

Kritische vorst- en dooicycli in Savonnières en Bentheim: Het effect van klimaatsverandering en stedelijk hitte eiland bij na-isoleren van historische gebouwen d.m.v. hygrothermische simulaties

Marie De Groeve

Studentennummer: 01600338

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche

Begeleider: Isabeau Vandemeulebroucke

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur

Academiejaar 2020-2021

DANKWOORD

Eerst en vooral wil ik mijn promotor Nathan Van Den Bossche bedanken om mij de mogelijkheid te geven dit boeiend onderwerp te onderzoeken. Als volgt wil ik Isabeau Vandemeulebroucke en Daphne Guilbert bedanken voor de goede opvolging en hulp bij het volbrengen van deze thesis.

Deze thesis vereist heel wat simulaties die uitgevoerd zijn met het programma Delphin 6.1.0 en verwerkt werden in Rstudio. Mijn dank hiervoor gaat uit naar Isabeau Vandemeulebroucke om mij hierbij te begeleiden en mij alle aspecten van deze programma's aan te leren. Hierbij wil ik ook Daphne Guilbert bedanken voor het gebruik van haar materiaalbestand bij de uitvoering van de simulaties.

Graag zou ik ook Prof. Tim De Kock en doctoraatstudent Maxim Deprez bedanken voor hun deskundig advies en om mijn vragen te beantwoorden. Het hielp me sommige fenomenen beter begrijpen.

Ik wil ook graag dank betuigen aan mijn familie voor de steun en motivatie tijdens het schrijven van mijn masterthesis.

Om te eindigen ben ik mijn collega studenten ook heel dankbaar om te zorgen voor voldoende motivatie ondanks corona. Het online samenwerken bracht steun wanneer nodig en gaf de moed om door te gaan.

ABSTRACT

Natuursteen wordt reeds eeuwen gebruikt als bouw materiaal. In onze steden is natuursteen vaak gezichtsbepalend door de aanwezigheid van veel historische gebouwen, bestaande uit diverse soorten natuursteen. Het aanwezige erfgoed bestaat veelal uit monumentale gebouwen in de binnenstad waaraan nu vaak een nieuwe functie wordt toegekend. De renovaties gebeuren bij voorkeur op een manier waarbij de culturele en architecturale waarden zoveel mogelijk behouden worden. Om een aangenaam binnenklimaat te creëren is het vaak aangewezen om o.a. de bouwschil te isoleren. Bij historische gebouwen wordt deze meestal aan de binnenzijde geplaatst.

Het klimaat is de laatste jaren onderhevig aan grote veranderingen. In deze thesis wordt het effect onderzocht van de opwarming van de aarde en de gevolgen ervan op de aanwezige natuursteen. Ook het na-isoleren van deze gebouwen heeft een fundamentele invloed op de verwerking van het bouw materiaal. Meer specifiek wordt onderzoek gedaan naar het effect van de klimaatverandering op twee soorten natuursteen: de Noord-Franse Savonnières en de Duitse Bentheim. Dit voor een muuropbouw zonder en met na-isolatie.

Eén van de belangrijkste schadefenomenen in een bouwsteen en de focus van deze thesis is vorstschade. Om een inschatting te maken van de vorstschade worden kritische vorst- en dooicycli geanalyseerd door middel van hygrothermische simulaties. Hierbij maken we gebruik van het programma Delphin 6.1.0. De evolutie van de schade, onderhevig aan de klimaatverandering, wordt aan de hand van diverse klimaatscenario's onderzocht: 3 scenario's voor de toekomst en 1 historisch klimaatscenario.

Verder onderzoeken we ook de invloed van het stedelijk hitte-eiland op de vorstschade in natuursteen. Het effect van het stedelijk hitte-eiland zorgt ervoor dat gebouwen, gelegen in de stad, 's nachts een stuk minder afkoelen dan wanneer ze aan de rand voorkomen. Dit fenomeen is een rechtstreeks gevolg van de klimaatverandering.

Met de gegevens die uit de hygrothermische simulaties komen, worden de kritische vorst- en dooicycli berekend. Dit gebeurt op basis van twee verschillende methodes. De ene methode maakt gebruik van een kritische ijsmassa, terwijl bij de andere methode een kritische temperatuurgrens bepalend is.

SAMENVATTING

In het bouwkundig erfgoed van België zijn heel wat gebouwen opgetrokken in diverse streekeigen natuurstenen. *“Natuurstenen aanwezig in historische gebouwen bezitten cultuurhistorische erfgoedwaarde als verwijzing naar het tijdperk waarin het monument werd opgericht of naar de mensen die de steen en het gebouw hebben vormgegeven.”* (Dusar & Dreesen, 2009, p2)

De focus in deze thesis wordt gelegd op de Noord-Franse kalksteen Savonnières en de Duitse kalkzandsteen Bentheim. Ze werden beide vooral gebruikt als renovatiesteen voor de Vlaamse witstenen in historische gebouwen. Hoewel de stenen op esthetisch vlak sterk op elkaar lijken (beide witte zand/kalksteen) hebben ze op onder andere macroscopische en microscopisch vlak een zeer verschillend karakter.

De afgelopen jaren is het klimaat grondig veranderd wat een invloed heeft op de verwerking van de steen. De zomers zullen meer extreme hittegolven kennen, terwijl we gedurende de wintermaanden een grotere hoeveelheid neerslag te verwerken krijgen. Deze extreme weersveranderingen veroorzaken diverse soorten erosie of afslijting van de bouwmaterialen.

Bij het renoveren van onze erfgoedgebouwen zal men door de hoge culturele waarde de muren na-isoleren aan de binnenzijde van de buitenmuur. Eén van de belangrijkste verweringsmogelijkheden zijn schadenfenomenen als gevolg van vocht. Een muur na-isoleren heeft als gevolg dat de muur kouder wordt en langer nat blijft. Een vochtgerelateerd probleem waar in deze thesis op gefocust wordt is vorstschade.

De twee natuurstenen waarop het onderzoek naar kritische vorst- en dooicycli toegepast wordt, zijn verschillend van afkomst en van macroscopische en microscopische samenstelling. Savonnières is een kalksteen die wordt ontgonnen in het noorden van Frankrijk, ten oosten van Parijs. De Franse witsteen kent sinds 19de en 20ste eeuw een opkomst in België als vervangsteen van de Vlaamse witstenen. Bentheim is een Duitse kalkzandsteen die een oorsprong heeft in de stad Bad Bentheimer. Het eerste gebruik in België dateert van in de vroegmoderne periode. De verdeling van poriëngroottes in de stenen toont aan dat Savonnières een groter aantal kleine poriën heeft en een veel grotere open porositeit dan Bentheim. Bij het analyseren van vorstschade zal de invloed van de poriën een grote rol spelen.

Om de vorstschade te analyseren wordt gebruik gemaakt van verschillende klimaatscenario's en twee verschillende soorten analyses. De eerste analyse focust zich op vergelijking tussen 30 jaar historische klimaatdata, van 1976 tot 2005, en 30 jaar toekomstige klimaatdata, van 2070 tot 2099. Voor de toekomstige klimaatdata wordt gewerkt met drie verschillende klimaatprojecties die worden bepaald aan de hand van de toekomstige broeikasgasemissies:

een optimistische, een gemiddelde en een pessimistische klimaatprojectie. Bij het bekijken van de verschillende klimaatdata, kan besloten worden dat in de toekomst de temperatuur met zekerheid zal stijgen ongeacht welke klimaatprojectie er wordt gebruikt. In de toekomst wordt er meer neerslag verwacht in de winter en meer droge periodes in de zomer. De totale hoeveelheid aan neerslag zal ofwel toenemen of gelijk blijven, afhankelijk van welke klimaatprojectie gevolgd zal worden. Ook de stijgende slagregenbelasting zal een belangrijke factor spelen in de toekomst. De tweede analyse focust zich op het effect van het stedelijk hitte-eiland van Gent. Hiervoor wordt het gedrag van de twee natuurstenen onderzocht op 6 verschillende locaties. Het effect van het stedelijk hitte-eiland zal zorgen dat de warmte in de stad langer vastgehouden wordt, terwijl de landelijke gebieden zullen afkoelen. Dit effect is vooral merkbaar tijdens de nacht.

De vorstschade wordt bepaald aan de hand van het aantal kritische vorst- en dooicycli. Voor de analyse hiervan worden eerst een aantal parameters onderzocht voor de natuurstenen Savonnières en Bentheim. Om deze parameters te bekomen, worden hygrothermische simulaties uitgevoerd met het programma Delphin 6.1.0, die verwerkt worden in een softwareprogramma RStudio. De simulaties worden uitgevoerd voor drie verschillende oriëntaties: de zuidwestelijke, de noordwestelijk en de noordelijk oriëntatie. Bij elke analyse (met het klimaat van Brussel of met de klimaatgegevens van het stedelijk hitte-eiland) zal eerst een onderzoek gebeuren naar de temperatuur, vochthoeveelheid en ijsmassa in de natuurstenen. Dit gebeurt voor zowel een geïsoleerde als een niet geïsoleerde muuropbouw. Het onderzoek naar kritische vorst- en dooicycli wordt uitgevoerd op twee verschillende methodes. Bij de eerste methode wordt via een kritisch ijsgehalte een grenswaarde bepaald waarmee het aantal kritische vorst- en dooicycli wordt berekend. De tweede methode werkt met een temperatuurgrens om het aantal kritische vorst- en dooicycli te bepalen.

Het eerste onderzoek (hoofdstuk 6) behandelt de effecten van de klimaatverandering op beide natuurstenen: Savonnières en Bentheim. Er wordt ook gekeken naar wat het effect op de natuurstenen is als de muur wordt na-geïsoleerd. In dit onderzoek wordt gewerkt met de Brusselse klimaatdata van 30 jaar uit het verleden en 30 jaar in de toekomst. De temperatuur van Savonnières zal lager liggen dan de temperatuur in Bentheim tot op een bepaalde diepte. Als beide muuropbouwen geïsoleerd worden, daalt de temperatuur met een aantal graden. Verder is er een grote kans dat de vochthoeveelheid in de muur zal stijgen in de toekomst. De vochthoeveelheid is afhankelijk van onder andere de poriëngrootteverdeling in de natuurstenen. Bij een voldoende lage temperatuur en een voldoende grote aanwezigheid van vocht kan ijsmassa gevormd worden. De ijsmassa zal zich ongehinderd voortplanten in de diepte bij Bentheim door zijn unimodale poriënverdeling. Na het bepalen van deze drie parameters, wordt het aantal kritische vorst- en dooicycli berekend. Door de lagere temperatuur en het hoger vochtgehalte zal Savonnières een groter aantal kritische vorst- en dooicycli opleveren dan Bentheim, maar de kritische vorst- en dooicycli zullen zich dieper verspreiden in Bentheim.

Het tweede onderzoek (hoofdstuk 7) behandelt de invloed van het stedelijk hitte-eiland op beide natuurstenen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de klimaatgegevens van verschillende locaties in en rond de stad Gent. De temperaturen in de steen vertonen eenzelfde verloop als de luchttemperaturen op de verschillende plaatsen. Savonnières zal ook hier tot op een bepaalde diepte lager liggen in temperatuur dan Bentheim. De vochthoeveelheden in de steen zijn op de locaties in Gent sterk afhankelijk van de slagregenbelasting. Niet alleen de vochthoeveelheid maar ook het vochtgedrag in de diepte wordt bekeken. De natuurstenen doorlopen doorgaans twee verschillende drogingsfasen. Indien we de vergelijking maken tussen Savonnières en Bentheim zien we dat in de meeste gevallen Savonnières langer nat zal blijven dan Bentheim. Aan de hand van deze vooronderzoeken wordt het aantal kritische vorst- en dooicycli bepaald op de 6 verschillende locaties.

Door het onderzoek in deze thesis wordt het verschillend gedrag van de natuurstenen van naderbij bekeken en kunnen algemene conclusies genomen worden over het effect van de poriënverdeling en -groottes in de opname van vocht, verdeling van ijs en het temperatuurverloop in de natuurstenen. Op deze manier kunnen we de vorstschade in beide natuurstenen inschatten.

Daarnaast geeft deze thesis een inzicht in wat het effect van na-isolatie is op een natuursteen en hoe deze zal reageren op de toekomstige klimaatveranderingen en op het stedelijk hitte-eilandeffect.

INHOUDSOPGAVE

Dankwoord	3
Abstract	4
Samenvatting	5
Inhoudsopgave	8
Figurenlijst	11
Tabellenlijst	17
1 Inleiding	21
2 Literatuurstudie	23
2.1 Natuurstenen in België en omstreken	23
2.2 De klimatologische verandering	26
2.3 Belangrijkste verwerking van natuursteen (in België)	31
2.4 Invloed van na-isolatie	35
2.5 Hygrothermische simulaties op natuursteen	38
2.5.1 Slagregenbelasting	39
2.5.2 Vorstschade	40
3 Te onderzoeken natuurstenen	43
3.1 De Savonnièressteen	43
3.1.1 Ontstaan en gebruik	43
3.1.2 Macroscopische en microscopische eigenschappen	44
3.2 De Bentheimsteen	46
3.2.1 Ontstaan en gebruik	46
3.2.2 Macroscopische en microscopische eigenschappen	48
4 Weerdata	51
4.1 Klimaatdata van Brussel	51
4.1.1 Temperatuur	51
4.1.2 Neerslag	52
4.2 Klimaatdata van het stedelijk hitte-eiland Gent	55
4.2.1 Resultaten weerstations	58
5 Software delphin	67
5.1 Muuropbouw	67

5.2	Materiaaleigenschappen	68
5.2.1	Savonnières	68
5.2.2	Bentheim	70
5.3	Inputgegevens	71
5.3.1	Beginvoorwaarden	71
5.3.2	Interne randvoorwaarden	72
5.3.3	Externe randvoorwaarden	72
5.3.4	Weerstanden	73
5.4	Muurvoorwaarden	73
5.4.1	Oriëntatie	73
5.4.2	Locaties	74
5.4.3	Opdeling in de muur	74
5.5	Outputgegevens	74
6	Simulaties met klimaatscenario's Brussel	75
6.1	Vooraf te onderzoeken parameters	75
6.1.1	Temperatuur	75
6.1.2	Vochtaccumulatie	84
6.1.3	IJsmassa	96
6.2	Kritische vorst- en doocycli	99
6.2.1	Methode 1: Bepalen van kritische vorst- en doocycli aan de hand van een kritisch ijsgehalte	99
6.2.2	Methode 2: Bepalen van kritische vorst- en doocycli aan de hand van een grenstemperatuur	109
6.3	Conclusie	117
7	Simulaties met klimaat uit verschillende plaatsen in Gent	121
7.1	Vooraf te onderzoeken parameters	121
7.1.1	Temperatuur	121
7.1.2	Vochtaccumulatie	130
7.1.3	IJsmassa	141
7.2	Kritische vorst- en doocycli	145
7.2.1	Methode 1: Kritische vorst- en doocycli bepalen aan de hand van het kritische ijsgehalte	145
7.2.2	Methode 2: Kritische vorst- en doocycli bepalen aan de hand van een grenstemperatuur	149

7.3	Conclusie	155
8	Algemene conclusie	159
9	Referenties	161
Bijlagen		169

FIGURENLIJST

Figuur 2.1: Verspreiding van de verschillende natuurstenen in Wallonië. Op de kaart is te zien: arduin (6), de Maaskalksteen (8 en 9), de Doornikse steen (10), zwarte marmers (11), gekleurde marmers (12) en siliciumhoudende stenen (16,18,19,20,22 & 23) (Pierres & Marbrers, 2005) .	23
Figuur 2.2: Verspreiding van de belangrijkste historische bouwstenen	24
Figuur 2.3: Een geologische kaart van de ontginningsplaatsen in Frankrijk. In de blauwe zone bevinden zich de belangrijkste witstenen als importsteen voor België, afkomstig uit het Juratijdperk (Dreesen et al., 2012).	26
Figuur 2.4: Voorziene wijzigingen van de jaarlijkse neerslag (links) en van de neerslag in de zomer (rechts) voor de periode van 2071-2100 in vergelijking met de referentieperiode van 1971-2000. De toekomstige klimaatdata geldt voor het RCP8.5-scenario. (Europees Milieu Agentschap, 2019).	27
Figuur 2.5: Kaart van Europa met vorst- en dooicycliïnen (Grossi et al., 2007).	29
Figuur 2.6: Vorming van gipskorst op Ledesteen (links) en vorming van een patinalaag op Ledesteen (rechts) (Monumenten kennis, 2015).	32
Figuur 2.7: Algen op kalkzandsteen Bentheim (Monumenten kennis, 2015).	35
Figuur 2.8: Een muur zonder dampscherm waar condensatie zich vormt tussen de gevel en de isolatie (links) en een muur met een dampscherm aan de binnenzijde die condensatie voorkomt (rechts)(van der Linden & van den Ham, 2015).	37
Figuur 2.9: Een illustratie van hoe het intelligent damprem zich gedraagt in de winter (links) en in de zomer (recht). De rode kleur stelt de warme ruimte of materiaal voor en de blauwe kleur voor een koude ruimte of materiaal. (Isoproc, 2013).	38
Figuur 2.10: Illustratie over het ontstaan van slagregen (Blocken & Carmeliet, 2004).	40
Figuur 3.1: Poriëngrootteverdeling in Savonnières (de volle lijn) en Bentheim (de stippellijn) (Deprez, 2020).	45
Figuur 3.2: Microscopische afbeelding van Savonnièressteen met microporiën tussen de oölieten en tussen het cement (1-2),microscopische intergranulaire poriën (3) en macroscopische intergranulaire poriën (4) en holle schelpfossielen (5) (Deprez, 2020) .	46
Figuur 3.3: Het ontsluitingsgebied van Bentheim (Deprez, 2020).	47
Figuur 3.4: De granulaire verdeling van Bentheim. De poriën zijn aangeduid in het zwart en de korrels in het grijs (Deprez, 2020).	48
Figuur 4.1: Gemiddelde temperatuur per jaar voor elk klimaatscenario. De stippellijnen geven de gemiddelde temperatuur weer voor 30 jaar.	52

Figuur 4.2: Het gemiddelde verschil in temperatuur van de toekomstige klimaatscenario's in vergelijking met het historische klimaatscenario (links) en een tabel met de gemiddelde temperatuur per seizoen (rechts) (Vandemeulebroucke et al., 2021).....	52
Figuur 4.3: De verandering in neerslaghoeveelheid van de toekomstige klimaatscenario's in vergelijking met de historische weerdata (Vandemeulebroucke et al., 2021).....	53
Figuur 4.4: Gemiddelde neerslaghoeveelheid per jaar [kg/m ³] voor elk klimaatscenario. De stippellijnen geven de gemiddelde neerslaghoeveelheid weer voor 30 jaar.....	53
Figuur 4.5: Windroos van de klimaatdata in Brussel.....	54
Figuur 4.6: De verschillende meetstations, gelokaliseerd op een kaart van Gent (Vandemeulebroucke, 2018).	56
Figuur 4.7: Een overzicht van de verschillende sensoren op een weerstation: passief geventileerd stralingsschild (1), opvangbassin voor de neerslag (2), actief geventileerd stralingsschild (3) en ultrasone anemometer (4) (Mocca, 2020).....	57
Figuur 4.8: Het temperatuurverloop in de winter (bovenaan) en in de zomer (onderaan). ...	59
Figuur 4.9: Verloop van de relatieve vochtigheid in de winter (bovenaan) en in de zomer (onderaan).	61
Figuur 4.10: Het verloop van de gemiddelde windsnelheden per dag.	63
Figuur 4.11: Windrozen die de windsnelheid en richting aanduiden voor alle meetstations in Gent.	65
Figuur 5.1: Muuropbouw in Delphin: de opbouw voor een niet-geïsoleerde muur (links) en een geïsoleerde muur (rechts).....	67
Figuur 5.2: Kenmerkende grafieken voor Savonnières: de capillaire druk in functie van het vochtgehalte (bovenaan), de geleidbaarheid van vloeistof in functie van het vochtgehalte (midden) en de warmtegeleiding in functie van het vochtgehalte (onderaan).	69
Figuur 5.3: De capillaire druk in functie van het vochtgehalte voor Bentheim.	70
Figuur 5.4: De geleidbaarheid van vloeistof in functie van het vochtgehalte (bovenaan) en de warmtegeleiding in functie van het vochtgehalte (onderaan) voor Bentheim.	71
Figuur 5.5: Dampdiffusieweerstand weergegeven in functie van de relatieve vochtigheid voor het gebruikte dampscherm in Delphin.	73
Figuur 6.1: De gemiddelde jaarlijkse temperatuur [°C] in Savonnières en Bentheim voor een zuidwestelijke oriëntatie tijdens een periode van 30 jaar in de historische klimaatdata (bovenaan) en 30 jaar in de toekomstige optimistische en pessimistische klimaatdata (onderaan). Temperaturen worden weergegeven op een diepte van 5mm en 50mm voor zowel een niet-geïsoleerde als een geïsoleerde muuropbouw.....	77
Figuur 6.2: Temperatuurverloop voor Bentheim en Savonnières in januari (bovenaan) en in juli (onderaan) voor een willekeurig jaar uit de historische klimaatdata. De natuurstenen bevinden zich in een geïsoleerde muuropbouw.....	79

Figuur 6.3: Temperatuurverloop in januari voor een willekeurig jaar uit de historische klimaatdata.	80
Figuur 6.4: Temperatuurverloop in juli voor een willekeurig jaar uit de historische klimaatdata.	80
Figuur 6.5: Het temperatuurverloop over de gehele diepte van de muur voor Savonnières en Bentheim.....	81
Figuur 6.6: De gemiddelde jaarlijkse temperatuur [°C] in Savonnières en Bentheim voor een noordelijke oriëntatie tijdens een periode van 30 jaar in de historische klimaatdata (bovenaan) en 30 jaar in de toekomstige optimistische en pessimistische klimaatdata (onderaan). Temperaturen worden weergegeven op een diepte van 5mm en 50mm voor zowel een niet-geïsoleerde als een geïsoleerde muuropbouw.	83
Figuur 6.7: Het temperatuurverloop voor Savonnières en Bentheim in de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie.	84
Figuur 6.8: De gemiddelde vochtaccumulatie per jaar in kg/m ³ in Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor een zuidwestelijke oriëntatie tijdens alle klimaatscenario's (1 historisch en 3 toekomstige). De vochtaccumulatie wordt weergegeven voor zowel een niet-geïsoleerde muur als een geïsoleerde muur.	85
Figuur 6.9: De gemiddelde vochtaccumulatie per jaar [kg/m ³] in beide natuurstenen voor de zuidwestelijke georiënteerde muur tijdens een historisch klimaatscenario (bovenaan) en twee toekomstige klimaatscenario's (het optimistische en het pessimistische) (onderaan).	86
Figuur 6.10: Het vochtverloop [kg/m ³] in Savonnières (bovenaan) en Bentheim voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als een geïsoleerde muuropbouw (rechts) die zuidwestelijke gericht zijn.....	87
Figuur 6.11: Verloop windsnelheid in januari voor het historische klimaatscenario.	88
Figuur 6.12: Het vochtverloop [kg/m ³] in Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als een geïsoleerde muuropbouw (rechts) die noordelijk gericht zijn.	89
Figuur 6.13: Het vochtverloop [kg/m ³] in Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als een geïsoleerde muuropbouw (rechts) die noordwestelijke gericht zijn.	90
Figuur 6.14: Het vochtverloop over de diepte voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor een zuidwestelijke oriëntatie tijdens de Natte Historische Periode, een representatie van 8 maanden in de historische periode. Het geeft het percentage van de poriën weer die gevuld zijn met water voor zowel een niet-geïsoleerde (links) als een geïsoleerde muur (rechts).....	91
Figuur 6.15: Droogcurves voor Savonnières en Bentheim.	93
Figuur 6.16: Het vochtverloop van Bentheim en Savonnières voor een korte periode van 1 dag (links) of 2 dagen (rechts) voor een maand januari uit de historische klimaatdata.	94

Figuur 6.17: Het vochtverloop over de diepte voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor een zuidwestelijke oriëntatie tijdens de Kortstondige Natte Historische Periode, een representatie van 2 maanden in de historische periode. Het geeft het percentage van de poriën weer die gevuld zijn met water voor zowel een niet-geïsoleerde (links) als een geïsoleerde muur (rechts).....	95
Figuur 6.18: Een ingezoomde versie van de muuropbouw zonder isolatie met Savonnières voor de maand januari in de natte periode.	97
Figuur 6.19: Een ingezoomde versie van de muuropbouw zonder isolatie met Bentheim voor de maand januari in de natte periode.	98
Figuur 6.20: De hoeveelheid ijs in de poriën aanwezig [%] voor Savonnières (links) en Bentheim (rechts) voor een geïsoleerde muuropbouw in de zuidwestelijke oriëntatie tijdens de natte historische periode.....	98
Figuur 6.21: De formule die gebruikt is voor de berekeningen van kritische vorst- en dooicycli, opgesteld door Vandemeulebroucke (2018).....	101
Figuur 6.22: Cumulatieve waarde voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) over een periode van 30 jaar. De grafieken zijn opgesteld voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als voor een geïsoleerde muuropbouw (rechts).....	102
Figuur 6.23: Cumulatieve waarde voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières en Bentheim over een periode van 30 jaar. De grafieken zijn opgesteld voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als voor een geïsoleerde muuropbouw (rechts).	102
Figuur 6.24: Cumulatieve waarde voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) over een periode van 30 jaar voor de kritische diepte. De grafieken zijn opgesteld voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als voor een geïsoleerde muuropbouw (rechts) waarvoor de schaal op de y-as varieert.	103
Figuur 6.25: Temperatuurverloop in Savonnières en Bentheim voor 1 maand, van halverwege december tot halverwege januari, in de jaarovergang van de natte historische periode. ...	105
Figuur 6.26: Het aantal kritische vorst- en dooicycli over 30 jaar voorgesteld in de diepte voor beide natuurstenen in een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) en een geïsoleerde muuropbouw (recht). De grafieken bevatten het aantal kritische vorst- en dooicycli voor alle klimaatscenario's.	105
Figuur 6.27: Cumulatieve waarde voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières en Bentheim over een periode van 30 jaar voor de noordelijke oriëntatie. De grafieken zijn voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als voor een geïsoleerde muuropbouw (rechts).....	108
Figuur 6.28: Cumulatieve waarde voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières en Bentheim over een periode van 30 jaar voor de noordwestelijke oriëntatie. De grafieken zijn voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als voor een geïsoleerde muuropbouw (rechts).....	108

Figuur 6.29: Het aantal kritische vorst- en doocycli in functie van de diepte voor Savonnières en Bentheim in een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) en een geïsoleerde muuropbouw (rechts) voor alle klimaatscenario's in zowel een noordelijke gerichte gevelopbouw (bovenaan) als in een noordwestelijke gerichte gevelopbouw (onderaan).	109
Figuur 6.30: Cumulatieve kritische vorst- en doocycli over 30 jaar voor een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) en een geïsoleerde muuropbouw (rechts).	112
Figuur 6.31: Cumulatieve kritische vorst- en doocycli over 30 jaar in functie van de diepte voor een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) en een geïsoleerde muuropbouw (rechts).	113
Figuur 7.1: Het temperatuurverloop op 6 locaties in de maand januari voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) in een zuidwestelijke oriëntatie.	122
Figuur 7.2: Temperatuurverloop in de diepte voor zowel Savonnières als voor Bentheim in een muuropbouw zonder isolatie.	124
Figuur 7.3: Temperatuurverloop in januari voor een niet-geïsoleerde muuropbouw met Bentheim. Het temperatuurverloop is weergegeven op een diepte van 5mm en 50mm voor de locatie Melle en Sint-Bavoschool.	126
Figuur 7.4: Temperatuurverloop in juli voor een niet-geïsoleerde muuropbouw en met Bentheim. Het temperatuurverloop is weergegeven op een diepte van 5mm en 50mm voor de locatie Melle en Sint-Bavoschool.	126
Figuur 7.5: De dagelijkse gemiddelde temperatuur voor de maand januari voor de locatie Melle en Sint-Bavoschool in beide stenen op een diepte van 5mm en 50mm.	127
Figuur 7.6: Het temperatuurverloop voor 6 locaties in de maand januari voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) in een noordelijke oriëntatie.	129
Figuur 7.7: De vochtaccumulatie [kg/m ³] in een niet-geïsoleerde muur (links) en een geïsoleerde muur (rechts) voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) in de zuidwestelijke oriëntatie.	131
Figuur 7.8: De vochtaccumulatie [kg/m ³] in een niet-geïsoleerde muur (links) en een geïsoleerde muur (rechts) voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) in de noordelijke oriëntatie.	133
Figuur 7.9: De vochtaccumulatie [kg/m ³] in een niet-geïsoleerde muur (links) en een geïsoleerde muur (rechts) voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) in de noordwestelijke oriëntatie.	134
Figuur 7.10: Vochtverdeling in een niet-geïsoleerde (links) en geïsoleerde (rechts) muuropbouw voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) op de locatie Melle. Het verloop van vocht wordt getoond over een periode van 8 maanden in het jaar 2017.	138
Figuur 7.11: Vochtverdeling in een niet-geïsoleerde (links) en geïsoleerde (rechts) muuropbouw voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) op de locatie Provinciehuis. Het verloop van vocht wordt getoond over een periode van 4 maanden in het jaar 2017.	139

Figuur 7.12: Vochtverdeling in een niet-geïsoleerde (links) en geïsoleerde (rechts) muuropbouw voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) op de locatie Provinciehuis. Het verloop van vocht wordt getoond over een periode van 8 maanden in het jaar 2018.	140
Figuur 7.13: Temperatuurverloop voor een geïsoleerde muuropbouw met Savonnières (blauwe lijn) en Bentheim (zwarte lijn) in de maand januari van 2017.	142
Figuur 7.14: Kleurendiagrammen van het percentage van de poriën gevuld met ijs in de geïsoleerde muuropbouw met Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor de locatie Melle (links) en de locatie het Provinciehuis (rechts) voor 1 maand, januari 2017. (Door de kleine hoeveelheid aan ijs in de natuurstenen muren is de bovengrens van het percentage 50%).	143
Figuur 7.15: Vochtverdeling in een geïsoleerde muur voor Savonnières (links) en Bentheim (recht) over 1 maand, januari 2017.	143
Figuur 7.16: Verloop van kortgolvlige straling in januari 2017.	144
Figuur 7.17: Vochthoeveelheid in een geïsoleerde muuropbouw met Bentheim op de locatie Melle, weergegeven voor 1 maand, februari 2017.	144
Figuur 7.18: Hoeveelheid ijs in een geïsoleerde muuropbouw met Bentheim op de locatie Melle, weergegeven voor 1 maand, februari 2017.	145
Figuur 7.19: Cumulatieve kritische vorst- en dooicycli in de natuurstenen Savonnières en Bentheim voor de locatie Melle (blauw) en de locatie het Honda (geel).	147
Figuur 7.20: Cumulatieve kritische vorst- en dooicycli in de natuurstenen Savonnières en Bentheim voor de locatie Melle (blauw), de locatie het Honda (geel) en de locatie Wondelgem (rood).	148

TABELLENLIJST

Tabel 4.1: Neerslaghoeveelheid per jaar en per seizoen (Vandemeulebroucke et al., 2021).	54
Tabel 4.2: Maximale, minimale en gemiddelde meettemperatuur per station	58
Tabel 4.3: Het aantal uren vorst per jaar voor elke locatie van het MOCCA-project in Gent.	60
Tabel 4.4: Gemiddelde relatieve vochtigheid per locatie	61
Tabel 4.5: Maximale windsnelheden per meetstation voor elk jaar	62
Tabel 4.6: De totale neerslaghoeveelheid in mm per jaar (2020 is niet meegerekend omdat het geen volledig jaar bevat).....	63
Tabel 4.7: Slagregenbelasting per jaar in mm.	64
Tabel 5.1: Materiaaleigenschappen van Savonnières.	68
Tabel 5.2: Materiaaleigenschappen van Bentheim.	70
Tabel 5.3: Externe randvoorwaarden met hun bijhorende klimaatparameters.	72
Tabel 6.1: Temperatuurverschil tussen voor- en achterkant van de twee verschillende natuurstenen in [°C] voor de verschillende klimaatscenario's.....	82
Tabel 6.2: De kritische dieptes voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in de verschillende muuropbouwen georiënteerd naar het noorden en naar het noordwesten.	107
Tabel 6.3: Het aantal kritische vries- en dooicycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van 0°C.	110
Tabel 6.4: Het aantal kritische vries- en dooicycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van -3°C.....	111
Tabel 6.5: Het verschil tussen de temperaturen in de natuurstenen op de een diepte van 5 mm en de buitenluchttemperatuur.	111
Tabel 6.6: Het aantal kritische vries- en dooicycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van 0°C in een noord gerichte muur.	114
Tabel 6.7: Het aantal kritische vries- en dooicycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van 0°C in een noordwest gerichte muur.....	114
Tabel 6.8: Het aantal kritische vries- en dooicycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van -3°C in een noord gerichte muur.	115
Tabel 6.9: Het aantal kritische vries- en dooicycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van -3°C in een noordwest gerichte muur.	115
Tabel 6.10: Het verschil tussen de temperaturen in de natuurstenen, gericht naar een noordwestelijke richting op een diepte van 5 mm en de buitenluchttemperatuur.	116

Tabel 6.11: Het verschil tussen de temperaturen in de natuurstenen, gericht naar een noordelijke richting op een diepte van 5 mm en de buitenluchttemperatuur.....	117
Tabel 7.1: Temperatuurverschil van de verschillende locaties met de locatie Melle voor twee verschillende dieptes en twee verschillende natuurstenen voor de zuidwestelijke oriëntatie.	123
Tabel 7.2: Temperatuursverschil van de verschillende locaties met de locatie Melle voor twee verschillende dieptes en twee verschillende natuurstenen voor de noordelijke oriëntatie..	128
Tabel 7.3: Temperatuursverschil van de verschillende locaties met de locatie Melle voor twee verschillende dieptes en twee verschillende natuurstenen voor de noordwestelijke oriëntatie.	129
Tabel 7.4: Vochthoeveelheid [kg/m ³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie met de natuursteen Savonnières voor een zuidwestelijke oriëntatie.	132
Tabel 7.5: Vochthoeveelheid [kg/m ³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie met de natuursteen Bentheim voor een zuidwestelijke oriëntatie.....	133
Tabel 7.6: Vochthoeveelheid [kg/m ³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie met de natuursteen Savonnières voor een noordelijke oriëntatie.	135
Tabel 7.7: Vochthoeveelheid [kg/m ³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie met de natuursteen Bentheim voor een noordelijke oriëntatie.....	135
Tabel 7.8: Vochthoeveelheid [kg/m ³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie en met de natuursteen Savonnières voor een noordwestelijke oriëntatie.	135
Tabel 7.9: Vochthoeveelheid [kg/m ³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie met de natuursteen Bentheim voor een noordwestelijke oriëntatie.	136
Tabel 7.10: Piekwaarden in de vochthoeveelheid, berekend in een percentage van de poriën die gevuld is met vocht [%].	139
Tabel 7.11: Gemiddelde waarde in vochthoeveelheid, berekend in een percentage van de poriën die gevuld is met vocht [%].	139
Tabel 7.12: Het aantal kritische vorst- en dooicycli over 3 jaar voor zowel Savonnières als Bentheim voor de 6 locaties in het MOCCA-project in een zuidwestelijke oriëntatie.....	146
Tabel 7.13: Het aantal kritische vorst- en dooicycli over 3 jaar voor zowel Savonnières als Bentheim voor de 6 locaties in het MOCCA-project in de noordwestelijk georiënteerde muren.	148
Tabel 7.14: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met de grenstemperatuur 0°C voor 3 jaar in een muuropbouw zonder isolatie.	150
Tabel 7.15: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met de grenstemperatuur 0°C voor 3 jaar in een muuropbouw met isolatie.	150
Tabel 7.16: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met de grenstemperatuur -3°C voor 3 jaar in een muuropbouw zonder isolatie.	151

Tabel 7.17: Het aantal kritische vorst- en doocycli met de grenstemperatuur -3°C voor 3 jaar in een muuropbouw met isolatie.	152
Tabel 7.18: Luchttemperatuur nodig voor het aantal kritische vorst- en doocycli te bereiken, berekend met een grenstemperatuur van -3°C	153
Tabel 7.19: Het aantal kritische vorst- en doocycli met de grenstemperatuur -3°C voor 3 jaar in noord gerichte muuropbouw.	154
Tabel 7.20: Het aantal kritische vorst- en doocycli met de grenstemperatuur -3°C voor 3 jaar in noordwest gerichte muuropbouw.	154
Tabel 7.21: Luchttemperatuur nodig voor het aantal kritische vorst- en doocycli te bereiken, berekend met een grenstemperatuur van -3°C in een noordelijke oriëntatie.....	155
Tabel 7.22: Luchttemperatuur nodig voor het aantal kritische vorst- en doocycli te bereiken, berekend met een grenstemperatuur van -3°C in een noordwestelijke oriëntatie.	155

1 INLEIDING

“Geen ander materiaal is meer met eigen bodem en cultuur verbonden dan natuursteen. Hij is het rechtstreekse product van die bodem en bepaalt mede de identiteit en het beeld van de streek.” (Dusar et al., 2009, p9). Natuursteen is een functioneel en duurzaam product met een uniek uiterlijk en karakter. Het is gevormd door natuurlijke processen en wordt gewonnen in groeves. De aanwezigheid van natuursteen in historische gebouwen vertelt meer over de plek en waarden dan men zou denken. Tot en met 1800 werd vaak gebruik gemaakt van lokale en gemakkelijk leverbare natuurstenen. Het esthetische was op dat moment eerder onderschikt. De reden voor het gebruik lag eerder bij de sterkte, de onverwoestbaarheid en de ruime mogelijkheden tot vormgeving van de natuursteen. De belangrijkste functie was op dat moment om de stabiliteit van een gebouw te garanderen. Als bouwsteen werden ze vaak onder een afwerkingslaag (verf of pleister) verborgen waardoor deze ook beschermd waren tegen uitwendige invloedsfactoren (De Witte, 1990; Dusar et al., 2009).

Het gebruik van lokale stenen toont een wijde variatie aan natuurstenen in de historische gebouwen van België en omstreken. De stenen kunnen een tijdperk weergeven waarin het monument of gebouw werd opgericht, een aanwijzing geven naar de mensen die de steen en het gebouw vormgegeven hebben of een weerspiegeling brengen van het geologische substraat. (Dusar & Dreesen, 2009). Afhankelijk van de ontginningsplek van de natuursteen, toont deze andere fysische eigenschappen (De Witte, 1990; Dusar et al., 2009).

Het is pas in de 19^{de} eeuw dat het esthetische aspect van belang werd. Als gevolg werden de afwerkingslagen weggenomen en werd natuursteen blootgesteld aan de omgeving. Op datzelfde moment nam de luchtvervuiling toe door de industriële revolutie waardoor natuurstenen sterk werden aangetast. Samen met andere verweringsmechanismen is dit één van de oorzaken van plaatselijke vervangingen van natuursteen in historische gebouwen. Ondertussen waren de plaatselijke groeves uitgeput en door de evolutie in transportmogelijkheden en de veranderende economische belangen werd natuursteen geïmporteerd uit het buitenland. Ook gingen ze er toen van uit dat de stenen uit Duitsland en Frankrijk een betere weerstand hadden tegen vertering waardoor deze gebruikt werden als vervangstenen van de Belgische natuurstenen (De Witte, 1990; Dusar et al., 2009).

Helaas bleek de kwaliteit van de ingevoerde stenen niet altijd dezelfde te zijn in een ander klimaat. De stenen werden voornamelijk vervangen in historische gebouwen met de bedoeling om een gelijk esthetisch karakter te bekomen. Het uiterlijk van de steen was echter niet voldoende om zich te kwalificeren als goede vervangsteen. Door een verschil in porositeit en watertransport in de natuurstenen werden grote verschillen duidelijk in vertering van de nieuwe en oude materialen. De eigenschappen en verouderingsprocessen van natuursteen kunnen sterk verschillen en zijn minder voorspelbaar dan betonblokken of bakstenen, die door de mens gemaakt zijn (Dusar et al., 2009).

Het onderhoud en de zorg voor onze historische gebouwen is meestal een dure aangelegenheid. Bovendien is het besef gegroeid dat de waarde van deze gebouwen voor zijn omgeving niet kan losgekoppeld worden van de functie of het gebruik ervan. In vele gevallen dringt een herbestemming zich op en wordt nagedacht over een relevante invulling om de historische panden terug tot leven te brengen. Zo zijn er tegenwoordig meer en meer projecten waarbij historische gebouwen met respect voor de authenticiteit een nieuwe functie krijgen in onze samenleving. Dit kunnen appartementen, kantoren of culturele centra enz. zijn. In elk van deze projecten probeert men modern comfort aan te bieden binnen dit historisch kader. Om een aangenaam binnenklimaat te creëren worden historische gebouwen dan ook vaak geïsoleerd. Wegens het belang van de aanwezigheid van historische elementen aan de buitenzijde van het gebouw wordt isolatie vaak aan de binnenzijde voorzien.

Net omdat de reactie van de natuursteen op een bepaalde veranderingen zoals het plaatsen van binnenisolatie of de evolutie in het klimaat en dergelijke, moeilijk te bepalen valt, is het belang van hygrothermische simulaties de laatste jaren toegenomen. Via deze methode wordt het gedrag van een natuursteen in een bepaald klimaat voorspeld. Niet elke steen neemt dezelfde hoeveelheid vocht op of bereikt dezelfde temperatuur door het verschil in fysische kenmerken. Dit kan leiden tot andere reacties in vorst- en schimmelschade of in andere verweringsfenomenen. Door het KMI zijn verschillende klimaatscenario's opgesteld die van groot belang zijn bij het uitvoeren van hygrothermische simulaties.

2 LITERATUURSTUDIE

2.1 Natuurstenen in België en omstreken

Een klein land als België beschikt over een enorme rijkdom aan diversiteit van natuurstenen. Vroeger, tot ongeveer 1800, werd vooral gebruik gemaakt van lokale, gemakkelijk leverbare stenen wat zich toont in het gebouwenlandschap van België. Op het eerste gezicht is een groot verschil op te merken tussen Vlaanderen en Wallonië. De Vlaamse monumenten worden vooral gekenmerkt door de witstenen, roomkleurige tot geelgroene, zachte kalkrijke stenen van een relatief jonge, Meso-Cenozoicum ouderdom (minder dan 80 miljoen jaar oud). In Wallonië, zeker vanaf de Hene-Samber-Maas as, domineren grijs getinte, harde gesteenten die van een hogere, paleozoïsche ouderdom zijn (meer dan 300 miljoen jaar oud). Witstenen verlichten het gebouw met hun heterogene uitstraling en kwaliteit, terwijl oude gesteenten de indruk geven van solidariteit door hun homogeniteit (Dusar et al., 2009; Dusar & Dreesen, 2009).

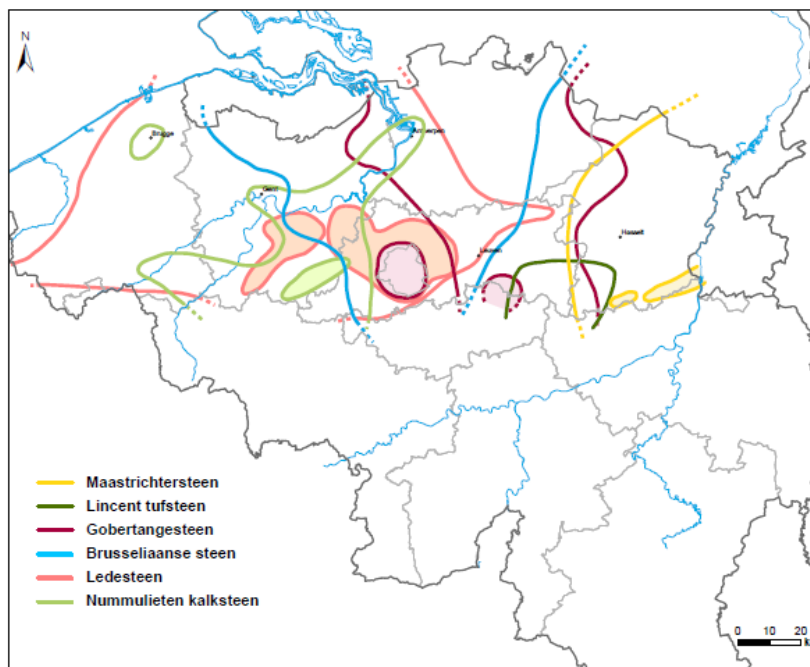
In Wallonië zijn verschillende kalkstenen te vinden in de grond zoals de blauwe stenen (arduin, Maaskalksteen, Doornikse steen) en marmers (zwarte marmer, gekleurde marmers) (Figuur 2.1). Doornikse steen is samen met arduin één van de meest gebruikte en meest bekende blauwe stenen in België. De eerst genoemde steen is een zwartblauwe gelaagde kalksteensoort vanuit de omgeving van Doornik. Deze wordt vaak gebruikt voor de constructie van kerken en kenmerkt de Scheldegotiek door zijn gebruik in de 13^{de} eeuw. Arduin wordt beschouwd als een van de meest doeltreffende bouwmaterialen die enkel in België gewonnen wordt. Verder zijn er ook nog siliciumhoudende stenen zoals kwartsiet, schisteuze zandsteen en dergelijke, aanwezig in Wallonië (Pierres & Marbrers, 2005).



Figuur 2.1: Verspreiding van de verschillende natuurstenen in Wallonië. Op de kaart is te zien: arduin (6), de Maaskalksteen (8 en 9), de Doornikse steen (10), zwarte marmers (11), gekleurde marmers (12) en siliciumhoudende stenen (16, 18, 19, 20, 22 & 23) (Pierres & Marbrers, 2005) .

De witstenen die in Vlaanderen voorkomen, zijn voornamelijk kalk- of zandstenen. Over het algemeen kennen de verschillende witstenen van België een grote verspreiding over Vlaanderen met toch een aantal opmerkelijke leiders. In Figuur 2.2 is op een kaart de spreiding weergegeven van de meest bekende witstenen van België die dienen als bouwsteen in Vlaamse historische monumenten. Het verspreidingsgebied is telkens weergegeven tussen de gekleurde lijnen voor de natuurstenen die in de legende vermeld staan. Van de meest gekende stenen (de Ledesteen, de Gobertangesteen, de Nummulieten kalksteen en de Maasrichtersteen) zijn de kerngebieden ingekleurd (Dusar & Dreesen, 2009).

Het gebruik van deze lokale stenen in historische gebouwen is duidelijk een fenomeen dat tijd- en plaatsgebonden is. Op welke plaats en wanneer een steen gebruikt werd, was afhankelijk van verschillende elementen: de mogelijkheid tot exploitatie en bewerking in een groeve, de transportmogelijkheden vanuit de groeve naar de benodigde plaats, de mogelijkheden tot verwerking, de economische, politieke en sociaal-culturele omstandigheden op dat moment en andere tijdsgebonden omstandigheden (Dusar et al., 2009).



Figuur 2.2: Verspreiding van de belangrijkste historische bouwstenen in Vlaanderen (Dusar & Dreesen, 2009).

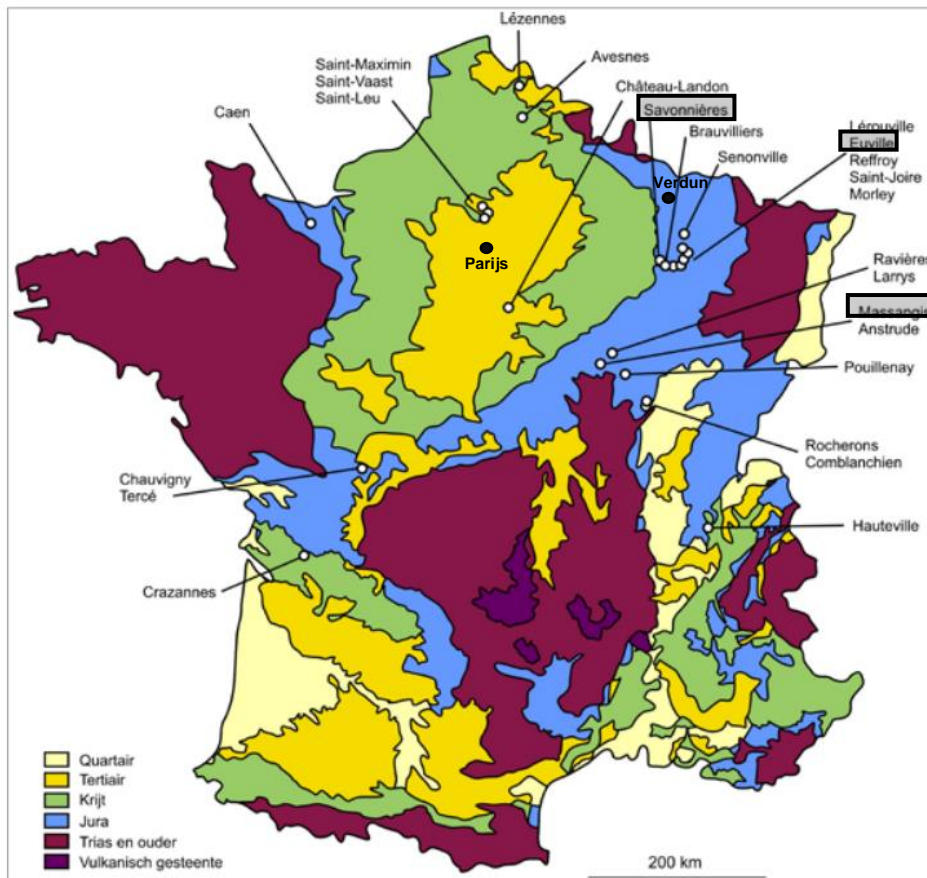
Op een bepaald moment werd het lokaal gebruik van natuurstenen verdreven naar de achtergrond en steeg de import van buitenlandse stenen. Enerzijds lag de oorzaak bij de lokale groeves die kampten met moeilijkheden tijdens de ontginning en bewerking op de groeve of simpelweg het probleem van uitputting van de lagen. Ledesteen, een van de populairste witstenen uit België en afkomstig uit Oost-Vlaanderen, is een voorbeeld van een natuursteen die niet meer ontgonnen wordt op sommige plaatsen omdat deze enkel nog te vinden is onder de watertafel. Door de aanwezigheid in een waterige grond ontkalkt de steen en kan deze niet meer ontgonnen worden. Anderzijds was de toenemende import van

buitenlandse stenen te wijten aan de opkomst van de industriële revolutie in de 19^{de} eeuw. Het verbeterde transportnetwerk en de modernisatie van de industriële revolutie maakte de export naar en import vanuit het buitenland veel gemakkelijker. Deze twee elementen zorgden samen voor een enorme boost om over te schakelen van een lokaal gebruik van natuurstenen tot een internationaal gebruik van natuurstenen (Quist, 2012).

In Vlaanderen waren de witstenen ondertussen zeer kenmerkend geworden voor het culturele erfgoed. Ze gaven Vlaanderen een duidelijke identiteit waardoor het meer dan logisch was dat België in de 19^{de} eeuw op zoek ging naar alternatieven wanneer er sprake was van een te kort aan beschikbare en voldoende goede lokale producten. De nood voor vervanging van witstenen uit Vlaanderen was veel groter dan bij de hardere, oudere natuurstenen uit Wallonië. Ze werden algemeen gekenmerkt door een hogere porositeit en heterogeniteit wat verwerking van de steen sneller toelaat (Dusar et al., 2009).

Een van de grootste leveranciers voor bleke kalkstenen in de 19^{de} en 20^{ste} eeuw was Frankrijk. In die tijd werden architecten vanuit België en Nederland sterk beïnvloed door Parijse grootmeesters in de architectuur en speelde Frankrijk een grote rol in de architectuur in die periode. De Franse witstenen waren van groot belang in de 19^{de} -eeuwse stadsverfraaiing en uitbreiding van Belgische steden. Het sterke aan Frankrijk was dat ze een bevoorradingszekerheid konden bieden en middelharde kalksteen soorten konden leveren in grote formaten. Door de heersende stijlperiodes, gebaseerd op het classicisme in die periode, waren grote blokken nodig om prestigieuze gebouwen op te richten. België kon enkel maar kleine formaten leveren van de lokale stenen waardoor naar alternatieven gezocht werd voor de massale aanwending van natuurstenen. Frankrijk had een breed scala aan diverse soorten witte kalkstenen met verschillende kwaliteiten, wat ruime bewerkingsmogelijkheden bood. De Franse witstenen die in België gebruikt werden zijn hoofdzakelijk afkomstig uit het Juratijdperk. De voornaamste bron hierbij is het Maasbekken ten zuiden van Verdun en ten oosten van het Bekken van Parijs (Figuur 2.3). Er is dan sprake van de witstenen Euville, Savonnières, Massangis enz. Deze drie kalkstenen hebben vanaf de 19^{de} eeuw elk een belangrijke hoofdrol gespeeld in de gebruikte natuursteensoorten van België. Verder zijn er ook een aantal stenen uit het Krijt en het Tertiaire die in beperkte hoeveelheden geleverd werden (Dreesen et al., 2012).

Naast de Franse witstenen waren ook de Luxemburgse en Duitse zandsteensoorten in een opmars als restauratie- en bouwsteen (Quist, 2011). Voor Duitse natuursteen Bentheim was Mechelen een draaischijf in handel door de bouwmeesters Keldermans en voor de Luxemburgse zandsteen zorgde de Belgische firma Montfort voor de exploitatie. De Duitse stenen werden vooral gewaardeerd om hun homogeniteit, goede bewerkbaarheid en grote afmetingen. De Duitse zandsteen Obernkirchener wordt vooral gekenmerkt als een zeer duurzame zandsteen, volledig weervast en oppervlakkig licht verzandend. Tot de dag van vandaag zijn de steengroeves van de Duitse natuurstenen nog steeds actief.



Figuur 2.3: Een geologische kaart van de ontginningsplaatsen in Frankrijk. In de blauwe zone bevinden zich de belangrijkste witstenen als importsteen voor België, afkomstig uit het Juratijdperk (Dreesen et al., 2012).

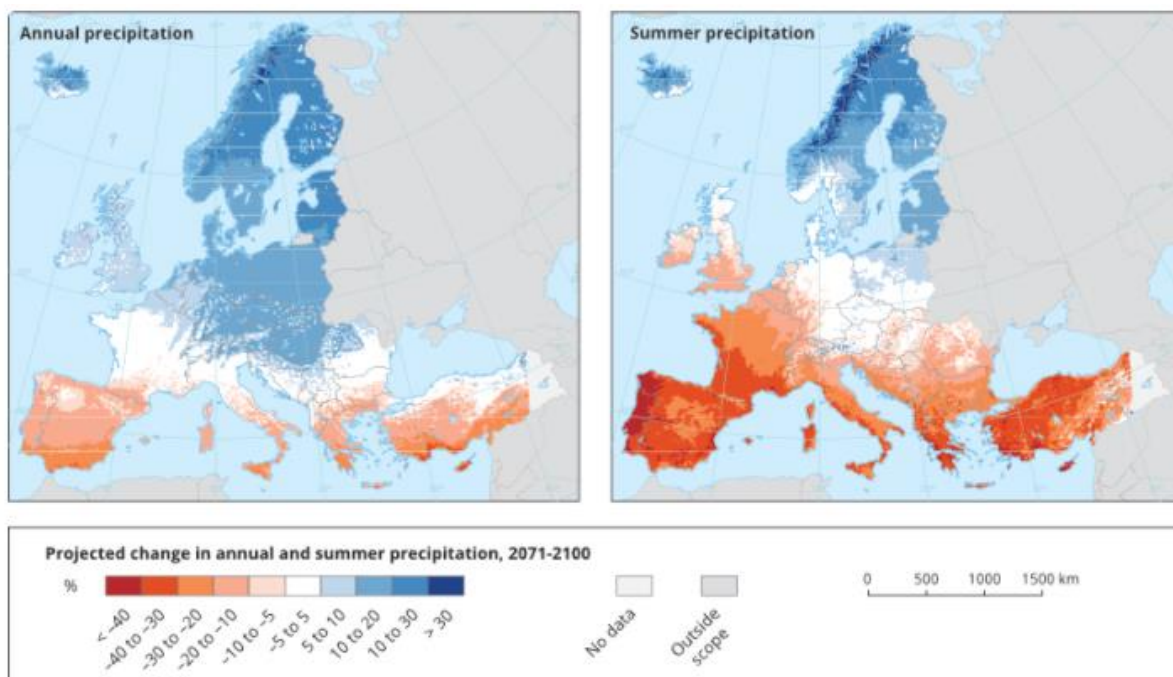
2.2 De klimatologische verandering

De klimatologische veranderingen zijn gekoppeld aan de opwarming van de aarde. De temperatuur gaat stijgen omdat er meer broeikasgassen zoals CO₂ in de lucht komen. Koolstofdioxide en waterdamp komen van nature voor in de atmosfeer en zijn ook noodzakelijk aanwezig voor het broeikaseffect. Dit is het proces dat start bij de zon die het aardoppervlak opwarmt. Het warme oppervlak zal infraroodstraling of langgolvlige stralingen uitzenden die worden geabsorbeerd door de aanwezige broeikasgassen in de atmosfeer. De geabsorbeerde energie wordt vervolgens opnieuw uitgezonden in alle richtingen, waarvan een deel terug naar het aardoppervlak komt. Hierdoor blijft de aarde op een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van 15°C, terwijl de aarde anders een temperatuur zou hebben van -18°C bij een gebrek aan broeikasgassen in de atmosfeer (Wikipedia, 2021a).

Helaas worden er vandaag te veel broeikasgassen geproduceerd. Sinds de 19^{de} eeuw zijn de industriële activiteiten versterkt waardoor te veel koolstofdioxide vrijkomt bij het verbranden

van fossiele brandstoffen. Door de stijging van het aantal broeikasgassen wordt er meer warmte van de aarde geabsorbeerd en ook terug gestuurd naar het aardoppervlak, waardoor het aardoppervlak warmer wordt dan bij een normale concentratie aan broeikasgassen. Dit zorgt voor de opwarming van de aarde (Milieucentraal, n.d.). De stijging van de atmosferische temperaturen gaat gepaard met verschillende geofysische aspecten.

Om te beginnen stelt het IPCC-panel (Intergovernmental Panel on Climate Change) vast dat in de toekomst, Noord-Amerika en Europa steeds vaker getroffen zullen worden door zeer hevige regen. De frequentie van de neerslag zal verhogen en de regenbuien zullen intenser worden. In de meeste Europese regio's zullen we te maken hebben met periodes van zeer zware neerslag wat het risico op overstromingen sterk vergroot. De neerslag in de winter zal als gevolg van de hogere temperaturen vaker in de vorm van regen voorkomen en minder in de vorm van sneeuw, wat het overstromingsgevaar nog zal vergroten. Op Figuur 2.4 is een voorspelling weergegeven van neerslag in de periode 2071-2100 in vergelijking met de periode 1971-2000. Daar valt op te merken dat landen ter hoogte van Zuid-Frankrijk en Noord-Italië weinig verandering zullen ondervinden qua hoeveelheid neerslaghoeveelheid. De zuiderse landen zoals Spanje zullen een grotere droogte kennen terwijl het noorden en het midden van Europa een duidelijke toename in neerslaghoeveelheid kennen (Federale overheidsdienst: Volksgezondheid, 2019; IPCC, 2013).



Figuur 2.4: Voorziene wijzigingen van de jaarlijkse neerslag (links) en van de neerslag in de zomer (rechts) voor de periode van 2071-2100 in vergelijking met de referentieperiode van 1971-2000. De toekomstige klimaatdata geldt voor het RCP8.5-scenario. (Europees Milieu Agentschap, 2019).

Voor België is het jaarlijks gemiddelde aantal neerslagdagen met zware neerslag verdubbeld. De zware neerslag valt hoofdzakelijk in de zomer onder de vorm van zware stortregens die slechts enkele uren duren. Sneeuw zal aanzienlijk minder worden waargenomen in de toekomst. Het KMI (Koninklijk Meteorologisch Instituut) voorspelt voor 2100 dat er in België meer seizoensgebonden neerslag zal zijn. Er zal in de zomer tot 25% minder neerslag vallen en in de winter zal er tot 22% meer neerslag vallen (Federale overheidsdienst: Volksgezondheid, 2019).

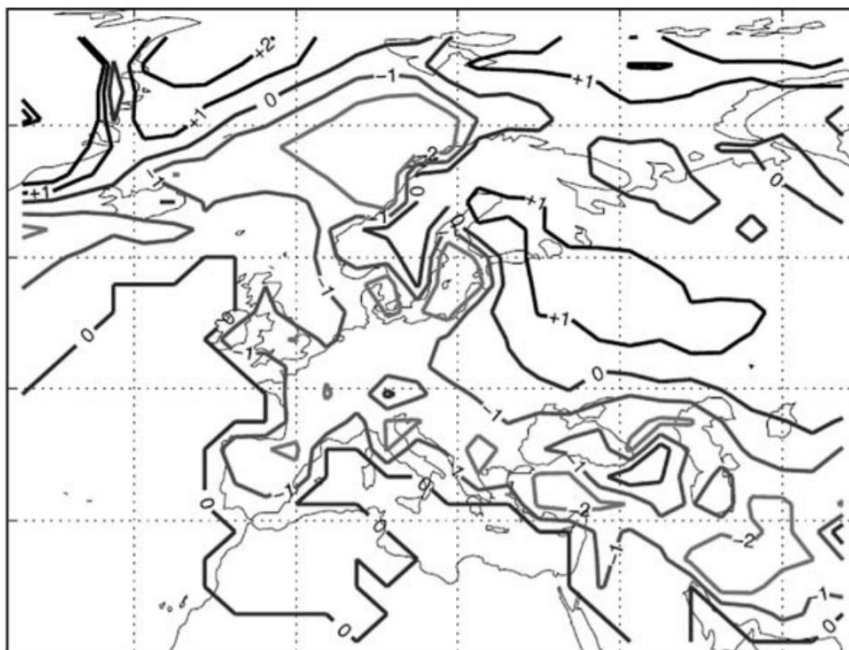
In Vlaanderen zal het aantal regendagen stijgen binnen 100 jaar, maar met een kleinere stijgfactor dan de hoeveelheid regen per jaar (Milieurapport, 2015). Door een stijging van het aantal regendagen en de hoeveelheid regen in de winter kan dit zorgen voor een diepere bevochtiging van gevelmaterialen zoals natuursteen. De meeste schadefenomenen in natuursteen hebben te maken met water. De langere periodes van regen en de verandering in de hoeveelheid en de frequentie van de neerslag zullen de verwerkingprocessen zoals vorst- en dooicycli of het effect van slagregen niet ten goede komen (Mosoarca et al., 2017). Vorst- en dooicycli in een (natuur)steen ontstaan bij een combinatie van een lage temperatuur en een vochtige steen. Als de neerslag in de winter toeneemt, is er meer kans op vorst- en dooicycli bij een lage temperatuur. Het effect van slagregen in stedelijke klimaten zoals Gent wordt beperkt door de aanwezigheid van de omliggende gebouwen die de slagregen deels belemmeren (Vandemeulebroucke et al., 2019). Als een ander gevolg van diepere bevochtiging, kunnen de patronen van de zoutverdeling sterk veranderen. Zout dringt veel dieper door als het bevochtigingsfront dieper is en zou getransporteerd worden door ionendiffusie waar er sprake is van verzadiging van de steen. In de zomer is dan weer sprake van volledige uitdroging waardoor de kristallisatieschade zich wijder zal verspreiden (Gomez-Heras & McCabe, 2015).

De zware regenvallen zijn niet het enige weerfenomeen dat extremer wordt. Algemeen is er een verandering van frequentie, intensiteit, gevoeligheid van extreme weereffecten zoals droogte, vuren, hevige regen, overstromingen, hagelbuien, sneeuw etc. (Mosoarca et al., 2017; UNESCO, 2007). Hevige lokale winden zullen ook frequenter voorkomen. Deze extreme weeromstandigheden zullen aanleiding geven tot een stijging in degradatie van de natuurstenen bouwmaterialen en van het falen van de historische gebouwen. Het zal vooral een effect geven op de esthetische aspecten van de oppervlaktes en de structurele integriteit. Zo bevorderen de warme lucht uit de Middellandse Zee en de vochtige luchtmassa's uit de Atlantische Oceaan de val van hagelstenen. Deze kunnen grote schade aanrichten aan historische gebouwen zoals de architectonische decoraties, de gevels, de dakbedekkingen enz. (Mosoarca et al., 2017).

Ook zal de klimaatsverandering zorgen voor een stijgende temperatuur met als gevolg dat de kans toeneemt op het voorkomen van veel extremere fenomenen zoals hittegolven, bosbranden en droogte. (UNESCO, 2007). Boven het Europese landoppervlak is een grotere stijging in temperatuur gekend dan het gemiddelde over de hele wereld (Vlaamse Overheid -

Departement Omgeving, 2020b). In Europa zal het zuiden en het centrale deel van Europa alsmaar meer hittegolven, bosbranden en droogte meemaken. De gebieden rond de Middellandse Zee worden droger en kwetsbaarder voor nog meer droogte en bosbranden (Europese Unie, n.d.). In de zomer zullen er langer durende periodes zijn van hoge temperaturen, ook wel gezien als hittegolven. Europa werd sinds 1950 geconfronteerd met 14 jaren aan extreme (intense en langdurende) hittegolven, waarvan de meeste zich voordoen na 2000 (Vlaamse Overheid - Departement Omgeving, 2020a).

Een warmer wordend Europa heeft als gevolg dat er in een groot deel van Europa een algemene daling is in vorst- en dooicycli, maar de zone die gevoelig is voor vorst zal stijgen in vorst- en dooicycli. De vorstgevoelige zone zal nu meer fluctuaties tonen rond de kritische temperatuur in plaats van één continue cycli te hebben onder de vriestemperatuur. Figuur 2.5 toont een kaart van Europa gemaakt door Grossi et al. (2007) waarin een overzicht wordt gegeven van hoe de vorst- en dooicycli over Europa veranderen. De lijnen met het getal 0 staan voor geen verandering in het aantal vorst- en dooicycli terwijl de positieve getallen een stijging in het aantal cycli en de negatieve getallen een daling in het aantal cycli weergeven. Door de stijging van de temperaturen heeft België te maken met minder vorst- en dooicycli, zoals een groot deel van Europa (Grossi et al., 2007). Als opmerking zijn de vorst- en dooicycli van (Grossi et al. (2007) gebaseerd op een dagelijks gemiddelde luchttemperatuur over Europa. Kritische vorst- en dooicycli besproken in deze thesis zullen handelen over vorst- en dooicycli gebaseerd op een vochtsaturatiegehalte van poreuze materialen en gemeten via hygrothermische simulaties.



Figuur 2.5: Kaart van Europa met vorst- en dooicyclilijnen (Grossi et al., 2007).

Door de stijging van de temperaturen zullen in België minder vorst- en dooicycli ontstaan. Deze opwarming zorgt er voor dat de minimumtemperaturen zullen stijgen en dus voor een langere periode boven het vriespunt blijven. Meer nog, in een stedelijk hitte-eiland zullen de effecten nog meer vermeederen (Vandemeulebroucke et al., 2019). Zo zou door de 3D geometrie van de gebouwen in de straat een verhoogde absorptie plaatsvinden van de inkomende zonnestraling en een groter behoud van de uitgaande infraroodstraling. Samen met de thermische eigenschappen van de materialen in een stadsomgeving en de dalende vochthoeveelheid wordt de zonne-energie minder omgezet naar latente warmte. Dit verklaart de hogere temperaturen in de stad (Bohnenstengel et al., 2014). Het temperatuurverschil met het scenario zonder het effect van het stedelijk hitte-eiland is vooral opmerkelijk na zonsondergang en minder overdag. Het effect van het stedelijk hitte-eiland heeft een primair verband met de afkoeling van de stad tijdens de nacht en minder met de hogere verwarmingsgraad gedurende de dag. In de nacht zullen de temperaturen minder kunnen dalen waardoor het verschil meer op te merken valt (Arnfield, 2003; Oke, 1982).

Verder heeft de klimaatsverandering een grote invloed op de zeespiegel en het grondwater (UNESCO, 2007). In Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge is een stijging van het zeewaterniveau gemeten van 11cm (Federale overheidsdienst: Volksgezondheid, 2021). Als gevolg van de stijging van het zeewater zullen overstromingen en erosie in de kustgebieden en laaglanden ontstaan. Het grondwater daarentegen kent een verandering in niveau en compositie door de opwarming van de aarde. (Viles, 2002). Materialen die in contact komen met de grond kunnen hierdoor grote gevolgen kennen. Vooral historische gebouwen hebben een grotere intimiteit met de grond dan moderne. Door het gebruik van meer poreuze materialen in historische gebouwen nemen ze meer water op in hun structuur, wat opnieuw afgegeven wordt aan de omgeving d.m.v. oppervlakte verdamping. Deze stijging van het grondwater kan zo leiden tot een grotere zoutmobilisatie en een consequente kristallisatie op de decoratieve elementen door droging. (UNESCO, 2007).

Tot slot is het laatste effect van klimaatsverandering dat aangehaald wordt de zure regen. Verzuring ontstaat door de verontreinigende stoffen, zoals zwaveldioxide, ammoniak en stikstofdioxide, aanwezig in onze atmosfeer waarvan het concentratieniveau voortdurend toeneemt. Deze gassen komen vrij door de industrie, elektriciteitscentrales, het wegverkeer en de landbouw. Ze dragen bij tot de verzuring door hun goede oplosbaarheid in water, wat zich uit in zure regen. Dit zorgt niet alleen voor een negatief effect op de vegetatie maar zorgt ook voor aantasting van historische monumenten door onder andere het vormen van gipskorsten (De Kock et al., 2017; Tiano, 2001).

2.3 Belangrijkste verwerking van natuursteen (in België)

Het verval van blootgestelde monumentale stenen is een complex proces waarbij de steen veranderingen ondergaat door de inwerking van zijn omgeving. (Slinger et al., 1982; Tiano, 2001). Verwerking is afhankelijk van intrinsieke factoren (samenstellende mineralen, cementatie, porositeit...) en extrinsieke factoren (water, temperatuurschommelingen, atmosfeer...), wat kan leiden tot een falen van de natuursteen als bouwsteen (Camerman, 1957). Duurzaamheid van een steen is dan ook duidelijk afhankelijk van het klimaat. Een lokale steen die perfect onbeschadigd blijft voor een aantal jaren is daarom niet even duurzaam in een ander klimaat. Zelfs kleine veranderingen in het klimaat kunnen een grote invloed hebben op de verwerking. België heeft ook natuurstenen, afkomstig uit het buitenland, gebruikt in historische gebouwen omdat de stenen in een ander klimaat minder last hadden van verwerking. Helaas had dit niet altijd het gehoopte effect op de Belgische historische gebouwen (Slinger et al., 1982; Tiano, 2001).

