

**This item is the archived peer-reviewed author-version of:**

Oppervlaktegradatie van steen, vroeger en in de toekomst: zichtbare en veronderstelde effecten van klimaat en luchtkwaliteit

**Reference:**

De Kock Tim.- Oppervlaktegradatie van steen, vroeger en in de toekomst: zichtbare en veronderstelde effecten van klimaat en luchtkwaliteit  
Vlaams-Nederlandse Natuursteendagen, 12-13 oktober, 2023, Amsterdam, Nederland - 322(2023), p. 7-19  
To cite this reference: <https://hdl.handle.net/10067/1998390151162165141>

# Oppervlaktegradatie van steen, vroeger en in de toekomst: zichtbare en veronderstelde effecten van klimaat en luchtkwaliteit

Tim De Kock<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Antwerp Cultural Heritage Sciences (ARCHES), Mutsaardstraat 31, 2000 Antwerpen, Belgium.  
Tim.DeKock@UAntwerpen.be

## ***Abstract NL***

Oppervlaktegradatie van natuursteen is een fenomeen van alle tijden. De meest voorkomende vormen in Vlaanderen en Nederland zijn korstvorming, verkleuring, verpoedering, en vormen van laagvormige desintegratie. Hun onderliggende oorzaak is vaak een complex samenspel van verschillende degradatieprocessen en het geheugen-effect van een steenoppervlak. Hier worden de kritische parameters van de meest voorkomende degradatieprocessen samen met een beknopt maar relevant literatuuroverzicht besproken. Zwarte korsten op kalksteen en vervuiling op alle steen in het algemeen was het meest voorkomende fenomeen over de voorbije honderdvijftig jaar. Door een verbetering in luchtkwaliteit neemt dit effect echter sterk af. Klimaatverandering en het stedelijke hitte-eiland zullen een belangrijke rol spelen in het relatief belang van toekomstige degradatie. Vorstschade zal minder belangrijk worden, terwijl bepaalde vormen van zoutschade of biologische groei kunnen toenemen.

## ***Abstract EN***

Surface degradation of natural stone is an all-time phenomenon. The most common forms in Flanders and the Netherlands are crusts, discoloration, granular decohesion, and forms of scaling and delamination. These are underpinned by a complex combination of different processes and the memory effect of a stone surface. Here, critical parameters of the most common degradation processes are discussed along with a brief but relevant literature review. Black crusts on limestone and soiling on all stone in general has been the most common phenomenon over the past century. However, as air quality is strongly improving, this effect is equally decreasing. Climate change and the urban heat island will play an important role in the relative change of future degradation. Frost damage will become less important, while certain forms of salt damage or biological growth could potentially occur more frequently.

**Kernwoorden:** monumentenzorg, natuursteen, klimaatverandering, luchtvervuiling, conservatie

## ***1. Inleiding***

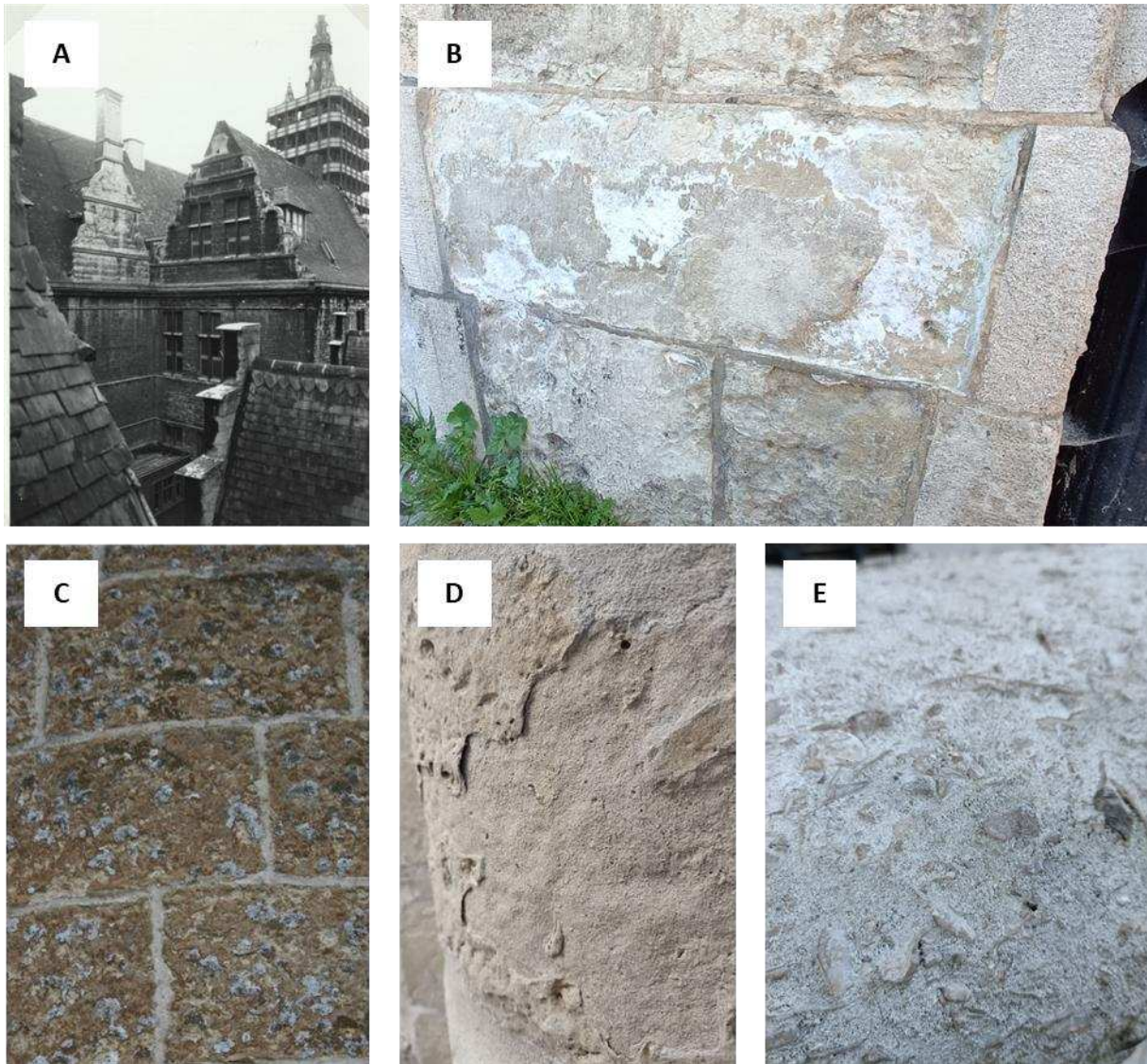
Monumenten uit natuursteen zijn gebouwd om de tijd te trotseren. Daarbij heeft natuursteen in de buitenschil naast een esthetische rol ook een belangrijke technische functie te vervullen, namelijk het weerstaan van de weersinvloeden en het beschermen van meer gevoelige elementen in het interieur. Maar steen noch gebouw zijn inert en ze vragen in verschillende mate onderhoud en herstel. Deze bijdrage bespreekt de oppervlaktegradatie van natuursteen en of we de komende decennia iets anders mogen verwachten dan wat de ervaring uit de voorbije decennia ons leert. De focus ligt op poreuze kalkstenen en zandstenen die belangrijk zijn in monumenten in Vlaanderen en

Nederland en relevant zijn voor grootstedelijke restauratie- en renovatieprojecten. Tegelijkertijd kan er voor veel van de besproken fenomenen een parallel getrokken worden naar baksteen. Oppervlaktegradatie wordt hier beschouwd als een verandering van de steeneigenschappen die zijn oorsprong vindt aan het oppervlak door de interactie tussen het materiaal en de omgeving, en die uiteindelijk leidt tot een afname van esthetische of functionele capaciteiten (ICOMOS International Scientific Committee for Stone, 2008). Zulke veranderingen kunnen het gevolg zijn van trage, incrementele processen (*slow onset events*), zoals ze meestal gepercipieerd worden door atmosferische invloeden (temperatuur, zonnestraling, relatieve luchtvochtigheid, (slag)regen en wind), maar even goed door plotse, catastrofale gebeurtenissen (*extreme events*), zoals brand. De focus van deze bijdrage ligt op algemene trends, en dus eerder op de incrementele processen. Natuurlijk is de grens tussen beiden eerder ambigu; overstromingen zijn catastrofale gebeurtenissen die zowel een structurele impact kunnen hebben, maar tegelijk ook een versterking kunnen betekenen van de incrementele processen, zoals zoutkristallisatie. Structurele schade aan gebouwcomponenten die zich mogelijks doorzetten op materiaalniveau worden hier niet specifiek behandeld, net zoals erg specifieke types van degradatie, zoals het innestelen van solitaire bijen die graafgangen kunnen maken in zachte gesteentes. Verder houden we ook oppervlaktebehandelingen grotendeels buiten beschouwing. Onder meer polychrome afwerking van beelden of muurvlakken kwam aan bod in de vorige editie van de Vlaams-Nederlandse natuursteendagen (7e Vlaams-Nederlandse Natuursteendagen, Pracht en Praal, 13-14 September 2021, Antwerpen).

