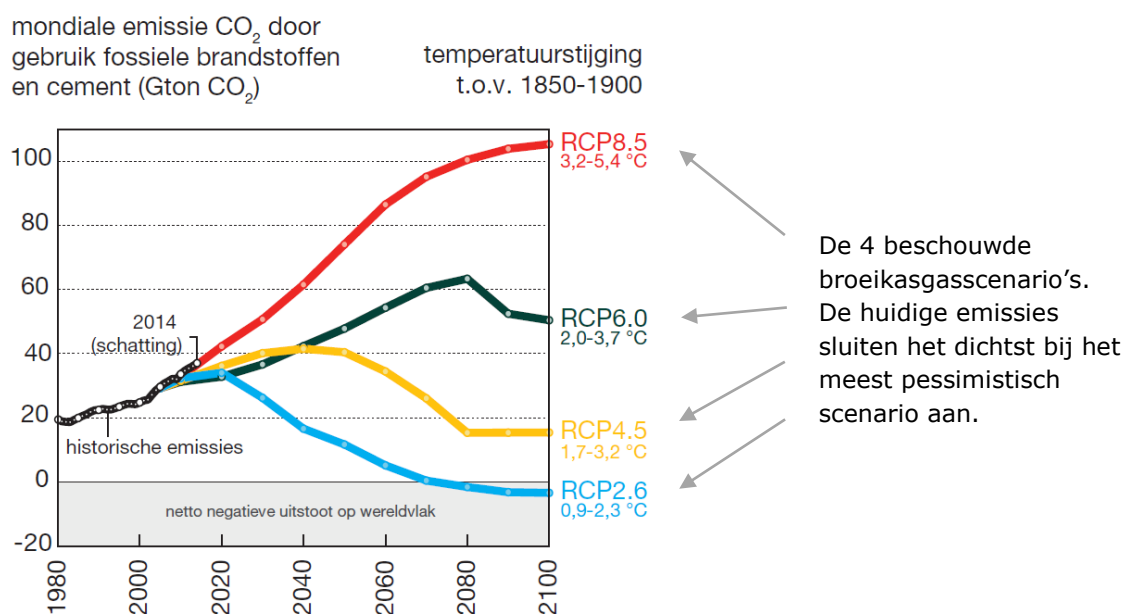
Om de toekomstige klimaatverandering in te schatten, wordt gebruik gemaakt van de resultaten van klimaatmodellen. In deze opdracht werden de meest recente simulatieresultaten met globale, regionale en lokale klimaatmodellen voor België gebruikt. Deze zijn gebaseerd op de nieuwste generatie klimaatmodellen, op basis van het World Climate Research Programme – Phase 5 (CMIP5). De resultaten van deze klimaatmodellen worden ook gebruikt in het 5<sup>de</sup> 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/m<sup>2</sup> (RCP2.6), 4.5 W/m<sup>2</sup> (RCP4.5), 6.0 W/m<sup>2</sup> (RCP6.0) en 8.5 W/m<sup>2</sup> (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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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/m<sup>2</sup> 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/m<sup>2</sup>. 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/m<sup>2</sup> en daarna afneemt tot 2.6 W/m<sup>2</sup> 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.

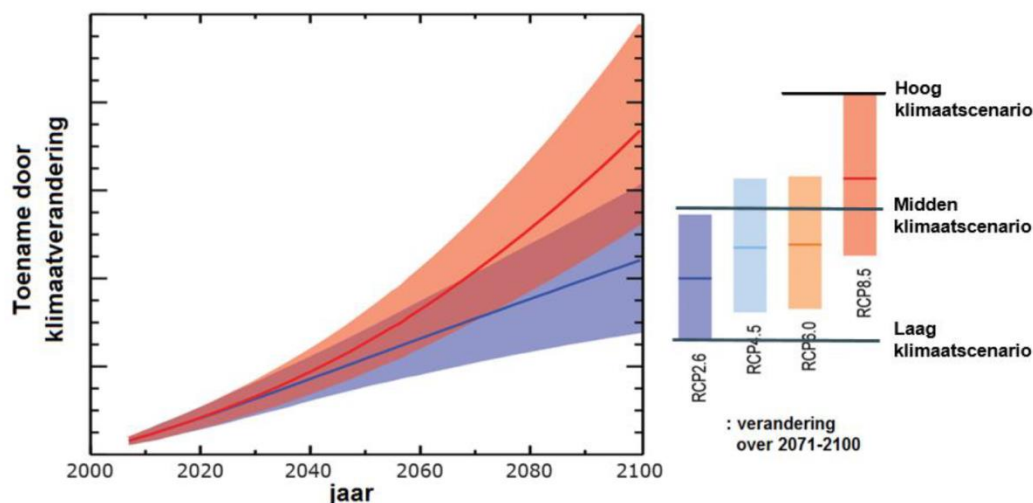
## 2.2 Interpretatie: onzekerheid omtrent modelresultaten

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).

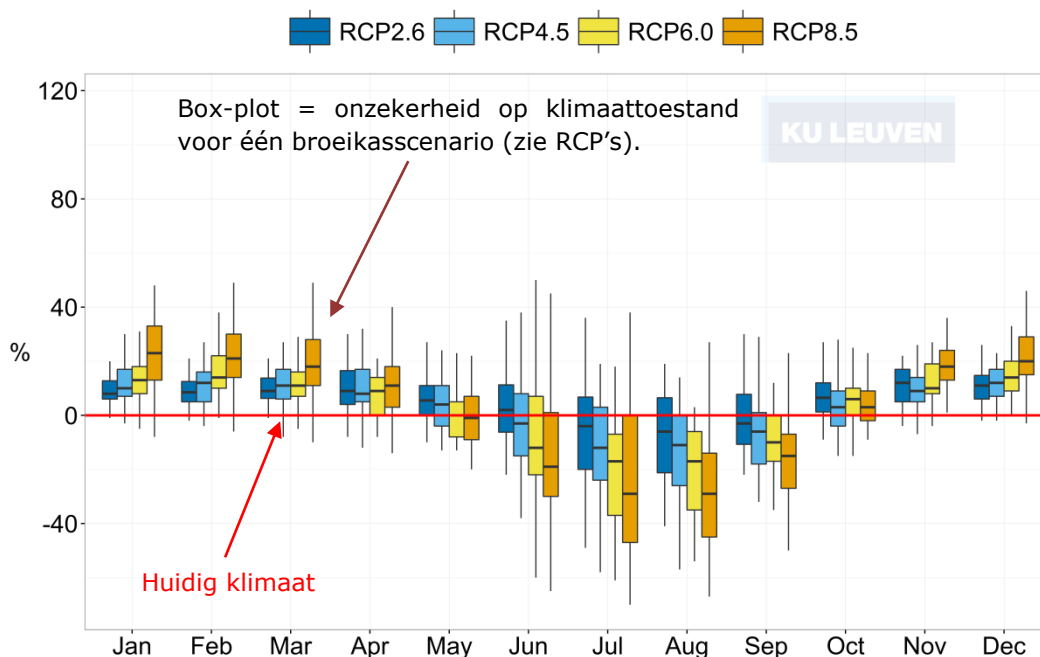
De veranderende klimaattoestanden, weergegeven als veranderingen van het huidig klimaat tot 2050 of 2100, kunnen ook geïnterpreteerd worden als de klimaatverandering over een periode van 50 of 100 jaar in de toekomst. Als referentieperiode werd de laatste 30 jaar beschouwd. Klimaat wordt immers gedefinieerd 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

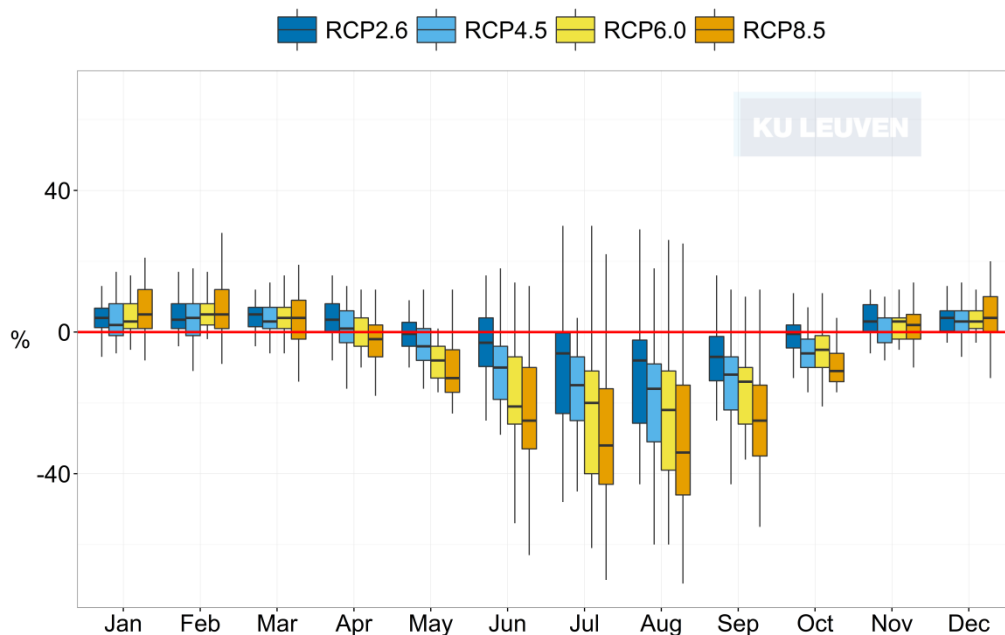
Het neerslagpatroon doorheen het jaar zal veranderen. **De algehele trend is dat zomers droger worden en dat in de winter meer neerslag zal gaan vallen**. Voor de meer extreme RCP-scenario's zijn de stijging in de winter en de daling in de zomer meer uitgesproken. Tijdens de wintermaanden ligt de toename 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.

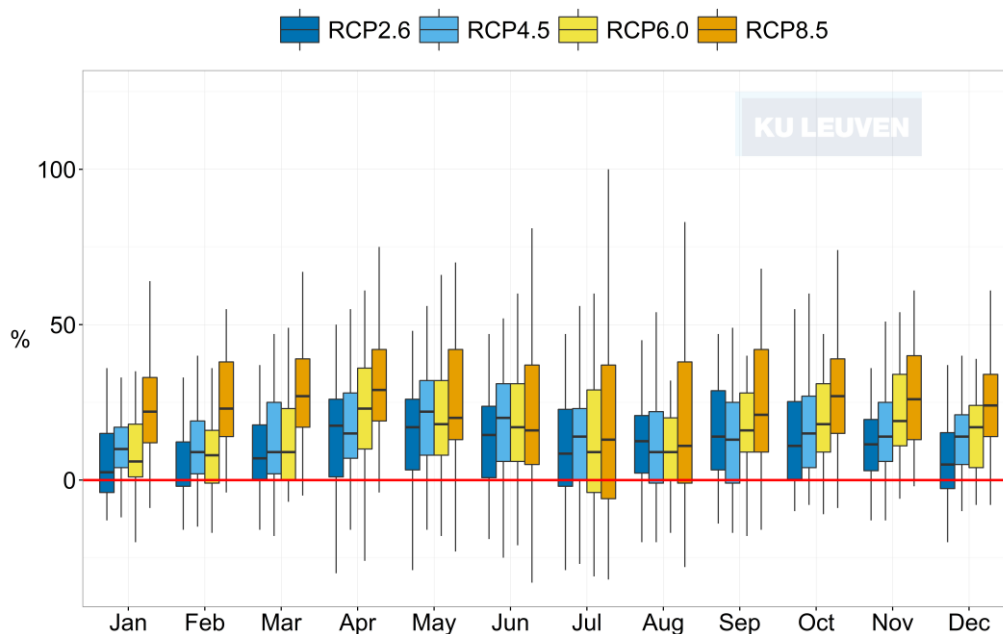


Figuur 8. Procentuele verandering in het gemiddelde aantal natte dagen per maand over een toekomstperiode van 100 jaar.



### 2.3.3 Extreme neerslagintensiteiten

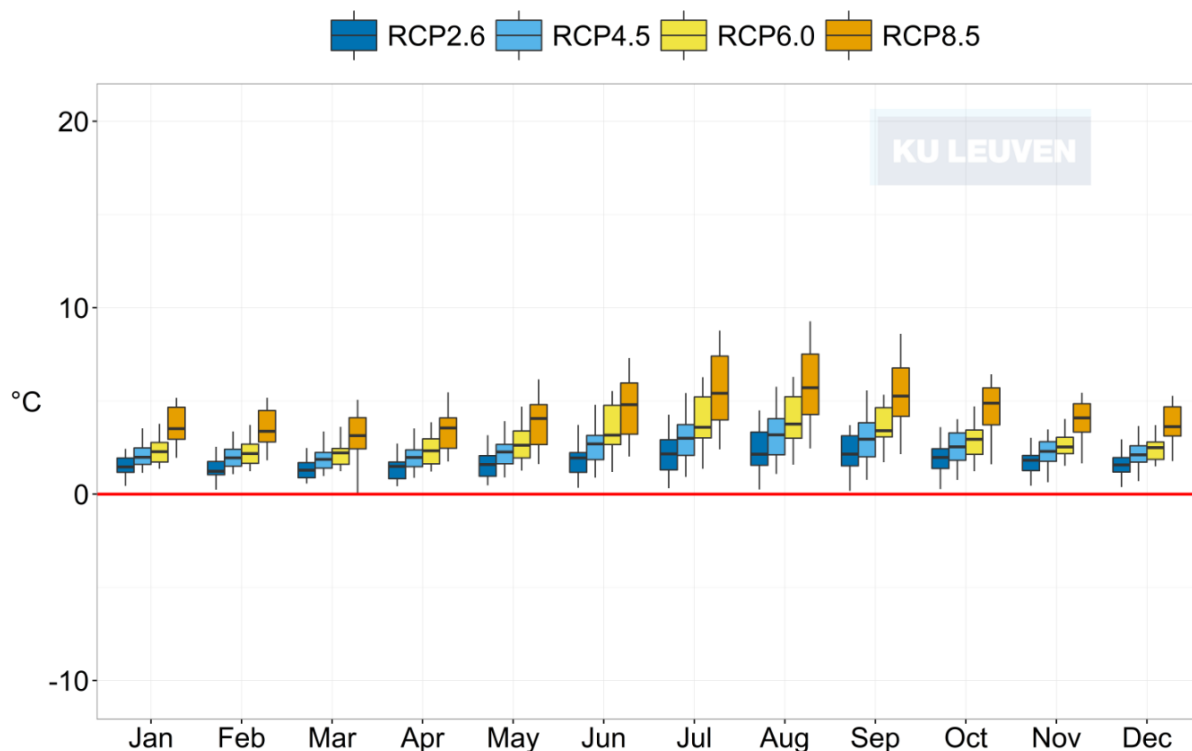
**Extreme regenbuien zullen heviger worden** dan in het huidig klimaat, zowel in de zomer- als in de wintermaanden. Extreme dagneerslag met een terugkeerperiode van 20 jaar kan toenemen tussen 0 en grootteorde 50% in de zomermaanden en tussen 0 en grootteorde 30% in de wintermaanden.