In dit onderdeel worden de algemene verweringsprocessen van natuursteen besproken. Belangrijke duurzaamheidsoverwegingen hebben te maken met fysische, chemische en biologische mechanismen. Afhankelijk van het type natuursteen zullen sommige verwerkingstypes extremer voorkomen dan andere. Ieder type heeft verschillende eigenschappen (met betrekking tot de porositeit, de permeabiliteit, de mineralogische samenstelling, de aard en graad van cementering en de fysische eigenschappen). De belangrijkste schadefenomenen worden gekarakteriseerd in de manier waarop ze voorkomen en kennen de volgende opdeling: oppervlakteverwerking, desintegratie, scheuren en biologische groei (Slinger et al., 1982; Tiano, 2001).

Bij oppervlakteverwerking is de schade aan de natuursteen op te merken met het blote oog. Het meest opvallende voorbeeld van oppervlakteverwerking is kleurverandering. De kleur van de natuursteen verandert door een schadelijk proces bv. door waterindringing. Door de aanwezigheid van vochtplekken in de natuurstenen wand verandert de intensiteit van de kleur of de kleur van het materiaal zelf.

Een ander voorbeeld van kleurverandering in een natuursteen kan ontstaan door depositie van materialen op het oppervlak. Er zijn 2 soorten deposities: de exogene (zoals vuilafzetting) en endogene depositie (zoals zoutuitbloeiing). Zout is oorspronkelijk in het materiaal aanwezig of daarin getransporteerd (Monumenten kennis, 2015) en richt vooral veel schade aan bij poreuze materialen (Siegesmund et al., 2002).

Een laatste fenomeen die kleurverandering teweegbrengt, is het ontstaan van een chemisch proces aan het oppervlak van de natuursteen. Het bekendste voorbeeld van een chemisch omgezette oppervlaktelaag is de patinalaag. Dit is een dunne, compacte laag die goed aan het onderliggende materiaal hecht. Op sommige kalkstenen zoals de kalkzandsteen Bentheim

of de kalksteen Ledesteen (Figuur 2.6) is er sprake van een mengvorm in de omzetting naar een patinalaag (Monumentenkennis, 2015). Er ontstaat hierdoor een donkere, roodkleurige verwerking door de aanwezigheid van ijzertrioxide uit het materiaal zelf. Dit kan voorkomen bij bijvoorbeeld Mergel, Ledesteen en Bentheim (Slinger et al., 1982). Een ander belangrijk voorbeeld, dat zijn oorsprong vindt bij de luchtverontreiniging, is het plaatselijk creëren van een gipskorst (Monumentenkennis, 2015). Ze zijn het hoofdproduct van de interactie tussen de atmosferische zwavel en de calcium bevattende materialen (Gomez-Heras & McCabe, 2015). Dit fenomeen komt hierdoor vaak voor op kalkstenen (Ledesteen, Savonnières...) waarbij de kalk wordt omgezet tot gips en een zwarte verkleuring krijgt door het invangen van roetdeeltjes uit de lucht (Monumentenkennis, 2015). Een voorbeeld hiervan is te zien op Figuur 2.6. Volgens Dreesen & Duser (2004) zijn de Belgische Gobertangesteen en Balegemse steen meer gevoelig voor de vorming van gipskorsten dan hun Noord-Franse vervangstenen (behalve voor Euville en Lérouville) in een vervuilende omgeving (Dreesen & Duser, 2004). De zwarte korsten hebben de neiging om los te komen van het oppervlak waardoor een onderliggend oppervlak wordt blootgesteld aan de vervuiling (Gomez-Heras & McCabe, 2015). In de experimenten van Gómez-Heras et al., (2008) wordt aangetoond dat de vermindering van de hoeveelheid fijn stof in de lucht de vorming van gips kan verminderen en de oplossing van het fijn stof kan verbeteren.



Figuur 2.6: Vorming van gipskorst op Ledesteen (links) en vorming van een patinalaag op Ledesteen (rechts) (Monumentenkennis, 2015).

De categorie desintegratie laat de integriteit van het materiaal verloren gaan. Dit fenomeen kan in een materiaal plaatsvinden of tussen 2 materialen. Enkele voorbeelden hiervan zijn het afschilferen van verschillende lagen van de natuursteen, verkrumelen, verzanden, verpoederen, erosie...

Het afschilferen is het loskomen van een relatief dun schubachtig deel van een materiaal. Het heeft maar betrekking op een kleiner deel van het oppervlak van de steen. Het verkrumelen, verzanden en verpoederen zijn gevolgen van cohesieverlies tussen de deeltjes van het

materiaal. Verzanden is een typisch voorbeeld voor zandstenen, terwijl verpoederen het meest voorkomt bij kalkstenen.

Bij erosie vertoont het beschadigde materiaal een combinatie van reliëfs, gaten, geulen en dergelijke. Hierbij komen deeltjes van het oppervlak los en worden ze eventueel afgevoerd (Monumenten kennis, 2015). Als een gevolg van zoutophoping in een steen kan er ook putcorrosie aan het oppervlak ontstaan dat gepaard gaat met materiaal verlies (Gomez-Heras & McCabe, 2015).

De volgende categorie heeft betrekking op scheuren. Scheuren kunnen fijn optreden en op het oppervlak van het materiaal beperkt aanwezig zijn of kunnen juist breed zijn en het materiaal dieper aantasten (Monumenten kennis, 2015). Er wordt een onderscheid gemaakt in de scheuren gebaseerd op de breedte van de scheur, de vorm en hoeveelheid van het aantal scheuren. Een veel voorkomende oorzaak van scheuren is de groei van kristallen in de poriënstructuur door vorst- en dooiprocessen (Berghmans, 2013). Vorstschade zal men vooral opmerken bij poreuze materialen verzadigd van water, nl materialen met een porositeit van meer dan 5% (Grossi et al., 2007). Voor het vormen van ijs in natuursteen zijn 3 noodzakelijke voorwaarden van toepassing: vriestemperaturen, natuurstenen die vorstgevoelig zijn en de aanwezigheid van voldoende vocht in de poriën (Berghmans, 2013). Aangezien natuurstenen hydrofiel zijn is het een goede zaak voor de duurzaamheid wanneer de poriënstructuur moeilijk water(damp) opneemt en/of makkelijk water(damp) afstaat. Of een steen vorstgevoelig is, wordt bepaald door verschillende eigenschappen van de steen. De grootte, vorm en onderlinge verbinding van de poriën bepalen de verdeling van het vocht in de steen en bij welke temperatuur deze kristalliseert. Niet in elke soort porie bevriest het water even snel. Het fenomeen vriespuntsdaling, ook wel 'freezing point depression' genoemd, verklaart dat het water in grote poriën zal bevriezen bij ongeveer nul graden, terwijl kleine poriën een lagere temperatuur nodig hebben om ijs te vormen. De poriënstructuur is een belangrijke parameter bij het bepalen van hoeveel water er in de steen zal bevriezen bij een zekere temperatuur. Voorbeelden van zeer vorstgevoelige natuurstenen zijn Massangis Roche Claire en Noyant Fine (twee witstenen uit Frankrijk). Om voldoende vocht in de poriën aanwezig te hebben, moet de natuursteen vocht opnemen. Dit kan gebeuren op verschillende manieren. Indien de buitenlucht vochtig genoeg is, kan er waterdamp opgenomen worden door het hygroscopisch gedrag van de natuursteen waarbij waterdampmoleculen vervolgens neerslaan op de poriënwanden. Opname van water in een vloeibare fase gebeurt door de capillaire aanzuiging in de fijne poriën. Naarmate de diameter van de poriën kleiner wordt en/of de contacthoek tussen het water en de poriënwand groter wordt, daalt de snelheid van de wateropname van de steen (Berghmans, 2013).

Of de steen bestand is tegen uitzetting veroorzaakt door het bevriezen van water of door zoutkristallisatie, wordt bepaald door de treksterkte van de steen. Als deze voldoende groot is kan weerstand geboden worden tegen de uitzettende krachten. Indien de spanningen die op de poriënwanden worden uitgeoefend groter zijn dan de treksterkte van de steen, zullen scheuren optreden ten gevolge van vorst of aanwezigheid van zout (Berghmans, 2013). Aan

de buitenkant van de steen is minder tegendruk aanwezig in het materiaal waardoor het destructieve effect van het bevriezen van water op die plaatsen als eerste zichtbaar is. Dit kan zich uiten in afschilferen of afbarsten van deeltjes van de steen (Dusar et al., 2009). Ondanks een voldoende grote treksterkte en gunstige poriënstructuur kan een steen toch vorstschade vertonen. Dit kan een gevolg zijn van de aanwezigheid van zwaktezones. Dit zijn elementen of structuren die voor een mechanische of lithologische heterogeniteit in het gesteente zorgen zoals afzettingsstructuren, fossielen, breuken... Als er een nieuwe vorstperiode aanbreekt nadat er al scheuren zijn ontstaan door een eerdere vorstperiode, groeien de ijskristallen in de al gemaakte breuken. Doordat deze scheuren vaak zeer smal zijn, kan tijdens de dooiperiode vocht worden vastgehouden als gevolg van capillaire druk. Hierdoor ontstaan er telkens grotere breuken, ook wel breukpropagatie genoemd (Berghmans, 2013).

Vorstschade is een cyclisch fenomeen, wat gezien kan worden als een soort vermoeiingschade. Telkens opnieuw zal het aanwezige water bevriezen, uitzetten en de steen schade toebrengen. Door de herhaaldelijke blootstelling aan vriestemperaturen ontstaan er microscheuren in het materiaal. Deze microscheuren nemen op hun beurt meer water op en zal het water op die plekken opnieuw bevriezen. Doordat deze plaatsen mee bevriezen, zal de schade in de scheuren nog groter worden. Het is voornamelijk het cyclische gedrag van de vorstperioden die schadelijk zijn voor de bouwsteen (Saskia De Mol, 2016).

De laatste categorie is de biologische groei op natuurstenen (Monumentenkennis, 2015). De groei toont aan dat er voldoende vochtige condities aanwezig zijn in de steen, want zonder het vocht kunnen de organismen niet ontstaan. De ontwikkeling van organismen in steenachtig materialen hangt af van de oppervlakteruwheid, het vochtgehalte, de chemische samenstelling van de buitenste lagen en de structuur en textuur van de steen (Tiano, 2001). Het biologische agens dat zich op de steen ontwikkelt, wordt beïnvloed door het type gesteente (bv een alkalische kalksteen of een zure zandsteen), de toestand van het oppervlak, de omgevingslocatie en het klimaat waaraan de steen wordt blootgesteld. Poreuze stenen zijn natuurstenen die makkelijk en lang vocht en door wind getransporteerd stof kunnen opvangen, wat hen gevoeliger maakt voor het ontstaan van biologische groei (Dusar et al., 2009). De groei en de zwelling van sommige vegetatieve structuren zoals wortels en dergelijke veroorzaken fysieke spanningen en mechanische onderbrekingen (Tiano, 2001). Op Figuur 2.7 **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** is een voorbeeld weergegeven van biologische groei op een natuursteen.

Veel soorten verwerking zijn afhankelijk van vocht (water of water onder de vorm van waterdamp). Een belangrijke factor die de hoeveelheid vocht in een muur kan beïnvloeden, is 'wind-driven rain' of door de wind aangedreven regen. Slagregen is regen die door de wind een horizontale snelheidscomponent krijgt en daardoor schuin op het oppervlak valt. Het effect van de slagregen is vooral gerelateerd aan de blootstelling, de lokale topografie, de stadskenmerken, de windsnelheid en de regenintensiteit. De meeste slagregen valt vanuit het

zuidwesten waardoor dit de meest kritische windrichting is voor historische oppervlakken van een gebouw (Mosoarca et al., 2017)



Figuur 2.7: Algen op kalkzandsteen Bentheim (Monumentenkenntnis, 2015)

2.4 Invloed van na-isolatie

De samenleving zet tegenwoordig sterk in op de vermindering van de broeikasgassen. Dit heeft geleid tot verschillende Europese richtlijnen voor gebouwen in het kader van energieprestatie. Zo wil men tegen 2050 een lage of een netto nul-uitstoot van koolstofdioxide voor alle gebouwen waardoor renovatiestrategieën afgedwongen worden (Johansson, 2020). Dertig procent van de Europese gebouwvoorraad bestaat immers uit historische gebouwen. In de Europese Unie zijn ze goed voor meer dan een derde van het totale energieverbruik van gebouwen. Dit toont het belang aan om de energie-efficiëntie van historische gebouwen te verbeteren. Door het plaatsen van na-isolatie is het mogelijk om het energieverbruik van historische gebouwen met zo'n 15 tot 20 procent te verminderen (Akkurt et al., 2020).

Veel uitdagingen zijn verbonden aan deze genoemde Europese richtlijnen, vooral bij cultureel erfgoed en monumenten. Het conflict tussen erfgoedwaarden in gebouwen en energie-efficiëntie is een frequent probleem (Johansson, 2020). Ter illustratie hebben historische gebouwen vaak niet-geïsoleerde muren die een hoge U-waarde bezitten. Om een lager energieverbruik te realiseren, wil men historische gebouwen bij hun renovatie en hun eventuele herbestemming isoleren. Vaak gebeurt dit aan de binnenzijde omwille van de culturele waarde van gevel. Als direct gevolg hiervan zal de binnenoppervlakte van de buitenmuur een hogere temperatuur krijgen, terwijl de volledige originele muur een lagere temperatuur zal ondervinden. Dit brengt echter problemen met zich mee voor de levensduur van de bouwcomponenten.

Muren kunnen zowel aan de binnen- als buitenzijde geïsoleerd worden. Met het oog op de vochtprestaties is externe isolatie een betere optie omdat de temperatuur in de constructie dan stijgt. Helaas is externe isolatie bij monumenten of cultureel erfgoed niet mogelijk door de hoge culturele waarde van de karakterbepalende elementen zoals de uitdrukking van de gevel, het volume van het gebouw, de decoratie van de gevel, ramen en kozijnen (Johansson, 2020).

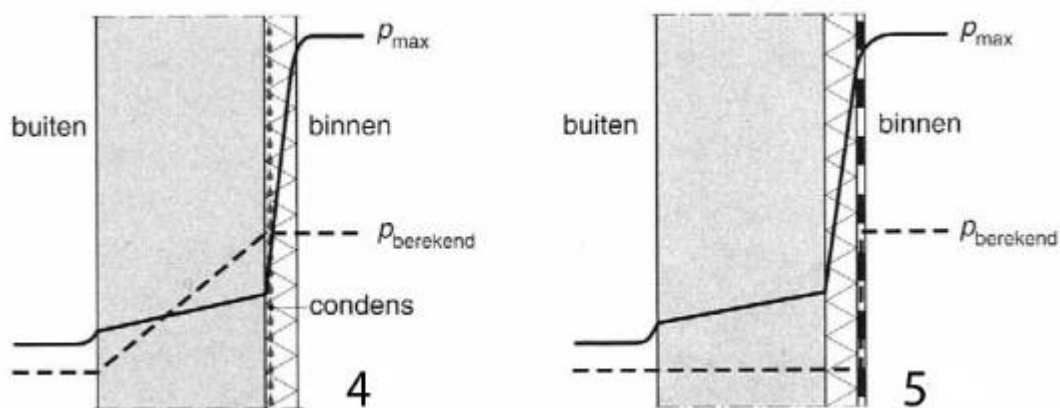
Na-isolatie langs de binnenzijde in historische gebouwen zullen de hygrothermische effecten op de natuursteen benadelen. De warmteweerstand mag dan wel verbeteren, de muren zullen te maken krijgen met een hogere vochtigheid en meer vries-en dooicycli (Johansson, 2020). De oorzaak van een hogere vochtigheid is te vinden in de belemmering van het uitdrogen van de muur. Bij regenval wordt ongeveer 70% van de hoeveelheid water opgenomen via capillaire aanzuiging in de muur. Slagregen heeft nog een extra negatieve invloed op dit fenomeen. De zuidwestelijke oriëntatie van een gebouw is het meest onderhevig aan de slagregen. Hoe poreuzer het materiaal, hoe meer water het kan bevatten (Bjarløv et al., 2015). Het plaatsen van na-isolatie aan de binnenzijde zal de temperatuur in de originele muur sterk doen dalen. Zonder isolatie geniet de muur nog mee van de warme binnentemperatuur, maar door de plaatsing van na-isolatie wordt de warmte van de binnenruimte weggehouden van de oorspronkelijk muur. Buitenmuren zullen dus bij het plaatsen van binnenisolatie algemeen langer nat en koud blijven doorheen het gehele jaar.

Bij het langdurig vochtig zijn van de muur doen zich verschillende problemen voor. Om te beginnen zal de originele muur aangetast worden door het vormen van meer vries- en dooicycli. (Pickles et al., 2012). Verder kan vochtverspreiding in een muur, bestaande uit poreus materiaal, leiden tot zoutvorming afgezet op de muuroppervlakken (Johansson, 2020). Bovendien zijn veel van deze zouten hygroscopisch, m.a.w. ze hebben een affiniteit met water en onttrekken vocht uit de lucht wat de problemen van een overdaad aan vocht in de muur verergert (Pickles et al., 2012). Een ander gevolg van te veel vocht in de muur is de beweging van teer en andere chemicaliën door de muur waardoor er vlekken op het oppervlak ontstaan (Pickles et al., 2012). Tot slot kan het aanbrengen van binnenisolatie zorgen dat de koudebruggen slechter worden waardoor er condensatie gecreëerd wordt binnenshuis. De oppervlaktecondensatie kan leiden tot vlekken en schimmelgroei als een esthetisch probleem en eventueel als gezondheidsprobleem voor de bewoners. De koudebruggen ontstaan doordat de binnenisolatie onderbroken wordt door vloeren en andere constructiedetails (Johansson, 2020).

Een oplossing voor een te hoge vochtigheid kan zijn om het buitenoppervlak hydrofoob te maken door middel van waterafstotende oppervlaktebehandelingen. Deze behandeling moet dampopen zijn zodat de vochtverspreiding van binnenuit niet in de muur wordt opgesloten. Echter moet wel aangegeven worden dat hier verstandig mee moet omgegaan worden. Het hydrofoberend middel heeft moeite met het overbruggen van scheuren en kan een omgekeerd effect geven indien de gevelmaterialen of voegen te veel beschadigd zijn. Indien het laatst

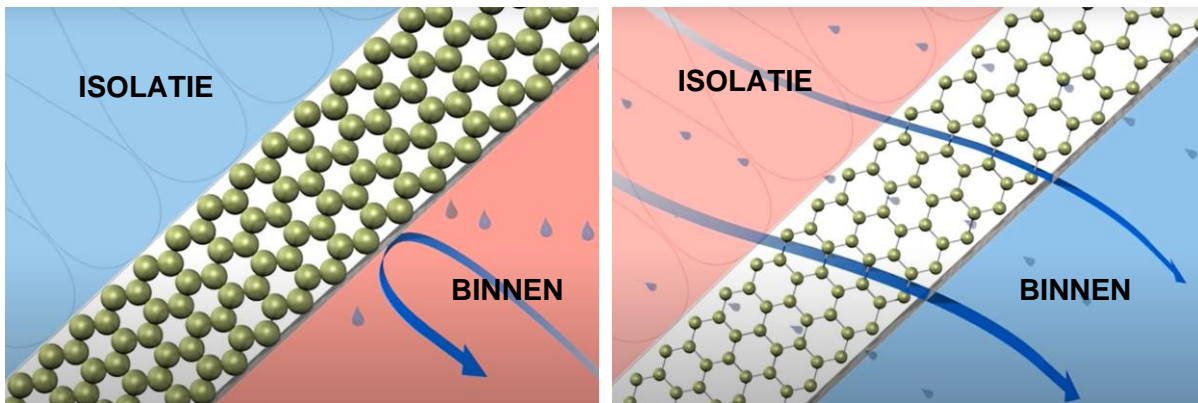
genoemde van toepassing is, kan de hydrofoberende laag net een lokale verhoging van het vochtgehalte teweegbrengen (Johansson, 2020).

Belangrijk is dat het materiaal waarmee geïsoleerd wordt dampopen is. Daarnaast is het ook aangeraden om een dampopen folie te voorzien om tussenliggende condensatie te vermijden. Als er enkel gewerkt wordt met een dampopen isolatie en geen dampscherm of een dampdicht dampscherm, dan ontstaat er kans dat condensatie wordt gevormd op de plaats tussen de isolatie en de gevel (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Dit wordt veroorzaakt door de waterdamp die zich door de isolatie kan verplaatsen. Op een bepaald moment raakt het de koude muur en vormt de waterdamp condensatie op die plaats. Als we dan een dampopen folie voorzien aan de binnenzijde van de muur, wordt tussenliggende condensatie voorkomen (van der Linden & van den Ham, 2015).



Figuur 2.8: Een muur zonder dampscherm waar condensatie zich vormt tussen de gevel en de isolatie (links) en een muur met een dampscherm aan de binnenzijde die condensatie voorkomt (rechts)(van der Linden & van den Ham, 2015).

Om nog beter resultaat te bekomen, kan gewerkt worden met een dampopen folie dat zich aanpast aan de relatieve vochtigheid van een ruimte. Dit wordt ook wel een intelligent of een vochtvariabele damprem genoemd. Deze luchtdichting wordt aan de binnenkant van de isolatie geplaatst. Afhankelijk van de relatieve vochtigheid in de directe omgeving zal het materiaal zich anders gedragen. In de winter heerst een lagere relatieve vochtigheid dan in de zomer. In de periode van de winter zal het zich gedragen als een dampdicht dampscherm, terwijl het in de zomer als een dampopen folie zal werken (Figuur 2.9). Op deze manier heeft het vocht een vrije doorgang om de constructie te verlaten waardoor de kans op inwendige condensatie of vochtaccumulatie sterk verminderd wordt. Op deze manier kan het vocht de constructie niet in, maar wel uit. Om een goede werking te garanderen, moet het dampscherm aan de warme zijde van de isolatie geplaatst worden. Dit kan enkel gebruikt worden bij constructies die aan de buitenkant dampopen zijn en waarbij vezelvormige, dampopen isolatie gebruikt wordt zoals glas- of houtvezelisolatie (Isoproc, 2013; Mahieu et al., 2012).



Figuur 2.9: Een illustratie van hoe het intelligent damprem zich gedraagt in de winter (links) en in de zomer (recht). De rode kleur stelt de warme ruimte of materiaal voor en de blauwe kleur voor een koude ruimte of materiaal. (Isoproc, 2013).

2.5 Hygrothermische simulaties op natuursteen

Met het oog op het renoveren van gebouwen met een erfgoedwaarde, is er een toenemende vraag naar rekenmethoden om het warmte-, lucht- en vochtgedrag op lange termijn te beoordelen en te voorspellen in de toekomst. Deze parameters hebben een belangrijke invloed op de prestaties en levensduur van de bouwcomponenten. De voorspellingen van hygrothermisch gedrag zijn een vereiste geworden voor een schadevrij en duurzaam ontwerp. Deze hygrothermische voorspellingen kunnen gedaan worden met HAM (Heat, Air and Moisture)-simulaties (Künzel & Karagiozis, 2010).

Gebouwen zijn onderworpen aan dynamische externe en interne milieubelasting. Sommige drempels m.b.t. temperatuur en vochtigheidsomstandigheden mogen niet overschreden worden in bouwconstructies. Tegenwoordig is vochtbeheersing een wereldwijd probleem geworden door de verandering van bouwactiviteiten. De nood om energie te besparen zorgt voor beter geïsoleerde en luchtdichtere constructies, die een stuk gevoeliger zijn voor vochtproblemen dan de slecht geïsoleerde, niet luchtdichte constructies (Künzel & Karagiozis, 2010).

Bij het voorspellen van het warmte-, lucht- en vochtgedrag in een muur zijn enkele belangrijke karakteristieken van het materiaal onmisbaar: de massadichtheid (kg/m^3), de soortelijke warmte (J/kgK), de thermische conductiviteit (W/mK), de porositeit (m^3/m^3), de maximale waterhoeveelheid (W_{max}), de vochtopslag (kg/m^3) en dampdoorlatendheid ($\text{kg/m}^2\text{sPa}$) (Künzel & Karagiozis, 2010). Vaak vertonen historische gebouwen ook heel andere kenmerken in vergelijking met nieuwe gebouwen, wat resulteert in een complex hygrothermisch gedrag. Daarom worden simulatietools gebruikt voor 3 verschillende doeleinden. Als eerste om de verschillende afbraakrisico's voor materialen, bepaald door de specifieke omgevingsfactoren zoals temperatuur, relatieve vochtigheid enz. te analyseren.

Daarnaast worden simulatietools gebruikt om condensatie op het oppervlak te verifiëren. Als laatste kunnen simulaties ook dienen om verschillende scenario's van energie-efficiëntie van een gebouw te beoordelen (Akkurt et al., 2020).

De inschattingen en voorspellingen die gemaakt worden via de simulatietools zijn de dag van vandaag niet 100% accuraat. Het virtueel modelleren van historische gebouwen is hetzelfde als het modelleren van nieuwe gebouwen. Echter door de grote complexiteit van historische gebouwen worden vaak verschillende vereenvoudigingen doorgevoerd waardoor het virtuele model niet meer identiek is aan het model in realiteit. Ook al zijn de voorspellingen die gemaakt worden door simulaties niet 100% correct, toch kan er een goede indicatie gegeven worden over hoe het gedrag van de muur zal veranderen in een bepaalde omgeving. Via de simulaties kan een goed zicht gegeven worden op het gedrag van de materialen op zich (Akkurt et al., 2020).

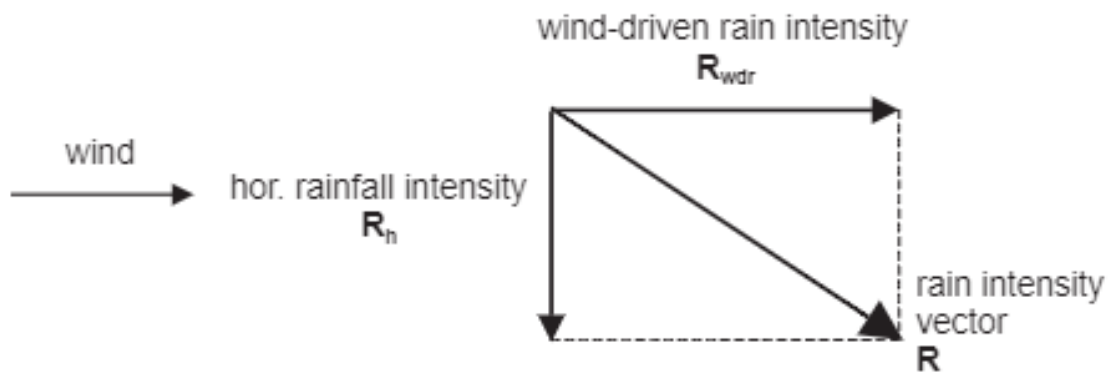
Om vochtgerelateerde schade te veroorzaken in een natuursteen moeten enkele zaken verplicht aanwezig zijn. Als eerste moet er een vochtbron zijn. Dit kan water zijn als gevolg van neerslag (vooral slagregen), smeltende sneeuw, waterdamp als gevolg van condensatie op koude oppervlakten, water aanwezig in bouwmaterialen en nog andere. Vervolgens moet er een pad aanwezig zijn waarop de vochtmigratie zich kan voortplanten en een drijvende kracht, die de vochtmigratie kan veroorzaken. Verder moeten de materialen zelf gevoelig zijn voor vochtschade. Als laatste is het van groot belang dat de vocht- en temperaturomstandigheden in het materiaal gedurende voldoende lange tijd gunstig zijn voor de vochtgerelateerde schade (J. Straube & Schumacher, 2007).

In gebouwen is het van groot belang om een evenwicht te hebben tussen bevochtiging en uitdroging. Als het evenwicht aanwezig is zal het totale vochtgehalte in de muur zich niet ophopen en zal de kritische waarde niet overschreden worden. Een vochtophoping gebeurt vaak in de poriën van het materiaal en kan een bron zijn van vochtschade (J. Straube & Schumacher, 2007).

2.5.1 Slagregenbelasting

Een belangrijke bron van vocht is de met wind aangedreven neerslag of slagregen die een grote invloed heeft op het hygrothermisch gedrag en de duurzaamheid van de steen. Dit fenomeen is regen die door de wind een horizontale snelheidscomponent krijgt (Blocken & Carmeliet, 2004). Door het gezamenlijke optreden van de twee elementen, wind en regen, wordt een schuine regenintensiteitsvector veroorzaakt (Figuur 2.10). De horizontale vector is de component die de regenstroom door een verticaal vlak teweegbrengt. De regenstroom

door een horizontaal vlak wordt weergegeven door de andere vector, de regenintensiteit genoemd. (Blocken & Carmeliet, 2004).



Figuur 2.10: Illustratie over het ontstaan van slagregen (Blocken & Carmeliet, 2004).

2.5.2 Vorstschade

Gevels van gebouwen worden belast met verschillende weeromstandigheden die afhankelijk zijn van verschillende klimaten. Het vocht kan diverse schadefenomenen in een gebouw doen ontstaan, waarvan vorstschade hier besproken wordt. Bij natuursteen is een belangrijke factor naast vocht, de porositeit van de steen. Camerman (1957) beschouwt de porositeit van een gesteende als een gebrek van de steen. Hoe poreuzer het materiaal, hoe slechter de steen bestand is tegen vochtgerelateerde schade, zoals vorstschade en temperatuurswisselingen.

Vorst- en dooischade is een belangrijke factor bij de verwerking van gesteenten in gebieden waar de temperatuur schommelt rond het vriespunt in bepaalde perioden zoals o.a. in België (Matsuoka & Murton, 2008). Voor het optreden van vorstschade moet voldaan zijn aan 3 voorwaarden: een aantal vorst- en dooicycli, de aanwezigheid van vocht en de geaardheid van het materiaal. Hoe meer vocht er in de muur aanwezig is, hoe meer schade er zal optreden. De aanwezige hoeveelheid vocht zal afhangen van het materiaal waarmee de muur is opgebouwd. Poreuze materialen zijn gevoeliger voor vorstschade dan andere materialen door hun poriënstructuur die zorgt voor een grotere vochtopname en hun over het algemeen lage treksterkte. Vocht wordt opgenomen via het capillair vermogen dat in verband staat met de poriënstructuur van het materiaal. Hoe het vochttransport zich gedraagt in de steen zal bepaald worden door de karakteristieken van de poriën zoals het totale poriën volume, grootte en vorm van de poriën, en verbindingen tussen de poriën (C. Hall & Hoff, 2002).

Vooraleer er sprake kan zijn van vorstschade, moeten vorst- en dooicycli aanwezig zijn. Zo'n cycli bevat een periode waarbij het water, aanwezig in het materiaal, bevriest en opnieuw zal dooien. Het bevriezen van water hangt vast aan de thermodynamische omstandigheden van

de steen. De poriëngrootte zal bepalen bij welke temperatuur het water in de porie zal bevriezen. Als er geen kiemvorming optreedt zal het water in een onderkoelde fase terecht komen.

Als ijsmassa meermaals voorkomt in de steen is er kans op mogelijke vorstschade. Een eerste oorzaak voor het creëren van vorstschade is de aanwezigheid van kristallisatiedrukken. Het kristalliseren van water is een proces waarbij water naar een vaste fase wordt omgezet. Als het water bevriest, gaat dit gepaard met een volume-expansie van 9%, wat gezien wordt als de grootste oorzaak van de vorstschade bij natuurstenen bouwstenen (Deprez, 2020; Vandemeulebroucke, 2018). Dat wil zeggen dat als het materiaal meer dan 91% verzadigd is, de materiaalmatrix de verdere uitzettingen niet meer kan verdragen. Als gevolg hiervan zal er vorstschade optreden in de natuursteen. Bij het overschrijden van trekspanningen in het materiaal worden scheurtjes veroorzaakt. In een volgende cyclus bestaat de kans dat het water zich zal ophopen in de scheuren en daar zal bevriezen. Door de uitzettingen van het ijs in de scheuren, zal verdere vorstschade optreden. Dit effect toont de negatieve invloed van het cyclisch gebeuren. Ook in dit geval hangt de grootte en de locatie van de spanningen veroorzaakt door kristallisatiedrukken af van de poriënkenmerken (Deprez, 2020).

Verder zijn er ook nog hydraulische drukken en ijslenzen die vorstschade kunnen veroorzaken bij bouwmaterialen. In de grootste poriën zal het water als eerste bevriezen, bij temperaturen rond de 0°C, omdat de dampspanning boven het capillair poriënwater lager is dan in de kleinere poriën. Deze poriën zullen zich dus als eerste vullen met ijs waardoor het onbevoren water naar de kleine poriën geduwd wordt. Bij de verplaatsing van het water ontstaat er wrijving, die op zijn beurt trekspanningen veroorzaakt op het poriënvlak. Bij dit fenomeen zal er schade ontstaan, waarvan de grootte toeneemt als het bevroeringspercentage toeneemt. Het tweede aspect is de vorming van ijslenzen, wat wordt gestimuleerd door een verschillende dampdruk op het ijsoppervlak en in de poriën. Door de verplaatsing van de damp van de omringende poriën tot het ijsoppervlak met als doel het thermodynamisch evenwicht te bereiken, zal de damp bevriezen op het oppervlak en zich verenigen met het ijsoppervlak. Op deze manier zal het ijsoppervlak toenemen in volume. De schade zal zich pas voordoen als het niet lukt om het thermodynamisch evenwicht te herstellen (Deprez, 2020; Vandemeulebroucke, 2018).

3 TE ONDERZOEKEN NATUURSTENEN

In deze thesis zal vooral onderzoek gedaan worden naar het vorstgedrag van natuursteen in een historisch gebouw. Een heel belangrijk aspect hierbij is de poriënstructuur. Hieruit volgt dan ook de keuze voor twee stenen met een zeer verschillende poriënstructuur: de Noord-Franse kalksteen Savonnières en de Duitse kalkzandsteen Bentheim. De eerst genoemde keuze vindt zijn inspiratie bij de thesis van Daphne Guilbert (2018) "Evaluation of the effect of the urban heat island in Ghent on natural building stones". Zij heeft een uitvoerig onderzoek gedaan naar het gedrag van de kalksteen Savonnières in een historische muur zonder isolatie. De andere steen is gekozen omwille van zijn redelijk bekend buitenlands karakter en zijn structuur, die sterk verschilt van de Savonnièressteen. We spreken hier ook van een kalkzandsteen i.p.v. een kalksteen. Deze twee stenen zijn ook duidelijk aanwezig in het Vlaamse gebouwenlandschap. Het bekendste voorbeeld voor Bentheim is de Sint-Romboutstoren in Mechelen en in het gebouw van de faculteit van ingenieurswetenschappen en architectuur van UGent is de Savonnièressteen verwerkt (Deprez, 2020).

3.1 De Savonnièressteen

3.1.1 Ontstaan en gebruik

In tegenstelling tot andere Franse kalkstenen is Savonnières een natuursteen die al gebruikt werd in de middeleeuwen (Monument Diagnosis and Conservation System, 2015). Savonnières is een kalksteen die behoort tot de Formatie van de Plateau de Barrois, dat zich bevindt in het noordoosten van Frankrijk (figuur 2.3 in hoofdstuk 2). Vanaf de middeleeuwen tot in de moderne tijd werd de Savonnièressteen gezien als een belangrijke decoratieve steensoort. Het is pas later dat de natuursteen gebruikt werd als belangrijke bouwsteen (Dreesen, 2018). De opkomst van de Noord-Franse Savonnièressteen als bouwsteen kent in België zijn oorsprong in de 19^{de} en 20^{ste} eeuw ter vervanging van de snel verwerende Belgische kalkstenen en werd later in de 20^{ste} eeuw, net zoals de Euvillesteen, ook gebruikt voor nieuwe constructies zoals het centraal station van Leuven (De Clercq, 2014; De Kock et al., 2014; Monument Diagnosis and Conservation System, 2015). Het belang van de exploitatie van deze natuursteen werd aangetoond in 1889 met 15 actieve groeven in de gemeente Savonnières (Dreesen, 2018).

In de jaren '80 van de 19^{ste} eeuw kwam de nadruk vooral te liggen op natuurstenen met een lang verwachte levensduur. Door de opkomst van de industriële revolutie waren veel kalkstenen aangetast door luchtvervuiling en zijn gevolgen, zoals zure regen (Dreesen, 2018). Volgens Carl Camerman, een mijningenieur met een grote kennis in de materiaalkunde, waren Savonnières en nog andere kalksteensoorten echter goed bestand tegen

uitlaatgassen. Terwijl een andere steen zoals Euville een duidelijke gipskorst vertoont, heeft Savonnières daar minder last van (Dreesen et al., 2012). Daarnaast werd het transporteren van natuurstenen naar en vanuit het buitenland veel makkelijker door de aanleg van uitgebreide spoornetwerken. Hierdoor werd ook in België al sneller een buitenlandse steen gebruikt (Dreesen, 2018; Quist, 2011). In het begin werden de Noord-Franse kalkstenen zoals de Savonnièressteen vervoerd via kanalen en rivieren omdat ze uit het stroomgebied van de Maas kwamen, maar later werden deze via het spoor naar België en Nederland gebracht (Quist, 2011, 2012).

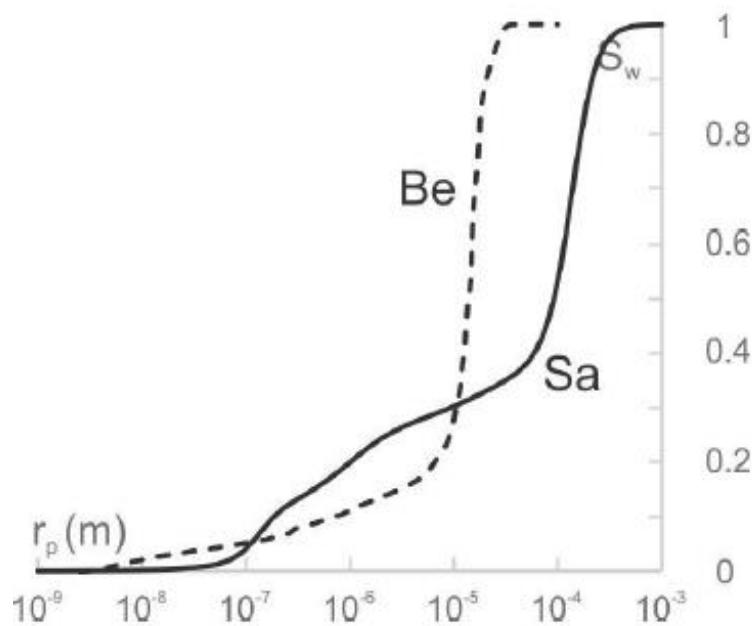
Tot op heden wordt Savonnières nog steeds ontgonnen op dezelfde plek maar zijn er nog slechts 3 overblijvende groeven (Dewanckele et al., 2014; Dreesen, 2018). Camerman (1957) beschreef Savonnièressteen samen met de Euvillesteen als de belangrijkste Franse kalkstenen die in België gebruikt worden en zijn van groot belang voor het Belgisch cultureel erfgoed. Sindsdien is zowel Savonnièressteen als Euvillesteen altijd beschikbaar geweest (De Kock et al., 2014).

3.1.2 Macroscopische en microscopische eigenschappen

De kalksteen Savonnières is een witte, Noord-Franse natuursteen, afkomstig uit het departement Meuse in Frankrijk, met een redelijk poreus gedaante (Van Roy et al., 2015). Vlak na de ontginning is de steen vrij zacht door de aanwezigheid van water in de steen. Na verloop van tijd is het water verdwenen en is de steen volledig uitgehard (Valdipierre bvba, 2000). De fijnkorrelige kalksteen is een voorbeeld van de groep van de oölitische kalkstenen en heeft een gelaagde structuur die bestaat uit 2 subgroepen van korrels. Het grootste deel bestaat uit gecementeerde oölieten, aangevuld met schelpfossielen. Een oöliet zijn bolletjes die bestaan uit opeenvolgende lagen kalk die in dit geval bedekt zijn met een laagje cement. De bolletjes kunnen zowel vol als hol zijn. Tussen deze deeltjes zijn er discrete lagen aanwezig in de vorm van kleine schelpjes (Dreesen, 2018; Monument Diagnosis and Conservation System, 2015; Quist, 2012; Roels et al., 2003). De oölieten in Savonnières kunnen ook elliptisch uitslaan en hebben een gemiddelde diameter van 0.5 mm (Dusar et al., 2009; Lebedev et al., 2014). Ze nemen ongeveer 90% in van alle korrels aanwezig in de natuursteen (Dusar et al., 2009). Daarnaast zijn het de schelpfossielen die de homogeniteit van de steen verstoren, alhoewel de schelpfragmenten vaak opgelost zijn waardoor enkel de omtrek nog intact is in de steen (De Kock et al., 2014; Dewanckele et al., 2014). Door de eventuele holle oölieten en eventuele opgeloste schelpfragmenten heeft de kalksteen een hogere porositeit dan de goed gecementeerde Belgische bouwstenen zoals bijvoorbeeld de Ledestein (Dewanckele et al., 2014). De open porositeit van de kalksteen varieert tussen de 22% en de 41% (Derluyn, Dewanckele, et al., 2014).

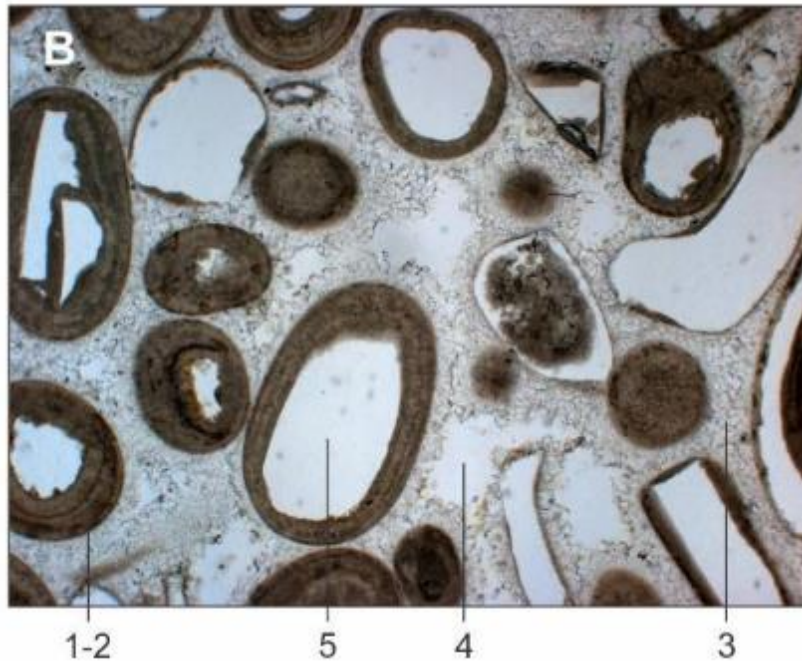
Savonnièressteen bestaat hoofdzakelijk uit pure kalksteen. Namelijk 99.8% van de steen is ingenomen door calciumcarbonaat (Derluyn, Dewanckele, et al., 2014; Dewanckele et al.,

2014). Naast kalk bevinden zich in de steen verschillende poriën. De poriën-grootteverdeling is multimodaal en bestaat uit macroporiën en microporiën. Macroporiën zijn in het doctoraat van Deprez (2020) gelijkgesteld aan poriën met een diameter groter dan 10 μm . Microporiën nemen de grootte aan van 1nm tot 1 μm . De poriën met een grootte daartussen worden gezien als mesoporiën. De verdeling van de poriëngroottes wordt weergegeven in de grafiek (Figuur 3.1). Er is ongeveer 70% van de poriën ingenomen door macroporiën, 10% door de mesoporiën en 20% door microporiën.



Figuur 3.1: Poriëngrootteverdeling in Savonnières (de volle lijn) en Bentheim (de stippellijn) (Deprez, 2020).

Figuur 3.2 toont de opdeling van de verschillende poriën in Savonnières. Er zijn twee soorten macroporiën. De ene worden aangeduid door nummer 5 en stellen de holtes voor die gevormd zijn door schelpfossielen die op die plaats zijn opgelost. De andere soort wordt aangeduid door nummer 4 en zijn de intergranulaire poriën. Nummer 3 toont de microporiën die zich tussen het eerder genoemde cement bevinden. De microporiën tussen de holle oölieten en de microporiën die zich tussen het cement bevinden, worden voorgesteld met het nummer 1 en 2. Door deze opbouw heeft Savonnières te kampen met een redelijk complex netwerk waardoor de permeabiliteit van de steen ook complex is. De permeabiliteit is de mate waarin een vaste stof andere stoffen doorlaat. Dit is afhankelijk van de macroporiën en de microporiën (Roels et al., 2001). Voor Savonnières wordt een gemiddelde waarde van 51 millidarcy (David et al., 2015) tot 91 millidarcy gemeten (Lopes et al., 2014).



Figuur 3.2: Microscopische afbeelding van Savonnièressteen met microporiën tussen de oölieten en tussen het cement (1-2),microscopische intergranulaire poriën (3) en macroscopische intergranulaire poriën (4) en holle schelpfossielen (5) (Deprez, 2020)

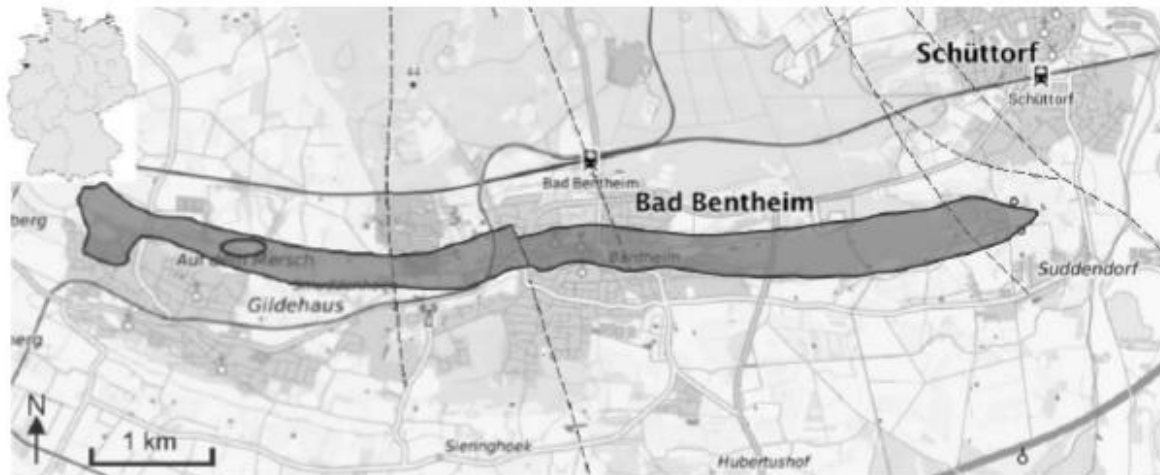
3.2 De Bentheimsteen

3.2.1 Ontstaan en gebruik

De zandsteen Bentheim kent zijn oorsprong in een stromingsgebied die zich uitstrekt van het oostelijke deel van Nederland tot het Harzgebergte in Duitsland (Dubelaar & Nijland, 2014). De zandsteen is zichtbaar aan het oppervlak bij de Nederlandse Duitse grens aan een kam van ongeveer 10 km lang die loopt van Suddendorf (ten oosten van Bad Bentheim) tot Gildehaus (ten westen van Bad Bentheim) en werd er ook ontgonnen (Dubelaar & Nijland, 2014; Traska, 2014). Op figuur 3.3 is een beeld geschetst van de ligging van het ontsluitingsgebied (Dubelaar & Nijland, 2014). In het graafschap Bentheim werd deze natuursteen aangeduid als het 'Bentheimer Gold' (Wikipedia, 2020). Met een ellips is de steengroeve in Romberg aangeduid. Deze is één van de enige overgebleven actieve steengroeven van Bentheim (Nijland et al., 2003b).

Afhankelijk van de locatie waar hij ontgonnen wordt, verschilt de Bentheimsteen van kleur. Stenen uit de steengroeve Romberg die gewoonlijk voor bouwdoeleinden worden gebruikt, hebben een grijswitte tot lichtgele kleur. In de buurt van Bad Bentheim, vooral in de verlaten steengroeven ten oosten van de stad, is de steen echter meer oker tot rood. Dit uiterlijk wordt veroorzaakt door hematietcoatings op de kwartskorrels (Dubelaar & Nijland, 2014). Hematiet

komt voor in de kleur roodbruin tot zwart grijs met een metaalglans (Wikipedia, 2018). Bovendien hebben de roodachtige stenen de neiging om een hoger kleigehalte te hebben dan hun grijswit gekleurde variant (Dubelaar & Nijland, 2014). De rode variant van Bentheim wordt de Bentheim-variant genoemd, terwijl de lichtgele de Gildehaus-variant wordt genoemd (De Boever, 2015).



Figuur 3.3: Het ontsluitingsgebied van Bentheim (Deprez, 2020).

Sinds het begin van de middeleeuwen werd Bentheim ontgonnen en lokaal gebruikt voor sculpturen en heilige gebruiksvoorwerpen in kerken in Duitsland en Nederland. Vanaf het einde van de 14^{de} eeuw werd de natuursteen ook gebruikt voor andere doeleinden, zoals de constructie van gebouwen (Traska, 2014). In Nederland werd de steen geïntroduceerd in 1450 in de Dom van Utrecht wat hem vervolgens een grote populariteit gaf. Hij werd zowel voor ornamenten als voor bouwstenen gebruikt in veel Nederlandse steden. Ondanks de relatief hoge transportkosten was de steen toch populair vanwege zijn duurzaamheid, verwerkbaarheid en beschikbaarheid in grote blokken. In Vlaanderen daarentegen werd Bentheim vooral gebruikt tijdens de vroegmoderne en moderne periode. In dat tijdperk kende de Duitse Bentheim in de 17^{de} en 18^{de} eeuw een grotere invoer, vooral in Antwerpen en Brabant, door een handelsverbod en een blokkade van de Schelde. De zandsteen werd in het algemeen meestal ingezet als restauratiesteen en wordt onder andere bewerkt in de werkplaatsen van de familie Keldersmans in Mechelen (Dusar et al., 2009; Dusar & Dreesen, 2009; Slinger et al., 1982). Een welgekend voorbeeld dat zich sinds de beginperiode van de aanwezigheid van Bentheim in het Vlaamse gebouwenlandschap toont, is de Sint-Romboutstoren in Mechelen. De toren dateert al van 1470, twintig jaar na het begin van de vroegmoderne tijd (Cnudde et al., 2009; Wikipedia, 2020).

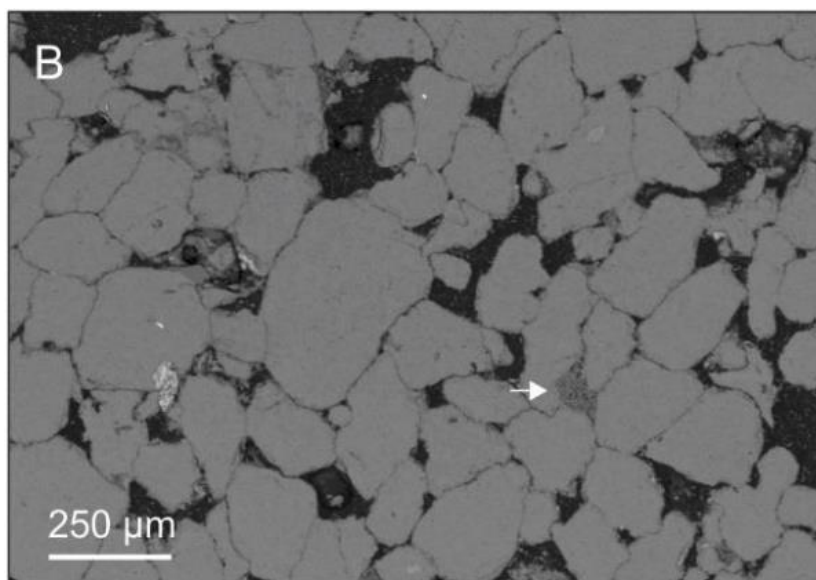
Later bleek dat de steen door verwerking donkerder werd van kleur, wat mogelijks in die tijd nog onbekend was. Dit leidde tot sommige esthetische teleurstellingen (Dusar et al., 2009) en is één van de oorzaken waarom de steen in de 19^{de} en 20^{ste} eeuw nog zelden werd gebruikt als vervangsteen bij renovatiewerken. In Gent is de natuursteen aanwezig in het Museum

voor Schone Kunsten, gerenoveerd in 1898-1904 (Agentschap Onroerend Erfgoed, 2015) en in de “Berg van Barmhartigheid”, gerenoveerd in 1770.

3.2.2 Macroscopische en microscopische eigenschappen

De Bentheimsteen is het ‘Bentheimer Gold’ van het Graafschap Bentheim in Duitsland. Op het eerste gezicht is de steen een zuivere en relatief stevige zandsteen met een gelijkmatige structuur die voor verschillende doeleinden kan dienen (Wikipedia, 2020). Afhankelijk van de concentratie aan ijzerhoudende mineralen kan Bentheim verschillende kleuren aannemen. (Dusar et al., 2009; Nijland et al., 2003b).

Bentheim is een kwartzandsteen met goed geordende, fijne tot middelgrote granulen. Meer dan 90% van het volume bestaat uit kwarts. De grootte van de kwartsdeeltjes ligt tussen de 0.1 mm en 0.5 mm (Nijland et al., 2003a; Traska, 2014). De steen bevat vaak deeltjes van zirkoon, toermalijn, muscoviet en veldspaat (Traska, 2014). Veldspaat kan tot 5% van het volume innemen en ook kleimineralen kunnen tot 3% van het volume bepalen (Louis et al., 2005). Op Figuur 3.4 is een foto te zien van de granulen in Bentheim. De korrels zijn in het grijs afgebeeld en de poriën in het zwart. De kwartskorrels zijn aan elkaar gehecht, wat zal bijdragen tot de mechanische sterkte van de steen (Nijland et al., 2003b). De druksterkte van de steen bedraagt 41 tot 77 MPa (Dubelaar & Nijland, 2014) en de treksterkte bedraagt 1.65 tot 3.20 MPa (Bakker & Barnhoorn, 2019; Ojala, 2011). De witte pijl wijst naar poriën gevuld met klei die zijn ontstaan door de oplossing van veldspaat (De Boever, 2015).



Figuur 3.4: De granulaire verdeling van Bentheim. De poriën zijn aangeduid in het zwart en de korrels in het grijs (Deprez, 2020).

De porositeit van Bentheim wordt gehaald uit de kwartscementering en bedraagt tussen de 20% tot 25% van het volume. De poriënverdeling is unimodaal en de meeste poriën hebben een diameter tussen de 20 en 40 μm (De Boever, 2015). De verdeling van de poriëngroottes is te vinden in figuur 3.1 in de vorige paragraaf. Bentheim telt ongeveer 82% aan macroporiën, 8% aan mesoporiën en 10% aan microporiën. De permeabiliteit heeft een waarde van 1 – 2.5 Darcy (Dubelaar & Nijland, 2014; Louis et al., 2005).

4 WEERDATA

4.1 Klimaatdata van Brussel

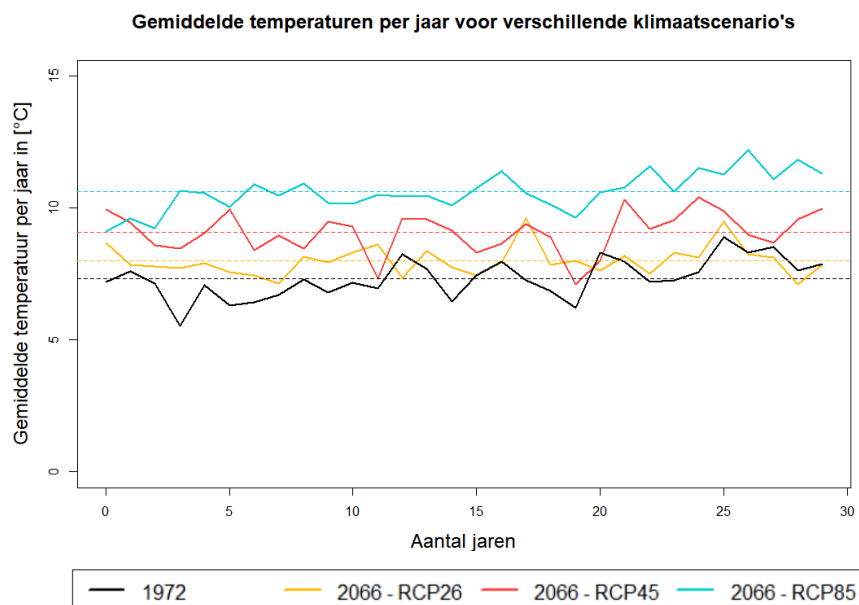
De klimaatdata van Brussel die gebruikt worden in de simulaties, bestaan uit 2 perioden opgesteld door de regionale klimaatmodel ALARO-0 van het KMI. Een regionaal klimaatmodel stelt een deel voor van een globaal klimaatmodel, die klimaatprojecties met een resolutie van 100 à 200 km bieden (KMI, 2017). De klimaatdata geven data per uur en bestaan uit 4 verschillende scenario's, waarvan 1 een historisch klimaatscenario voorstelt en de 3 andere een toekomstig klimaatscenario. De laatstgenoemde maken een onderscheid in representatieve concentratieroutes van atmosferische gassen (RCP2.6, RCP 4.5 en RCP8.5). Het is opgedeeld in een optimistisch, een gemiddeld en een pessimistisch scenario. De getallen 2.6, 4.5 en 8.5 geven een straling op het einde van de 21^{ste} eeuw weer. Deze stralingen kunnen de energieflexen aan de bovenzijde van de atmosfeer veranderen. De historische klimaatdata geeft een representatie weer van de periode 1972 tot 2005. De drie toekomstige klimaatscenario's geven een indicatie voor de jaren 2066-2099 (Vandemeulebroucke et al., 2021). Beide periodes zijn inclusief de conditioneringsperiode gerekend.

4.1.1 Temperatuur

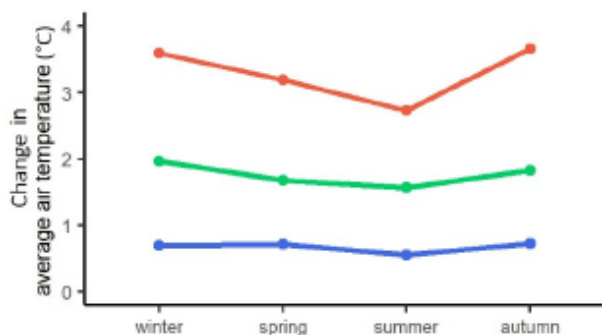
Om het aantal kritische vorst- en dooicycli te analyseren, wordt de evolutie van de klimaatdata onderzocht. In Figuur 4.1 is de gemiddelde temperatuur per jaar berekend over een periode van 30 jaar en deze worden in vergelijking geplaatst met elkaar. Het toont een duidelijke temperatuurstijging in de toekomst. De gemiddelde temperatuur voor 30 jaar is 7.33 °C en zal stijgen met een temperatuur tussen 0.67 °C en 3.29 °C. Deze waarden zijn respectievelijk de waarden voor het optimistisch scenario en het pessimistisch scenario.

De stijging in temperatuur is niet gelijk voor elk seizoen. Figuur 4.2 toont een weergave van de gemiddelde temperatuurverschillen van de toekomstige klimaatscenario's met het historische klimaatscenario, opgesteld door Vandemeulebroucke et al. (2021) . Hierbij merken we op dat in de zomer het kleinste verschil te kennen zal zijn, vooral bij de vergelijking van het historische klimaatscenario met het pessimistische toekomstig klimaatscenario. De grootste verschillen liggen in de winter en herfst. Voor het gemiddelde en pessimistisch klimaatscenario bedraagt het verschil respectievelijk $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ en over $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$. De grote stijging zou volgens Grossi et al. (2007) leiden tot minder gevaar voor de vriesschade in historische gebouwen, indien de temperaturen hoger liggen dan 0 °C. Voor klimaatzones met een temperatuur rond het vriespunt kan de stijging van de temperatuur echter zorgen voor meer fluctuaties rond het vriespunt wat kan leiden tot meer kritische vorst- en dooicycli. Dit effect

zal versterkt worden als ook de neerslag in die specifieke klimaatsverandering vermeerderd (Vandemeulebroucke et al., 2021).



Figuur 4.1: Gemiddelde temperatuur per jaar voor elk klimaatscenario. De stippellijnen geven de gemiddelde temperatuur weer voor 30 jaar.



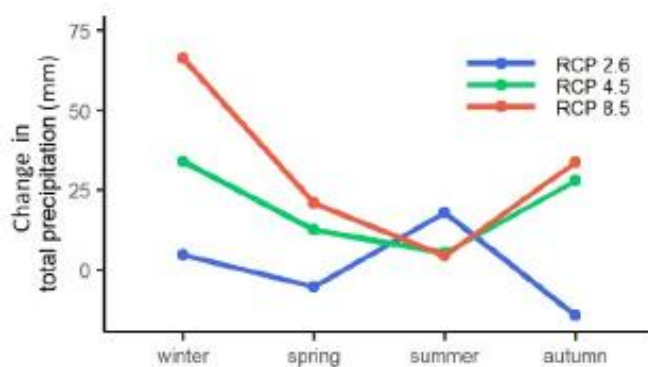
	Temperature (°C)			
	Historical	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Annual	7.3	8.0	9.1	10.6
Winter	0.2	0.9	2.1	3.8
Spring	5.3	6.0	7.0	8.5
Summer	15.3	15.9	16.9	18.1
Autumn	8.4	9.1	10.2	12.0

Figuur 4.2: Het gemiddelde verschil in temperatuur van de toekomstige klimaatscenario's in vergelijking met het historische klimaatscenario (links) en een tabel met de gemiddelde temperatuur per seizoen (rechts) (Vandemeulebroucke et al., 2021).

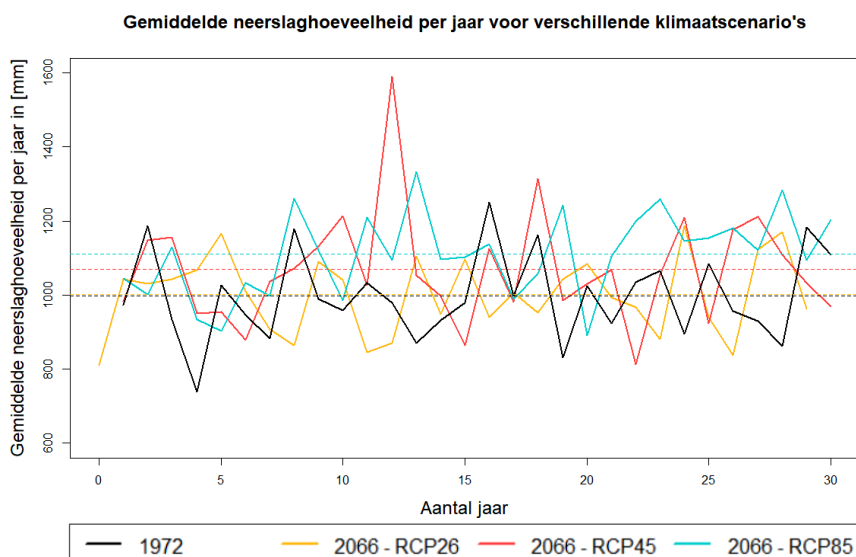
4.1.2 Neerslag

Bij het ontstaan van kritische vorst- en dooicycli is vocht zeer belangrijk. De temperaturen kunnen dichterbij 0°C liggen, waardoor meer fluctuaties rond het vriespunt mogelijk zijn. Om dan kritische vorst- en dooicycli te vertonen, zou er meer vocht in de muur aanwezig moeten zijn (Vandemeulebroucke et al., 2021). In de toekomst zal de neerslaghoeveelheid in de winter stijgen volgens de analyse van de gemiddelde neerslaghoeveelheid in mm van

Vandemeulebroucke et al. (2021) in Figuur 4.3. Het KMI voorspelde dat er in de toekomst meer seizoensgebonden neerslag wordt verwacht. Zij voorspellen 25% minder regen in de zomer en 22% meer neerslag in de winter voor het pessimistisch klimaatscenario in vergelijking met het historische klimaatscenario. In Tabel 4.1 van Vandemeulebroucke et al. (2021) is de neerslaghoeveelheid berekend per seizoen en voor een heel jaar. Daaruit kan geconcludeerd worden dat de meeste neerslag in de zomer valt en de minste neerslag in de winter, behalve voor het pessimistische toekomstige klimaatscenario. Over het algemeen zal er in de toekomst meer neerslag aanwezig zijn dan in de historische periode. Figuur 4.4 is een grafiek met de gemiddelde neerslaghoeveelheden per jaar. Bij het bekijken van de gemiddelde neerslaghoeveelheid over 30 jaar wordt een stijging opgemerkt tussen 0.4% en 11.30%.



Figuur 4.3: De verandering in neerslaghoeveelheid van de toekomstige klimaatscenario's in vergelijking met de historische weerdata (Vandemeulebroucke et al., 2021).

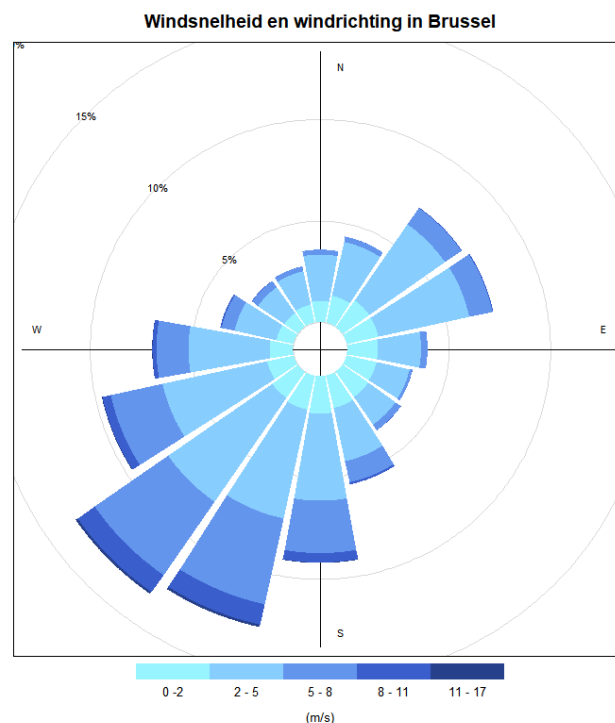


Figuur 4.4: Gemiddelde neerslaghoeveelheid per jaar [kg/m³] voor elk klimaatscenario. De stippellijnen geven de gemiddelde neerslaghoeveelheid weer voor 30 jaar.

Neerslaghoeveelheid in [mm]				
Wanneer	Historisch	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Jaarlijks	983	986	1063	1108
Winter	241	246	275	307
Lente	244	238	256	264
Zomer	287	305	292	291
Herfst	212	198	240	246

Tabel 4.1: Neerslaghoeveelheid per jaar en per seizoen (Vandemeulebroucke et al., 2021).

Naast de gewone neerslag is de slagregenbelasting ook een belangrijke factor. De hoogste cumulatieve slagregenbelasting komt steeds uit de meest kritische oriëntatie voor vochtgerelateerde problemen in hygrothermische analyses van muuropbouwen. In de windroos op Figuur 4.5 is te zien dat voor het klimaat van Brussel het zuidwesten de meest kritische windrichting is. Volgens de analyse van (Vandemeulebroucke et al., 2021) is voor het historische klimaat de slagregenbelasting het hoogst in de winter terwijl de neerslaghoeveelheid het grootst is in de zomer (Tabel 4.1). Dit is te verklaren door de hogere windsnelheden in de winter. In vergelijking met het historische klimaat zal voor het pessimistisch klimaat de slagregenbelasting de grootste stijging hebben in de zuidwestelijke oriëntatie met een waarde van 19 mm (+ 20%).



Figuur 4.5: Windroos van de klimaatdata in Brussel.

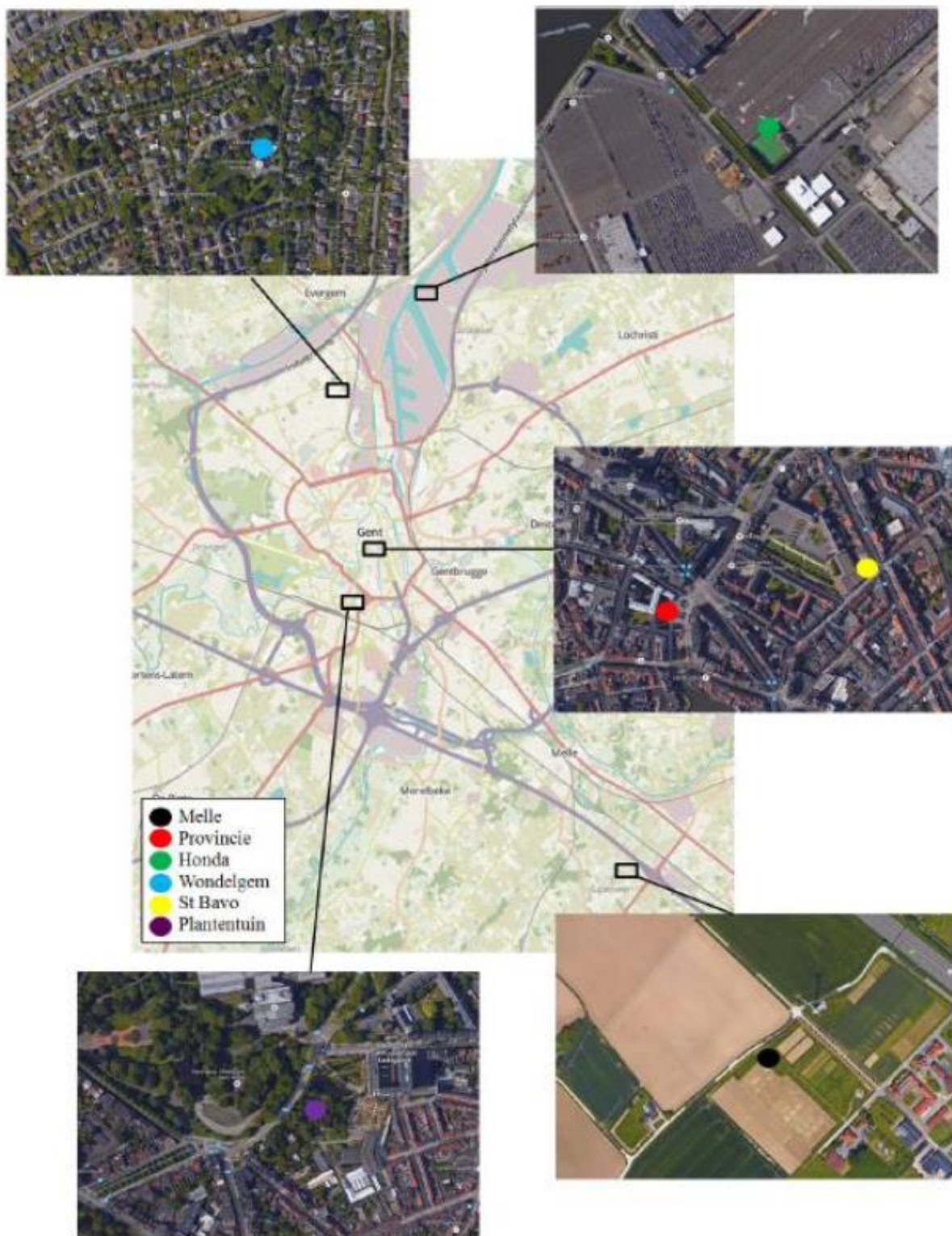
4.2 Klimaatdata van het stedelijk hitte-eiland Gent

Naar aanleiding van de thesis van D. Guilbert (2018) wordt er verder onderzoek verricht naar het effect van het stedelijk hitte-eiland op natuursteen. De klimaatdata die gebruikt werden in de thesis van D. Guilbert (2018) zijn de weerdata van verschillende plaatsen in Gent afkomstig uit het MOCCA-project (Monitoring the City's Climate and Atmosphere project). In deze thesis wordt gewerkt met dezelfde data, maar voor een langere periode.