## ***2. Degradatieprocessen***

Om te begrijpen of we in de toekomst andere vormen of intensiteiten van degradatie zullen zien, en welke consequenties dit heeft, worden eerst de meest genoemde degradatieprocessen zelf tegen het licht gehouden. Soms wordt het woord schade gebruikt, maar in wezen gaat het over degradatie. De gevoeligheid in deze semantiek is vooral van toepassing op culturele objecten in het Engelse taalgebruik, waarbij degradatie een fysische materiaalverandering beschrijft, en waar schade pas gebruikt wordt wanneer dit als ongewenst wordt beschouwd. Hier wordt vorstschade en zoutschade wel gebruikt ter beschrijving van het overeenkomstige degradatieproces.

De meest voorkomende vormen van oppervlaktegradatie zijn kostvorming, verkleuring, verpoedering (granulaire decohesie), biologische kolonisatie en verschillende vormen van laagvormige desintegratie zoals schilferen, exfoliatie en afspringen (Fig. 1). Er zijn enkele, onderliggend gelijke, schade-atlassen voor steenachtige materialen beschikbaar die helpen om de verschillende degradatieprocessen consequent te benoemen. De eerste is de meertalige (maar vooralsnog niet in het Nederlands) schadeatlas van ICOMOS (ICOMOS International Scientific Committee for Stone, 2008). Daarnaast is er ook een Nederlandstalige schadeatlas beschikbaar van MDCS, opgesteld door onderzoekers van ERM, Monumentenwacht, TU Delft en TNO (MDCS, 2023). Deze atlas illustreert naast de degradatie van natuursteen ook de degradatie van metselwerk, en benoemt verder ook de mogelijke oorzaken. De onderliggende oorzaken zijn de aanwezigheid van vocht, zouten, temperatuurverschillen, variaties in luchtkwaliteit en elke combinatie hiervan. De degradatieprocessen worden omschreven als vorstschade, zoutschade, chemische reactie, atmosferische vervuiling, biologische groei en thermische of hygrische (vochtgerelateerde) spanningen. Hieronder wordt het principe achter de meest belangrijke processen en hun mogelijke voorkomen nog eens toegelicht aan de hand van enkele kritische omgevingsparameters.



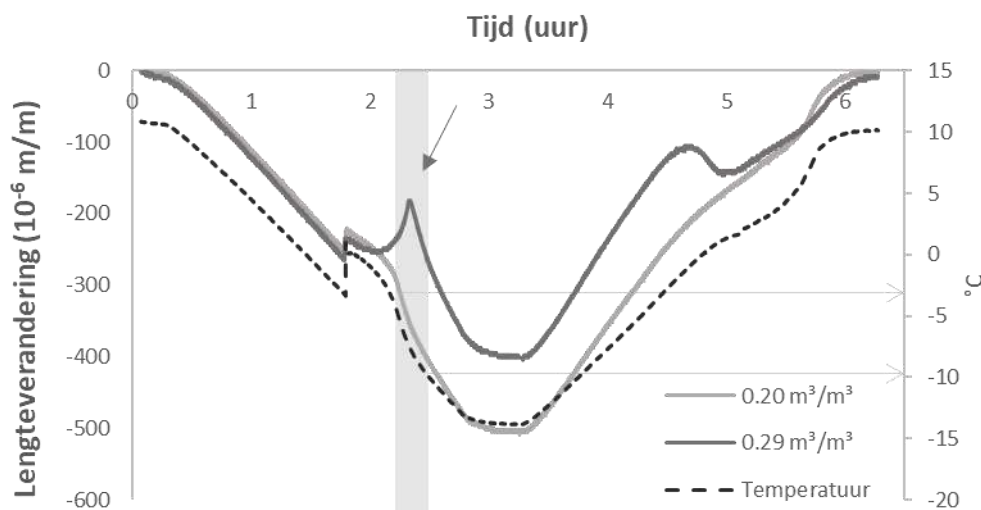
Figuur 1: Verschillende vormen van oppervlaktegradatie van kalksteen en zandige kalksteen. A) zwarte korsten op het Stadhuis van Gent, historische foto (digitale collectie Bibliotheek UGent). B) Schilferen, ten gevolge van dooizouten. C) Biologische kolonisatie onder de vorm van korstmossen. D) Exfoliatie van de buitenste laag, mogelijks ten gevolge van differentiële spanning na een niet-compatibele conserverende behandeling. E) Differentiële erosie ten gevolge van chemische reacties (karsteffect en mogelijk historische luchtvervuiling).

## 2.1 Vorstschade

Over vorstschade bestaan nog steeds verrassend veel misconcepties. Aan de basis van vorstschade ligt niet zozeer de volume-uitzetting wanneer water bevriest tot ijs. Wel van belang is de kristallisatiedruk die zo'n ijskristal kan weerstaan zonder te smelten, en die het aldus kan overbrengen op het gesteente (Scherer, 1999). De complexe thermodynamische theorie brengt een eenvoudige conclusie voort: hoe lager de temperatuur (onder nul), hoe groter de spanningen die zich kunnen ontwikkelen (Scherer & Valenza, 2005). Onder één voorwaarde natuurlijk, de aanwezigheid van vloeibaar water dat in de kleinste poriën ( $< 0,1 \mu\text{m}$ ) bevriest bij temperaturen die lager zijn dan  $0^\circ\text{C}$ . De opgebouwde spanning door vorst hangt dus voornamelijk af van het vochtgehalte en de temperatuur van de steen. Een grootschalig experiment, zij het met baksteen, toonde duidelijk aan

dat de intensiteit van de degradatie stijgt met stijgend vochtgehalte en dalende absolute minimumtemperaturen tijdens het vriezen (Wang et al., 2018).

Dit wordt geïllustreerd in Figuur 2, waarbij de lengteverandering ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) van een proefstuk Saint-Maximin (poreuze foraminiferenkalksteen) met verschillende waterverzadiging gemeten wordt tijdens een vorstcyclus. Een vochtgehalte van  $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$  komt overeen met 0,13 gew.% ofwel 50 % verzadiging van de porieruimte, terwijl een vochtgehalte van  $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^3$  overeenkomt met 0,18 gew.% ofwel 70 % verzadiging van de porieruimte. Het proefstuk gaat krimpen door afkoeling (zie 2.5 Differentiële spanningen). Bij een verzadiging van 70 % valt evenwel op dat er een extra uitzetting optreedt die afwijkt van het temperatuursverloop. Deze uitzetting is het gevolg van de kristallisatiedruk van het ijs dat zich nog kan vormen bij lagere temperaturen ( $< 0^\circ\text{C}$ ) omwille van het nog beschikbare water. Op deze manier kan een soort kritische verzadiging bepaald worden, en ook maximale temperaturen die nodig zijn om de kristallisatiespanning te onderhouden. Of deze condities daadwerkelijk voorkomen op de gebouwschil kan gecontroleerd worden door in-situ monitoring of meting, of het gebruik van hygrothermische modellen die het vochtgehalte en de temperatuur van gebouwcomponenten en/of materialen onder bepaalde grenswaarden (zoals klimaat, oriëntatie, enz.) modelleren.



