A microscopic image showing a dense, yellowish-green, fibrous structure, likely Thaumasia, growing on a surface. The structure is composed of numerous fine, needle-like or hair-like projections. The background is a mix of white and light-colored material, possibly paint or a substrate, with some darker, brownish spots.

## Thaumasitangreb på fuger og puds

Afklaring af omfang og konsekvenser.

Etablering af vidensgrundlag for udvikling af løsninger.



**Titel:**

Thaumasitangreb på fuger og puds

Afklaring af omfang og konsekvenser. Etablering af vidensgrundlag for udvikling af løsninger.

**Udarbejdet af:**

Teknologisk Institut  
Kongsvang Allé 29  
8000 Aarhus C  
Tlf. 7220 2000  
Byggeri og Anlæg  
Murværk

**Finansielt støttet af Martha og Paul Kerrn-Jespersens Fond**

**Kvalitetssikring:**

**Sagsansvarlig:** Jesper Frank Axelsen, tlf. 7220 2501, jaxe@teknologisk.dk

**Godkendt af:** Sandra Michelis, tlf. 7220 1243, sami@teknologisk.dk

**Opgave nr.:** P2008676

**Version nr.:** 01

**Dato:** 22-12-2023

*Resultater af Instituttets opgaveløsning beskrevet i denne rapport, herunder fx vurderinger, analyser og udbedringsforslag, må kun anvendes eller gengives i sin helhed, og må alene anvendes i denne sag. Instituttets navn eller logo eller medarbejderens navn må ikke bruges i markedsføringsøjemed, medmindre der foreligger en forudgående, skriftlig tilladelse hertil fra Teknologisk Institut, Direktionssekretariatet.*

## **Indholdsfortegnelse**

1.	Indledning .....	4
2.	Sulfatangreb generelt.....	4
3.	Thaumasitangreb beskrevet i litteraturen.....	6
	Udvikling af skader over tid.....	7
	Temperatur .....	8
	Hærdningsgrad og pH.....	9
	Fugt.....	9
	Sulfatkilde .....	10
	Kalk i filler og tilslag.....	11
4.	Opsamling på skadessager .....	13
	Fællestræk mellem sagerne .....	13
	Makroskopisk skadesbillede .....	13
	Mikroskopisk skadesbillede .....	16
5.	Effekt af thaumasitdannelse på mørteltrykstyrken.....	20
6.	Opsamling.....	21
7.	Litteraturliste .....	23

# Thaumasitangreb på fuger og puds

## 1. Indledning

I denne rapport præsenteres resultaterne af et studie om thaumasit-angreb på fuger og puds, som Teknologisk Institut har udført med støtte fra Martha og Paul Kern-Jespersen Fond.

Baggrunden for rapporten er, at Teknologisk Institut gennem de senere år har identificeret mineralet thaumasit, som dannes ved nedbrydning af hydratiseret cement, i et stigende antal skadesager omhandlende murværk af teglsten.

Rapporten indeholder en opsummering af væsentlige punkter fra litteraturen om sulfatangreb generelt og mere specifikt om thaumasit-angreb samt en opsamling med fællestræk og forskelle i de skadesager, hvor Teknologisk Institut har identificeret thaumasit.

## 2. Sulfatangreb generelt

Den meste litteratur omkring sulfatangreb på cement omhandler beton, hvorfor også dette generelle afsnit omkring sulfatangreb primært fokuserer på viden og erfaringer fra beton.

Under produktionen af Portland Cement tilsættes sulfat i form af gips for at styre de tidlige afbindingsreaktioner. Hvis der ikke var sulfat til stede, ville der ske lynafbinding, og mørtlen eller betonen ville miste sin plasticitet på få minutter, hvilket ville umuliggøre opmuring eller udstøbning.

Sulfater kan imidlertid også føre til nedbrydningsmekanismer i cementen. Typiske skader, som følge af sulfatangreb i beton er:

- Ekspansion og revnedannelse
- Dårlig binding mellem cementpasta og tilslag
- Nedbrydning af cementpasta
- Afskalning og smuldring af overfladen.