Gent is de hoofdstad van de provincie Oost-Vlaanderen in België. De stad is 1400 jaar geleden ontstaan rond de samenvloeiing van de Schelde en de Leie. Met zijn inwoners is het de op één na grootste stad van België. De stad telt meer dan 250 000 inwoners en heeft een totale oppervlakte van 157.74 km² (Wikipedia, 2021b). Het centrum van Gent is dichtbevolkt, terwijl de rand van de stad eerder bestaat uit (half) open bebouwingen verweven in een groene omgeving. In het noorden liggen de haven en de industriële terreinen. Rond de stad Gent is er een landelijke omgeving te vinden (Vandemeulebroucke, 2018).

Het stedelijk hitte-eiland is een fenomeen dat meer en meer voorkomt. In het sterk verstedelijkte Vlaanderen is bewustwording hierrond van groot belang. Samen met bijkomende redenen heeft de faculteit van fysica en sterrenkunde van de Universiteit Gent het MOCCA - project opgestart. Voor de realisatie van dit project zijn in de stad verschillende meetpunten geplaatst. In totaal zijn er 6 identieke meetstations op verschillende soorten locaties om betrouwbare data te verzamelen. De locaties zijn zo gekozen dat er verschillende stedelijke omgevingen (haven, stadspark, bebouwde omgeving, het platteland...) vertegenwoordigd zijn.

De verschillende locaties zijn: Melle, Plantentuin, Wondelgem, Provinciehuis, Sint-Bavoschool en Honda. Sint-Bavoschool en het Provinciehuis zijn allebei gelegen in het stedelijke centrum van Gent. Het eerstgenoemde stelt een dicht bebouwde, stedelijke omgeving voor, terwijl de andere een breder bebouwde, stedelijke omgeving voorstelt. Wondelgem is gelegen aan de rand van de stad en bestaat grotendeels uit vrijstaande woningen omsloten met een groene omgeving. De plantentuin geeft de condities weer van een stadspark en Honda staat voor de havenomgeving in het noorden van Gent. Melle bevindt zich net buiten de stad Gent in een landelijke omgeving.



Figuur 4.6: De verschillende meetstations, gelokaliseerd op een kaart van Gent (Vandemeulebroucke, 2018).

Elke meetstation bestaat uit een constructie tot 2 meter hoogte waarop sensoren bevestigd zijn (Figuur 4.7). Elke sensor stuurt een elektrisch signaal naar de datalogger waar de gemeten informatie wordt omgezet tot de juiste meteorologische grootte. De datalogger zal zijn gegevens uiteindelijk via GPRS (General Packet Radio Service) doorsturen naar de server.

De verschillende sensoren meten elk een andere parameter. De temperatuur wordt gemeten door een Pt100 in een actief geventileerd stralingsschild die de sensor afschermt van het direct zonlicht en voor voldoende ventilatie zorgt. HC2S3 meet de relatieve vochtigheid samen met de temperatuur. De relatieve vochtigheid hangt niet enkel af van de hoeveelheid waterdamp in de lucht maar ook van de temperatuur. De HC2S3 is geïnstalleerd in een passief geventileerd hutje. Voor de wind bevat het weerstation een ultrasone anemometer die de windsnelheid en de windrichting opmeet. De windsnelheid wordt uitgedrukt in Beaufort en de windrichting in de afwijking van het aantal graden t.o.v. van het noorden. De laatste sensor staat in voor het meten van de neerslag via een kantelbakje dat dient als regenmeter. Een trechter vangt de neerslag op en laat deze doorstromen naar een emmer van 0.2 liter, die zich onder de trechter bevindt. Als de emmer vol is, wordt deze geleidigd door omkering. Het aantal keren per minuut dat de emmer omkeert, wordt geregistreerd. De neerslaghoeveelheid wordt uitgedrukt in l/m².



Figuur 4.7: Een overzicht van de verschillende sensoren op een weerstation: passief geventileerd stralingsschild (1), opvangbassin voor de neerslag (2), actief geventileerd stralingsschild (3) en ultrasone anemometer (4) (Mocca, 2020)

In de klimaatdata van het MOCCA-project zijn geen langgolvlige en kortgolvlige stralingsdata aanwezig. Die gegevens zullen ingevuld worden door een meetpunt van de zonnestraling van het KMI, te vinden in Melle. Dit wil zeggen dat ieder locatie dezelfde hoeveelheid zonnestraling zal bevatten in de klimaatdata.

4.2.1 Resultaten weerstations

Het MOCCA levert weerdata voor de 6 verschillende locaties in Gent over een periode van ongeveer 4 jaar. De klimaatdata start in juli 2016 en eindigt in oktober 2020 en wordt geanalyseerd via R Studio, een softwareprogramma om data te verwerken. Om het vorstgedrag van de natuurstenen op die locaties te onderzoeken, wordt er gekeken naar verschillende parameters: temperatuur, relatieve vochtigheid, windsnelheid en (slag)neerslag.

In de klimaatdata van het MOCCA ontbreken sommige gegevens en parameters of zijn de inputgegevens niet correct. De oorzaak van ontbrekende gegevens ligt bij het tijdelijk niet werken van de lokale meetstations. Na een voorafgaande analyse van de weerstations worden ontbrekende gegevens vervangen door waarden van een meetstation die het dichtst bij de waarden van het originele meetstation liggen. De temperatuur en relatieve vochtigheid worden altijd vervangen door gegevens uit hetzelfde meetstation omdat deze aan elkaar gelinkt zijn. Een relatieve vochtigheid die hoger gaat dan 100%, een negatieve straling en een negatieve neerslaghoeveelheid zijn gegevens die niet correct zijn opgenomen in de data van het MOCCA-project. De waarden die de 100% relatieve vochtigheid overschrijden worden afgetopt op 100%. De negatieve waarden in de neerslaghoeveelheid en de stralingsdata krijgen een nulwaarde.

4.2.1.1 Temperatuur

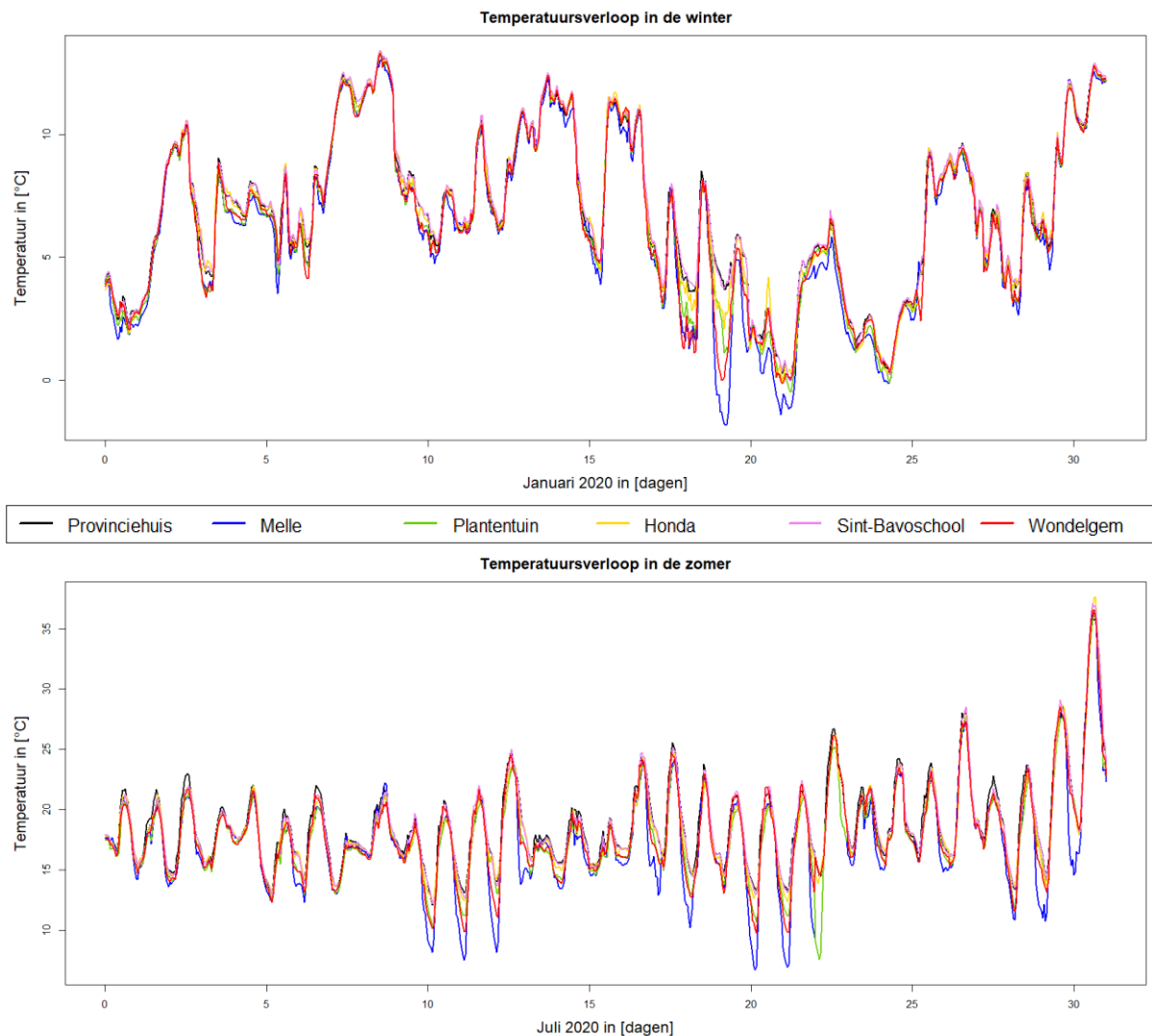
In dit onderzoek wordt enkel gepraat over de actief geventileerde temperatuur, waarbij de thermometer door een elektrische ventilator geventileerd wordt. Bij een passief geventileerde thermometer worden er bij windstille momenten minder correcte gegevens verzameld, waardoor met deze waarde geen rekening wordt gehouden in dit onderzoek.

Locatie	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tgem [°C]
Provinciehuis	40.00	- 6.00	12.82
Melle	39.76	- 7.04	11.74
Plantentuin	39.73	- 6.22	12.19
Honda	41.00	- 6.45	12.53
Sint-Bavoschool	40.80	- 5.86	12.78
Wondelgem	40.34	- 6.19	12.18

Tabel 4.2: Maximale, minimale en gemiddelde meettemperatuur per station

Per weerstation werd de maximum, minimum en gemiddelde temperatuur berekend en geordend genoteerd in Tabel 4.2. De hoogste temperatuur wordt bereikt in Honda, een verhard industrieterrein, gevolgd door de Sint-Bavoschool, een dicht bebouwde omgeving in het midden van de stad. De laagste maximumtemperaturen worden bereikt in de Plantentuin en in Melle. Beide locaties zijn voorzien van meer groen en minder verharding. De aanwezige

vegetatie zal het regenwater opnemen en kan het opnieuw afgeven door middel van verdamping via de huidmondjes van de bladeren. De verdamping heeft warmte nodig waardoor de vegetatie zorgt voor een verkoelend effect voor de omgeving (VIBE, 2020). De hoogste minimumtemperaturen zijn gemeten in de Sint-Bavoschool, gevolgd door het Provinciehuis. Beide locaties liggen in het midden van de stad, in een dichtbebouwde omgeving. De laagste minimumtemperatuur is gemeten in Melle in een landelijke omgeving, gevolgd door de locatie Honda. Het verschil tussen de maximumtemperaturen is 1.27°C en tussen de minimumtemperaturen 1.18°C.



Figuur 4.8: Het temperatuurverloop in de winter (bovenaan) en in de zomer (onderaan).

Figuur 4.8 toont het temperatuurverloop in een zomer- en wintermaand in 2020 voor alle meetpunten van Gent in een grafiek. Het laatste jaar van de meetdata staat hier afgebeeld terwijl voor de andere jaren de conclusie hetzelfde bedraagt. In de winterperiode is te zien dat de temperatuur in Melle telkens de onderste curve volgt terwijl de bovenste curve af en toe wordt afgewisseld tussen het provinciehuis, de Sint-Bavoschool en Honda. Voornamelijk

nemen de eerste twee de bovenhand. In de nacht koelt de plek Melle en Wondelgem, beide omgeven door een redelijk open, groene vlakke, af. Het effect van het stedelijk hitte-eiland is op te merken door de lage minima van de locatie Melle en wordt vooral duidelijk op heldere en windstille nachten. (Mocca, 2021). De plaatsen in de steden behouden hun warmte en zullen 's nachts minder afkoelen, terwijl het op andere plaatsen wel afkoelt als de zon ondergaat. In de zomer kent Melle ook telkens de laagste temperatuur en vertoont ze dezelfde temperatuurschommeling als in de winter. De warmere plaatsen zijn ook te vinden in het midden van de stad. Als effect van het stedelijk hitte-eiland zal water minder snel verdampen in een stedelijke omgeving doordat het regenwater minder wordt geïnfiltreerd en sneller wordt afgevoerd, wat zal zorgen voor een kleinere aanwezigheid van regenwater om te verdampen. Het verdampen van regenwater helpt de locatie afkoelen waardoor dit in de stad minder gebeurt (Stichting toegepast onderzoek waterbeheer, 2019).

Met een blik op het toekomstig te voeren onderzoek naar het aantal kritische vorst- en dooicycli, wordt het aantal uren vorst per jaar berekend. In Tabel 4.3 staat het aantal uren vorst voor de verschillende locaties opgesomd. Voornamelijk de jaren 2017 en 2018 kennen het meeste aantal uren vorst. Melle is met ruime voorsprong telkens de locatie met het meest aantal uren vorst ten opzichte van de andere locaties. De twee plaatsen in de binnenstad zoals het Provinciehuis en Sint-Bavoschool hebben het laagste aantal uren vorst, tot bijna de helft van het aantal uren vorst in Melle.

Plaats	Aantal uren vorst			
	2017	2018	2019	Voor de 3 jaar samen
Provinciehuis	235	239	108	582
Melle	357	386	245	988
Plantentuin	291	281	140	712
Honda	285	273	131	689
Sint-Bavoschool	217	230	98	545
Wondelgem	294	297	164	755

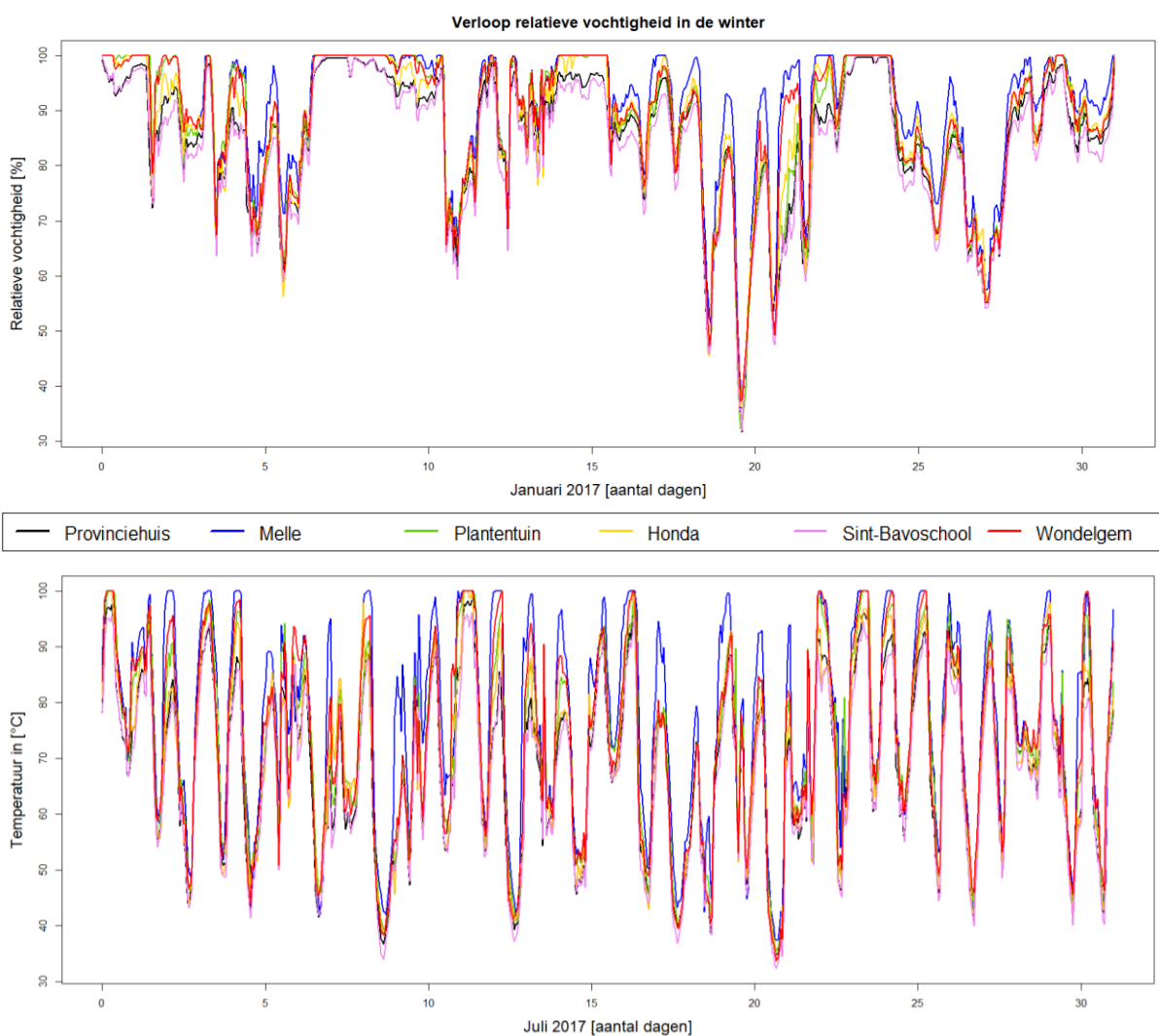
Tabel 4.3: Het aantal uren vorst per jaar voor elke locatie van het MOCCA-project in Gent.

4.2.1.2 Relatieve vochtigheid

Voor de relatieve vochtigheid wordt gekeken naar een gemiddelde waarde per locatie (Tabel 4.4). Melle heeft door de lagere omgevingstemperatuur de grootste relatieve vochtigheid, terwijl de Sint-Bavoschool de laagste waarde heeft. Dit uit zich in Figuur 4.9 waar de relatieve vochtigheid voor de zomer- en wintermaand in 2017 is afgebeeld. Voor beide jaren geldt dat in de zomer en winter vooral 's nachts de waarde van de Sint-Bavoschool, afwisselend met het Provinciehuis, daalt in relatieve vochtigheid. Overdag stijgt de waarde van Melle in vergelijking met de andere meetstations.

Locatie	Relatieve vochtigheid [%]
Provinciehuis	75.54
Melle	80.61
Plantentuin	77.87
Honda	76.75
Sint-Bavoschool	74.01
Wondelgem	78.23

Tabel 4.4: Gemiddelde relatieve vochtigheid per locatie



Figuur 4.9: Verloop van de relatieve vochtigheid in de winter (bovenaan) en in de zomer (onderaan).

4.2.1.3 Windsnelheid

De meetsensoren van het MOCCA meten de windsnelheid op een hoogte van 2 meter. Het simulatieprogramma Delphin vereist echter een windsnelheid op 10 meter hoogte, waardoor deze waarde aangepast moet worden. Via de formule in de PhD van Straube (1998) worden de waarden omgevormd:

$$V(z) = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \cdot V_{10}$$

met

$V(z)$ = de windsnelheid in m/s

z = het aantal meter boven de grond

V_{10} = de snelheid op een hoogte van 10m

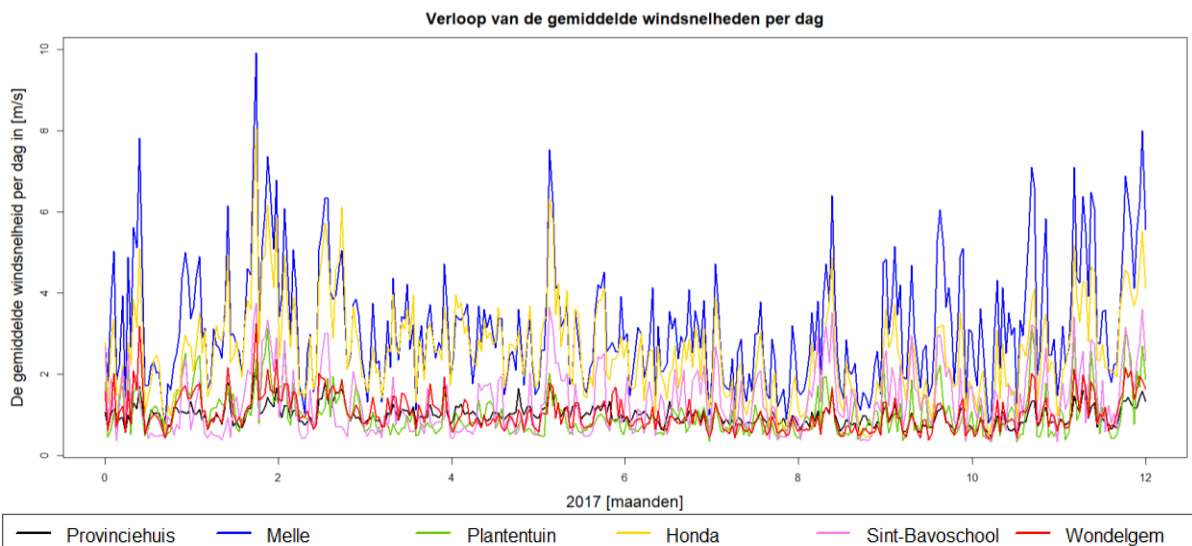
α = de maximum versnelling van de wind waarvoor een regendruppel nog in de luchtstroom blijft

Na deze omvorming bekomen we waarden in Tabel 4.5 die de maximale windsnelheden weergegeven. De maximale waarden worden telkens bereikt op de locatie Melle, gevolgd door Honda. De minimale waarde daarentegen varieert voornamelijk tussen de Sint-Bavoschool en het Provinciehuis. De dichte bebouwing in het centrum van Gent zorgt ervoor dat de windsnelheid afgevlakt wordt, waardoor de waarden lager liggen op deze twee plaatsen. Melle daarentegen bevindt zich in een landelijk gebied waardoor de wind zijn volle snelheid kan nemen. Daarnaast is Honda een havenomgeving die door beperkte of lage bebouwing onderhevig is aan hoge windsnelheden.

Locatie	V_{\max} 2017 [m/s]	V_{\max} 2018 [m/s]	V_{\max} 2019 [m/s]
Provinciehuis	2.95	8.00	5.93
Melle	13.37	14.15	17.21
Plantentuin	5.43	7.31	7.56
Honda	10.60	11.50	12.68
Sint-Bavoschool	5.52	5.41	5.93
Wondelgem	5.53	5.68	7.61

Tabel 4.5: Maximale windsnelheden per meetstation voor elk jaar

In Figuur 4.10 is de windsnelheid te zien voor een volledig jaar (2017) op alle locaties. In deze grafiek is de conclusie van daarnet duidelijk op te merken. Melle blijft gedurende het hele jaar aan de top, samen met Honda, de industriële omgeving die er dicht op volgt. Deze twee locaties tonen de grootste variatie in windsnelheden in vergelijking met de andere locaties. Op de grafiek is tussen de twee locaties Melle en Honda en de andere weerstations telkens een groot verschil op te merken.



Figuur 4.10: Het verloop van de gemiddelde windsnelheden per dag.

4.2.1.4 Neerslag

In Tabel 4.6 is de totale neerslag in mm gegeven per jaar, met uitzondering van 2020. Het jaar 2020 is niet volledig waardoor vergelijkingen met andere jaren niet correct zouden gebeuren. De neerslaghoeveelheid van de verschillende locaties liggen rond eenzelfde range van waarden, behalve de Plantentuin. Door de schaduwen van de bomen en de bladeren in het kantelbakje van de neerslagmeter kunnen deze resultaten niet als volwaardig aanzien worden.

De maximale neerslaghoeveelheid is telkens in Wondelgem te vinden, terwijl de laagste neerslaghoeveelheid per jaar in Melle of Honda valt.

Locatie	Neerslag 2017 [mm]	Neerslag 2018 [mm]	Neerslag 2019 [mm]
Provinciehuis	808.4	645.2	775.0
Melle	784.8	628.0	703.0
Plantentuin	564.6	454.6	617.6
Honda	778.2	684.0	793.6
Sint-Bavoschool	793.2	631.6	741.8
Wondelgem	841.4	697.0	834.2

Tabel 4.6: De totale neerslaghoeveelheid in mm per jaar (2020 is niet meegerekend omdat het geen volledig jaar bevat).

4.2.1.5 Slagregen

Een belangrijke bijkomende factor van neerslag is de slagregen. Zoals eerder besproken is dit fenomeen een combinatie van horizontale regenval en windsnelheid. Voor de berekening van de windregenbelasting wordt beroep gedaan op de formule van Straube & Burnett (2000):

$$WDR = RAF \cdot DRF(r_h) \cdot \cos(\theta) \cdot V(h) \cdot r_h$$

met

WDR = slagregenbelasting

RAF = 'rain admittance function'

DRF(r_h) = slagregenfactor

θ = de hoek tussen de normaal van de gevel en de windrichting

V(h) = windsnelheid

r_h = de neerslaghoeveelheid

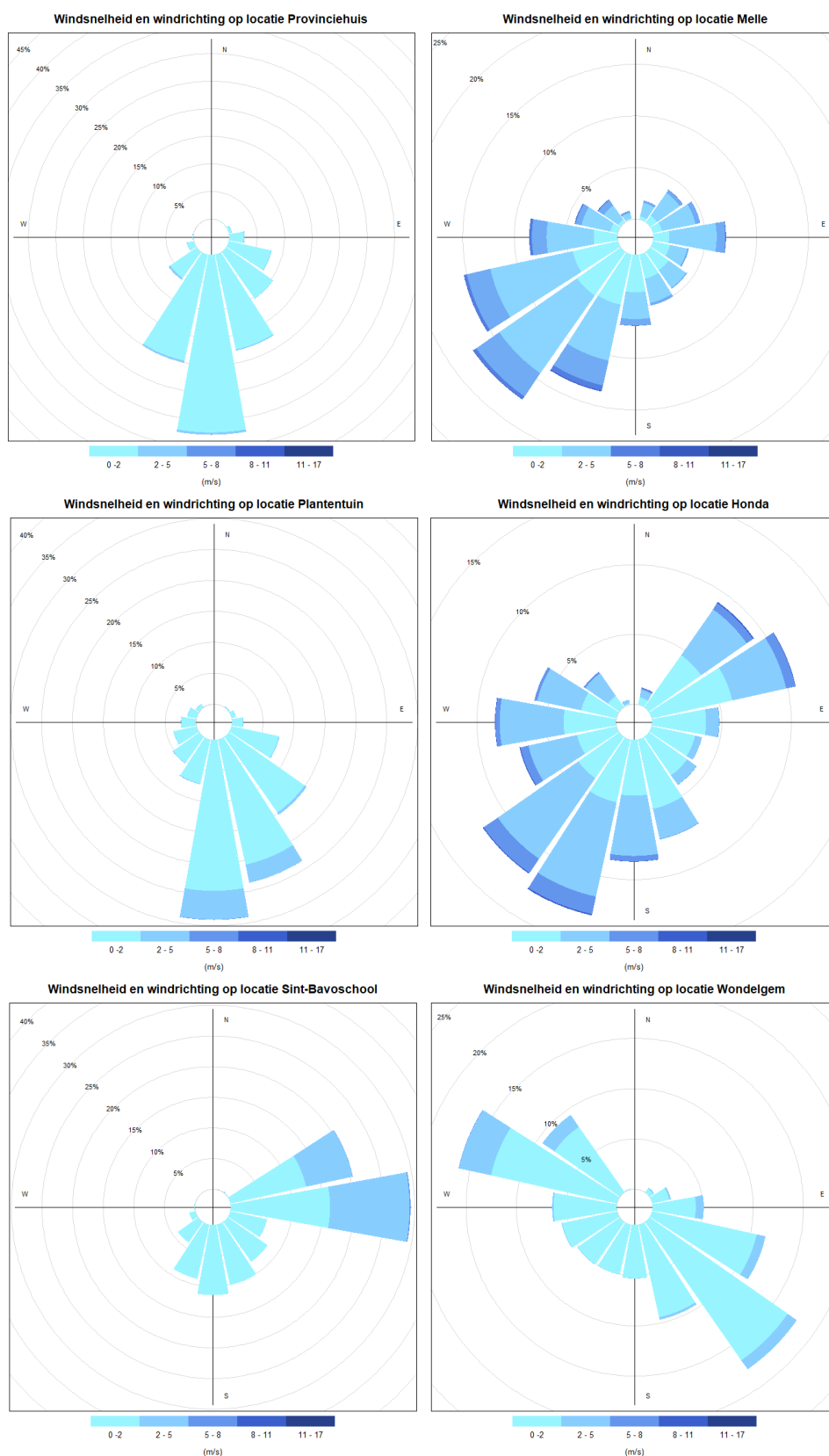
Voor de windrichting is er telkens gerekend met de windrichting van Melle. Doordat de meetpunten op 2 m hoogte staan, kan op sommige locaties zoals in de stad, de windrichting afwijken van de correcte waarde. De wind wordt gedreven tussen de gebouwen waardoor op die manier een complexe stroming omheen de gebouwen wordt gemeten. In Delphin wordt gewerkt met een wind die zich op 10 meter hoogte bevindt waardoor de windrichtingen anders kunnen zijn dan gemeten op 2 meter hoogte.

Plek	Slagregenbelasting in [mm]		
	2017	2018	2019
Provinciehuis	77.03	65.63	72.63
Melle	299.17	228.18	263.49
Plantentuin	56.91	58.36	59.03
Honda	214.55	165.42	203.83
Sint-Bavoschool	115.96	84.39	105.02
Wondelgem	97.16	86.42	111.80

Tabel 4.7: Slagregenbelasting per jaar in mm.

In Tabel 4.7 zijn de jaarlijkse slagregenbelastingen te vinden voor alle locaties. De meeste slagregenbelasting komt voor in Melle, gevolgd door Honda. Melle is landelijk gelegen en Honda bevindt zich in een industrieterrein, waar de windsnelheden hoog kunnen oplopen. Dit is terug te vinden in de windrozen in Figuur 4.11. Hoe donkerder de kleur, hoe meer snelheid de wind heeft in die richting. Opmerkelijk zien we dat Melle steeds de laagste neerslaghoeveelheden kent, maar wel telkens de hoogste slagregenbelasting heeft. De hoge windsnelheden zorgen voor de hoge slagregenbelasting op de locatie Melle en Honda. Door het grote verschil in windsnelheid, bekomen deze locaties ook een groot verschil in slagregenbelasting met de andere locaties. De laagste slagregenbelasting toont zich op de

plaatsen het Provinciehuis, gevolgd door Wondelgem en de Sint-Bavoschool. De lagere waarden zijn te wijten aan de nabijgelegen woningen die zorgen voor lagere windsnelheden.



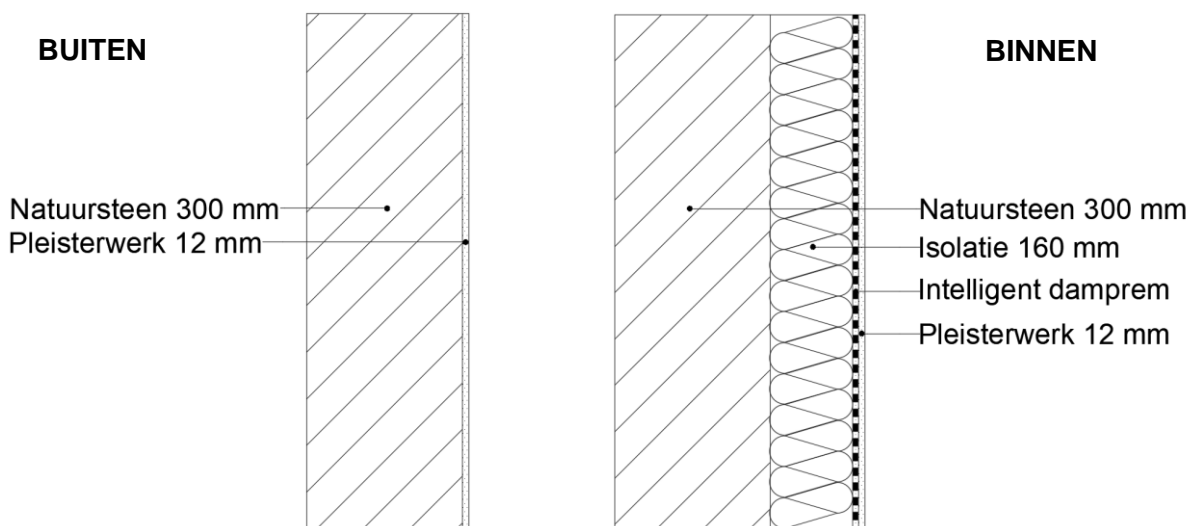
Figuur 4.11: Windrozen die de windsnelheid en richting aanduiden voor alle meetstations in Gent.

5 SOFTWARE DELPHIN

Voor de hygrothermische simulaties wordt er gewerkt met Delphin , versie 6.1.0. Het is een programma ontwikkeld door Bauklimatik Dresden, die HAM (heat, air and moisture) simulaties uitvoert op bouwmaterialen in 1D, 2D of 3D. Delphin kan gebruikt worden om koudebruggen te simuleren en andere hygrothermische probleemgebieden te analyseren. In deze thesis zal het programma gebruikt worden om vorst- en dooicycli te evalueren.

5.1 Muuropbouw

In de historische gebouwen zijn de muren over het algemeen opgebouwd uit een volle natuurstenen muur. In deze thesis wordt de situatie voor en na het plaatsen van isolatie in historische gebouwen onderzocht. Voor de originele muur wordt er een opbouw gekozen van 30 cm natuursteen en 12 mm pleisterwerk aan de binnenkant. De na-geïsoleerde muur is opgebouwd uit 30 cm natuursteen, 16 cm isolatie, een dampscherm en pleisterwerk van 12mm dik. De dikte van de isolatie is gekozen om een U-waarde van 0.24 W/m²K te verkrijgen voor de gehele muur. De maximale warmtegeleiding door de muur is gebaseerd op de EPB-eisen voor buitenmuren van Vlaanderen (2018). Voor de isolatie is geopteerd voor een dampopen isolatie, meer in detail een houtvezel isolatieplaat, waardoor de muur ook naar binnen zou kunnen uitdrogen. Bij een dampdichte isolatie zal de schade, veroorzaakt door plaatsen van isolatie versterkt worden. In de muur is een intelligent damprem geplaatst, die zich zal aanpassen aan de relatieve vochtigheid van de omgeving. De werking hiervan is uitgelegd in hoofdstuk 2.



Figuur 5.1: Muuropbouw in Delphin: de opbouw voor een niet-geïsoleerde muur (links) en een geïsoleerde muur (rechts).

5.2 Materiaaleigenschappen

Om het warmte-, lucht- en vochtgedrag te voorspellen, hebben we enkele belangrijke karakteristieken van de materialen nodig zoals o.a. de massadichtheid (kg/m^3), de soortelijke warmte (J/kgK), de thermische conductiviteit (W/mK), de porositeit (m^3/m^3) enz. (Künzel & Karagiozis, 2010). Deze en ook andere kenmerken worden besproken voor twee soorten natuurstenen waarmee gewerkt zal worden. De Noord-Franse Savonnières is echter niet aanwezig in de catalogus van materialen in Delphin. Er wordt gebruik gemaakt van een materiaalbestand, gemaakt door Guilbert (2018) in haar thesis. Dit bestand is gemaakt door middel van laboproeven op Savonnièressteen. Bentheim daarentegen is wel gekend in Delphin 6.1.0 onder de naam 'Sandstone Bad Bentheim'. In verdere tabellen worden de verschillende materiaalkenmerken beschreven die noodzakelijk zijn voor het verdere onderzoek.

5.2.1 Savonnières

Enkele kenmerken van Savonnières, samengesteld door de waarden van D. Guilbert (2018) en Derluyn (2012) zijn weergegeven in onderstaande tabel 5.1.

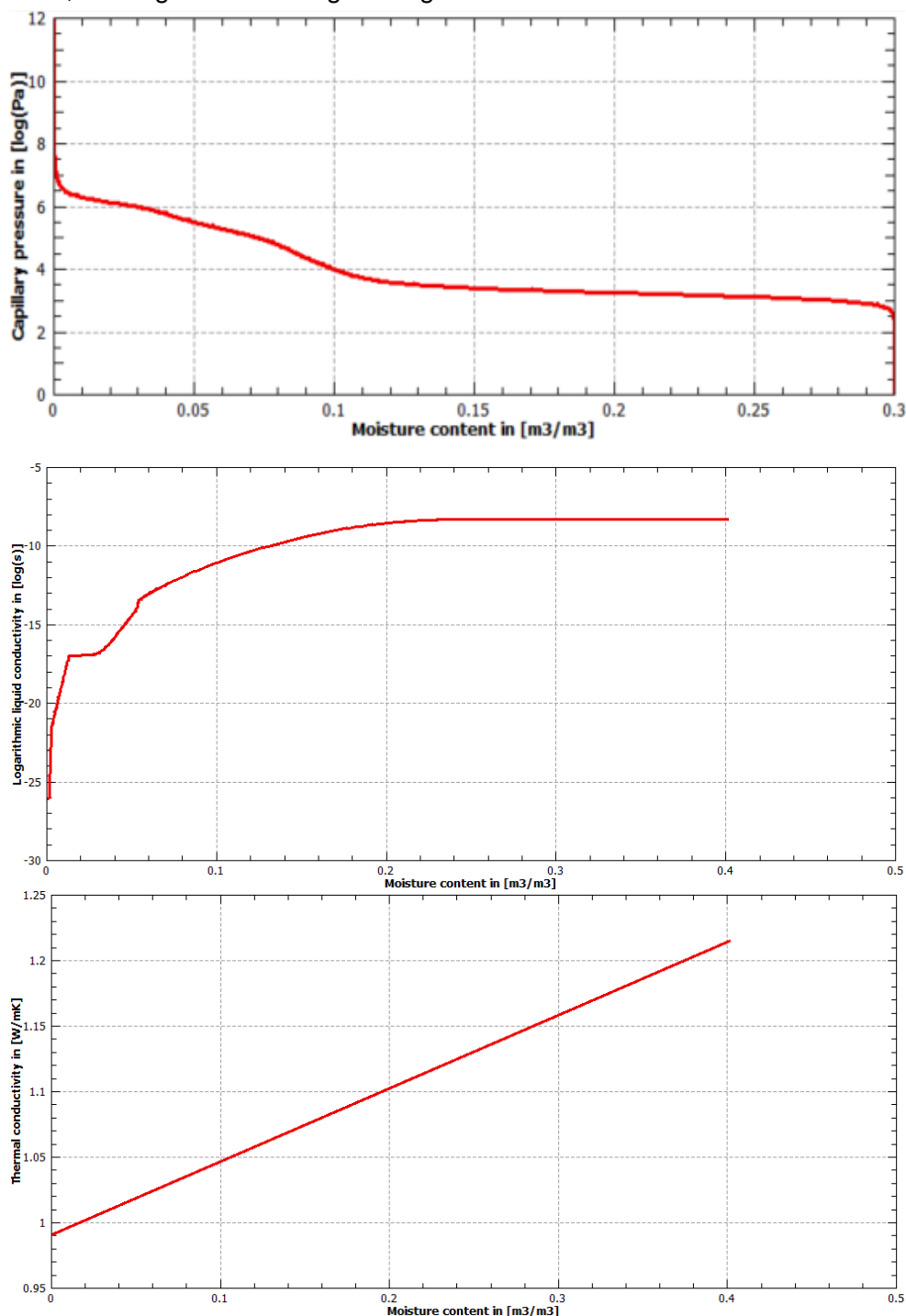
Parameter	Value
Open porositeit	0.345 m^3/m^3
Effectieve saturatie	0.300 m^3/m^3
Warmtegeleiding (droog)	0.99 W/m.K (Derluyn, 2012)
Wateropname coëfficiënt	0.072 $\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$
Specifieke warmtecapaciteit	900 J/kg.K (Derluyn, 2012)
Massadichtheid/ soortelijke massa	1778 kg/m^3
Treksterkte (droog)	1.80 – 2.10 MPa (Derluyn, 2012; Derluyn, Moonen, et al., 2014)
Treksterkte (nat)	1.46 – 1.63 MPa (Derluyn, 2012; Derluyn, Moonen, et al., 2014)

Tabel 5.1: Materiaaleigenschappen van Savonnières.

Open porositeit komt ter sprake wanneer poriën en holten met elkaar in verbinding staan door kanaaltjes of capillairen. Het is de verhouding tussen het volume van de open poriën met het schijnbaar volume van de steen (Dusar et al., 2009).

In het onderzoek naar kritische vorst- en dooicycli is het belangrijk om te weten hoe de steen op vocht reageert. In Figuur 5.2 zijn enkele grafieken opgesteld door het programma Delphin. De bovenste afbeelding toont de capillaire druk in functie van het vochtgehalte. Hoe meer vocht het materiaal bevat hoe lager de capillaire druk zal zijn. De middelste afbeelding toont de geleidbaarheid van een vloeistof in functie van het vochtgehalte. De vloeibare

geleidbaarheid zal eerst snel stijgen bij een laag vochtgehalte en vakt daarna af. In het eerste deel, tot $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ vochthoeveelheid, zal het moeilijker zijn om het vloeibare vocht te transporteren doorheen de steen dan wanneer de natuursteen meer dan $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ vocht bevat. Verder is in Figuur 5.2 ook het verloop van de warmtegeleiding getoond. Hoe droger het materiaal, hoe lager de warmtegeleiding.



Figuur 5.2: Kenmerkende grafieken voor Savonnières: de capillaire druk in functie van het vochtgehalte (bovenaan), de geleidbaarheid van vloeistof in functie van het vochtgehalte (midden) en de warmtegeleiding in functie van het vochtgehalte (onderaan).

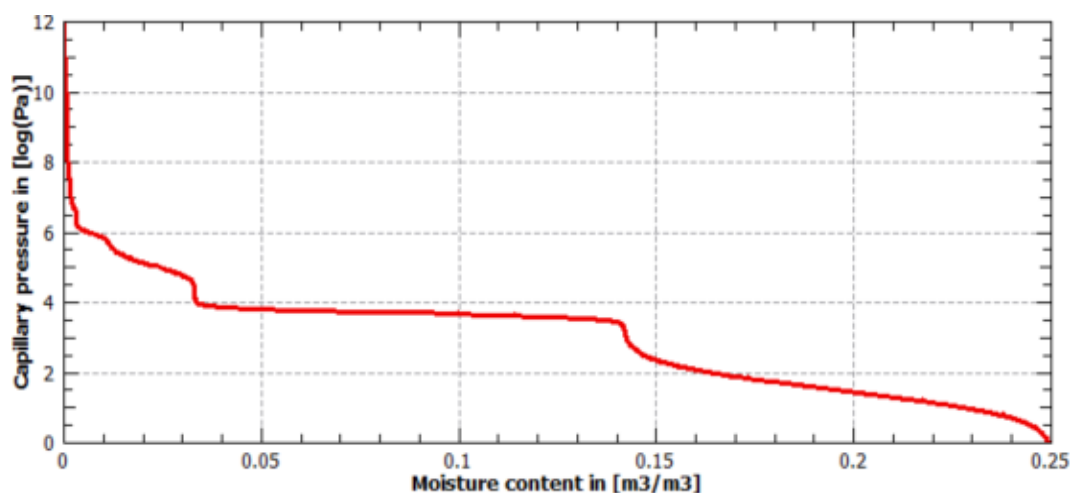
5.2.2 Bentheim

Voor Bentheim zijn de kenmerken opgesomd in Tabel 5.2 waarbij de gegevens uit het materiaalbestand van Delphin komen.

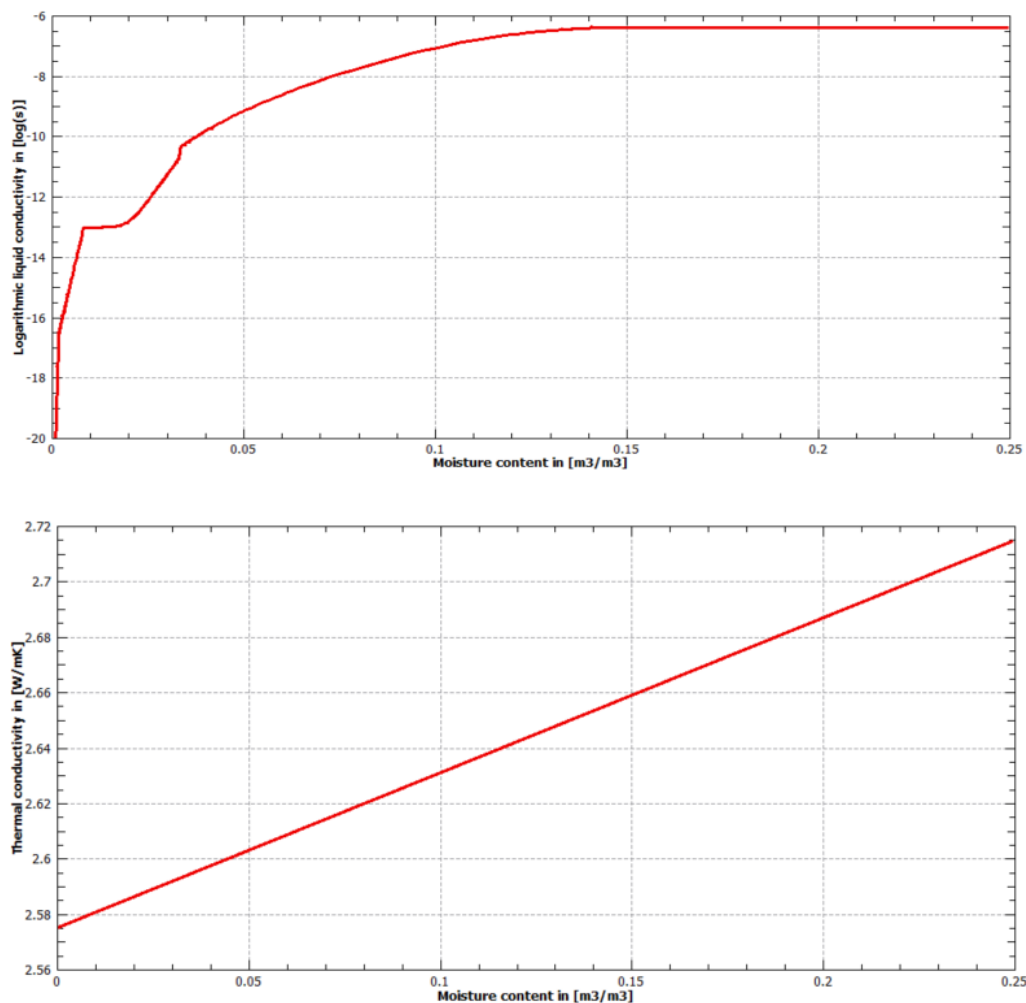
Parameter	Value
Open porositeit	0.2707 m ³ /m ³
Effectieve saturatie	0.2492 m ³ /m ³
Warmtegeleiding (droog)	2.575 W/m.K (Derluyn, 2012)
Wateropname coëfficiënt	0.6687 kg/m ² s ^{1/2}
Specifieke warmtecapaciteit	910 J/kg.K (Derluyn, 2012)
Massadichtheid/ soortelijke massa	1933 kg/m ³
Treksterkte	1.65 – 3.10 MPa (Bakker & Barnhoorn, 2019; Ojala, 2011)

Tabel 5.2: Materiaaleigenschappen van Bentheim.

Ook wordt gekeken naar de grafieken in Delphin, te vinden bij het materiaal bestand. Figuur 5.3 toont in de grafiek waar capillaire druk ten opzichte van het vochtgehalte staat, ook een dalend verloop zoals Savonnières. Eerst zien we een sterke daling van de capillaire druk (67%) bij licht stijgend vochtgehalte. Vanaf een vochtgehalte van 0.04 m³/m³ begint de capillaire druk te stagneren tot een waarde van 0.15 waarna we opnieuw een sterkere daling krijgen. Figuur 5.4 geeft geleidbaarheid van vloeistof weer in functie van het vochtgehalte. Hoe meer vocht, hoe hoger de geleidbaarheid. De onderste grafiek in de Figuur 5.4 toont het verloop van de warmtegeleiding, wat logischerwijs stijgt als het materiaal vochtiger wordt.



Figuur 5.3: De capillaire druk in functie van het vochtgehalte voor Bentheim.



Figuur 5.4: De geleidbaarheid van vloeistof in functie van het vochtgehalte (bovenaan) en de warmtegeleiding in functie van het vochtgehalte (onderaan) voor Bentheim.

5.3 Inputgegevens

5.3.1 Beginvoorwaarden

De beginvoorwaarden van de simulaties kunnen we niet veranderen. Het zijn vaste waarden die Delphin oplegt aan het project voor de start van de simulatie. Zo rekent Delphin met een vaste initiële binnentemperatuur van 12°C en een vaste initiële relatieve vochtigheid van 80%. Bij de start van de simulatie is het materiaal redelijk droog, waardoor de eerste 4 jaar van de simulatie als conditioneringsperiode zal gerekend worden.

5.3.2 Interne randvoorwaarden

De interne randvoorwaarden zijn geplaatst aan de uiterste binnenzijde van de muuropbouw. Deze voorwaarden vereisen twee parameters: de interne relatieve vochtigheid en de binnentemperatuur. Voor elk klimaattype zullen deze parameters verschillen van elkaar. In de klimaatdata van Brussel, voor zowel de historische als toekomstige, variëren de waarden voor relatieve vochtigheid tussen 35% en 65%. De binnentemperatuur heeft als minimale waarde 20°C en als maximale waarde 25°C. De klimaatdata vanuit Gent heeft eenzelfde temperatuurschommeling als in Brussel maar de interne relatieve vochtigheid varieert eerder tussen de 40% en 65%. Deze twee parameters zijn voor elke locatie van het MOCCA-project verschillend.

5.3.3 Externe randvoorwaarden

De externe randvoorwaarden worden toegepast op de buitenkant van de muuropbouw, m.a.w. op de natuursteen in beide situaties. De randvoorwaarden zijn gebaseerd op verschillende klimaatparameters, maar niet iedere randvoorwaarde is gebaseerd op dezelfde soort klimaatparameters. In Tabel 5.3 zijn de verschillende randvoorwaarden opgelijst met hun bijhorende klimaatparameters.

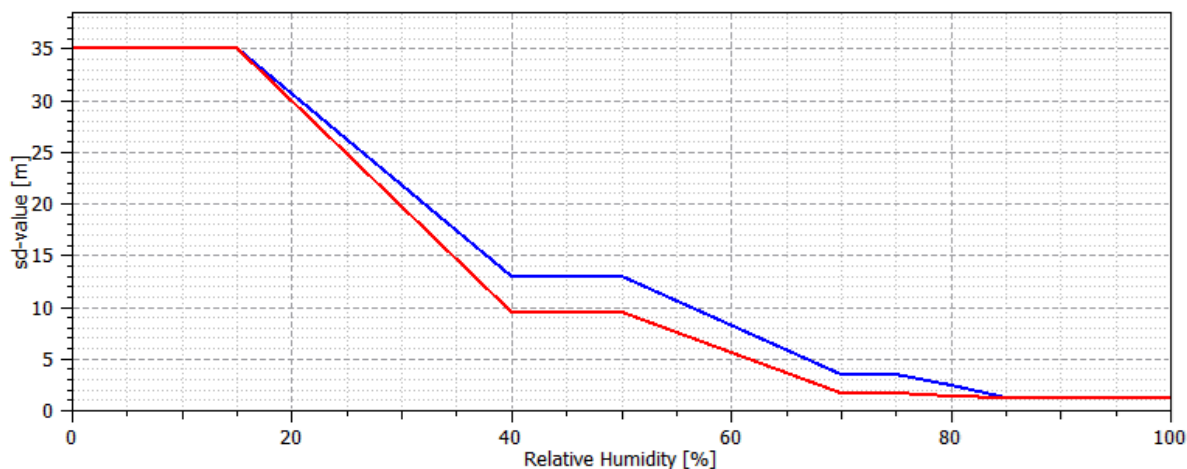
Externe randvoorwaarde	Klimaatparameter
Warmtegeleiding	Buitenluchttemperatuur
Dampdiffusie	Buitenluchttemperatuur
	Externe relatieve vochtigheid
Slagregen	Neerslag op een horizontaal vlak
	Windsnelheid
	Windrichting
	Buitenluchttemperatuur
	Externe relatieve vochtigheid
Kortgolvlige zonnestraling	Directe kortgolvlige straling op een horizontaal vlak
	Diffuse kortgolvlige zonnestraling op een horizontaal vlak
Langgolvlige straling	Atmosferische tegenstraling

Tabel 5.3: Externe randvoorwaarden met hun bijhorende klimaatparameters.

Om de kortgolvlige straling te kunnen berekenen heeft Delphin 6.1.0 een absorptiecoëfficiënt van het gebouwoppervlak nodig. In dit onderzoek wordt hiervoor een waarde genomen van 0.6. Voor de langgolvlige straling is er een emissiecoëfficiënt nodig van het gebouwoppervlak, wat hier als waarde 0.9 wordt aangenomen.

5.3.4 Weerstand

In de muuropbouw met isolatie is er telkens een intelligent damprem aanwezig die verschillend werkt bij een andere relatieve vochtigheid. Het dampscherm is gekozen in Delphin met de voorwaarde dat de folieweerstand afhankelijk is van richting van de dampbeweging. Naar mate de relatieve vochtigheid stijgt, daalt de dampdiffusiewaarde (Figuur 5.5). In de zomer is de relatieve vochtigheid hoger waardoor het dampscherm eerder als een dampopen folie zal reageren. In de winter echter is de relatieve vochtigheid lager waardoor het dampscherm een hoge dampweerstand aanneemt en reageert als een dampdichte folie. Hoe hoger deze waarde, hoe beter het materiaal in staat is damp tegen te houden.



Figuur 5.5: Dampdiffusieweerstand weergegeven in functie van de relatieve vochtigheid voor het gebruikte dampscherm in Delphin.

5.4 Muurvoorwaarden

5.4.1 Oriëntatie

Er worden drie verschillende windrichtingen, waarnaar de gevel gericht staat, gebruikt in de simulaties: zuidwest, noord en noordwest. De zuidwestelijke oriëntatie is van groot belang voor vochtgerelateerde schade, doordat de meeste regen in België vanuit die windrichting komt. De noordelijke en noordwestelijke oriëntatie worden gebruikt om het effect te onderzoeken als er zich een tegenovergestelde situatie voordoet. In deze windrichtingen is de neerslaghoeveelheid een stuk minder en zullen de temperaturen lager zijn door een mindere blootstelling aan de zon.

5.4.2 Locaties

De coördinaten van de locaties van de onderzochte muuropbouwen in kwestie worden verwerkt in het klimaatbestand zelf. Delphin leest uit het klimaatbestand die waarden af samen met de tijdzone.

5.4.3 Opdeling in de muur

Om de verschillende outputs te genereren is de natuursteen in de muur opgedeeld in meerdere stukjes. Doordat de eerste 5 cm bij natuursteen belangrijk zijn voor verwerking, is deze zone opgesplitst in 10 delen van 5 mm. De resterende 25 cm die overblijft is verdeeld in secties van 1 cm. Zo is de natuursteen in het totaal in 35 stukjes verdeeld om de simulaties op uit te voeren. Per deeltje kan een ingevoerde output aangevraagd worden en zal Delphin de gegevens van dat deeltje bezorgen.

5.5 Outputgegevens

Om goede resultaten te bekomen is het belangrijk om een aantal conditioneringsjaren toe te voegen aan je output. Deze jaren zijn nodig om in Delphin een evenwicht te bereiken in het vocht- en warmtetransport. Hiervoor onderwerpen we een muuropbouw aan enkele gemiddelde weerjaren. Uit eerdere HAM-simulaties in Delphin is gebleken dat na drie à vier conditioneringsjaren de muur tijd genoeg heeft gehad om te stabiliseren. Na de conditioneringsjaren wordt gestart met het referentiejaar waarin we het gedrag van de muuropbouw willen weten. De conditioneringsjaren en het referentiejaar worden als identiek beschouwd. In de outputgegevens is data opgevraagd per uur de temperatuur, relatieve vochtigheid, ijsmassa en vochtgehalte. Hierbij wordt dan door Delphin een gemiddelde waarde per uur opgeslagen in de dataset.

6 SIMULATIES MET KLIMAATSCENARIO'S BRUSSEL

6.1 Vooraf te onderzoeken parameters

Het voornaamste doel van deze thesis is het analyseren van kritische vorst- en dooicycli in de Noord-Franse natuursteen Savonnières en de Duitse natuursteen Bentheim, beiden sterk verschillend in microscopische en macroscopische samenstelling. Voorafgaand aan dit onderzoek wordt gekeken naar verschillende parameters zoals temperatuur, vochtaccumulatie en ijsmassa. Alle parameters worden bekeken in functie van de tijd en diepte van de steen.

6.1.1 Temperatuur

Eén van de belangrijkste parameters om kritische vorst- en dooicycli te bereiken is een negatieve temperatuur. Zonder een negatieve temperatuur is het water niet in staat om te bevriezen. Niet elke periode met een negatieve temperatuur zal zorgen voor ijsvorming in de natuursteen (K. Hall, 2007). Een tweede belangrijke factor voor het bereiken van kritische vries- en dooicycli is water, nodig voor de ijsvorming. Hoeveel water er in welke soort poriën zal bevriezen, hangt af van de poriëngrootte. Als er maar weinig water in de muur aanwezig is, zal de temperatuur niet altijd genoeg dalen om die hoeveelheid water te laten bevriezen. Als dit voorkomt, blijft het water in een onderkoelde situatie (Matsuoka, 2001).

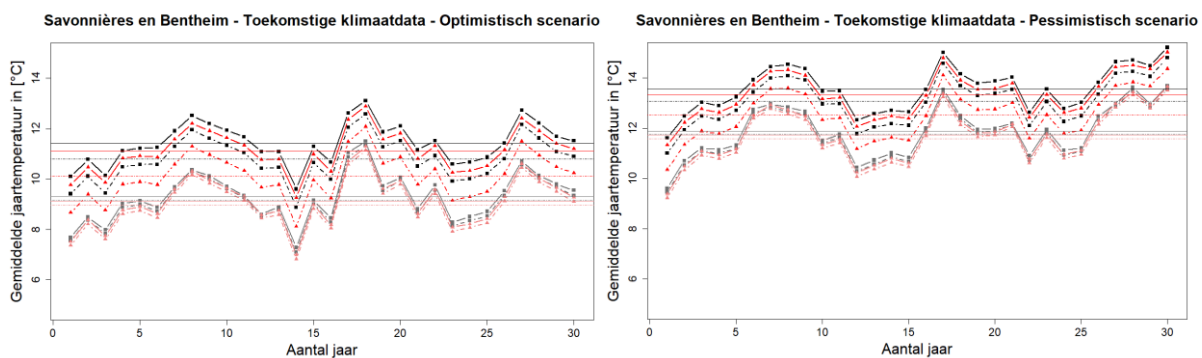
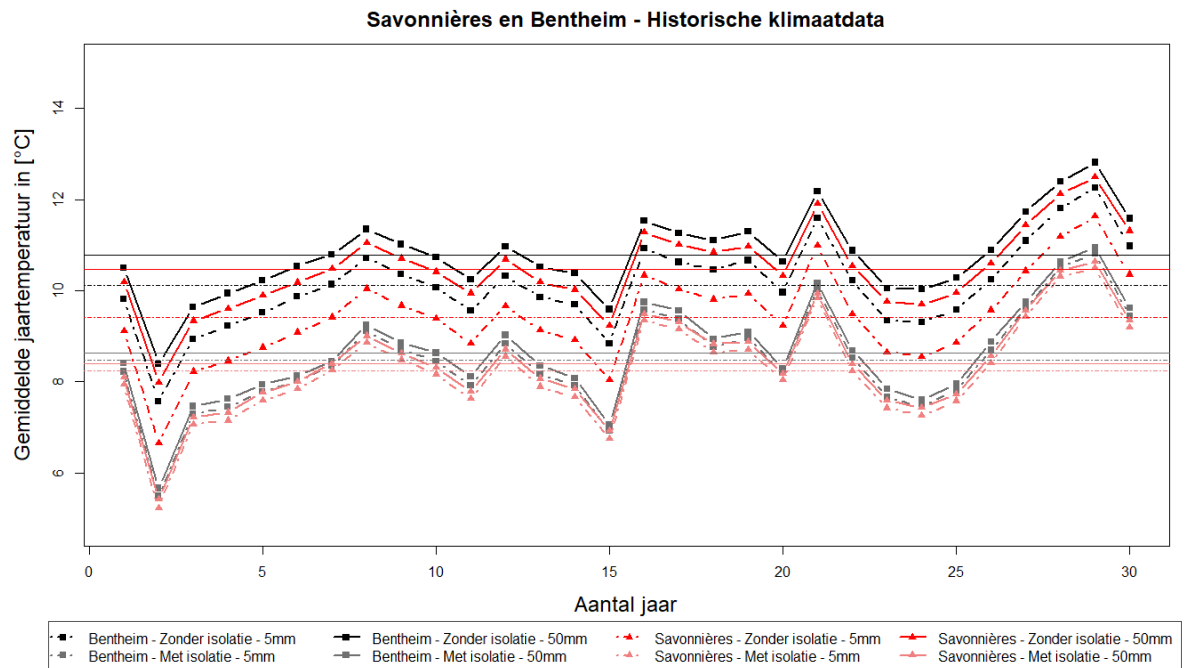
In deze paragraaf zal een inschatting gemaakt worden hoe beide natuurstenen zullen reageren op de buitentemperatuur. Hiervoor wordt de steen in verschillende secties verdeeld om te kunnen simuleren in Delphin. Doordat de meeste ijsmassa zich meestal in de eerste 5 cm van de natuursteen bevindt, startend van aan het gevelvlak, wordt die zone in Delphin opgedeeld in secties van 1 mm om meer specifieke resultaten te bekomen over een kleinere sectie. De overige 25 cm wordt opgedeeld in delen van 1 cm breed. Voor beide natuurstenen wordt geanalyseerd hoe de gemiddelde jaartemperatuur in de steen zich gedraagt op een diepte van 5mm en een diepte van 50mm voor drie verschillende windrichtingen: zuidwest, noord en noordwest over een periode van 30 jaar. Die 30 jaar loopt van 1976 tot 2005 voor de historische klimaatdata en van 2070-2099 voor de toekomstige klimaatdata. Beide perioden zijn een klimaatprojectie van hoe het klimaat toen was of zal zijn. Het weer op een bepaalde dag in de klimaatprojectie is niet hetzelfde als het weer op die bepaalde dag in het verleden, het is slechts een representatie waarbij de gemiddelde waarden overeenkomen met de gemiddelde waarden van die periode in het verleden.

6.1.1.1 Zuidwestelijke oriëntatie

De windrichting zuidwest zal een invloed ondervinden van de zon, aangezien het zuiden de oriëntatie is die het meest beïnvloed wordt door de zon. Zoals in hoofdstuk 4 besproken, zal de gemiddelde temperatuur ieder jaar stijgen in de toekomst, ongeacht welk klimaatscenario er van toepassing zal zijn. Als gevolg van de stijgende temperaturen in het Belgische klimaat, zullen ook de temperaturen voor eenzelfde diepte in de muur stijgen naar de toekomst toe, afgebeeld in figuur 6.1. De stijging bij een niet-geïsoleerde muur met Savonnières heeft een voorspelde stijging voor toekomstige klimaatscenario's tussen 0.70°C en 3.12°C op 5 mm diepte en een stijging van 0.64°C en 2.86°C op 50 mm diepte. Respectievelijk bedragen de waarden voor Bentheim tussen 0.67°C tot 2.95°C en tussen 0.64°C en 2.79°C. Voor een geïsoleerde Savonnièresmuur bedragen de stijgingen tussen 0.72°C en 3.34°C ($\pm 0.01^\circ\text{C}$) voor zowel 5 mm diepte als 50 mm diepte en bij een niet-geïsoleerde Bentheimmuur tussen 0.68°C ($\pm 0.01^\circ\text{C}$) en 3.27°C ($\pm 0.01^\circ\text{C}$). Over het algemeen zijn de temperatuurstijgingen altijd kleiner voor Bentheim dan voor Savonnières.

Het temperatuurverschil tussen 5 mm en 50 mm zal in beide natuurstenen anders evolueren. Eerst wordt er gekeken naar de situatie voor een niet-geïsoleerde muur. In Bentheimsteen is het verschil tussen 5 mm en 50 mm diepte ongeveer 0.67°C volgens historische klimaatdata. In de toekomst zal het verschil tussen de twee dieptes lichtjes dalen. Voor het optimistische toekomstig klimaatscenario (RCP2.6) bedraagt de waarde 0.63°C en voor het pessimistisch toekomstig klimaatscenario (RCP8.5) 0.50°C. Bij de niet-geïsoleerde Savonnièressteen bedraagt de afwijking tussen de temperatuur op 5 mm en 50 mm diepte 1.06°C in het historisch klimaat. In de toekomst wordt een waarde van 1.00 °C verwacht voor het optimistisch scenario en 0.80 °C voor het pessimistisch scenario. Ook hier zal het verschil in temperatuur tussen de twee dieptes dalen in de toekomst. Het lijkt dat Savonnières meer daalt in de toekomst dan Bentheim, maar procentueel gezien dalen ze ongeveer evenveel t.o.v. het historische klimaat, namelijk -6% voor het optimistisch toekomstige klimaatscenario en -25% voor het pessimistisch toekomstige klimaatscenario.

Verder wordt gekeken naar de muuropbouw met na-isolatie, wat slechts kleine verschillen oplevert tussen de twee gemeten dieptes voor beide natuurstenen (figuur 6.1). Bentheim zal in de historische data een verschil kennen van 0.16°C tussen de 2 verschillende dieptes (5 mm en 50 mm) terwijl het in de toekomst voor beide scenario's een verschil zal kennen van 0.14°C. Bij de Savonnières is de waarde gelijk aan de waarde bij Bentheim voor de historische klimaatdata maar voor de toekomstige klimaatdata heeft het verschil een waarde van 0.15°C voor het optimistisch klimaatscenario en 0.14°C voor het pessimistisch klimaatscenario. Door isolatie aan de muuropbouw toe te voegen zal het temperatuurverschil ongeveer hetzelfde blijven ongeacht in welk klimaat de steen zich bevindt. De temperatuur van de muur is over de gehele diepte een aantal graden gedaald door deze aanpassing (Figuur 6.1). Bij de plaatsing van isolatie zal de volledige steen eerder de temperatuur aannemen van de buitentemperatuur omdat de warmte van de binnenruimte minder verloren gaat.

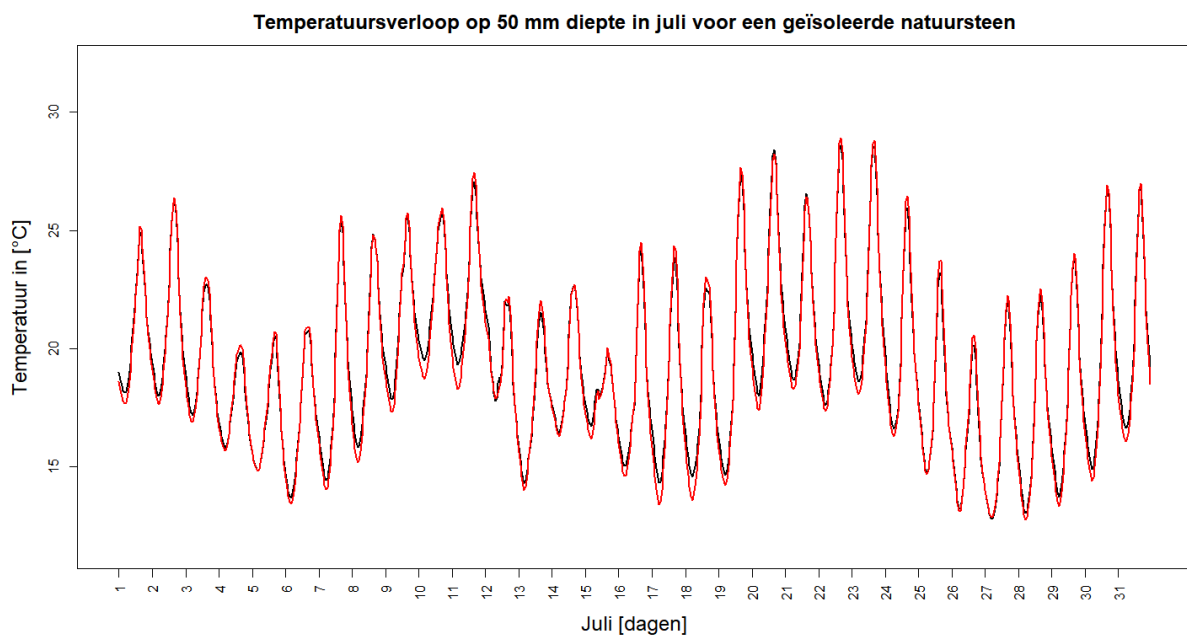
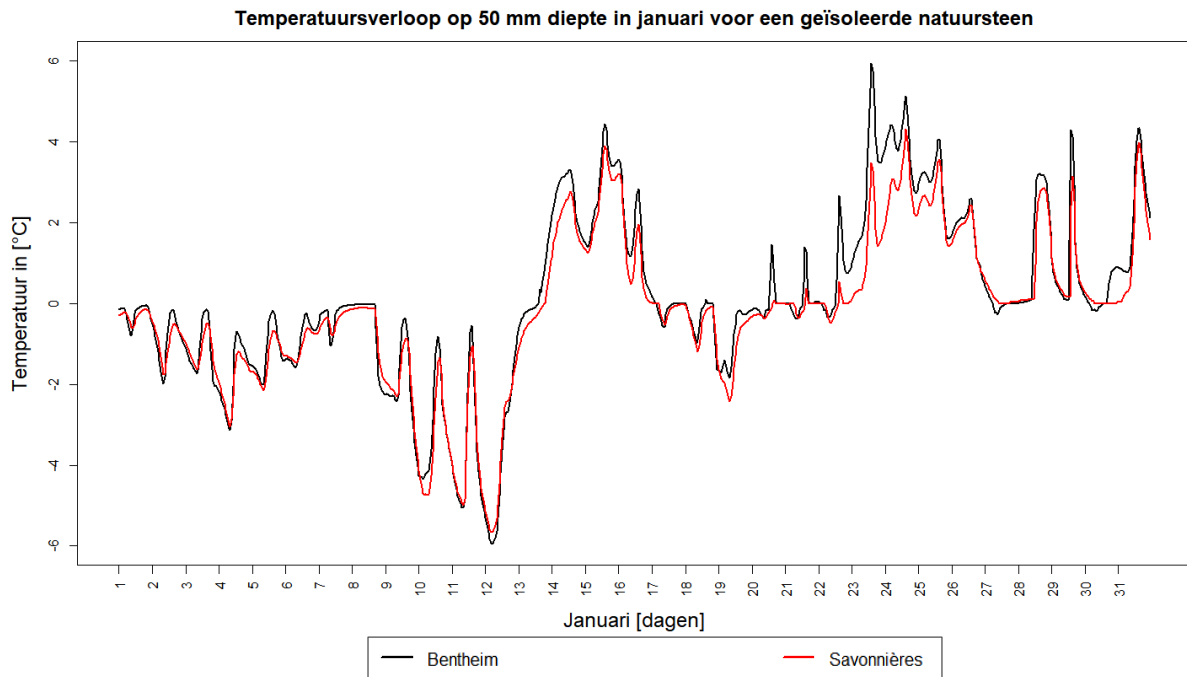


Figuur 6.1: De gemiddelde jaarlijkse temperatuur [°C] in Savonnières en Bentheim voor een zuidwestelijke oriëntatie tijdens een periode van 30 jaar in de historische klimaatdata (bovenaan) en 30 jaar in de toekomstige optimistische en pessimistische klimaatdata (onderaan). Temperaturen worden weergegeven op een diepte van 5mm en 50mm voor zowel een niet-geïsoleerde als een geïsoleerde muuropbouw.