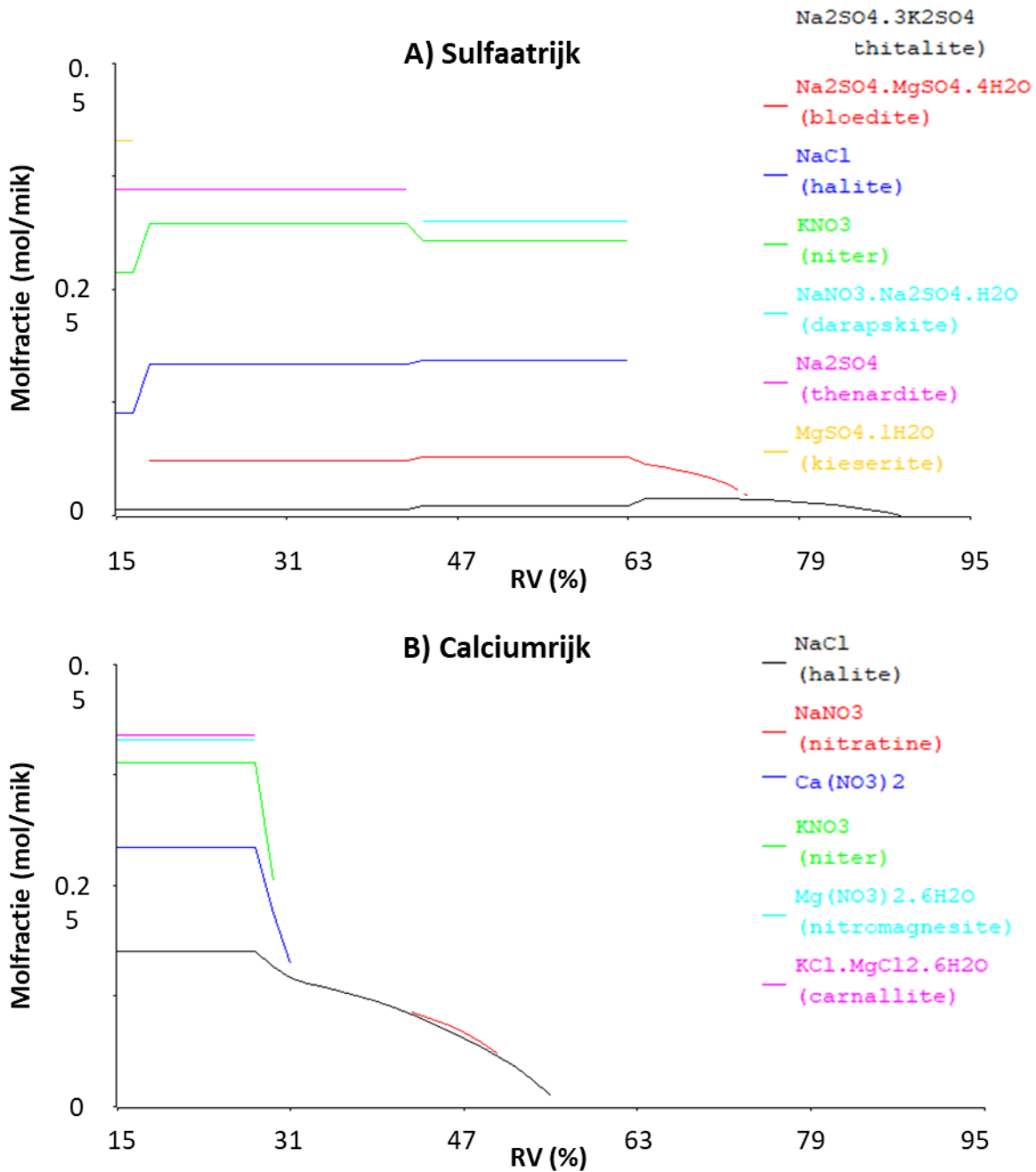
*Figuur 2: Lengteverandering (volle lijnen) en temperatuur (stippellijn) van Saint-Maximin natuursteen tijdens een vorstproef bij een waterverzadiging van  $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (0,13 gew.%) en  $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (0,18 gew.%). Lengteverandering zijn voornamelijk het gevolg van thermische expansie. Tijdens ijskristallisatie stijgt de temperatuur van het staal weer naar  $0^\circ\text{C}$  door de vrijgekomen latente warmte. Tijdens de verdere koeling treedt er een bijkomende piek op door spanningen ten gevolge van ijskristallisatie in het staal met de hoogste verzadiging.*

## 2.2 Zoutschade

Ook oppervlaktegradatie door zouten is het gevolg van kristallisatiedruk, al kunnen er ook esthetische gevolgen zijn, namelijk vochtvlekken, omwille van het hygroscopische gedrag (het aantrekken van vocht uit de lucht) van sommige zouten. Hier is de intensiteit van de spanning voornamelijk afhankelijk van het moleculair volume (en dus het type zout) en de oververzadiging van

de zoutoplossing die zich in het gesteente bevindt. Zouten gaan zich na verloop van tijd accumuleren nabij het (verdampings)oppervlak. De schade is sterk afhankelijk van het type zout en de weerstand van het gesteente. Toch wordt over het algemeen aangenomen dat > 1 gew.% aan zout een richtwaarde is voor mogelijke schade, al is dit sterk afhankelijk van het type zout en de weerstand van het gesteente. Het oplossen en uitkristalliseren van zouten en zoutmengsels hangt af van het vochtgehalte en/of de lokale luchtvochtigheid en is iets wat thermodynamisch kan gemodelleerd worden. Hoe vaak dit gebeurt is dus sterk afhankelijk van de omgevingscondities, en dus kan ook hier het risico ingeschat worden door het begrijpen van de omgevingscondities van elk mogelijk zoutmengsel. In wetenschappelijk onderzoek werden tot voor kort voornamelijk enkele vaak voorkomende enkelvoudige zouten beschouwd. In casestudies werd dan weer gebruik gemaakt van thermodynamische modellen zoals die van het ECOS-Runsalt programma (Bionda, 2005; Price, 2000). Recente analyse van > 10.000 stalen die in de laatste decennia verzameld zijn door het KIK-IRPA toont aan dat de meeste zoutmengsels terug te brengen zijn tot enkele referentie-zoutmengsels met hun specifieke eigenschappen. Daarbij worden twee basismengsels onderscheiden: één minder hygroscopisch mengsel ten opzichte van een equimolaire calcium en sulfaat verhouding (beschouwd als gips) (Fig. 3A) en één sterk hygroscopisch mengsel dat calcium-rijk is ten opzichte van een equimolaire calcium en sulfaat verhouding (Fig. 3B) (Godts et al., in review). Het merendeel van de zoutmengsels die in onze grootstedelijke monumenten gevonden worden sluit qua gedrag aan bij één van deze twee. Bij 20°C vertoont het minder hygroscopische mengsel oplossing/kristallisatiecycli bij relatieve luchtvochtigheden tussen 60 en 75 %. Ter vergelijking, voor een enkelvoudig zout als NaCl is dit bijvoorbeeld rond 75 % relatieve luchtvochtigheid. Wanneer de luchtvochtigheid hier boven en onder schommelt, kunnen er dus kristallisatiecycli optreden met schade tot gevolg. Bij het hygroscopische mengsel gebeurt dit voornamelijk bij luchtvochtigheden << 60 %. Gezien dit vrij laag is, zal dit soort mengsel over het algemeen dus minder kristallisatiecycli, en minder schade vertonen, maar meer aanleiding geven tot vochtvlekken. Bij Op basis van deze inzichten kunnen grote trends in zoutschade representatiever bestudeerd worden dan enkel met enkelvoudige zouten.





Figuur 3: Thermodynamisch kristallisatiemodel van twee referentie-zoutmengsels. A) Minder hygroscopisch mengsel (sulfaatrijk) waarbij de kristallisatie optreedt bij  $RV > 60\%$ . B) Meer hygroscopisch mengsel (calciumrijk) waarbij kristallisatie optreedt bij  $RV < 60\%$ .