Taylor [1] beskriver, at mens ekspansion og revnedannelse udgør de skader, som oftest ses i laboratoriet, så udgør dårlig vedhæftning, afskalninger og styrketab de skader, som oftest ses i praksis.

Der skelnes mellem interne og eksterne sulfatangreb. Et sulfatangreb som forårsages af sulfat, som er til stede i betonblandingen fra starten kaldes internt sulfatangreb. Sulfatangreb, der forårsages af sulfat, som tilføres fra omgivelserne i konstruktionens levetid benævnes som eksternt sulfat-angreb [2]. Ved internt sulfatangreb kan sulfatkilden f.eks. være gips der er til stede i tilslaget, mens sulfatkilden for eksterne sulfatangreb kan stamme fra kontakt til f.eks. grund- eller havvand.

Sulfat fra interne kilder vil som oftest være jævnt fordelt i cementpastaen, mens sulfat, som trænger ind i betonen udefra, kan være mere ujævnt fordelt [2]. For beton, som generelt er relativt kompakt, vil eksternt tilført sulfat være koncentreret nær overfladen. For mørtel, som har en mere åben og porøs struktur, vil sulfaten typisk trænge længere ind i materialet. I disse tilfælde følger sulfaten transporten af fugt rundt i mørtlen og opkoncentreres de steder hvor fugten fordamper.

Sulfatangreb i cementholdige materialer kan effektivt forebygges f.eks. i forbindelse med design af betonrecept og/eller efterfølgende eksponering, og i Danmark er sulfatangreb sjældent den primære årsag til nedbrydning af beton [2,3].

#### *Eksterne sulfatangreb*

Sulfat tilført cementholdige materialer fra eksterne kilder, vil medføre omdannelse af hydroxy-AFm (hydratiserede faser af klinkermineralet C3A ikke indeholdende sulfat) til monosulfat (hydratiseret fase af C3A indeholde ét sulfatmolekyle pr. C3A). Fortsat tilførsel af sulfat vil medføre, at monosulfat omdannes til mineralet ettringit (hydratiseret fase af C3A indeholdende tre sulfatmolekyler pr. C3A). Yderligere tilførsel af sulfat vil derefter resultere i dannelse af gips [2].

En cementtypes sulfatbestandighed afhænger således af indholdet af klinkermineralet C3A og den europæiske cementstandard [4] angiver at Portlandcement kan karakteriseres som sulfatbestandig på 3 forskellige niveauer når C3A-indholdet i klinkerne er mindre end eller lig hhv. 5%, 3% eller 0%. I Danmark specificerer DS/INF 135:2023 desuden, at en CEM I cement kan klassificeres som *moderat* sulfatbestandig såfremt C3A-indholdet er højst 8% - eller, gældende for en Portland-flyveaske cement (CEM II V), såfremt flyveaskeindholdet er over 15%<sup>1</sup>.

#### *Interne sulfatangreb*

Interne sulfatangreb dækker over forsinket ettringitdannelse (DEF, delayed ettringite formation) som er en ekspansiv skadesmekanisme. Mekanismen kan finde sted, når beton har været udsat for høje hærdetemperaturer. Interne sulfatkilder kan ikke, uden høj temperatur, medføre DEF, da tilstedeværelsen af sulfat blot vil betyde, at der dannes ettringit, mens betonen er i den plastiske fase [2].

---

<sup>1</sup> under forudsætning af at flyveasken er siliciumaluminiumholdig

### 3. Thaumasiangreb beskrevet i litteraturen

Der findes en del nyere studier af thaumasitskader i beton og mørtel fra England, da den britiske regering efter fund af thaumasit i fundamenterne til ti motorvejsbroer i Gloucestershire i 1998 nedsatte den såkaldte "Thaumasite Expert Group" (TEG). Gruppen har beskæftiget sig med både betonkonstruktioner og murværk, og en del af de eksempler på thaumasitskader i murværk, som er beskrevet i litteraturen, stammer fra denne gruppes arbejde.