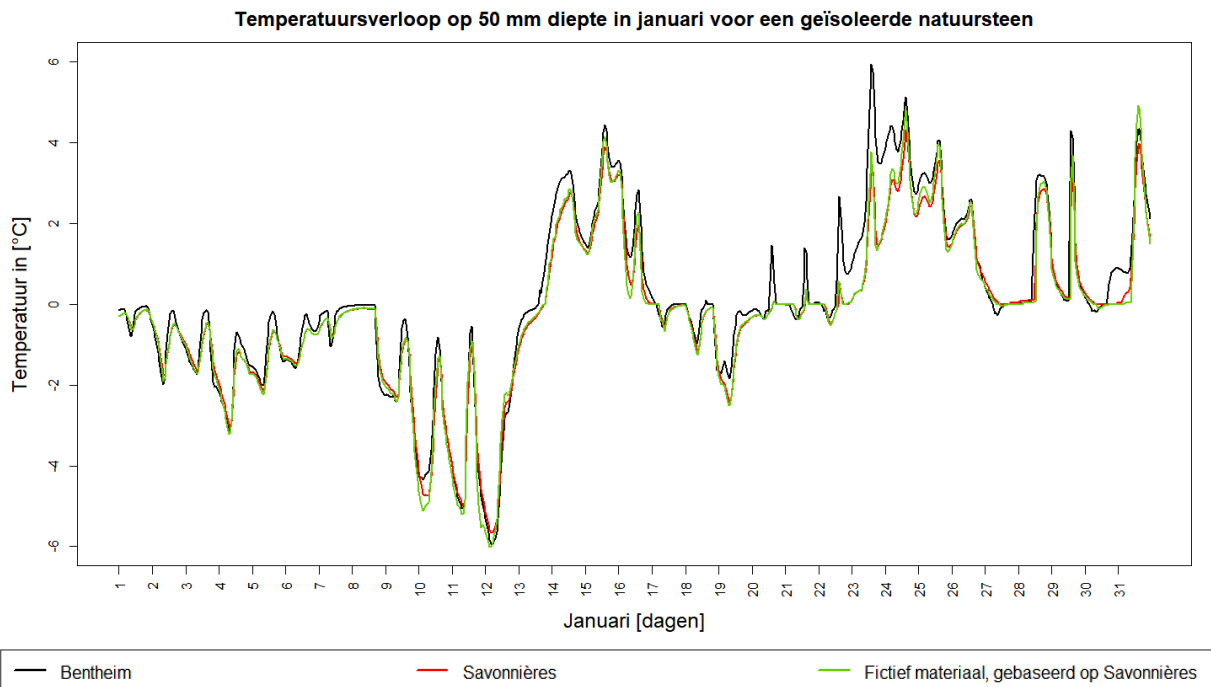
Als de vergelijking wordt gemaakt tussen Savonnières en Bentheim in de muuropbouw zonder na-isolatie dan ligt het temperatuurverschil in de Savonnièressteen tussen 5 mm en 50 mm diepte 1.6 keer hoger dan bij Bentheim. Dit valt zonder de berekening ook op te merken in Figuur 6.1 waarbij de horizontale lijnen de gemiddelde temperatuur voor 30 jaar weergeven. Daarnaast merken we dat de temperatuur in Savonnières steeds lager ligt dan de temperatuur in Bentheim, ongeacht in welk klimaat de natuurstenen zich bevinden. Het grotere temperatuurverschil en de lagere plaatselijke temperatuur kan twee mogelijk oorzaken hebben. Enerzijds is dit afhankelijk van de hoeveelheid energie die het kost om de materialen op te warmen en anderzijds hangt het af van hoe gemakkelijk de natuurstenen de warmte doorlaten.

Eerstgenoemde wordt bepaald door de soortelijke warmte van de steen. Deze parameter geeft aan hoeveel energie er nodig is om 1 kg materiaal op te warmen met 1 Kelvin. Bij beide natuurstenen ligt deze waarde rond de $900\text{J/kg}\cdot\text{K}$. Het verschil tussen de twee natuurstenen is slechts $10\text{J/kg}\cdot\text{K}$ waardoor deze parameter geen doorslaggevende rol speelt op het verschillend thermisch gedrag. De andere mogelijke oorzaak wordt aangetoond door de warmtegeleidingscoëfficiënt, ook wel de lambda-waarde genoemd. De parameter is een materiaalconstante die aangeeft hoe goed een materiaal warmte geleidt. Bij een hogere waarde zal het materiaal beter warmte overbrengen van de ene kant naar de andere kant van de steen. De kalksteen Savonnières kent hierbij een redelijk lage waarde, $0.990\text{ W/m}\cdot\text{K}$, in vergelijking met de waarde van de kalkzandsteen Bentheim, $2.575\text{ W/m}\cdot\text{K}$. Volgens Wikipedia (2021) zou warmte zich met een kleinere snelheid overdragen in materialen met een lagere warmtegeleidingscoëfficiënt. Zo zorgen de lage waarde van Savonnières voor een dempende invloed op temperatuurschommelingen en zou het ook lagere piekwaarden aantonen bij vorst of zonnestralingen. In Figuur 6.2 is het temperatuurverloop voor januari te zien. De lagere piekwaarden voor deze periode zijn goed op te merken op een diepte van 50 mm. De piekwaarden bij de temperaturen onder de 0 graden zijn voor vorst kleiner in Savonnières dan in Bentheim. Wanneer in januari de zon schijnt is dit duidelijk te merken doordat Savonnières een lagere waarde heeft dan Bentheim. In het algemeen bereikt Savonnières kleinere temperatuurschommelingen dan Bentheim. Als dan gekeken wordt naar de maand juli in Figuur 6.2 dan is er amper verschil tussen de twee natuurstenen, terwijl in de maand juli veel zon aanwezig is.

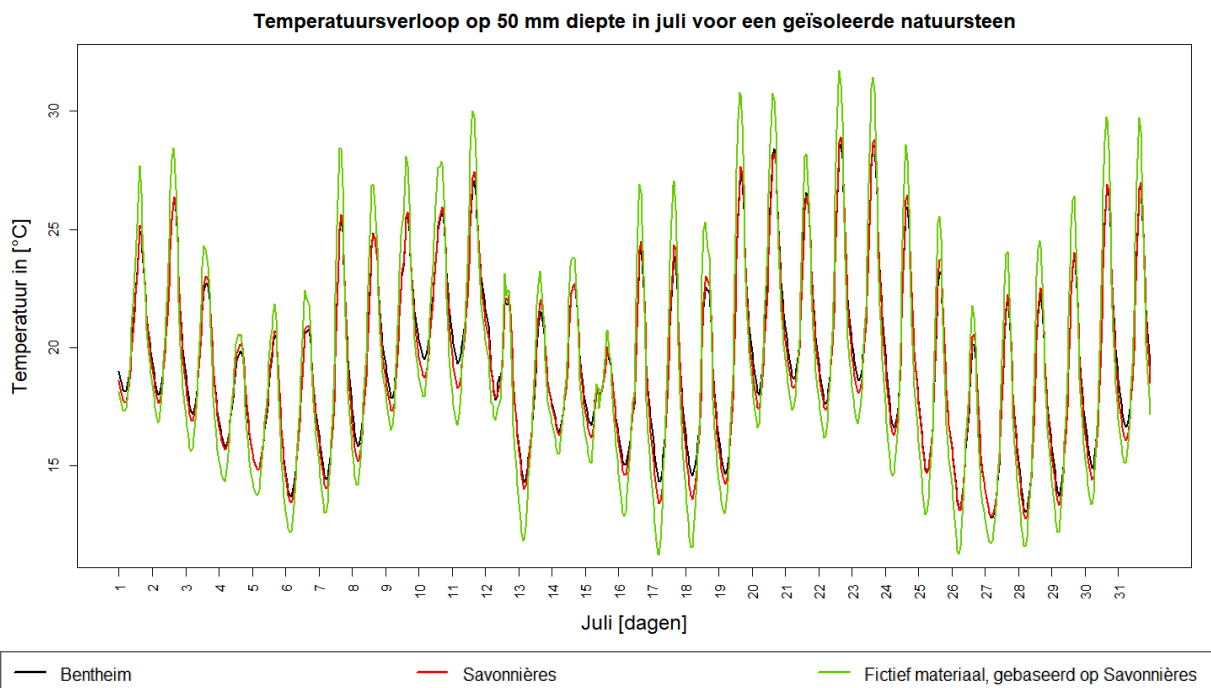
Een aanname hierbij zou zijn dat de soortelijke warmte hierbij ook een rol speelt. Savonnières zou oorspronkelijk voor kleinere temperatuurschommelingen zorgen maar door de grote aanwezigheid van zon is deze verandering niet echt zichtbaar. De soortelijke warmte van Savonnières ligt lager dan die van Bentheim waardoor Savonnières veel minder energie nodig heeft om de steen op te warmen met 1 Kelvin. Doordat er in de zomer veel meer zon aanwezig is kan Savonnières in de buurt blijven van Bentheim en worden de kleinere temperatuurschommelingen, als effect van een lagere lambda-waarde, niet duidelijk in de maand juli. Deze aanname wordt bevestigd door een test uit te voeren in Delphin met een fictief materiaal. Het materiaalbestand van Savonnières is aangepast naar een lagere waarde van soortelijke warmte, $200\text{J/kg}\cdot\text{K}$, in plaats van de $900\text{J/kg}\cdot\text{K}$. In Figuur 6.4 valt op te merken dat de temperatuurschommelingen nu nog groter worden, waardoor de soortelijke warmte het effect van de lagere piekwaarden van de zonnestraling tegenwerkt. Ter bevestiging dat dit enkel de piekwaarden van de zonnestraling tegenwerkt is de maand januari in Figuur 6.3 te zien voor het fictief materiaal, als variant op Savonnières, in vergelijking met dezelfde waarden voor Bentheim. Wanneer het een mooie winterdag is met veel zonnestraling valt het op dat het fictieve materiaal meer afwijkt van het oorspronkelijk Savonnières materiaal.



Figuur 6.2: Temperatuurverloop voor Bentheim en Savonnières in januari (bovenaan) en in juli (onderaan) voor een willekeurig jaar uit de historische klimaatdata. De natuurstenen bevinden zich in een geïsoleerde muuropbouw.

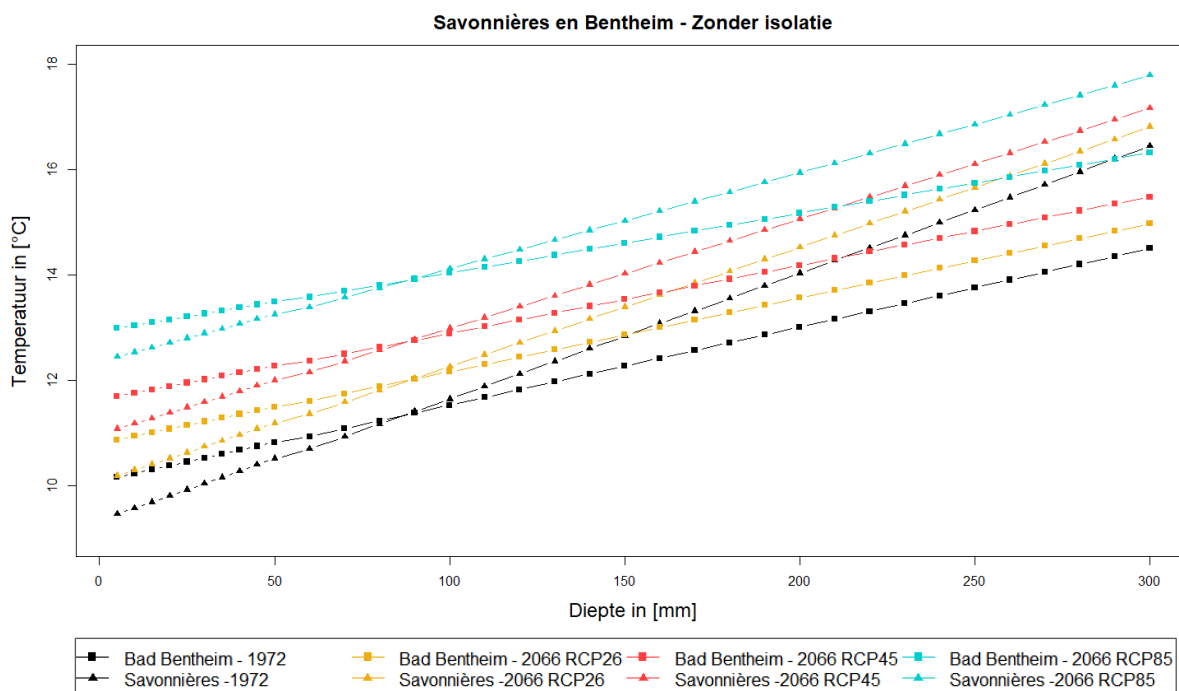


Figuur 6.3: Temperatuurverloop in januari voor een willekeurig jaar uit de historische klimaatdata.



Figuur 6.4: Temperatuurverloop in juli voor een willekeurig jaar uit de historische klimaatdata.

Naast deze gevolgen zal de lagere warmtegeleidingscoëfficiënt zorgen voor een beter isolerende werking van de natuursteen Savonnières. Hierdoor zal de buitenkant van de steen kouder blijven dan bij kalkzandsteen Bentheim, die meer invloed van de binnentemperatuur zal ondervinden door zijn minder isolerende waarde. Als gevolg hiervan zal de helling van het temperatuurverschil tussen de buitenzijde en de binnenzijde van de steen sneller dalen bij de Savonnièressteen. Dit is duidelijk zichtbaar aan de helling van de grafiek in de Figuur 6.5 waar de temperatuur in functie van de diepte wordt afgebeeld voor een niet-geïsoleerde muur. Savonnières helt veel steiler dan Bentheim, wat betekent dat de buitenkant van de muur met Bentheim een hogere waarde kent en de binnenkant van de muur een lagere waarde in vergelijking met Savonnières. Bij een geïsoleerde muur is dit verschil echter veel kleiner en is het verschil in hellingshoek niet duidelijk in een grafiek (Bijlage A). Als de effectieve temperaturen erbij worden genomen dan is de helling van het temperatuurverloop in de natuursteen bij Savonnières nog steeds steiler dan die bij Bentheim. Bij een geïsoleerde muur zal Savonnières, ondanks zijn steilere helling, over de gehele diepte met zijn temperatuur onder de temperatuur van Bentheim blijven. Het temperatuurverschil tussen de voor- en achterkant van een niet-geïsoleerde steen per klimaatscenario is te vinden in Tabel 6.1.



Figuur 6.5: Het temperatuurverloop over de gehele diepte van de muur voor Savonnières en Bentheim.

Temperatuurverschil tussen voor- en achterkant van een niet-geïsoleerde natuursteen [°C]		
Klimaatscenario	Bentheim	Savonnières
Historisch klimaat	1.04	1.17
Optimistisch toekomstige klimaatscenario (RCP2.6)	0.93	1.11
Gemiddeld toekomstig klimaatscenario (RCP4.5)	0.97	1.09
Pessimistisch toekomstige klimaatscenario (RCP8.5)	0.94	1.03

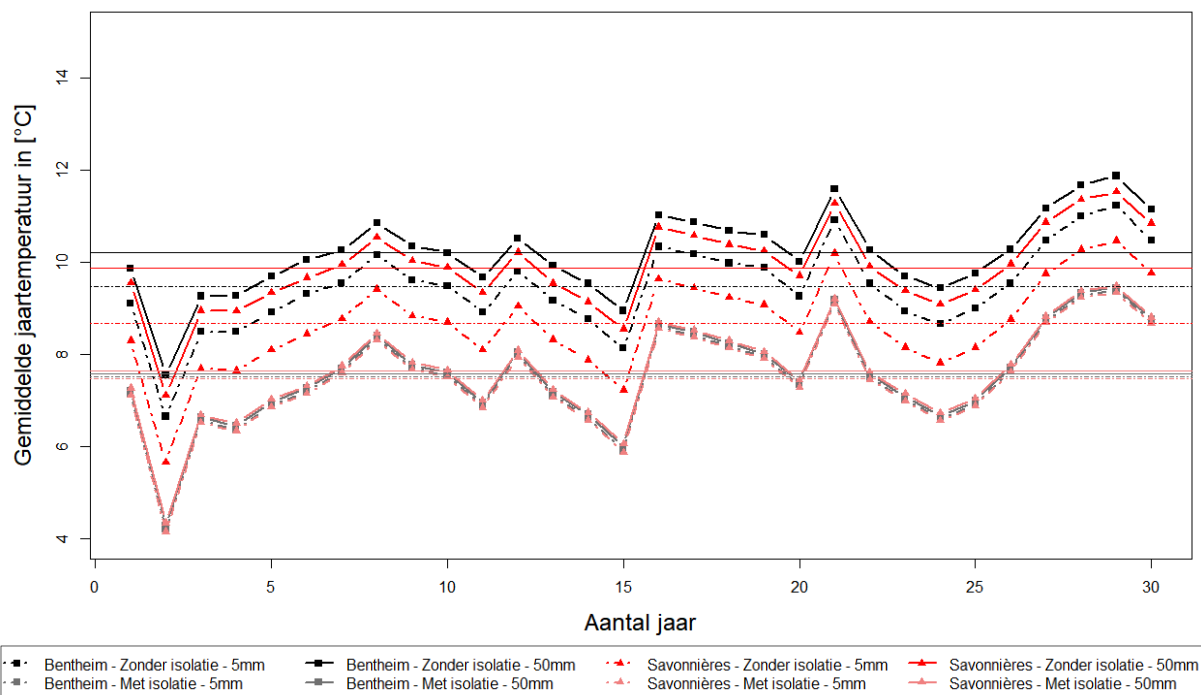
Tabel 6.1: Temperatuurverschil tussen voor- en achterkant van de twee verschillende natuurstenen in [°C] voor de verschillende klimaatscenario's.

6.1.1.2 Noordelijke en noordwestelijke oriëntatie

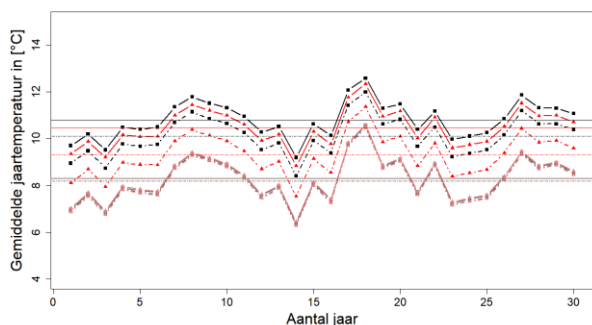
Bij de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie lopen de temperaturen in de muur zeer gelijkaardig, tot op een tiende na. De waarden liggen voor beide oriëntaties een stuk lager dan in de zuidwestelijke oriëntatie. De procentuele stijging van de temperaturen op een diepte van 5 mm en 50 mm is gelijklopend voor beide oriëntaties (Figuur 6.6). In de noord en noordwest gerichte muur liggen de waarden de temperatuurstijging in de toekomst voor een niet-geïsoleerde Savonnièresmuur tussen 0.66°C en 3.13°C op een diepte van 5 mm en tussen 0.61°C en 2.88°C op een diepte van 50 mm. Bij een muur met Savonnières in combinatie met na-isolatie liggen de temperatuurstijgingen een stuk ruimer dan bij de zuidwest oriëntatie. Ze liggen tussen 0.69°C en 3.38 (± 0.01) °C op een diepte van 5 mm en tussen 0.69 °C en 3.35 (± 0.01) °C op een diepte van 50 mm. Voor de niet-geïsoleerde muur met Bentheim is een stijging te merken die loopt van 0.64°C tot 2.97°C voor een diepte van 5 mm en van 0.60°C tot 2.82°C voor een diepte van 50 mm. Bij een geïsoleerde muur worden exact dezelfde stijgende waarden verkregen als voor de geïsoleerde muur met Savonnières. De absolute waarden voor temperatuurverschillen in deze oriëntaties liggen een stuk lager dan in de zuidwestelijke oriëntatie.

Wanneer gekeken wordt naar het verschil in temperatuur tussen de 5 mm en 50 mm, is het duidelijk dat ook hier Savonnières steeds een groter temperatuurverschil heeft t.o.v. Bentheim voor alle klimaatopties. Voor zowel de noordelijke oriëntatie als de noordwestelijke oriëntatie is er echter een factor 1.62 (± 0.02) verschil voor de niet-geïsoleerde muren. Bij de situatie met geïsoleerde muren is het verschil in de Savonnièressteen zelfs een factor 2.15 (± 0.01) groter dan het temperatuurverschil in Bentheim voor de noordelijke oriëntatie en een factor 2.45 (± 0.15) voor de noordwestelijk oriëntatie. Verder is kalksteen Savonnières bij deze oriëntaties ook steeds lager in temperatuur op de verschillende dieptes en voor de verschillende klimaten.

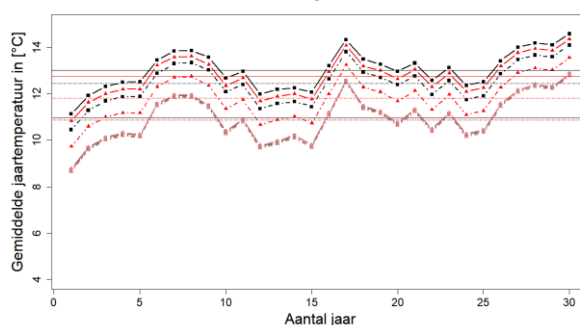
Savonnières en Bentheim - Historische klimaatdata



Savonnières en Bentheim - Toekomstige klimaatdata - Optimistisch scenario



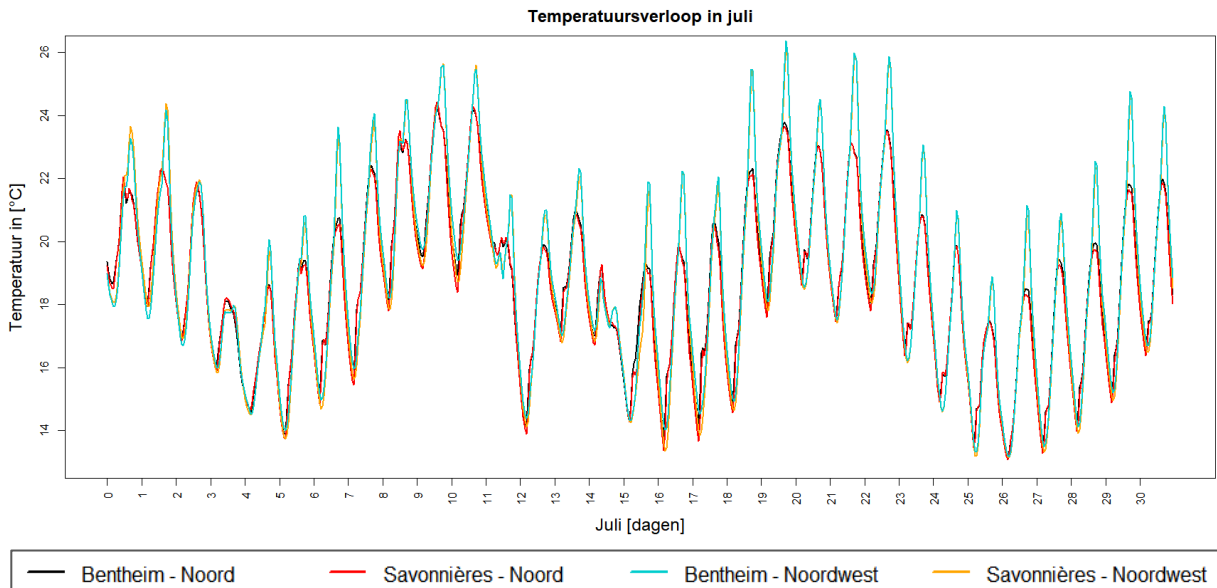
Savonnières en Bentheim - Toekomstige klimaatdata - Pessimistisch scenario



Figuur 6.6: De gemiddelde jaarlijkse temperatuur [°C] in Savonnières en Bentheim voor een noordelijke oriëntatie tijdens een periode van 30 jaar in de historische klimaatdata (bovenaan) en 30 jaar in de toekomstige optimistische en pessimistische klimaatdata (onderaan). Temperaturen worden weergegeven op een diepte van 5mm en 50mm voor zowel een niet-geïsoleerde als een geïsoleerde muuropbouw.

Hoewel de kortgolvlige straling bij de noordwestelijke oriëntatie meer bedraagt dan bij de noordelijke oriëntatie, blijft de temperatuur in de steen gelijk tot op een tiende. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de soortelijke warmte niet veel invloed heeft op de gemiddelde temperatuur, maar vooral op de temperatuurschommelingen. Zoals bij de zuidwestelijke oriëntatie zorgt de soortelijke warmte van een materiaal ervoor dat het de warmte van de kortgolvlige zonnestralingen opneemt om zichzelf op te warmen. De temperatuurschommelingen wijken vooral overdag van elkaar af wanneer de zon schijnt, terwijl 's nachts de temperaturen dicht bij elkaar liggen voor de maand juli (Figuur 6.7). Het effect van de zon is opmerkelijk bij de vergelijking van de noordelijke oriëntatie, waar nooit

zon schijnt, en de noordwestelijke oriëntatie, waar de steen de avondzon kan meepikken. Doordat de rest van de grafiek sterk op elkaar lijkt, blijven de gemiddelde temperaturen dicht bij elkaar liggen. Voor eenzelfde locatie tonen de curves van Savonnières en Bentheim een gelijkaardig gedrag t.o.v. elkaar zoals in de zuidwestelijke oriëntatie. Voor de maand juli liggen de waarden van Savonnières en Bentheim dicht bij elkaar.



Figuur 6.7: Het temperatuurverloop voor Savonnières en Bentheim in de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie.

6.1.2 Vochtaccumulatie

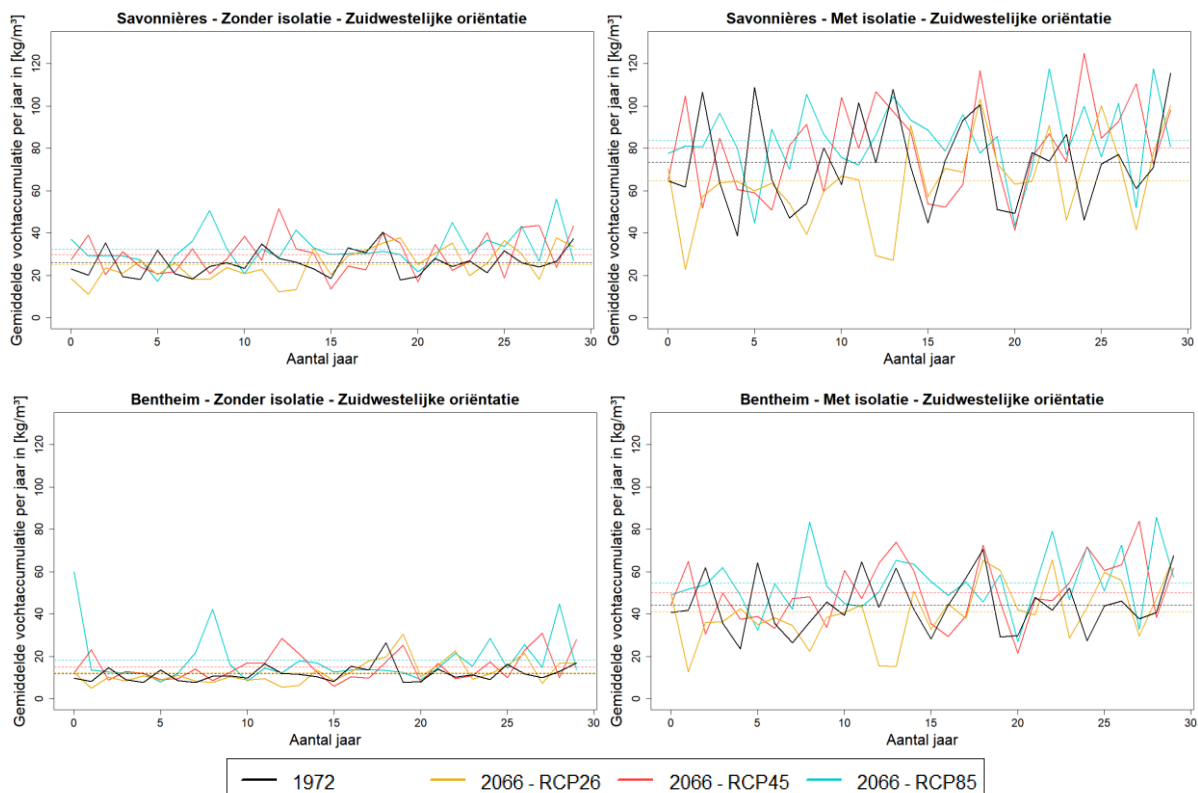
6.1.2.1 Vochtaccumulatie in functie van de tijd

Hall (1986) verklaarde dat de hoeveelheid water een cruciale factor is voor de vorstverwerking in gesteenten. Kritische vorst- en dooicycli kunnen enkel ontstaan als er naast een lage temperatuur ook voldoende vocht aanwezig is. Bij vorstschade stijgt het gevaar op schade als de hoeveelheid vocht in de muur stijgt. Wanneer het watergehalte een kritieke waarde overschrijdt in de natuursteen zal dit zich uiten in acute schade als de steen bevriest. Poriën karakteristieken en de verdeling van de poriegrootte zullen de mogelijke hoeveelheid water die kan opgeslagen worden, regelen. De grotere hoeveelheid aan poriënwater kan ervoor zorgen dat de drukken na kristallisatie ook groter zullen zijn (Deprez, 2020).

- **Zuidwestelijke oriëntatie**

Figuur 6.8 geeft ons een kijk op de gemiddelde vochtophoping per jaar in de muur voor de zuidwestelijke oriëntatie. Dit is de meest belangrijke zijde voor de vochthoeveelheid omdat deze oriëntatie het meest belast wordt door regen en wind in België. Het vocht is gemeten in de eerste 5 mm vanaf het geveloppervlak. Voor vorst- en dooicycli zijn deze millimeters de

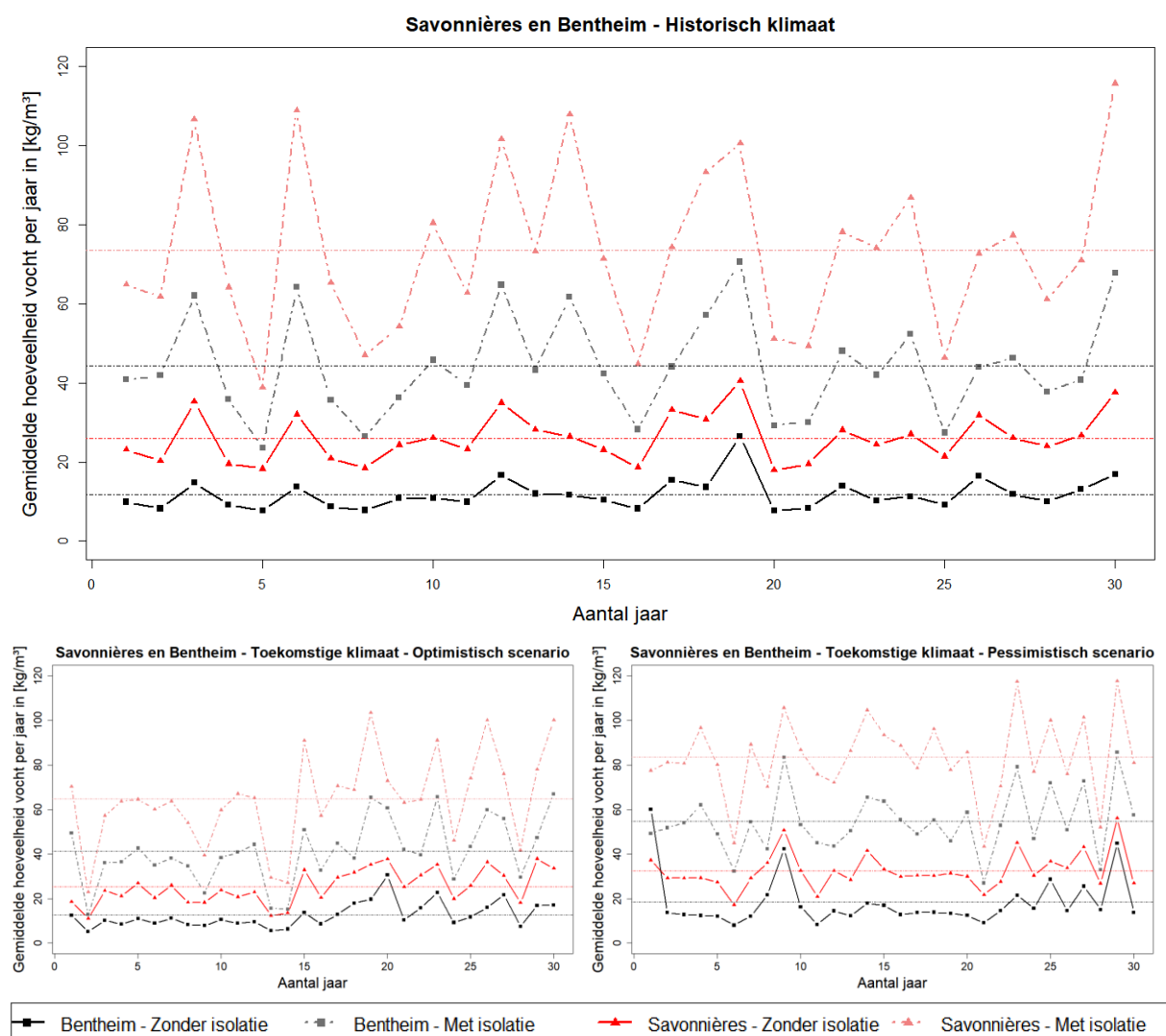
cruciaalste voor de vorming van schade. Fenomenen zoals afschilfering komen voornamelijk voor in die eerste 5 mm van een natuursteen.



Figuur 6.8: De gemiddelde vochtaccumulatie per jaar in kg/m^3 in Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor een zuidwestelijke oriëntatie tijdens alle klimaatscenario's (1 historisch en 3 toekomstige). De vochtaccumulatie wordt weergegeven voor zowel een niet-geïsoleerde muur als een geïsoleerde muur.

Figuur 6.9
 Figuur 6.8 toont een grafiek met de gemiddelde hoeveelheid vocht berekend per jaar in kg/m^3 . Hierbij wordt in stippellijn nog eens de gemiddelde waarde over 30 jaar berekend. Met de laatstgenoemde gemiddelde waarden is voor de muren zonder na-isolatie op te merken dat de vochthoeveelheid in de toekomst zal afhangen van hoe het klimaat zal veranderen bij de Savonnièressteen. Als het klimaat optimistisch verandert, blijft de hoeveelheid vocht rond dezelfde waarde als bij de historische klimaatdata. In het andere geval kan het vochtgehalte tot en met 25% vermeederen in een niet-geïsoleerde muuropbouw. Voor Bentheim liggen de waarden anders. Naar de toekomst toe zal het vochtgehalte met zekerheid hoger liggen dan in het historische klimaat. De procentuele stijging ligt tussen de 6.4% en 55.2%. Voor een geïsoleerde muuropbouw daarentegen stijgen de waarden niet altijd in de toekomst. Voor Savonnières is er 53.8% kans dat de muur in een klimaatscenario terechtkomt waarbij het vochtgehalte in de muur zal stijgen en voor Bentheim is de kans 76.6%. Meer kans op een stijging in vochthoeveelheid kan meer kans geven op eventuele ijsmassa.

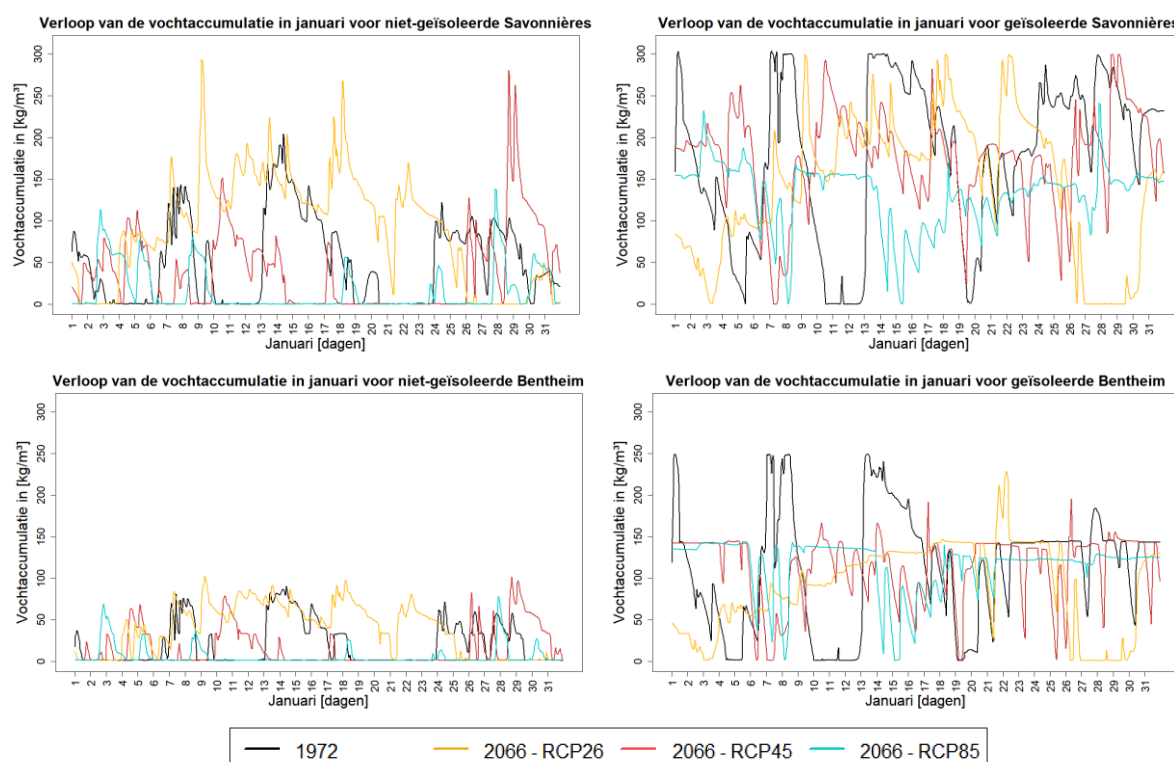
Overduidelijk is wel dat Savonnières altijd meer vocht bevat dan Bentheim, ongeacht welk klimaatscenario wordt aangenomen (Figuur 6.9). Bij regenval wordt 70% van de hoeveelheid water opgenomen via capillaire aanzuiging in de muur. Kleine poriën hebben een grotere capillaire opzuigingskracht dan grote poriën, waardoor een steen zich meer kan vullen als deze veel kleinere poriën bevat. De kleine poriën hebben echter de laagste waterabsorptiesnelheid waardoor eerst de grote poriën zullen gevuld worden. Daarna zullen de kleine poriën het water onttrekken van de grote poriën. Savonnières en Bentheim bevatten respectievelijk 20% en 10% aan kleine poriën volgens de vooropstellingen in het doctoraat van Deprez (2020). Onder kleine poriën rekent hij de microporiën, die in zijn doctoraat een range hebben van 0.1µm tot 1µm. Grote poriën, vanaf een grootte van >10µm (Deprez, 2020), worden geleidelijk aangevuld door de kleinere poriën. Savonnières is een poreuzer materiaal wat in eerste instantie zal zorgen dat de muur meer water kan opnemen dan Bentheim.



Figuur 6.9: De gemiddelde vochtaccumulatie per jaar [kg/m³] in beide natuurstenen voor de zuidwestelijke georiënteerde muur tijdens een historisch klimaatscenario (bovenaan) en twee toekomstige klimaatscenario's (het optimistische en het pessimistische) (onderaan).

Om de veronderstellingen verder te staven, wordt gekeken naar het verloop van de vochtaccumulatie in januari (Figuur 6.10). In die maand komen frequente vriestemperaturen voor, wat een goede indicator kan zijn voor eventuele vorstschade. Bij een vergelijking van de natuurstenen t.o.v. elkaar bevat Bentheim een factor 2.53 (± 0.18) minder vocht in hetzelfde klimaatscenario dan Savonnières voor een niet-geïsoleerde muuropbouw. Bij een muur met na-isolatie bedraagt deze factor 1.57 (± 0.03) behalve voor het pessimistisch toekomstig klimaatscenario, waar de factor 1.14 is.

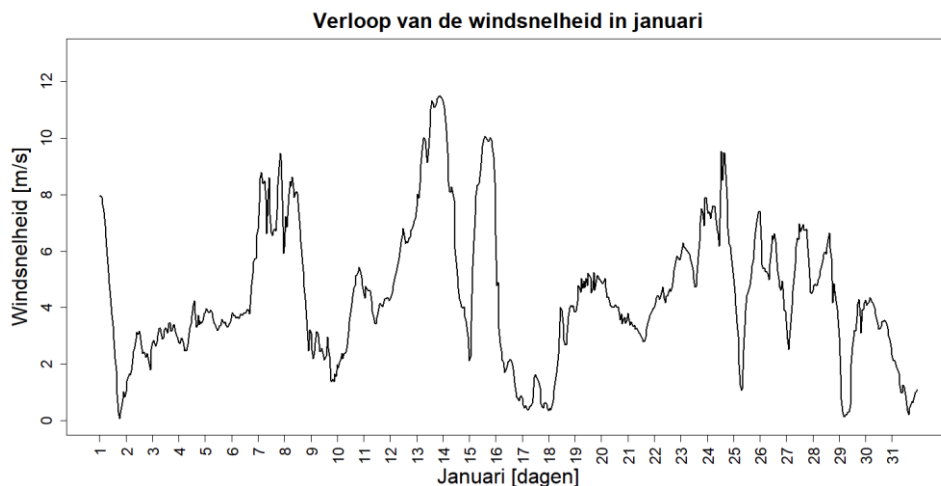
Opvallend is hoe de grafieken zich vormgeven. Savonnières toont grotere pieken in de curves dan Bentheim. De vochthoeveelheid stijgt veel sneller voor Savonnières dan voor Bentheim op het moment van de pieken. De kalkzandsteen Bentheim droogt sneller uit na een natte periode en zal sneller een nulwaarde bereiken dan Savonnières voor elk klimaat.



Figuur 6.10: Het vochtverloop [kg/m³] in Savonnières (bovenaan) en Bentheim voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als een geïsoleerde muuropbouw (rechts) die zuidwestelijke gericht zijn.

Bij een geïsoleerde muur is het opvallend dat er veel meer vocht aanwezig is in de muur en dat beide natuurstenen een bepaalde waarde hebben waar ze met hun vochtgehalte moeilijker over geraken. De capillaire opname van water gebeurt vlot en snel tot een waarde bereikt wordt van capillaire verzadiging. Bij Bentheim bedraagt deze waarde rond de 150 kg/m³ en bij Savonnières is deze waarde niet in rekening gebracht. Om die waarde te overstijgen, hebben ze een extra factor nodig, zoals bv een hogere winddruk. In Figuur 6.11 is als voorbeeld de windsnelheid afgebeeld voor het historische klimaatscenario. Op deze grafiek kan eenzelfde verloop opgemerkt worden. Een stijging in windsnelheid loopt

gelijkaardig met een stijging in de vochtaccumulatie. Bij het bereiken van een bepaalde windsnelheid wordt Bentheim geholpen om de capillaire verzadiging te overtreffen. Ook bij Savonnières is een plotse vochtopname op te merken bij een hoge windsnelheid. Eenmaal de capillaire verzadigingswaarde overstegen is, kan Bentheim tot een effectieve saturatiewaarde gaan van 250 kg/m^3 en Savonnières tot een waarde van 300 kg/m^3 .



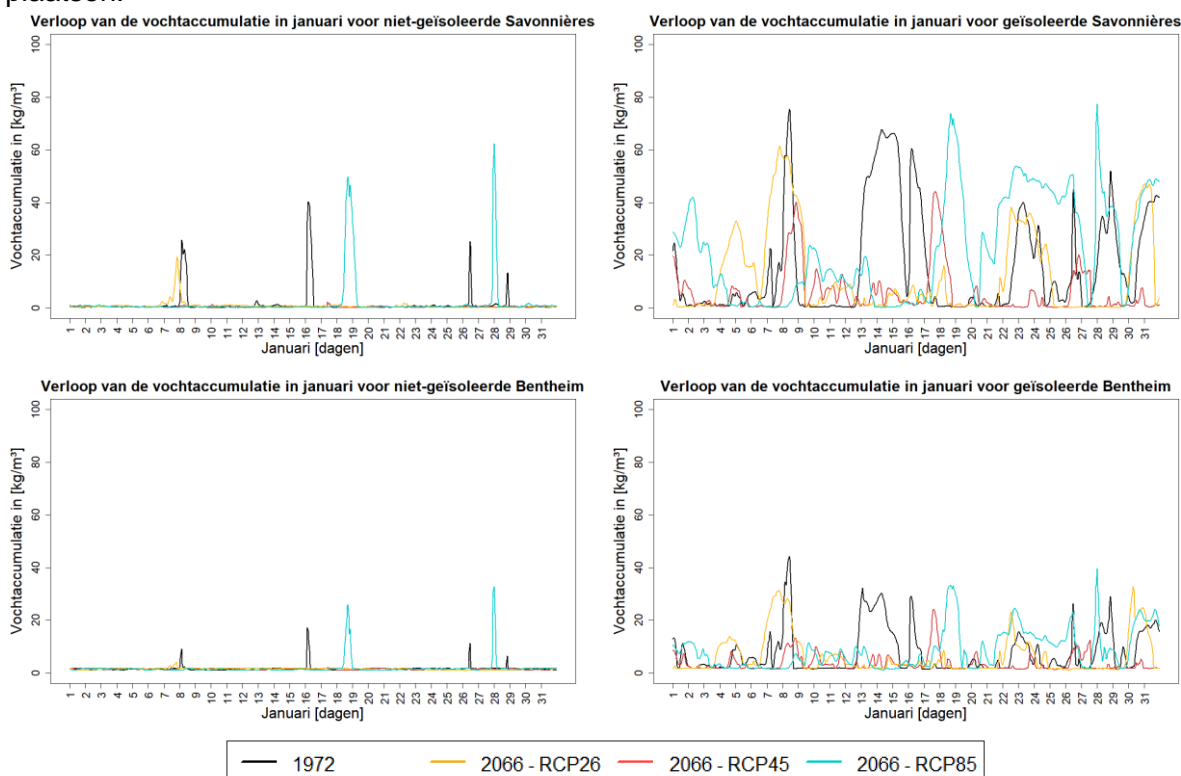
Figuur 6.11: Verloop windsnelheid in januari voor het historische klimaatscenario.

- **Noordelijke en noordwestelijke oriëntatie**

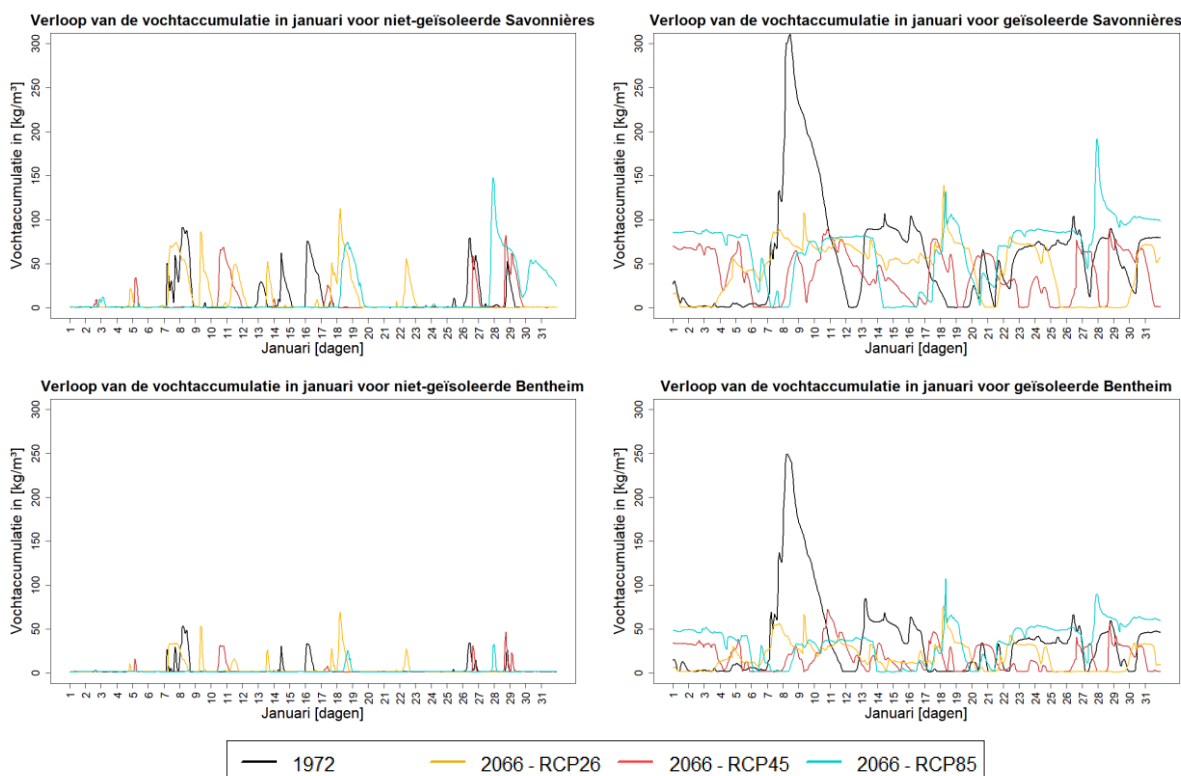
In de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie valt er heel wat minder regen dan in de zuidwestelijke oriëntatie. Als gevolg is er een heel pak minder vocht aanwezig in de muren (Figuur 6.12 en Figuur 6.13). In de toekomst zal de vochthoeveelheid in de muur stijgen t.o.v. de historische klimaatdata. Doordat er in een noordelijke of een noordwestelijke gevel in de eerste plaats amper vocht aanwezig is, lijkt de stijging van de gemiddelde vochthoeveelheid per jaar over een periode van 30 jaar procentueel veel te zijn. In absolute waarde stijgt de gemiddelde vochthoeveelheid per jaar in de noordelijke oriëntatie met 0.29 kg/m^3 in een niet-geïsoleerde muuropbouw met Bentheim en 0.98 kg/m^3 in een niet-geïsoleerde muuropbouw met Savonnières. Voor een geïsoleerde muur bedragen deze waarden 1.24 kg/m^3 voor Bentheim en 1.75 kg/m^3 voor Savonnières. In een noordwestelijk georiënteerde muur bedragen de gemiddelde stijgingen in de vochthoeveelheid respectievelijk 0.09 kg/m^3 , 0.23 kg/m^3 , 0.20 kg/m^3 en 0.51 kg/m^3 .

In de noordelijke niet-geïsoleerde gevel met Savonnières is er wel tot 9.6 keer minder vocht aanwezig in de muur dan in de zuidelijkwestelijk georiënteerde gevel en in de noordwestelijke gevel tot 3.3 keer minder. Bij Bentheim echter is er aan de noordelijke kant 6.3 keer minder vocht aanwezig en in de noordwestelijke kant 3.6 keer minder. Bij de geïsoleerde muur hebben ze voor de noordelijke oriëntatie allebei de natuurstenen 9 keer minder vocht in de muur dan bij de zuidwestelijke oriëntatie. Voor de noordwestelijke oriëntatie is dit 3 keer minder. Over het algemeen kan gezegd worden dat het verschil tussen de noordwestelijke oriëntatie en de zuidwestelijke oriëntatie al groot is, maar dat het verschil nog eens dubbel of

drie keer zo groot wordt als we de zuidwestelijke oriëntatie t.o.v. de noordelijke oriëntatie plaatsen.



Figuur 6.12: Het vochtverloop $[\text{kg/m}^3]$ in Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als een geïsoleerde muuropbouw (rechts) die noordelijk gericht zijn.



Figuur 6.13: Het vochtverloop [kg/m³] in Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als een geïsoleerde muuropbouw (rechts) die noordwestelijke gericht zijn.

6.1.2.2 Vochtgehalte in de diepte

In deze paragraaf wordt gekeken naar het vochtgehalte doorheen de muur. Aan de hand van de resultaten zal onderzocht worden hoe snel de besproken natuurstenen water opnemen en hoe snel de natuurstenen terug uitdrogen. Onder atmosferische omstandigheden zal een steen vaak niet helemaal verzadigd worden. In de meeste gevallen zal Bentheim maximaal 70% verzadigd worden terwijl Savonnières een verzadiging van 60% kan bereiken (Siegesmund, 2011). Voor beide gevallen zijn al hogere verzadigingsgraden waargenomen, maar de genoemde waarden zijn de voornaamste maximale verzadigingsgraden (Deprez, 2020; Walbert et al., 2015).

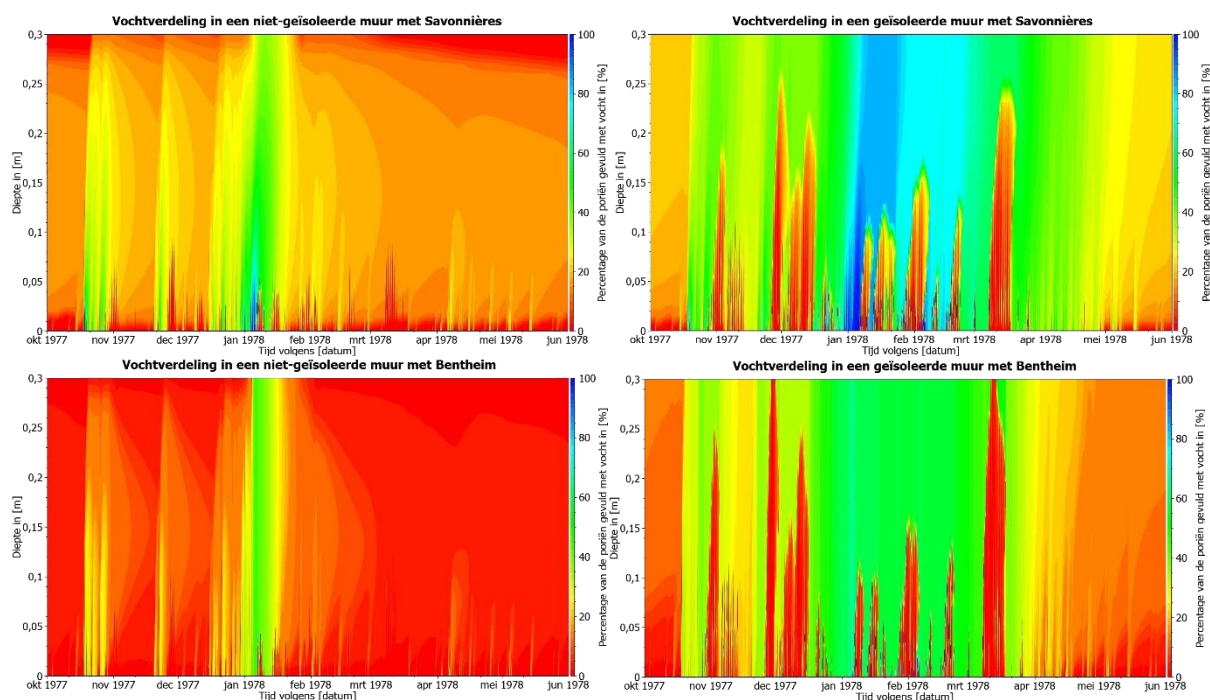
Om het gedrag van de steen op de aanwezigheid van vocht te onderzoeken wordt gekeken naar 1 klimaatscenario, namelijk de historische klimaatdata en 1 oriëntatie, de zuidwestelijke oriëntatie. Andere klimaatscenario's vertonen hetzelfde gedrag voor de steen en worden hier niet verder besproken. Voor de noordelijke en noordwestelijke muur zal er minder vocht worden opgenomen maar zal de muur nog steeds op dezelfde manier het vocht opnemen en afgeven, waardoor we enkel de zuidelijkwestelijke oriëntatie bespreken in dit onderdeel. Het vochtgehalte is ingesteld als een field output bij de output van Delphin en wordt weergegeven als een kleurendiagram in het programma PostProc 2.2.2.

- **Zuidwestelijke oriëntatie**

In Figuur 6.14 is het vochtgehalte in functie van de diepte weergegeven. De y-as stelt de diepte van de steen voor in meter, terwijl de x-as een periode van 8 maanden van de historische klimaatdata weergeeft. De kleuren geven een indicatie aan van de hoeveelheid vocht aanwezig in de muur aan de hand van de kleurenlegende aan de rechterkant van de grafiek. Een warmere kleur (rood) geeft aan dat er niet veel vocht in de muur aanwezig is. Hoe kouder de kleur (blauw) zal worden, hoe meer vocht er aanwezig is in de muur.

Volgens het KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) (n.d.) is een natte dag gelijk aan een dag met 10 millimeter neerslag binnen een etmaal. Zo is de klimaatdata van Brussel geanalyseerd op basis van zijn natte dagen. Bij deze analyse is er nader onderzoek uitgevoerd op de overgang tussen het einde van het najaar van 1977 tot het voorjaar/zomer van 1978 door een voorafgaande schatting van de neerslagperiodes met grote regenval. Een opmerking hier is dat de genoemde datums behoren tot representatie van het klimaat uit de jaren 1972-2005, met de eerste 4 jaar als conditioneringsjaren. De gemiddelde waarden over 30 jaar zullen gelijk zijn maar wat precies op een bepaalde dag gebeurt, is niet te linken aan de effectieve dag in datzelfde jaar. In deze thesis zal er worden verwezen naar de gekozen periode van 8 maand, van oktober 1977 tot eind mei 1978, als de "Natte Historische Periode".

In de Natte Historische Periode zijn er twee belangrijke periodes voor de vochthoeveelheid in de muur. Op het einde van de maand oktober van de Natte Historische Periode, de 28^{ste} oktober, is een zware regenval geteld met net geen 50 mm neerslag op één dag. Volgens het KNMI (n.d.) wordt dit gezien als een zware regendag. Deze dag werd voorafgegaan door een natte dag met een waarde van ongeveer 17 millimeter neerslag. Dit zorgt voor een duidelijke indicatie van aanwezigheid van vocht in de natuursteen. Een ander belangrijk moment in de Natte Historische Periode is bij de jaarovergang van 1977 naar 1978. In een tijdsspanne van 7 dagen zijn er 4 natte dagen gerekend met waarden die variëren tussen de 11 mm en 16 mm. De niet-natte dagen die daartussen liggen, hebben waarden van 4.5 mm, 5 mm en 9.8 mm. Deze opeenvolging van natte dagen, wat een lange regenperiode voorstelt, zal ook zorgen voor een duidelijke accumulatie van vocht in de muur omdat de natuursteen voldoende tijd heeft om het water op te nemen. Bij een intense regenbui met veel neerslag op korte tijd, kan de muur soms niet al het vocht opnemen, waardoor deze bui niet zoveel effect zal hebben als die tijdsspanne van 7 dagen.



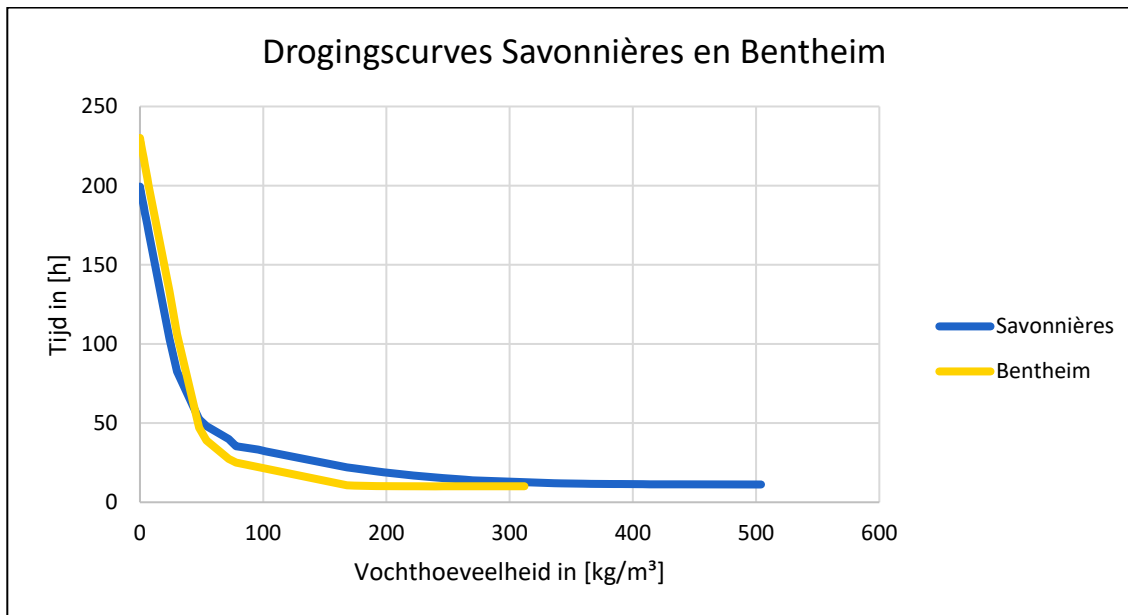
Figuur 6.14: Het vochtverloop over de diepte voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor een zuidwestelijke oriëntatie tijdens de Natte Historische Periode, een representatie van 8 maanden in de historische periode. Het geeft het percentage van de poriën weer die gevuld zijn met water voor zowel een niet-geïsoleerde (links) als een geïsoleerde muur (rechts).

De besproken tijdsspanne wordt verder geanalyseerd in de field output van Delphin in PostProc 2.2.2. De bovenste diagrammen in Figuur 6.14 geven het vochtgehalte van de Savonnièressteen weer voor zowel een muuropbouw met als een muuropbouw zonder nisolatie. De onderste diagrammen geven hetzelfde weer voor de Bentheimsteen. Als eerste conclusie kunnen we stellen dat Savonnières meer verzadigd zal geraken dan Bentheim. De Noord-Franse kalksteen zal een maximale waarde bereiken van 100% terwijl de Duitse

kalkzandsteen slechts de helft van deze waarde bereikt als maximaal vochtgehalte in zowel een geïsoleerde als een niet-geïsoleerde muuropbouw. Een tweede conclusie luidt dat Bentheim veel sneller droogt dan Savonnières. Bij de diagrammen van een muur zonder isolatie is duidelijk te zien dat het vocht zich in beide natuurstenen tot een diepte van 30 cm verspreidt. Savonnières zal weliswaar over die diepte meer gesatureerd zijn dan Bentheim. Het vocht in de Duitse steen is na een halve maand weer helemaal uit de steen verdwenen, terwijl het vocht met een lage hoeveelheid aanwezig blijft in de muur met Savonnières, en dit tot na de maand juni. Zes maand na de tweede neerslagperiode in de Natte Historische Periode (bij de jaarovergang) is de steen gedroogd voor de laatste 4 cm. De resterende 26 cm van de steen is nog steeds nat met een vochtgehalte van 15%. Deze droging is het effect van de niet-geïsoleerde muur. De warmte die de binnenomgeving biedt, helpt de binnenzijde van de steen drogen. Na de eerste neerslagperiode in de Natte Historische Periode, de regenbui rond 28 oktober, was de muur al redelijk vochtig door een niet volledige uitdroging na de zomer. Daarna werd de muur vochtiger door de neerslag, maar het vochtgehalte daalt de hele periode niet meer onder 13%. Dit verklaart ook waarom er in de vorige paragraaf steeds meer vocht in de Savonnièresmuur aanwezig was dan in de Bentheimmuur.

In de muren met na-isolatie is het fenomeen waarbij Savonnières langer nat blijft, nog veel extremer. Bentheim blijft nu tot 7 keer langer nat dan in de niet-geïsoleerde versie. In de geïsoleerde situatie hebben kleinere buien veel meer effect dan in de niet-geïsoleerde muur. In Bentheim bereikt de steen een waarde van 13% in de representatieve maand maart, terwijl Savonnières deze waarde slechts haalt in de representatie van de maand juni. Savonnières bevat veel meer vocht dat uitgedroogd moet worden waardoor de steen voor een lange periode vochtig blijft.

De snellere uitdroging van Bentheim kan met behulp van de drogingscurves van Savonnières en Bentheim, die opgesteld zijn door D. Guilbert aan de hand van laboproeven, verklaard worden (Figuur 6.15). De drogingscurves bestaan uit twee fasen. De eerste fase wordt weergegeven door de eerste daling van de grafieken en staat in voor de transportatie van het water naar het oppervlak van de steen door middel van hydraulische paden. Hoe steiler deze curve is, hoe sneller het transport naar het oppervlak en hoe sneller de steen uitdroogt. In deze grafiek wordt opgemerkt dat Bentheim een steilere helling heeft dan Savonnières wat betekent dat deze sneller zal uitdrogen. Als het proces in fase 1 onderbroken wordt door het tekort aan vocht, dan zal fase 2 starten, voorgesteld door de lichtere daling in de grafiek. Dit is een veel trager proces en bestaat uit diffuse droging. Een droogfase 2 zal voorkomen wanneer een steen diep bevochtigd is na lange regenbuien. Het tekort aan vocht zal zorgen voor onderbrekingen in meerdere hydraulische paden, die ontstaan bij drogingsfase 1. Deze fase verloopt ook in de Savonnièressteen wat trager dan in de Bentheimsteen. Droging na een kortere regenbui zou sneller moeten verlopen dan bij een langere regenbui, door een gebrek aan drogingsfase 2 bij het drogen na een korte regenbui. Verder zal dit worden nagekeken door middel van kleurendiagrammen na een korte regenperiode (Figuur 6.17).



Figuur 6.15: Droogcurves voor Savonnières en Bentheim.

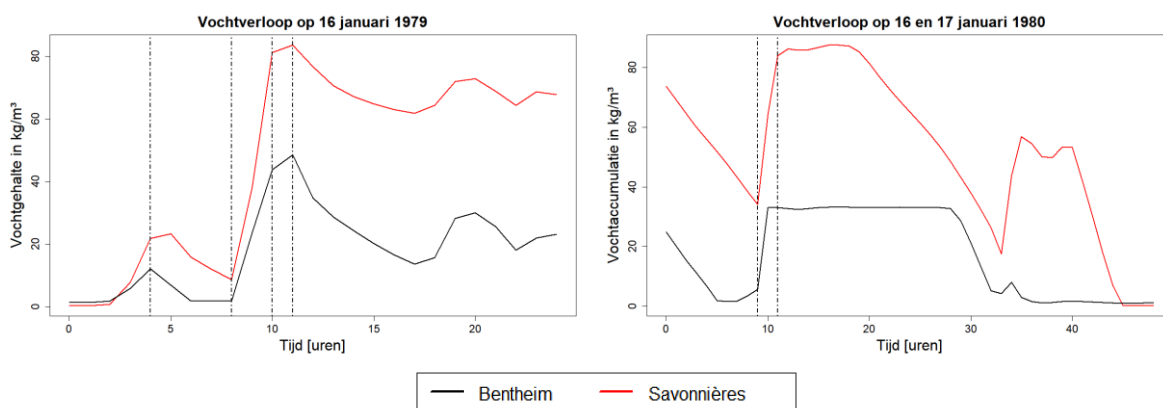
Indien de stenen een grotere diepte zouden hebben dan 30 cm, kan er met overtuiging gezegd worden dat Savonnières tot een grotere diepte nat zou worden dan Bentheim. Dit merken we ook bij een kortere regenbui die afgebeeld wordt in Figuur 6.17. Het wordt vastgesteld dat voor eenzelfde neerslaghoeveelheid de kalksteen dubbel zo nat wordt op een diepte van 30 cm dan de kalkzandsteen.

Samen met de resultaten in de vorige paragraaf 'Vochtrophoping' en de conclusies uit deze paragraaf, kan een verklaring gegeven worden aan het feit dat Savonnières meer vocht bevat dan Bentheim. In een niet-bevroren toestand wordt het water, dat zich doorheen de poriën verplaatst, opgeslagen op basis van de capillaire krachten, die op hun beurt weer bepaald worden door de poriëngroottes van de steen. Om te beginnen zullen de grootste poriën zich vullen met water doordat ze de grootste waterabsorptiesnelheid hebben. Omdat de kleinste poriën dan weer de grootste capillaire druk uitoefenen, zullen deze het water uit de grotere poriën zuigen. Dit opzuigingsproces is trager dan het proces waarbij de grote poriën het water opnemen uit de omgeving. Als de waterhoeveelheid te groot wordt, kunnen de kleine poriën geen water meer opzuigen waardoor de grote poriën geleidelijk aan gevuld geraken. Het moment waarbij de grote poriën zich vullen met water is het moment dat de capillaire druk afneemt. (C. Hall & Hoff, 2002). Bij het ontstaan van een evenwichtstoestand in functie van de capillaire druk, komt dit proces tot een einde. (Deprez, 2020).