### 2.3 Chemische reacties en atmosferische vervuiling

Terwijl degradatie door ijs- en zoutkristallisatie hier als fysische processen afzonderlijk besproken worden, brengen we voor het gemak chemische omzettingen onder dezelfde noemer. Het zijn voornamelijk kalkstenen of zandstenen met een carbonaatcement (en kalkmortels) die hiervoor gevoelig zijn. Over het algemeen worden drie afzonderlijke effecten beschouwd: (i) karst, (ii) zure regen en (iii) droge afzetting van atmosferische gassen (Bonazza *et al.*, 2009). Karst is een fenomeen waarbij kalkstenen en -mortels geleidelijk oplossen, wetende dat de pH van regenwater in evenwicht

met atmosferische CO<sub>2</sub> licht zuur is (pH 5,8). Op geologische tijdschaal geeft dit aanleiding tot karstverschijnselen zoals lapiaz. In de gebouwde omgeving uit zich dit als differentiële erosie. De grootteorde wordt over het algemeen geschat op 10 µm erosie per jaar; 1 mm per 100 jaar dus. Het is een eerder traag proces dat op erg lange termijn wel relevant kan zijn. Het zal bovendien toenemen wanneer het CO<sub>2</sub> gehalte van de atmosfeer verder blijft stijgen, maar het is momenteel eerder ondergeschikt aan de overige processen die hier besproken worden.

Belangrijker is de reactie van kalkstenen met een verzuurde atmosfeer die het gevolg is van zwavel- en stikstofuitstoot. Vooral zwaveluitstoot heeft in het verre en recente verleden een erg grote invloed gehad op het patrimonium. Partikels van zwaveldioxide komen voornamelijk in de atmosfeer door het verbranden van fossiele brandstoffen, en vooral steenkool. Het wordt nu met name gelinkt aan industrie, maar kwam vroeger dus gewoon voort uit het verwarmen van de gebouwen. De partikels zwaveldioxide kunnen zich afzetten op het gesteenteoppervlak (droge afzetting of *dry deposition*) waar ze in combinatie met water reageren tot zwavelzuur. Deze reactie kan ook plaatsvinden in de atmosfeer, dan ontstaat het fenomeen dat omschreven wordt als zure regen die ook rechtstreeks met de gebouwschil in contact kan komen (natte afzetting of *wet deposition*). Het gevolg is dat calciet via oplossing-precipitatiereacties wordt omgezet in gips, een beperkt oplosbaar zout. Terwijl de oplossing enkele millimeter tot centimeter diep in de steen kan plaatsvinden, kristalliseert het gips voornamelijk aan de buitenzijde. Hierdoor ontstaat een gipskorst met daaronder een lokaal verzwakte steen. Deze gipskorsten incorporeren fijnstofdeeltjes waardoor ze zwart kleuren en ook wel bekend staan als zwarte korsten (*black crust*). De zwarte kleur hangt sterk samen met het voorkomen van elementair koolstof, en dus het type luchtvervuiling.

Fijn stof (PM<sub>x</sub>, voor *particulate matter*) wordt gedefinieerd op basis van grootte, waarbij het suffix staat voor de maximale equivalente diameter in micrometer. Zo wordt het gegroepeerd in PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub> en PM<sub>10</sub>. De fijnstofdeeltjes bevatten onder meer primaire deeltjes als elementair koolstof en condensaten van uitgestoten gassen waaronder organische stoffen, nitraat en ammonium. Elementaire koolstof en organische koolstoffen komen onder meer voort uit de verbranding van fossiele brandstoffen in verbrandingsmotoren, waarbij elementair koolstof alsook NO<sub>x</sub> (de precursor van onder meer nitraten) voornamelijk gelinkt zijn aan dieselmotoren, terwijl de uitstoot van andere organische stoffen relatief hoger is bij benzinemotoren maar ook de verbranding van hout of steenkool. Ze hebben door hun afzetting een directe en indirecte invloed op de kleur van alle gesteentes, niet enkel de kalkstenen. Tot op heden worden ze vooral gelinkt aan een donkere verkleuring (*soiling*), al dan niet in een gipskorst.

## 2.4 Biologische groei

Biologische kolonisatie omvat een breed spectrum van de groei van biofilms tot kolonisatie van lichens, mossen en hogere planten. De groei van biofilms gaat gepaard met esthetische effecten zoals zwartverkleuring of groenverkleuring, en kan bovendien een impact hebben op de waterhuishouding. Er is een vertraagde waterabsorptie van het oppervlak, maar tevens een hogere retentie van het opgenomen water (Schröer et al. 2020). Of dit dan voornamelijk positieve of negatieve gevolgen heeft voor secundaire effecten (zoals vorst- of zoutschade) is nog een onderwerp van discussie; er wordt zowel gesproken over biodegradatie als biobescherming (*bioprotection*). Vooral de esthetische impact is groot en vaak een bezorgdheid. Hogere planten kunnen dan weer voor structurele schade zorgen. Al worden ze tegenwoordig ook gecontroleerd ingezet in de



preventieve bescherming van onder meer ruïnes volgens het romantische beeld. Dit concept wordt *soft capping* genoemd.

Algemeen wordt aangenomen dat zachtere klimaten met veel neerslag biologische groei beter faciliteert, al is de relatie niet altijd even rechtlijnig (Cutler *et al.*, 2013). De groei van biomassa op monumentale gebouwen is empirisch gemodelleerd door staalname in de buurt van verschillende Europese weerstations waarvoor de jaarlijkse gemiddelde neerslag (mm) en jaarlijkse gemiddelde temperatuur (°C) beschikbaar was. Het resultaat was dat de hoeveelheid biomassa exponentieel toeneemt met stijgende neerslaghoeveelheden, en lichtjes daalt met de gemiddelde temperatuur (Gómez-Bolea *et al.*, 2012). Daarnaast kan ook de hoeveelheid nutriënten een impact hebben op de groei van biomassa. Dit is niet onafhankelijk met luchtvervuiling, zo is er vaak een sterke groei aan biomassa te zien in landelijke monumenten waar -door landbouw en veeteelt- nutriënten als nitraten, ammonium en andere organische verbindingen aanwezig zijn.

## 2.5 Differentiële spanningen

Gesteentes kunnen uitzetten bij opwarming door expansie van de individuele mineralen, en door het opnemen van water in hun poriën omdat de capillaire spanning afneemt (Ruedrich *et al.*, 2011). Daardoor zijn ze onderhevig aan zwel of krimp tijdens veranderingen van temperatuur en vochtgehalte. Sommige kleimineralen versterken zwel en krimp door water, maar dit komt vooral voor in specifieke gesteentetypes die in Vlaanderen of Nederland niet gebruikt zijn (Wangler and Scherer 2008). Differentiële spanningen zijn voornamelijk van belang als er een gradiënt aanwezig is, namelijk een sterk verschil in temperatuur of vochtgehalte binnen dezelfde steen. Wanneer de oppervlakte door opwarming of wateropname wil uitzetten ten opzichte van de diepte van de steen, wordt deze belemmerd en komt die onder druk te staan (Demoulin *et al.*, 2016). Omgekeerd, wanneer de oppervlakte door uitdroging of afkoeling wil krimpen ten opzichte van de diepte van de steen, dan komt deze onder trekspanning te staan. Het kan belangrijk zijn wanneer de buitenschil, bijvoorbeeld door korstvorming, al sterk verzwakt is en zich anders gedraagt of wanneer er bijvoorbeeld een niet-compatibele herstellmortel of een niet-compatibele behandeling is aangebracht. Het relatieve belang is echter niet goed gekend en het wordt mogelijk onderschat. Al is het onder meer aangetoond dat het effect speelt in de degradatie van de kleilagen die soms voorkomen in Doornikse steen (Fontaine *et al.*, 2015).

Thermische spanningen manifesteren zich heel sterk in marmer, en zeker in dunne marmerplaten. Calciet zet bij opwarming immers uit in twee kristallografische richtingen, maar het krimpt in de derde richting. Stress gerelateerd aan thermische expansie resulteert hierdoor in microscheuren ter hoogte van de mineraalcontacten (Siegesmund *et al.*, 2000). Op die manier verhoogt ook de porositeit en de gevoeligheid voor andere verwerking. Het resultaat is dat marmerplaten gaan buigen en dat marmeroppervlakken kunnen versuikeren.