Thaumasit er et calciumsilika-karbonat-sulfat-hydrat ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ). Thaumasitdannelse som følge af sulfatangreb adskiller sig fra traditionelle sulfatangreb i cement. Ved thaumasitdannelse er det CSH-fasen, dvs. den primære styrkegivende komponent i cement, som nedbrydes og omdannes til thaumasit. Det vil sige, at cementens indhold af C3A, som er afgørende for den traditionelle sulfatbestandighed, ikke har betydning i forhold til at reducere risikoen for thaumasitdannelse. Dannelsen af thaumasit medfører tab af styrke og delvis omdannelse af cementen til en blød ikke-sammenhængende masse [2, 5, 6].

For at thaumasit kan dannes i byggematerialer, skal alle bestanddelene for dannelse af thaumasit være til stede i materialet eller transporteres dertil af fugt. Det er således nødvendigt at der er sulfat-, karbonat- og calciumioner samt calciumsilikat eller calciumsilikathydrat tilgængeligt [2]. Dannelsen af thaumasit er desuden afhængig af høj relativ fugtighed og forholdsvis lave temperaturer – typisk er dannelseshastigheden meget lav over 15 °C [5].

Den britiske ekspertgruppe skelner mellem "thaumasite form of sulfate attack (TSA)" og "thaumasite formation" (TF), der beskrives som to former for thaumasitdannelse med vidt forskellig konsekvens [5]. TSA refererer til tilfælde, hvor der er betydelig skade på betonens eller mørtlens matrix pga. omdannelse af hydratiseret cement (CSH-fase) til thaumasit.

TF er på den anden side karakteriseret ved at thaumasit vokser i allerede eksisterende porer eller revner og ikke nødvendigvis medfører væsentlige skader [5, 6].

Dvs. dannelse af thaumasit i mørtler vil ikke nødvendigvis medføre skadesdannelse og styrketab i mørtlen. Når thaumasit detekteres i en beton eller mørtel er det ikke altid muligt at skelne mellem, hvorvidt den observerede thaumasit er dannet som følge af TSA eller TF [5].



Figur 1. Eksempel på revnedannelse ifm. TSA i muret pille [7].

Sibbick og Crammond [7] beskriver et eksempel på thaumasitskader i murede piller i en fabrikskælder med relativ konstant temperatur på 10-15°C (Fig. 1). Bygningen er fra 1940'erne og skaderne kan derfor være udviklet relativt langsomt. Det interessante ved dette eksempel er sammenligneligheden med ret almindelige danske forhold; mørtlen er en kalkcementmørtel og det beskrives at murstenene har et sulfatindhold, som er ret typisk for moderne mursten (dog engelske). Det ses desuden, at der er tale om røde mursten, som (i hvert fald i Danmark) har et relativt lavt sulfatindhold. Det er ikke nævnt i artiklen, men af fotoet fremgår, at skaderne er mest udbredt nederst på søjlen, hvilket sandsynligvis skyldes opstigende grundfugt, der kan have indeholdt sulfat.

### Udvikling af skader over tid

Dannelse af thaumasit beskrives ofte som en langsom reaktion og thaumasitskader beskrives som en skadestype, der udvikler sig over lang tid. Ved en gennemgang af laboratorieforsøg og skadessager, som er beskrevet i litteraturen, ses dog, at thaumasitskader udvikles i meget

varierende tempo. Resultaterne indikerer således, at thaumasit kan dannes hurtigt, når betingelserne herfor er til stede.

I en artikel, der opsummerer den britiske thaumasit ekspertgruppes arbejde [5] ses således, at skadessagerne på beton typisk er konstateret alt mellem 2 og 33 år efter opførslen, mens thaumasitskader på murværk typisk er konstateret mellem 4 og 10 år efter opførslen.

Med til billedet hører, at betingelserne for thaumasitdannelse ikke nødvendigvis har været til stede i hele konstruktionens levetid, og skaderne dermed kan være udviklet over en kortere periode efter de givne betingelser er opstået. Blandt eksemplerne på dette er de 90 år gamle fuger i en støbejernstunnel i Londons undergrundsbane. Fugerne har været beskyttet mod indtrængning af sulfater indtil støbejernet var gennemtæret og sulfatholdigt vand kunne trænge ind og starte reaktionen.