Het gevolg van de verschillende poriënverdeling, waarbij Savonnières een grotere aanwezigheid heeft van microporiën met een hoge capillaire druk, toont zich in een groter wateropname voor Savonnières in Figuur 6.17. Volgens Deprez (2020) is bij Savonnières 20% van het poriënvolume gewijd aan microporiën, terwijl dat bij Bentheim maar 10% is, wat zorgt voor een grotere vochthoeveelheid in de muur in vergelijking met Bentheim op het

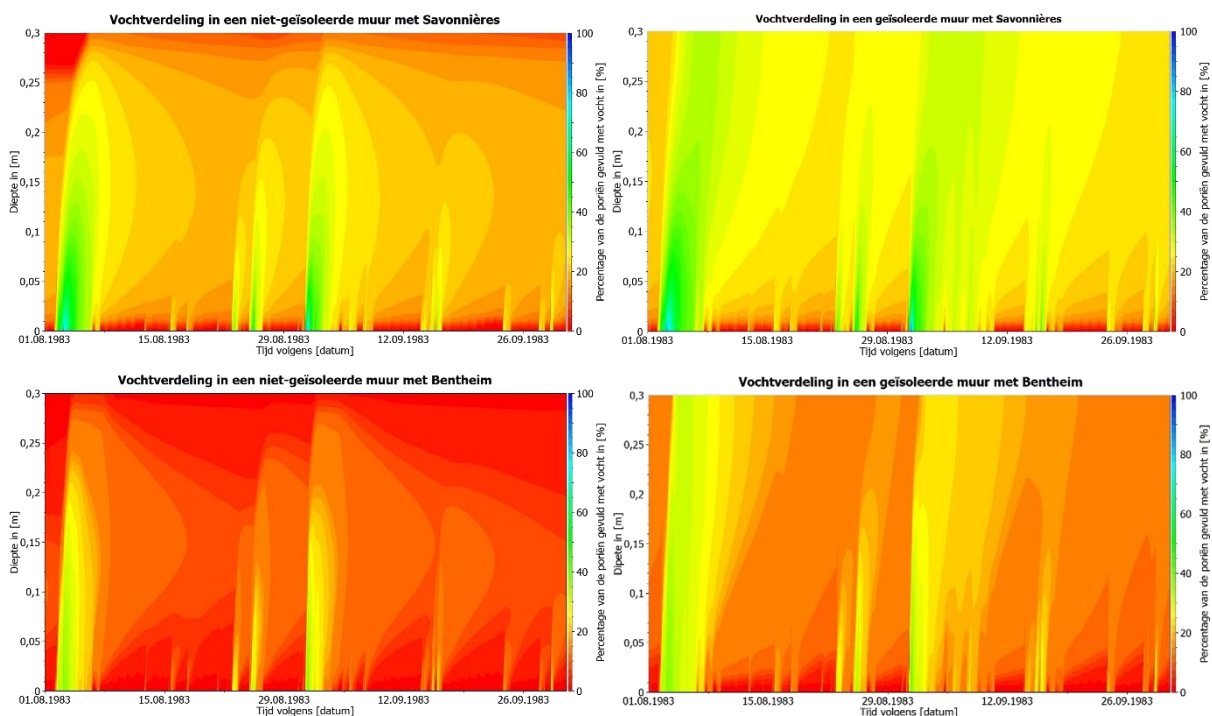
moment van het evenwicht in capillaire druk. Door de hogere capillaire druk zal op het evenwichtsmoment voor Savonnières veel meer microporiën gevuld zijn dan in Bentheim. Een voorbeeld uit het doctoraat van Deprez (2020): bij een 60% gesatureerde natuursteen zit 10% van het water in de microporiën voor Bentheim en 15-20% in de microporiën van Savonnières. Bij een 20% verzadigde natuursteen zal bij Bentheim ook in dit voorbeeld het water zich voor 10% in de microporiën bevinden terwijl voor Savonnières het meeste van het water zich zal bevinden in de microporiën.

Nochtans heeft Savonnières een bijna 10 keer lagere waterabsorptiecoëfficiënt dan Bentheim wat er zou moeten voor zorgen dat Savonnières het water trager opneemt. De waterabsorptiecoëfficiënt vertelt hoe snel een bouw materiaal vocht kan opnemen en is vooral afhankelijk van de open porositeit en de poriëngroottes (Dusar et al., 2009). Op het eerste gezicht is het verschil tussen de waterabsorptiecoëfficiënten niet zo merkwaardig in de grafieken (Figuur 6.10 en Figuur 6.14). Om te kijken wat het effect is van de verschillende waterabsorptiecoëfficiënt wordt gekeken naar een meer specifieke periode, meer bepaald twee periodes van enkele dagen in een maand januari in de historische klimaatdata. Al snel wordt duidelijk dat de waterabsorptiecoëfficiënt niet altijd een effect heeft in de vocht opname van de natuurstenen muur. In Figuur 6.16 is het vochtverloop in de natuurstenen weergegeven voor een periode van 1 dag in het jaar 1980 en 2 dagen in 1979 van de historische klimaatdata. Ook hier komen de exacte data niet overeen met de exacte data van toen, maar zijn de gemiddelde waarden gelijk. In januari 1979 verloopt de vocht opname in beide stenen gelijkaardig. Op hetzelfde moment bereiken beide stenen hun maximale vocht opname. Het verloop in januari 1980 toont een verschillend gedrag in het opnemen van vocht. Savonnières zal hierbij trager de maximale vocht hoeveelheid bereiken dan Bentheim. Het verschil tussen deze twee figuren is de windsnelheid. Bij eenzelfde verloop van de vocht opname is er een grote windsnelheid aanwezig die de vrij absorptie tegengaat. Bij een lage tot bijna geen windsnelheid, nemen de natuurstenen elk op hun manier het water op. Savonnières zal hierbij een paar uur later zijn maximale hoeveelheid vocht bereiken terwijl Bentheim de maximale waarde al eerder bereikt.



Figuur 6.16: Het vochtverloop van Bentheim en Savonnières voor een korte periode van 1 dag (links) of 2 dagen (rechts) voor een maand januari uit de historische klimaatdata.

Als de met water verzadigde stenen bevroren, ontstaat er cryosuctie, het aanzuigen van water uit onbevoren poriën. Hierbij zal de interne waterverdeling veranderen. Voor er cryosuctie kan ontstaan moet er eerst kristallisatie plaatsvinden in de poriën. Dit gebeurt eerst in de grote poriën omdat zij een lagere kristallisatiedruk ondervinden dan de kleine poriën. Bij cryosuctie zal het niet-bevroren microporiënwater zich migreren om ijskristallen te vormen in de grote poriën. Op deze manier wordt door Deprez (2020) verklaard dat het ijsgehalte in de microporiën minder bedraagt dan het totale volume aan microporiën. Zelfs zonder cryosuctie zou dit het geval zijn. Cryosuctie kan niet aangetoond worden in de HAM-simulaties, waardoor niet-bevroren water niet zal migreren en dus niet meegerekend worden in de kleurendiagrammen.



Figuur 6.17: Het vochtverloop over de diepte voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor een zuidwestelijke oriëntatie tijdens de Kortstondige Natte Historische Periode, een representatie van 2 maanden in de historische periode. Het geeft het percentage van de poriën weer die gevuld zijn met water voor zowel een niet-geïsoleerde (links) als een geïsoleerde muur (rechts).

Verder is er over de gehele historische neerslagdata van Brussel één waarde die er volledig uit springt. Die waarde stelt een hevige regenbui voor op korte tijd en wordt weergegeven op 3 september 1983, een willekeurige datum in de historische klimaatdata. Er wordt gekeken van begin augustus 1983 tot eind september 1983, wat een periode weergeeft met een korte en hevige regenbui. Naar deze periode wordt verwezen met de naam: Kortstondige Natte Historische Periode. Op die specifieke dag met hevige regen in die periode wordt er net geen 100mm neerslag waargenomen in 24 uur terwijl andere maxima in de klimaatdata maar tot 55mm reiken. Doordat dit zo'n extreme waarde is, werd onderzocht hoe de steen hierop reageert. De dag ervoor viel er slechts 5mm neerslag, maar de dag erna viel er wel bijna 35mm. De dag die daarop volgde had dan slechts 1mm neerslag op 1 dag. Figuur 6.17 vertelt dat een krachtige regenbui van korte duur minder effect heeft op het vochtgehalte van de

natuursteen dan een langere periode met een gematigde neerslaghoeveelheid. De zwaarste neerslag van die bepaalde dag valt in 3 opeenvolgende uren. In die tijd is de muur niet in staat om alle neerslag te absorberen waardoor het vochtgehalte lager blijft dan een langdurige periode met gematigde neerslag.

Voor deze Kortstondige Natte Historische Periode valt het op dat Savonnières voor een grotere vochthoeveelheid, sneller zijn water weer afgeeft aan de omgeving. De Noord-Franse kalksteen daalt in vochtgehalte van 95% tot 23% op een korte tijd. Dit is een daling in de met vocht gevulde poriën met 72% op 1 maand i.p.v. met 85% op 6 maanden zoals in de Natte Historische Periode. Dit fenomeen is te verklaren aan de hand van de drogingscurves in Figuur 6.15. Bij een kortere regenperiode zal de steen minder gevuld zijn met vocht waardoor er enkel sprake is van de eerste drogingsfase. De tweede drogingsfase, de traagste, komt zelfs niet aan bod door een te kleine vochthoeveelheid.

6.1.3 IJsmassa

In een bebouwde omgeving zullen de natuurstenen vooral blootgesteld worden aan kortdurende en hoogfrequente vorst- en dooicycli (deze worden ook dagelijkse vorst- en dooicycli genoemd) (Matsuoka & Murton, 2008). Zo zijn de bouwstenen onderhevig aan éénrichtingsbevriezing vanaf het buitenoppervlak, wat voorplanting van het bevroeringsfront naar binnen toe veroorzaakt. Hier hoort een watermigratie bij die loopt van het niet-bevroren deel van de steen tot naar het vriesfront. Deze migratie draagt bij tot de vorming van ijslenzen op een bepaalde diepte onder het oppervlak. Deze welbepaalde diepte is afhankelijk van de toegepaste thermische gradiënt, die afhangt van de thermische eigenschappen van het gesteente, nl. de atmosferische druk en het watergehalte. Schade veroorzaakt door de dagelijkse vorst- en dooicycli is beperkt tot de eerst aantal millimeters tot decimeters van het materiaal met het buitenoppervlak als referentie (Matsuoka & Murton, 2008).

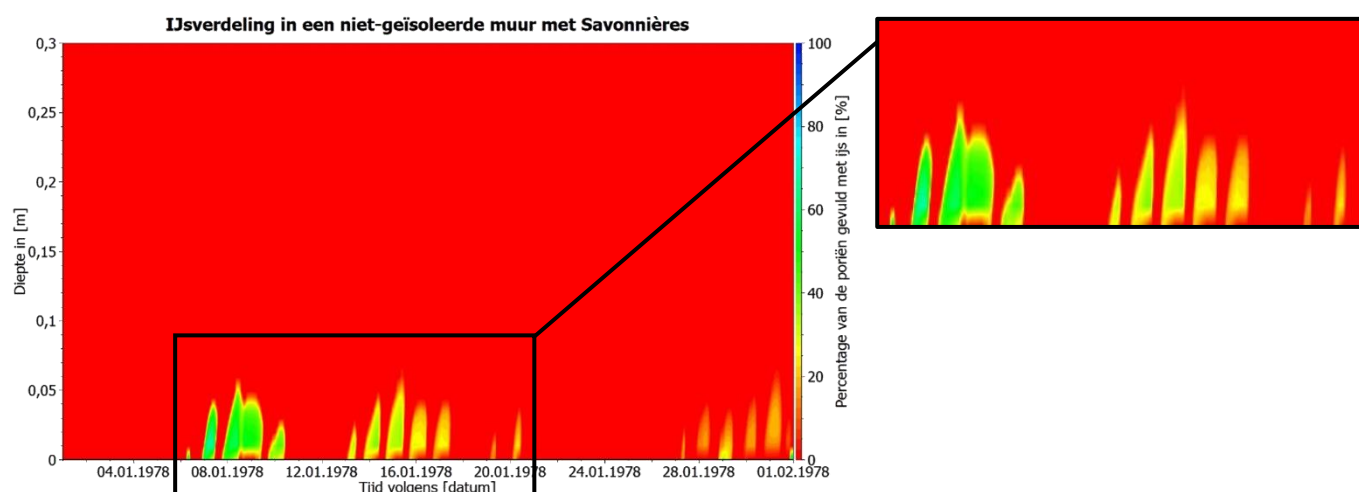
Zoals eerder vermeld zullen de poriënkenmerken en de poriëngrootteverdeling de mogelijke hoeveelheid aan water regelen. Als de hoeveelheid aan water in de steen toeneemt, kan dit de kristallisatiedrukken mogelijk doen stijgen. Niet enkel bepaalt de poriëngrootteverdeling de hoeveelheid water die in de steen aanwezig kan zijn, ze bepaalt ook hoeveel water er kan kristalliseren bij een bepaalde negatieve temperatuur en hoeveel druk hierbij zou ontstaan. Niet in elke poriegrootte bevriest het poriewater op eenzelfde temperatuur. Hoe kleiner de porie, hoe lager de temperatuur, die nodig is om ijs te vormen in de porie (Deprez, 2020).

In deze paragraaf wordt onderzocht hoeveel ijsmassa in de muur aanwezig is en hoe deze zich verdeelt in de muur. De opgebouwde ijsmassa aanwezig in de poriën van de steen is afhankelijk van de poriëngroottes in het materiaal en de condities waar het materiaal onderhevig aan is. IJs zal zich vormen in relatief grote poriën bij een temperatuur van 0°C,

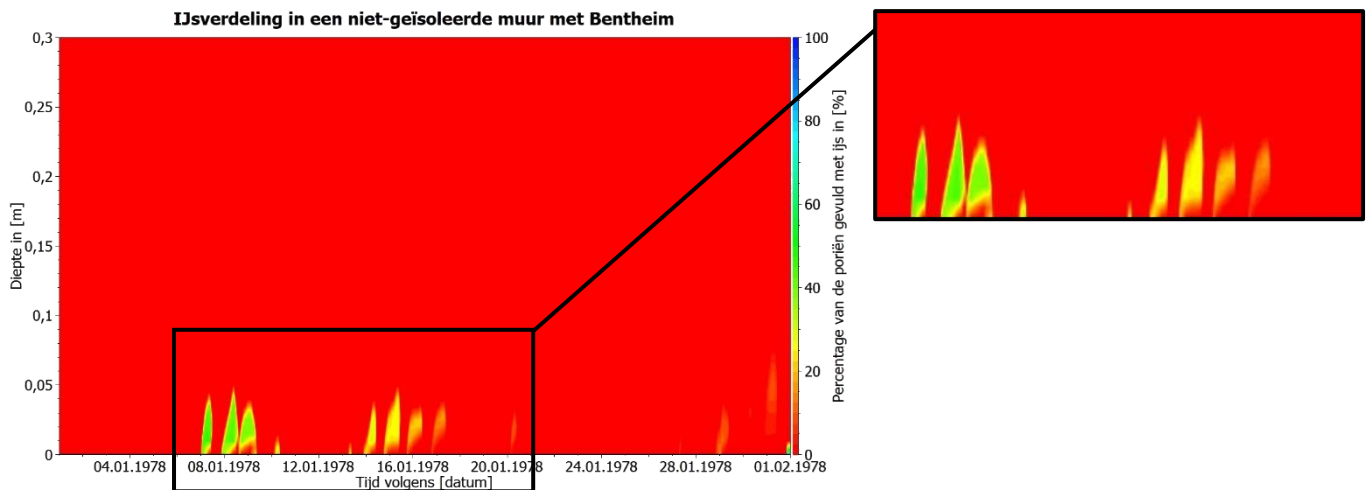
terwijl bevriezingen van kleine poriën pas lukt als de temperatuur lager zakt dan 0°C (Deprez, 2020). De gebruikte methode is gelijkaardig aan de vorige paragraaf over het vochtgehalte. De ijsmassa wordt gemeten via een field output, genaamd 'Ice Volume Ratio', in Delphin. Deze field output zal duiden op het percentage van de poriën dat gevuld is met ijs en zal worden geanalyseerd met het programma PostProc 2.2.2. Hieruit wordt opnieuw een kleurendiagram verkregen. De kleurencode werkt hetzelfde: hoe kouder de kleur, hoe meer ijsmassa er aanwezig is op die diepte en op dat moment. Voor er ijsmassa ontstaat, zijn er twee noodzakelijke elementen nodig: een voldoende lage temperatuur en voldoende vocht. Opnieuw wordt gekeken naar de Natte Historische Periode zoals in de vorige paragraaf omdat de muren voor die periode lang vochtig bleven. Zo wordt er een winterse periode voorgesteld met een gemiddelde temperatuur in januari van 0.35°C in de historische klimaatdata.

6.1.3.1 Zuidwestelijke oriëntatie

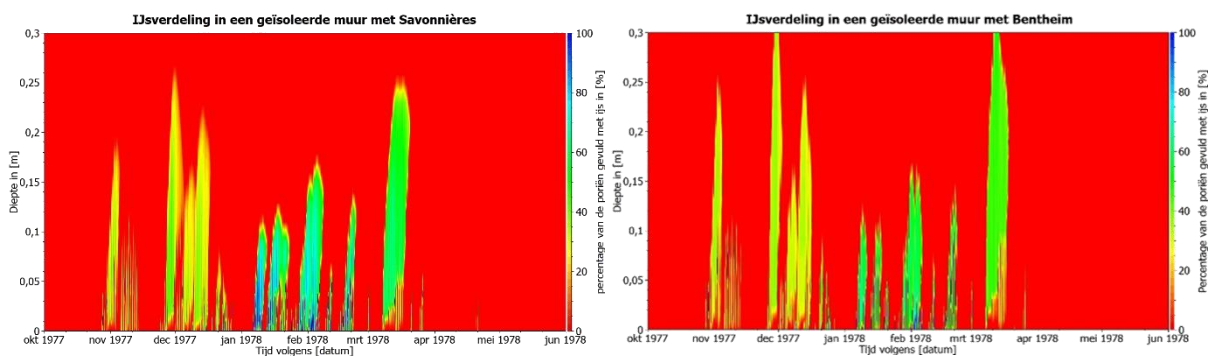
Uit de vorige paragrafen blijkt dat Savonnières de laagste temperaturen en de grootste vochthoeveelheid heeft in de muur. Deze twee parameters zorgen ervoor dat Savonnières meer ijsmassa zal aanmaken dan Bentheim. Op Figuur 6.18 en Figuur 6.19 is het verschil al op te merken bij de niet-geïsoleerde muren. Voor deze muuropbouw is de figuur ingezoomd op de maand januari in de Natte Historische Periode om de ijsmassa duidelijk weer te geven. In de kalksteen is 64% van de poriën het maximum percentage aan volume die ingenomen wordt door ijs, terwijl dit bij de kalkzandsteen slechts 45% is. Bentheim zal minder intens ijsmassa aanmaken, waardoor ijsmassa voor een kortere periode aanwezig is in de natuursteen. De kalkzandsteen Bentheim zal ook niet altijd ijs vormen wanneer Savonnières ijs vormt. Dit wordt mede mogelijk gemaakt door een lager vochtgehalte en een hogere temperatuur waardoor de condities niet dezelfde zijn als in Savonnières.



Figuur 6.18: Een ingezoomde versie van de muuropbouw zonder isolatie met Savonnières voor de maand januari in de natte periode.



Figuur 6.19: Een ingezoomde versie van de muuropbouw zonder isolatie met Bentheim voor de maand januari in de natte periode.



Figuur 6.20: De hoeveelheid ijs in de poriën aanwezig [%] voor Savonnières (links) en Bentheim (rechts) voor een geïsoleerde muuropbouw in de zuidwestelijke oriëntatie tijdens de natte historische periode.

Als de muur geïsoleerd wordt zal Savonnières meer ijs vormen voor een langere periode dan Bentheim maar de ijsvorming in Bentheim zal zich veel dieper voortplanten dan in Savonnières (Figuur 6.20). De grotere hoeveelheid aan ijs dat gevormd wordt in Savonnières is te wijten aan een grotere aanwezigheid van water. Het ijs dat zich vormt met het aanwezige vocht in Bentheim zal zich dieper verspreiden doordat het zich ongehinderd kan voortplanten door de unimodale poriënverdeling. Bentheim bevat relatief grote poriën (10 μm – 100 μm) die verbonden zijn door relatief grote poriënkelen (1 μm – 10 μm). De ijsvorming kan zich ongehinderd door het gesteente voortplanten. In Savonnières daarentegen vormt de ijsvorming zich niet zo gemakkelijk tot de binnenkant van de steen. Savonnières bevat kleine poriën die de voortplanting van het ijs zullen verhinderen (Deprez, 2020). De ijspercolatiesnelheid, wat in de testen van Deprez (2020) het verweringsgedrag bepalen, verschilt in beide stenen. De snelle ijspercolatie door de poriën in Bentheimsteen kan zorgen voor het uitdrijven van niet-bevroren water weg van het ijsfront. Bij een omnidirectionele bevroering kunnen de hydraulische drukken grote barsten veroorzaken, maar een historische muur heeft te maken met een unidirectionele bevroering. Langzame percolatie van het ijs door Savonnières zal eerder schade veroorzaken aan of net onder het oppervlak van de kalksteen. De ijsvorming brengt een volume-expansie van 9% met zich mee die de schadelijke kristallisatie-drukken introduceert (Deprez, 2020).

6.2 Kritische vorst- en dooicycli

Om het potentieel aan schade door vorst- en dooicycli te bepalen, worden berekeningen gemaakt die gebaseerd zijn op de klimatologische variaties. Een index die hier vaak bij wordt gebruikt, is het berekenen van het aantal jaarlijkse vorst- en dooicycli, bepaald door de luchttemperatuur gedurende een zekere periode (Grossi et al., 2007). Deze worden vorst- en dooicycli genoemd die enkel gebaseerd zijn op het klimaat en waarvoor klimaatdata vereist zijn. In deze thesis zal worden gekeken naar de kritische vorst- en dooicycli. Deze hangen af van het hygrothermisch gedrag van de materialen en vereisen simulaties, zoals hier wordt gedaan met het programma Delphin 6.1.0.

In dit hoofdstuk zullen twee methoden gehanteerd worden. De ene methode zal kritische vorst- en dooicycli berekenen via de kritische ijsmassa die in de natuursteen gevormd wordt. Deze grens van kritische ijsmassa zal worden bepaald met behulp van de waarden voor open porositeit en het kritische watersaturatiegehalte. Bij het overtreffen van de kritische ijsmassagrens zal er telkens een kritische vorst- en dooicycli gerekend worden. Deze berekeningen worden uitgevoerd over 30 jaar voor zowel een historisch als de toekomstige klimaatscenario's. De tweede methode heeft betrekking op de temperatuur in de steen. Sommige onderzoekers beweren dat breuken zich enkel voordoen als de temperatuur binnen een bepaald 'frost cracking window' ligt. Dit stelt een bepaald bereik voor van temperaturen, wat voor rotsen varieert van -3°C tot -8°C (Anderson, 1998; Oxford Reference, 2009). Eens een natuursteen met zijn bijhorende temperatuur in dit bereik komt zal dit beschouwd worden als een kritische vorst- en dooicycli. Naast deze twee methoden is het kijken naar de tijd die de natuursteen nodig heeft om de minimale temperaturen te bereiken ook belangrijk om de vorstschade bij een natuursteen in te schatten (Deprez, 2020). De laatstgenoemde strategie wordt niet behandeld in deze thesis.

De twee methodes waarmee het aantal kritische vorst- en dooicycli wordt berekend, zullen toegepast worden op een muuropbouw in de zuidwestelijke, noordwestelijke en noordelijke oriëntatie en voor de verschillende klimaatscenario's (1 historisch en 3 toekomstige).

6.2.1 Methode 1: Bepalen van kritische vorst- en dooicycli aan de hand van een kritisch ijsgehalte

Na de voorgaande, belangrijke vooronderzoeken, wordt er verdergegaan met een analyse van de kritische vorst- en dooicycli. Om een vorst- en dooicyclus te creëren zijn er twee essentiële elementen nodig: een voldoende lage temperatuur en voldoende vocht. Uit de vorige paragraaf bleek dat er genoeg ijsvorming ontstaat in de muur om kritische vorst- en dooicycli te hebben. Om een kritische vorst- en dooicycli te vormen, is er nood aan een kritische watersaturatiegrens. Deze grens wordt opgelegd aan de parameter

'ijsvolumegehalte' van Delphin 6.1.0 die staat voor het percentage aan poriën dat gevuld is met ijs.

De berekening van de grens voor het ijsvolumegehalte is gebaseerd op het doctoraat van Deprez (2020) en de thesis van Frisque (2017). Aan de hand van een kritische waterverzadigingsfactor wordt de grens bepaald voor het ijsvolumegehalte. Doordat, zoals eerder vermeld, de poriëngrootteverdeling en de poriënkaracteristieken bepalen hoeveel water er in de natuursteen aanwezig is en hoeveel water er zal bevriezen bij een bepaalde temperatuur, speelt de kritische waterverzadigingsgraad een belangrijke rol. Het laatste is onvermijdelijk verbonden met de poriënkenmerken van het materiaal (Deprez, 2020). In de gebruikte literatuur werd vooral gewerkt met een interval waarin de waarde kan liggen. Op basis van die spreidingsgebieden is in deze thesis een waarde bepaald om de berekeningen mee verder te zetten. Volgens het doctoraat van Deprez (2020) ligt de kritische waarde voor Savonnières voornamelijk tussen 60% en 80%. Later wordt beslist dat de waarde eerder aansluit bij 60%. Waarschijnlijk is de kritische verzadigingsgraad afhankelijk van de structurele zwakheden in de steen. Beddingsvlakken, die verschillen in samenstellingen en/of omhulsels bevatten, werken als structurele zwakheden, die worden geactiveerd bij kritische vorst- en dooicycli (Nicholson & Nicholson, 2000). Volgens de thesis van Frisque (2017) ligt de kritische waarde van Savonnières bij de 60%. Hieruit kan besloten worden dat 60% van de open porositeit van de steen een goede waarde is als referentiewaarde voor het kritische watersaturatiegehalte. De open porositeit van Savonnières bedraagt $0.3455 \text{ m}^3/\text{m}^3$, wat ons een waarde geeft van $0.207 \text{ m}^3/\text{m}^3$ als kritisch ijsvolumegehalte. Als het volume van de ijsmassa boven deze waarde stijgt, zal het ijs schade toebrengen aan de steen. Onder deze waarde is er geen gevaar voor schade door ijsvorming.

Voor Bentheim ligt de waarde hoger volgens zowel het doctoraat van Deprez (2020) als de thesis van Frisque (2017). Onder de 80% van de open porositeit wordt er geen enkel teken van schade ten gevolge van vorst opgemerkt in de testen van Deprez (2020). Volgens Frisque (2017) ligt de waarde van Bentheim tussen de 60% en 80% omdat de steen veel vorstbestendiger is dan Savonnières. Bentheim is een hardere steen door de grotere aanwezigheid van zand. In deze thesis wordt gebruik gemaakt van de 80% van de open porositeit als grens voor de kritische watersaturatiewaarde. De open porositeit van Bentheim bedraagt $0.270662 \text{ m}^3/\text{m}^3$, wat ons een grenswaarde geeft van $0.2166 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Voor de analyse van kritische vorst- en dooicycli volgens deze methode is de muur verdeeld in 35 secties. De eerste 10 secties zijn deeltjes van 5 mm voor de eerste 5 cm. De resterende 25 cm zijn secties van 1 cm. In elk van deze deeltjes wordt de ijsmassa [m^3/m^3] per uur bepaald. Via een formule, opgesteld door Vandemeulebroucke (2018), wordt per sectie het aantal kritische vorst- en dooicycli per jaar berekend (Figuur 6.21). In deze formule zit het aantal jaar van de klimaatdata en de kritische watersaturatiegrens. Na het toepassen van de formule wordt voor iedere sectie het aantal kritische vorst- en dooicycli bepaald per jaar. Zo

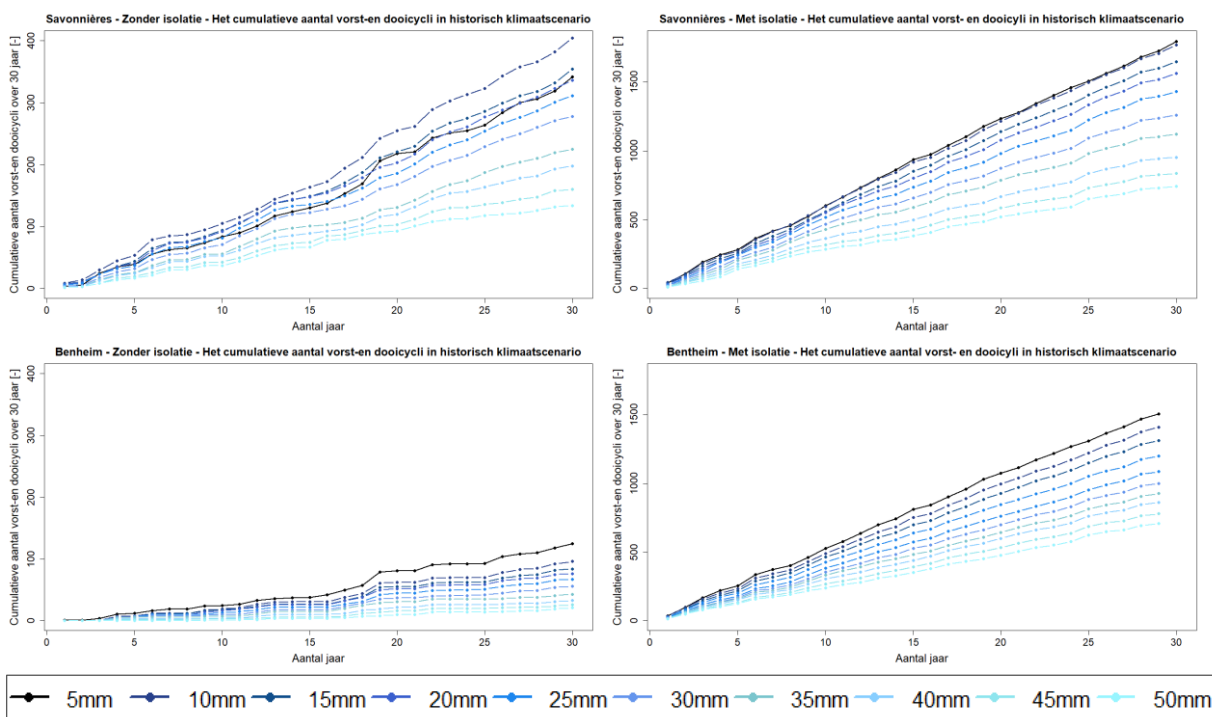
krijgen we een reeks gegevens met het aantal jaarlijkse kritische vorst- en dooicycli over een periode van 30 jaar.

```
FTCcrit <- function(x1,x2,x3) {  
  temp.matrix <- matrix(x1,nrow= 8760, ncol=x3)  
  temp.FTC <- colsums((temp.matrix>=x2 & lag(temp.matrix, default=0)<x2))  
  return(temp.FTC)  
}
```

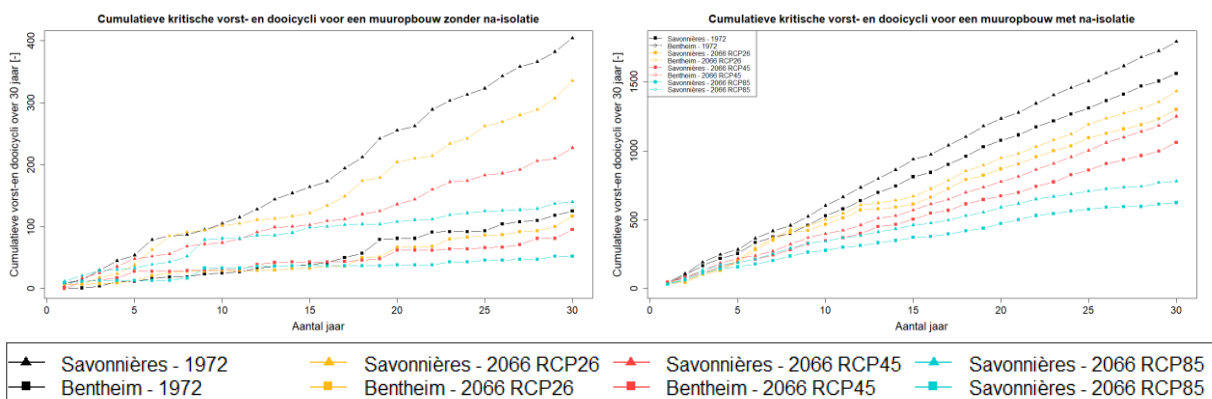
Figuur 6.21: De formule die gebruikt is voor de berekeningen van kritische vorst- en dooicycli, opgesteld door Vandemeulebroucke (2018).

6.2.1.1 Zuidwestelijke oriëntatie

In de zuidwestelijke oriëntatie bevatten de muren de grootste vochthoeveelheden, waardoor er een groot aantal aan kritische vorst- en dooicycli aanwezig is. Om verder te onderzoeken hoe het aantal kritische vorst- en dooicycli zich gedragen t.o.v. de verschillende klimaten en de verschillende natuurstenen, wordt eerst een onderzoek gedaan naar de meest kritische diepte, de plaats in de steen waar het meest aantal kritische vorst- en dooicycli in voorkomen. Niet in elke soort muur zit het grootste aantal kritische vorst- en dooicycli op eenzelfde diepte. Op Figuur 6.22 is het aantal kritische vorst- en dooicycli te zien, cumulatief opgesteld voor elke diepte, per sectie voor de eerste 5 cm. De figuur toont duidelijk welke sectie de meeste kritische vorst- en dooicycli over een periode van 30 jaar bereikt. Voor de muur bestaande uit Bentheim (met zowel isolatie als zonder) en de geïsoleerde muur met Savonnières zijn de meeste cycli te vinden in de eerste 5 mm. Voor de niet-geïsoleerde muur met Savonnières zit het maximum aantal cycli in het deel tussen 5 mm en 10 mm. Deze conclusie geldt voor alle klimaatscenario's, zowel de historische als de toekomstige. Het valt op dat het aantal kritische vorst- en dooicycli steeds dalen naar mate men zich dieper in de muur bevindt. Enkel in de niet-geïsoleerde Savonnièresmuur is dit niet het geval. Daar is het aantal kritische vorst- en dooicycli op een diepte van 5 mm een uitzondering op de reeks. Vanaf die waarde dalen alle waarden ook volgens de diepte. In de samenvattende Figuur 6.23 worden Savonnières en Bentheim voor dezelfde muuropbouw samen in een grafiek geplaatst. Daar is uit af te leiden dat Savonnières wel tot 3 keer meer kritische vorst- en dooicycli heeft op de kritische diepte dan Bentheim over de 30 jaar in een niet-geïsoleerde muuropbouw en slechts 1.15 keer in een geïsoleerde muuropbouw. In deze grafiek valt ook op te merken dat het aantal kritische vorst- en dooicycli bepaald door het historische klimaatscenario altijd een hogere waarde bedraagt dan het aantal cycli in de toekomst. In een niet-geïsoleerde muuropbouw zal het aantal kritische vorst- en dooicycli dalen in de toekomst met een waarde tussen 63% en 67% bij Savonnières en met een waarde tussen 6% en 58% bij Bentheim. Hierbij zal Savonnières procentueel gezien te kampen hebben met een grotere daling, maar in absolute waarde ligt het aantal kritische vorst- en dooicycli steeds boven het aantal van Bentheim. Als de muur nageïsoleerd is, zal deze in beide natuurstenen een daling veroorzaken in het aantal kritische vorst- en dooicycli van 20% tot 60%.



Figuur 6.22: Cumulatieve waarde voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) over een periode van 30 jaar. De grafieken zijn opgesteld voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als voor een geïsoleerde muuropbouw (rechts).

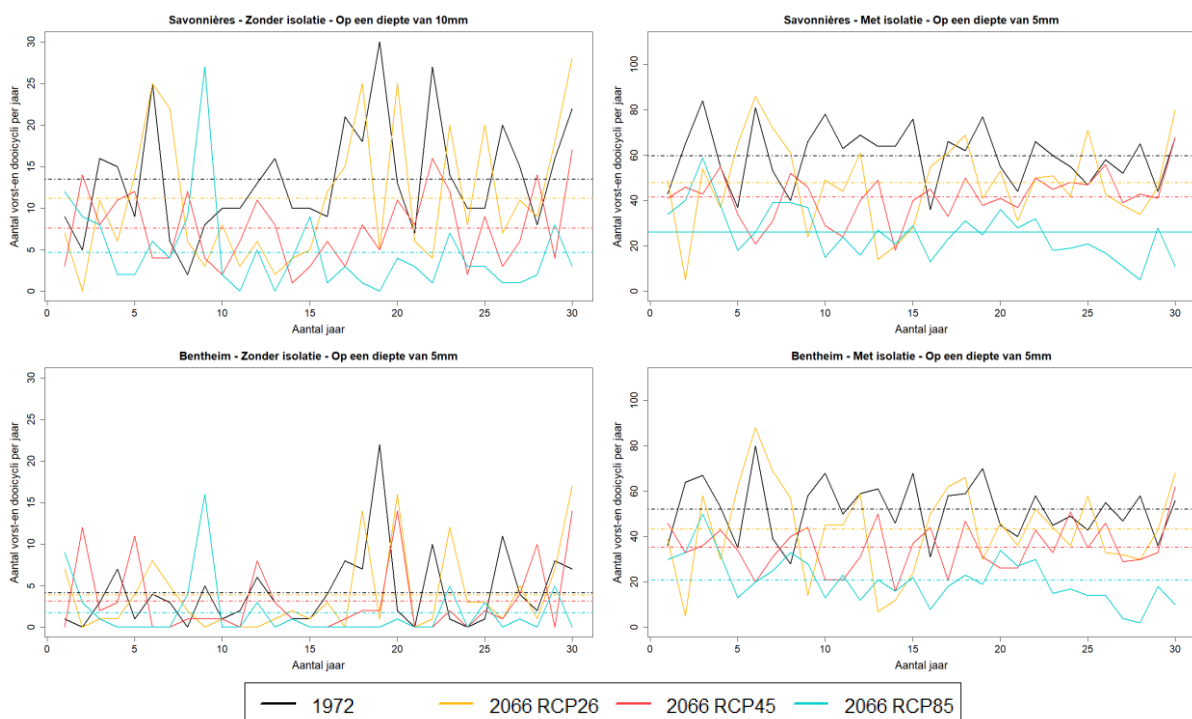


Figuur 6.23: Cumulatieve waarde voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières en Bentheim over een periode van 30 jaar. De grafieken zijn opgesteld voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als voor een geïsoleerde muuropbouw (rechts).

Voor een verdere analyse zullen we op de kritische diepte, de diepte met de meeste kritische vorst- en dooicycli, het aantal kritische vorst- en dooicycli genereren voor de verschillende klimaatscenario's in functie van het aantal jaar (Figuur 6.24). Op het eerste gezicht is er een grote variatie in het aantal kritische vorst- en dooicycli. Bij een nader inzoomen op de grafiek, liggen de waarden voor het klimaatscenario in de toekomst met RCP2.6 hoger dan het toekomstig klimaatscenario met RCP4.5 voor de verschillende muuropbouwen. De waarden voor het klimaatscenario met RCP8.5 liggen hoofdzakelijk onder alle andere klimaten en het

historisch klimaatscenario ligt hoofdzakelijk boven alle andere klimaatscenario's. Enkel bij een niet-geïsoleerde muur van Bentheim liggen de lijnen van de toekomstige klimaatscenario's dicht bij elkaar. Opvallend in de grafiek is hoeveel keer nul kritische vorst- en dooicycli worden bereikt bij een niet-geïsoleerde muuropbouw met Bentheim. Soms zijn er hier en daar pieken die toch nog voldoende schade zouden kunnen aanrichten. Bij een niet-geïsoleerde Savonnièresmuur bereikt de curve van het toekomstig klimaatscenario met RCP 8.5 een paar keer 0 kritische vorst- en dooicycli op een jaar.

Op Figuur 6.23 en Figuur 6.24 is duidelijk te merken dat Bentheim in de muuropbouw zonder na-isolatie een heel stuk minder kritische vorst- en dooicycli heeft dan Savonnières. In de muuropbouw met na-isolatie komen deze in elkaars buurt. In het aantal kritische vorst- en dooicycli maakt Bentheim plots een zeer grote sprong als de muur isolatie zou bevatten. Opvallend is dat bij de muuropbouw zonder isolatie Bentheim vaak een nulwaarde aan kritische vorst- en dooicycli bereikt. Komt er in de muuropbouw echter isolatie bij, dan maakt Bentheim een sprong met een factor 10 in de gemiddelde waarde van het kritische vorst- en dooicycli voor elk klimaatscenario. Voor Savonnières is de factor niet zo groot en varieert hij tussen de 4 en 5.5.

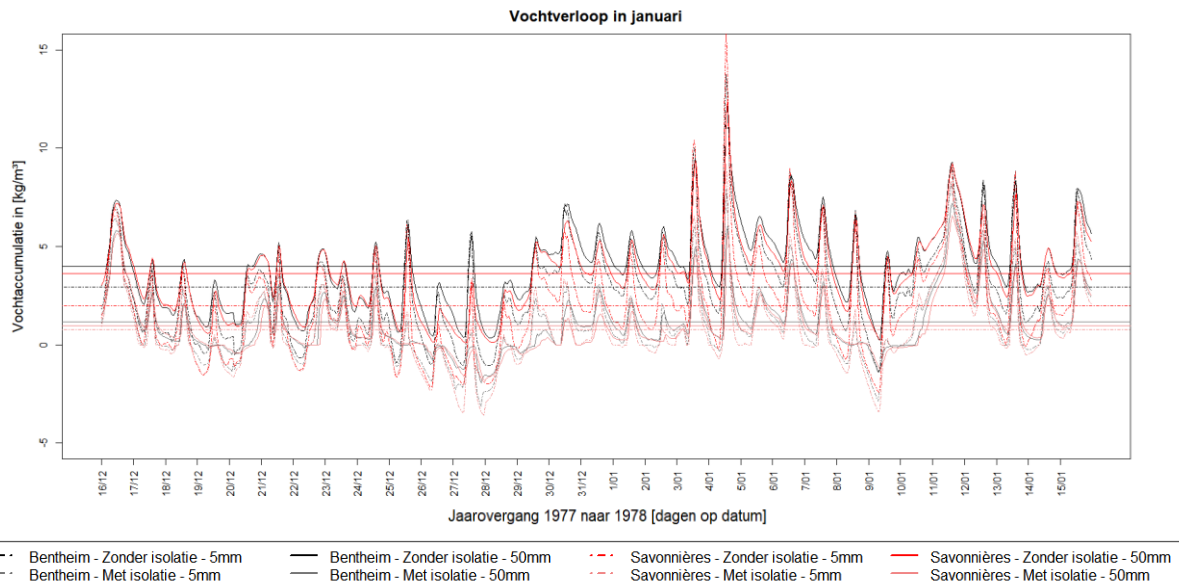


Figuur 6.24: Cumulatieve waarde voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) over een periode van 30 jaar voor de kritische diepte. De grafieken zijn opgesteld voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als voor een geïsoleerde muuropbouw (rechts) waarvoor de schaal op de y-as varieert.

Aan dit gedrag kunnen verschillende aspecten aan de oorzaak liggen. Als eerste is uit voorgaande onderzoeken gebleken dat de vochtopname met dezelfde procenten stijgt in Savonnières als in Bentheim. Mocht hier een verschil zijn, zou de kritische vorst- en dooicycli

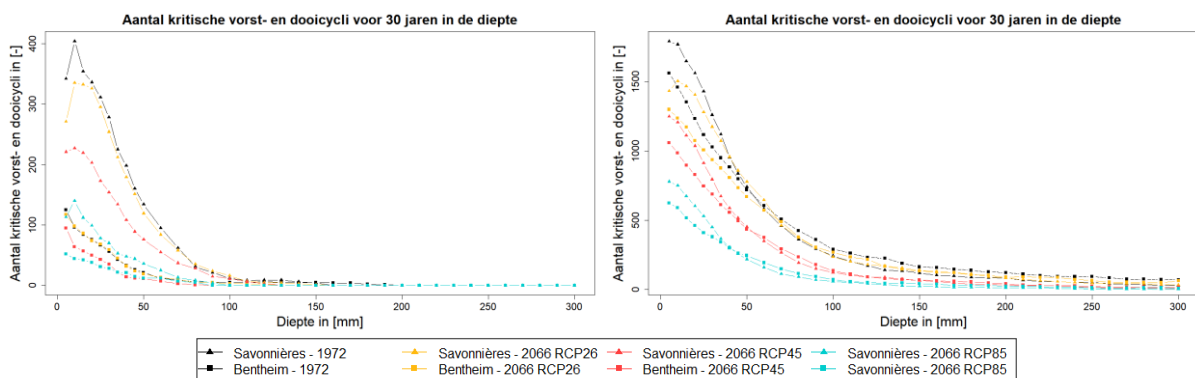
van Savonnières ook veel meer gestegen moeten zijn, want het vocht stijgt evenredig met de mogelijke vorstschade in de muur. Een tweede verklaring kan de temperatuur zijn. Als er meer in detail wordt gekeken naar de temperaturen in de muur voor de periode met de grote hoeveelheid vocht, namelijk de tweede regenperiode in de Natte Historische Periode, begint het duidelijk te worden waarom de grote sprong in het aantal kritische vorst- en dooicycli enkel ontstaat bij Bentheim (Figuur 6.23). In een niet-geïsoleerde muur kent Bentheim een gemiddelde temperatuur boven 0°C, de vriestemperatuur voor grote poriën, voor 5 mm diepte en voor 50 mm diepte tijdens de eerder vernoemde periode. De niet-geïsoleerde Savonnièresmuur zit in diezelfde periode al met negatieve temperaturen die de aanwezige grote poriën kunnen doen bevriezen. Wanneer de muur echter geïsoleerd is, bereikt Bentheim plots een veel negatievere temperatuur dan de muur zonder isolatie. Savonnières en Bentheim zullen evenveel verschillen in temperatuur als we de niet-geïsoleerde muuropbouw en de geïsoleerde muuropbouw ten opzichte van elkaar plaatsen (Figuur 6.25). Op deze manier komt Bentheim tot negatieve temperaturen met een gemiddelde van -1,82°C op een diepte van 5 mm en -1,53°C op een diepte van 50 mm. Respectievelijk bereikt Savonnières temperaturen van -2,25°C en -1,97°C. Doordat de temperaturen ongeveer even veel zullen dalen, blijft Savonnières een lagere temperatuur hebben dan Bentheim. Dit zal resulteren in een mogelijke bevriezing van kleinere poriën met als gevolg een hoger aantal kritische vorst- en dooicycli (Deprez, 2020).

De snelle bevriezing bij Bentheim bij het bereiken van een lagere temperatuur is volgens Ruedrich et al. (2011) & Joerg Ruedrich & Siegesmund (2007) te wijten aan de unimodale en gerichte poriënverdeling van Bentheim. Zij beweren dat hierdoor de natuursteen het vermogen heeft om het meeste water in 1 keer te bevriezen. Bij natuurstenen als bouwstenen is het aantal poriën tussen de 0.1 µm en 10 µm van groot belang voor de schade door kristallisatie (Benavente et al., 2011). Met die grootteorde worden de mesoporiën en een deel van de microporiën bedoeld. In unidirectionele bevriezing zijn kristallisatiedrukken de belangrijkste reden voor de schade veroorzaakt door kritische vries- en dooicycli. Volgens de Gibbs-Thomson-relatie zal het ijs zich vormen in poriën groter dan 1 µm tijdens de kristallisatie. Hieruit volgt dat de mesoporiën wel degelijk een groot belang hebben bij de schadevormen. Door hun kleinere grootte dan de macroporiën zorgen ze ook voor meer kristallisatiedrukken. Daaropvolgend zorgen de microporiën voor de meeste schade als er wordt gekeken in functie van de kristallisatiedrukken. Het aantal mesoporiën (met een grootte tussen 1 µm tot 10 µm bepaald door Deprez (2020) is ongeveer gelijk in Savonnières en Bentheim. Het aantal microporiën verschilt wel, namelijk met een factor twee. Savonnières heeft dubbel zoveel microporiën als Bentheim in hun poriënvolume (Deprez, 2020). Hieruit kan worden verondersteld dat het aantal kritische vorst- en dooicycli een grotere schade zou kunnen toebrengen aan de Savonnièressteen dan aan de Bentheimsteen.



Figuur 6.25: Temperatuurverloop in Savonnières en Bentheim voor 1 maand, van halverwege december tot halverwege januari, in de jaarovergang van de natte historische periode.

Als laatste toont Figuur 6.26 het aantal kritische vorst- en dooicycli in functie van de diepte. Opvallend hierbij is dat Savonnières in een muuropbouw met na-isolatie zich voor de eerste 5 cm boven het aantal kritische vorst- en dooicycli in Bentheim bevindt, maar vanaf dat punt komt het aantal van Savonnières onder dat van Bentheim te liggen. Deze diepte stelt de gemiddelde diepte over 30 jaar voor waarbij de hoeveelheid ijsmassa in Bentheim de hoeveelheid ijsmassa in Savonnières overtreft. In de eerste 5cm zal Savonnières veel meer ijsmassa aanmaken door een grotere aanwezigheid van water en een lagere temperatuur in de muur. Bentheim zal met zijn unimodale poriënverdeling het ijs tot op een veel grotere diepte brengen dan Savonnières, wat te merken is na de eerste 5cm. Bij een muuropbouw zonder isolatie ligt de temperatuur in Savonnières voor de eerste 90mm de temperatuur lager dan in Bentheim (Figuur 6.5). In het aantal kritische vorst- en dooicycli van een niet-geïsoleerde muur is de combinatie van een lagere temperatuur voor de eerste 90mm in combinatie met meer vocht nadelig voor Savonnières en zal dit een hoog aantal kritische vorst- en dooicycli opleveren.



Figuur 6.26: Het aantal kritische vorst- en dooicycli over 30 jaar voorgesteld in de diepte voor beide natuurstenen in een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) en een geïsoleerde muuropbouw (recht). De grafieken bevatten het aantal kritische vorst- en dooicycli voor alle klimaatscenario's.

Het verschillend gedrag van de twee natuurstenen heeft nog een verdere verklaring. Het niet-bevroren water in Bentheim wordt tijdens de bevroering van de steen weggeduwd van het ijsfront, terwijl in de Savonnièressteen het water net aangetrokken wordt door het ijsfront. Het wegduwen van water zal leiden tot hydraulische drukken in het geval van omnidirectionele bevroering. Dit zal echter niet voorkomen bij een bouw materiaal in de gevel doordat dit unidirectionele temperatuurschommelingen heeft. De HAM-simulaties die hier worden uitgevoerd zijn ook unidirectioneel, waardoor de gevolgen van omnidirectionele bevroering niet in rekening worden gebracht. Het openbarsten van de steen door hydraulische drukken heeft geen waarde die in het megapascal bereik ligt waardoor deze niet voorkomen in de unidirectionele meting. Het aanzuigen van water uit het onbevroren gedeelte van het materiaal, ook cryosuctie genoemd, zorgt voor de vorming van ijslenzen in Savonnières. Deze lenzen veroorzaken hoge kristallisatiedrukken en laten de natuursteen afbrokkelen en afschilferen aan de buitenste rand van de steen. Zoals eerder vermeld zijn kristallisatiedrukken de meest schadelijke factor voor vorstschade en heeft Savonnières meer microporiën dan Bentheim. Door dit fenomeen samen met de hydraulische drukken in Bentheim die geen voldoende grootte hebben om schade toe te brengen, wordt een hoger risico op vorstschade verwacht bij Savonnières. Ook zijn er meerdere kritische vorst- en dooicycli aanwezig in Savonnières dan in Bentheim waardoor de kristallisatiedrukken nog versterkt worden. Per cyclus zullen de kristallisatiedrukken opnieuw voorkomen en schade toebrengen aan de steen indien ze groot genoeg zijn. Cryosuctie in Savonnièressteen kan zijn voor- en nadelen hebben. Het ijsfront in Savonnières beweegt zich naar de buitenkant toe. Bij cryosuctie wordt het water naar het ijsfront toegezogen en kan de steen makkelijker uitdrogen na het ontdooien. Als het weer het drogen niet toelaat, zorgt dit effect echter voor een groter risico op vries- en dooischade omdat er meer water aanwezig zal zijn in de poriën door cryosuctie.

Als de totale druk, veroorzaakt door ijskristallen of ijslenzen, de lokale treksterkte van het bevroren materiaal overtreft, zal er vorstschade optreden. De ijsmassa in een porie kan op zichzelf de treksterkte van het materiaal overwinnen en daar schade toebrengen. Volgens Scherer (1999) zal enkel schade optreden wanneer de temperatuur laag genoeg is om ijsgroei te doen ontstaan in de poriën met een doorbraakporiestraal. Dit laatste wijst op de karakteristieke poriegrootte die de permeabiliteit van vloeistof door het materiaal regelt. Hoe groter de concentratie ijs in een bepaald volume, hoe groter de kans dat de poriën wanden worden beïnvloed door kristallisatiedrukken en dus hoe groter de kans op falen van het materiaal (Johannesson, 2010).

In de paper van Deprez (2020) staat een verzachtende factor voor de schade die ontstaat door de kritische vorst- en dooicycli. Bij een aanwezigheid van ink-bottle poriën kan het risico op cyclische vorstschade gereduceerd worden. Ink-bottle poriën zijn poriën die in normale omstandigheden gevuld zijn met lucht. Groeiende kristallen die zelf water uit de kleine poriën aanzuigen, zoals bij Savonnières, kunnen zich in die holtes gaan huisvesten. Ze fungeren als

het ware als een expansiereservoir. Hierdoor kan de schade van Savonnières worden gereduceerd.

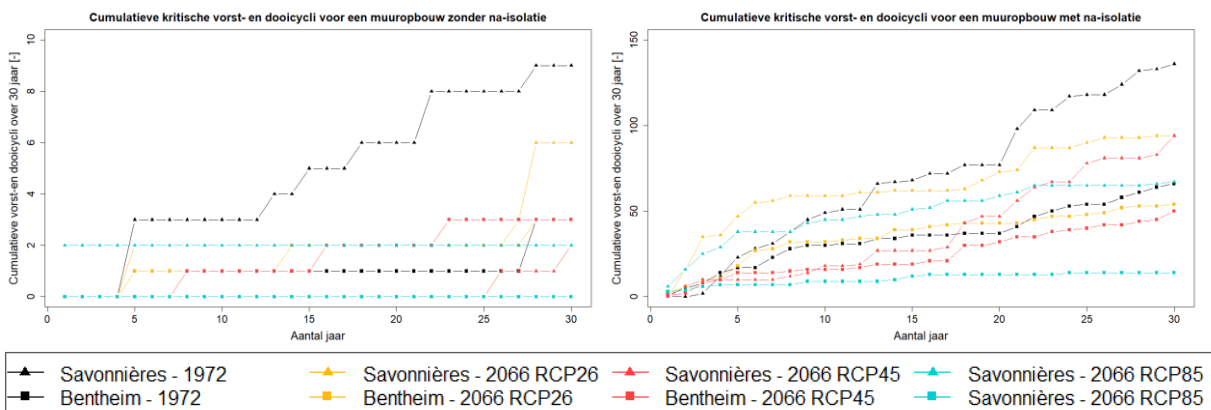
6.2.1.2 Noordelijke en noordwestelijke oriëntatie

Om het aantal kritische vorst- en dooicycli in de verschillende muuropbouwen te vergelijken, is voor iedere muuropbouw de kritische diepte gezocht. Tabel 6.2 geeft de kritische dieptes weer voor beide windrichtingen. Het valt op dat Savonnières voor zowel de geïsoleerde muur als de niet-geïsoleerde muur een kritische diepte heeft rond de 15 mm terwijl deze zich bij Bentheim altijd in de eerste 5 mm van de natuursteen bevindt. Met het aantal kritische vorst- en dooicycli op de kritische diepte worden 2 oriëntaties en 2 natuurstenen met elkaar vergeleken.

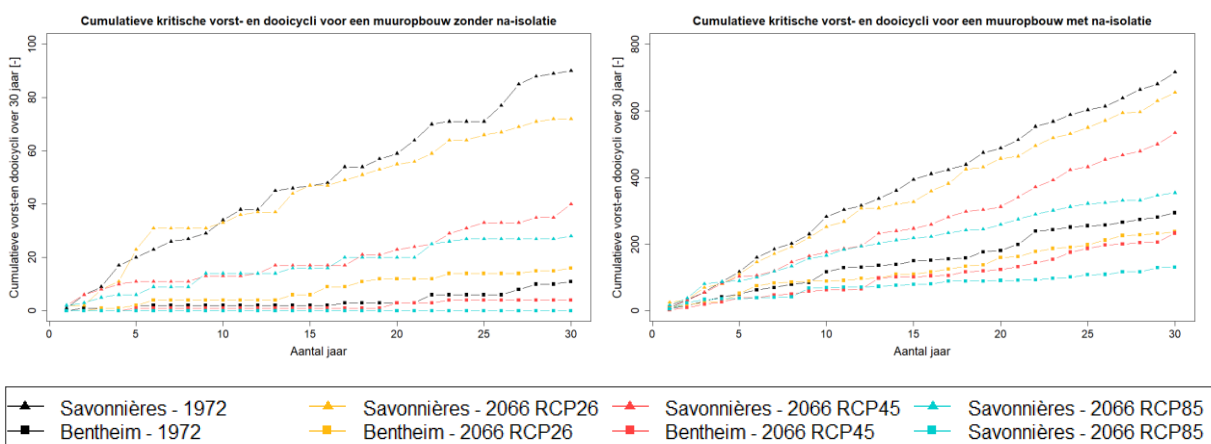
Muuropbouw		Kritische diepte aan de noordzijde [mm]	Kritische diepte aan de noordwestzijde [mm]
Savonnières	Zonder isolatie	15	15
	Met isolatie	20	15
Bentheim	Zonder isolatie	5	5
	Met isolatie	5	5

Tabel 6.2: De kritische dieptes voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in de verschillende muuropbouwen georiënteerd naar het noorden en naar het noordwesten.

Algemeen kan gesteld worden dat de natuursteen in de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie veel minder kritische vorst- en dooicycli bevatten dan de zuidwestelijke oriëntatie. De maximale kritische vorst- en dooicycli die behaald worden, komen telkens voor in de muuropbouw met Savonnières in het historische klimaatscenario. Voor de zuidwestelijk oriëntatie bedraagt dit aantal 404, in de noordelijke oriëntatie 9 en in de noordwestelijk oriëntatie 90 voor een muuropbouw zonder isolatie. Voor een muuropbouw met isolatie bedragen deze waarden respectievelijk 1793, 136 en 716. Grotendeels is het veel lagere aantal (vooral in de noordelijke windrichting) te wijten aan het feit dat er veel minder vocht aanwezig is in de muren. Als Savonnières en Bentheim vergeleken worden met elkaar, zoals te zien in Figuur 6.27 en Figuur 6.28, kan gesteld worden dat Bentheim hetzelfde fenomeen ondergaat in de noordelijke oriëntatie als in de zuidwestelijke oriëntatie, maar minder sterk. De Duitse kalkzandsteen heeft in de niet-geïsoleerde muur veel minder kritische vorst- en dooicycli dan de Noord-Franse Savonnièressteen. Als de muur echter geïsoleerd wordt komt het aantal van de kritische vorst- en dooicycli van Bentheim een stuk dichterbij het aantal kritische vorst- en dooicycli van Savonnières. Echter is dit fenomeen niet zo goed zichtbaar bij de noordwestelijke oriëntatie.

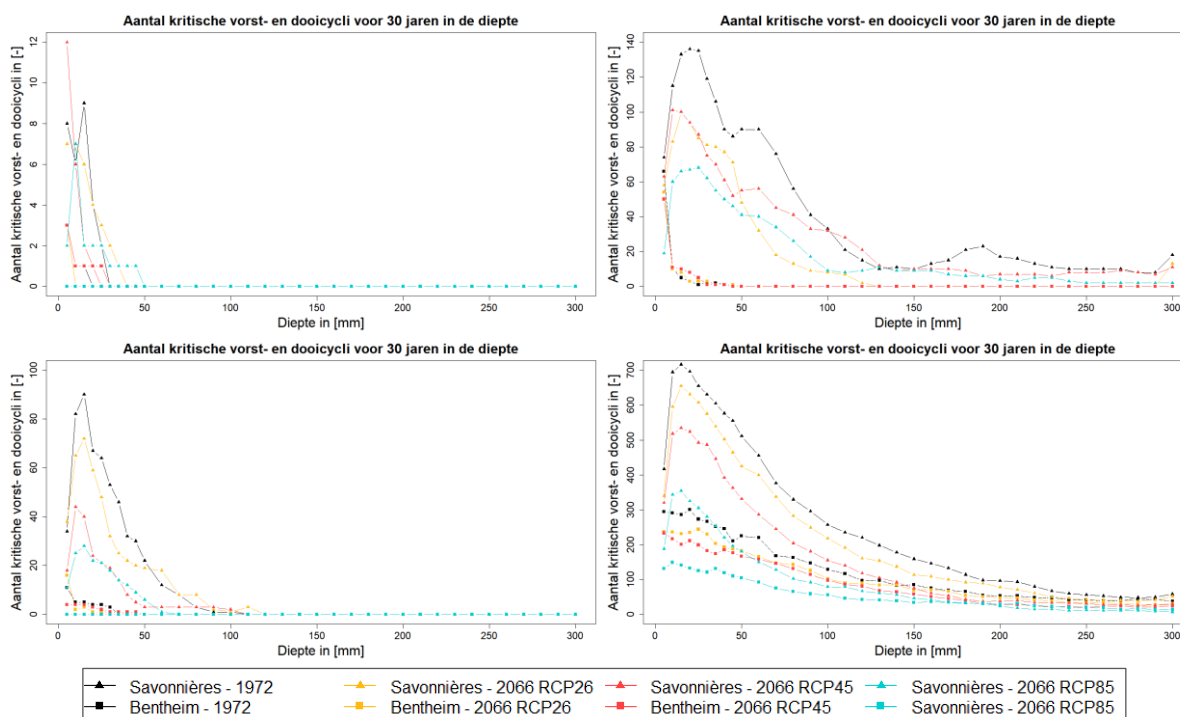


Figuur 6.27: Cumulatieve waarde voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières en Bentheim over een periode van 30 jaar voor de noordelijke oriëntatie. De grafieken zijn voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als voor een geïsoleerde muuropbouw (rechts).



Figuur 6.28: Cumulatieve waarde voor het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières en Bentheim over een periode van 30 jaar voor de noordwestelijke oriëntatie. De grafieken zijn voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) als voor een geïsoleerde muuropbouw (rechts).

In Figuur 6.29 wordt het aantal kritische vorst- en dooicycli weergegeven in functie van de diepte. Voor de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie gebeurt er iets anders dan in de zuidwestelijke oriëntatie muur. Als de muur op deze windstreken georiënteerd staat blijft het aantal kritische vorst- en dooicycli van Savonnières steeds boven het aantal van Bentheim. Er blijft telkens een groot verschil tussen het aantal kritische vorst- en dooicycli in de 2 soorten natuursteen. In de noordwestelijke oriëntatie is er echter een grote stijging te merken van het aantal kritische vorst- en dooicycli bij Bentheim bij de plaatsing van na-isolatie, maar het aantal gaat in de eerst 50mm terug naar nul voor alle klimaatscenario's. In die situatie is er een grotere aanwezigheid van water in vergelijking met de noordelijke georiënteerde gevel, maar wel een ongeveer gelijke temperatuur, waardoor het aantal kritische vorst- en dooicycli een heel stuk hoger ligt. Het maximale aantal aan kritische vorst- en dooicycli in de noordelijke oriëntatie ligt 10 keer lager in een niet-geïsoleerde Savonnièresmuur en 3 keer lager in een niet-geïsoleerde Bentheimmuur in vergelijking met een noordwestelijke oriëntatie. Voor een geïsoleerde muuropbouw verschillen de waarden met een factor 5.



Figuur 6.29: Het aantal kritische vorst- en dooicycli in functie van de diepte voor Savonnières en Bentheim in een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) en een geïsoleerde muuropbouw (rechts) voor alle klimaatscenario's in zowel een noordelijke gerichte gevelopbouw (bovenaan) als in een noordwestelijke gerichte gevelopbouw (onderaan).

6.2.2 Methode 2: Bepalen van kritische vorst- en dooicycli aan de hand van een grenstemperatuur

Via een andere methode gaan we de vorstschade proberen in te schatten aan de hand van de temperaturen in de natuursteen en deze linken aan de buitenlucht. Hierbij wordt bepaald hoeveel de temperaturen in de buitenlucht afwijken van de temperaturen in de steen. Er zijn twee belangrijke aspecten die aanwezig moeten zijn voor er vorstschade kan optreden in de steen en dat is de aanwezigheid van vocht en voldoende lage temperatuur. Omdat hier enkel gerekend wordt met een temperatuur, wordt verondersteld dat er telkens voldoende vocht aanwezig is in de muur. In de zuidwestelijk oriëntatie kan dit een goede indicatie zijn omdat de muur, vooral met Savonnières, niet snel uitdroogt en licht vochtig blijft doorheen de jaren. De noordelijke en noordwestelijke oriëntatie zullen minder relevant zijn om de vorstschade in te schatten via de temperatuur door de mindere aanwezigheid van vocht.

Deze methode wordt dus toegepast op de drie windrichtingen met in het achterhoofd de opmerking van hierboven. Met welke diepte de buitentemperatuur wordt vergeleken hangt af van welke diepte de meest kritische diepte is. Hiervoor wordt gestart met het bepalen van de kritische vorst- en dooicycli op elke diepte. Als grenswaarde voor de temperatuur wordt -3°C genomen, de uiterste grens van het 'frost cracking window'. Dit laatste is een temperatuurzone die opgelegd is door verschillende onderzoekers die beweren dat in rotsen de eerste

schadelijke barsten voorkomen in die temperatuurzone, namelijk van -3°C tot -8°C (Anderson, 1998). In deze thesis wordt het aantal kritische vorst- en dooicycli bepaald door te kijken naar het aantal keer dat de steen met zijn temperatuur in die zone komt. Verder in het onderzoek zal de grenswaarde voor de temperatuur in de steen gelinkt worden aan de luchttemperatuur waardoor een ruwe inschatting kan gemaakt worden over het gedrag van de natuurstenen op vorst via de luchttemperatuur.

6.2.2.1 Zuidwestelijke oriëntatie

Er worden twee referentietemperaturen gebruikt om de kritische vorst- en dooicycli te bepalen. In eerste instantie wordt gekeken hoeveel keer de steen op een negatieve temperatuur komt en waar de mogelijkheid ontstaat om ijs te vormen (Tabel 6.3). Tussen 0°C en -3°C kunnen wel scheuren ontstaan maar het zijn daarom geen schadelijke scheuren voor rotsen (Anderson, 1998). Vanaf -3°C wordt het 'frost cracking window' betreden. Bij het bereiken van die temperatuur in de steen zouden er belangrijke scheuren ontstaan die de steen vorstschade kunnen toebrengen. In Tabel 6.4 zijn het aantal kritische vorst- en dooicycli bepaald voor een grenstemperatuur van -3°C . Het aantal kritische vorst- en dooicycli is telkens opmerkelijk kleiner bij Bentheim dan bij Savonnières. Bij de geïsoleerde muren worden altijd de meeste kritische vorst- en dooicycli bereikt en komen de waarden van de verschillende natuurstenen bij elkaar in de buurt. Dit wordt logisch geacht omdat bij eenzelfde luchttemperatuur het kouder wordt in een muur met (na-)isolatie dan in een muur zonder isolatie. In Tabel 6.5 is het verschil gegeven voor de luchttemperatuur en de temperatuur in de steen ter hoogte van de eerste sectie (0 tot 5 mm). Zelfs op die diepte is er al een duidelijk verschil voor een muur met isolatie en een muur zonder isolatie. Het verschil met de luchttemperatuur is het grootst in de muren zonder isolatie. Het verschil is negatief wat wil zeggen dat de muur warmer heeft dan de buitentemperatuur. Door het plaatsen van isolatie wordt de muur kouder waardoor deze dus ook minder zal verschillen met de buitentemperatuur. Het plaatsen van binnenisolatie verhoogt ook volgens deze methode de kans op het aantal kritische vorst- en dooicycli.

Klimaat	Aantal kritische vorst- en dooicycli over 30 jaar met referentietemperatuur van 0°C			
	Savonnières		Bentheim	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Historisch klimaat	2069	2741	1302	2457
Toekomstig klimaat RCP26	1831	2496	1126	2235
Toekomstig klimaat RCP45	1345	1949	701	1642
Toekomstig klimaat RCP85	705	1201	302	945

Tabel 6.3: Het aantal kritische vries- en dooicycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van 0°C .

Klimaat	Aantal kritische vorst- en doocycli over 30 jaar met referentietemperatuur van -3°C			
	Savonnières		Bentheim	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Historisch klimaat	470	829	238	682
Toekomstig klimaat RCP26	393	752	164	614
Toekomstig klimaat RCP45	211	373	96	274
Toekomstig klimaat RCP85	84	155	22	111

Tabel 6.4: Het aantal kritische vries- en doocycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van -3°C.

Om in een muur zonder isolatie -3°C te bereiken zou de buitenluchttemperatuur al moeten dalen tot een temperatuur van ongeveer -5°C ($\pm 0.12^\circ\text{C}$) bij een Savonnièressteen en tot -5.64°C ($\pm 0.20^\circ\text{C}$) bij een Bentheimsteen. Doordat Savonnières een minder lage luchttemperatuur nodig heeft zullen daar mogelijks meer kritische vorst- en doocycli ontstaan. Dat Savonnières een kleiner verschil bereikt tussen de 5 mm diepte en de luchttemperatuur is te wijten aan het feit dat Savonnières minder energie nodig heeft om de steen af te koelen of op te warmen. De soortelijke warmte bedraagt in Savonnières 10 J/kg*K minder dan in Bentheim.

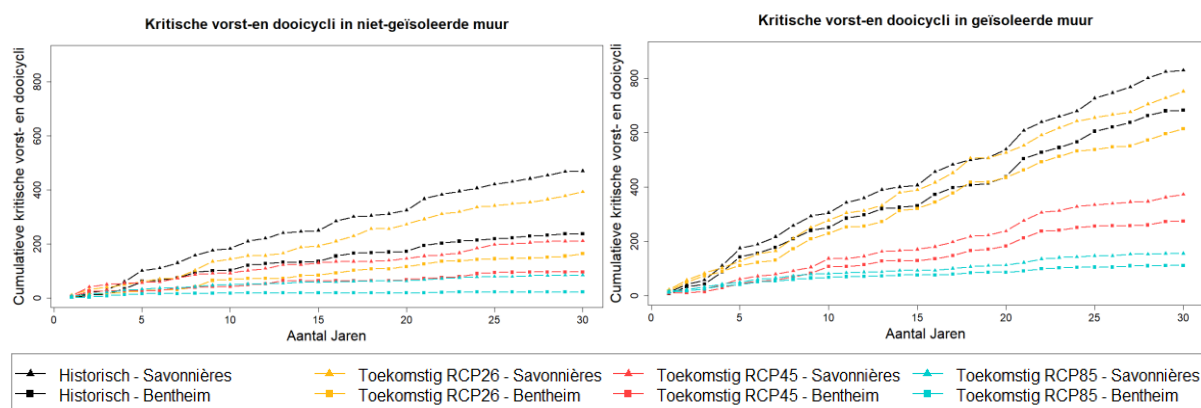
Klimaat	Verschil in °C tussen de luchttemperatuur en de temperatuur in de steen op 5mm diepte			
	Savonnières		Bentheim	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Historisch klimaat	-2.12	-0.92	-2.83	-1.18
Toekomstig klimaat RCP26	-2.16	-1.00	-2.85	-1.22
Toekomstig klimaat RCP45	-1.94	-0.91	-2.58	-1.15
Toekomstig klimaat RCP85	-1.89	-0.89	-2.44	-1.11

Tabel 6.5: Het verschil tussen de temperaturen in de natuurstenen op de een diepte van 5 mm en de buitenluchttemperatuur.