## 3. De complexiteit van degradatie

### 3.1 Het geheugen van een steen

Het is niet noodzakelijk zo dat de vormen van oppervlaktegradatie die we vandaag zien ook het gevolg zijn van processen die vandaag overheersen. Ze zijn veelal de getuige van verschillende en vaak veranderende processen doorheen de tijd. Bovendien zijn de omgevingscondities doorheen de

geschiedenis van monumenten niet altijd constant geweest; zo kunnen er koudere of nattere perioden geweest zijn, perioden met hogere luchtvervuiling en bovendien ook extreme gebeurtenissen zoals een brand, of zelfs -al dan niet gepaste- conserverende behandeling (McCabe *et al.*, 2010). Het is ook niet altijd duidelijk welke processen elkaar versterken of verzwakken. Algemeen kan aangenomen worden dat gedegreerde oppervlakken verzwakt zijn en dus minder resistent voor verdere degradatie, al is dit proces niet lineair. Korstvorming kan bijvoorbeeld initieel een remmend effect hebben op de degradatie, tot een kritiek punt bereikt wordt.

De grote uitdaging bij de studie van oppervlaktegradatie zit in het complexe samenspel van verschillende processen en het incrementele effect ervan. Het blijft dan ook vaak moeilijk om te achterhalen welke processen overheersen. Een afschalend oppervlak van Ledesteen zonder zwarte korst zal misschien doen denken aan vorstschade, maar is dit wel het geval? Misschien is dit een aanslepend gevolg van korstvorming, of is net door vroegere korstvorming het huidige oppervlak gevoeliger voor vorstschade? Het valt enkel met zekerheid te zeggen wanneer het proces of hun producten door in-situ metingen of staalname wordt geobserveerd. Gips is een duidelijke indicator voor korstvorming, zwartverkleuring voor atmosferische vervuiling of voor biologische groei (cyanobacteriën), beiden vragen verdere microscopische analyse. Zouten kunnen bepaald worden met chemische technieken of kwalitatieve benaderingen. Differentiële spanningen en vorstschade zijn moeilijker te analyseren, en vandaar waarschijnlijk het hypothetische gehalte, op extreme situaties na. Maar aangezien de kritische omgevingscondities gekend zijn uit de degradatieprocessen, valt er een degelijk woord te zeggen over de mogelijke evolutie.

### 3.2 Indices

Uit de beknopte beschouwing van de degradatieprocessen blijkt dat voornamelijk variaties in vochtgehalte en temperatuur twee drijvende krachten zijn, in combinatie met luchtvervuiling. Ze beïnvloeden rechtstreeks het risico op vorstschade, de migratie en kristallisatiecycli van zouten, chemische reacties, vervuiling en andere differentiële spanningen. De vraag is hoe afhankelijk van kleine veranderingen de processen zijn. Het inschatten van absolute degradatiesnelheid of intensiteit is echter moeilijk, en daarom wordt degradatie voornamelijk benaderd door een inschatting van het risico. Dit houdt geen rekening met de sterkte of de gevoeligheid van de afzonderlijke materialen, maar wel met het waarschijnlijke voorkomen en de intensiteit van de kritische omgevingsparameters. Dit wordt vaak benaderd met klimaatgebaseerde indices. In sommige gevallen, waarbij gesteente-eigenschappen veralgemeend kunnen worden, geen rol spelen of wanneer ze gekend zijn, kunnen deze indices wel gebaseerd zijn op de omgevingsrespons van het materiaal (*dose-response*). Dat is bijvoorbeeld het geval voor de vaak gebruikte Lipfert functie om de erosie van kalkstenen te modelleren (Lipfert 1989).

*The Atlas of Climate Change Impact on European Cultural Heritage* (Sabbioni *et al.*, 2010) is tot op heden waarschijnlijk het meest omvattende werk dat gebruik maakt van klimaat-gebaseerde en omgevingsrespons-gebaseerde indices ter evaluatie van de oppervlaktegradatie, ook al is het inmiddels bijna 15 jaar oud. Dit werk beschouwt algemene trends in oppervlaktegradatie voor de nabije (2021-2050) en verre (2071-2100) toekomst op basis van klimaatprojecties (Hadley Model HadCM3). Ondanks de generalisatie biedt het een uniek perspectief op de te verwachten veranderingen over heel Europa, en dus ook België en Nederland. Het was een eerste generieke aanzet, die later op kleinere schaal gevolgd is door een meer gedetailleerde benadering van het degradatieproces, nieuwere klimaatmodellen of gewoon een hogere resolutie. Desondanks stammen

de meeste tot op heden gebruikte indices nog steeds uit het eerste decennium van de 21<sup>e</sup> eeuw, zo blijkt ook uit een recent overzicht (Bonazza & Sardella, 2023). Tegenwoordig lijkt meer aandacht te gaan naar een algemene risicobenadering voor erfgoed, terwijl men voor materiaaldegradatie erg vaak vasthoudt aan bestaande concepten. Op het moment van dit schrijven loopt er een gezamenlijk onderzoeksproject van Belspo aan UAntwerpen, UGent, KIK-IRPA en KMI, waarin onderzoek gedaan wordt naar de impact van klimaatsverandering op oppervlaktegradatie, op de schaal van België en met de meest recente klimatologische inzichten en ensembles van klimaatprojecties (Climpacth – Climate Impact on Built Heritage), met als doel de impact van klimaatsverandering op de degradatieprocessen op de schaal van

#### **4. Veranderingen in degradatieprocessen**

Oppervlaktegradatie van natuursteen is van alle tijden, zo getuige meerdere geschreven verslagen. In een vertaling van Vitruvius' *De Architectura* (2:VII:2) staat te lezen dat 'alle zachte soorten het voordeel [hebben] dat de blokken, als zij zijn ontgonnen, voor de bouw gemakkelijk te bewerken zijn, en past men ze aan beschutte plaatsen toe, dan houden zij wat zij te weerstaan hebben uit, maar bezigt men ze aan onbeschutte open plekken, dan verbrokkelen en verweren zij onder den invloed van vorst en rijp'. De vraag is hoe sterk die kan veranderen.

##### **4.1 Het recente verleden**

Aangezien een verschillende degradatievormen kunnen accumuleren op een gesteenteoppervlak, kan dit als een archief beschouwd worden. De verschillende vormen van degradatie die we nu zien, geven ons dus een beeld op hun relatief belang in het verleden. Deze analyse kan conceptueel en beschrijvend zijn (McCabeet *al.*, 2010), maar even goed kan er gebruik gemaakt worden van historische geschreven en gemeten bronnen (Brimblecombe & Grossi 2009). Deze laatste maakte een reconstructie van vermoedelijke degradatie in Londen over het voorbije millennium. De hoofdconclusie was dat degradatie ten gevolge van atmosferische vervuiling, voornamelijk SO<sub>2</sub>, een erg belangrijke rol speelde vanaf de 19<sup>e</sup> eeuw tot diep in de 20<sup>e</sup> eeuw en met een hoogtepunt rond 1900. De vorming van zwarte korsten is één van de meest persistente degradatievormen die in de loop van de 20<sup>e</sup> eeuw te observeren viel, en waarvan de effecten soms nog te zien zijn. Historisch fotomateriaal uit het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw toont inderdaad pertinent een dikke zwarte vervuiling, de zwarte korsten, op onze monumenten in witsteen. Maar het ergste lijkt dus achter de rug. De zwaveluitstoot in Vlaanderen is tussen 2005-2021 gedaald met 84 % (Vlaamse Milieumaatschappij, 2023), terwijl deze voorheen al in een dalende lijn zat. Ondanks de soms hoge lokale uitstoot van andere luchtvervuiling, zoals NO<sub>2</sub> lijkt dit inderdaad te suggereren dat het belang van chemische reacties en vervuiling afneemt. Recente publicaties nuanceren dit echter en tonen aan dat lokaal nog steeds voor degradatie relevante concentraties van luchtvervuiling voorkomen, onder meer in industriële gebieden als Antwerpen en Amsterdam/IJmuiden, beiden met hun havenindustrie (Spezzano, 2021).

Wat we nu nog zien aan zwarte korsten en algemene vervuiling is dus voor een groot deel het geheugeneffect van de steen uit het verleden. Daaruit vallen zelfs evoluties in luchtvervuiling te distilleren. Het verweerde oppervlak geldt dan als archief voor het verleden. Als er een bepaalde tijdsperiode op hun vorming kan geplaatst worden, bijvoorbeeld Door de verplaatsing van

standbeelden met een korst, kunnen verschillende proxies gevonden worden voor de bron van de luchtvervuiling. Dit gaat onder meer om vliegias als indicator voor het gebruik van brandhout (Ausset *et al.*, 1998), tot het voorkomen van bepaalde zwavelisotopen (Vallet *et al.*, 2006) en loodisotopen kenmerkend voor de fossiele brandstof (Wilhelm *et al.*, 2020), toxische koolstofverbindingen (Lamhasni *et al.* 2019) en de verhoudingen tussen elementair koolstof en organisch koolstof (Bonazza *et al.*, 2007).