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

### 2.3.4 Daggemiddelde temperatuur

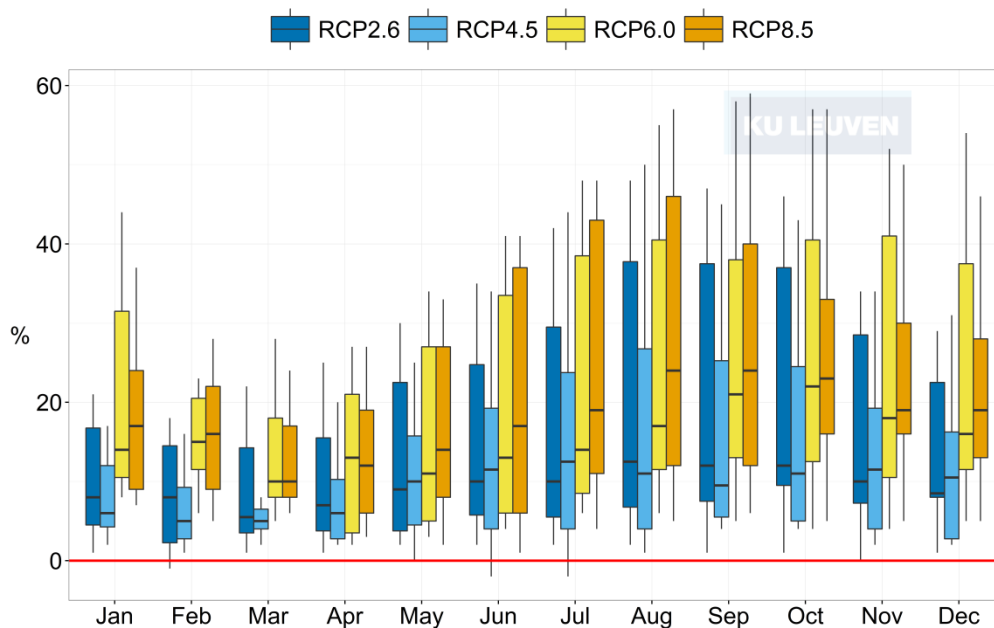
De maandgemiddelde dagtemperatuur stijgt voor alle maanden van het jaar. In de wintermaanden is deze toename in grootteorde tussen 1 °C en 4.5 °C. In de zomermaanden is deze toename groter: in grootteorde tussen 1,5 °C en 6,5 °C. Hoe hoger het broeikasscenario (tot RCP 8.5), hoe hoger de stijging in verwachte daggemiddelde temperatuur.



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

### 2.3.5 Verdamping

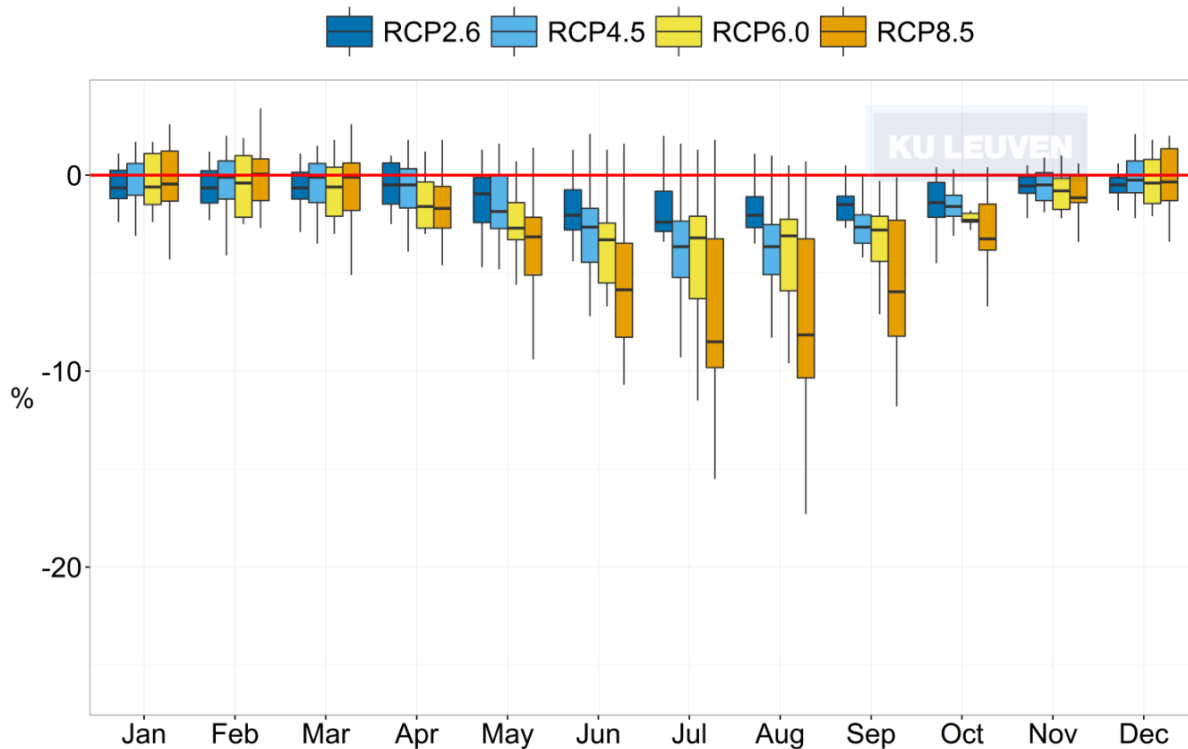
Door de temperatuurstijging zal de verdamping toenemen. Voor de zomermaanden juni t.e.m. september betekent dit een toename tussen grootteorde 5% en 50%, terwijl deze voor de lentemaanden wat lager is tussen grootteorde 0 en 20%.



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

### 2.3.6 Relatieve vochtigheid

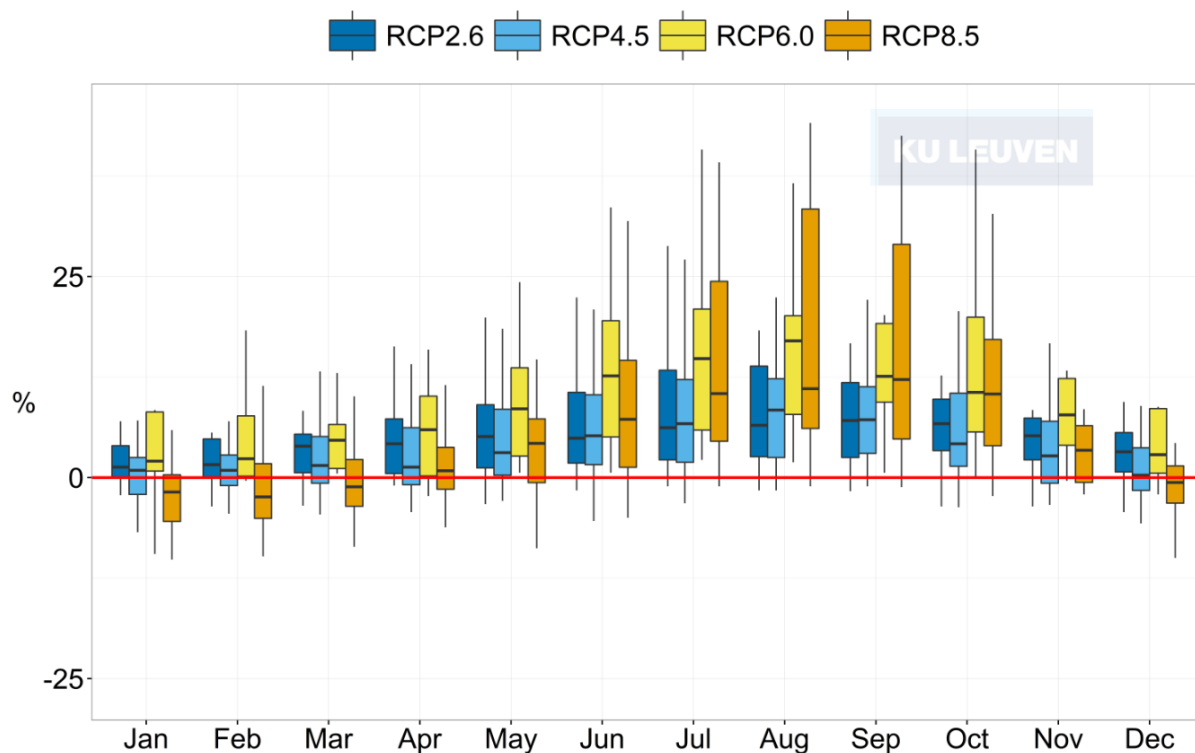
Door de temperatuurstijging in de zomer zal de relatieve vochtigheid afnemen, vooral in de zomer. Voor de zomermaanden juni t.e.m. september zorgt dit voor een afname van grootteorde -5% tot -10%. In de andere maanden is deze afname minder uitgesproken.



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

### 2.3.7 Zonnestraling

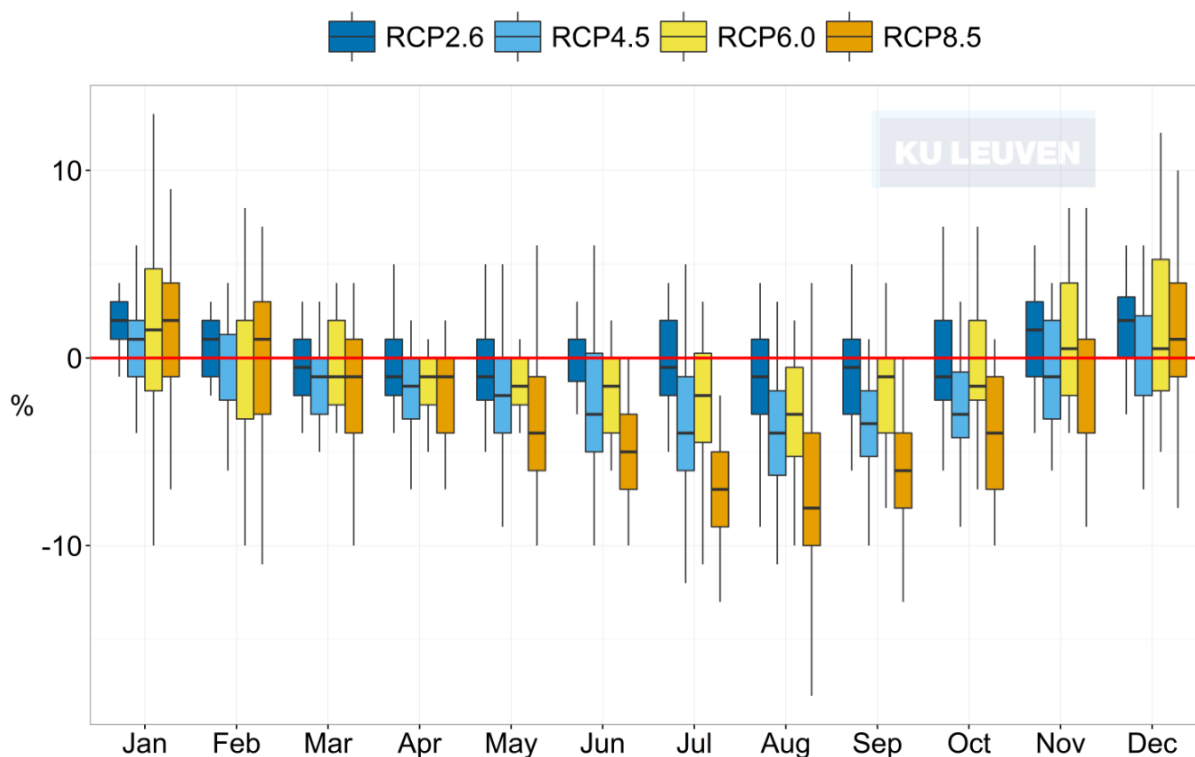
De broeikasgassen (en dus klimaatverandering) hebben ook een impact op de intensiteit van zonnestraling. Vooral in de zomer is een sterke toename mogelijk van de zonnestraling: grootteorde 5% tot 25%. In de overige maanden is de verwachte toename beperkt.



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

### 2.3.8 Windsnelheid

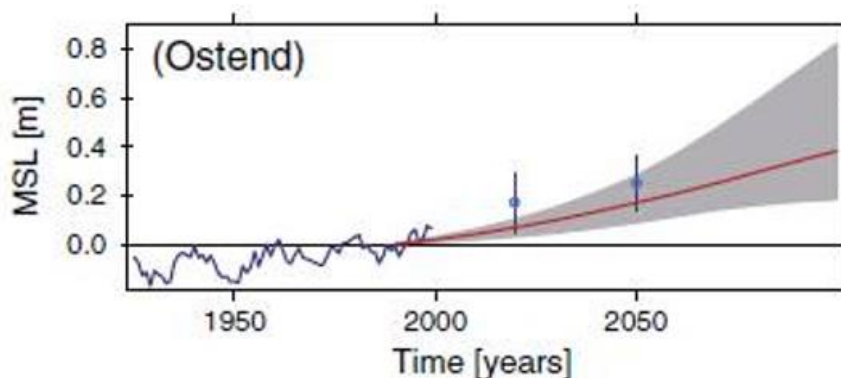
Verwacht wordt dat klimaatverandering een beperkte impact heeft op de gemiddelde windsnelheid (gemeten over een dag). De resultaten wijzen in een maximale verandering van +5% tot -10%.



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. 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.



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

## 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 huidige 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.

	<b>Huidig klimaat</b>	<b>Toekomstig klimaat</b>		
		<b>2030</b>	<b>2050</b>	<b>2100</b>
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.