Algemeen is het verschil in temperatuur een heel stuk kleiner in de muren met isolatie dan in de muren zonder isolatie. Hierdoor kan al bij een hogere luchttemperatuur de kritische temperatuur van -3°C bereikt worden in de natuursteen. Ze zal nog steeds eerder bereikt

worden in Savonnières dan in Bentheim en in combinatie met het feit dat Savonnières steeds meer en langer vocht bewaart in de muur zal dit resulteren in nog steeds grotere aantallen van kritische vorst- en dooicycli. In de geïsoleerde muur met Savonnières kan al bij een luchttemperatuur van ongeveer -3.93°C ($\pm 0.06^{\circ}\text{C}$) een temperatuur van -3°C bereikt worden in de natuursteen, terwijl bij Bentheim de muur een luchttemperatuur nodig heeft van -4.17°C ($\pm 0.06^{\circ}\text{C}$) om de steen te laten zakken tot een temperatuur van -3°C . Het verschil van 0.25°C tussen deze twee waarden kan er voor zorgen dat in sommige gevallen Savonnières net wel een kritische vorst- en dooicyclus bereikt volgens deze methode en dat Bentheim net gespaard blijft van een kritische vorst- en dooicyclus.

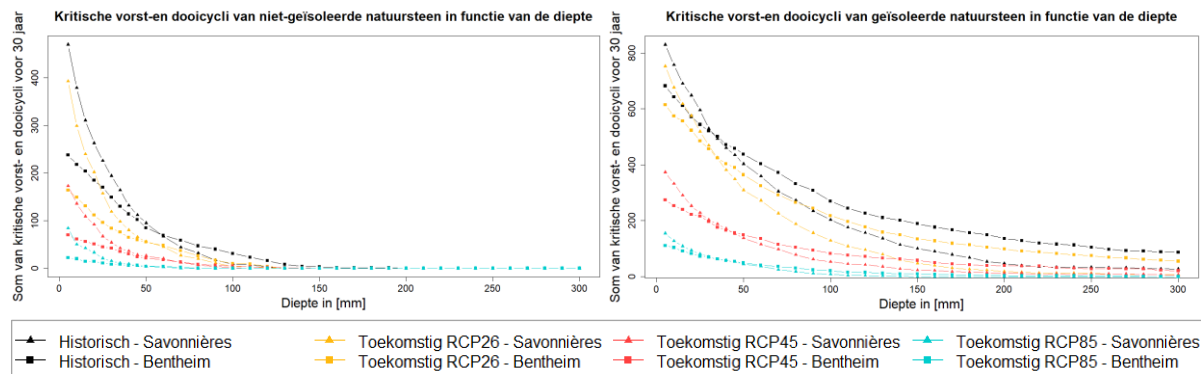
In de toekomst zal het aantal vries- en dooicycli volgens deze methode dalen doordat de temperaturen algemeen zullen stijgen, ongeacht in welk klimaatscenario we ons zullen bevinden (Figuur 6.30). Over 30 jaar heen, kan dit zorgen voor ofwel een lichte of een heel grote daling in kritische vorst- en dooicycli. In een niet-geïsoleerde steen kan dit zorgen voor een daling tussen de 16.4% en 82.0% voor Savonnières en een daling tussen 31% en 90.8% voor Bentheim. In een geïsoleerde muur krijgen we een daling van 9.3% tot 81.3% voor Savonnières en van 10% tot 83.7% voor Bentheim. Indien er isolatie in de muuropbouw wordt geplaatst kunnen we dus een gelijkaardige daling verwachten in beide natuurstenen. Zonder isolatie daarentegen zorgt Bentheim met zekerheid al voor een daling van een derde t.o.v. het aantal kritische vorst- en dooicycli bepaald in het historische klimaatdata. In het geval de muur niet-geïsoleerd blijft, is een muuropbouw uit Bentheim beter dan Savonnières als je ziet hoe het aantal kritische vorst- en dooicycli evolueert naar de toekomst toe. Voor een geïsoleerde muuropbouw scoort Bentheim ook nog steeds als beste, maar het verschil tussen de twee natuurstenen is miniem.



Figuur 6.30: Cumulatieve kritische vorst- en dooicycli over 30 jaar voor een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) en een geïsoleerde muuropbouw (rechts).

Als de kritische vorst- en dooicycli over de gehele diepte van de steen worden bekeken dan verschijnt er eenzelfde fenomeen als bij de andere methode (Figuur 6.31). Ook hier ligt het aantal kritische vries- en dooicycli van Bentheim eerst onder die van Savonnières, om ze na een bepaalde diepte zelf te overtreffen. Bij de vorige methode gebeurde dit enkel in de muuropbouw met na-isolatie, terwijl dit hier in beide muuropbouwen gebeurt. De oorzaak is

te vinden in het verloop van de temperatuur in de steen. Aan de voorkant heeft Savonnières een lagere temperatuur dan Bentheim wat resulteert in een hoger aantal kritische vorst- en dooicycli. Na een bepaalde diepte wordt de temperatuur in Bentheim kouder dan in Savonnières omdat Savonnières een grotere hellingshoek heeft voor het verloop van temperatuur over de diepte.



Figuur 6.31: Cumulatieve kritische vorst- en dooicycli over 30 jaar in functie van de diepte voor een niet-geïsoleerde muuropbouw (links) en een geïsoleerde muuropbouw (rechts).

Het aantal kritische vorst- en dooicycli zal minder snel afnemen in Bentheim wat te verklaren is door zijn minder isolerende werking. In het onderdeel 6.1 'Temperatuur' werd in Figuur 6.5 aangetoond dat Savonnières veel sneller zal stijgen in temperatuur dan Bentheim. Hier baseren we ons enkel op de temperatuur waardoor het fenomeen van een sneller stijgende temperatuur in Savonnières zich uit in deze grafiek. Het aantal cycli zal vroeger tot nul komen in Savonnières. Bij isolatie aanwezig in de muur zullen er nog steeds kritische vorst- en dooicycli blijven vertoond worden over de gehele diepte van 30 cm natuursteen bij alle klimaatscenario's met uitzondering van het pessimistisch toekomstig klimaatscenario (RCP8.5). Voor het laatstgenoemde klimaatscenario komen beide stenen redelijk snel tot een aantal van 0 kritische vorst- en dooicycli, namelijk in de helft van de muur, doordat de temperatuur in het pessimistische scenario veel zal stijgen. Plaatsen van na-isolatie is volgens deze methode niet echt bevorderlijk voor de vorstschade die volgens de voorspelde kritische vorst- en dooicycli.

6.2.2.2 Noordelijke en noordwestelijke oriëntatie

In de noordelijke en noordwestelijk windrichting wordt dezelfde analyse uitgevoerd om het aantal kritische vorst- en dooicycli te bepalen aan de hand van een temperatuurgrens. Tabel 6.7 en Tabel 6.7 tonen aan hoeveel keer de temperatuur in de natuurstenen onder 0 gaat. In de natuurstenen muur gericht volgens beide oriëntaties is dit een lager aantal dan een natuurstenen muur gericht volgens de zuidwestelijke oriëntatie. De temperatuur ligt over het algemeen lager in de natuursteen die noordelijk of noordwestelijk georiënteerd is. In een zuidwestelijke muuropbouw zullen er zich meer fluctuaties voordoen rond de 0°C waardoor de meeste kritische vorst- en dooicycli voor een muur in de zuidwestelijke oriëntatie berekend

worden. De noordwestelijke oriëntatie zorgt telkens wel voor net iets meer kritische vorst- en doocycli. De luchttemperatuur is het noordwesten lichtjes verschillend van de noordelijke temperatuur die het verschil hier zullen maken over een periode van 30 jaar. Voor het aantal kritische vorst- en doocycli komt op deze manier gemiddeld in elk jaar van de 30-jarige periode 1 à 2 kritische vorst- en doocycli bij voor een muur in de noordwestelijk oriëntatie, in vergelijking met een muur in de noordelijke oriëntatie. In het noordwesten zijn iets hogere temperaturen te vinden die ervoor zullen zorgen dat bij een vriesperiode net onder de 0°C de temperatuur sneller rond het vriespunt zal fluctueren dan een muur in het noordwesten. Deze zal langer onder nul blijven bij een vriesperiode net onder 0°C.

Klimaat	Aantal kritische vorst- en doocycli over 30 jaar met referentietemperatuur van 0°C in noordwest gerichte muur			
	Savonnières		Bentheim	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Historisch klimaat	1662	2054	931	1849
Toekomstig klimaat RCP26	1533	1788	855	1592
Toekomstig klimaat RCP45	1138	1527	542	1339
Toekomstig klimaat RCP85	572	1057	210	933

Tabel 6.6: Het aantal kritische vries- en doocycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van 0°C in een noord gerichte muur.

Klimaat	Aantal kritische vorst- en doocycli over 30 jaar met referentietemperatuur van 0°C in noord gerichte muur			
	Savonnières		Bentheim	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Historisch klimaat	1639	2051	851	1784
Toekomstig klimaat RCP26	1497	1813	799	1555
Toekomstig klimaat RCP45	1089	1522	508	1286
Toekomstig klimaat RCP85	551	1057	210	884

Tabel 6.7: Het aantal kritische vries- en doocycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van 0°C in een noordwest gerichte muur.

Vervolgens wordt hetzelfde toegepast met een grenstemperatuur in de natuursteen op -3°C (Tabel 6.8 en Tabel 6.9). Ook hier bedragen het aantal kritische vorst- en dooicycli voor een natuursteen in een noordelijk of noordwestelijk georiënteerde muur een stukje hoger dan bij een zuidwestelijk georiënteerde muur. De noordwestelijke oriëntatie geeft het grootste aantal kritische vorst- en dooicycli weer voor een temperatuurgrens van -3°C , wat te wijten is aan de iets hogere temperatuur in de natuursteen in een noordwestelijke gevel. Door dit kleine verschil zal de temperatuur voor de muur in het noordwesten soms net niet onder de -3°C -grens komen, waardoor er geen kritische vorst- en dooicycli wordt gerekend.

Klimaat	Aantal kritische vorst- en dooicycli over 30 jaar met referentietemperatuur van -3°C			
	Savonnières		Bentheim	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Historisch klimaat	510	906	231	809
Toekomstig klimaat RCP26	449	918	177	801
Toekomstig klimaat RCP45	240	568	112	497
Toekomstig klimaat RCP85	92	266	26	219

Tabel 6.8: Het aantal kritische vries- en dooicycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van -3°C in een noord gerichte muur.

Klimaat	Aantal kritische vorst- en dooicycli over 30 jaar met referentietemperatuur van -3°C			
	Savonnières		Bentheim	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Historisch klimaat	486	862	227	750
Toekomstig klimaat RCP26	410	882	179	757
Toekomstig klimaat RCP45	224	529	112	448
Toekomstig klimaat RCP85	88	235	26	197

Tabel 6.9: Het aantal kritische vries- en dooicycli over 30 jaar met een referentietemperatuur van -3°C in een noordwest gerichte muur.

Het verschil tussen de luchttemperatuur en de temperatuur in de natuursteen op 5mm diepte liggen voor beide windrichtingen dicht bij elkaar (Tabel 6.10 en Tabel 6.11). Een niet-geïsoleerde muur met Savonnières zou een buitenluchttemperatuur moeten bereiken van -4.29°C ($\pm 0.11^{\circ}\text{C}$) en voor Bentheim een buitenluchttemperatuur van -5.00°C ($\pm 0.17^{\circ}\text{C}$). Voor een geïsoleerde muur bedragen deze waarden respectievelijk -3.21°C ($\pm 0.02^{\circ}\text{C}$) en -3.26°C ($\pm 0.02^{\circ}\text{C}$), wat door de hogere temperatuur zal zorgen voor meer kritische vorst- en dooicycli in een muuropbouw met na-isolatie. Voor Savonnières wordt in beide muuropbouwen telkens bij een hogere luchttemperatuur kritische vorst- en dooicycli gerekend. In de muuropbouw in de zuidwestelijke richting ontstaan veel minder snel kritische vorst- en dooicycli dan in de muuropbouwen in de noord- en noordwestelijke oriëntaties. In een muur zonder na-isolatie ligt voor de noord- en noordwestelijke oriëntaties de luchttemperatuurgrens voor het ontstaan van kritische vorst- en dooicycli ongeveer 0.70°C hoger, waardoor volgens deze methode meer kritische vorst- en dooicycli berekend worden voor natuurstenen in deze oriëntatie. Voor de geïsoleerde muuropbouwen ontstaan kritische vorst- en dooicycli al voor een 0.80°C tot 1.00°C hogere luchttemperatuur in de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie in vergelijking met de zuidwestelijke oriëntatie.

Het noorden en noordwesten zorgt over het algemeen voor een lager vochtgehalte in de steen waardoor deze inschatting voor de kritische vorst- en dooicycli minder correct zal zijn. Bij de methode met de grenstemperatuur wordt verwacht dat op ieder moment dat de temperatuur in de natuursteen onder de grenstemperatuur gaat, er voldoende vocht in de muur aanwezig is om aan ijsvorming te doen. Dit is niet altijd het geval waardoor hier sprake is van een overschatting. De temperaturen zijn hier inderdaad lager, wat meer schadelijk is indien er voldoende vocht aanwezig is in de muur.

Klimaat	Verschil in $^{\circ}\text{C}$ tussen de luchttemperatuur en de temperatuur in de steen op 5mm diepte			
	Savonnières		Bentheim	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Historisch klimaat	-1.39	-0.21	-2.18	-0.24
Toekomstig klimaat RCP26	-1.37	-0.21	-2.16	-0.25
Toekomstig klimaat RCP45	-1.18	-0.19	-1.91	-0.24
Toekomstig klimaat RCP85	-1.18	-0.22	-1.83	-0.27

Tabel 6.10: Het verschil tussen de temperaturen in de natuurstenen, gericht naar een noordwestelijke richting op een diepte van 5 mm en de buitenluchttemperatuur.

Klimaat	Verschil in °C tussen de luchttemperatuur en de temperatuur in de steen op 5mm diepte			
	Savonnières		Bentheim	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Historisch klimaat	-1.41	-0.22	-2.19	-0.27
Toekomstig klimaat RCP26	-1.40	-0.23	-2.17	-0.28
Toekomstig klimaat RCP45	-1.22	-0.22	-1.94	-0.26
Toekomstig klimaat RCP85	-1.19	-0.22	-1.83	-0.27

Tabel 6.11: Het verschil tussen de temperaturen in de natuurstenen, gericht naar een noordelijke richting op een diepte van 5 mm en de buitenluchttemperatuur.

6.3 Conclusie

Het is duidelijk dat de klimaatsverandering een effect heeft op de verwerking van natuursteen. Savonnières is een zachte, poreuze kalksteen met een multimodale poriënverdeling waarvan een groot deel bestaat uit kleine poriën. Hoewel de grote poriën als eerste worden gevuld, hebben de kleine de grootste capillaire druk. Die zullen vooral zorgen dat Savonnières veel vocht zal opnemen vooral bij een langdurige regenbui. Het drogingsproces verloopt traag waardoor de muur langere tijd vochtig blijft.

Verder zal Savonnières door zijn lage lambda-waarde in de winter onderhevig zijn aan kleine temperatuurschommelingen. De lambda-waarde in combinatie met de soortelijke warmte zal in de zomer grote temperatuurschommelingen opleveren door de aanwezige zonnestraling. In de 30-jarige klimaatdata van het verleden, heeft Savonnières een veelvuldige aanwezigheid van kritische vorst- en doocycli getoond. De kalksteen zal door zijn lage temperatuur in de steen en de hoge vochtaccumulatie een grote hoeveelheid ijsmassa aanmaken. De schade ten gevolge van kritische vorst- en doocycli zal eerder oppervlakkig voorkomen. De voortplanting van de ijsmassa wordt verhinderd door de multimodale poriënverdeling. De veranderingen van het klimaat zullen echter een gunstig effect hebben op de verwerking van de natuursteen door een dalend aantal kritische vorst- en doocycli.

De huidige trend om overheidsgebouwen of erfgoedgebouwen te herbestemmen, zorgt ervoor dat na-isolatie in historische gebouwen wordt geplaatst. Dit gaat gepaard met een daling in de temperatuur van de steen en met een langere en grotere aanwezigheid van vocht. De plaatsing van na-isolatie zorgt ervoor dat de uitdroging enkel kan plaatsvinden langs één zijde, het gevelvlak. Het uitdrogen van de steen neemt nu nog meer tijd in beslag.

Hierdoor zal het aantal kritische vorst- en doocycli problematisch stijgen. Het gunstige effect van de klimaatsverandering zal dit effect slechts minimaal kunnen counteren.

Voor de Duitse Bentheimsteen zal de klimaatsverandering ook zijn effect nalaten. Bentheim is een harde kalkzandsteen, met een unimodale verdeling van de poriënstructuur. Grotendeels bestaat de steen uit grote poriën die het water eerst zullen opnemen, pas daarna worden de kleine poriën gevuld. Door de kleine hoeveelheid aan microporiën neemt de natuursteen een lage vochthoeveelheid op. Het vocht verspreidt zich echter vaak over de volledige diepte door zijn unimodale poriënverdeling. Verder heeft Bentheim een grote waterabsorptiecoëfficiënt die zal zorgen voor een snelle wateropname.

Met zijn hoge lambda-waarde zorgt Bentheim voor grote temperatuurschommelingen, zowel in de winter als in de zomer, maar de temperatuur zal zich niet snel verspreiden in de diepte. Deze kenmerken van Bentheim zorgen voor een klein aantal kritische vorst- en doocycli in de voorbij klimaatdata. De temperaturen blijven vaak nog boven nul en samen met een lage vochthoeveelheid zorgt dit voor de vorming van minder ijsmassa. De klimaatsveranderingen zullen met hun gunstig effect dit klein aantal kritische vorst- en doocycli nog meer doen dalen.

Wanneer we de muur uit Bentheim na-isoleren, zien we een sterke stijging voor het aantal kritische vorst- en doocycli. De muur komt nu op een lagere temperatuur waardoor deze meermaals onder 0°C gaat. Daarnaast zal Bentheim ook meer vocht vasthouden dan voorheen. Het vocht verspreidt zich snel en diep in de steen.

Het langer nat blijven van de steen en de diepe bevochtiging zorgt voor kritische vorst- en doocycli op een grote diepte voor de zandsteen. De ijsmassa kan zich diep voortplanten door de unimodale poriënverdeling in Bentheim, wat leidt tot een aantal kritische vorst- en doocycli op grote diepte. Het plaatsen van na-isolatie zorgt voor een drastische stijging in het aantal kritische vorst- en doocycli. Een muur met na-isolatie bereikt 15 keer meer kritische vorst- en doocycli dan een muur zonder na-isolatie. Het gunstige effect van het klimaat laat dit aantal deels dalen, maar de stijging blijft enorm.

Als we de twee besproken natuurstenen t.o.v. elkaar plaatsen is het duidelijk dat Savonnières een hoger aantal kritische vorst- en doocycli vertoont dan Bentheim. Het verschillend temperatuurverloop van de twee stenen in een niet-geïsoleerde muur is vooral te wijten aan de verschillende lambda-waarde. Savonnières zal met het grootste aantal kleine poriën een groter vochtgehalte bereiken in de steen. De lagere temperatuur en het hoger vochtgehalte zorgt dat Savonnières meer ijsmassa zal aanmaken dan Bentheim. Dit is af te lezen in het aantal kritische vorst- en doocycli, waarbij Savonnières meer kritische vorst- en doocycli vertoont. Het aantal kritische vorst- en doocycli wordt in een niet-geïsoleerde muur beperkt tot een diepte van 100mm.

Bij het na-isoleren van beide natuurstenen zal het aantal kritische vorst- en doocycli van beide natuurstenen sterk stijgen. Savonnières zal hier opnieuw het hoogste aantal blijven vertonen. De temperatuur in Savonnières zal over de gehele diepte lager liggen dan in Bentheim. Nog steeds zal Savonnières de grootste hoeveelheid vocht opnemen. Beide natuurstenen hebben een voldoende lage temperatuur en een voldoende grote vochthoeveelheid om ijsmassa te

vormen. Door de unimodale poriënverdeling in Bentheim plant de ijsmassa zich ongehinderd voort in de diepte, terwijl in Savonnières de ijsmassa minder makkelijk tot een bepaalde diepte reikt. Dit fenomeen zal zich uiten in het aantal kritische vorst- en doocycli over de diepte.

Savonnières zal een groter aantal kritische vorst- en doocycli vertonen maar schade beperkt zich eerder tot het gevelvlak. Hierdoor zal het esthetische aspect van de natuursteen sneller aangetast worden door de mogelijke vorstschade. Vanaf een 50-tal mm zal Bentheim het meest kritische vorst- en doocycli vertonen. Deze diepte toont de gemiddelde diepte, bepaald voor 30 jaar, waarbij het percentage poriën gevuld met ijs het percentage in Savonnières overtreft.

Bentheim zal aan het geveloppervlak van de steen minder kritische vorst- en doocycli vertonen maar zal schade aanrichten tot diep in de steen, wat het gevaar van onstabieleit met zich mee kan brengen.

Een blik naar de treksterkte van de natuurstenen kan deze conclusie verder versterken. Vorstschade kan ontstaan in een natuursteen wanneer de kristallisatiedruk de treksterkte van de natuursteen overtreft. Bentheim heeft een treksterkte van 1.65-3.10 MPa in een natte toestand en voor Savonnières bedraagt deze 1.46MPa tot 1.63 MPa. Bentheim heeft dus de grootste treksterkte van beide natuurstenen. Bij het ontstaan van kritische vorst- en doocycli zal Savonnières hierdoor meer geneigd zijn om vorstschade te vertonen dan Bentheim. Door de kleinere treksterkte zal Savonnières sneller barsten veroorzaken, wat een negatief effect heeft op onder andere het esthetische aspect van de steen.

7 SIMULATIES MET KLIMAAT UIT VERSCHILLENDE PLAATSEN IN GENT

7.1 Vooraf te onderzoeken parameters

In dit onderdeel van het onderzoek wordt dezelfde volgorde doorlopen als bij hoofdstuk 6. Voorafgaand wordt gekeken naar het verloop van temperatuur, vocht en ijsmassa in de twee soorten natuursteen Savonnières en Bentheim. Op basis van deze analyse proberen we het aantal kritische vorst- en dooicycli in te schatten. In dit hoofdstuk worden de verschillende locaties in Gent van het MOCCA-project geanalyseerd en besproken. Er wordt gekeken welke invloed de locatie heeft op de kritische vorst- en dooicycli en welke rol het effect van het stedelijk hitte-eiland hierin speelt.

7.1.1 Temperatuur

Een negatieve temperatuur in combinatie met voldoende vocht is nog steeds de voorwaarden voor de vorming van ijsmassa, die kan leiden tot kritische vorst- en dooicycli. In deze paragraaf wordt het temperatuurverloop geanalyseerd in twee verschillende maanden, een zomer- en wintermaand. Een kijk op de gemiddelde temperaturen per jaar, zoals in het vorige hoofdstuk, is hier niet relevant omdat de resultatenperiode veel korter is, namelijk net geen 4 jaar. Het temperatuurverloop wordt bekeken op verschillende plaatsen, dieptes, periodes en windrichtingen. Er zijn 6 locaties bepaald die zich bevinden in het project van het stedelijk hitte-eiland van Gent. Voor de dieptes wordt opnieuw een 30cm dikke natuursteen gerekend. De eerste 5 cm, vanaf het geveloppervlak gezien, is verdeeld in Delphin in 10 secties van 5 mm. De resterende 25 cm wordt verdeeld in secties van 1 cm. Bij de windrichtingen maken we een onderscheid tussen de zuidwestelijke, de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie.

7.1.1.1 Zuidwestelijke oriëntatie

De zuidwestelijk gerichte muur zal vooral op mooie dagen overdag getroffen worden door de aanwezigheid van zon, wat een invloed heeft op de temperaturen in de natuurstenen. Zoals besproken in hoofdstuk 4 heeft Melle de laagste luchttemperatuur en de 2 locaties in de stad, Sint-Bavoschool en het Provinciehuis, de hoogste. Beide natuurstenen bereiken op dezelfde locaties de hoogste en laagste temperaturen op 5mm diepte en dezelfde conclusies kunnen besloten worden (Figuur 7.1). Vooral 's nachts is het verschil bij afkoeling op de zes locaties goed merkbaar. Hoe landelijker of opener de omgeving, hoe meer de temperaturen 's nachts afwijken van de temperaturen overdag. In Melle worden de laagste temperaturen in de steen bereikt en op de locatie aan de Sint-Bavoschool en het Provinciehuis de hoogste. Door de mindere verdamping in het centrum, blijft de warmte langer aanwezig in de stad, wat zich laat

merken in de temperatuur van de natuurstenen. Honda sluit het meest aan bij de locatie Melle. Deze twee locaties hebben de laagste temperaturen en tonen een verband met de windsnelheid. In deze twee locaties bedraagt de windsnelheid 2 tot 3 keer zoveel als op de 4 andere locaties. Melle is landelijk gelegen, terwijl Honda aan de Gentse haven ligt. Een hoge windsnelheid, met eventuele aanwezigheid van water zorgt voor een versnelde afkoeling van de omgeving. Honda is een industrieel gebied met veel verharding, waardoor op het eerste gezicht geen lage temperatuur wordt verwacht. Het is de aanwezigheid van het water samen met de hoge windsnelheid die toch zullen zorgen voor een afkoeling van de omgeving. Door de hoge windsnelheid wordt verhinderd dat de warmte overdag opgeslagen wordt in de bebouwing zoals dit gebeurt in de binnenstad van Gent. Het provinciehuis en de Sint-Bavoschool absorberen veel warmte met de steenachtige materialen in de stad door lage windsnelheden waardoor het 's nachts minder afkoelt. Wondelgem volgt samen met de Plantentuin kort op de locaties in de binnenstad. Deze conclusies zijn ook van toepassing op een diepte van 50 mm in de natuursteen (Bijlage B en Bijlage C) en voor in de zomermaand juli op 5mm (Bijlage D) en 50mm (Bijlage E).



Figuur 7.1: Het temperatuurverloop op 6 locaties in de maand januari voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) in een zuidwestelijke oriëntatie.

In Tabel 7.1 wordt onderzocht of de temperaturen in de natuurstenen een ander verband vertonen tussen de verschillende locaties. Hiervoor worden de temperaturen van de 6 locaties vergeleken met de laagste temperatuur, namelijk de temperatuur van de natuurstenen in Melle. Dit wordt onderzocht voor de twee dieptes (5 mm en 50 mm) in een niet-geïsoleerde muuropbouw waarvoor de temperatuurverschillen duidelijk op te merken zijn. Het grootste temperatuurverschil met Melle is voor iedere diepte en in iedere steen op te merken in Sint-Bavoschool, gevolgd door het Provinciehuis. Opmerkelijk hierbij is dat Bentheim voor iedere plaats in Gent telkens een hoger temperatuurverschil heeft dan Savonnières. De temperaturen in de natuursteen Bentheim op de verschillende locaties liggen meer uit elkaar. Dit is een gevolg van Bentheim die sneller reageert op een temperatuursverandering in de omgeving door zijn hoge lambda-waarde. Op 5 mm diepte is een temperatuurverschil bereikt van 0.30°C tussen beide natuurstenen op alle locaties. Hoewel het temperatuurverloop van Savonnières grotere temperatuurschommelingen vertoont dan in Bentheim, liggen de gemiddelde temperaturen van de verschillende locaties dichter bij elkaar dan van Bentheim (Figuur 7.1). Door zijn lage lambda-waarde zal Savonnières in de maand januari kleinere pieken geven in het temperatuurverloop als gevolg van vorst, maar door de hogere soortelijke warmte zal terug grotere temperatuurschommeling tonen als gevolg van zonnestraling (Bijlage D). Doordat de koudere temperatuur een langere periode bepalen dan de pieken in de zonnestraling, zal de koude temperatuur een groter effect hebben op de gemiddelde temperatuur.

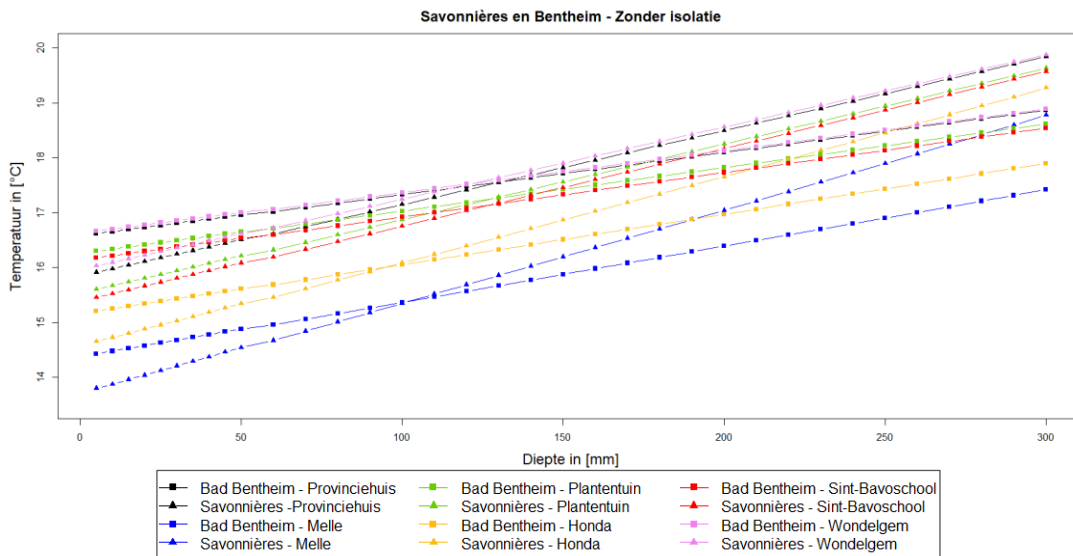
Plaats die wordt vergeleken met Melle	Temperatuurverschil in [°C]			
	Savonnières		Bentheim	
	5mm	50 mm	5 mm	50 mm
Provinciehuis	1.91	1.75	2.29	2.15
Plantentuin	1.49	1.36	1.83	1.72
Honda	0.78	0.71	0.89	0.84
Sint-Bavoschool	2.24	2.05	2.55	2.39
Wondelgem	1.54	1.41	1.89	1.78

Tabel 7.1: Temperatuurverschil van de verschillende locaties met de locatie Melle voor twee verschillende dieptes en twee verschillende natuurstenen voor de zuidwestelijke oriëntatie.

In Figuur 7.1 was het duidelijk dat Bentheim een lagere temperatuur kent dan Savonnières voor eenzelfde locatie en eenzelfde diepte (hier onderzocht op 5 mm). In Figuur 7.2 wordt aangetoond dat dit niet voor iedere diepte van toepassing is. In deze figuur is enkel de muuropbouw zonder na-isolatie weergegeven omdat deze een duidelijker beeld geeft over het temperatuurverloop in de diepte. De grafiek voor een muuropbouw met isolatie is te vinden in Bijlage F. Voor zowel een niet-geïsoleerde als een geïsoleerde muur zal de temperatuur in Savonnières lager liggen dan in Bentheim in de eerste aantal centimeters van de muur. In de resterende centimeters ligt de temperatuur in Bentheim dan lager dan de temperatuur van Savonnières. De kruising van de twee curves die het temperatuurverloop weergeven in een niet-geïsoleerde muur zal op locatie Melle en Honda plaatsvinden op een diepte van 100mm. Op andere locaties vindt deze kruising plaats op een diepte van ongeveer 130mm. In een

geïsoleerde muur ligt de kruising op een diepte van 110 à 120 mm behalve voor de locatie Honda en de Sint-Bavoschool, waar deze zich respectievelijk op een diepte van 80mm en 70mm bevinden.

Niet voor iedere locaties kent het temperatuursverloop doorheen de muur éénzelfde stijging. Voor de ene locatie loopt de curve steiler dan op andere locaties. Melle vertoont de meest steile helling en de Sint-Bavoschool de minst steile helling. Een niet-geïsoleerde muur met Savonnières kan op de locatie Melle een temperatuurverschil van 4.98°C tweebrengen over een diepte van 30 cm en op de locatie Sint-Bavoschool 3.85°C. Een niet-geïsoleerde Bentheimmuur heeft respectievelijke temperatuurverschillen van 3.00°C en 2.22°C. Het temperatuurverschil tussen de twee dieptes op beide locaties ligt voor Bentheim ±1.70 keer lager dan voor Savonnières. In een geïsoleerde muur verloopt het temperatuurverschil tussen de voor- en achterkant van de steen veel minder steil. Savonnières kan over een diepte van 30 cm een temperatuurverschil geven van 0.73°C in Melle en 0.53°C in Sint-Bavoschool. Bentheim heeft respectievelijke waarden van 0.32°C en 0.21°C. Voor een geïsoleerde muur zal het temperatuurverschil tussen de twee dieptes in Bentheim 2.40 (± 0.10) keer groter zijn dan in Savonnières. Het grote verschil in lambda-waarde tussen Savonnières en Bentheim zal zorgen dat Savonnières met zijn meer isolerende werking een veel groter temperatuurverschil vertoont over 30 cm. De lambda-waarde voor Bentheim bedraagt 2.575 W/m*K en voor Savonnières 0.990W/m*K zoals vermeld in hoofdstuk 6.



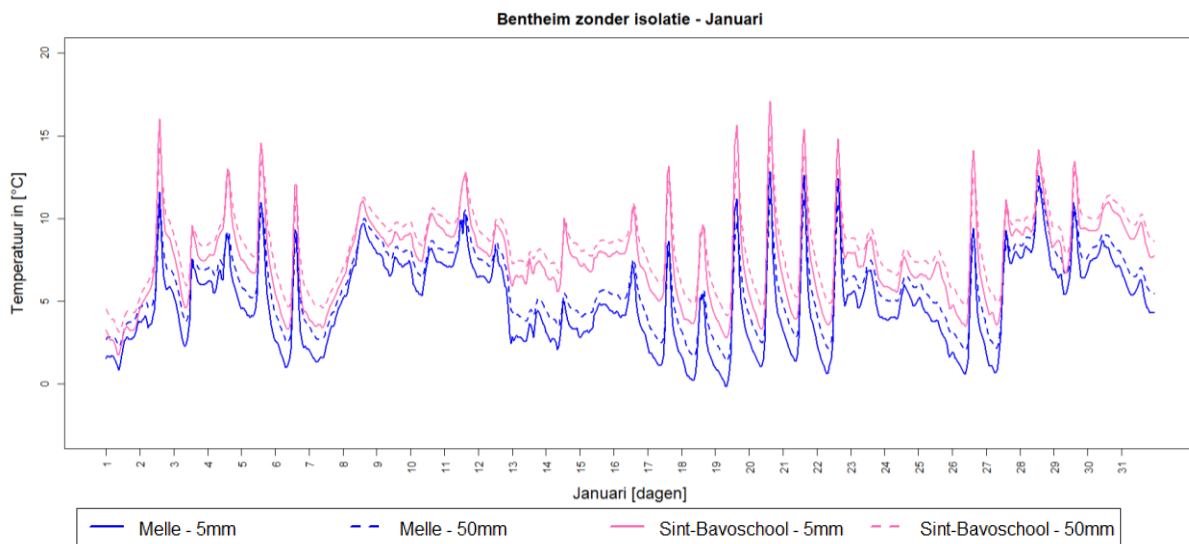
Figuur 7.2: Temperatuurverloop in de diepte voor zowel Savonnières als voor Bentheim in een muuropbouw zonder isolatie.

Bij het bekijken van de zes verschillende locaties, stellen we de volgende zaken vast (Figuur 7.1 & Figuur 7.2). Er zijn twee locaties, Melle en Honda, die de kleinste temperatuurverschillen vertonen tussen een niet-geïsoleerde muuropbouw en een geïsoleerde muuropbouw. De andere locaties zullen een groter temperatuurverschil hebben. Tussen deze twee groepen is een verschil te merken van ongeveer 0.32°C (± 0.12°C). De kleinste temperatuurverschillen in Melle en Honda bedragen in Savonnières rond 0.90°C op 5mm diepte en rond 1.57°C op

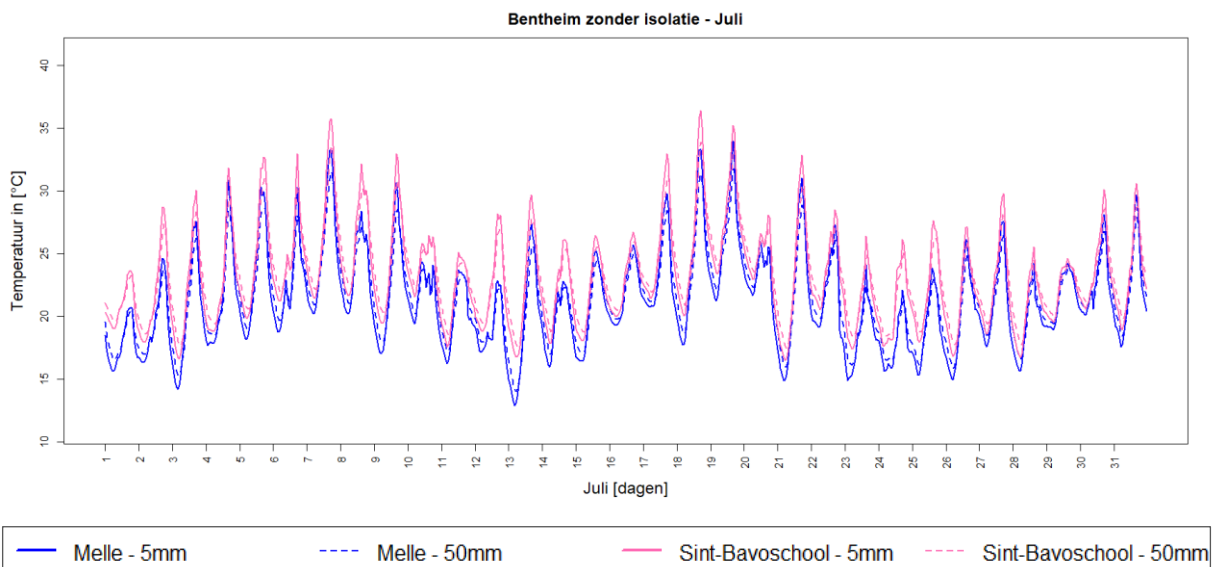
50mm diepte. Voor Bentheim bedragen de waarden respectievelijk 1.40°C en 1.83°C. De 4 andere locaties, met de grootste waarden, geven een temperatuurverschil van 1.20°C op een diepte van 5mm en 1.77°C op een diepte van 50mm in Savonnières. Voor Bentheim is het verschil 1.84°C op 5mm diepte en 2.19°C op 50mm diepte. Een natuursteen in Melle of in Sint-Bavoschool zal een kleinere invloed ondervinden bij het na-isoleren van een gebouw dan op één van de andere locaties. De locaties Melle en Honda bereiken in de muur al een lagere temperatuur doordat hoge windsnelheden op die plaats zorgen voor een versnelde afkoeling van de omgeving. Net om die reden zal een niet-geïsoleerde muur minder kunnen profiteren van de warmte uit de binnenruimte en zal de steen toch afgekoeld worden. Op de andere plaatsen laat de lage windsnelheid toe dat de warmte overdag in de omgeving opgeslagen worden. Op die manier zal het plaatsen van na-isolatie zorgen voor een kleiner verschil op de plaatsen Melle en Honda.

Rekening houdend met bovenstaande conclusies zal voor verder onderzoek naar het gedrag van beide natuurstenen op luchttemperatuur, verdergegaan worden met de twee meest extreme locaties, Melle en de Sint-Bavoschool.

Figuur 7.3 toont het temperatuurverloop in de natuursteen Bentheim op een diepte van 5mm en 50mm voor de locaties Melle en Sint-Bavoschool. Het temperatuurverloop wordt weergegeven in een niet-geïsoleerde muur voor 1 maand, namelijk januari. Op Figuur 7.4 wordt hetzelfde afgebeeld voor de maand juli. Savonnières kent een gelijkaardig verloop met iets grotere temperatuurschommelingen, waarvan de grafieken te vinden zijn in Bijlage G. Het temperatuurverschil tussen de twee gemeten dieptes voor een niet-geïsoleerde muur levert een waarde op van 1.48°C ($\pm 0.10^\circ\text{C}$) bij Savonnières en 0.87°C ($\pm 0.07^\circ\text{C}$) bij Bentheim. Figuur 7.3 en Figuur 7.4 tonen de twee locaties met het grootste en het kleinste temperatuurverschil tussen de twee gemeten dieptes. Melle heeft door zijn landelijke omgeving grotere fluctuaties in de buitentemperatuur, waarbij vooral 's nachts de grote temperatuurverschillen op te merken zijn. In de stad koelt het 's nachts minder af door het effect van het stedelijk hitte-eiland. Er is minder vegetatie in de binnenstad aanwezig waardoor de stad niet afkoelt door verdamping en de grote aanwezigheid van beton en andere steenachtige materialen absorbeert de warmte en houdt deze langer vast. Doordat de temperatuurschommelingen in Melle groter zijn dan in de binnenstad, meer bepaald de Sint-Bavoschool, zullen ook de natuurstenen in Melle onderworpen zijn aan een grotere temperatuurschommeling. In Figuur 7.2 werd duidelijk gemaakt dat Melle het grootste temperatuurverschil overbrugde in een 30cm diepe steen, wat ook zal wijzen op een groter verschil tussen de twee gemeten diepten. Overdag, meestal in combinatie met voldoende zonnestraling, is het effect van het stedelijk hitte-eiland minder op te merken. De temperatuurverschillen tussen de twee gemeten dieptes in Melle en Sint-Bavoschool zijn ongeveer gelijk. Wanneer het 's nachts kouder wordt of als er overdag niet veel zon aanwezig is, is het stedelijk hitte-eiland effect meer te merken.

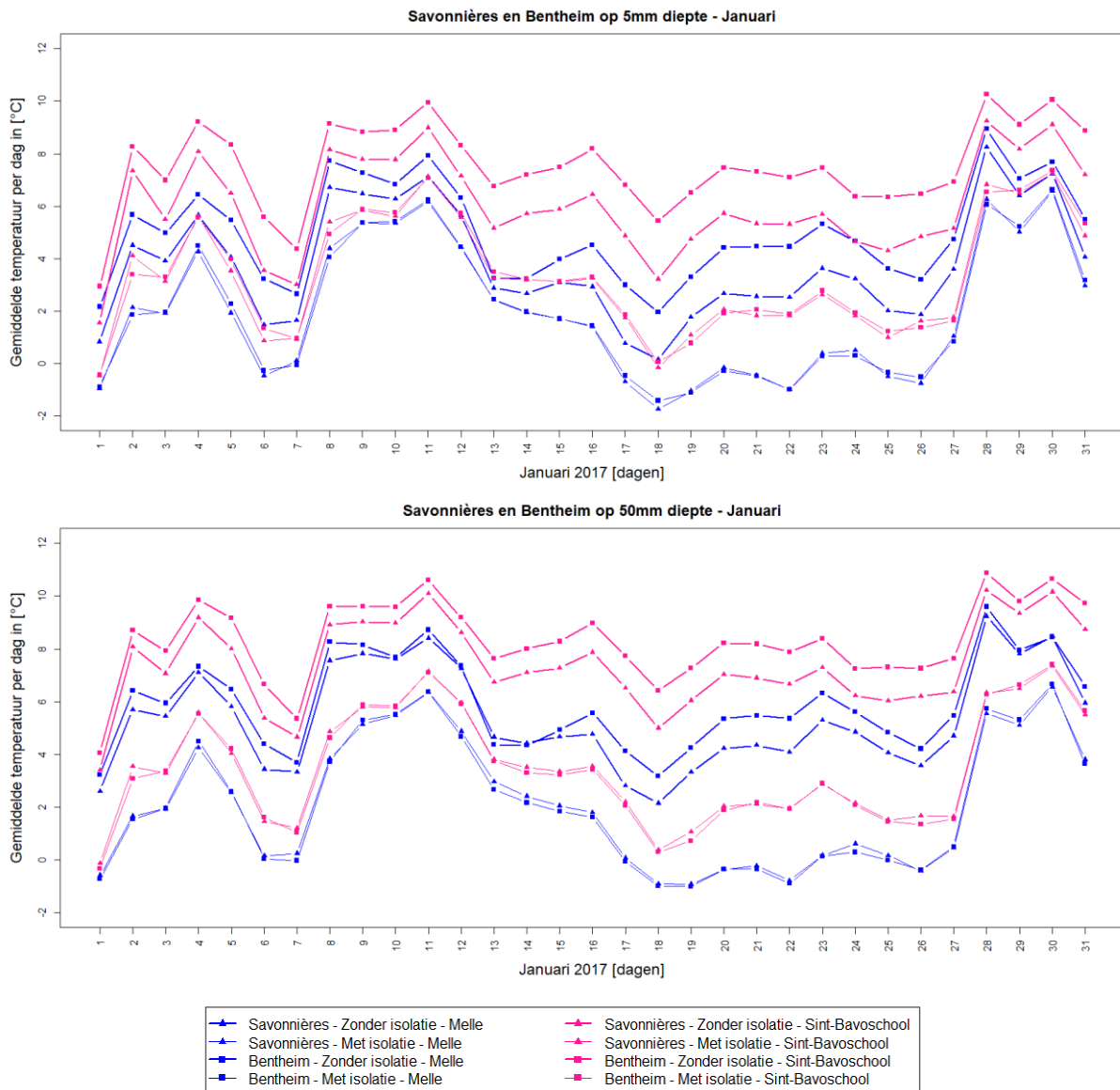


Figuur 7.3: Temperatuurverloop in januari voor een niet-geïsoleerde muuropbouw met Bentheim. Het temperatuurverloop is weergegeven op een diepte van 5mm en 50mm voor de locatie Melle en Sint-Bavoschool.



Figuur 7.4: Temperatuurverloop in juli voor een niet-geïsoleerde muuropbouw en met Bentheim. Het temperatuurverloop is weergegeven op een diepte van 5mm en 50mm voor de locatie Melle en Sint-Bavoschool.

Op een diepte van 5 mm zal Savonnières een lagere temperatuur hebben dan Bentheim voor zowel een niet-geïsoleerde muuropbouw als voor een geïsoleerde muuropbouw (Figuur 7.5) In een niet-geïsoleerde muuropbouw liggen de temperaturen altijd een stuk lager dan in een geïsoleerde muuropbouw. Als er nog geen na-isolatie is geplaatst, kan de steen profiteren van de warmte in de binnenruimte. Bij het plaatsen van na-isolatie wordt dit belemmerd waardoor de muur algemeen veel kouder wordt. Dit geeft een groter gevaar op vorstschade door het ontstaan van mogelijks meer kritische vorst- en dooicycli.



Figuur 7.5: De dagelijkse gemiddelde temperatuur voor de maand januari voor de locatie Melle en Sint-Bavoschool in beide stenen op een diepte van 5mm en 50mm.

In Figuur 7.5 zijn de gemiddelde temperaturen per dag weergegeven voor de twee natuurstenen in de maand januari. De temperaturen zijn gemeten op een diepte van 5mm in de steen en weergegeven voor de locaties Melle en Sint-Bavoschool. De verschillen in temperatuur bij een niet-geïsoleerde en een geïsoleerde muuropbouw zijn groter bij Bentheim dan bij Savonnières. Wanneer een muur wordt na-geïsoleerd zal Bentheim een grotere verandering ondervinden dan Savonnières. Deze grote verandering in temperatuur kan ook een grote verandering betekenen in het aantal kritische vorst- en dooicycli bij het na-isoleren. Eerst, voor de plaatsing van na-isolatie, hebben de twee natuurstenen een temperatuurverschil van rond 2°C tussen de gemiddelde temperaturen per dag. Later, in een muur met na-isolatie, is er amper een verschil te merken tussen deze temperaturen. De oorzaak van dit fenomeen ligt bij de grote lambda-waarde van Bentheim die in een niet-geïsoleerde muur zal zorgen dat de muur over het algemeen warm gehouden wordt door de

binnenhuistemperatuur. In een geïsoleerde muur valt deze factor weg, waardoor Bentheim met zijn temperatuur in de buurt van Savonnières komt.

7.1.1.2 Noordelijke en noordwestelijke oriëntatie

Over het algemeen liggen in de noordelijk en noordwestelijk oriëntatie de temperaturen in de steen lager dan in de zuidwestelijke oriëntatie. Voor de maand januari liggen de temperaturen op een diepte van 5 mm in de steen ongeveer een halve graad lager dan in de zuidwestelijke oriëntatie. Op Figuur 7.6 zijn er minder grote temperatuurschommelingen te zien door een mindere aanwezigheid van zon. In die figuur wordt het temperatuurverloop voor de maand januari weergegeven voor zowel Savonnières als voor Bentheim in een noordelijke oriëntatie. Het temperatuurverloop in januari voor de noordwestelijke oriëntatie verloopt zeer gelijkaardig en is te vinden in Bijlage H. Ook in deze oriëntaties is de koudste temperatuur steeds te vinden op de locatie Melle en Honda en de warmste temperaturen in de binnenstad, aan de Sint-Bavoschool en het Provinciehuis.

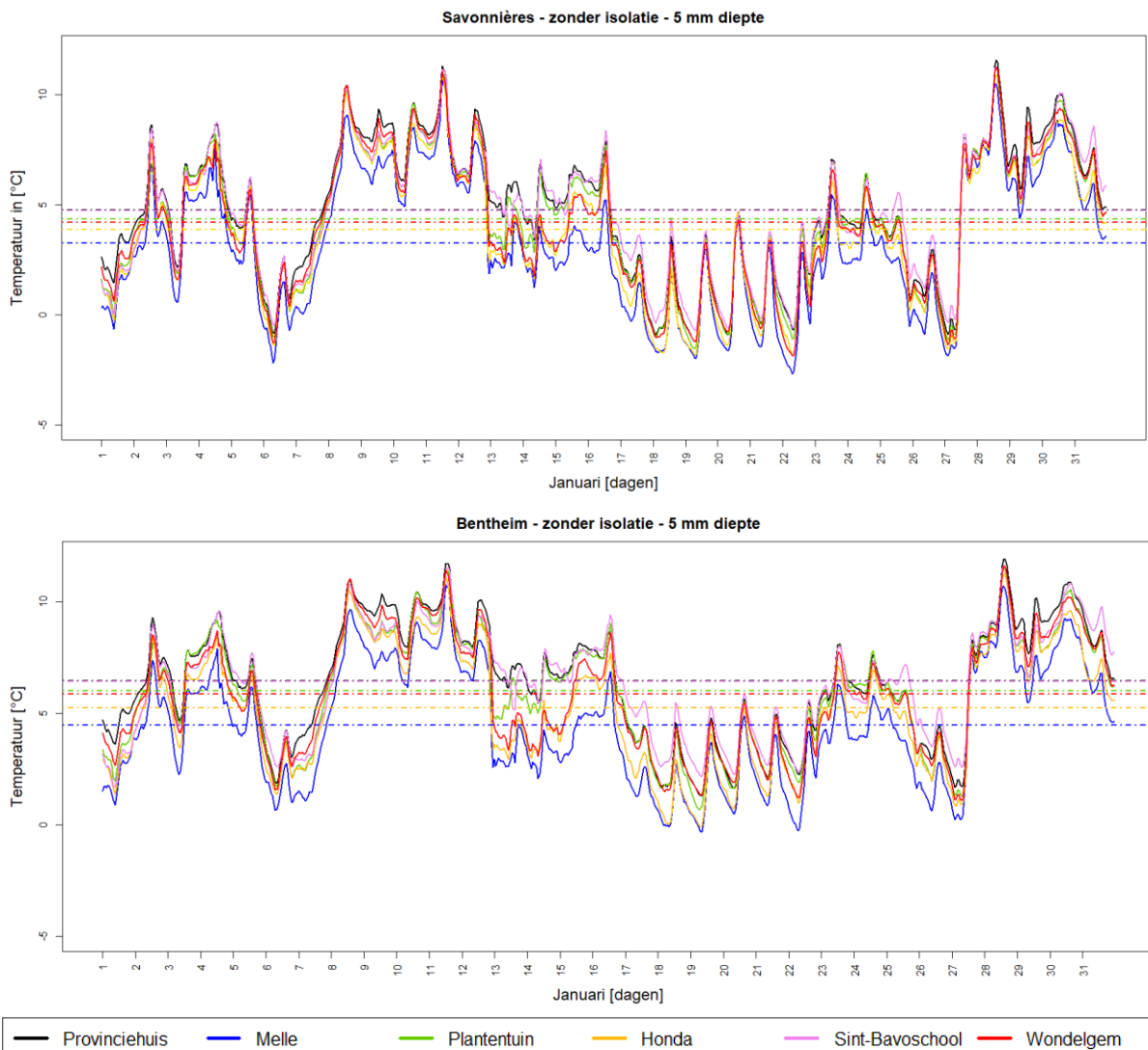
De temperaturen in de steen op de verschillende locaties liggen dicht bij elkaar in de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie dan in de zuidwestelijk oriëntatie. Als we de temperaturen op de verschillende locaties vergelijken met de temperatuur in Melle, ligt het verschil tussen de twee over het algemeen lager (Tabel 7.2 en Tabel 7.3). De temperatuur in de steen op de verschillende locaties zullen minder verschillen in vergelijking met zuidwestelijke oriëntatie. Het grootste temperatuurverschil tussen de locaties is toegekend aan Melle en de twee locaties in de binnenstad, het Provinciehuis en de Sint-Bavoschool. Het kleinste temperatuurverschil zien we tussen Melle en Honda. Verder zijn de temperatuurverschillen in Bentheim ook in deze oriëntaties een stuk groter dan in Savonnières. De temperatuurverschillen tussen de twee natuurstenen kunnen op een diepte van 5 mm een waarde van 0.20°C bereiken voor zowel de noordelijke als de noordwestelijke oriëntatie. Dit verschil ligt een derde lager dan in de zuidwestelijke oriëntatie.

Plaats die wordt vergeleken met Melle	Temperatuurverschil in [°C]			
	Savonnières		Bentheim	
	5mm	50 mm	5 mm	50 mm
Provinciehuis	1.39	1.27	1.60	1.52
Plantentuin	1.07	0.99	1.26	1.18
Honda	0.60	0.56	0.59	0.57
Sint-Bavoschool	1.25	1.17	1.38	1.31
Wondelgem	0.93	0.86	1.13	1.06

Tabel 7.2: Temperatuurverschil van de verschillende locaties met de locatie Melle voor twee verschillende dieptes en twee verschillende natuurstenen voor de noordelijke oriëntatie.

Plaats die wordt vergeleken met Melle	Temperatuurverschil in [°C]			
	Savonnières		Bentheim	
	5mm	50 mm	5 mm	50 mm
Provinciehuis	1.47	1.37	1.65	1.57
Plantentuin	1.16	1.08	1.35	1.28
Honda	0.59	0.55	0.60	0.58
Sint-Bavoschool	1.33	1.25	1.47	1.40
Wondelgem	1.02	0.94	1.23	1.16

Tabel 7.3: Temperatuurverschil van de verschillende locaties met de locatie Melle voor twee verschillende dieptes en twee verschillende natuurstenen voor de noordwestelijke oriëntatie.



Figuur 7.6: Het temperatuurverloop voor 6 locaties in de maand januari voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) in een noordelijke oriëntatie.

Tussen de twee gemeten dieptes (5mm en 50mm) kent een niet-geïsoleerde muur met Savonnières een verschil van 0.75°C ($\pm 0.06^{\circ}\text{C}$) en een niet-geïsoleerde muur met Bentheim

0.48°C ($\pm 0.04^\circ\text{C}$) voor de noordelijke oriëntatie. In de noordwestelijke oriëntatie bedragen de verschillen respectievelijk 0.82 °C ($\pm 0.05^\circ\text{C}$) en 0.48°C ($\pm 0.08^\circ\text{C}$). De verschillen voor een geïsoleerde muur liggen lager en zullen voor een muur met Savonnières 0.10°C bedragen en voor een muur met Bentheim 0.04 °C in de noordelijke en noordwestelijk oriëntatie. Deze waarden bedragen iets meer dan de helft van de zuidwestelijke oriëntatie. Procentueel gezien zijn de verhoudingen tussen de temperaturen op 5mm diepte en 50mm diepte even groot in de noord- en noordwestelijke oriëntatie als in de zuidwestelijke oriëntatie. De waarde in Bentheim zal ongeveer 15% bedragen van de waarden in Savonnières. Telkens opnieuw hoort het grootste verschil tussen de temperaturen op verschillende dieptes bij de locatie Melle en het kleinste verschil bij de twee locaties in de binnenstad van Gent. Zoals in Figuur 7.2 aangegeven, brengt voor de zuidwestelijke oriëntatie Melle een groter temperatuurverschil teweeg over een diepte van 30cm dan de locaties in de binnenstad. Zo zal een natuursteen op de locatie Melle een groter verschil aangeven tussen 5mm en 50mm. Deze grafiek geldt ook voor de noord- en noordwestelijke oriëntatie.

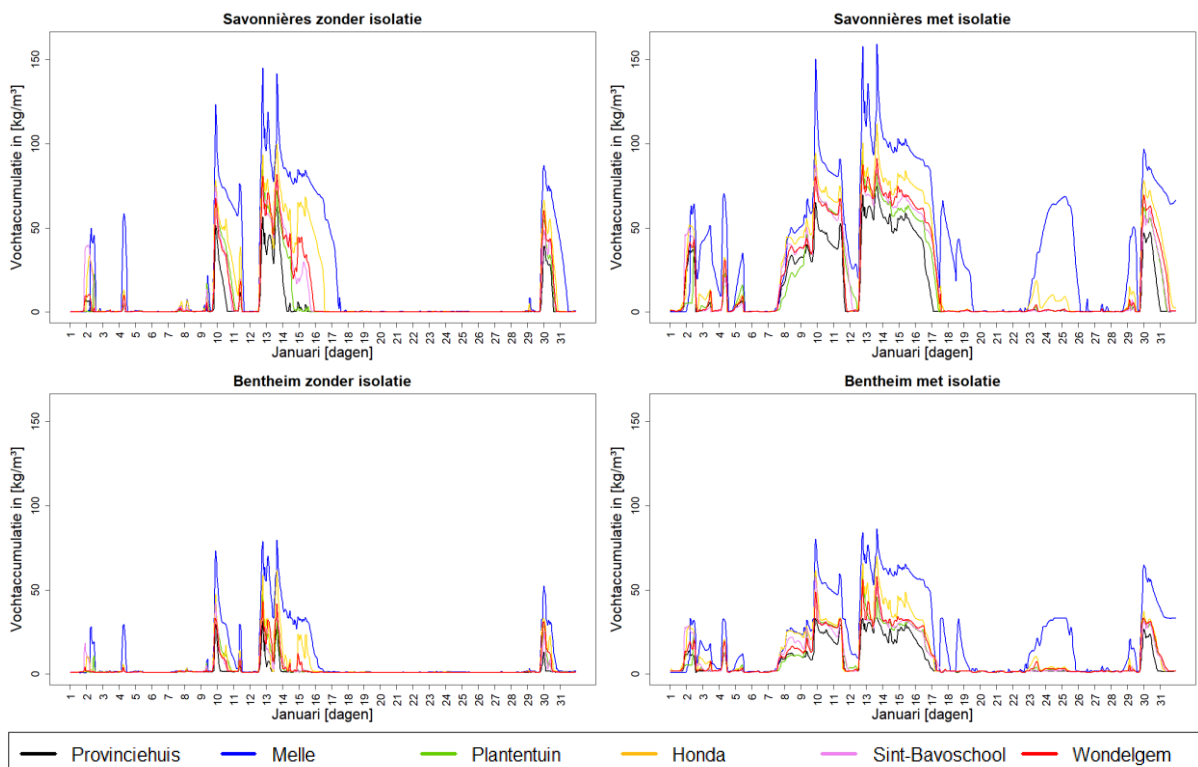
Als we voor Savonnières van een niet-geïsoleerde muur naar een geïsoleerde muur overgaan dalen de waarden met 1.20°C ($\pm 0.25^\circ\text{C}$) voor een diepte van 5mm en met 1.77°C ($\pm 0.21^\circ\text{C}$) voor een diepte van 50mm in de noordelijke oriëntatie. Voor een Bentheimsteen zijn deze waarden 1.91 °C ($\pm 0.35^\circ\text{C}$) en 2.35°C ($\pm 0.31^\circ\text{C}$). Dezelfde waarde zijn te vinden voor de noordwestelijke oriëntatie in beide stenen behalve voor Savonnières op een diepte van 50 mm, daar bedraagt de waarde 1.93°C ($\pm 0.20^\circ\text{C}$). Het kleinste verschil tussen de temperatuur in een niet-geïsoleerde en een geïsoleerde muur zien we in Melle en Honda, waardoor deze locaties ook in deze oriëntaties de minste invloed zullen ondervinden bij het plaatsen van na-isolatie. De grootste invloed is te vinden op de vier andere locaties. Die locaties zullen de grootste temperatuursveranderingen in de muur kennen bij het plaatsen van na-isolatie. Tussen de locaties met de grootste waarden en de kleinste waarden zit telkens een sprong van een aantal graden in de grootteorde van een tiende.

7.1.2 Vochtaccumulatie

7.1.2.1 Vochtaccumulatie in functie van de tijd

Om de hoeveelheid vocht te onderzoeken in het kader van de analyse van het aantal kritisch vorst- en dooicycli in de twee natuurstenen, wordt gekeken naar de hoeveelheden vocht in de muur over een periode van een maand. Dit wordt bekeken in de maand januari omdat daar een grote kans is op negatieve temperaturen. De combinatie van een negatieve temperatuur en een bepaalde hoeveelheid vocht kan samen zorgen voor de vorming van ijsmassa, die op zijn beurt weer kan zorgen voor kritische vorst- en dooicycli. In dit onderdeel worden de vochthoeveelheden in de natuurstenen, gemeten in kg/m^3 , bekeken voor drie oriëntaties: de zuidwestelijke, de noord- en noordwestelijke oriëntatie.

○ Zuidwestelijke oriëntatie



Figuur 7.7: De vochtaccumulatie [kg/m³] in een niet-geïsoleerde muur (links) en een geïsoleerde muur (rechts) voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) in de zuidwestelijke oriëntatie.

In Figuur 7.7 valt op dat Melle in eender welke muuropbouw steeds de meeste hoeveelheid vocht bevat in een zuidwestelijk georiënteerde muur, terwijl in hoofdstuk 4 Melle altijd een van de laagste neerslaghoeveelheden kende. Dit komt omdat Melle een zeer grote neerslagbelasting heeft, wat het belang aantoont om slagregen mee te nemen in hygrothermische simulaties. Het vochtverloop in kg/m³ over de maand januari is voor de verschillende muuropbouwen en locaties weergegeven. Bij het kijken naar de verschillende locaties met hun eigen windrichting, gemeten door het MOCCA-project, worden de minste vochthoeveelheden gehaald op de twee locaties in de binnenstad. Doordat het MOCCA-project metingen doet van de windsnelheid en windrichting op 2 meter hoogte, is het mogelijk dat er een te lage slagregenbelasting wordt berekend. Men is nog niet zeker of op 2 meter hoogte de slagregenbelasting al dan niet kan opgemerkt worden. Om dit te voorkomen wordt ook gerekend met de windrichting van de locatie Melle op de 5 andere locaties zoals in de berekening van de slagregen in hoofdstuk 4. De twee locaties in de binnenstad tonen een sterke stijging aan in vergelijking met andere plaatsen, wat ons doet vermoeden dat een windsnelheid en -richting gemeten op 2 meter hoogte sommige slagregenbelasting over het hoofd ziet. Nu toont enkel het Provinciehuis de laagste vochthoeveelheid. De twee grootste vochthoeveelheden in de natuurstenen muur zijn nog steeds Melle en Honda, waarbij beide locaties een zeer grote slagregenbelasting hebben in vergelijking met de andere plaatsen. De waarden in de Sint-Bavoschool, de Plantentuin en Wondelgem wisselen vaak af van wie de

grootste waarde vertoont, maar toch toont Sint-Bavoschool het meeste aantal keren de hoogste waarde van de 3 overgebleven locaties. Dat maakt dat de Sint-Bavoschool meer beïnvloed is door slagregen dan de locatie het Provinciehuis.

Het is op te merken dat de muren met isolatie spontaan een grotere hoeveelheid vocht hebben dan de muren zonder isolatie en wordt het vocht in beide natuurstenen veel langer behouden. Per locatie is het effect van de plaatsing van na-isolatie te zien in de vochthoeveelheden in Tabel 7.4 en Tabel 7.5. Voor beide stenen heeft het Provinciehuis de grootste stijging in de hoeveelheid vocht bij de overgang van een niet-geïsoleerde muuropbouw naar een geïsoleerde muuropbouw en bedraagt deze waarde ongeveer 300%. Voor de andere plaatsen is in Savonnières een waarde gekend rond de 170% voor de Plantentuin en Sint-Bavoschool en voor plaatsen zoals Melle en Honda een percentage van 100%. Voor Bentheim liggen deze waarden tussen de 170% en de 250% voor de verschillende locaties, behalve voor het Provinciehuis. De laagste vermeerderingen zijn steeds op te merken op de locatie Melle en Honda, waardoor deze locaties het minst effect zullen ondervinden bij de plaatsing van na-isolatie, net zoals bij de temperaturen. Door hun lage temperatuur in vergelijking met de andere locaties, blijven de stenen hun vocht beter vasthouden, waardoor ze de grootste hoeveelheid vocht bevatten.

Algemeen gezien heeft een Bentheimsteen telkens een grotere vermeerdering in het vochtgehalte bij een overgang naar een muuropbouw met na-isolatie dan Savonnièressteen, behalve op de locatie Wondelgem en het Provinciehuis. Telkens bevat Bentheim ook een kleinere hoeveelheid aan vocht in de muur (ongeveer de helft tot een derde van de waarde van Savonnières), behalve voor Wondelgem. De lagere vochthoeveelheid in Bentheim vindt zijn oorzaak bij een grotere aanwezigheid van grotere poriën. Savonnières neemt door zijn groter aantal kleinere poriën, die een hogere capillaire druk hebben, een heel stuk meer vocht op dan Bentheim, wat uitgelegd is in hoofdstuk 6.

Vergelijking van de gemiddelde vochthoeveelheid van januari in muuropbouw met en zonder isolatie op 5 mm diepte voor Savonnières.				
Plaats	Zonder isolatie	Met isolatie	Vershil	Procentuele vermeerdering
Provinciehuis	3.63	14.40	10.77	+ 297%
Melle	20.61	41.84	21.23	+ 103%
Plantentuin	6.42	18.14	11.72	+ 183%
Honda	11.95	24.28	12.34	+ 103%
Sint-Bavoschool	7.73	20.09	12.36	+ 160%
Wondelgem	3.06	13.86	10.80	+ 353%

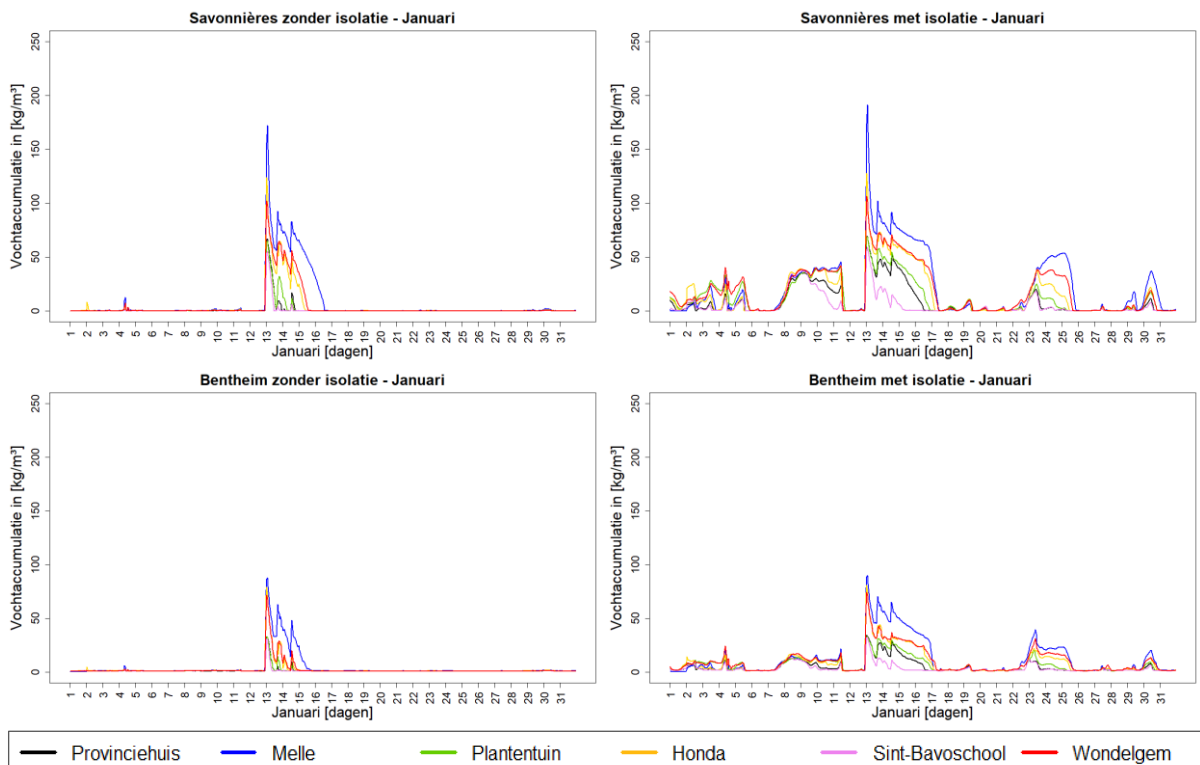
Tabel 7.4: Vochthoeveelheid [kg/m^3] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie met de natuursteen Savonnières voor een zuidwestelijke oriëntatie.

Vergelijking van de gemiddelde vochthoeveelheid van januari in muuropbouw met en zonder isolatie op 5 mm diepte voor Bentheim.