Gezien deze atmosferische vervuiling accumuleert op de historische oppervlakken, stijgt ook de concentratie ervan. En dit gaat soms over relevante concentraties van stoffen die gekende carcinogene of (neuro)toxische eigenschappen hebben, zoals polycyclische aromaten en lood. Een recente analyse van enkele zwarte korsten uit centrum Antwerpen (o.m. Begijnhof, Paardenmarkt, Onze-Lieve-Vrouwekathedraal) vertonen loodconcentraties van meer dan 200 tot meer dan 1000 mg kg<sup>-1</sup> (Fig. 4). Dit ligt in lijn, hetzij aan de hoge kant, met de te verwachten waardes (Farkas *et al.*, 2018). Wetende dat de interventiewaarde voor bodemsanering door loodverontreiniging in Nederland op 530 mg kg<sup>-1</sup> ligt (Otte *et al.*, 2015), roepen deze waardes toch enkele vragen op. De oorsprong van dat lood ligt voornamelijk in omgevingsuitstoot, bijvoorbeeld loodhoudende benzine maar ook het vroegere gebruik van steenkool voor verwarming. De waardes kunnen nog vele malen hoger zijn als er ook nog sporen van loodverf of nabije loden bouwmaterialen te vinden zijn.



Figuur 4: Links: het 19<sup>e</sup> eeuwse tempelgebouw (Campus Mutsaard, Antwerpen) in kalksteen, waaronder Avendersteen en pleisterwerk. De buitenkant is sterk vervuild. Rechts: SEM-BSE opname van een staal Avendersteen uit de gevel van het tempelgebouw met zwarte korst (witte pijl). ICP-OES analyse van de korst wijzen op 588 mg kg<sup>-1</sup> Pb.

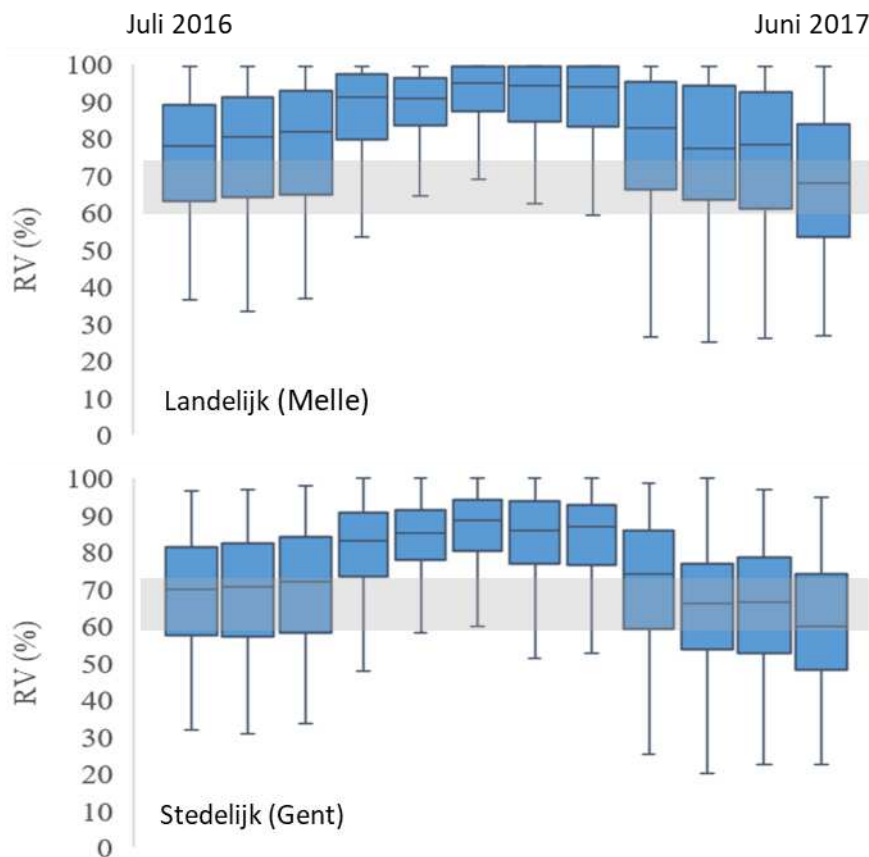
## 4.2 De nabije toekomst

De meest gedragen conclusie is dat chemische reactie en atmosferische vervuiling in belang zullen afnemen ten opzichte van degradatievormen gelinkt aan klimaatverandering (Brimblecombe & Grossi 2009). Desondanks kunnen de eerste twee lokaal nog een erg belangrijke rol blijven spelen, vooral in regio's rijk aan industrie en petrochemie (Spezzano, 2021). Over klimaatverandering zelf bestaan nog veel onzekerheden, enerzijds vanwege onzekere scenario's (het is onmogelijk om

toekomstige CO<sub>2</sub> uitstoot of sekwestratie te voorspellen), anderzijds vanwege onzekerheid op de modellen. Voor onze regio is de verwachte trend een stijging van gemiddelde temperatuur over alle seizoenen, terwijl de gemiddelde neerslaghoeveelheid op jaarbasis gelijkaardig blijft, maar mogelijks meer gespreid tussen natte (winter) en droge (zomer) seizoenen. Daarnaast speelt nog een tweede fenomeen, namelijk het stedelijke hitte-eiland. Hierdoor is het warmer (en de relatieve luchtvochtigheid lager) in de steden dan in de landelijke gebieden. Het zou bovendien ook regenpatronen wind afwaarts kunnen beïnvloeden. Het fenomeen is sterker in de zomer en tijdens onbewolkte nachten.

Beide fenomenen lijken alleszins een grote impact te hebben op mogelijke vorstschade in onze regio's. Volgens klimaatindices zou vorstschade er moeten afnemen door klimaatverandering (Grossi *et al.*, 2007; Vandemeulebroucke *et al.*, 2019). In meer noordelijke gebieden zou vorstschade kunnen toenemen, omdat er meer (natte) dagen zijn waarbij de temperatuur rond het vriespunt fluctueert, in plaats van zich er langere tijd onder te bevinden. Een analyse op basis van recente metingen in Gent (data MOCCA, [www.mocca.ugent.be](http://www.mocca.ugent.be)) toont aan dat het stedelijke hitte-eiland nu al kan zorgen voor het wegvallen van vorstcycli ten opzichte van landelijke gebieden in de omgeving (Guilbert *et al.*, 2019). Daar tegenover staan onze isolatie-inspanningen. Door binnenisolatie, wat vaak de voorkeur heeft bij erfgoed, wordt de buitenschil tijdens de winter kouder en dus ook natter. Dit verhoogt dan weer het risico op vorstschade (*et al.*, 2019). Vermoedelijk speelt dit meer bij vorstgevoelige materialen, zoals bepaalde baksteentypes, die voorheen goed geventileerd en mogelijk verwarmd waren. Het lijkt dus aannemelijk dat er in de komende 10 tot 20 jaar meer aandacht dient te zijn voor de vorstrisico's bij voornamelijk jong (< 150 jaar) erfgoed, terwijl het op middellange termijn in belang afneemt.