	<b>Huidig klimaat</b>	<b>Toekomstig klimaat</b>		
		<b>2030</b>	<b>2050</b>	<b>2100</b>
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 ( $\geq 25$ °C) gemiddeld per jaar	31	68.6	91.6	114.6





## 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 de historische binnenstad van Brugge en de directe omgeving. 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 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 kunnen 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.

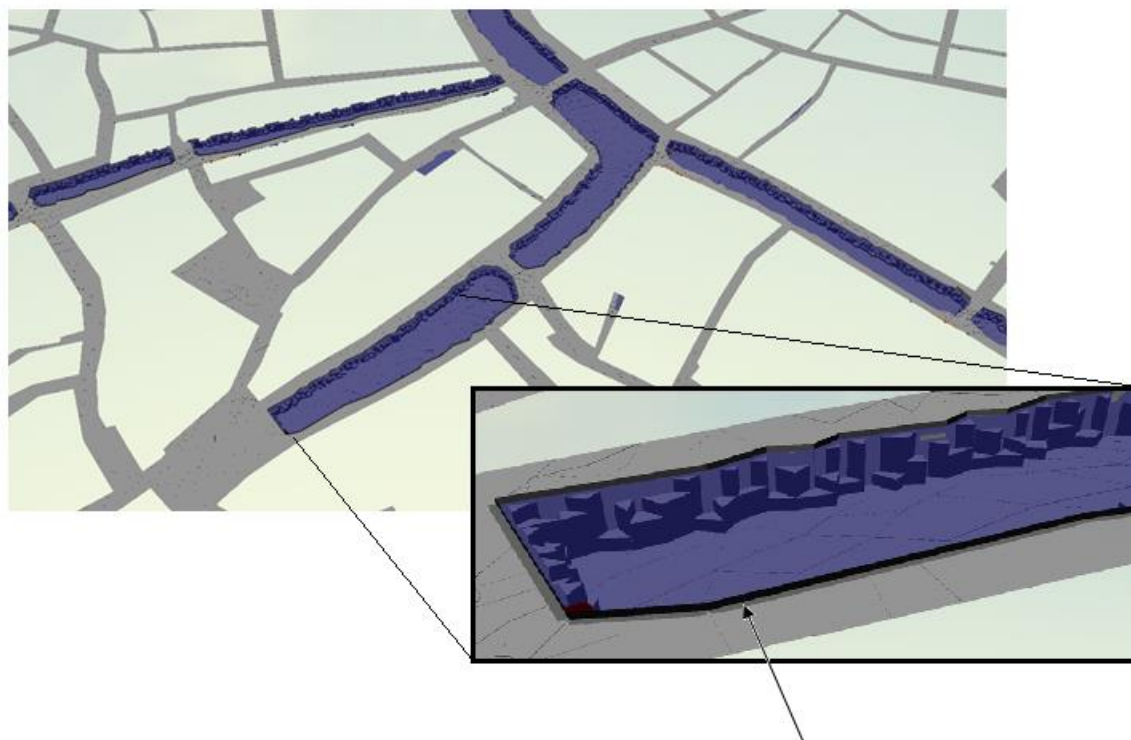
### 3.2.1 Berekeningswijze

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 rekenraaster 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.

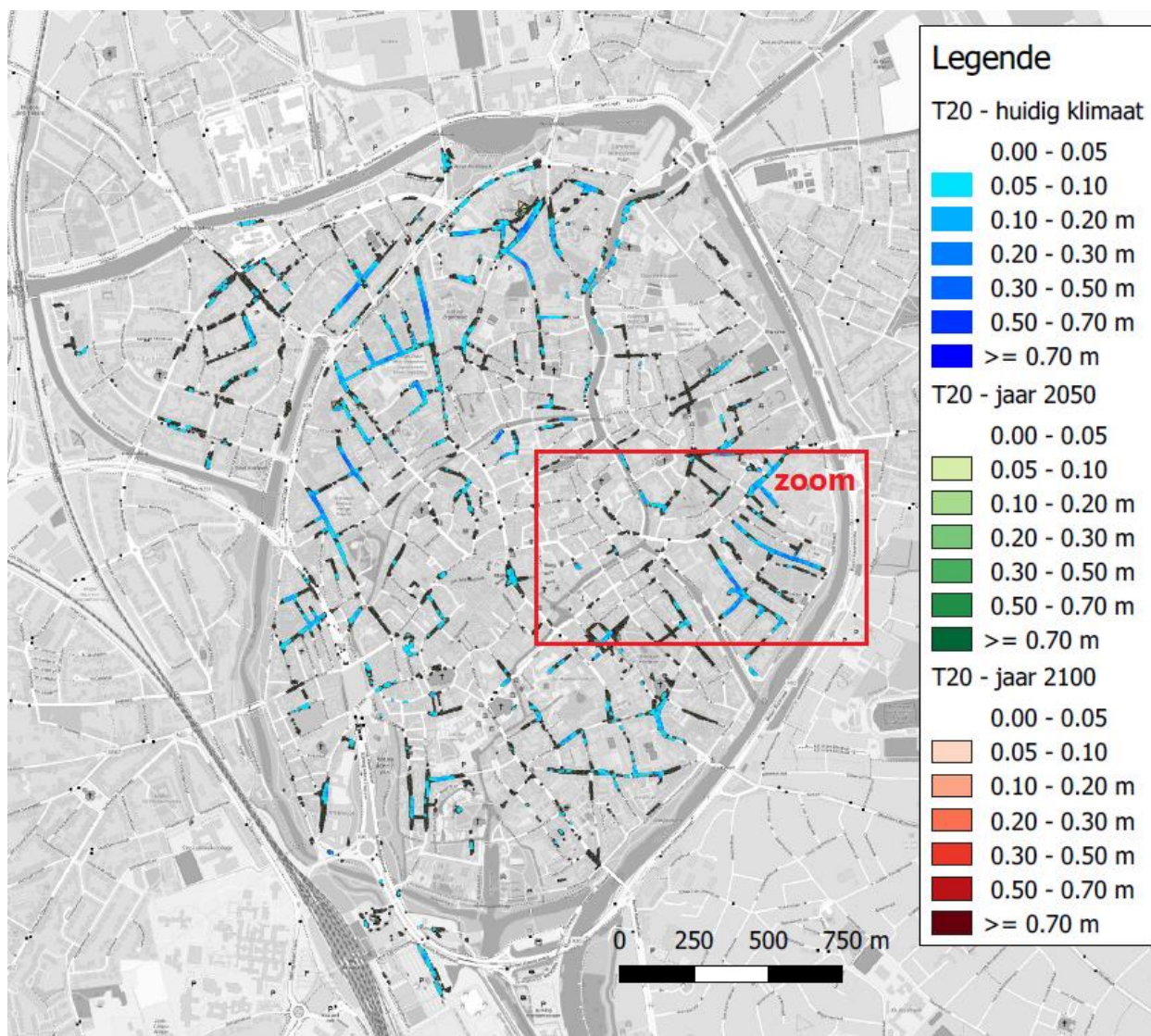


Figuur 17. Aangepast 1D-2D simulatiemodel waarbij een rekenraster voor de oppervlakte werd toegevoegd.

### 3.2.2 Resultaten

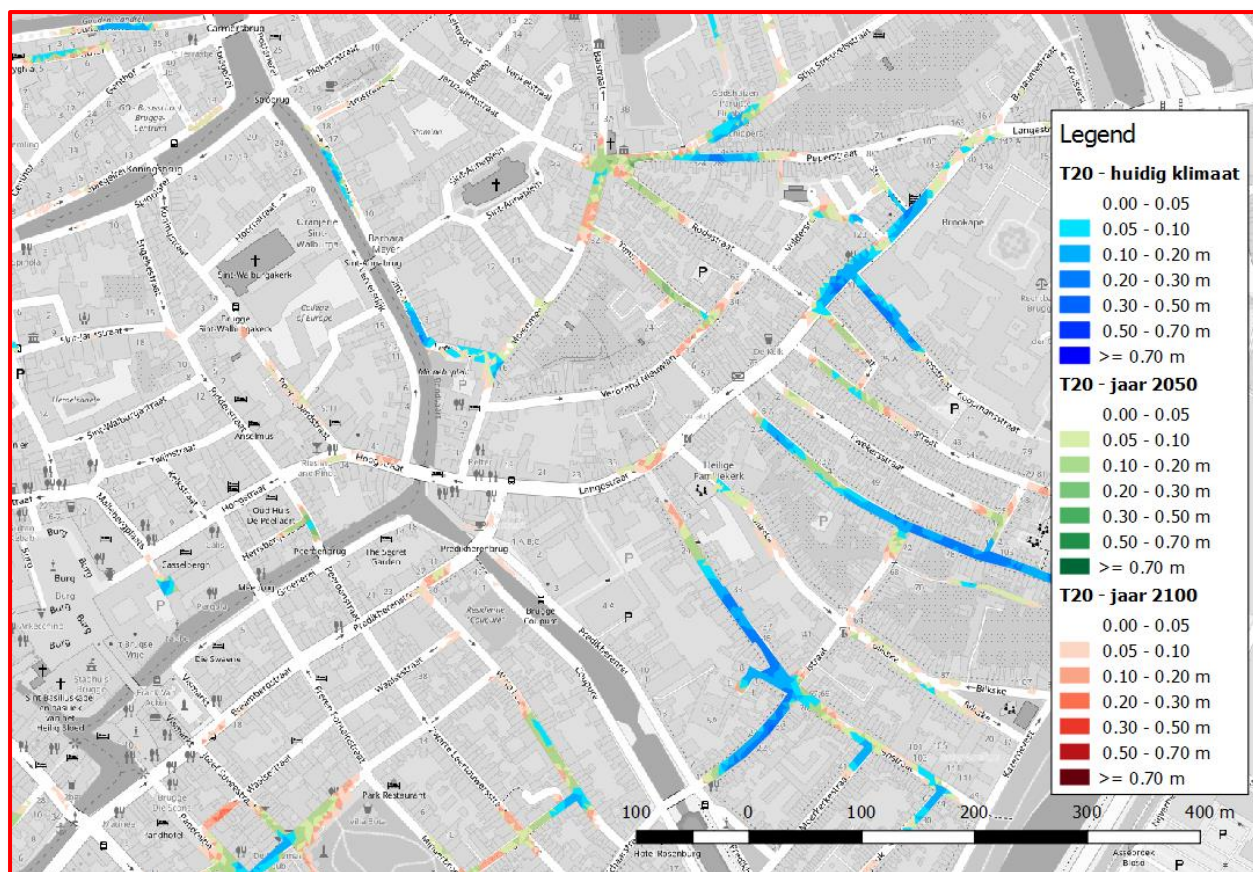
Met het uitgebreide en gedetailleerde rioleringsmodel werden overstromingen gesimuleerd die gemiddeld eens per 2, 5, 20, 50 en 100 jaar voorkomen in het huidige klimaat. Daarnaast werden ook neerslagbuien gesimuleerd onder het toekomstig klimaat. **Klimaatverandering zorgt voor toenemende neerslagextremen, 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 liggen en de gesimuleerde overstromingen.

Figuur 18 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 18. Kaart met de overstromingen door intense neerslag die gemiddeld eens per 20 jaar voorkomen onder het huidig klimaat, en het beschouwde klimaat in 2050 en in 2100.

Figuur 19 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 huidig 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 19. Zoom van de kaart uit Figuur 18. Kaart met overstromingen die gemiddeld eens per 20 jaar voorkomen onder het huidige 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 overstromt 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 huidige klimaat, en het klimaat in het jaar 2050 en 2100.

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

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

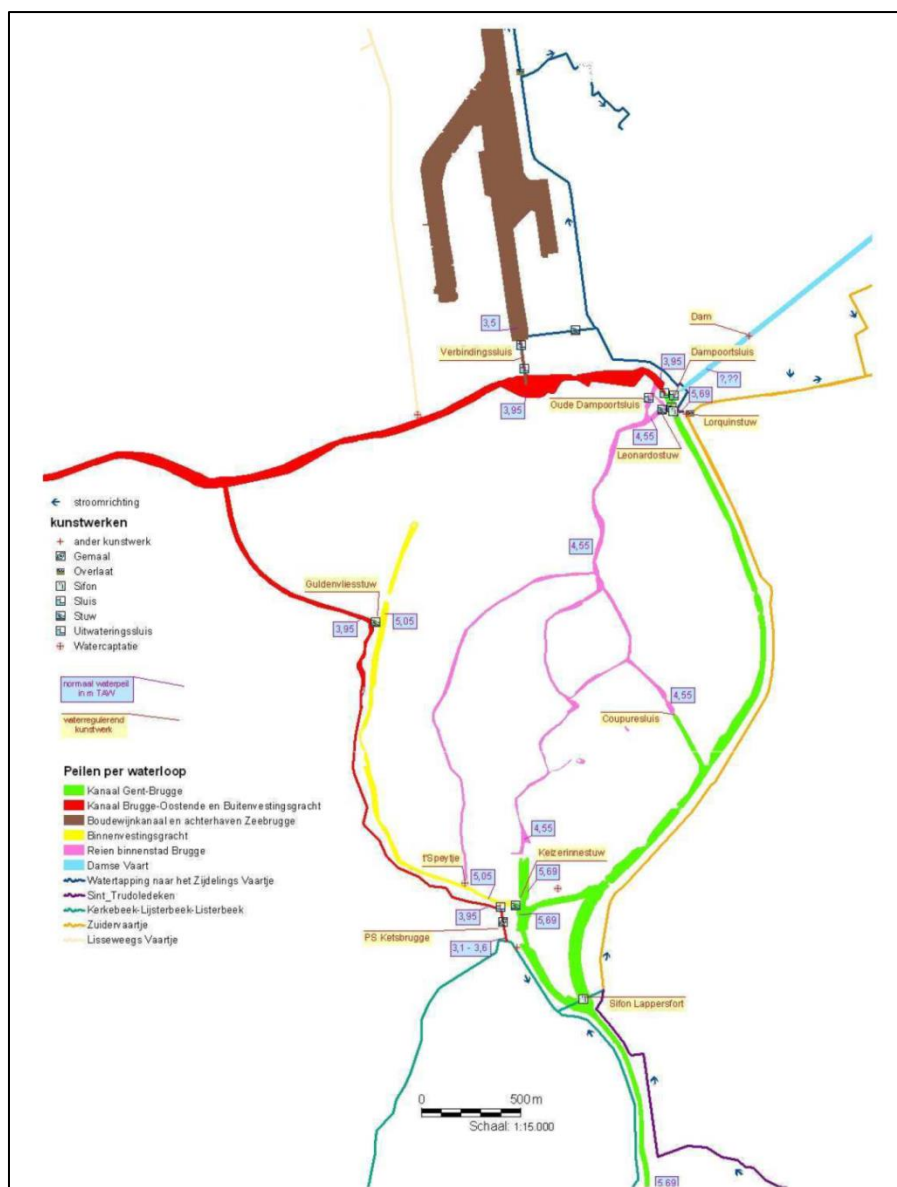
### 3.3 Overstromingen vanuit waterlopen

Overstromingen vanuit waterlopen doen zich voornamelijk voor in de wintermaanden (november t.e.m. maart), na periodes van langdurige neerslag, met lage intensiteit. Deze grote hoeveelheden neerslag zullen nl. 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

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, sluizen en pompen. Het geheel kan opgedeeld worden in vijf vakken (zie Figuur 20):

- 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 20. Waterlopen in en rond het historische centrum van Brugge (CIW, 2009).

