

# Samenvatting

Bouwkundig erfgoed wordt geconfronteerd met aanzienlijke uitdagingen in een snel veranderende maatschappij en een veranderend klimaat. Zouten zijn gekend als één van de belangrijkste oorzaken bij de verwerking van stenen, desondanks werden zoutmengsels onvoldoende onderzocht en blijven belangrijke vragen onbeantwoord. De ionenconcentraties in poreuze materialen komen uit grondwater, regenwater, atmosferische, biologische of verontreinigingen in het materiaal zelf. Na verloop van tijd worden deze ionen getransporteerd naar het oppervlak en afgezet aan het drogingsfront, waar ze kunnen kristalliseren onder verschillende vaste vormen met een toenemend volume en bijbehorende druk op de omgeving. Cycli van kristallisatie en oplossing, en (de)hydratatie kunnen leiden tot deterioratie van materialen. Daarnaast spelen zoutmengsels een belangrijke rol in exogene processen in geomorfologie, planetair onderzoek en industriële processen. Desondanks richten de meeste studies zich op binaire systemen. Dit proefschrift onderzoekt representatieve mengsels van ionen die vaak worden geïdentificeerd in verweerde steenachtige materialen. Hierbij zijn natrium ( $\text{Na}^+$ ), kalium ( $\text{K}^+$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), chloride ( $\text{Cl}^-$ ), nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ), en sulfaat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de belangrijkste ionen. Deze werden geanalyseerd in 11.412 boormonsters genomen in 338 historische sites met bouwmaterialen die zoutschade vertonen. Op basis van deze dataset kon het equilibrium van ionengegevens accurater worden berekend en dit om het zoutgehalte correcter te kunnen identificeren en het gedrag van gangbare zoutmengsels verdergaand te kunnen onderzoeken met modellering en experimentele verificatie.

Eén van de belangrijkste uitdagingen bij de analyse van ionenmengsels is de interpretatie van de afgeleide ionenbalans. Analytische onzekerheden en niet gedetecteerde ionen resulteren in een onevenwicht tussen anionen en kationen, waarvoor correcties noodzakelijk zijn om elektrische neutraliteit te bereiken en een wetenschappelijk gefundeerde evaluatie te kunnen maken. In het kader van dit proefschrift werden methodologische verbeteringen in de berekeningen van de ionenbalans uitgewerkt, wat een nauwkeurigere interpretatie van de aanwezige zoutmengsels mogelijk maakt. De volledige dataset en de geoptimaliseerde berekeningsmethode voor de ladingbalans werden open-source beschikbaar gesteld om betrokkenheid van de wetenschappelijke wereld te bevorderen. Verder werden er op basis van de dataset, gangbare mengselsamenstellingen geïdentificeerd, die inzicht geven in de ionen die het mengselgedrag kunnen beïnvloeden. De gecorrigeerde ionengegevens kunnen ook worden gebruikt als input voor thermodynamische modellering. Dit biedt inzichten in het gebruik van het ECOS/Runsalt-model, een programma voor het analyseren van het kristallisatie- en oplossingsgedrag van zoutmengsels onder verschillende klimatologische omstandigheden. Het gebruik van specifieke terminologie werd aanbevolen; hoe het model te gebruiken en de output te interpreteren werd beschreven, met nadruk op de beperkingen van het model waarvoor oplossingen werden geboden.

Met dit onderzoek werden eveneens veelvoorkomende zoutmengsels in het Belgische bouwkundig erfgoed geïdentificeerd, waardoor inzicht in hun gedrag en bijgevolg hun aandeel in materiaalverlies werd vergroot. De resultaten toonden aan dat 92% van de monsters minstens vijf ionen bevatten, waaronder natrium, kalium, nitraat, chloride, en calcium of sulfaat, al dan niet inclusief magnesium. Verder werden 14 veel voorkomende zouten geïdentificeerd en vier vaak voorkomende zoutmengsels. Hun kritische relatieve vochtigheidswaarden voor kristallisatie/oplossing werden vastgesteld, wat belangrijke informatie oplevert voor experimenteel onderzoek naar steenverwerking en voor het begrijpen van modellerings- en zoutverwerkingsprocessen onder veranderende klimatologische omstandigheden. Daarnaast werd aangetoond dat innovatieve gecombineerde analysetechnieken waaronder het gebruik van omgevingsscanning-elektronenmicroscopie (ESEM), dynamische

dampabsorptie (DVS), Raman-spectroscopie, röntgendiffractie (XRD) en timelapse-micrografieën een gedetailleerde analyse van de kristallisatiekinetiek van zouten onder veranderende relatieve vochtigheid mogelijk maakte. De kinetiek van de kristallisatie van zoutmengsels onder verschillende omstandigheden werd in een tijdsverloop geanalyseerd, waarbij het effect van de relatieve vochtigheid en de samenstelling van het mengsel op kristallisatie en oplossingsgedrag kon worden aangetoond, en een correlatie tussen de kinetiek en de veranderingssnelheid van de relatieve vochtigheid kon worden vastgesteld. Deze bevindingen werden gekoppeld aan de resultaten van het thermodynamische model en werden bevestigd met de verschillende analysetechnieken.

De combinatie van resultaten en nieuwe technieken leverde een belangrijke bijdrage aan het bepalen van faseveranderingen over tijd onder verschillende realistische klimatologische omstandigheden en aan het algemene begrip van zoutkristallisatieprocessen. Bovendien valideerde een vergelijking tussen de gemodelleerde voorspellingen en de experimentele resultaten de effectiviteit van het ECOS/Runsalt-model en benadrukte valkuilen waardoor de betrouwbaarheid in het voorspellen van zoutgedrag werd verbeterd. De algehele resultaten bieden nieuwe inzichten in zout gerelateerde verwerkingprocessen, waaronder het identificeren van kritieke relatieve vochtigheidswaarden en kristallisatie/-oplossingstijden van veelvoorkomende zouten en mengsels. Dit biedt cruciale informatie bij het bepalen van preventieve conservatie behandelingen. De onderzoeksresultaten geven dus met andere woorden de mogelijkheid om gerichte beheerstrategieën op te maken op basis van specifieke klimaatvoorwaarden. De bevindingen zijn cruciaal voor de instandhouding van erfgoed en het begrip van zoutafzetting en oplossingsmechanismen in het algemeen.