Zoutschade is mogelijks een ander verhaal. Veranderende neerslagpatronen (meer neerslag op kortere tijd) zouden kunnen zorgen voor meer regendoorslag of diepere penetratie, waardoor meer zouten kunnen gemobiliseerd worden. Of het risico op schade dan ook toeneemt, is afhankelijk van hoe de relatieve luchtvochtigheid tussen periodes van hevige regen gaat fluctueren rond de kristallisatie- en oplossingsdrempel. Dat is sterk afhankelijk van het zoutmengsel en de verwachte klimatologische trend, waardoor het in sommige situaties kan toenemen en in andere kan afnemen (Menéndez, 2018). In onze regio's lijkt zoutschade zich vooral te manifesteren in de lente en de zomer, met andere woorden de drogere periodes. Tijdens de nattere seizoenen bevindt de relatieve luchtvochtigheid zich buiten zich voornamelijk boven 80 % en vaak zelfs 90 %, waardoor er weinig tot geen kristallisatiecycli zullen optreden. Het is echter wel in deze periodes dat zouten gemobiliseerd kunnen worden. In de zomer lente en zomer daalt de relatieve luchtvochtigheid en zijn er sterke dagelijkse fluctuaties door het temperatuurverschil overdag (warmer en lagere luchtvochtigheid) en 's nachts (kouder en hogere luchtvochtigheid). Hierdoor zouden er verschillende kristallisatiecycli kunnen plaatsvinden. Het stedelijke hitte-eiland versterkt dit effect door een algemeen hogere temperatuur en dus gemiddeld lagere relatieve luchtvochtigheid, dicht bij de kristallisatiedrempel (Fig. 5). Een gelijkaardig effect valt te verwachten door klimaatopwarming. Het effect is het grootste voor de minder hygroscopische, sulfaatrijke mengsels. Al zou het zo kunnen zijn dat, net als door het stedelijke hitte-eiland de relatieve luchtvochtigheid bij momenten zo sterk daalt, dat ook de tot op heden minder schadelijke hygroscopische mengsels vaker aan kristallisatiecycli onderworpen worden. Het is momenteel nog moeilijk om algemene conclusies te trekken, maar een natter seizoen (mobilisatie van zouten) gevolgd door een droger seizoen (potentieel meer kristallisatiecycli) zou wel eens kunnen leiden tot een grotere kans op zoutschade.



Figuur 5: Spreiding van de maandelijkse RV in stedelijk gebied (Gent) en omliggend landelijk gebied (Melle) in de periode juni 2016-juli 2017 (data MOCCA, [www.mocca.ugent.be](http://www.mocca.ugent.be)). De grijze zone geeft de kristallisatiedrempel weer van veel voorkomende niet-hygroscopisch zoutmengsels (zie Fig. 2). De RV ligt gemiddeld lager in een stedelijke omgeving en valt daardoor meer in de grijze zone, waardoor er meer kristallisatiecycli verwacht kunnen worden.

Een natter seizoen zou ook kunnen leiden tot meer biologische groei, zoals bijvoorbeeld in Galicia (Spanje) vaak geobserveerd wordt. Lichens en hogere organismen hebben een meer constante aanwezigheid, maar biofilms (microbacteriën en algen) zouden in de nattere seizoenen wel eens sterker kunnen opflakkeren, met fluctuerende intensiteiten aan groene of zwarte verkleuring tot gevolg. Dit is al geobserveerd in andere gematigde regio's zoals Noord-Ierland (Smith *et al.*, 2011). Biologische groei zou tevens in de hand gewerkt kunnen worden door de toenemende aanwezigheid van nitraten en ammonium als nutriënten voor organismen. Sommige onderzoeken wijzen op de aanwezigheid van organisch residuen zoals oxalaten in de jongere lagen ten gevolge van afgenomen zwavelafzetting en toegenomen biologische groei. Hierdoor zouden de korsten en dus monumenten in de toekomst eerder een gelige dan een zwarte verkleuring kunnen krijgen (Alessandra Bonazza *et al.* 2007). Oxalaten zijn al regelmatig waargenomen in de gelere patina's (*scialbatura*) in Zuid-Europese landen als Italië (Monte & Sabbioni, 1987), al is er discussie of de oorsprong bacterieel of antropogeen (een historische behandeling) is. Anderzijds zorgen warmere en drogere periodes met ook meer zonnestraling (minder wolken) voor meer stress die de groei kan beperken. Het is erg moeilijk te voorspellen en er zijn geen sterke aanwijzingen in onze regio's. De evolutie van grafstenen of beeldhouwwerk in poreuze steen zoals Portland, zouden een interessante indicator kunnen zijn.



Tot slot zijn er differentiële spanningen, waarvan deze door vocht (capillaire spanning of kristallijne zwel) en temperatuur (thermische dilatatie) ook kunnen toenemen bij hogere extremen. In onze regio's zou dit effect evenwel beperkt zijn (Bonazza *et al.*, 2009), temeer omdat de meeste materialen hier weinig gevoelig voor lijken te zijn. De voornaamste uitzondering daarop is marmer en Doornikse steen met kleirijke lagen.

## **Conclusie**

Oppervlakedegradatie van natuursteen is een fenomeen van alle tijden. Wel kan de onderliggende oorzaak en dus ook de degradatievorm veranderen doorheen de tijd. Er wordt verwacht dat klimaatverandering een impact zal hebben, terwijl de impact van luchtvervuiling algemeen zal afnemen. De grootste verandering die hiermee gepaard gaat, is de afname van het fenomeen zwarte korsten, iets wat zich vandaag al doorzet. Er zijn beduidend minder zwarte korsten op onze monumenten dan te zien is op foto's van 100 jaar terug. Dat ligt deels aan de reiniging die vaak wordt toegepast. Het belang van reinigen zal in de nabije toekomst toenemen, zeker wanneer er ook extra aandacht komt voor de toxische stoffen die zich op een steenoppervlak kunnen bevinden. Het is dus van belang dat de uitvoerders van zo'n reiniging voldoende preventieve maatregelen nemen. Bij voorkeur komt het verwijderde materiaal ook niet in het milieu terecht.

Door de afname van luchtvervuiling en het inzetten op reinigen zullen steeds minder gebouwen zwart zien. De intrinsieke kleur of patina van de steen zal meer tot uiting komen. Vergroening door toegenomen biologische groei is een mogelijkheid, maar waarschijnlijk ook sterk gebonden aan de lokale effecten. Er wordt ook gesproken van een vergelijking ten gevolge van een toegenomen biologische activiteit en bijvoorbeeld de toename van oxalaten op een gevel. Andere vormen van vervuiling, zoals microplastics, zijn hier buiten beschouwing gelaten. Het is mogelijk dat er nieuwe zaken naar voor treden waarvan we de impact op heden niet kennen.

Granulaire desintegratie of vormen van laagvormige desintegratie zullen blijven voorkomen, al zal het effect voornamelijk afkomstig zijn van zouten en minder tot niet meer van vorst. Dat kan een invloed hebben op de manier waarop naar consolidatie gekeken wordt, gezien de aanwezigheid van zouten de effectiviteit van een behandeling sterk kan beïnvloeden.

Deze veranderingen moeten in context geplaatst worden; het zijn trends met een algemene basis. Lokale effecten, zoals de geometrie en dimensionaliteit van een gebouw en -componenten, het stedelijk weefsel en nabije industrie kunnen een belangrijke rol spelen in de oppervlakedegradatie. Bovendien zijn catastrofale gebeurtenissen moeilijk te voorspellen en kunnen ze een erg grote impact hebben, op lokale en regionale schaal. En tot slot hebben steeds meer stenen één of andere behandeling ondergaan. Het effect daarvan, zeker van de meest recente, zal pas in de toekomst echt duidelijk worden.

## **Referenties**

- Ausset, P, Bannery, F, Del Monte, M, Lefevre, R A, 1998. "Recording of Pre-Industrial Atmospheric Environment by Ancient Crusts on Stone Monuments." *Atmospheric Environment* 32 (16): 2859–63. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(98\)00063-6](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(98)00063-6).
- Bionda, D, 2005. "RUNSALT - A Graphical User Interface to the ECOS Thermodynamic Model for the Prediction of the Behaviour of Salt Mixtures under Changing Climate Conditions." [Http://Science.Sdf-Eu.Org/Runsalt/](http://Science.Sdf-Eu.Org/Runsalt/). 2005.