Plaats	Zonder isolatie	Met isolatie	Vershil	Procentuele vermeerdering
Provinciehuis	1.85	7.33	5.48	+ 296%
Melle	8.43	22.93	14.50	+ 172%
Plantentuin	2.97	9.59	6.62	+ 223%
Honda	4.20	12.50	8.30	+ 198%
Sint-Bavoschool	2.86	10.25	7.39	+ 258%
Wondelgem	3.08	10.23	7.15	+ 232%

Tabel 7.5: Vochthoeveelheid [kg/m³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie met de natuursteen Bentheim voor een zuidwestelijke oriëntatie

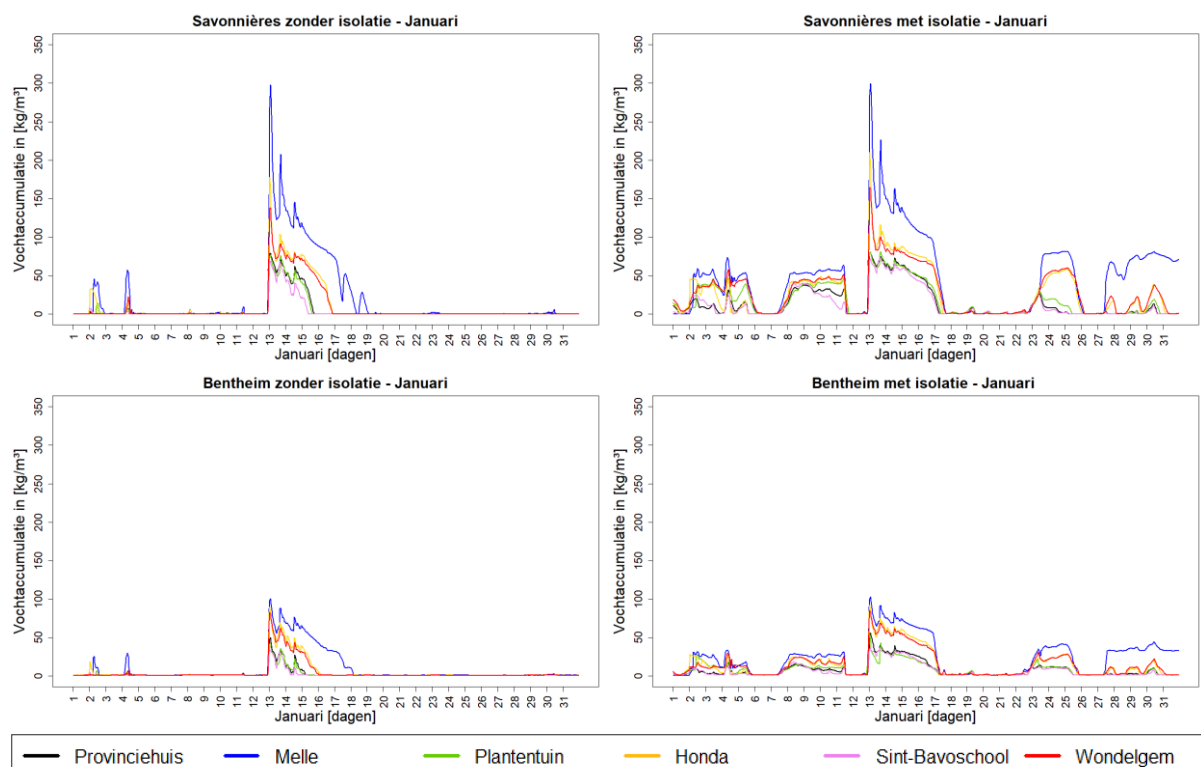
○ **Noordelijke en noordwestelijke oriëntatie**



Figuur 7.8: De vochtaccumulatie [kg/m³] in een niet-geïsoleerde muur (links) en een geïsoleerde muur (rechts) voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) in de noordelijke oriëntatie.

Voor beide oriëntaties volgen de verschillende locaties ongeveer dezelfde rangschikking in hoeveelheden vocht (Figuur 7.8 & Figuur 7.9). Melle toont opnieuw de grootste hoeveelheid vocht in de muur, terwijl het Provinciehuis de laagste hoeveelheid vocht bedraagt. In de noordelijke oriëntatie heeft de Sint-Bavoschool terug één van de laagste waarden. Ook hier, in beide oriëntaties, bevat een muur met Bentheim telkens veel minder vocht dan een muur

met Savonnières, behalve als de vochtvoelheid lager is dan 2.50 kg/m^3 . Op die momenten hebben beide muren een even grote vochtopname of heeft Savonnières een lagere vochtopname dan Bentheim. Bij zo'n lage vochtvoelheid zal Savonnières trager vocht opnemen doordat de grote poriën zich als eerste zullen vullen met water door hun grote absorptiesnelheid. Normaal gezien zullen de kleinste poriën het water uit de grote poriën zuigen, maar dit proces gaat trager dan het proces waarbij de grote poriën het vocht opnemen. Doordat hier sprake is van een zeer korte periode waarin Savonnières en Bentheim vocht opnemen, krijgt Savonnières de kans niet om het water op te nemen in de kleine poriën. Dit verklaart waarom Bentheim een hogere waarde heeft dan Savonnières op sommige locaties. De meeste waarden in Bentheim liggen 1.5 tot 2 keer lager dan in de Savonnières. Savonnières zal ongeacht de oriëntatie van de muur, in de meeste gevallen meer vocht opnemen dan Bentheim door zijn grotere aanwezigheid van kleine poriën. Het verschil tussen de grafieken voor de muur met isolatie en de muur zonder isolatie voor eenzelfde natuursteen lijken goed op elkaar. Vooral in de noordwestelijke richting is dit het geval. In die oriëntatie maakt het minder uit of er al dan niet na-isolatie is geplaatst. De noordwestelijke oriëntatie toont een grotere spreiding van het vocht over het aantal dagen in vergelijking met de zuidwestelijke oriëntatie voor een niet-geïsoleerde muuropbouw. Voor een geïsoleerde muuropbouw is dat amper of helemaal niet het geval.



Figuur 7.9: De vochtaccumulatie [kg/m^3] in een niet-geïsoleerde muur (links) en een geïsoleerde muur (rechts) voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) in de noordwestelijke oriëntatie.

Vergelijking van de gemiddelde vochthoeveelheid van januari in muuropbouw met en zonder isolatie op 5 mm diepte voor Savonnières (in noordelijke oriëntatie).				
Plaats	Zonder isolatie	Met isolatie	Vershil	Procentuele vermeerdering
Provinciehuis	1.22	8.98	7.76	+ 636%
Melle	7.61	21.37	13.77	+ 181%
Plantentuin	1.49	12.94	11.45	+ 768%
Honda	3.82	15.32	11.50	+ 301%
Sint-Bavoschool	0.85	5.66	4.81	+ 566%
Wondelgem	4.29	18.53	14.24	+ 332%

Tabel 7.6: Vochthoeveelheid [kg/m³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie met de natuursteen Savonnières voor een noordelijke oriëntatie.

Vergelijking van de gemiddelde vochthoeveelheid van januari in muuropbouw met en zonder isolatie op 5 mm diepte voor Bentheim (in noordelijke oriëntatie).				
Plaats	Zonder isolatie	Met isolatie	Vershil	Procentuele vermeerdering
Provinciehuis	1.46	4.99	3.53	+ 241%
Melle	4.28	12.03	7.75	+ 181%
Plantentuin	1.54	6.84	5.30	+ 344%
Honda	2.47	8.57	6.10	+ 247%
Sint-Bavoschool	1.37	3.54	2.16	+ 158%
Wondelgem	2.43	9.90	7.47	+ 307%

Tabel 7.7: Vochthoeveelheid [kg/m³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie met de natuursteen Bentheim voor een noordelijke oriëntatie.

Vergelijking van de gemiddelde vochthoeveelheid van januari in muuropbouw met en zonder isolatie op 5 mm diepte voor Savonnières (in noordwestelijke oriëntatie).				
Plaats	Zonder isolatie	Met isolatie	Vershil	Procentuele vermeerdering
Provinciehuis	4.70	14.08	9.38	+ 200%
Melle	19.09	47.47	28.38	+ 149%
Plantentuin	4.51	18.43	13.91	+ 308%
Honda	9.61	25.91	16.29	+ 169%
Sint-Bavoschool	3.44	12.65	9.20	+ 266%
Wondelgem	8.43	28.07	19.65	+ 233%

Tabel 7.8: Vochthoeveelheid [kg/m³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie en met de natuursteen Savonnières voor een noordwestelijke oriëntatie.

Vergelijking van de gemiddelde vochthoeveelheid van januari in muuropbouw met en zonder isolatie op 5 mm diepte voor Bentheim (in noordwestelijke oriëntatie).				
Plaats	Zonder isolatie	Met isolatie	Vershil	Procentuele vermeerdering
Provinciehuis	2.51	7.92	5.41	+ 215%
Melle	9.77	23.98	14.21	+ 145%
Plantentuin	2.41	8.45	6.04	+ 250%
Honda	5.33	14.70	9.37	+ 176%
Sint-Bavoschool	2.08	7.01	4.93	+ 236%
Wondelgem	4.76	15.04	10.28	+ 215%

Tabel 7.9: Vochthoeveelheid [kg/m³] in een muuropbouw met en zonder na-isolatie met de natuursteen Bentheim voor een noordwestelijke oriëntatie.

De hoeveelheid vocht voor een noord gerichte muur ligt een stuk lager dan voor de zuidwestelijk gerichte muur. De vochthoeveelheden van de noordwestelijk gerichte muur komen in de buurt van de zuidwestelijke oriëntatie en op twee plaatsen, namelijk Wondelgem en het Provinciehuis, overtreft de hoeveelheid vocht in de noordwestelijk gerichte gevel de waarde van de zuidwestelijk gerichte gevel. De oorzaak hiervan ligt bij de berekeningen van de slagregenbelasting. Delphin berekent met de inputgegevens de slagregenbelasting op elk moment. De slagregen, afhankelijk van de windrichting, komt niet altijd uit eenzelfde richting, maar meestal is deze afkomstig vanuit de het zuidwesten. In de maand januari voor 2017 heeft Delphin een berekening gemaakt waarvoor de slagregenbelasting uit het noordwesten de grootste is voor sommige locaties. Als gevolg van slagregenbelasting tonen het Provinciehuis en Wondelgem een grotere hoeveelheid aan vocht in de noordwestelijke oriëntatie dan in de zuidwestelijke oriëntatie. Voor de plaats Wondelgem wordt de waarde van de zuidwestelijke oriëntatie zelfs overtroffen met een factor twee.

Het plaatsen van na-isolatie in de noordelijk gerichte muren heeft een groter effect op het vochtgehalte dan het plaatsen van na-isolatie in een noordwestelijk gerichte muur voor beide natuurstenen. De twee locaties in de binnenstad kennen de grootste stijgingen in de vochthoeveelheid bij de Savonnièressteen. Bij Bentheim is dat niet zo duidelijk uitgesproken voor de 2 verschillende oriëntaties.

Hoewel de gemiddelde vochthoeveelheid over het algemeen lager ligt voor beide oriëntaties bereiken ze toch een hogere piekwaarde dan in de zuidwestelijke oriëntatie. De maximale hoeveelheid bij de noordelijke oriëntatie stijgt slechts met 1/3^{de} van de hoeveelheid van de zuidwestelijke oriëntatie terwijl de noordwestelijke oriëntatie een vochthoeveelheid bereikt die het dubbele bedraagt van de vochthoeveelheid in de zuidwestelijk gerichte muur. De hogere piekwaarden zijn te wijten aan de grotere slagregenbelasting die door Delphin berekend werd. Het langer vasthouden van het vocht heeft dan eerder zijn oorzaak bij een grotere afwezigheid van de zon. De kortgolvlige stralingen staan in voor een deel van de uitdroging van de muur waardoor deze minder lang nat zal blijven. De zuidwestelijke oriëntatie daarentegen heeft een

grote aanwezigheid van zon, en dus een grotere kans op het uitdrogen van de natuursteen in het geveloppervlak.

7.1.2.2 Vochtaccumulatie in functie van de diepte

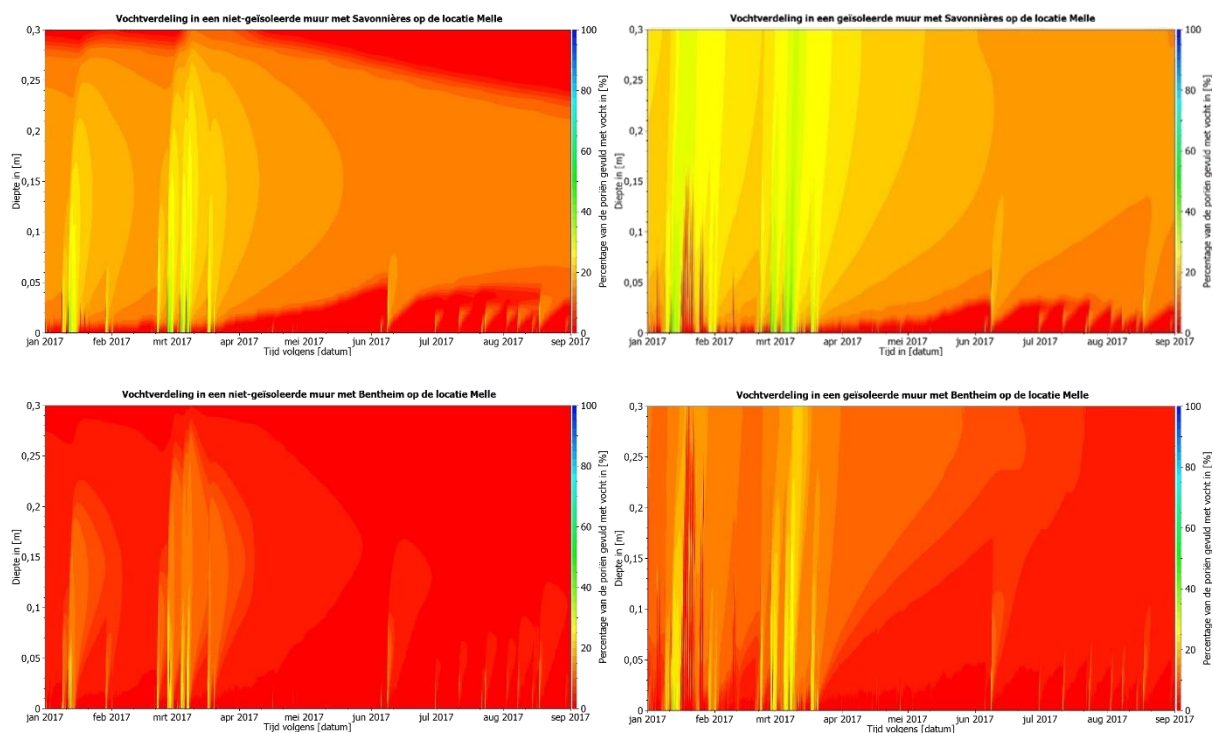
Om de vochtaccumulatie in de diepte te bekijken wordt gebruik gemaakt van het programma PostProc 2.2.2 om kleurendiagrammen te maken. Op deze manier kan er bekeken worden hoe snel de natuursteen het vocht opneemt en het weer afgeeft. Ook kan bekeken worden welke diepte het water kan bereiken. Zoals eerder vermeld in hoofdstuk 6 zal de maximale verzadiging in de meeste gevallen voor Bentheim rond de 70% liggen terwijl voor Savonnières deze waarde rond 60% ligt. Om het gedrag van de steen te bepalen kijken we opnieuw naar één oriëntatie, namelijk de zuidwestelijke oriëntatie, en naar twee verschillende locaties in Gent, Melle en het Provinciehuis. Deze twee locaties gaven de uiterste vochthoeveelheden in de vorige paragraaf, waardoor hier mee verder wordt gegaan in deze paragraaf.

Bij de start van het onderzoek wordt een periode uitgekozen. Er wordt geopteerd om te kijken naar een winterse periode die naast voldoende vocht ook beschikt over negatieve temperaturen, namelijk januari 2017. Er zijn twee opvallende momenten in deze maand. Rond 8 januari kent de periode een bijna natte dag met een waarde van 7 mm. Dit wordt gevolgd door een periode van grote regenbuien die beginnen vanaf 11 januari. Op die dag valt er 18.4 mm neerslag op 1 dag, wat overduidelijk meer is dan op een normale natte dag (>10 mm per dag). Dit wordt gevolgd door een dag met 21.6 mm, 5.8 mm en 5.6 mm. Het aantal mm per dag is telkens verdeeld in kleine neerslaghoeveelheden over de verschillende uren. Op die manier kan er verondersteld worden dat de muur het vocht geleidelijk aan zal kunnen opnemen. Om het gedrag van die buien te bepalen zal gekeken worden naar een periode van 8 maanden startende vanaf januari 2017.

In Figuur 7.10 wordt de vochtverdeling over de diepte in beide natuurstenen op de locatie Melle weergegeven voor de bovenvermelde periode. De grafieken stellen zowel een muuropbouw met na-isolatie als een muuropbouw zonder isolatie voor. De kleurendiagrammen hebben een kleurencode, waarbij de warmste kleuren de minste hoeveelheid vocht voorstellen. Op het eerste gezicht valt ook hier op dat Savonnières meer vocht bevat dan de muur met Bentheim door zijn koudere kleur, terwijl Bentheim het vocht veel dieper verspreid dan in Savonnières.

In de muuropbouw zonder isolatie is mooi te zien dat het vocht uitdroogt langs beide kanten. Zowel aan de voorkant van de steen als aan de achterkant worden de kleurendiagrammen van beide natuurstenen het snelst terug rood, m.a.w. die delen drogen het snelst terug uit. Dit fenomeen is het meest duidelijk in de niet-geïsoleerde muur met Savonnières. In de muuropbouw met isolatie valt op dat het vocht op een diepte van 30 cm niet meer uitdroogt via de binnenkant van de muuropbouw. Alles moet nu gedroogd worden via het gevelvlak van de steen waardoor de muur langer vochtig blijft. Normaal gezien, zonder de plaatsing van

isolatie is het meest natte deel van de steen het midden (15 cm in dit geval). Bij de plaatsing van na-isolatie is het meest natte deel de achterkant van de natuursteen en blijft deze langer nat dan het midden van de steen door de langere duur om 30 cm natuursteen uit te drogen dan 15 cm. Na de eerste drogingsfase, bevat de muuropbouw met Savonnières nog veel meer vocht dan een muuropbouw met Bentheim. Bentheim zal veel sneller drogen in de eerste fase waardoor deze minder vocht overheeft aan de start van fase 2 (Figuur 6.15). De voorkant droogt in beide natuurstenen nog steeds op een gelijkmatige manier als in de muuropbouw zonder isolatie. Vanaf april is op te merken dat het gevelvlak van de steen sneller begint te drogen. Waarschijnlijk ligt de oorzaak bij een grotere aanwezigheid van de zon.



Figuur 7.10: Vochtverdeling in een niet-geïsoleerde (links) en geïsoleerde (rechts) muuropbouw voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) op de locatie Melle. Het verloop van vocht wordt getoond over een periode van 8 maanden in het jaar 2017.

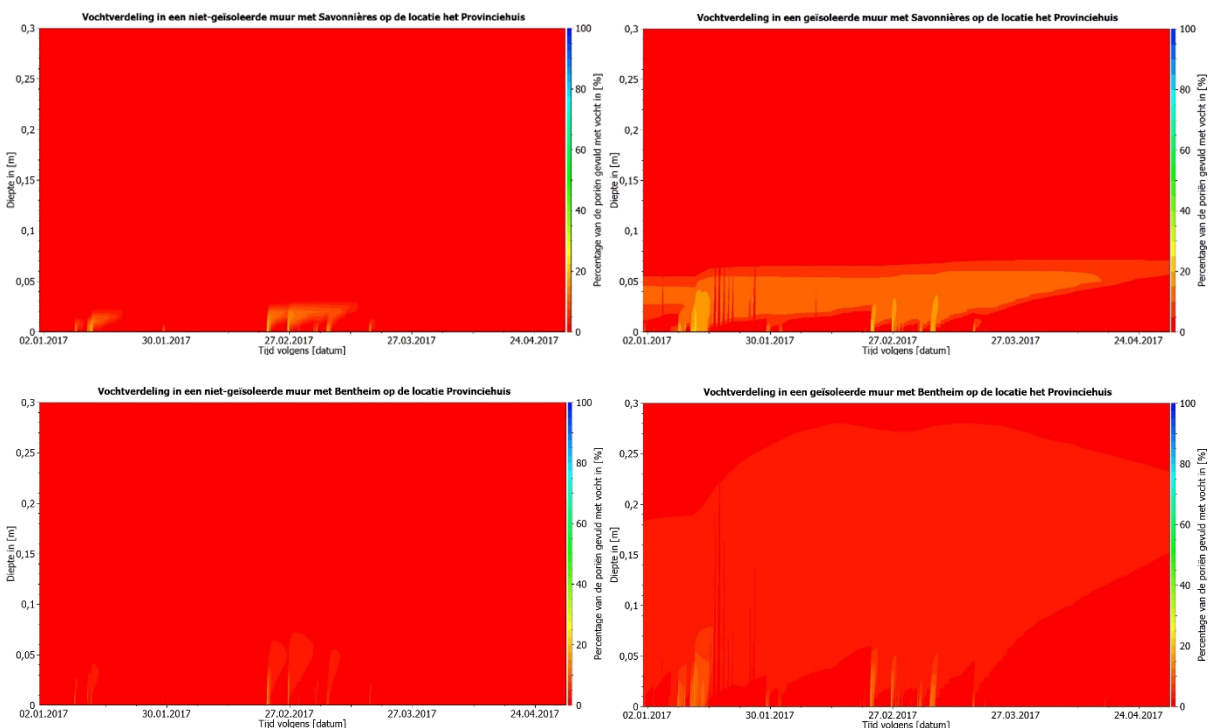
Savonnières zal trager uitdrogen dan Bentheim en neemt ook meer vocht op in de natuursteen dan Bentheim. Door de grotere aanwezigheid van kleinere poriën met een grote capillaire druk zorgt dit ervoor dat Savonnières een groter vochthoeveelheid zal opnemen. Op de locatie Melle bereikt Savonnières piekwaarden in de muur die wel anderhalf keer de grootte zijn van de piekwaarden in Bentheim (Tabel 7.10). De piekwaarden van Savonnières bereiken bijna de meest voorkomende saturatiewaarde van 60%. De hoogste piekwaarde voor de maand januari is 50%. Voor de gemiddelde waarden op de locatie Melle bereikt Savonnières ook waarden die wel anderhalf keer zo groot zijn als die van Bentheim in een niet-geïsoleerde muur op de locatie Melle en waarden tot 1.3 keer zo groot in een geïsoleerde muur (Tabel 7.11).

Plek	Piekwaarde in vochthoeveelheid				Stijging van waarde bij geïsoleerde muur	
	Bentheim		Savonnières		Bentheim	Savonnières
	Geen	+ isolatie	Geen	+ isolatie		
Melle	29	34	48	50	+ 20.8%	+ 0.04%
Provinciehuis	12	14.7	21	26	+ 22.5%	+ 23.8%

Tabel 7.10: Piekwaarden in de vochthoeveelheid, berekend in een percentage van de poriën die gevuld is met vocht [%].

Plek	Gemiddelde vochthoeveelheid				Stijging van waarde bij geïsoleerde muur	
	Bentheim		Savonnières		Bentheim	Savonnières
	Geen	+ isolatie	Geen	+ isolatie		
Melle	13	20	21	27	+ 0.54%	+ 0.29%
Provinciehuis	11	13	13	16	+ 0.18%	+ 0.23%

Tabel 7.11: Gemiddelde waarde in vochthoeveelheid, berekend in een percentage van de poriën die gevuld is met vocht [%].

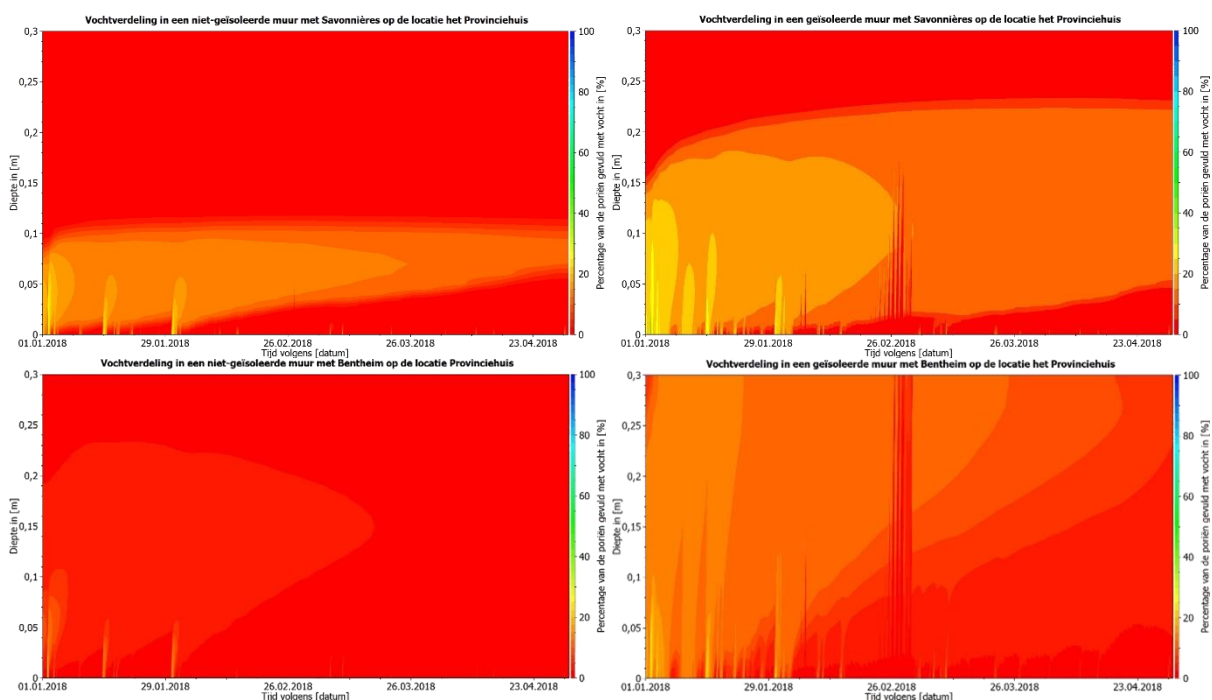


Figuur 7.11: Vochtverdeling in een niet-geïsoleerde (links) en geïsoleerde (rechts) muuropbouw voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) op de locatie Provinciehuis. Het verloop van vocht wordt getoond over een periode van 4 maanden in het jaar 2017.

In Figuur 7.11 zijn de verschillende kleurendiagrammen te zien voor de locatie in de binnenstad, het Provinciehuis. Dit is de locatie die volgens eerdere onderzoeken de minste hoeveelheid vocht bevat. Ook in dit onderdeel kijken we naar de locatie het Provinciehuis met

de windrichting van Melle om een juistere benadering van de slagregenbelasting te hebben, wat een belangrijke invloed heeft op de vochthoeveelheid in de natuursteen. De locatie het Provinciehuis heeft een zeer lage vochthoeveelheid in de muur waardoor in dit onderdeel ingezoomd wordt op 4 maanden om het vochtverloop op te kunnen merken. Deze vier maanden lopen van 1 januari 2017 tot 1 mei 2017.

Door de geringe aanwezigheid van vocht komt het vocht zelfs maar tot een diepte van 5 cm in een muuropbouw met Savonnières en tot een diepte van 7.5 cm in een geïsoleerde muuropbouw met Bentheim. Om een beter zicht te krijgen op hoe de natuurstenen omgaan met het vocht in de binnenstad wordt er gekeken naar het jaar 2018. Voor de (bijna) 4 gesimuleerde jaren bevat januari van het jaar 2018 de meeste hoeveelheid neerslag voor de beide locaties in vergelijking met de maand januari in andere jaren. De maand januari van 2018 bedraagt geen negatieve temperaturen waardoor deze periode niet eerder besproken is. Door een afwezigheid van vriestemperaturen zal er geen sneeuw vallen of ijsvorming optreden. In januari 2018 is er echter veel meer vocht op te merken in de muren voor diezelfde plaatsen. In Bentheim geraakt het vocht zelfs tot de achterzijde van het materiaal en Savonnières tot een diepte van ongeveer 17.5 cm. Voor de locatie in de binnenstad is er 28% aan regen bijgekomen in het jaar 2018 en voor Melle 17%. De vochtverdeling in de muur op de locatie het Provinciehuis in de maand januari 2018 wordt in Figuur 7.12 afgebeeld om aan te tonen hoe de natuurstenen omgaan met vocht in de binnenstad.



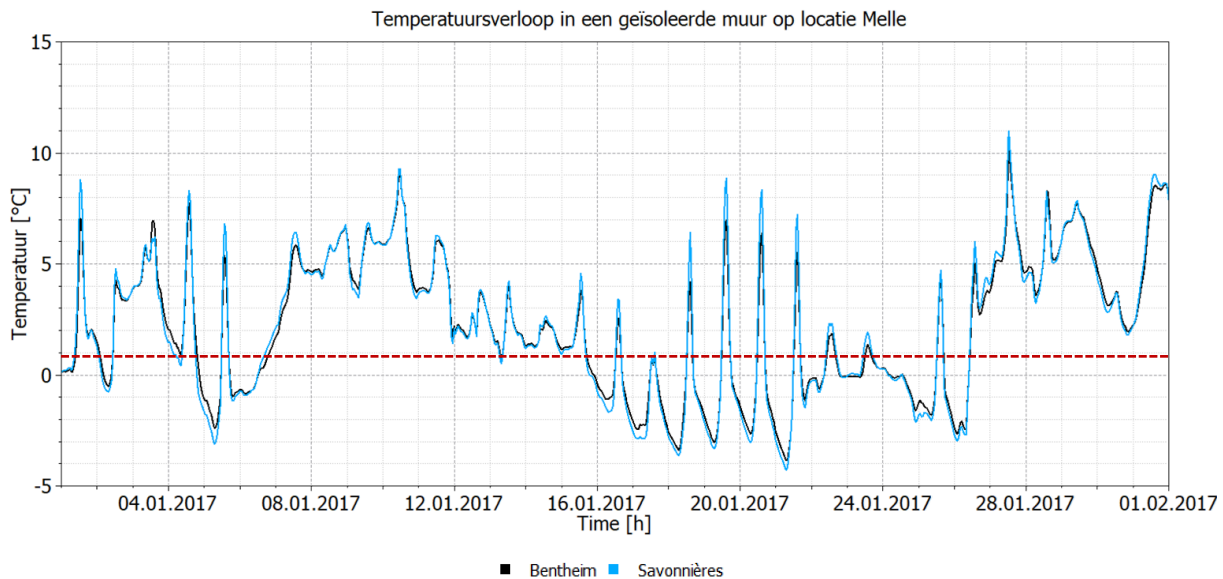
Figuur 7.12: Vochtverdeling in een niet-geïsoleerde (links) en geïsoleerde (rechts) muuropbouw voor zowel Savonnières (bovenaan) als Bentheim (onderaan) op de locatie Provinciehuis. Het verloop van vocht wordt getoond over een periode van 8 maanden in het jaar 2018.

In deze periode is opnieuw een horizontale werking van het vocht op te merken. Het vocht blijft in de niet-geïsoleerde muur hangen rond een diepte van 2 tot 5 cm. Mogelijks is dit te verklaren door de twee verschillende drogingsfasen in de natuurstenen zoals eerder besproken. Het vocht dat blijft hangen rond een diepte van 2 tot 5 cm zou te wijten zijn aan de tweede drogingsfase, waarbij diffuse droging van toepassing is. Bij Bentheim is de horizontale werking van het vocht niet op te merken en droogt de steen snel uit. Hoogstwaarschijnlijk is dit omdat Bentheim quasi uitgedroogd is na de eerste drogingsfase, waardoor drogingsfase 2 niet hoeft te starten. Bentheim neemt het vocht snel op tot een zeker diepte maar zal ze ook snel weer afgeven. Savonnières daarentegen zal hiervoor meer tijd nodig hebben om het vocht terug af te geven. Wat opvalt bij Savonnières is dat de periodes waarbij de steen bevochtigd wordt, elkaar versterken doordat het vocht van de ene periode nog niet helemaal uitgedroogd is en zo aansluit bij een volgende natte periode.

Algemeen is het duidelijk dat Melle een veel grotere vochthoeveelheid in de steen heeft dan het Provinciehuis. De vergelijking van de piekwaarden en de gemiddelde waarden is te zien in Tabel 7.10 en Tabel 7.11. De piekwaarden in het Provinciehuis liggen voor alle muuropbouwen zelfs lager dan de helft van de piekwaarden in Melle. De gemiddelde waarde aanwezig in de muur zal een stuk lager liggen voor het provinciehuis dan in Melle, maar zal ook in een mindere hoeveelheid voorkomen. De gemiddelde waarden voor de natuursteen Savonnières zal 1.6 à 1.7 keer groter zijn in Melle dan in het provinciehuis, terwijl deze voor Bentheim 1.2 keer groter is voor een niet geïsoleerde muur en 1.5 keer groter voor een geïsoleerde muur.

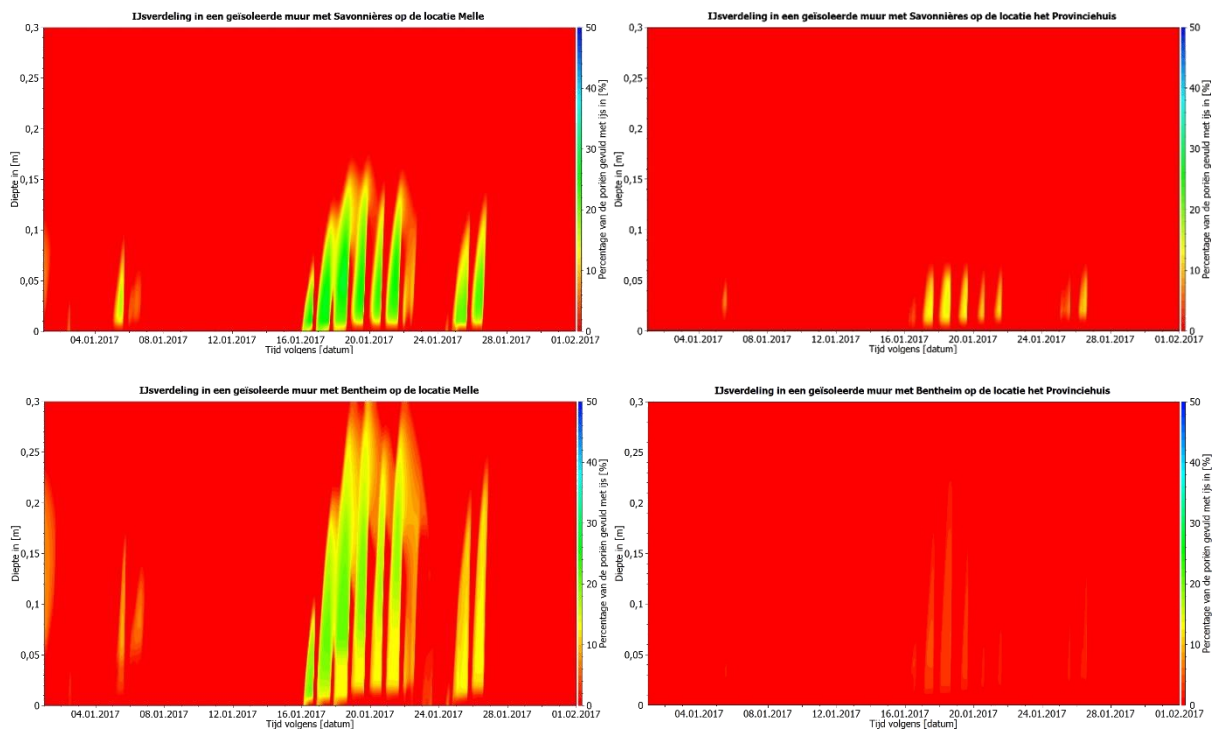
7.1.3 IJsmassa

Voor het onderzoek naar het ontstaan van ijsmassa wordt naar de winterse periode in 2017 gekeken, de periode waarvoor in de vorige paragraaf de vochthoeveelheid bekeken werd. Deze periode bevat met zekerheid een negatieve temperatuur en voldoende vocht. Het vocht in een natuurstenen muur op de locatie het Provinciehuis was in mindere mate aanwezig. De temperatuur gaat voor beide natuurstenen op een diepte van 5 mm verschillende keren sterk onder nul, vooral na 16 januari. Een voorbeeld is gegeven voor de locatie Melle, maar hetzelfde geldt voor het Provinciehuis (Figuur 7.13).

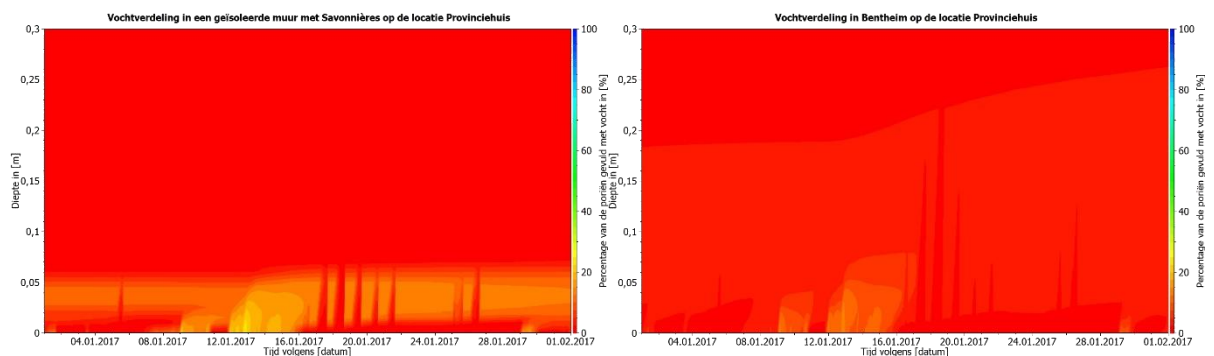


Figuur 7.13: Temperatuurverloop voor een geïsoleerde muuropbouw met Savonnières (blauwe lijn) en Bentheim (zwarte lijn) in de maand januari van 2017.

Figuur 7.14 toont het percentage van de poriën in de natuursteen die gevuld zijn met ijs [%], enkel voor de muuropbouwen met na-isolatie omdat in de muuropbouwen zonder na-isolatie geen ijsmassa gevormd wordt. Bij het bekijken van de kleurendiagrammen valt op dat heel wat meer ijsmassa aanwezig is in de muur op de locatie Melle dan in de binnenstad. De locatie Melle heeft een grotere aanwezigheid van vocht en een lagere temperatuur, beide nodig om ijs te vormen. In een natuursteen op de locatie Melle wordt er tot wel 5 keer meer ijs aangemaakt t.o.v. de locatie het Provinciehuis, terwijl dat bij Savonnières 2 keer zoveel meer is. Een geïsoleerde muur met Bentheim maakt in de landelijke omgeving tot 20.5% ijs aan, terwijl op de plaats het Provinciehuis slechts 4% ijs wordt gemaakt. Savonnières daarentegen produceert 26% ijs in Melle en 13% in het Provinciehuis. De hoge productie van ijsmassa in Savonnières op de locatie het Provinciehuis is te wijten aan een grotere vochthoeveelheid die op dat moment in de muur aanwezig is ($\pm 16\%$), terwijl Bentheim op dat moment minder en voor een veel kortere duur vocht bevat ($\pm 13\%$) (Figuur 7.11). Figuur 7.15 toont het vochtverloop in de steen voor een kortere periode, namelijk de maand januari, om de aanwezigheid van de ijsmassa beter te bekijken. Bij Savonnières is het duidelijk dat de onderbrekingen in de oranje zone (een percentage van 20% met vocht gevulde poriën) een aanwezigheid van ijs tonen. Door het traag drogen van vocht Savonnières is er voldoende vocht in de muur aanwezig wanneer het vriest in de binnenstad waardoor ijsmassa kan ontstaan. Bij Bentheim is het vocht sneller weg waardoor de vorming van ijsmassa amper een kans krijgt.



Figuur 7.14: Kleurendiagrammen van het percentage van de poriën gevuld met ijs in de geïsoleerde muuropbouw met Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) voor de locatie Melle (links) en de locatie het Provinciehuis (rechts) voor 1 maand, januari 2017. (Door de kleine hoeveelheid aan ijs in de natuurstenen muren is de bovengrens van het percentage 50%).

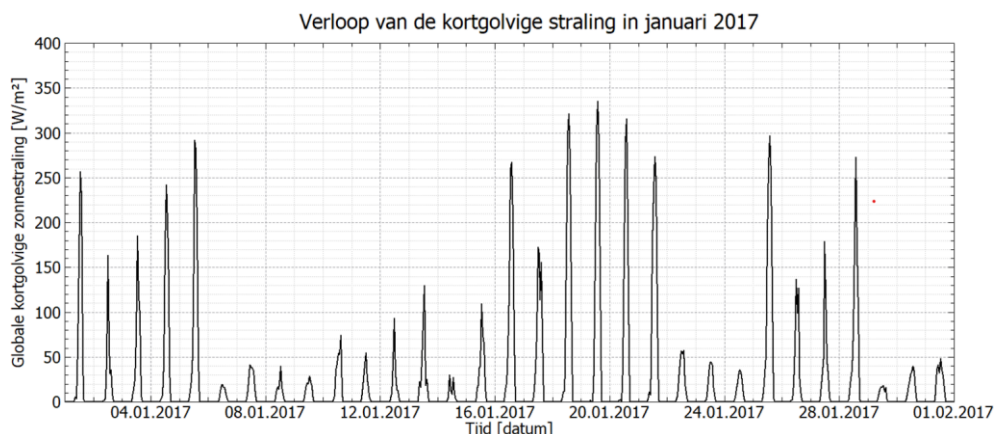


Figuur 7.15: Vochtverdeling in een geïsoleerde muur voor Savonnières (links) en Bentheim (recht) over 1 maand, januari 2017.

Op beide locaties reikt het ijs veel dieper in Bentheim dan in Savonnières. Door de unimodale verdeling van de poriënstructuur in Bentheim kan de ijsvorming zich ongehinderd voortplanten in de muur. Ook het vocht in de muur met Bentheim bevindt zich oorspronkelijk op een grotere diepte door die verdeling van de poriënstructuur. Het ijs in Savonnières mag zich dan wel minder diep voortplanten, het is wel in een groter percentage aanwezig in de muur in vergelijking met Bentheim.

In de onderzochte periode valt op dat de ijsvorming vaak kortstondig voorkomt, weggaat en daarna weer terugkomt. Dit herhaaldelijk verschijnen van ijsmassa is gevaarlijk voor de vorstschade in natuursteen. Bij het vormen van ijs in de poriën van de natuursteen kunnen scheuren ontstaan door de uitzetting van het vocht. Als na de ijsvorming het ijs ontdooit, kan

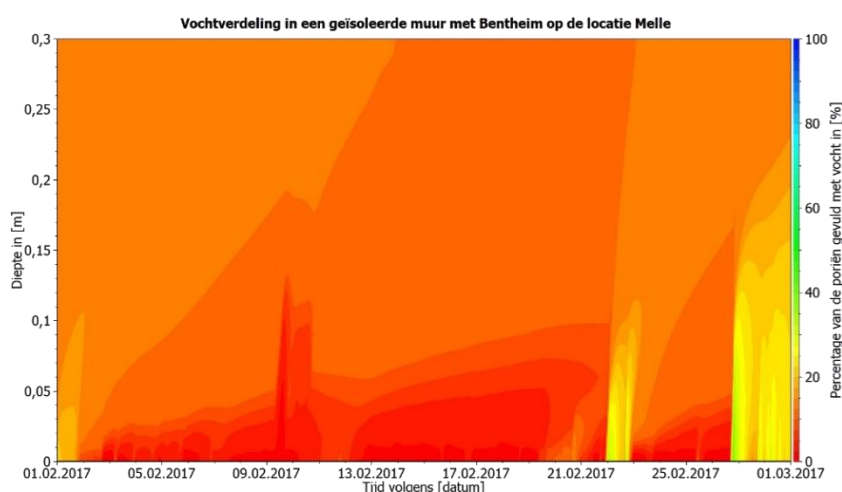
een deel van het water aanwezig blijven in de scheuren. Wanneer het water opnieuw bevroert, zal het uitzetten waardoor de scheur groter wordt gemaakt. Dit is het cyclisch gevaar van vorstschade en uit zich op plaatsen waar temperaturen vaak rond het vriespunt fluctueren.



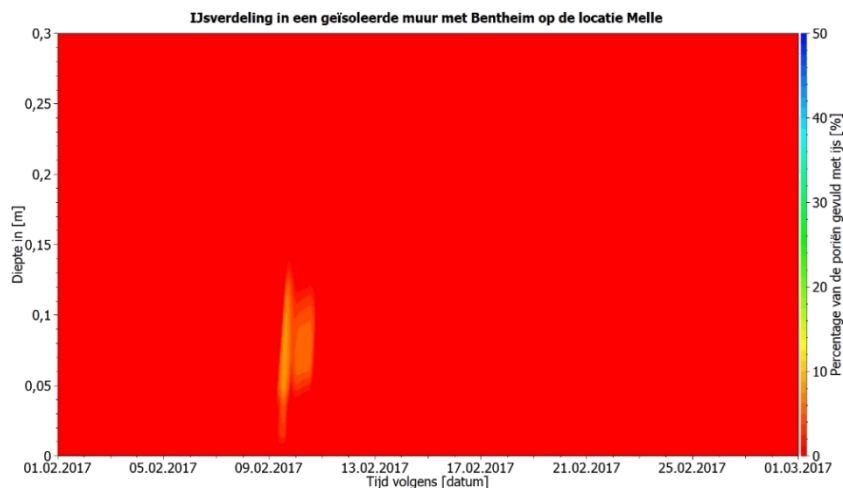
Figuur 7.16: Verloop van kortgolvlige straling in januari 2017.

Wat ook opvalt in de figuren 7.14 en 7.15 is dat de ijsmassa meestal pas ontstaat vanaf 5 mm diepte. Vanaf de 16^{de} januari is het vocht in de muur tot op die diepte ongeveer uitgedroogd. Dit is te wijten aan het feit dat vanaf deze dag veel meer kortgolvlige zonnestraling aanwezig is die ervoor zorgt dat het gevelvlak van de muur sneller uitdroogt (Figuur 7.16).

Muren die lang nat blijven, zoals een muuropbouw met na-isolatie, komen meer in gevaar voor het bevriezen van het water op een bepaalde diepte. Een voorbeeld hiervan is de Bentheimsteen die aan het uitdrogen is na een regenperiode voor de start van februari (Figuur 7.17). Tot de 5^{de} februari droogt de steen geleidelijk aan uit en vanaf de 5^{de} februari gaat het droogproces wat sneller. Op 9 februari is de steen al gedroogd tot op een diepte van 3 cm. Op die dag komen de temperaturen ook nog eens onder nul. Door de grote aanwezigheid van vocht kan er zich een ijsmassa vormen over een 10-tal cm op 1 dag (Figuur 7.18). Dit kan ook voorkomen bij een grotere tijdspanne. De trage uitdroging kan zorgen voor negatieve gevolgen bij vorstschade.



Figuur 7.17: Vochthoeveelheid in een geïsoleerde muuropbouw met Bentheim op de locatie Melle, weergegeven voor 1 maand, februari 2017.



Figuur 7.18: Hoeveelheid ijs in een geïsoleerde muuropbouw met Bentheim op de locatie Melle, weergegeven voor 1 maand, februari 2017.

7.2 Kritische vorst- en dooicycli

Het aantal vries- en dooicycli kan een aanduiding geven van de potentiële vorstschade in een steen. De berekeningen zullen hier gedaan worden voor de 6 locaties van het MOCCA-project en voor 3 windrichtingen (zuidwest, noord en noordwest). Het aantal kritische vorst- en dooicycli zal berekend worden op 2 verschillende manieren. De ene methode zal gebruik maken van een kritische ijsmassa die overtroffen moet worden voor er een kritische vorst- en dooicyclus kan ontstaan. De kritische ijsmassa voor beide natuurstenen werd in het vorige hoofdstuk bepaald aan de hand van het kritische watersaturatiehalte en de open porositeit. De andere methode zal kijken naar het 'frost cracking window' van -3°C tot -8°C . Op basis van de temperatuur in de steen zal men zoeken naar het aantal kritische vorst- en dooicycli in de steen.

7.2.1 Methode 1: Kritische vorst- en dooicycli bepalen aan de hand van het kritische ijsgehalte

Voor dit onderdeel verdelen we de steen opnieuw in secties van 1 mm voor de eerste 5 cm en voor de resterende 25 cm verdeeld in delen van 1 cm. In elk deeltje wordt via Delphin 6.1.0 het ijsgehalte op die specifieke diepte bepaald. Na het berekenen van het ijsgehalte op de verschillende dieptes wordt een formule toegepast op die resultaten. Dit is opnieuw de formule van Vandemeulebroucke (2018) (Figuur 6.21). In de formule wordt gebruik gemaakt van de kritische ijsmassa. Deze bedraagt $0.207 \text{ m}^3/\text{m}^3$ voor Savonnières en $0.2166 \text{ m}^3/\text{m}^3$ voor Bentheim. Door de aanwezigheid van ijsmassa enkel in de geïsoleerde muren, wordt het onderzoek van kritische vorst- en dooicycli vooral uitgevoerd op de muuropbouw met na-

isolatie. Ook hier is gerekend met de windrichting van Melle om de slagregenbelasting niet te onderschatten, zoals in de paragraaf over vocht.

7.2.1.1 Zuidwestelijke oriëntatie

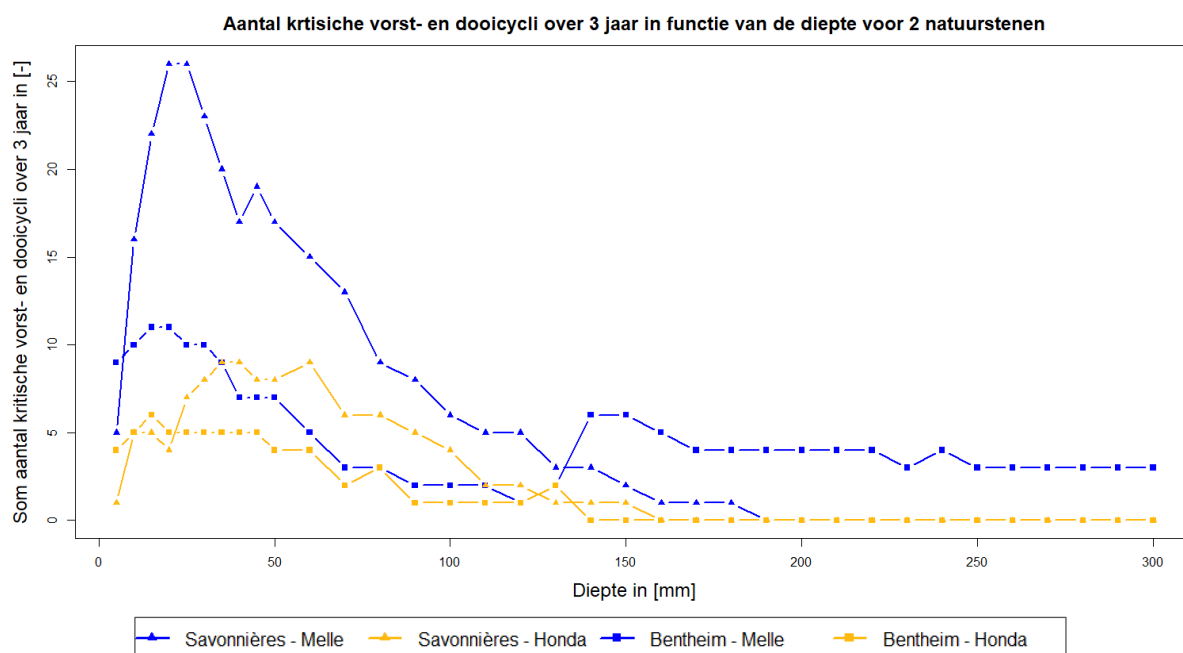
Op alle locaties is de kritische ijsmassagrens toegepast, wat enkel leidt tot kritische vorst- en dooicycli op de locatie Melle en op Honda (Tabel 7.12). Dit zijn de twee plaatsen met de laagste temperaturen. Het grootste aantal kritische vorst- en dooicycli wordt bereikt in Melle, de locatie met de grootste vochthoeveelheid. Savonnières bereikt algemeen gezien steeds meer kritische vorst- en dooicycli dan Bentheim en op de locatie Melle bereikt Savonnières bijna tot 2 keer zoveel kritische vorst- en dooicycli als in Bentheim. Voor de locatie Honda ligt het verschil een stuk lager en bereikt Savonnières slechts 1.23 keer meer kritische vorst- en dooicycli. Het meeste aantal kritische vorst- en dooicycli wordt bereikt voor het jaar 2018, hoewel het aantal uren vorst in 2018 ongeveer gelijk is met het aantal uren vorst in 2017 en de neerslaghoeveelheid in 2018 met ongeveer 50 tot 100mm lager ligt dan in 2017 (Tabel 4.3 & Tabel 4.6). Hoogstwaarschijnlijk zijn er in 2018 minder uren vorst maar schippert de temperatuur meerdere malen rond de vriestemperatuur voor een bepaalde tijd.

Plek	Aantal kritische vorst- en dooicycli						Totale kritische vries- en dooicycli (2017-2019)	
	Bentheim			Savonnières			Bentheim	Savonnières
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	Totaal	Totaal
Provinciehuis	0	0	0	0	0	0	0	0
Melle	22	77	0	72	109	10	99	181
Plantentuin	0	0	0	0	0	0	0	0
Honda	0	52	0	8	56	0	52	64
Sint-Bavoschool	0	0	0	0	0	0	0	0
Wondelgem	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 7.12: Het aantal kritische vorst- en dooicycli over 3 jaar voor zowel Savonnières als Bentheim voor de 6 locaties in het MOCCA-project in een zuidwestelijke oriëntatie.

Voor de locaties met een waarde aan kritische vorst- en dooicycli, wordt gekeken welke diepte de meest kritische is voor het aantal vorst- en dooicycli (Figuur 7.19). De meest kritische diepte wijst op de sectie die het grootste aantal kritische vorst- en dooicycli bevat. In een muuropbouw met Bentheim op de locatie Melle is dit de sectie van 10mm tot 20mm. Voor een muuropbouw met Savonnières is het gedeelte van 15mm tot 25mm. Op de locatie Honda bedraagt de meest kritische sectie in een muuropbouw met Bentheim 10mm tot 15mm en in een muuropbouw met Savonnières 30mm tot 40mm. Opvallend is dat aan het gevelvlak (de eerste 5 à 10 mm) de meeste kritische vorst- en dooicycli gerekend zijn voor Bentheim op eenzelfde locatie. Daarna komt de waarde van Savonnières boven die van Bentheim te liggen, waarna Bentheim opnieuw de waarde van Savonnières overtreft op een diepte van 130 mm in Honda en 140 mm in Melle. Dit laatste is te wijten aan het vocht dat zich veel dieper

verspreid in Bentheim dan in Savonnières. Ijs zal zich ook veel sneller voortplanten in de diepte van de steen door de unimodale verdeling van de poriënstructuur in Bentheim.



Figuur 7.19: Cumulatieve kritische vorst- en dooicycli in de natuurstenen Savonnières en Bentheim voor de locatie Melle (blauw) en de locatie het Honda (geel).

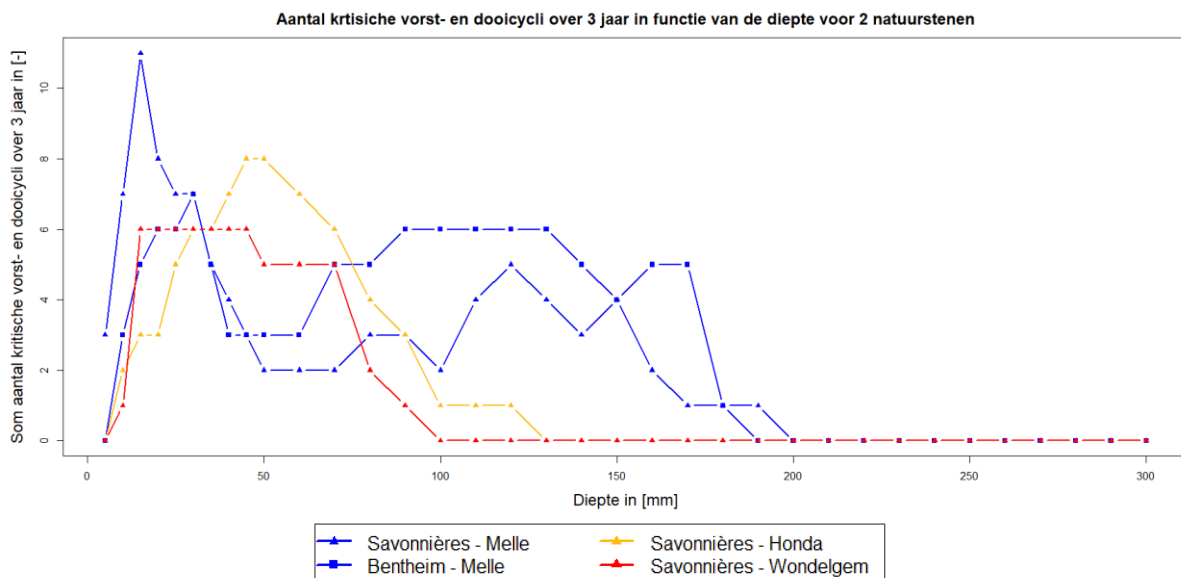
7.2.1.2 Noordelijk en noordwestelijke oriëntatie

Ondanks een mindere vochthoeveelheid en een lagere temperatuur dan in de zuidwestelijke oriëntatie heeft de noordelijke oriëntatie enkel in de geïsoleerde muuropbouw met Savonnières 39 kritische vorst en dooicycli op de locatie Melle. Op alle andere locaties en voor alle andere muuropbouwen zijn er geen enkele kritische vorst- en dooicycli. Voor de noordwestelijke oriëntatie zijn de meeste kritische vorst- en dooicycli te vinden in Melle voor zowel Bentheim als voor Savonnières, gevolgd door Honda en Wondelgem die enkel kritische vorst- en dooicycli vertonen voor een geïsoleerde Savonnièressteen (Tabel 7.13). Omdat Wondelgem in 2017 getroffen werd door een slagregenbelasting vanuit het noordwesten, is er genoeg vocht aanwezig om kritische vorst- en dooicycli te ontwikkelen bij vriestemperaturen. Het minder voorkomen van vorst- en dooicycli in de noordelijke oriëntatie is door een mindere hoeveelheid vocht in de muur. Zonder vocht kan er geen ijsmassa gevormd worden en dus ook geen kritische vorst- en dooicycli volgens deze onderzoeksmethode. Ondanks er soms voldoende vocht in de noordwestelijke oriëntatie aanwezig is, blijft het aantal kritische vorst- en dooicycli in de zuidwestelijke oriëntatie altijd hoger liggen. Voor Savonnières liggen de waarden op de locatie Melle in de noordwestelijke oriëntatie 3.18 keer lager dan in de zuidwestelijke oriëntatie en op de locatie Honda 1.33 keer lager. Voor Bentheim liggen de waarden op de locatie Melle 2.53 keer lager dan in de zuidwestelijke oriëntatie.

Plek	Aantal kritische vorst- en dooicycli						Totale kritische vries- en dooicycli (2017-2019)	
	Bentheim			Savonnières			Bentheim	Savonnières
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	Totaal	Totaal
Provinciehuis	0	0	0	0	0	0	0	0
Melle	25	0	14	37	0	20	39	57
Plantentuin	0	0	0	0	0	0	0	0
Honda	0	0	0	48	0	0	0	48
Sint-Bavoschool	0	0	0	0	0	0	0	0
Wondelgem	0	0	0	48	0	0	0	48

Tabel 7.13: Het aantal kritische vorst- en dooicycli over 3 jaar voor zowel Savonnières als Bentheim voor de 6 locaties in het MOCCA-project in de noordwestelijk georiënteerde muren.

In Figuur 7.20 is het aantal kritische vorst- en dooicycli afgebeeld in functie van de diepte. In Melle is de meest kritische diepte de sectie van 10mm tot 15mm voor Savonnières en 15mm tot 20mm voor Bentheim. De locatie Honda en Wondelgem vertonen enkel kritische vorst- en dooicycli voor Savonnières. Daar geldt de kritische diepte voor Wondelgem 10 mm tot 15mm en voor Honda 40mm tot 50mm. Ook hier is het aantal kritische vorst- en dooicycli van Bentheim in de eerste fase onder het aantal van Savonnières voor de plaats Melle. Na een diepte van 20mm heeft Bentheim tot 150mm nu het grootste aantal kritische vorst- en dooicycli. Daarna heeft Savonnières voor 30mm opnieuw het grootste aantal. In de laatste fase heeft uiteindelijk Bentheim voor de laatste 20mm het grootste aantal kritische vorst- en dooicycli. Het vocht wordt in de noordwestelijke oriëntatie ook diep verspreid in Savonnières door de tragere uitdroging.



Figuur 7.20: Cumulatieve kritische vorst- en dooicycli in de natuurstenen Savonnières en Bentheim voor de locatie Melle (blauw), de locatie het Honda (geel) en de locatie Wondelgem (rood).

7.2.2 Methode 2: Kritische vorst- en dooicycli bepalen aan de hand van een grenstemperatuur

Een kritische ijsmassa in een natuursteen onderzoeken is niet altijd evident. Bij deze methode zal er gebruik gemaakt worden van de temperatuur in de natuursteen om het aantal kritische vorst- en dooicycli te bepalen. De gebruikte temperaturen worden teruggekoppeld naar de luchttemperatuur waardoor op basis van de luchttemperatuur een schatting kan gemaakt worden van eventuele vorstschade. Volgens Anderson (1998) is er kans op vorstschade als de temperatuur in de natuursteen zich in het 'frost cracking window' bevindt. Dit spreidingsgebied bevindt zich tussen -3°C en -8°C .

7.2.2.1 Zuidwestelijke oriëntatie

Om te beginnen wordt gekeken naar het aantal kritische vorst- en dooicycli op basis van 0°C . Op die manier wordt een inschatting gemaakt over hoeveel keer de temperatuur in de steen onder nul gaat. Dit wordt geanalyseerd voor iedere locatie per jaar in Tabel 7.14 en Tabel 7.15. In deze analyse is de locatie Melle opnieuw de locatie met de grootste waarde aan kritische vorst- en dooicycli, gevolgd door Honda. De minste kritische vorst- en dooicycli zijn te vinden in de Sint-Bavoschool, met daaropvolgend het Provinciehuis. In de muur zonder isolatie heeft het Provinciehuis bijna het dubbele aantal kritische vorst- en dooicycli in vergelijking met de Sint-Bavoschool en in de muur met isolatie liggen deze waarden dicht bij elkaar. Dit komt omdat de muuropbouw zonder isolatie op de locatie Sint-Bavoschool een warmere temperatuur aanneemt dan de muuropbouw op de locatie het Provinciehuis. Als de muren geïsoleerd worden, dalen de temperaturen voor de muuropbouwen in beide locaties. Op die manier komt het aantal kritische vorst- en dooicycli op de plaats Sint-Bavoschool plots een heel stuk dicht bij het aantal die bereikt wordt op de locatie het Provinciehuis.

Het verschil tussen het aantal kritische vorst- en dooicycli in een geïsoleerde en een niet-geïsoleerde muuropbouw met Savonnières is kleiner dan het verschil bij een muuropbouw met Bentheim. De temperatuur in Bentheim ligt in een niet-geïsoleerde muur vaak boven 0°C terwijl Savonnières zich al onder 0°C bevindt. Op die manier heeft Bentheim in een niet-geïsoleerde muur heel wat minder kritische vorst- en dooicycli dan Savonnières. Als de muur geïsoleerd wordt, komt het aantal dicht bij het aantal van Savonnières te liggen. Uiteindelijk heeft Bentheim nog steeds de minste kritische vorst- en dooicycli op iedere locatie voor in eenzelfde muuropbouw als Savonnières.

Plek	Aantal vorst- en dooicycli met grens op 0°C voor een muuropbouw zonder isolatie						Totale kritische vries- en dooicycli (2017-2019)	
	Bentheim			Savonnières			Bentheim	Savonnières
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	Totaal	Totaal
Provinciehuis	0	10	0	10	42	6	10	58
Melle	2	62	4	61	95	35	68	191
Plantentuin	0	11	0	16	46	8	11	70
Honda	0	52	0	35	83	14	52	132
Sint-Bavoschool	0	0	0	1	25	3	0	29
Wondelgem	0	16	0	19	45	11	16	75

Tabel 7.14: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met de grenstemperatuur 0°C voor 3 jaar in een muuropbouw zonder isolatie.

Plek	Aantal vorst- en dooicycli met grens op 0°C voor een muuropbouw met isolatie						Totale kritische vries- en dooicycli (2017-2019)	
	Bentheim			Savonnières			Bentheim	Savonnières
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	Totaal	Totaal
Provinciehuis	138	127	73	141	164	80	338	385
Melle	183	265	124	175	282	143	572	600
Plantentuin	142	165	76	159	191	90	383	440
Honda	153	232	78	158	235	86	463	479
Sint-Bavoschool	138	126	69	139	158	75	333	372
Wondelgem	156	192	78	163	206	111	426	480

Tabel 7.15: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met de grenstemperatuur 0°C voor 3 jaar in een muuropbouw met isolatie.

Vervolgens wordt nagekeken hoeveel fluctuaties rond 0°C effectief schadelijk zijn volgens het 'frost cracking window' van Anderson (1998). De kritische temperatuurgrens wordt gelegd op -3°C, het moment waarop de temperatuur van de steen in het 'frost cracking window' terecht komt. De locaties die het meest in dit temperatuurbereik terechtkomen zijn de locaties Melle en Honda bij alle soorten muuropbouw. De locaties in de binnenstad komen het minst in dat 'frost cracking window' terecht, vooral de locatie Sint-Bavoschool. De oorzaak is het stedelijk hitte-eilandeffect waar de temperatuur in de meer open en landelijke gebieden gemiddeld lager zijn dan de temperatuur in de binnenstad. Als gevolg zullen de natuurstenen de luchttemperatuur overnemen waardoor zich een verschil uit in de temperatuur van de natuursteen op een landelijke locatie en op een locatie uit de binnenstad. Bentheim heeft over het algemeen een lager aantal kritische vorst- en dooicycli dan Savonnières doordat de temperaturen in Bentheim altijd hoger liggen op een diepte van 5mm. Bij een muuropbouw met isolatie komen de waarden van de kritische vorst- en dooicycli van Savonnières en Bentheim dichter bij elkaar te liggen. Doordat Savonnières meerdere kritische vries- en

dooicycli heeft, fluctueert de temperatuur in de natuursteen meerdere keren rond -3°C dan in Bentheim. Door zijn hogere temperatuur blijft Bentheim soms nog boven de -3°C terwijl Savonnières er net onder gaat, wat resulteert in extra kritische vorst- en dooicycli bij deze methode.

Bij een muur zonder isolatie zien we een groot verschil bij het aantal kritische vorst- en dooicycli van Melle en Honda t.o.v. andere locaties. Bij de muur met na-isolatie zien we dit veel minder tussen Honda en de andere locaties maar tussen Melle en de andere locaties is dit grote verschil nog duidelijk aanwezig. Het plaatsen van na-isolatie heeft duidelijk een grote invloed op het aantal kritische vorst- en dooicycli. Het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières stijgt met een factor 15 voor de locaties Provinciehuis, Plantentuin en Wondelgem. Voor de plaatsen Melle en Honda stijgt het aantal in Savonnières respectievelijk met een factor 3.8 en een factor 3.4. Bentheim zal meer stijgen voor de plaatsen waar al kritische vorst- en dooicycli vastgesteld waren. In Melle zal het aantal kritische vorst- en dooicycli stijgen met een factor 7.6 en in Honda met een factor 11. Op de andere locaties gaat het aantal kritische vorst- en dooicycli van 0 naar plots rond de 30 voor dezelfde 3 jaar bij het plaatsen van na-isolatie. Het plaatsen van na-isolatie, waardoor de temperatuur van de gevelsteen zal dalen, zorgt op veel plaatsen voor grote toename in vorstschade van de natuursteen. Opvallend is ook dat 2019 het jaar is waar meestal de minste kritische vorst- en dooicycli te vinden zijn. Het jaar 2019 bevat voor de verschillende locaties ongeveer de helft minder vriestemperaturen dan in andere jaren, behalve voor de plaats Melle. Op die plaats liggen de waarden voor het aantal vriesuren in 2019 een derde lager dan andere jaren (Tabel 4.3).

Plek	Aantal vorst- en dooicycli met grens op -3°C voor een muuropbouw zonder isolatie						Totale kritische vries- en dooicycli (2017-2019)	
	Bentheim			Savonnières			Bentheim	Savonnières
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	Totaal	Totaal
Provinciehuis	0	0	0	0	2	0	0	2
Melle	0	8	0	0	15	0	8	15
Plantentuin	0	0	0	0	2	0	0	2
Honda	0	3	0	0	11	0	3	11
Sint-Bavoschool	0	0	0	0	0	0	0	0
Wondelgem	0	0	0	0	2	0	0	2

Tabel 7.16: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met de grenstemperatuur -3°C voor 3 jaar in een muuropbouw zonder isolatie.

Plek	Aantal vorst- en dooicycli met grens op -3°C voor een muuropbouw met isolatie						Totale kritische vries- en dooicycli (2017-2019)	
	Bentheim			Savonnières			Bentheim	Savonnières
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	Totaal	Totaal
Provinciehuis	1	30	0	4	28	0	31	32
Melle	16	34	11	14	34	9	61	57
Plantentuin	1	30	0	2	29	2	31	33
Honda	1	33	0	3	31	3	34	37
Sint-Bavoschool	0	12	0	0	13	0	12	13
Wondelgem	0	28	4	3	25	5	32	33

Tabel 7.17: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met de grenstemperatuur -3°C voor 3 jaar in een muuropbouw met isolatie.

Omdat hier gewerkt wordt met de temperatuur als grens voor het aantal kritische vorst- en dooicycli kan er geen inschatting worden gemaakt over welke diepte het meest kritiek is voor het aantal kritische vorst- en dooicycli. De sectie het dichtst bij het gevelvlak zal steeds de meest kritieke diepte zijn omdat de temperatuur stijgt in de muur naarmate er dieper in de muur gegaan wordt. De bepaling van de kritische vorst- en dooicycli op basis van de temperatuur zal ook zorgen voor een snellere daling in de kritisch vorst- en dooicycli in functie van de diepte voor Savonnières t.o.v. Bentheim. Het aantal cycli volgt het temperatuurverloop over de diepte en in hoofdstuk 6 en in het begin van hoofdstuk 7 is aangetoond dat de temperatuur een snellere daling kent in Savonnières dan in Bentheim door de lagere lambda-waarde (Figuur 7.2 & Figuur 6.5).