### 3.3.2 Berekeningswijze

In het kader van de EU overstromingsrichtlijn (2007/60/EC) werden door het Waterbouwkundig Laboratorium gedetailleerd hydrodynamisch modellen ontwikkeld voor Oost- en West-Vlaanderen. Dergelijke modellen lossen de stromingsvergelijkingen voor waterlopen op en laten toe om waterpeilen en debieten in en rond waterlopen te simuleren op een zeer nauwkeurige en gedetailleerde schaal. Het stelt eveneens de mogelijkheid om overstromingskaarten op te maken, op basis van de modelresultaten.

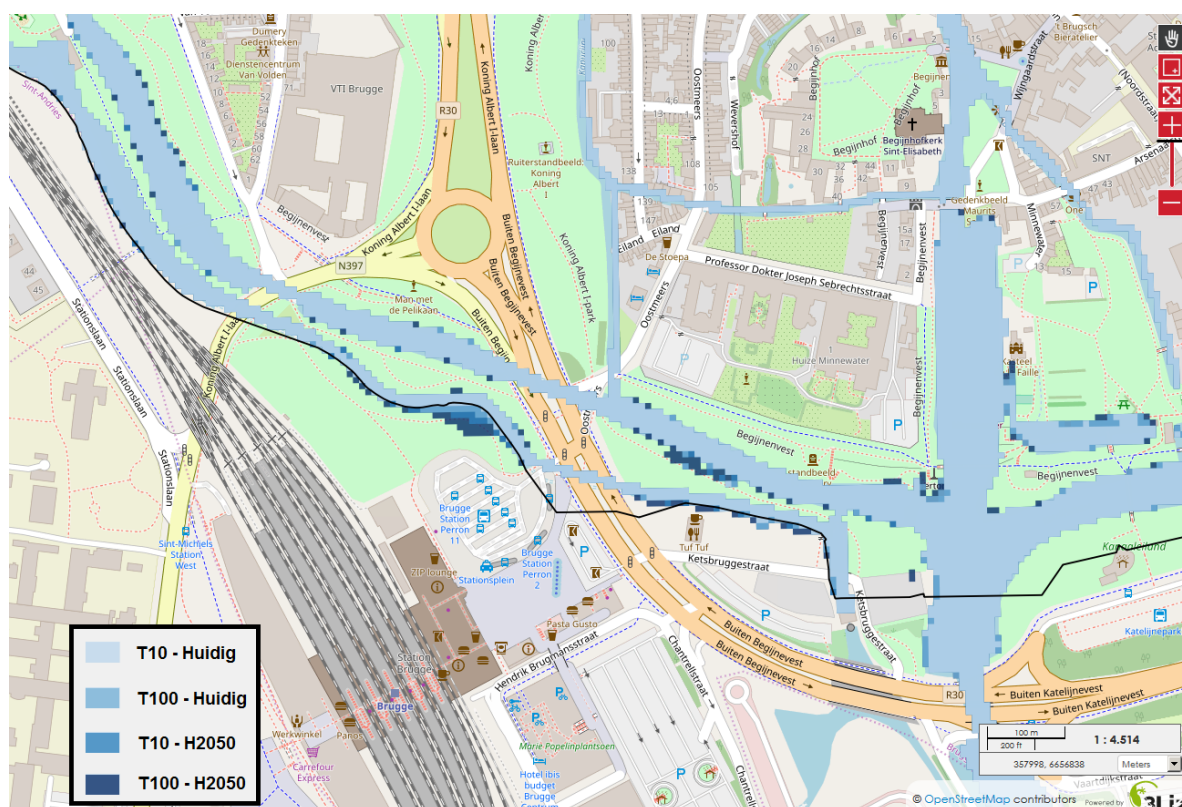
Het studiegebied van dit rapport is onderdeel van het bekken van de Brugse polders. Het bijhorende hydrodynamische model omvat echter een veel groter gebied, omwille van het sterk gereguleerde systeem van de ringvaart rond Gent. Meer concreet omvat het model de bovenlopen van Schelde en Leie van aan de grens met Wallonië en Frankrijk, de ringvaart rond Gent, de Benedenschelde tot in Dendermonde, het kanaal Gent-Terneuzen en alle kanalen ten noordwesten van Gent, waaronder dus ook het kanaal Gent-Oostende. Naar aanleiding van de overstromingsrisicobeheerplannen (ORBP) werden voor het volledige studiegebied een groot aantal simulaties uitgevoerd (Leyssen et al., 2015). Dit om een idee te krijgen van de

waterstanden bij verschillende terugkeerperiodes en dit zowel voor het huidige klimaat als het hoog impact scenario voor 2050. De resultaten van deze simulaties zijn hier ook gebruikt voor het opstellen van overstromingskaarten in en rond het historische stadscentrum van Brugge.

Het rapport bij de ORBP-plannen bespreekt de simulatieresultaten slechts op een beperkt aantal locaties, nl. ter hoogte van de huidige meetpunten in Aalter en Varsenare. Dit zijn beiden meetpunten in respectievelijk het opwaartse en het afwaartse pand van het KGO. Op basis van metingen en inzicht in het watersysteem is vervolgens gezocht naar relaties tussen de meetpunten langs het KGO en de waterstanden in en rond Brugge. In de veronderstelling dat deze relaties in de toekomst niet of nauwelijks zullen wijzigen, kan dan een inschatting gemaakt worden van de waterstanden in en rond Brugge bij verschillende terugkeerperiodes. Tot slot zijn de waterstanden omgezet naar overstromingskaarten, na vergelijking met het digitaal hoogte model met een resolutie van 5m. Locaties waar het waterpeil hoger ligt dan het maaiveld zullen onder water komen te staan en omgekeerd.

### 3.3.3 Resultaten

In totaal werden vier overstromingskaarten aangemaakt: voor het huidige klimaat en het hoog impact scenario voor 2050 en bij terugkeerperiodes van 10 en 100 jaar. De keuze voor deze terugkeerperiodes stemt overeen met reeds bestaande kaarten, nl. de risicozones voor overstromingen en de effectief overstromingsgevoelige gebieden, welke beleidsinstrumenten zijn. Een detail van deze overstromingskaarten voor het zuidwesten van de historische binnenstad is te vinden in Figuur 21. Op deze kaart zijn zowel het opwaartse pand van het KGO, de binnen- en buitenvestigingsgracht en het Minnewaterpark getoond. Voor de andere locaties in de Brugse binnenstad wordt verwezen naar interactieve online kaartenatlas.



Figuur 21. Overstromingskaarten bij terugkeerperiodes van 10 en 100 jaar voor het huidige klimaat en het hoog impact scenario voor 2050. Detail van de Brugse stationsbuurt.



Wat opvalt is dat de uitgestrektheid van de overstromingen niet sterk verschilt voor de verschillende beschouwde scenario's: ze neemt maximaal 15 à 20 meter toe, wanneer het T10-Huidig en T100-H2050 scenario met elkaar vergeleken worden. Dit is enerzijds te danken aan de keerstuw op het KGO in Beernem, die verhindert dat te grote volumes water de stad Brugge bereiken. Hierdoor blijft de stijging van de waterpeilen ook beperkt. Anderzijds zorgt de geringe stijging van de waterpeilen er ook voor dat de waterlopen niet of nauwelijks buiten hun oevers treden, wat ook te danken is aan het feit dat ze voldoende ingedijkt zijn.

Algemeen kan gesteld worden dat de Brugse binnenstad **goed beschermd is tegen overstromingen vanuit de bevaarbare en onbevaarbare waterlopen**. En dit zowel in het huidige scenario, als volgens de voorspellingen tegen 2050. Omwille van de beperkte verschillen tussen het huidige klimaat en de toestand in 2050 zijn geen extra kaarten aangemaakt voor de korte termijn (2030). Verondersteld wordt dat deze ergens tussen beide situaties zullen liggen.

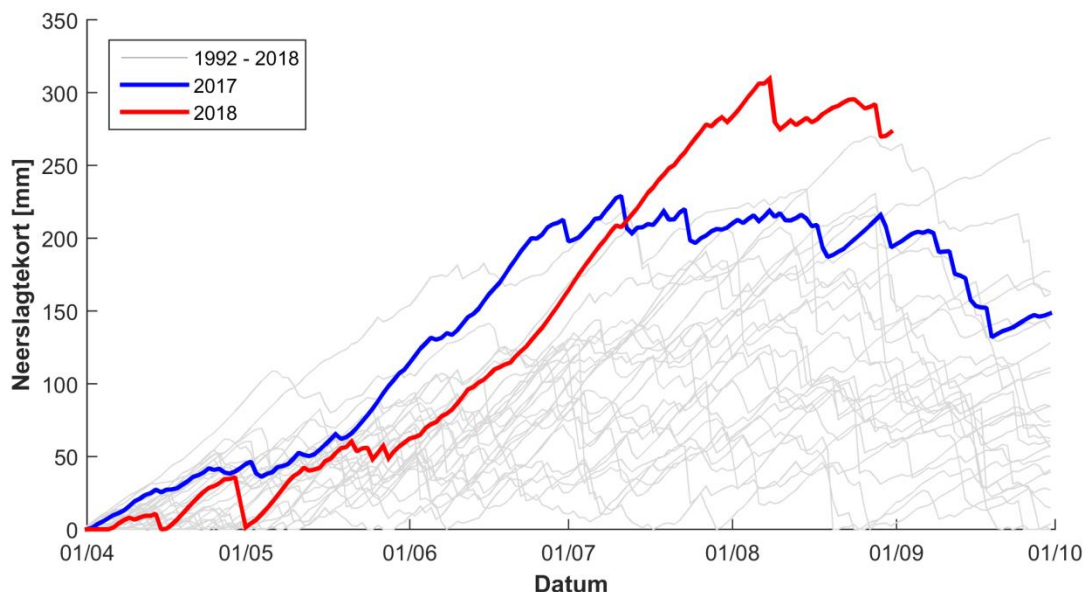
## 3.4 Droogte

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.**

### 3.4.1 Berekeningswijze

Momenteel worden voor heel Vlaanderen droogtekaarten opgesteld, 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 relatief eenvoudige droogte indicators. 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, 2018) 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. Figuur 22 toont bv. 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 dit de droogste zomer.



Figuur 22. 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.

In een tweede stap van de droogteanalyse 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 (Leysen 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.

### 3.4.2 Resultaten

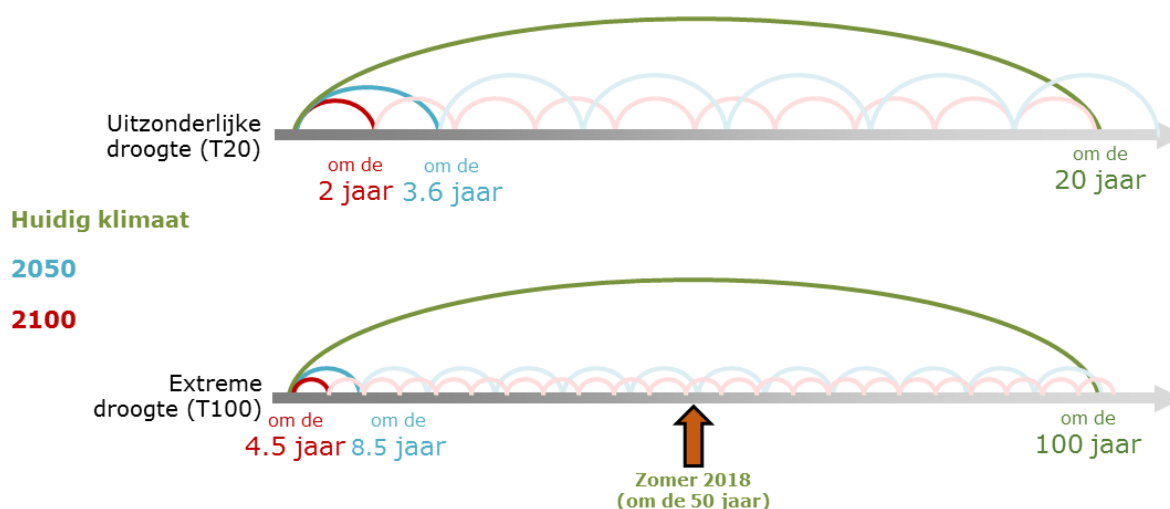
In het rapport "Impact van klimaatverandering op meteorologische droogte in Vlaanderen" (VMM, 2018) wordt een analyse gemaakt van het neerslagtekort in het huidige klimaat en voor drie periodes in de toekomst: 2030, 2050 en 2100. De hierbij gebruikte klimaatscenario's zijn afgeleid volgens het MIRA2015-klimaatrapport 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.