Laboratorieforsøg med cementpuds dækket af gipsspartel bekræfter ligeledes at thaumasit kan dannes hurtigt under de rette betingelser, idet der kan dannes udbulninger med thaumasit og ettringit indenfor kun 8 uger [8].

Omfanget og hastigheden for skadesudviklingen er altså stærkt afhængig af de tilstedeværende betingelser, og i det følgende beskrives de parametre, der anses for at påvirke dannelsen af thaumasit.

## Temperatur

I en del af litteraturen beskrives thaumasitdannelse, som et problem, der kun opstår ved lave temperaturer. Taylor [1] beskriver f.eks., at thaumasit dannes ved temperaturer på 5-10°C. I de fleste senere artikler lader der dog til at være konsensus om, at thaumasit kan dannes ved op til 25°C, men at dannelsen er langt mere hyppig ved temperaturer under ca. 15°C og at de optimale forhold for thaumasitdannelse er ved temperaturer omkring 5°C.

For eksempel nævner blandt andre Collepardi [9], at thaumasit kan dannes ved stuetemperatur, hvor processen dog er relativt langsom ift. ved lavere temperaturer. Anden litteratur beskriver de ideelle temperaturforhold for thaumasitdannelse som værende ca. 2-10°C [11]. Dette er adopteret af testmetoden fra Eaca, som foreskriver opbevaring af prøverne ved 3°C [12].

Knudsen [10] har desuden konstateret at thaumasit i prøverne fra en skadessag var bevaret ved opbevaring af prøverne ved 40°C, men ikke ved 60°C. Han argumenterer derfor for, at årsagen til at thaumasit dannes hurtigere ved lav temperatur er kinetisk, idet thaumasit tilsyneladende også er stabilt ved relativt høj temperatur.

Crammond [6] foreslår at årsagen til at thaumasit dannes hurtigere ved lavere temperatur er at thaumasit er mindre opløseligt ved lav temperatur, mens CO<sub>2</sub> og portlandit er mere opløseligt ved lav temperatur, hvilket betyder at ligevægten skubbes mod større thaumasitdannelse når temperaturen er lav.



Selvom risikoen for udvikling af skader derfor formentlig er størst ved lav temperatur, findes der eksempler på thaumasitskader, som er udviklet ved relativt høj temperatur. Sibbick og Crammond [7], rapporterer f.eks. om nedbrydning af en pudsmørtel i et badeværelse med relativ konstant temperaturer på ca. 16-22°C. Trods den høje temperatur er pudsen nedbrudt til en klæbrig masse efter kun 18 måneder. Skaderne skal ses i lyset af at de indvendige vægge tidligere har været dækket af gipsspartel, at der er gipsspartel ovenpå pudsen, og at flisebelægningen i badeværelset var utæt. Eksemplet viser, at thaumasitskader kan udvikles relativt hurtigt selv ved høj temperatur, hvis fugt og sulfatbelastning er meget høj.

## Hærdningsgrad og pH

Thaumasit dannes kun under basiske forhold – mere specifikt ved pH fra 13 og ned til 10,5 [13]. Crammond [6] indikerer tilmed at jo højere pH, jo hurtigere dannelse af thaumasit. Hun forklarer dette med, at dannelsen af thaumasit kræver tilstedeværelse af calciumioner, som indledningsvist fås fra portlandit. Efterhånden som portlandit opbruges, fås calcium fra udludning af CSH-gelen. Udludning af CSH-gelen vil dog gradvist sænke pH og i sidste ende medføre at thaumasitdannelse stopper.

Et højt indhold af portlandit betyder altså, at der er mere calcium tilgængeligt, og der dermed kan dannes mere thaumasit før pH falder under 10,5 og omdannelsen stopper. Tilstedeværelsen af meget portlandit er ensbetydende med høj pH, og sammenhængen mellem pH og thaumasitdannelse kan altså være indirekte.