Om de temperatuur in de natuursteen te koppelen aan de luchttemperatuur, is een berekening uitgevoerd waarbij eerst het verschil genomen wordt tussen temperatuur in de natuursteen op 5 mm diepte (per uur) en de gemiddelde luchttemperatuur (per uur). Dan bekomen we een reeks aan waarden die het verschil tussen deze twee temperaturen geeft per uur. Van deze reeks gegevens wordt de gemiddelde waarde genomen om mee verder te rekenen. Die gemiddelde waarde wordt opgeteld bij de grenswaarde voor de temperatuur in de natuursteen. In Tabel 7.18 worden de verschillende temperaturen gegeven die nodig zijn om het aantal kritische vorst- en dooicycli te bereiken vanuit Tabel 7.16 & Tabel 7.17. Opmerkelijk is dat de locatie Melle en Honda de minst lage temperatuur nodig hebben om het aantal kritische vorst- en dooicycli, berekend met een grenstemperatuur in de natuursteen van -3°C, te bereiken. Het verschil tussen de luchttemperatuur van deze locaties en de temperatuur in de steen op een diepte van 5 mm op deze plaatsen is kleiner dan op andere plaatsen. Als er in de buitentemperatuur vorst optreedt, dan moet een waarde bereikt worden van ongeveer -5.13°C ($\pm 0.32^\circ\text{C}$) voor een niet-geïsoleerde muur en -4.00°C ($\pm 0.08^\circ\text{C}$) voor een geïsoleerde muur voor Honda en Melle om het aantal kritische vorst- en dooicycli te bekomen, berekend in Tabel 7.16 en Tabel 7.17. Voor de locaties in de binnenstad en voor Wondelgem is er echter een lagere temperatuur nodig om het aantal kritische vorst- en dooicycli te bekomen. Er zullen

in principe nog steeds minder kritische vorst- en dooicycli voorkomen dan in de meest kritische locaties Melle en Honda. Dus de natuurstenen op de locatie Melle en Honda bereiken niet alleen meer kritische vorst- en dooicycli maar bereiken deze waarden ook veel sneller dan de natuurstenen op andere locaties.

Plek	Luchttemperatuur [°C] nodig voor vorstschade met grenstemperatuur -3°C te bereiken			
	Bentheim		Savonnières	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Provinciehuis	-6.54	-4.81	-5.83	-4.71
Melle	-5.44	-4.08	-4.81	-3.93
Plantentuin	-3.84	-5.15	-6.14	-5.05
Honda	-5.44	-4.07	-4.88	-3.97
Sint-Bavoschool	-6.37	-4.71	-5.70	-4.64
Wondelgem	-6.64	-4.90	-5.90	-4.79

Tabel 7.18: Luchttemperatuur nodig voor het aantal kritische vorst- en dooicycli te bereiken, berekend met een grenstemperatuur van -3°C.

De gebruikte methode geeft een indicatie voor het aantal kritische vorst- en dooicycli aan de hand van de temperatuur in de steen. Wat niet in rekening wordt gebracht is de hoeveelheid vocht in de natuursteen. Over het algemeen veronderstelt deze methode dat de muur altijd nat is wanneer er onder de grenstemperatuur gegaan wordt. Voor de muren met isolatie zou dit de meest inschatting kunnen zijn omdat de muur langdurig nat blijft door de plaatsing van na-isolatie. Een muur zonder isolatie droogt sneller uit waardoor de kans groter is dat er geen vocht meer in de muur aanwezig is. Savonnièressteen, met of zonder isolatie, zal over het algemeen langer nat blijven dan Bentheim waardoor deze ook meer in de buurt zal komen van een correcte inschatting. Dit wil niet zeggen dat deze methode een slechte inschatting is voor Bentheim, want de muur blijft in de geïsoleerde muuropbouw ook voor een lange tijd nat waardoor deze inschatting zeker te overwegen valt.

7.2.2.2 Noordelijke en noordwestelijk oriëntatie

Bij deze methode ligt het aantal kritische vorst- en dooicycli in een noordelijke en noordwestelijke oriëntatie een stuk hoger dan in de zuidwestelijk oriëntatie voor alle muuropbouwen. Voor muren georiënteerd op deze twee windrichtingen is dit eerder een overschatting. In de methode wordt enkel rekening gehouden met de temperatuur, waarbij verondersteld wordt dat er altijd vocht aanwezig is in de muur om ijsvorming te laten ontstaan. De temperaturen in deze windrichtingen zijn een stuk lager dan in de zuidwestelijke richting waardoor via deze methode meer kritische vorst- en dooicycli berekend worden. Het is duidelijk een overschatting van de waarden maar toch kunnen we eruit concluderen dat ook hier Melle en Honda de locaties zijn met het meeste vorst- en dooicycli doordat de temperaturen op deze locaties als eerste onder 0°C gaan (Tabel 7.19 en Tabel 7.20). In de

noordwest gerichte muur met na-isolatie bereiken de locatie de Sint-Bavoschool en de Plantentuin de grootste waarde voor de Savonnièressteen en de locaties Plantentuin en Melle de grootste waarden voor Bentheimsteen. Een uitgebreidere tabel met de kritische vorst- en dooicycli is te vinden in Bijlage I tot L.

Plek	Totaal aantal kritische vorst en dooicycli met een temperatuurgrens op -3 °C voor de noordelijke oriëntatie			
	Bentheim		Savonnières	
	<i>Zonder isolatie</i>	<i>Met isolatie</i>	<i>Zonder isolatie</i>	<i>Met isolatie</i>
Provinciehuis	0	141	8	164
Melle	12	158	22	138
Plantentuin	0	151	8	162
Honda	7	125	20	129
Sint-Bavoschool	0	135	3	160
Wondelgem	0	151	9	167

Tabel 7.19: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met de grenstemperatuur -3°C voor 3 jaar in noord gerichte muuropbouw.

Plek	Totaal aantal kritische vorst en dooicycli met een temperatuurgrens op -3 °C voor de noordwestelijke oriëntatie			
	Bentheim		Savonnières	
	<i>Zonder isolatie</i>	<i>Met isolatie</i>	<i>Zonder isolatie</i>	<i>Met isolatie</i>
Provinciehuis	0	127	8	137
Melle	11	142	18	105
Plantentuin	0	147	8	147
Honda	7	100	14	91
Sint-Bavoschool	0	129	3	150
Wondelgem	0	122	8	119

Tabel 7.20: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met de grenstemperatuur -3°C voor 3 jaar in noordwest gerichte muuropbouw.

Als we het aantal kritische vorst- en dooicycli willen inschatten op basis van de luchttemperatuur, zijn ook voor de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie Melle en Honda de twee locaties waar de hoogste temperatuur nodig is om het aantal kritische vorst- en dooicycli, berekend volgens de grenstemperatuur van -3°C, te bereiken. De muren kunnen in deze oriëntaties zelfs al bij een hogere luchttemperatuur dan in de zuidwestelijke oriëntatie kritische vorst- en dooicycli vormen. Als er voldoende vocht in de muur aanwezig is, zullen de noordwest en noord gerichte muuropbouwen sneller een kritische vorst- en dooicyclus tot stand laten komen. Het is belangrijk om in het achterhoofd te houden dat de noordelijke en noordwestelijke oriëntatie over het algemeen zorgt voor een lagere regenbelasting dan een zuidwestelijke oriëntatie. Daarom is het aantal kritische vorst- en dooicycli in realiteit niet zo

hoog als hier wordt aangetoond en zullen de hogere luchttemperaturen waarbij een kritische vorst- en dooicycli kan ontstaan niet zo schadelijk zijn als ze lijken.

Plek	Luchttemperatuur [°C] nodig voor vorstschade met grenstemperatuur -3°C te bereiken in de noordelijke oriëntatie			
	Bentheim		Savonnières	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Provinciehuis	-5.29	-3.13	-4.40	-3.07
Melle	-4.82	-3.35	-4.15	-3.24
Plantentuin	-5.53	-3.40	-4.68	-3.31
Honda	-4.72	-3.13	-4.05	-3.05
Sint-Bavoschool	-5.20	-3.13	-4.38	-3.06
Wondelgem	-5.47	-3.34	-4.61	-3.24

Tabel 7.21: Luchttemperatuur nodig voor het aantal kritische vorst- en dooicycli te bereiken, berekend met een grenstemperatuur van -3°C in een noordelijke oriëntatie.

Plek	Luchttemperatuur [°C] nodig voor vorstschade met grenstemperatuur -3°C te bereiken in de noordwestelijke oriëntatie			
	Bentheim		Savonnières	
	Zonder isolatie	Met isolatie	Zonder isolatie	Met isolatie
Provinciehuis	-5.29	-3.14	-4.45	-3.06
Melle	-4.75	-3.26	-4.08	-3.15
Plantentuin	-5.55	-3.49	-4.71	-3.35
Honda	-4.64	-3.03	-3.97	-2.97
Sint-Bavoschool	-5.19	-3.13	-4.39	-3.07
Wondelgem	-5.44	-3.31	-4.58	-3.23

Tabel 7.22: Luchttemperatuur nodig voor het aantal kritische vorst- en dooicycli te bereiken, berekend met een grenstemperatuur van -3°C in een noordwestelijke oriëntatie.

7.3 Conclusie

Algemeen is gebleken dat het stedelijk hitte-eiland een gunstig effect biedt op het aantal kritische vorst- en dooicycli in de natuursteen.

Savonnières is een poreuze, Noord-Franse natuursteen met een groot percentage aan kleine poriën. Door de invloed van zonnestraling zal de temperatuur in Savonnières grote schommelingen vertonen. Dit komt door de combinatie van een hoge soortelijke warmte met een lage lambda-waarde. In koude periodes, meer specifiek bij het voorkomen van vorst, zal

Savonnières door zijn lage lambda-waarde een dempende invloed geven aan de temperatuurschommelingen.

In het MOCCA-project zullen de laagste temperaturen in de steen voorkomen op de locatie Melle en Honda. De warmste temperaturen doen zich voor in de binnenstad, als gevolg van het stedelijk hitte-eiland. In de stad zal minder verdamping plaatsvinden door afwezigheid van vegetatie en de bebouwing zal een grote hoeveelheid warmte absorberen. Als gevolg hiervan koelt het centrum van de stad veel minder af. De buitenstedelijke gebieden, zoals Melle en Honda, zullen minder warmte absorberen en zijn onderhevig aan een versnelde afkoeling door hoge windsnelheden op die locaties.

Verder neemt Savonnières een grote hoeveelheid vocht op in de muur door zijn poriëngrootteverdeling. Vooral de bijdrage aan microporiën zal bepalen hoeveel vocht een natuursteen zal opnemen. Over het algemeen neemt Savonnières relatief traag het vocht in zich op door een lage waterabsorptiecoëfficiënt. In het MOCCA-project zal op de locaties Melle en Honda dit fenomeen niet te merken zijn door hoge windsnelheden. Het laatstgenoemde zal zijn bijdrage leveren bij de slagregenbelasting en zal zo de grootste vochthoeveelheden bieden op die locaties. De laagste vochthoeveelheden worden toegewezen aan het centrum van de stad.

Savonnières heeft naast een trage wateropname, ook een trage waterafgifte. Hierdoor zal een natuurstenen muur met Savonnières langer nat blijven.

Ongeacht op welke locatie de natuursteen zich bevindt, Savonnières vertoont op 3 jaar tijd geen enkele kritische vorst- en dooicyclus die zowel bij de ene als bij de andere berekeningsmethode voorkomt.

Bij het na-isoleren van Savonnières zal de temperatuur in de steen met een aantal graden dalen. Daarnaast zal de vochthoeveelheid in de muur sterk toenemen door de verhindering van tweezijdige uitdroging, zoals mogelijk is bij een niet-geïsoleerde muur. Door een hogere vochthoeveelheid zal het uitdrogen van de muur nog meer tijd vragen.

Ondanks de lagere temperatuur in de muur en het hoger vochtgehalte ontstaan enkel kritische vorst- en dooicycli op de locaties Melle en Honda voor een zuidwest gerichte muur. Het na-isoleren van de muur zorgt voor een drastisch verschil in het aantal kritische vorst- en dooicycli. Met een 3 keer grotere hoeveelheid kritische vorst- en dooicycli is Savonnières op de locatie Melle het hardst getroffen door deze verandering.

In een noordwest gerichte muur worden kritische vorst- en dooicycli gevormd op de locatie Melle, Honda en ook Wondelgem. De plotse en veel kritische vorst- en dooicycli in Wondelgem zijn te wijten aan slagregenbelasting. Het effect van dit fenomeen op de verwerking van natuursteen wordt versterkt door de plaatsing na-isolatie.

Beide oriëntaties tonen aan de ene kant het gunstig effect van het stedelijk hitte-eiland op het aantal kritische vorst- en dooicycli, maar aan de andere kant het drastisch gevolg van het na-isoleren van een muur.

Bentheim is een Duitse kalkzandsteen met een homogene poriënverdeling. De Duitse natuursteen bevat een grote lambda-waarde waardoor Bentheim makkelijk reageert op een

temperatuurverschil. Als gevolg zal de temperatuur in de steen grote schommelingen vertonen bij vorst of zonnestralingen. Met een groot temperatuurverschil tussen de verschillende locaties van het MOCCA-project, vertoont Bentheim de laagste temperaturen in de buitenstedelijke gebieden en de hoogste temperaturen in het centrum van de stad.

Over het algemeen neemt Bentheim slechts een kleine hoeveelheid vocht op, te wijten aan zijn poriëngrootteverdeling. Hij is in staat om het vocht snel op te nemen en af te geven. Ook in deze natuursteen wordt de grootste hoeveelheid vocht in de muur bereikt op de locaties Melle en Honda.

Op 3 jaar tijd ontstaat op geen enkele locatie een kritische vorst- en dooicyclus in Bentheim.

Als de muur met Bentheim na-geïsoleerd wordt, daalt de temperatuur ook in deze natuursteen op iedere locatie van het MOCCA-project. Bij het plaatsen van na-isolatie zal de vochthoeveelheid vermeerderen en de uitdroging langer duren.

In een tijdspanne van 3 jaar ontstaan enkel kritische vorst- en dooicycli op de locatie Melle, ondanks de gunstige combinatie van een koudere temperatuur en een hogere vochthoeveelheid. Ook hier blijft het positieve effect van het stedelijk hitte-eiland nog steeds geldig: enkel in de buitenstedelijke gebieden bekomen we kritische vorst- en dooicycli.

Bij een vergelijking van de twee natuurstenen t.o.v. elkaar, zal Savonnières in elke situatie een groter aantal kritische vorst- en dooicycli bereiken dan Bentheim.

Op elke locatie van het MOCCA-project bedraagt de temperatuur in Savonnières een graad lager dan de temperatuur in Bentheim. Daarnaast zal Savonnières een groter temperatuurverschil teweegbrengen over 30cm diepte door de sterk variërende lambda-waarden. Tussen de verschillende locaties is een verschil op te merken tussen twee groepen. De locaties met de hoogste windsnelheden, Melle en Honda, wijken in temperatuur af van de vier andere locaties.

Verder zal door de verschillende poriënstructuur Savonnières altijd meer vocht bevatten dan Bentheim. De Noord-Franse kalksteen is poreuzer en bevat een groter aantal aan microporiën. Echter op windstille dagen, zal Savonnières zijn maximale vochthoeveelheid later bereiken dan Bentheim. Bij het vergelijken van de droogcurves, toont Savonnières de traagste uitdroging. Een langer nat blijvende muur zal echter een negatief effect tonen op het aantal kritische vorst- en dooicycli. Als beide muren niet-geïsoleerd zijn, worden voor beide natuurstenen op geen enkele locatie kritische vorst- en dooicycli bereikt.

Door de plaatsing van na-isolatie kennen beide natuurstenen plots een groot aantal kritische vorst- en dooicycli over een periode van 3 jaar. In beide natuurstenen zal de temperatuur dalen bij de plaatsing van na-isolatie maar zal Savonnières nog steeds de laagste temperatuur aantonen.

Daarnaast bereikt een geïsoleerde muur een hoger vochtgehalte voor beide natuurstenen. Savonnières zal hierbij nog steeds de grootste waarde bereiken en het traagst uitdrogen.

Als volgt kan door een voldoende lage temperatuur en een voldoende grote vochthoeveelheid, ijsmassa in de natuursteen ontstaan. Bij dit proces zal Bentheim het ijs gemakkelijk verspreiden over een zekere diepte door zijn unimodale poriënverdeling. In Savonnières verloopt de ijspercolatie in de diepte minder vlot door de multimodale poriënverdeling die de voortplanting van ijsmassa in de steen verhindert.

Voor beide natuurstenen wordt na 3 jaar een groot aantal kritische vorst- en dooicycli bereikt op de locatie Melle. Door zijn grotere vochthoeveelheid en lagere temperatuur zal Savonnières dubbel zoveel kritische vorst- en dooicycli laten ontstaan dan Bentheim.

Het stedelijk hitte-eiland biedt een gunstig effect voor historische gebouwen in het centrum van de stad op het aantal kritische vorst- en dooicycli. Dit positieve effect weerlegt de negatieve gevolgen van het na-isoleren.

8 ALGEMENE CONCLUSIE

In het tweeledig onderzoek naar het aantal kritische vorst- en dooicycli in Savonnières en Bentheim kan besloten worden dat de klimaatveranderingen over het algemeen een gunstige invloed hebben.

In de toekomst zal de temperatuur gegarandeerd stijgen, ongeacht welke klimaatprojectie er wordt gehanteerd. Het effect van het stedelijk hitte-eiland wordt versterkt bij een globale temperatuurstijging van het klimaat. De stadsomgeving kent een mindere afkoeling wat een hogere temperatuur zal opleveren dan voordien. Van de verschillende seizoenen zal de winter de op één na grootste temperatuurstijging ondervinden. Een ander gevolg van de klimaatsverandering is meer seizoensgebonden neerslag. In de winter zal een grote vermeerdering waargenomen worden en in de zomer een grote vermindering. Daarnaast zal de intensiteit van de neerslag verhogen en zorgen voor hevige buien. Verder zorgt de klimaatsverandering voor meer lokale en hevige winden. Dit fenomeen zorgt ervoor dat het hitte-eilandeffect geen invloed heeft op meer landelijke gebieden. Hierdoor zal het temperatuurverschil tussen het centrum en de rand van de stad nog groter worden. Slagregenbelasting, afhankelijk van onder andere de windsnelheid, zal groter worden en een sterke bijdrage leveren aan het (mogelijks) stijgend vochtgehalte.

Savonnières is een poreuze, zachte en Noord-Franse kalksteen met een witte uitstraling. De stijgende temperaturen in het klimaat zullen overgenomen worden in de temperaturen van de kalksteen. Daarnaast zorgen de meer frequente regenbuien voor een grotere vochtopname in de poreuze natuursteen. Bij een stijging van de intensiteit van de regenbuien, zal van een grotere vochtopname geen sprake zijn. Door zijn poriënstructuur heeft Savonnières onvoldoende tijd om bij een korte en intensieve regenbui het vocht voldoende op te nemen. In normale omstandigheden neemt Savonnières traag het vocht in zich op, tenzij bij hoge windsnelheid. Doordat de klimaatsverandering hevige winden met zich meebrengt, zal Savonnières in staat zijn sneller water op te nemen.

Het stedelijk hitte-eilandeffect zal het fenomeen van de stijgende temperaturen nog meer versterken. De binnenstad zal een nog grotere temperatuur in de steen opleveren, terwijl in een landelijke en/of open omgeving deze invloed miniem is. De absorptie van warmte wordt aan de buitenrand van de stad belemmerd door de toenemende windsnelheden.

Algemeen heeft het na-isoleren een negatieve invloed op de duurzaamheid van Savonnières. De temperatuurstijgingen, teweeggebracht door de klimaatsveranderingen, zullen de negatieve effecten hiervan voor een deel compenseren.

Bentheim is een harde, zuivere en Duitse kalkzandsteen met een gelijkmatige structuur. De kalkzandsteen zal de stijgende temperaturen ten gevolge van de klimaatsverandering nog gemakkelijker overnemen dan de Savonnièressteen. Daarnaast zullen meer frequente regenbuien zorgen voor een grotere vochtopname in Bentheim, maar het zal de vochthoeveelheid van Savonnières niet kunnen overtreffen. De stijging van de intensiteit van

de regenbuien heeft amper effect op Bentheim. De Duitse kalkzandsteen neemt relatief snel het vocht op, waardoor deze op windstille dagen, sneller wordt verzadigd dan de Savonnièressteen.

In de binnenstad zullen ook hier de temperaturen sterker stijgen omwille van het stedelijk hitte-eilandeffect. Doordat Bentheim makkelijker de omgevingstemperatuur overneemt, zal deze een groter temperatuurverschil aantonen tussen de binnenstad en buitenstedelijke gebieden dan Savonnières. Aan de rand van de stad zal het stedelijk hitte-eiland zijn effect verliezen door de grotere windsnelheden.

Algemeen heeft de na-isolatie ook hier een negatief effect op de levensduur van de steen. Voornamelijk door de afkoeling van de buitenmuur door het plaatsen van na-isolatie, neigen de prestaties van Bentheim aan te sluiten bij deze van de Savonnières. De temperatuurstijging als gevolg van de klimaatsverandering, zal de negatieve gevolgen van na-isolatie in beide natuurstenen afvlakken.

Savonnières en Bentheim zijn dus op heden beide onderhevig aan een aantal kritische vorst- en dooicycli. Het is duidelijk dat Bentheim in alle situaties beter presteert dan Savonnières. De klimaatsverandering, in het bijzonder de stijgende temperatuur, zal ervoor zorgen dat het aantal kritische vorst- en dooicycli gereduceerd wordt. Bij het stedelijk hitte-eiland zien we hiervan een groter effect in de binnenstad dan in de landelijke en/of open omgeving.

Na-isolatie heeft daarentegen een zeer negatief gevolg op de duurzaamheid van de natuursteen. Door het bereiken van een groot aantal kritische vorst- en dooicycli zal de natuursteen meer getroffen worden door vorstschade. Het positief effect van de klimaatsverandering en het stedelijk hitte-eiland kan deze negatieve gevolgen van na-isolatie nagenoeg niet weerleggen.

REFERENTIES

- Agentschap Onroerend Erfgoed. (2015). *Museum voor Schone Kunsten*. <https://inventaris.onroerenderfgoed.be/erfgoedobjecten/18199>
- Akkurt, G. G., Aste, N., Borderon, J., Buda, A., Calzolari, M., Chung, D., Costanzo, V., Del Pero, C., Evola, G., Huerto-Cardenas, H. E., Leonforte, F., Lo Faro, A., Lucchi, E., Marletta, L., Nocera, F., Pracchi, V., & Turhan, C. (2020). Dynamic thermal and hygrometric simulation of historical buildings: Critical factors and possible solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118(August 2019), 109509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109509>
- Anderson, R. S. (1998). Near-surface Thermal Profiles in Alpine Bedrock: Implications for the Frost Weathering of Rock. *Arctic and Alpine Research*, 30(4), 362–372. <https://doi.org/10.1080/00040851.1998.12002911>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Bakker, R. R., & Barnhoorn, A. (2019). Multiscale evaluation of potential damage in jetted lateral boreholes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.03.027>
- Benavente, D., Sanchez-Moral, S., Fernandez-Cortes, A., Canaveras, J., Elez, J., & Saiz-Jimenez, C. (2011). Why pore size is important in the deterioration of porous stones used in the built heritage. *Environ Earth Science*, 63, 1529–1543. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0815-9>
- Berghmans, G. (2013). *Evaluatie van vorstschade bij kalkstenen: een technische beoordeling*.
- Bjarløv, S. P., Finken, G. R., & Odgaard, T. (2015). Retrofit with interior insulation on solid masonry walls in cool temperate climates - An evaluation of the influence of interior insulation materials on moisture condition in the building envelope. *Energy Procedia*, 78, 1461–1466. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.171>
- Blocken, B., & Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(13), 1079–1130. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.06.003>
- Bohnenstengel, S. I., Hamilton, I., Davies, M., & Belcher, S. E. (2014). Impact of anthropogenic heat emissions on London's temperatures. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(679), 687–698. <https://doi.org/10.1002/qj.2144>
- Camerman, C. (1957). *Beschrijving en gebruik in België en in Nederland van de Franse witte steen*. Brussel : Hayez, 1957. <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:000290711>
- Cnudde, V., Dewaele, J., & De Ceukelaire, M. (2009). *Gent... Steengoed!* <https://lib.ugent.be/nl/catalog/rug01:001335481>

- David, C., Bertauld, D., Dautriat, J., Sarout, J., Menéndez, B., & Nabawy, B. (2015). Detection of moving capillary front in porous rocks using X-ray and ultrasonic methods. *Frontiers in Physics*, 1, 53. <https://doi.org/10.3389/fphy.2015.00053>
- De Boever, W. (2015). *Unraveling the structure and composition of sandstones: a submicron-to centimetre-scale study*. <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>
- De Clercq, M. (2014). *Herstelmortels voor de Ledesteen: receptontwikkeling en eigenschappen . Voorwoord*.
- De Kock, T., Dewanckele, J., Boone, M., De Schutter, G., Jacobs, P., & Cnudde, V. (2014). Replacement stones for lede stone in Belgian historical monuments. *Geological Society Special Publication*, 391(1), 31–46. <https://doi.org/10.1144/SP391.9>
- De Kock, T., Van Stappen, J., Fronteau, G., Boone, M., De Boever, W., Dagrain, F., Silversmit, G., Vincze, L., & Cnudde, V. (2017). Laminar gypsum crust on lede stone: Microspatial characterization and laboratory acid weathering. *Talanta*, 162(September 2016), 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.10.025>
- De Witte, E. (1990). Natuursteen in de monumentenzorg: vervangen of conserveren? *Bulletin de La Société Belge de Géologie*, 99(2), 197–205.
- Deprez, M. (2020). *A multiscale experimental identification of freeze-thaw induced pore-scale processes in porous mineral building materials*.
- Derluyn, H. (2012). *Salt transport and crystallization in porous limestone Neutron-X-ray imaging and poromechanical modeling*.
- Derluyn, H., Dewanckele, J., Boone, M. N., Cnudde, V., Derome, D., & Carmeliet, J. (2014). Crystallization of hydrated and anhydrous salts in porous limestone resolved by synchrotron X-ray microtomogra. In *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* (Vol. 324). <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X14000226>
- Derluyn, H., Moonen, P., & Carmeliet, J. (2014). Deformation and damage due to drying-induced salt crystallization in porous limestone. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 63(1), 242–255. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2013.09.005>
- Dewanckele, J., De Kock, T., Fronteau, G., Derluyn, H., Vontobel, P., Dierick, M., Van Hoorebeke, L., Jacobs, P., & Cnudde, V. (2014). Neutron radiography and X-ray computed tomography for quantifying weathering and water uptake processes inside porous limestone used as building material. *Materials Characterization*, 88, 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.12.007>
- Dreesen, R. (2018). *Aard en herkomst van de bouw- en decoratieve steensoorten uit de Romeinse thermen van Heerlen*. 1–37.
- Dreesen, R., Cnudde, V., Dusar, M., de Ceukelaire, M., Bossiroy, D., Groessens, E., Elsen, J., De Kock, T., & Dewanckele, J. (2012). In het voetspoor van Camerman: de opmars van de Franse steen in België. *Stenen van Binnen, Stenen van Buiten : Natuursteen in de Jonge Bouwkunst*, 33–63. <http://mars.naturalsciences.be/bibliop4plone/pdf/papers/2012/in-het-voetspoor-van-camerman>

- Dreesen, R., & Duser, M. (2004). Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): Role of petrography in provenance and durability assessment. *Materials Characterization*, 53(2–4), 273–287. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.07.001>
- Dubelaar, C. W., & Nijland, T. G. (2014). *The Bentheim Sandstone: Geology, petrophysics, varieties and its use as dimension stone*. Springer.
- Duser, M., & Dreesen, R. (2009). *Geodiversiteit Weerspiegeld in Historische Monumenten: Vlaamse Natuursteenlandschappen Als Geotoeristische Trekpleister*. 79–100. www.pbvw.be/
- Duser, M., Dreesen, R., & De Naeyer, A. F. (2009). *Renovatie & restauratie: Natuursteen in Vlaanderen, versteend verleden*.
- Europees Milieu Agentschap. (2019). *Projected change in annual and summer precipitation — European Environment Agency*. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/projected-changes-in-annual-and-5>
- Europese Unie. (n.d.). *De gevolgen van de klimaatverandering*. Retrieved April 11, 2021, from https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_nl
- Federale overheidsdienst: Volksgezondheid. (2019). *Klimaatverandering - Waargenomen veranderingen: Neerslag*. <https://klimaat.be/klimaatverandering/waargenomen-veranderingen/neerslag>
- Federale overheidsdienst: Volksgezondheid. (2021). *Waargenomen veranderingen in België*. <https://klimaat.be/in-belgie/klimaat-en-uitstoot/waarmeningen>
- Frisque, A. (2017). *The influence of the water saturation degree on frost-induced damage: a laboratory study on Savonnières and Bentheim stone*. https://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/508/636/RUG01-002508636_2018_0001_AC.pdf
- Gomez-Heras, M., & McCabe, S. (2015). Weathering of stone-built heritage: A lens through which to read the Anthropocene. *Anthropocene*, 11, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2015.12.003>
- Gómez-Heras, M., Smith, B. J., & Fort, R. (2008). Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response and its potential for the generation of thermoclasty. *Environmental Geology*, 56(3–4), 547–560. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1356-3>
- Grossi, C. M., Brimblecombe, P., & Harris, I. (2007). Predicting long term freeze-thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. *Science of the Total Environment*, 377(2–3), 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.014>
- Guilbert, D. (2018). *Evaluation of the Effect of the Urban Heat Island in Ghent on Natural Building Stones*. 1–77.
- Hall, C., & Hoff, W. D. (2002). *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9780203301708>
- Hall, K. (1986). Rock moisture content in the field and the laboratory and its relationship to mechanical weathering studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11(2), 131–142. <https://doi.org/10.1002/esp.3290110204>

- Hall, K. (2007). Evidence for freeze-thaw events and their implications for rock weathering in northern Canada: II. The temperature at which water freezes in rock. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(2), 249–259. <https://doi.org/10.1002/esp.1389>
- IPCC. (2013). Climate Change 2013 - The physical science basis. In *Researchgate.Net*. https://www.researchgate.net/profile/Abha_Chhabra2/publication/271702872_Carbon_and_Other_Biogeochemical_Cycles/links/54cf9ce80cf24601c094a45e/Carbon-and-Other-Biogeochemical-Cycles.pdf
- Isoproc. (2013). *Damprem - en luchtdichtingsbanen: Intello / Intello Plus - Producten*. <https://www.isoproc.be/nl/solutions/producten/detail/intello/167#simpleContained5>
- Johannesson, B. (2010). Dimensional and ice content changes of hardened concrete at different freezing and thawing temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.001>
- Johansson, P. (2020). *Interior super insulation in heritage buildings Challenges and possibilities to conserve heritage*. July.
- KMI. (2017). *Klimaatprojecties van KMI en UGent gepubliceerd voor internationaal klimaatonderzoek*. <https://www.meteo.be/nl/info/nieuwsbrief/artikels-2017/klimaatprojecties-van-kmi-en-ugent-gepubliceerd-voor-internationaal-klimaatonderzoek>
- KNMI. (n.d.). *KNMI - Regenintensiteit*. Retrieved April 16, 2021, from <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/regenintensiteit>
- Künzel, H. M., & Karagiozis, A. (2010). Hygrothermal behaviour and simulation in buildings. *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*, 54–76. <https://doi.org/10.1533/9781845699277.1.54>
- Lebedev, M., Wilson, M. E. J., & Mikhaltsevitch, V. (2014). An experimental study of solid matrix weakening in water-saturated Savonnières limestone. *Geophysical Prospecting*, 62(6), 1253–1265. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12168>
- Lopes, S., Lebedev, M., Müller, T. M., Clennell, M. B., & Gurevich, B. (2014). Forced imbibition into a limestone: measuring P-wave velocity and water saturation dependence on injection rate. *Geophysical Prospecting*, 62(5), 1126–1142. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12111>
- Louis, L., David, C., Metz, V., Robion, P., Menéndez, B., & Kissel, C. (2005). Microstructural control on the anisotropy of elastic and transport properties in undeformed sandstones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(7-8 SPEC. ISS.), 911–923. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.05.004>
- Mahieu, E., Noirfalisse, E., & Steskens, P. (2012). *Compactdaken, een nieuwe trend? november*, 1–7.
- Matsuoka, N. (2001). Microgelivation versus macrogelivation: towards bridging the gap between laboratory and field frost weathering. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(3), 299–313. <https://doi.org/10.1002/ppp.393>
- Matsuoka, N., & Murton, J. (2008). Frost weathering: Recent advances and future directions. In *Permafrost and Periglacial Processes* (Vol. 19, Issue 2, pp. 195–210).

<https://doi.org/10.1002/ppp.620>

Milieueentraal. (n.d.). *Klimaatverandering*. Retrieved December 1, 2020, from <https://www.milieueentraal.nl/klimaat-en-aarde/klimaatverandering/>

Milieurapport. (2015). *Is klimaatverandering nu al zichtbaar in Vlaanderen?* <https://klimaat2015.milieurapport.be/>

Mocca. (2020). *Het weerstation*. <https://observatory.ugent.be/station.html>

Mocca. (2021). *Live*. <https://observatory.ugent.be/live.html>

Monument Diagnosis and Conservation System. (2015). *Stone Atlas*. <https://mdcs.monumentenkenis.nl/wiki/page/43/stone-atlas-types-of-natural-stone>

Monumentenkenis. (2015). Schade-atlas natuursteen. *Monument En Kennis | Kennis van Natuursteen, Tabel 1*, 66–93.

Mosoarca, M., Keller, A. I., Petrus, C., & Racolta, A. (2017). Failure analysis of historical buildings due to climate change. *Engineering Failure Analysis*, 82(September 2016), 666–680. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.013>

Nicholson, D. T., & Nicholson, F. H. (2000). Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(12), 1295–1307. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200011\)25:12<1295::AID-ESP138>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200011)25:12<1295::AID-ESP138>3.0.CO;2-E)

Nijland, T. G., Dubelaar, C. W., Van Hees, R. P. J., & Van Der Linden, T. J. M. (2003a). Black weathering of Bentheim and Obernkirchen sandstone. In *Heron* (Vol. 48, Issue 3, pp. 179–195).

Nijland, T. G., Dubelaar, C. W., Van Hees, R., & Van Der Linden, T. (2003b). De Bentheimer zandsteen: oliereservoirsteente en bouwsteen. *Grondboor & Hamer*, 57(2), 21–25. <https://repository.tudelft.nl/view/tno/uuid:f79aff81-eacf-4529-bf3c-8d31a208f5a6>

Ojala, I. O. (2011). The effect of CO₂ on the mechanical properties of reservoir and cap rock. *Energy Procedia*, 4, 5392–5397. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.523>

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>

Oxford Reference. (2009). *Frost cracking*. <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199231805.001.0001/acref-9780199231805-e-1306>

Pickles, D., Brocklebank, I., & Wood, C. (2012). *Energy Efficiency and Historic Buildings. Insulating timber-framed walls*. March. <http://www.english-heritage.org.uk/publications>

Pierres & Marbrers, W. (2005). *Een natuurlijke behoefte aan steen*.

Quist, W. J. (2011). *Vervanging van witte Belgische steen: Materiaalkeuze bij restauratie: Vol. Ph.D.*

Quist, W. J. (2012). *Steenkeuze voor restauratie: 150 jaar ontwikkeling in Nederland en*

Vlaanderen. 1–15.

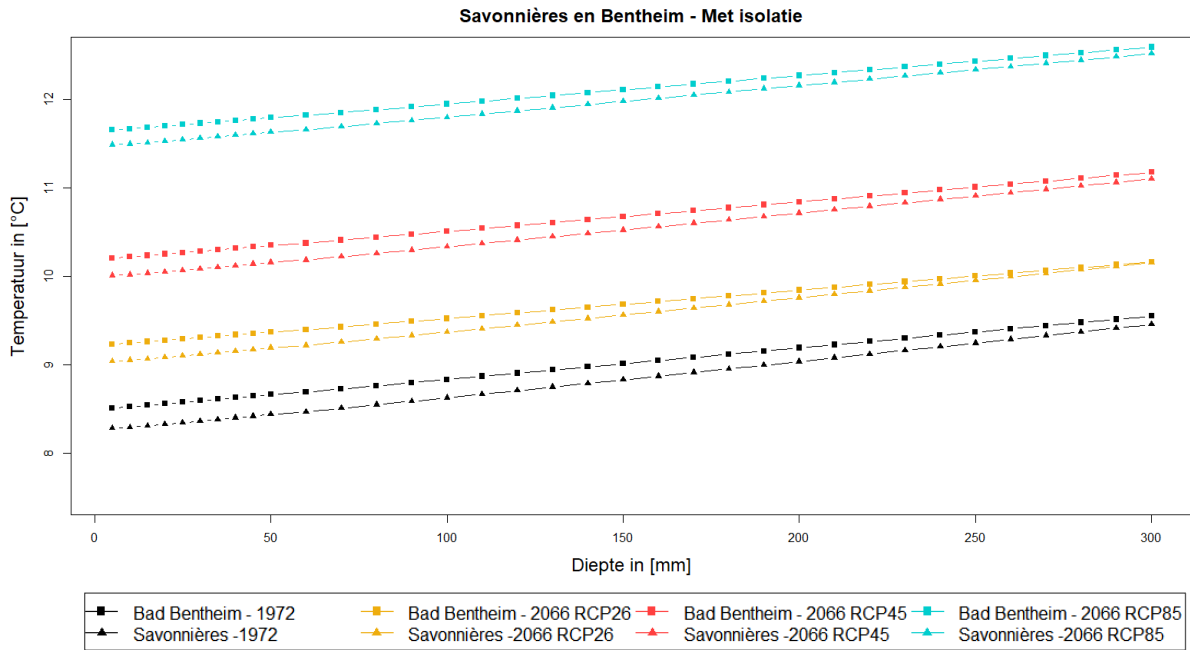
- Roels, S., Carmeliet, J., & Hens, H. (2003). Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone. *Transport in Porous Media*, 52(3), 351–369. <https://doi.org/10.1023/A:1023504128480>
- Roels, S., Elsen, J., Carmeliet, J., & Hens, H. (2001). *Characterisation of pore structure by combining mercury porosimetry and micrography* (Vol. 34).
- Ruedrich, J., Kirchner, D., & Siegesmund, S. (2011). Physical weathering of building stones induced by freeze-thaw action: a laboratory long-term study. *Environ Earth Science*, 63, 1573–1586. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0826-6>
- Ruedrich, J., & Siegesmund, S. (2007). Salt and ice crystallisation in porous sandstones. *Environ Geology*, 52, 225–249. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0585-6>
- Saskia De Mol. (2016). Studie naar het hygrothermisch gedrag van historische bakstenen na hydrofobering a.d.h.v. experimenten en simulaties in Delphin. *Masterproef*, 412. https://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/367/017/RUG01-002367017_2017_0001_AC.pdf
- Scherer, G. W. (1999). Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1347–1358. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00002-2)
- Siegesmund, S. (2011). *Stone in Architecture*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10070-7>
- Siegesmund, S., Weiss, T., & Vollbrecht, A. (2002). Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies: Introduction. *Geological Society Special Publication*, 205(July 2016), 1–7. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.205.01.01>
- Slinger, A., Janse, H., & Berends, G. (1982). *Natuursteen in monumenten*. 1982.
- Stichting toegepast onderzoek waterbeheer. (2019). *Droogte en hitte in de stad*. <https://www.stowa.nl/deltafacts/zoetwatervoorziening/aanpassen-aan-klimaatverandering/droogte-en-hitte-de-stad>
- Straube, J. (1998). *Moisture control and enclosure wall systems*.
- Straube, J. F., & Burnett, E. F. P. (2000). Simplified prediction of driving rain on buildings. *Proceedings of the International Building Physics Conference*, 375–382.
- Straube, J., & Schumacher, C. (2007). Interior insulation retrofits of load-bearing masonry walls in cold climates. *Journal of Green Building*, 2(2), 42–50. <https://doi.org/10.3992/jgb.2.2.42>
- Tiano, P. (2001). *Biodegradation of Cultural Heritage: Decay Mechanisms and Control Methods*. 9, 1–37. http://www.arcchip.cz/w09/w09_tiano.pdf
- Traska, M. (2014). *Water transport properties in building materials : traditional methods versus CT-based pore network analysis*. *Tese de Mestrado*. 91.
- UNESCO. (2007). Climate Change and World Heritage: Report on predicting and managing the impacts of climate change on World Heritage and strategy to assist State Parties to implement appropriate management responses. *World Heritage Reports*, 22, 1–55.

- Valdipierre bvba. (2000). *Savonnières Natuursteen*. <https://www.valdipierre.be/nl/savonniere-natuursteen.aspx>
- van der Linden, A. C., & van den Ham, E. R. (2015). *Bouwfysische aspecten rond het na-isoleren van spouwmuren* (Issue september).
- Van Roy, N., Van Balen, K., Verstrynghe, E., & Naldini, S. (2015). The Stratified Significance of a Historic Façade as a Basis for a more Durable Conservation Approach. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 21(4–6), 137–148. <https://doi.org/10.1515/rbm-2015-1004>
- Vandemeulebroucke, I. (2018). *Hygrothermal Performance Analysis on Retrofitted Historical Masonry Walls: Assessing the Influence of Urban Heat Island Effect and Climate Change by Means of Hygrothermal Simulations*.
- Vandemeulebroucke, I., Calle, K., Caluwaerts, S., De Kock, T., & Van Den Bossche, N. (2019). Does historic construction suffer or benefit from the urban heat island effect in ghent and global warming across Europe? *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(11), 1032–1042. <https://doi.org/10.1139/cjce-2018-0594>
- Vandemeulebroucke, I., Caluwaerts, S., & Van Den Bossche, N. (2021). Factorial study on the impact of climate change on freeze-thaw damage, mould growth and wood decay in solid masonry walls in Brussels. *Buildings*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/buildings11030134>
- VIBE. (2020). *Hoe gaan we om met het stedelijke hitte-eilandeffect?* <https://www.vibe.be/omgeving/hitte-eilandeffect-2/>
- Viles, H. A. (2002). Implications of future climate change for stone deterioration. *Geological Society Special Publication*, 205, 407–418. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.205.01.29>
- Vlaamse Overheid - Departement Omgeving. (2020a). *Milieurapport Vlaanderen (MIRA): Hittegolven en temperatuurextremen*. <https://www.milieurapport.be/milieuthemas/klimaatverandering/temperatuur/hittegolven-en-temperatuurextremen>
- Vlaamse Overheid - Departement Omgeving. (2020b). *Milieurapport Vlaanderen (MIRA): Jaargemiddelde temperatuur*. <https://www.milieurapport.be/milieuthemas/klimaatverandering/temperatuur/jaargemiddelde-temperatuur>
- Walbert, C., Eslami, J., Beaucour, A. L., Bourges, A., & Noumowe, A. (2015). Evolution of the mechanical behaviour of limestone subjected to freeze–thaw cycles. *Environmental Earth Sciences*, 74(7), 6339–6351. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4658-2>
- Wikipedia. (2018). *Hematiet*. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Hematiet>
- Wikipedia. (2020). *Bentheimer zandsteen*. https://nl.wikipedia.org/wiki/Bentheimer_zandsteen
- Wikipedia. (2021a). *Broeikaseffect*. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Broeikaseffect>
- Wikipedia. (2021b). *Gent*. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Gent>

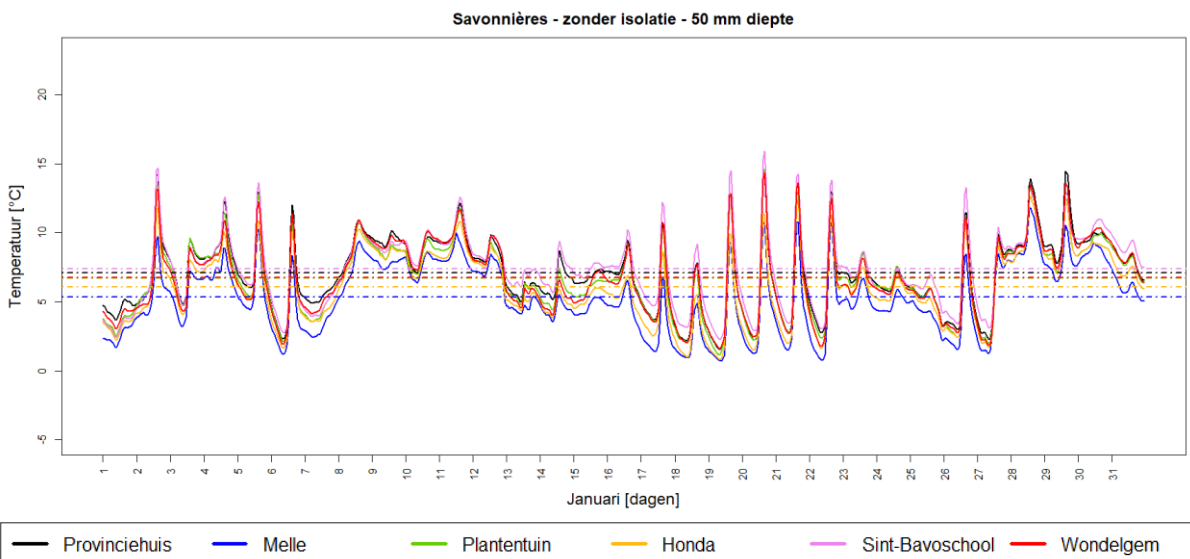
Wikipedia. (2021c). *Thermal conductivity*. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conductivity

BIJLAGEN

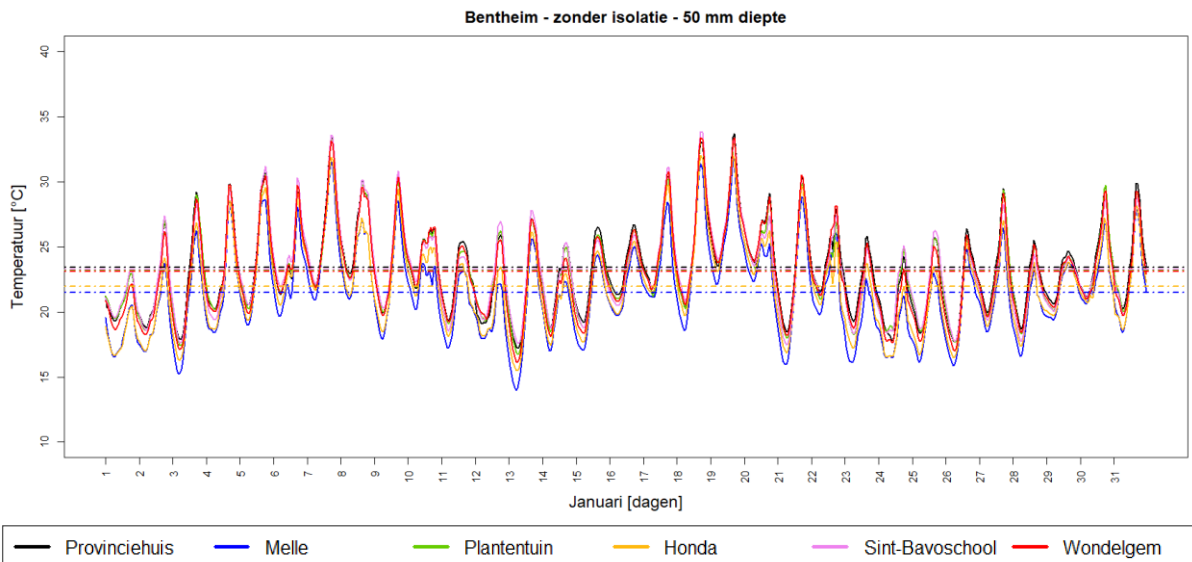
Bijlage A: Het temperatuurverloop over de gehele diepte van de muur voor Savonnières en Bentheim in een geïsoleerde muur.	170
Bijlage B: Het temperatuurverloop van 6 locaties in de maand januari voor Savonnières op 50 mm diepte in een zuidwest gerichte muur.	170
Bijlage C: Het temperatuurverloop van 6 locaties in de maand januari voor Bentheim op 50 mm diepte in een zuidwest gerichte muur.	171
Bijlage D: Temperatuurverloop van 6 locaties in de maand juli voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) op 5mm diepte in een zuidwest gerichte muur.....	171
Bijlage E: Temperatuurverloop van 6 locaties in de maand juli voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) op 50mm diepte in een zuidwest gerichte muur.....	172
Bijlage F: Temperatuurverloop in de diepte voor zowel Savonnières als voor Bentheim in een geïsoleerde muuropbouw.	173
Bijlage G: Temperatuurverloop voor januari (bovenaan) en juli (onderaan) voor Savonnières in een geïsoleerde muuropbouw. Het temperatuurverloop is weergegeven op 5mm en 50 mm diepte voor Melle en Sint-Bavoschool.....	173
Bijlage H: Temperatuurverloop van 6 locaties in de maand januari voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) op 50mm diepte in een noordwest gerichte muur....	174
Bijlage I: Het aantal kritische vorst- en doocycli met een grenstemperatuur van -3°C in een noordwest gerichte en niet-geïsoleerde muuropbouw.	174
Bijlage J: Het aantal kritische vorst- en doocycli met een grenstemperatuur van -3°C in een noordwest gerichte en geïsoleerde muuropbouw.	175
Bijlage K: Het aantal kritische vorst- en doocycli met een grenstemperatuur van -3°C in een noord gerichte en niet-geïsoleerde muuropbouw.	175
Bijlage L: Het aantal kritische vorst- en doocycli met een grenstemperatuur van -3°C in een noord gerichte en geïsoleerde muuropbouw.	175



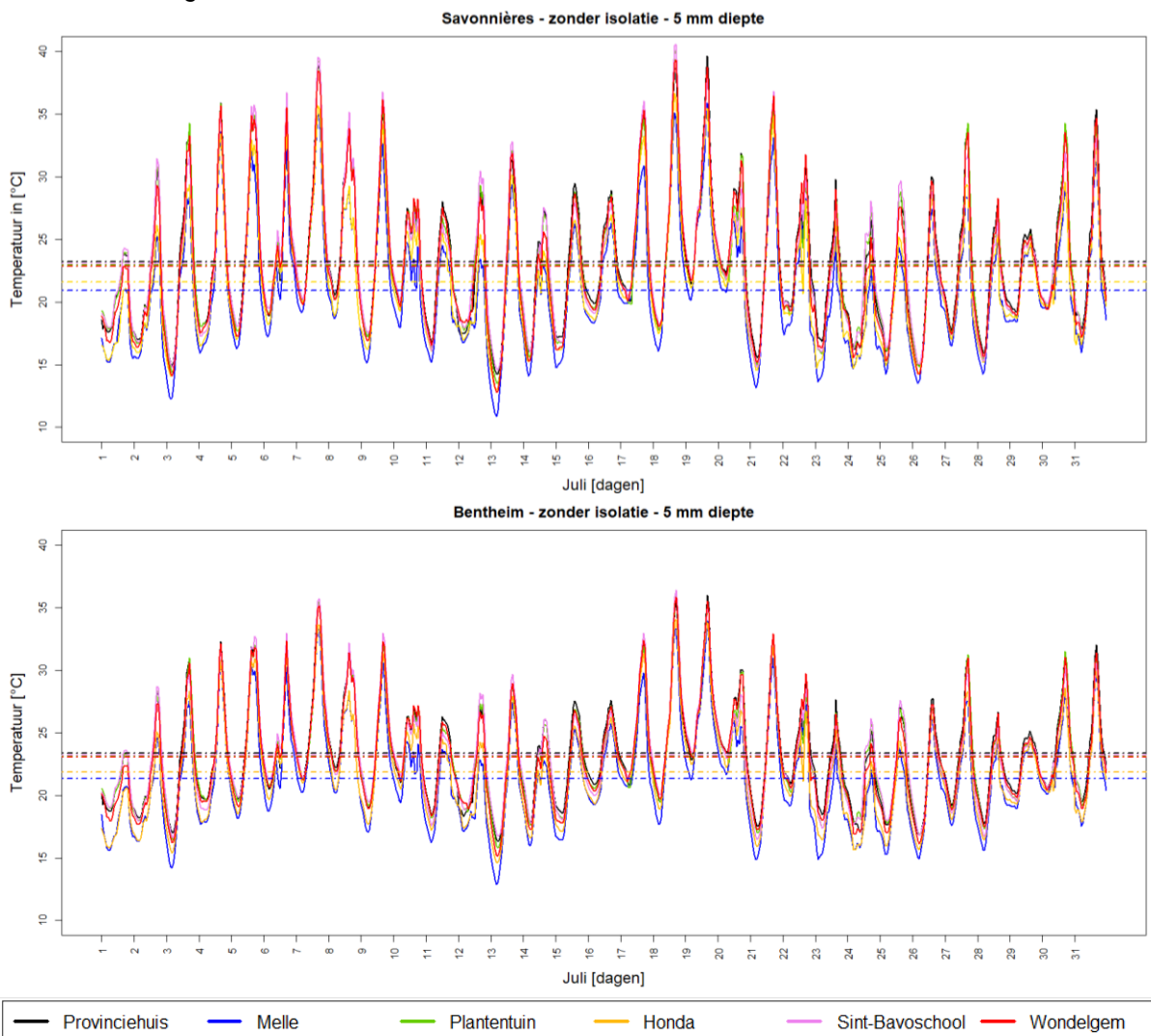
Bijlage A: Het temperatuurverloop over de gehele diepte van de muur voor Savonnières en Bentheim in een geïsoleerde muur.



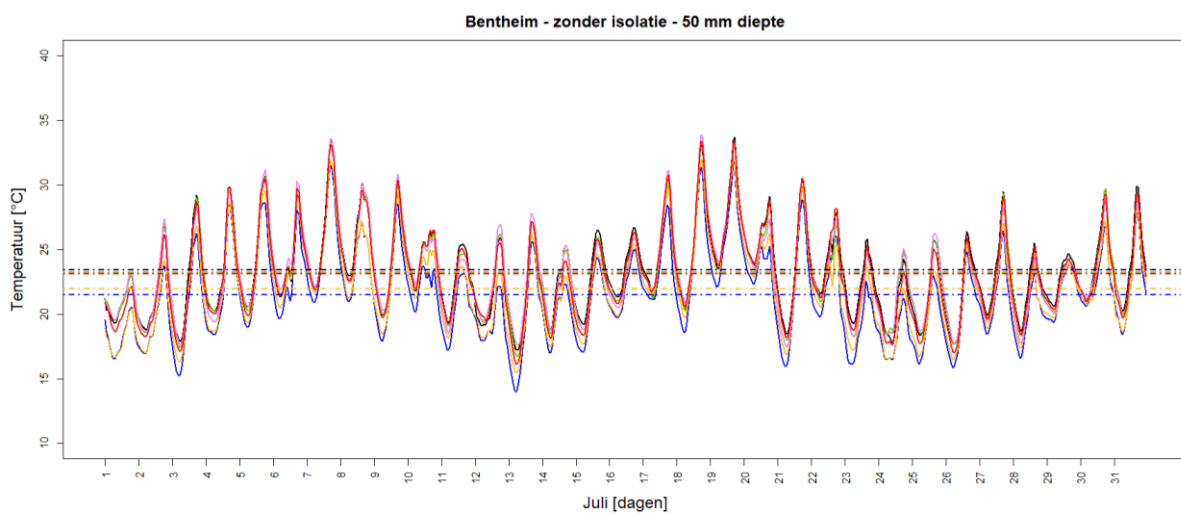
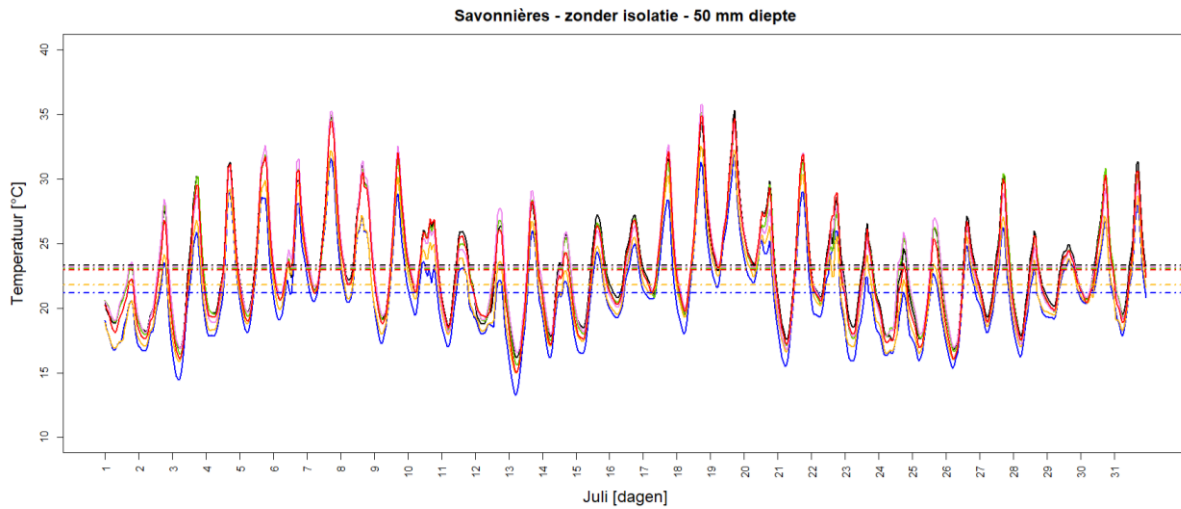
Bijlage B: Het temperatuurverloop van 6 locaties in de maand januari voor Savonnières op 50 mm diepte in een zuidwest gerichte muur.



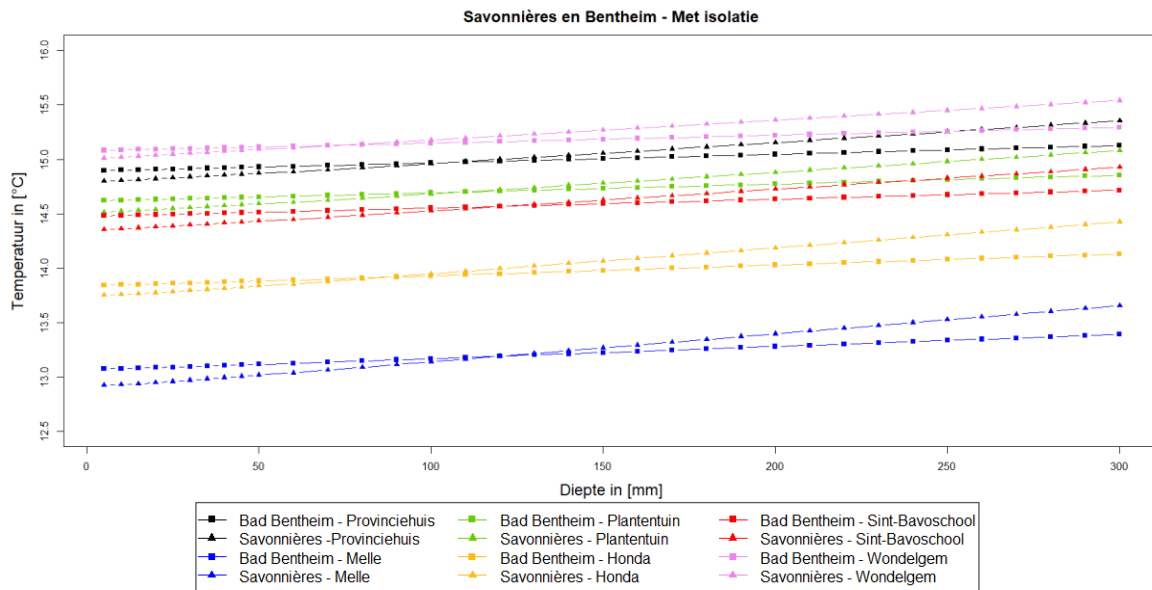
Bijlage C: Het temperatuurverloop van 6 locaties in de maand januari voor Bentheim op 50 mm diepte in een zuidwest gerichte muur.



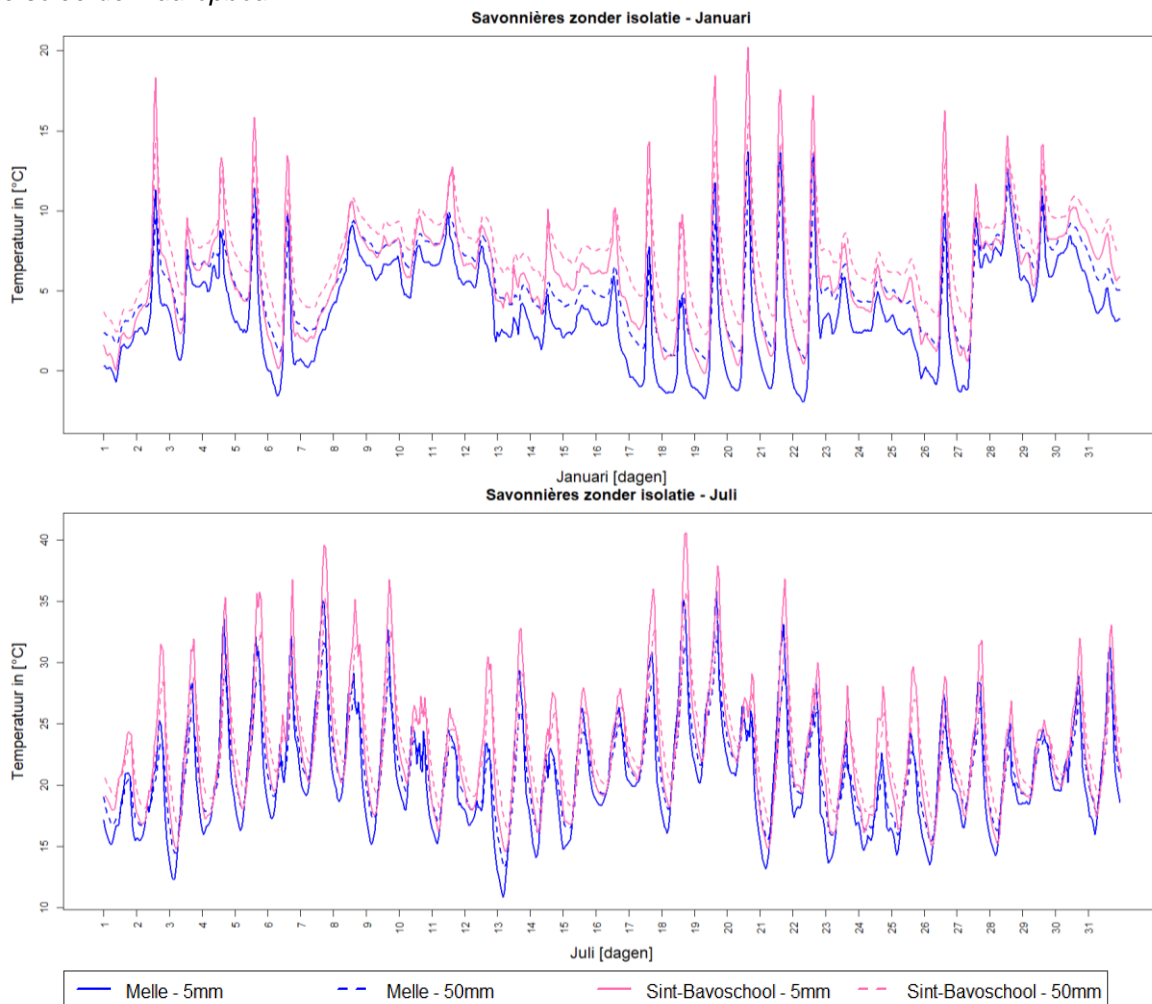
Bijlage D: Temperatuurverloop van 6 locaties in de maand juli voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) op 5mm diepte in een zuidwest gerichte muur.



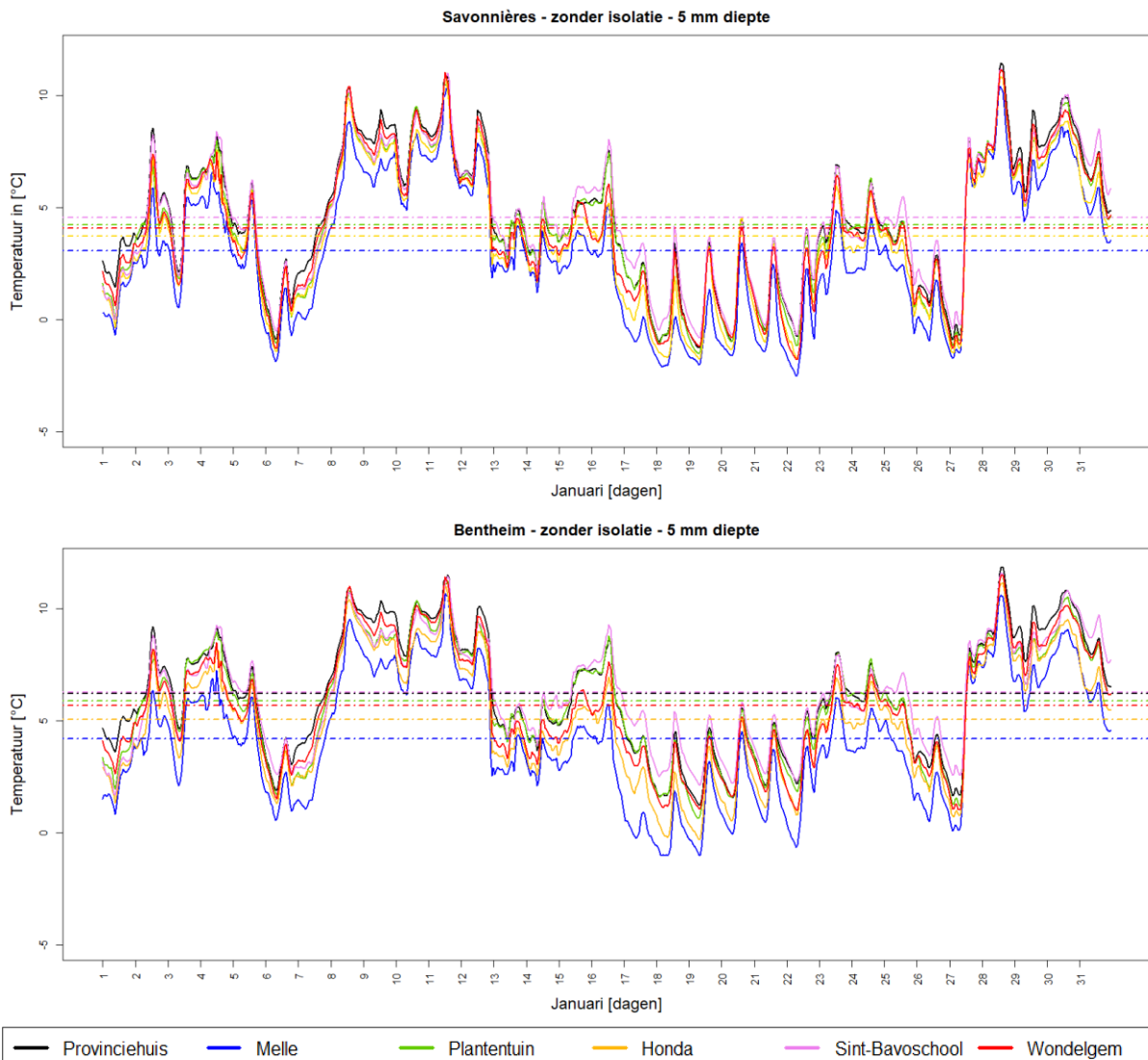
Bijlage E: Temperatuurverloop van 6 locaties in de maand juli voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) op 50mm diepte in een zuidwest gerichte muur.



Bijlage F: Temperatuurverloop in de diepte voor zowel Savonnières als voor Bentheim in een geïsoleerde muuropbouw.



Bijlage G: Temperatuurverloop voor januari (bovenaan) en juli (onderaan) voor Savonnières in een geïsoleerde muuropbouw. Het temperatuurverloop is weergegeven op 5mm en 50 mm diepte voor Melle en Sint-Bavoschool.



Bijlage H: Temperatuurverloop van 6 locaties in de maand januari voor Savonnières (bovenaan) en Bentheim (onderaan) op 50mm diepte in een noordwest gerichte muur.

Plek	Aantal vorst- en dooicycli met grens op -3°C voor een muuropbouw zonder isolatie voor noordwestelijke oriëntatie						Totale kritische vries- en dooicycli (2017-2019)	
	Bentheim			Savonnières			Bentheim	Savonnières
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	Totaal	Totaal
Provinciehuis	0	0	0	0	8	0	0	8
Melle	0	11	0	0	17	1	11	18
Plantentuin	0	0	0	0	8	0	0	8
Honda	0	7	0	0	14	0	7	14
Sint-Bavoschool	0	0	0	0	3	0	0	3
Wondelgem	0	0	0	0	8	0	0	8

Bijlage I: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met een grenstemperatuur van -3°C in een noordwest gerichte en niet-geïsoleerde muuropbouw.

Plek	Aantal vorst- en dooicycli met grens op -3°C voor een muuropbouw met isolatie voor noordwestelijke oriëntatie						Totale kritische vries- en dooicycli (2017-2019)	
	Bentheim			Savonnières			Bentheim	Savonnières
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	Totaal	Totaal
Provinciehuis	55	42	30	62	48	27	127	137
Melle	67	45	30	45	44	16	142	105
Plantentuin	70	47	30	69	52	26	147	147
Honda	40	40	20	34	39	18	100	91
Sint-Bavoschool	58	51	20	64	66	20	129	150
Wondelgem	55	37	30	49	45	25	122	119

Bijlage J: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met een grenstemperatuur van -3°C in een noordwest gerichte en geïsoleerde muuropbouw.

Plek	Aantal vorst- en dooicycli met grens op -3°C voor een muuropbouw zonder isolatie voor noordelijke oriëntatie						Totale kritische vries- en dooicycli (2017-2019)	
	Bentheim			Savonnières			Bentheim	Savonnières
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	Totaal	Totaal
Provinciehuis	0	0	0	0	8	0	0	8
Melle	0	12	0	0	20	2	12	22
Plantentuin	0	0	0	0	8	0	0	8
Honda	0	7	0	0	20	0	7	20
Sint-Bavoschool	0	0	0	0	3	0	0	3
Wondelgem	0	0	0	0	9	0	0	9

Bijlage K: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met een grenstemperatuur van -3°C in een noord gerichte en niet-geïsoleerde muuropbouw.

Plek	Aantal vorst- en dooicycli met grens op -3°C voor een muuropbouw met isolatie voor noordelijke oriëntatie						Totale kritische vries- en dooicycli (2017-2019)	
	Bentheim			Savonnières			Bentheim	Savonnières
	2017	2018	2019	2017	2018	2019	Totaal	Totaal
Provinciehuis	64	47	30	67	69	28	141	164
Melle	75	53	30	68	48	22	158	138
Plantentuin	70	48	33	72	64	26	151	162
Honda	63	42	20	62	47	20	125	129
Sint-Bavoschool	59	56	20	67	73	20	135	160
Wondelgem	75	46	30	79	58	30	151	167

Bijlage L: Het aantal kritische vorst- en dooicycli met een grenstemperatuur van -3°C in een noord gerichte en geïsoleerde muuropbouw.