Tabel 5 en Figuur 23 tonen de resultaten van de studie naar de droogte-proxyindicator. Voor een aantal terugkeerperiodes (2, 5, 20 en 100) volgens het huidige klimaat wordt telkens de overeenkomstige terugkeerperiode in de toekomst getoond. Dit betekent bijvoorbeeld dat een

droogte die in het huidige klimaat gemiddeld om de 20 jaar voorkomt (T20), tegen 2050 gemiddeld om de 3.6 jaar zal voorvallen. **Voor alle toekomsthorizonten en terugkeerperiodes wordt een stijging van de frequentie van extreme droogte voorspeld.**

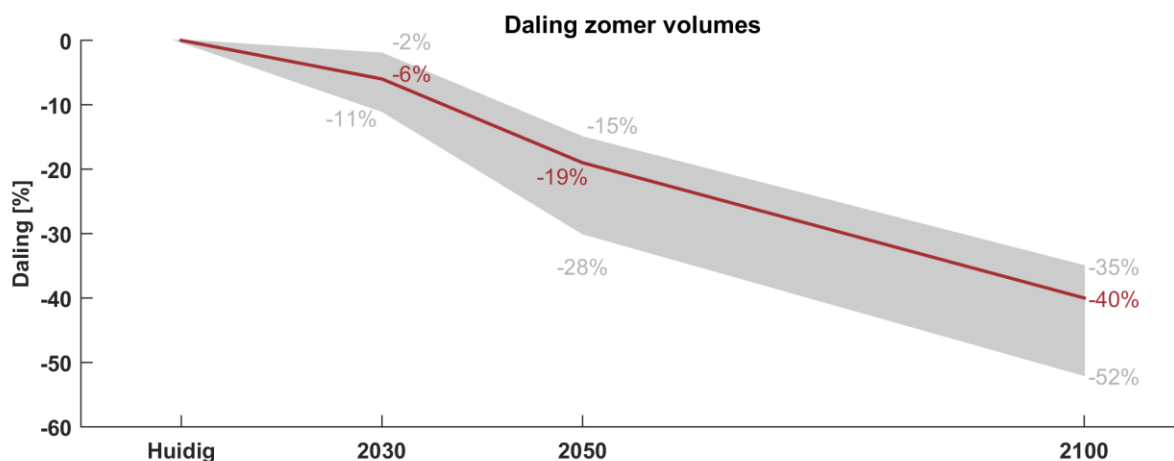
Tabel 5. Verschuiving van de frequentie van extreme droogtecondities, voor de drie klimaatscenario's tegen 2030, 2050 en 2100, ten opzichte van het huidige klimaat (bron: VMM, 2018).

Huidig klimaat	Jaar 2030	Jaar 2050	Jaar 2100
<b>T2</b>	1.7	1.4	1.1
<b>T10</b>	3.8	2.7	1.5
<b>T20</b>	5.4	3.6	2
<b>T100</b>	13.3	8.4	4.4

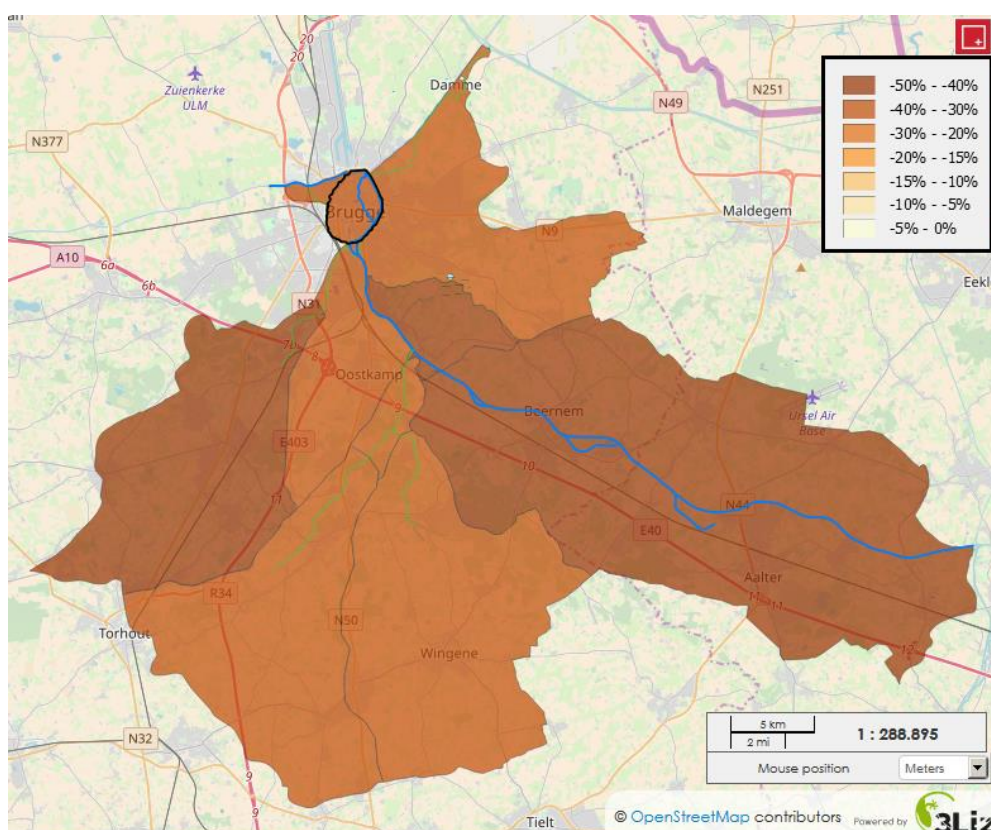


Figuur 23. Verandering van de herhalingstijd van uitzonderlijke en extreme droogte fenomenen.

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 24. 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 bv. 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. Merk eveneens op dat de waarden getoond in Figuur 24 gemiddelde waarden zijn over meerdere jaren. Tijdens droge zomers zal de daling nog groter zijn.



Figuur 24. Afname waterbeschikbaarheid in de zomermaanden: procentuele daling van het gemiddelde cumulatieve volume.



Figuur 25. 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.

### 3.5 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.

### 3.5.1 Berekeningswijze

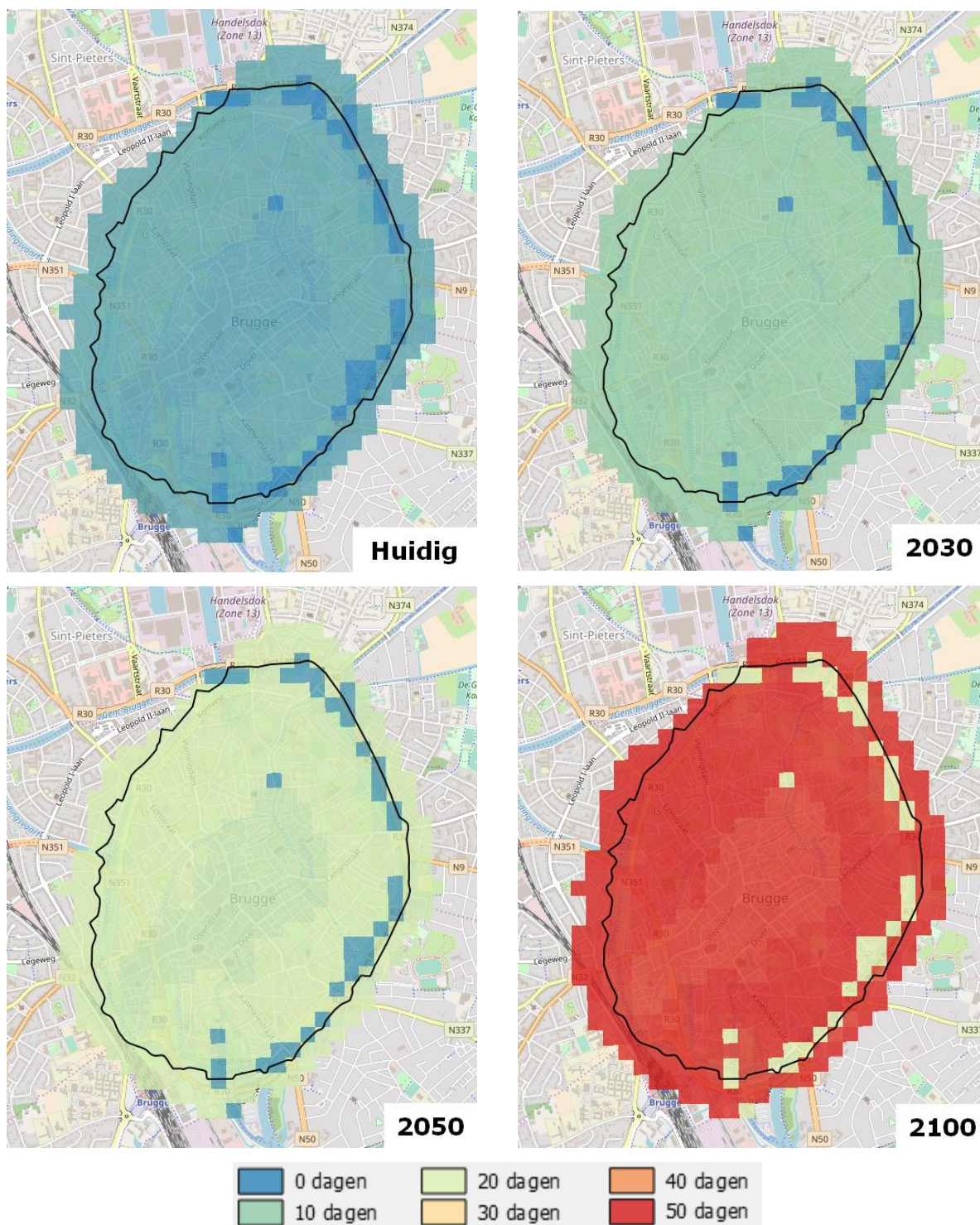
In het kader van het VMM-MIRA Hittekaartproject (Lauwaet et al., 2018) werden door VITO hittekaarten aangemaakt voor het Vlaamse en het Brussels hoofdstedelijke gewest. Hiervoor werd gebruik gemaakt van het stedelijke klimaatmodel *UrbClim*. Dit model berekent temperaturen voor volledig Vlaanderen bij 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 o.a. 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 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.

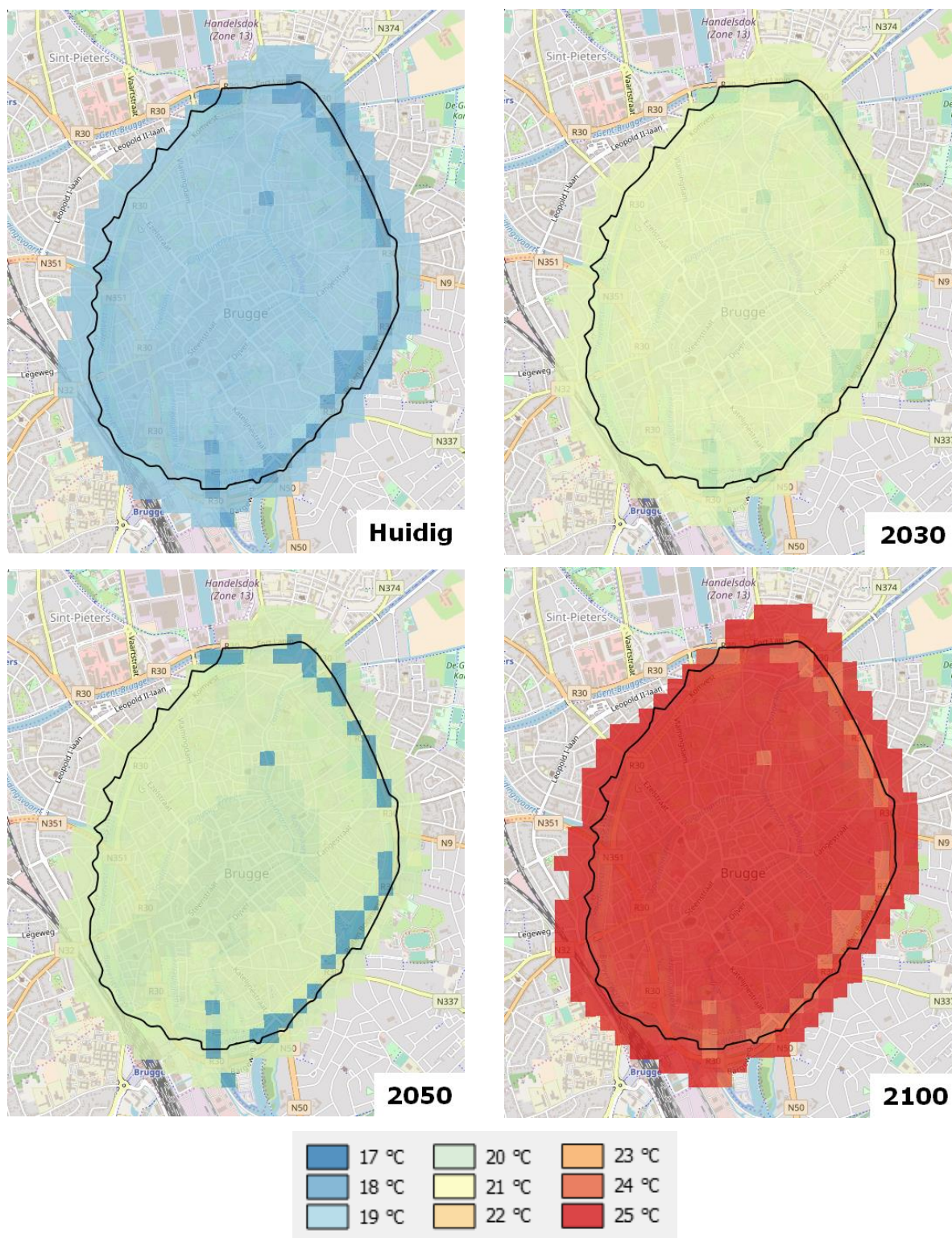
### 3.5.2 Resultaten

Figuur 26 en Figuur 27 tonen de resultaten van het VMM-MIRA Hittekaartproject voor het historische centrum van de stad Brugge. 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. Merk op dat de resultaten voor het stadscentrum van Brugge nagenoeg uniform zijn over het volledige studiegebied, als gevolg van de relatief beperkte omvang van het gebied en het uniforme landgebruik. Enkel ter hoogte van het Minnewaterpark en het kanaal Gent-Oostende worden lokaal lagere temperaturen voorspeld.

In het huidige klimaat ondervindt het centrum van de stad Brugge gemiddeld 5 hittegolfdagen per jaar. **Voor de toekomst wordt een stijging naar gemiddeld 11, 19 en 48 hittegolfdagen per jaar voorspeld, voor respectievelijk 2030, 2050 en 2100.** Dit betekent een verviervoudiging tegen 2050 en zelfs een vertienvoudiging tegen 2100. De gemiddelde temperatuur tijdens de zomermaanden schommelt in het huidige klimaat rond 18.7 °C. Deze temperatuur zal verder stijgen naar 20.3 °C, 21.7 °C en 24.9 °C voor de voorspellingshorizonnen van 2030, 2050 en 2100.