- Bonazza, A, Sabbioni, C, Messina, P, Guaraldi, C, De Nuntiis, P, 2009. "Climate Change Impact: Mapping Thermal Stress on Carrara Marble in Europe." *Science of The Total Environment* 407 (15): 4506–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.04.008>.
- Bonazza, A, Brimblecombe, P, Grossi, C M, Sabbioni, C, 2007. "Carbon in Black Crusts from the Tower of London." *Environmental Science & Technology* 41 (12): 4199–4204. <https://doi.org/10.1021/es062417w>.
- Bonazza, A, Messina, P, Sabbioni, C, Grossi, C M, Brimblecombe, P, 2009. "Mapping the Impact of Climate Change on Surface Recession of Carbonate Buildings in Europe." *Science of The Total Environment* 407 (6): 2039–50. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.067>.
- Bonazza, A, Sardella, A, 2023. *Climate Change and Cultural Heritage: Methods and Approaches for Damage and Risk Assessment Addressed to a Practical Application*. *Heritage* 2023, 6, 3578–3589. <https://doi.org/10.3390/heritage6040190>
- Brimblecombe, P, Grossi, C M, 2009. "Millennium-Long Damage to Building Materials in London." *Science of The Total Environment* 407 (4): 1354–61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.037>.
- Cutler, N A, Viles, H, Ahmad, S, McCabe, S, Smith, B J, 2013. "Algal 'Greening' and the Conservation of Stone Heritage Structures." *Science of The Total Environment* 442 (January): 152–64. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.050>.
- Del Monte, M, Sabbioni, C, 1987. "A Study of the Patina Called 'Scialbatura' on Imperial Roman Marbles." *Studies in Conservation* 32 (3): 114. <https://doi.org/10.2307/1506215>.
- Demoulin, T, Girardet, F, Wangler, T P, Scherer, G W, Flatt, R., 2016. "On-Site Monitoring for Better Selection of Stone Repairs: A Case Study." *Heritage Science* 4 (1): 38. <https://doi.org/10.1186/s40494-016-0108-z>.
- Farkas, O, Siegesmund, S, Licha, T, Török, A, 2018. "Geochemical and Mineralogical Composition of Black Weathering Crusts on Limestones from Seven Different European Countries." *Environmental Earth Sciences* 77 (5): 211. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7384-8>.
- Feng, C, Roels, S, Janssen, H, 2019. "Towards a More Representative Assessment of Frost Damage to Porous Building Materials." *Building and Environment* 164 (October): 106343. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106343>.
- Fontaine, L, Hendrickx, R, De Clercq, H, 2015. "Deterioration Mechanisms of the Compact Clay-Bearing Limestone of Tournai Used in the Romanesque Portals of the Tournai Cathedral (Belgium)." *Environmental Earth Sciences* 74 (4): 3207–21. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4358-y>.
- Godts, S, Orr, S A, Steiger, M, Stahlbuhk, A, De Kock, T, Desarnaud, J, De Clercq, H, Cnudde, V, In review. "Salt Mixtures in Stone Weathering." *Scientific Reports*.
- Gómez-Bolea, A, Llop, E, Ariño, X, Saiz-Jimenez, C, Bonazza, A, Messina, P, Sabbioni, C, 2012. "Mapping the Impact of Climate Change on Biomass Accumulation on Stone." *Journal of Cultural Heritage* 13 (3): 254–58. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.10.003>.
- 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): 273–81. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.014>.
- Guilbert, D, Caluwaerts, S, Calle, K, Van Den Bossche, N, Cnudde, V, De Kock, T, 2019. "Impact of the Urban Heat Island on Freeze-Thaw Risk of Natural Stone in the Built Environment, a Case Study in Ghent, Belgium." *Science of The Total Environment* 677 (August): 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.344>.

- ICOMOS International Scientific Committee for Stone, 2008. ICOMOS ISCS: Illustrated glossary on stone deterioration patterns. 86 pp.
- Lamhasni, T, El-Marjaoui, H, El Bakkali, A, Ait Lyazidi, S, Haddad, M, Ben-Ncer, A, Benyaich, F, Bonazza, A, Tahri, M, 2019. "Air Pollution Impact on Architectural Heritage of Morocco: Combination of Synchronous Fluorescence and ATR-FTIR Spectroscopies for the Analyses of Black Crusts Deposits." *Chemosphere* 225 (June): 517–23.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.109>.
- Lipfert, F W, 1989. "Atmospheric Damage to Calcareous Stones: Comparison and Reconciliation of Recent Experimental Findings." *Atmospheric Environment* (1967) 23 (2): 415–29.  
[https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90587-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90587-8).
- McCabe, S, Smith, B J, Warke, P A , 2010. "A Legacy of Mistreatment: Conceptualizing the Decay of Medieval Sandstones in NE Ireland." Edited by R Prikryl and Á Török. Geological Society, London, Special Publications 333 (1): 87–100. <https://doi.org/10.1144/SP333.9>.
- MDCS, 2023. Damage Atlas. <https://mdcs.monumentenkenis.nl/damageatlas/4/material#overview>. Geraardpleegd op 29/07/2023.
- Menéndez, B, 2018. "Estimators of the Impact of Climate Change in Salt Weathering of Cultural Heritage." *Geosciences* 8 (11): 401. <https://doi.org/10.3390/geosciences8110401>.
- Otte, P F, Bakker, M A, Lijzen, J P A , Versluijs, C W , Zeilmaken, M J, 2015. "Diffuse Loodverontreiniging in de Bodem." Bilthoven.
- Price, C, 2000. "An Expert Chemical Model for Determining the Environmental Conditions Needed to Prevent Salt Damage in Porous Media."
- Ruedrich, J, Bartelsen, T, Dohrmann, R, Siegesmund, S, 2011. "Moisture Expansion as a Deterioration Factor for Sandstone Used in Buildings." *Environmental Earth Sciences* 63 (7–8): 1545–64.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-010-0767-0>.
- Sabbioni, C, Brimblecombe, P, Cassar, M, 2010. *The Atlas of Climate Change Impact on European Cultural Heritage. Scientific Analysis and Management Strategies*. Anthem Press.
- Scherer, G W, 1999. "Crystallization in Pores." *Cement and Concrete Research* 29 (8): 1347–58.  
[https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00002-2).
- Scherer, G W, Valenza, J J 2005. "Mechanisms of Frost Damage." *Materials Science of Concrete VII*: 209–46.
- Schröer, L, De Kock, T, Cnudde, V, Boon, N, 2020. "Differential Colonization of Microbial Communities Inhabiting Lede Stone in the Urban and Rural Environment." *Science of The Total Environment* 733 (September): 139339. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139339>.
- Siegesmund, S, Ullemeyer, K, Weiss, T, Tschegg, E K, 2000. "Physical Weathering of Marbles Caused by Anisotropic Thermal Expansion." *International Journal of Earth Sciences* 89 (1): 170–82.  
<https://doi.org/10.1007/s005310050324>.
- Smith, B J, McCabe, DS, McAllister, D, Adamson, C, Viles, H, Curran, J M, 2011. "A Commentary on Climate Change, Stone Decay Dynamics and the 'Greening' of Natural Stone Buildings: New Perspectives on 'Deep Wetting.'" *Environmental Earth Sciences* 63 (7–8): 1691–1700.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-010-0766-1>.
- Spezzano, P, 2021. "Mapping the Susceptibility of UNESCO World Cultural Heritage Sites in Europe to Ambient (Outdoor) Air Pollution." *Science of The Total Environment* 754 (February): 142345.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142345>.
- Vallet, J M, Gosselin, C, Bromblet, P, Rolland, O, Vergès-Belmin, V, Kloppmann, W, 2006. "Origin of Salts in Stone Monument Degradation Using Sulphur and Oxygen Isotopes: First Results of the

- Bourges Cathedral (France)." *Journal of Geochemical Exploration* 88: 358–62.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.075>.
- 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, 1032-1042. <https://doi.org/10.1139/cjce-2018-0594>.
- Vlaamse Milieumaatschappij, 2023. Uitstoot zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>). <https://www.vmm.be/lucht/meer-polluenten/uitstoot-zwaveldioxide>. Geraardpleegd op 27/07/2023.
- Wang, F, Gao, J, Zha, Y, 2018. "Hyperspectral Sensing of Heavy Metals in Soil and Vegetation: Feasibility and Challenges." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 136 (February): 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.12.003>.
- Wangler, T, Scherer, G W, 2008. "Clay Swelling Mechanism in Clay-Bearing Sandstones." *Environmental Geology* 56 (3–4): 529–34. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1380-3>.
- Wilhelm, K, Longman, J, Orr, S A, Viles, H, 2020. "Stone-Built Heritage as a Proxy Archive for Long-Term Historical Air Quality: A Study of Weathering Crusts on Three Generations of Stone Sculptures on Broad Street, Oxford." *Science of The Total Environment*, December, 143916. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143916>.