Figuur 26. 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 27. 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 omlijnd.

### 3.6 Zeespiegelstijging

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

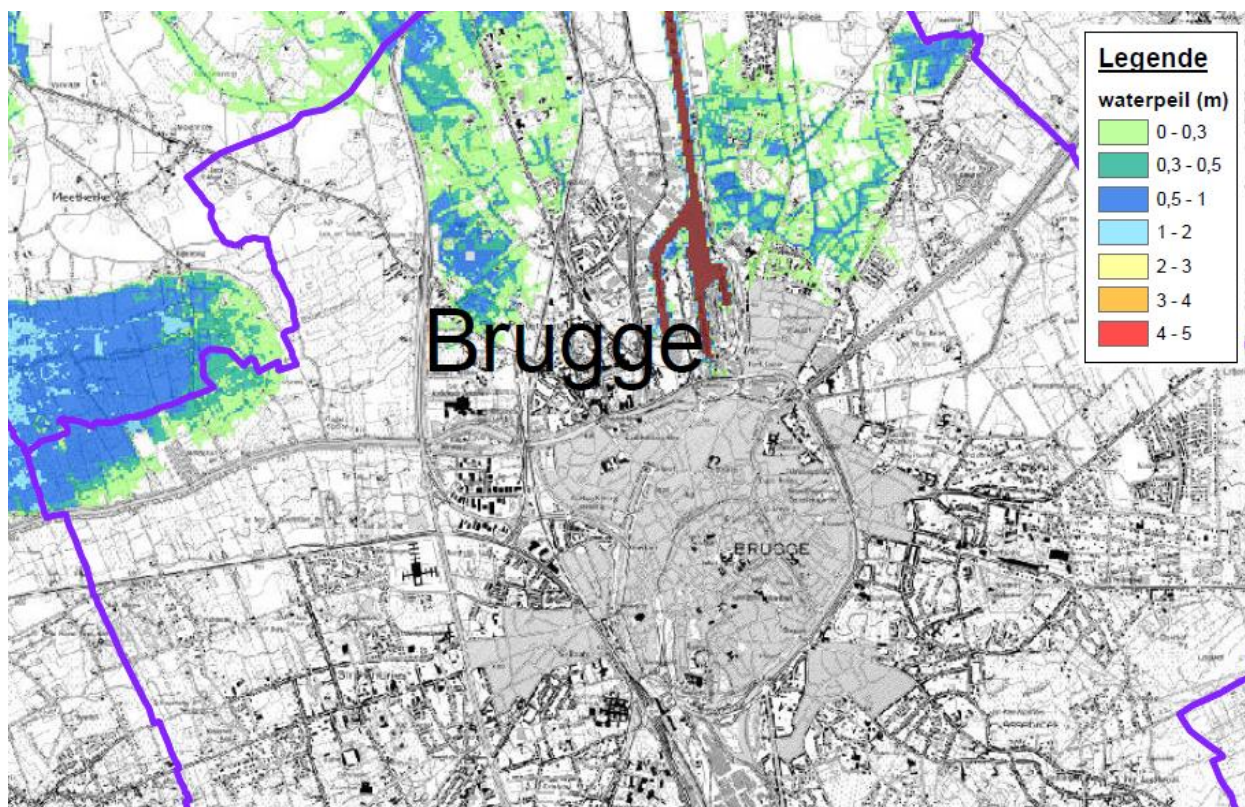
concludeerde hieruit dat de zeespiegel gemiddeld met 0.20 cm per jaar, of 20 cm per 100 jaar stijgt. Extrapolatie naar 2100 levert een stijging van de zeespiegel met 20 cm op. Als gevolg van de relatief trage reactie van oceanen en ijskappen kan echter verwacht worden dat de stijgende trend nog verder 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.

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 28 toont een uittreksel van de overstromingskaart bij een stormvloedpeil van 7m TAW. Deze heeft bij het huidige niveau van de zeespiegel een terugkeerperiode van 1000 jaar. De kaarten tonen aan dat het historische centrum van Brugge niet getroffen zal worden door overstromingen vanuit zee. De deelgemeenten en wijken in het noorden zoals Kruisabele en Koolkerke kunnen echter wel getroffen worden. Ook bij hogere stormvloedpeilen van 7.5 mTAW (T4000) en 8 m TAW (T17000) blijft de historische binnenstad gevrijwaard van overstromingen.

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. Vooral 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.

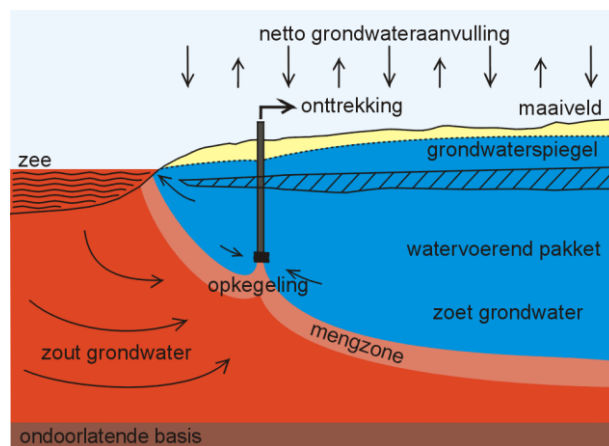




Figuur 28. Uittreksel uit de overstromingskaarten bij een stormvloedpeil van 7 m TAW. Deze overstromingen hebben in het huidige klimaat een terugkeerperiode van 1000 jaar.

### 3.7 Verzilting

Grondwater in poldergebieden bestaat uit een opeenvolging van zoete, brakke en zoute grondwaterlagen (zie Figuur 29). 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 dicht bij de oppervlakte komt te liggen, spreken we van verzilting. Uit recent onderzoek blijkt dat de zoet-zoutwaterverdeling in de Vlaamse polders momenteel vrij stabiel en goed gekend is (Zwaenepoel et al., 2016). Het zoete water in de bovenste lagen van de bodem kan echter 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.



Figuur 29. Schematische weergave van verzilting in poldergebieden (Deltares, 2018).

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.

De kans dat de historische binnenstad getroffen wordt door een verzilting, nu en in de toekomst, lijkt zeer klein. Daarvoor ligt de stad te ver van de kust. Verwacht wordt echter dat de toenemende droogte tot een daling van de beschikbare hoeveelheden zoet water zal leiden. Om verzilting in de polders tegen te gaan, zullen echter grote volumes zoet water nodig blijven die elders niet gebruikt kunnen worden. Hierdoor zal de binnenstad van Brugge op een onrechtstreekse manier mogelijks toch beïnvloed worden door verzilting van de polders.

## 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 de historische binnenstad van 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, bv. 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 interactieve online 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. 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

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, bv. 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.

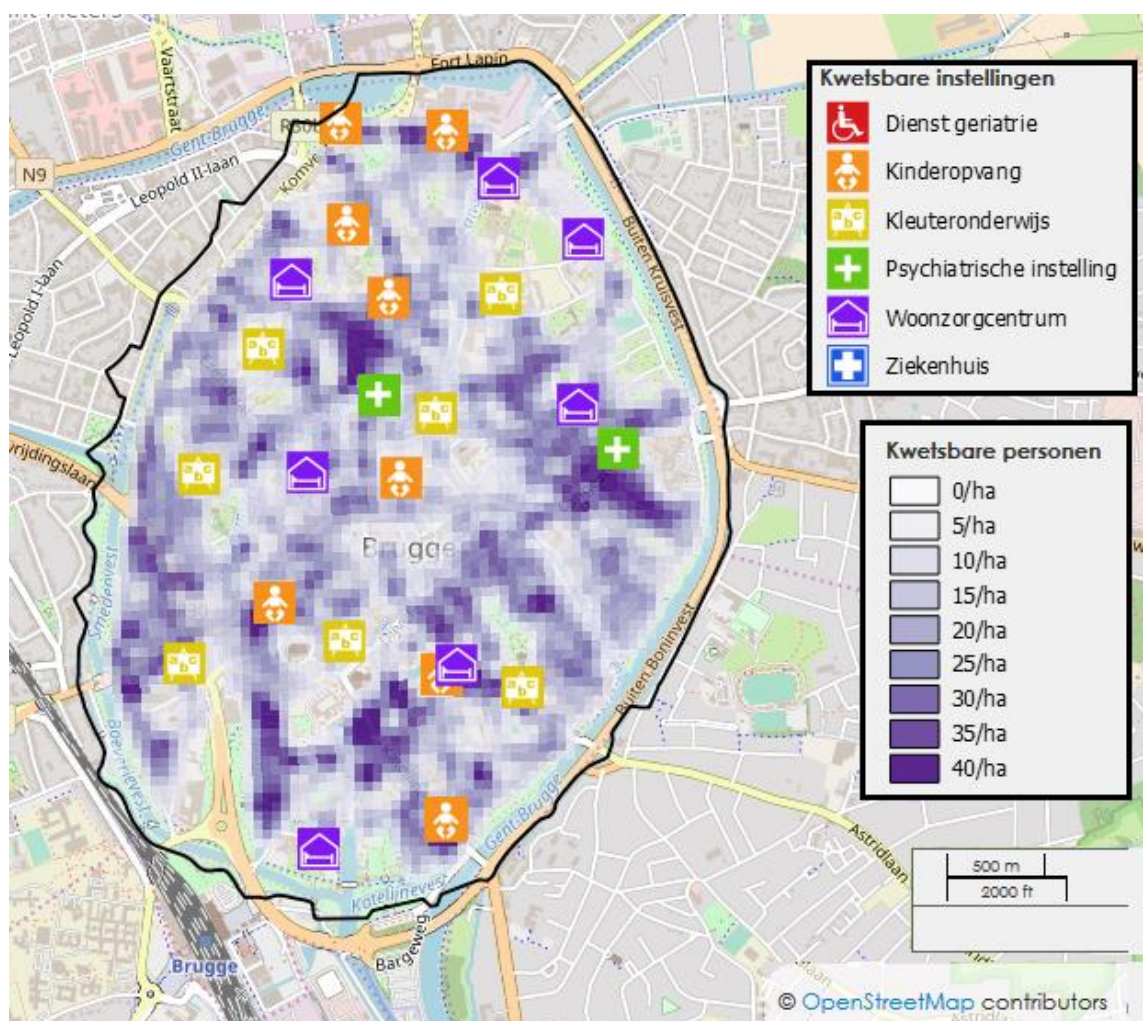
Niet iedereen kan even goed omspringen met de gevolgen van wateroverlast. Sommige personen zijn hier meer kwetsbaar voor, omdat ze het moeilijker hebben om zich uit de voeten te maken, of omdat ze meer tijd en middelen nodig hebben om ervan te herstellen. Deze kwetsbare personen omvatten o.a. ouderen (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).

#### 4.2.2 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 bv. 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 dagelijkse 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 aan allergieklachten en luchtwegeninfecties. 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). Gebieden met een hoge bevolkingsdichtheid en een hoge blootstelling zullen dus het grootste risico ondervinden. Hier staat tegenover dat dichtbevolkte gebieden met een beperkt aantal hittegolven een klein risico zullen ondervinden. Merk op dat beide fenomenen verbonden zijn met verstedelijking, waardoor het blootstellingsrisico groot tot zeer groot is in stadscentra. In de hittekaarten (zie Figuur 26 en Figuur 27) werd reeds aangegeven dat de toename van temperaturen en hittegolfdagen nagenoeg hetzelfde is over het volledige stadscentrum van Brugge. Dit heeft onder meer te maken met de beperkte omvang van het studiegebied en het nagenoeg uniforme landgebruik in het centrum. **Het risico op blootstelling aan hittegolven zal dus nagenoeg overal hetzelfde zijn.** Enkel in de dunnerbevolkte gebieden zoals het Minnewaterpark en rond het Grootseminarie zullen de risico's lager liggen.

In de online klimaatatlas zijn kaarten met bevolkingsdichtheid in het historische stadscentrum opgenomen. Deze geven bij benadering een inschatting van het blootstellingsrisico, aangezien de toename van temperatuur en aantal hittegolfdagen nagenoeg constant is over het volledige gebied. De kaarten zijn opgesteld door informatie van de statistische sectoren en het centraal referentieadressenebestand (CRAB) te combineren. De kaarten maken 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 30. 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.

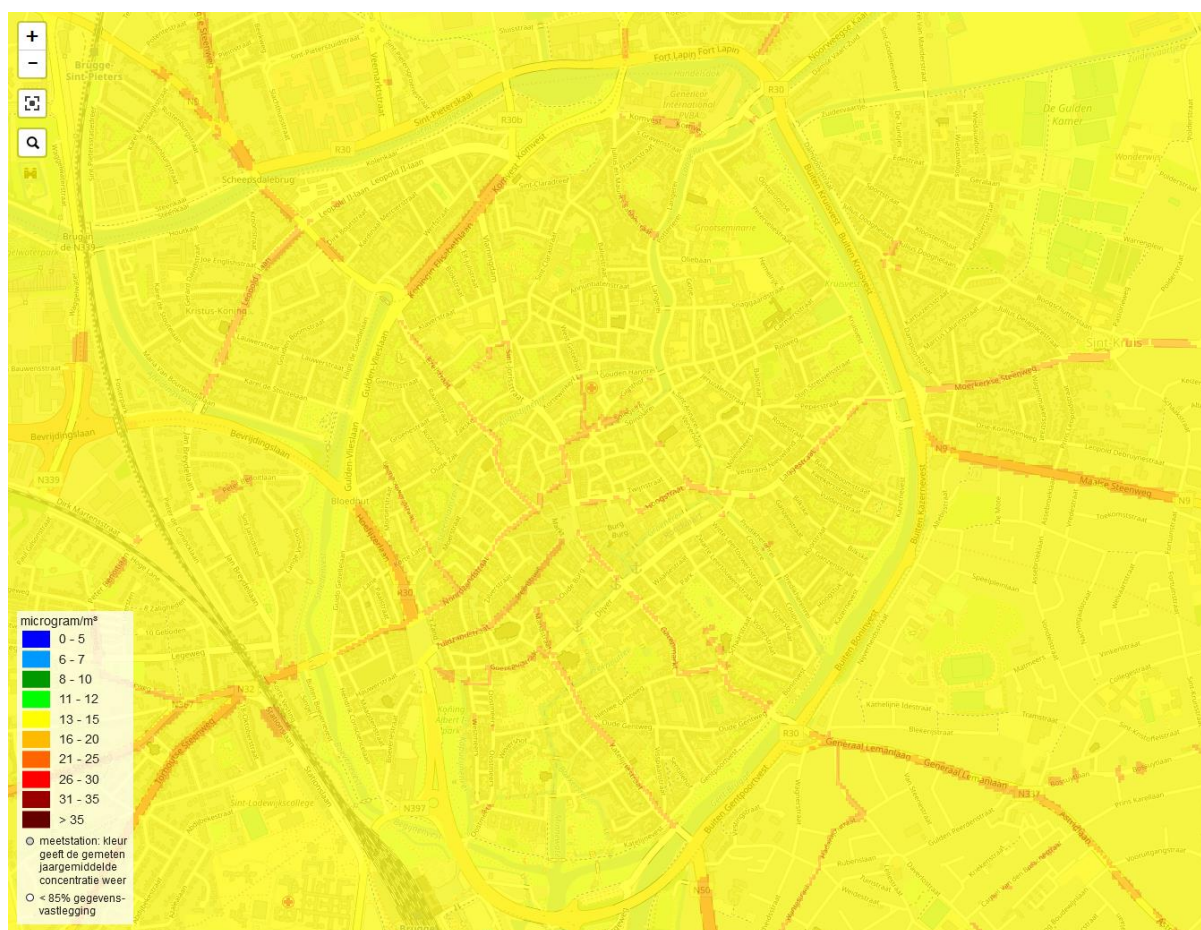
#### 4.2.3 Daling luchtkwaliteit

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.

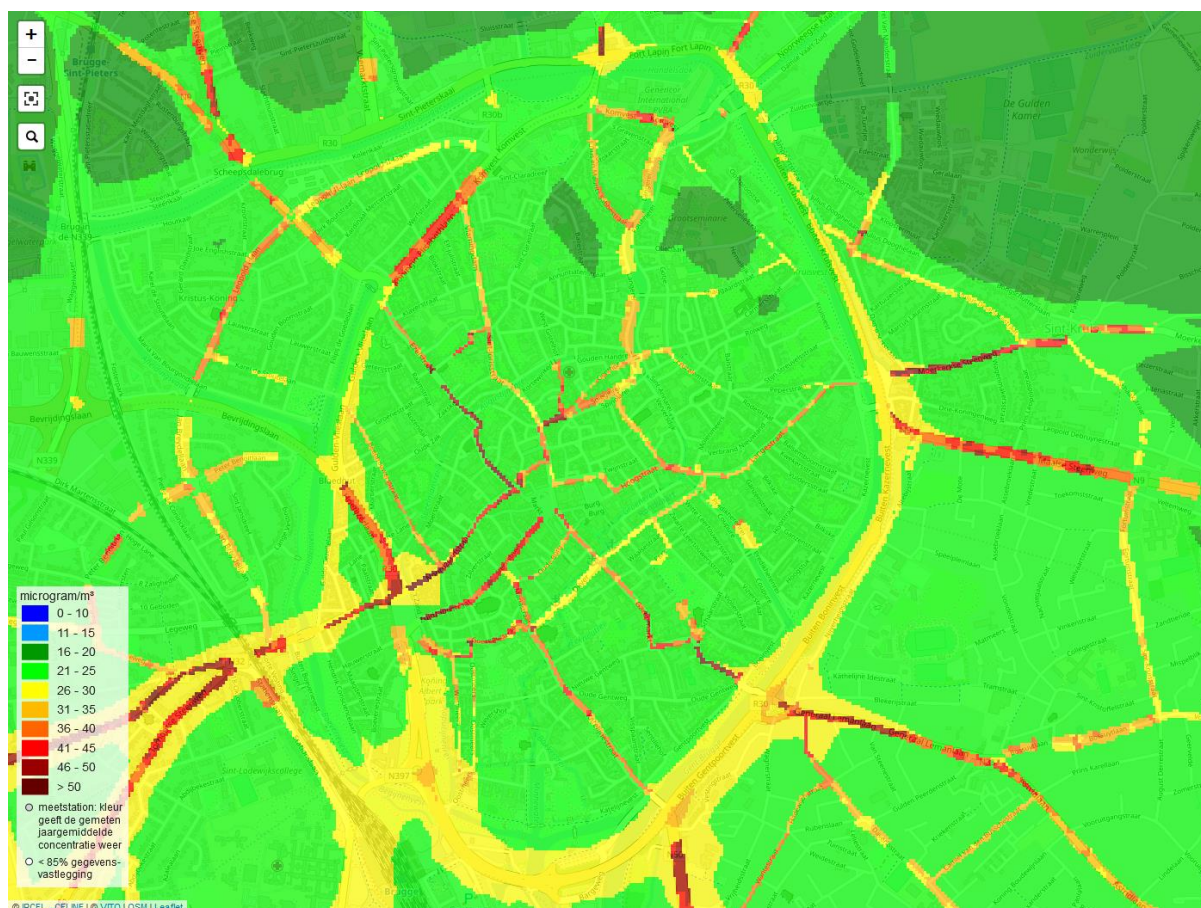
Algemeen wordt aangenomen dat klimaatverandering de luchtkwaliteit zal verslechteren, zeker in dichtbevolkte gebieden zoals steden. Dit is te wijten aan het verminderen van de processen die

verontreiniging uit de lucht halen (bv. 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 31 en Figuur 32 tonen de resultaten van deze modellen voor twee luchtkwaliteitsparameters, in en rond de historische binnenstad van Brugge voor het jaar 2017. Zoals verwacht kon worden, is de luchtkwaliteit hier lager dan in de meer landelijke gebieden. 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, dit in de toekomst ook zullen zijn. 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 31. Jaargemiddelde fijn stof (PM2.5) concentraties in en rond de historische binnenstad van Brugge.



Figuur 32. Jaargemiddelde stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>) concentraties in en rond de historische binnenstad van Brugge.

## 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 de gebouwen in de historisch binnenstad, bv. doordat ze te maken krijgen met wateroverlast. In wat volgt wordt voor elke klimaateffect besproken hoe gebouwen getroffen kunnen worden.

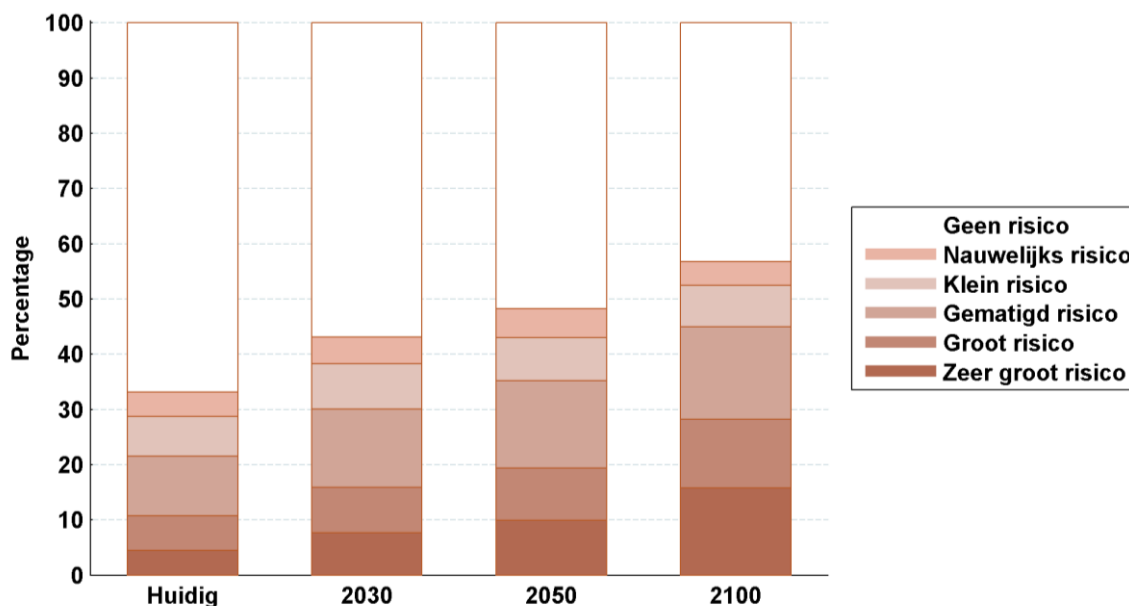
### 4.3.1 Wateroverlast

De stijging van extreme neerslagintensiteiten zal leiden tot een toename van stedelijke wateroverlast. Eerder, in sectie 3.2.2, werd al berekend dat de overstroomde oppervlakte in de toekomst sterk kan toenemen. 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.

Om de impact van stedelijke wateroverlast op gebouwen te begroten wordt opnieuw gebruik gemaakt van de 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 perimeteer van twee meter rond een gebied met wateroverlast ligt.

Figuur 33 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 33. Relatieve verdeling van de verschillende blootstellingsrisico's voor schade aan gebouwen door wateroverlast, 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 perimeteer van twee meter rond de wateroverlast contouren bevindt. Opnieuw kan een duidelijke stijging van het aantal getroffen monumenten vastgesteld worden.

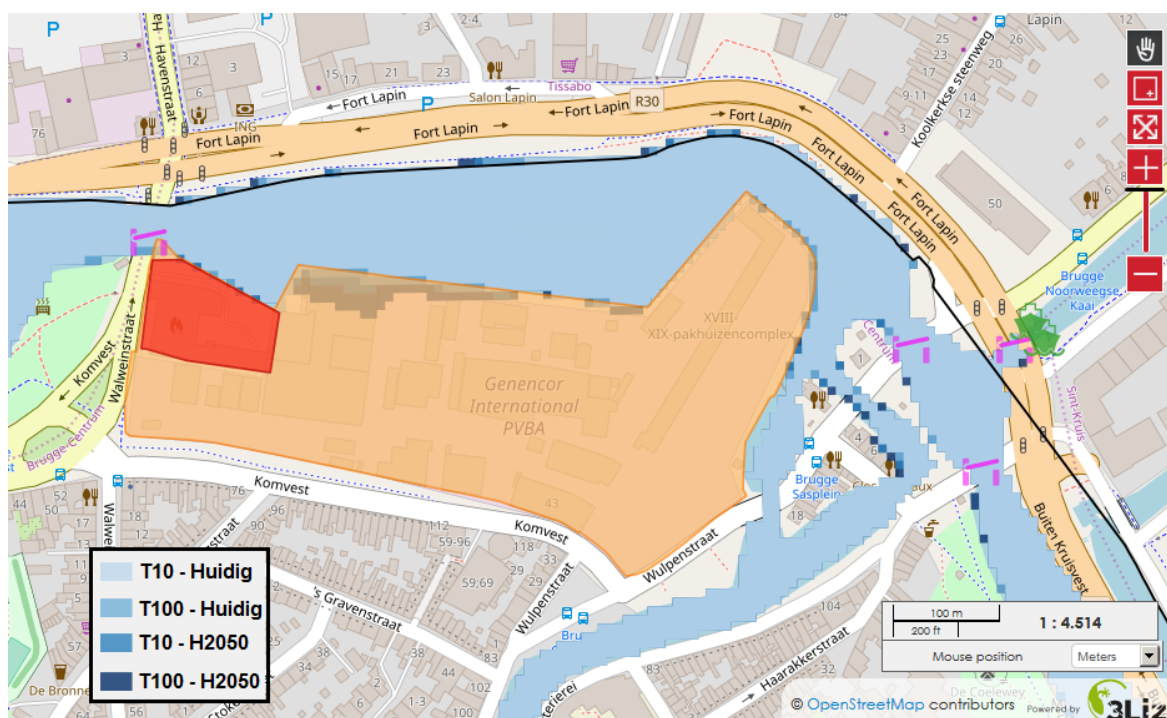
Tabel 6. Beschermde monumenten die getroffen kunnen worden door stedelijke wateroverlast.

	Huidig klimaat	Jaar 2030	Jaar 2050	Jaar 2100
<b>T2</b>	14	28	37	68
<b>T5</b>	41	67	91	137
<b>T20</b>	99	145	176	242
<b>T50</b>	132	197	235	280
<b>T100</b>	159	236	255	311



### 4.3.2 Overstromingen vanuit waterlopen

In sectie 3.3 werd reeds aangetoond dat de historische binnenstad van Brugge waarschijnlijk weinig zal hinder zal ondervinden van overstromingen, zowel in het huidige klimaat als volgens de voorspellingen horende bij het hoog impact scenario voor 2050. 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 Genecor International gedeeltelijk kan overstromen (zie Figuur 34 voor uittreksel uit online klimaatatlas). 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 Walweinstreet. De overstromingsdieptes lijken hier echter klein en vermoedelijk zal de hinder niet verder gaan dan het onder water komen van de parkeerterreinen.



Figuur 34. Mogelijke impact van overstromingen in het noorden van Brugge langsheen het afwaartse pand van het kanaal Gent-Oostende. Aangeduid op de kaart: bedrijventerrein Genecor International (oranje) en brandweerkazerne (rood).

### 4.3.3 Droogte

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 verschildzettingen, 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.

#### 4.3.4 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**. 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 beschermd monumenten treffen, maar ook minder opvallende structuren of constructies negatief beïnvloeden. Denk bijvoorbeeld aan elektriciteitscabines. Indien deze 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. In 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, waardoor de kans op falen beperkt blijft. De locaties van deze elektriciteitscabines zijn opgenomen in de online klimaatatlas.

#### 4.4.2 Overstromingen vanuit waterlopen

Naast de toename van de uitgestrektheid van de overstroomde gebieden, kan ook een toename van het aantal periodes met hoge afvoer op het KGO 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 bv. 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 langs 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 en dalende productiviteit van werknemers als gevolg van de hitte. Elk van deze aspecten wordt hieronder verder besproken.

### 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. De bedrijventerreinen in Brugge die mogelijks getroffen worden zijn te vinden in het noordoosten (ter hoogte van de Kruisvest) en in het noordwesten (langs de Werfstraat). Deze zijn ook aangeduid in de online klimaatatlas.

### 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 (bv. 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 (WBGT) index, die temperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid en hittestraling combineert. Indien de WBGT 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. In de omgeving van het historische stadscentrum van Brugge zijn er slechts een beperkt aantal vergunningen uitgereikt voor het oppompen van grondwater. De impact van verdroging en lagere grondwaterstanden lijkt dus beperkt te blijven. Dit is echter geen vrijbrief om ongelimiteerd te blijven oppompen of extra vergunningen uit te reiken. Indien grondwatervoorraden onvoldoende bijgevoerd worden, als gevolg van de toegenomen droogte en eventueel de toenemende verharding, zal de kans op tekorten nog altijd toenemen.

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

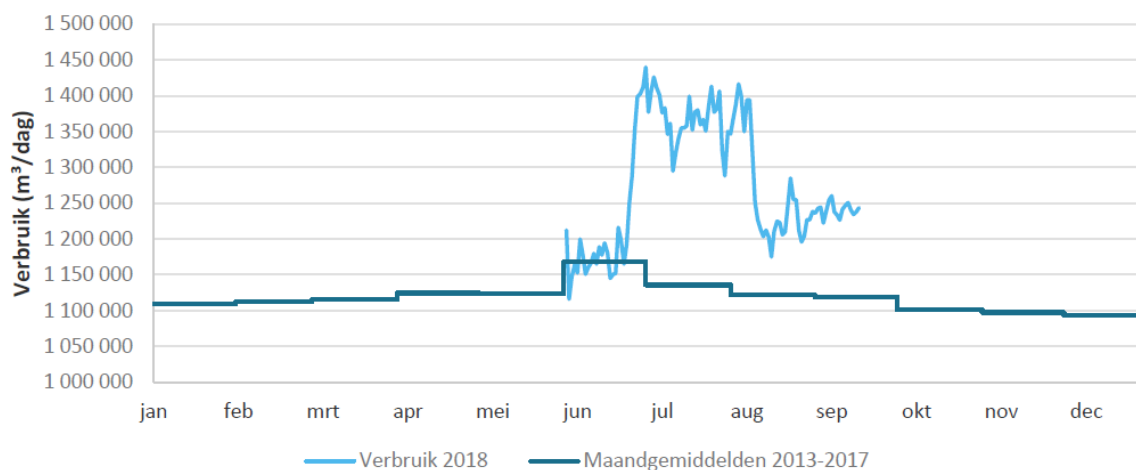
De stijgende temperaturen zullen leiden tot verschuivingen in de energievraag. Tijdens de wintermaanden zal de buitentemperatuur licht stijgen. Hierdoor kan een daling van het energieverbruik verwacht worden omdat gebouwen minder verwarmd moeten worden. Aan de andere kant kan **tijdens de zomermaanden 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 35 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 (zie eerder), waardoor mensen meer leidingwater moeten gebruiken, draagt hier vermoedelijk ook aan bij.

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

## 4.7 Natuur en milieu

### 4.7.1 Aantasting biodiversiteit

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, omdat planten en dieren migreren naar plaatsen waar het klimaat wel voldoet.** 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 in het Boudewijnkanaal kropen krabben uit het water, met massale sterfte tot gevolg. 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 bijen geobserveerd, omdat planten aan hittestress leden en daardoor minder nectar produceerden. 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.

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 onbewoonbaar worden 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.

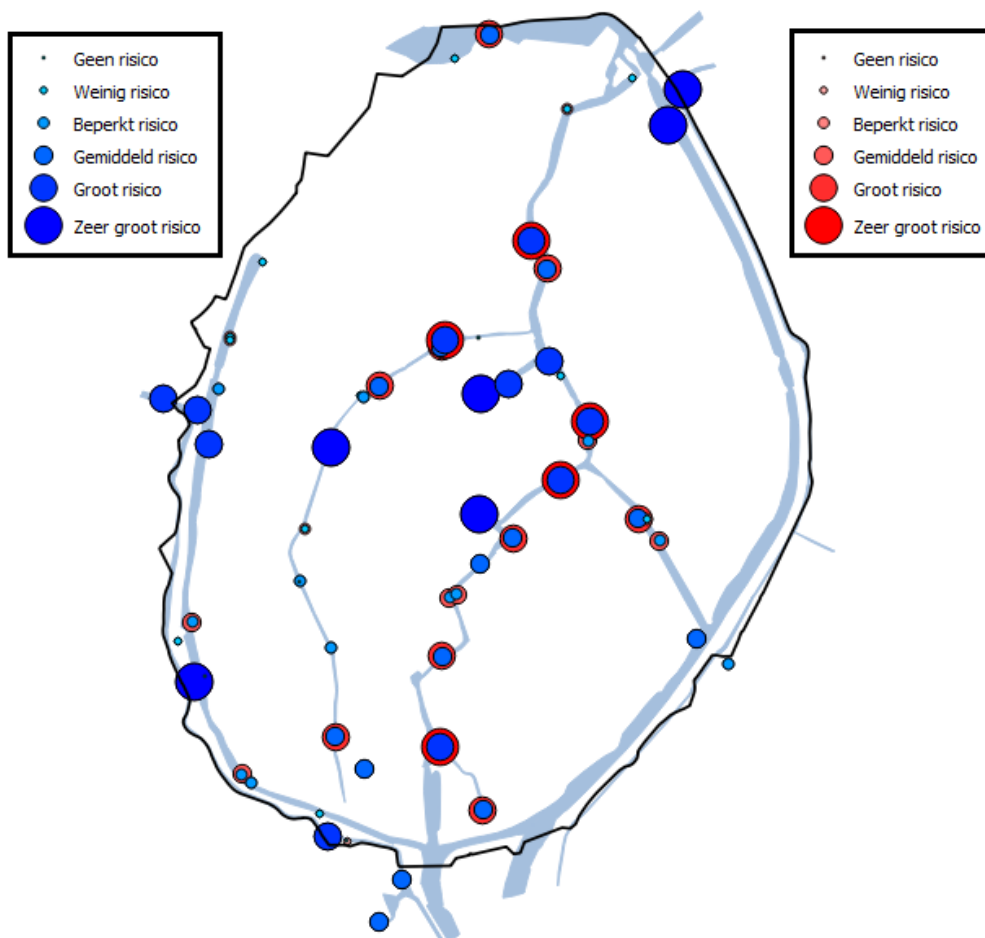
De online klimaatatlas toont een uittreksel van de biologische waarderingskaart, voor het stadscentrum van Brugge. Deze kaart toont het voorkomen van belangrijke habitats volgens verschillende waarderingsniveaus en kan bijgevolg ook geïnterpreteerd worden als een kwetsbaarheidskaart. Hoe waardevoller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

#### 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 Brugse binnenstad 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 het kanaal en de reien in de binnenstad. 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 36 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 buitenvestingsgracht 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.



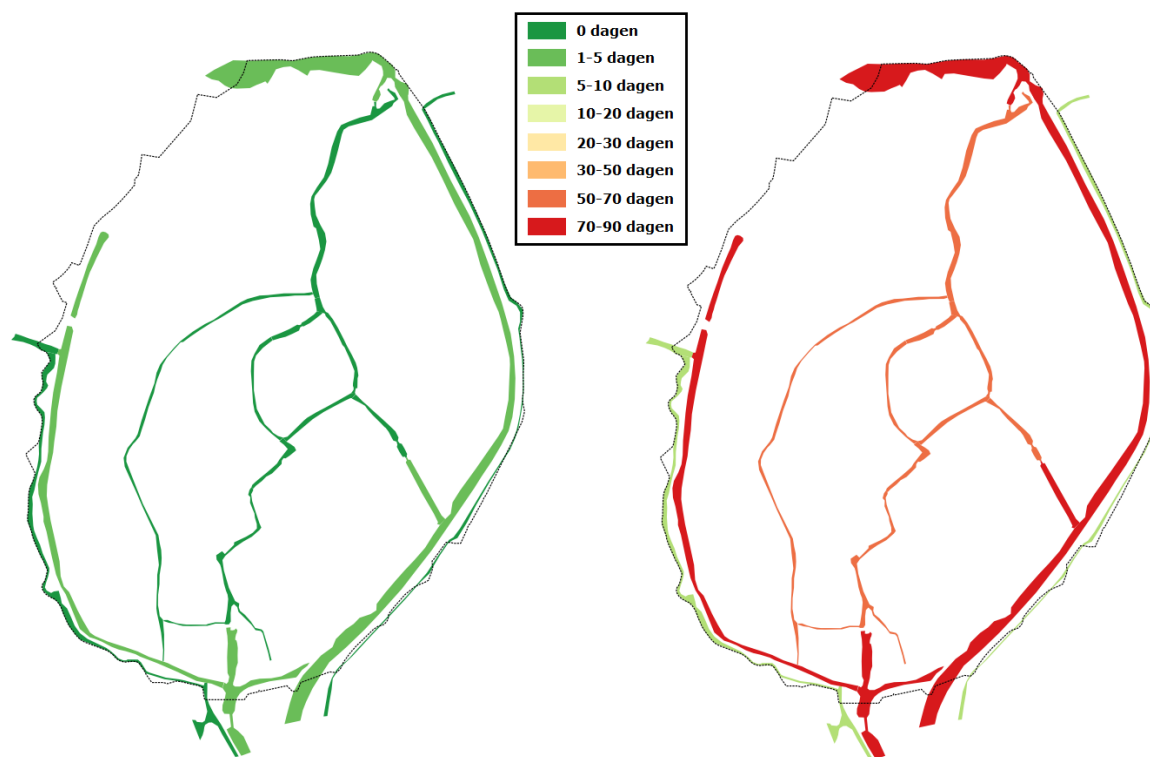
Figuur 36. Risiko op overstorten van de riolering in de oppervlaktewateren in en rond de historische binnenstad van Brugge: in het huidige klimaat (blauw) en in het hoog impact scenario voor 2100 (rood).

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 zal dit nog versterkt worden door de specifieke eigenschappen van het systeem. De toevoer van water in de reien is nl. beperkt waardoor de reien, zeker in droge periodes, als een groot reservoir met stilstaand water beschouwd kunnen worden. Dit heeft 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 zullen dus sterk kunnen oplopen.** Het spoelen van de reien 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 verlamdend 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 37).



Figuur 37. 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 in en rond de historische binnenstad 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, nl. 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 verfachtige 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 en 2018 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. 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).

**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 CO<sub>2</sub> voor het fotosynthese proces, in die mate zelfs dat dit een limiterende factor kan worden. De uitstoot van broeikasgassen zal leiden tot hogere concentraties CO<sub>2</sub> 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 zal dit effect vooral spelen in de reien, omwille van de specifieke karakteristieken van het systeem.

## 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 zwembad vijvers, 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, terwijl andere buurtbewoners al willen slapen en 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.

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 online klimaatatlas 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 sluisen beperkt worden, om de waterverliezen te limiteten. 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 Conclusions

Our climate is changing. This study reveals that climate change can impact heavily on the historic town centre. This is why it is important to start preparing for climate change now. This study is part of the European Water Resilient Cities project (WRC), which is designed to make historic cities resilient to climate change and heavier rainfall. The present report is a step forward in the overall project: an assessment of climate change and its potential impact on the historic town centre of Brugge. This assessment allows us to identify vulnerabilities and prepares the ground for a second step: a climate adaptation plan with a particular focus on water.

Climate models and scenarios were used to put figures to climate change in this study. At the present time climate changes cannot be accurately forecast, as the uncertainties in the models and future greenhouse gas emissions are too great. For that reason, this report shows the expected range of the changes. The estimates of potential impacts rest on the most negative or the high impact scenario. This scenario is within the realm of possibility and so cannot be discounted from future policy.

Climate change will lead to shifts in the rainfall patterns in Flanders: the winter months will be wetter and the summer months drier, only with heavier rainstorms. These trends have already become clear in recent decades, but analysis has shown that (coincidentally) the historic centre of Brugge has had no extreme rainstorms to contend with in at least the last 10 years. In addition, temperatures will rise: by 1 °C to 4.5 °C in the winter, and by 1.5 °C to 6.5 °C in the summer by 2100. As a result, there will be fewer frost days. Evaporation will increase, mostly in the summer months. The sea level at Ostend could rise by 20 to 80 cm by 2100.

Urban flooding, flooding from rivers, droughts and heat waves will be more frequent and more extreme as a result of these changes. Due to heavier rainstorms the land impacted by flooding from drains could rise by a factor of 2 to almost 4 by 2100. The extreme rainfall will make sewer overflow more common, which will have a negative impact on water quality in the waterways and canals. The impact of flooding from rivers appears to be limited, thanks to the flood controls on the Ghent-Ostend canal in Beernem. Exceptional droughts, which currently occur every 20 years, may occur once every two years on average by 2100. Very extreme droughts, of the type seen once every 100 years, could shift to every 4.5 years. The quantities of surface water available in the summer could drop by 40% by the year 2100. This will also affect potential water intake for the canals in Brugge: periods of zero intake will increase, leading to lower water levels and poorer water quality in the canals. At present Brugge town centre has 5 heatwave days a year on average, and this could rise to 48 by 2100. The average temperature in the summer months may also rise from 18.7 °C to 24.9 °C. All of this will have a negative impact on the water quality of surface water reservoirs.

These changing conditions, especially the heightening of extremes, will undoubtedly impact on humans and the environment. The report describes these impacts across seven sectors: health and welfare, damage to buildings, infrastructure, work & economy, energy & potable water, nature & environment and recreation & tourism. This was done by mapping climate effects to spatial maps by means of geographical information from the various areas and sectors.

Climate change is happening gradually. The impacts we describe here will not all happen overnight. But it is important that we shape our policies and actions to suit anticipated changes in climate. Given the long life associated with infrastructure and spatial planning, this study looks at the climate change we can expect by 2050 as well as 2100. To make the historic town centre resilient to climate change the climate adaptation plan (see separate document) proposes specific action in several areas. This plan makes the town centre climate-proof and at the same time takes every opportunity to strengthen and improve life quality, nature and other aspects.



## 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.
- 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>
- 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 O<sub>3</sub>, 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.
- 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., Vanderkimpfen, P., Verwaest, T., Mostaert, F. (2015). *Overstromingsrisicobeheerplannen in Vlaanderen: Randvoorwaarden, Hydraulica, Statistiek van Dender, Leie, Bovenschelde, 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>
- 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.
- 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 (2018). Impact van klimaatverandering op meteorologische droogte. Opdracht uitgevoerd door Sumaqua in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, maart 2018, 43 p.

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