Efterhånden som pH falder mod 7 vil thaumasit og ettringit blive ustabile og omdannes til popcorn-calcit under frigivelse af sulfat til porevæsken. De frigivne sulfationer i porevæsken kan betyde at reaktionen kan fortsætte i endnu ukarboniserede dele af mørtlen eller betonen, hvor pH endnu er høj [6].

I murværk er fugttransporten (og transport af opløselige ioner) primært rettet mod overfladen og dermed de karboniserede dele af mørtlen. Det vurderes derfor, at der er større risiko for at slutproduktet er gipsudfældninger, som kan give forvitring af overfladen.

## Fugt

Tilstedeværelse af vand er en forudsætning for dannelse af thaumasit, da der indgår en del vand i thaumasits krystalstruktur. Vandet er desuden ansvarligt for transport af de nødvendige ioner. Dette gælder særligt i eksternt sulfatangreb, hvor det nødvendige sulfat og eventuelt bikarbonat kan tilføres udefra, fordi det er opløst i indtrængende vand. Tilsvarende er fugt afgørende for interne sulfatangreb, hvor det er porevandet, der sørger for den lokale transport af ioner til de steder, hvor thaumasit dannes.

For konstruktioner af beton, kan vandindtrængning give anledning til thaumasitskader uanset hvornår i konstruktionens levetid vandindtrængningen sker. Det skyldes at forholdene i betonen forbliver basiske i hele konstruktionens levetid, da betonen, for at begrænse korrosion af

armeringsjern, er designet til ikke at karbonatisere. De basiske forhold betyder, at thaumasit kan dannes i hele konstruktionens levetid.

Mørtler til opmuring og fugning er derimod relativt porøse og beregnet til at karbonatisere under hærdeningen. Efter karbonatiseringen er mørtlen pH-neutral, og fugtbelastning af murværket giver derfor ikke længere risiko for thaumasitangreb.

Manglende afdækning af murværket under hærdeningen er ekstra kritisk, da det kan øge risikoen for thaumasitdannelse både på kort og lang sigt. På kort sigt fordi fugtbelastning kan medføre transport af sulfat fra mursten til mørtel, mens mørtlen endnu er basisk og thaumasit er stabilt. På lang sigt fordi tidlig fugtbelastning erfaringsmæssigt betyder et langstrakt karbonatiseringsforløb, da karbonatisering kun foregår ved fugtindhold under ca. 7 vægt% og i værste fald kan betyde, at karbonatiseringen går helt i stå, fordi udfældninger i overfladen begrænser yderligere udtørring og tilgang af CO<sub>2</sub>. Tidlig fugtbelastning af murværket kan derfor skabe et permanent basisk miljø i murværket, som kan betyde at der er risiko for thaumasitdannelse i hele murværkets levetid.

## Sulfatkilde

### *Eksterne sulfatangreb*

En stor del af de thaumasitskader, der er beskrevet i litteraturen skyldes eksterne sulfatangreb, der er opstået fordi beton eller mørtel er i kontakt med sulfatholdigt vand. I Betonhåndbogen [2] nævnes følgende eksempler på eksterne sulfatkilder:

- Grundvand
- Havvand
- Spildevand
- Luftforurening
- Sulfatholdigt tørsalt
- Forsuring af gylle med svovlsyre for at nedsætte fordampning af ammoniak

En del af kilderne (havvand, spildevand og gylle) er dog kun relevante for meget specifikke anlægskonstruktioner, som typisk udføres i beton – eksempelvis bropiller, spildevandsledninger og gylletanke.

Både sulfatholdigt grundvand og tørsalte kan derimod være kilde til eksterne sulfatangreb i murværk. Det gælder murede fundamenter, sokler, kældervægge og terrænnært murværk uden horisontal fugtspærre, hvor det er en ret udbredt problemstilling, at udfældning af sulfatholdige salte giver anledning til forvitring af terrænnære mursten, fuger og puds. Ligeledes er afskalning af overfladebehandling på kældervægge i ældre bygninger velkendt.

En af årsagerne til at thaumasitskader ikke er et almindeligt forekommende problem i sokler og terrænnært murværk i Danmark er formentlig, at man fortrinsvis murede med rene kalkmørtler og kun i meget begrænset omfang har anvendt cement, mens det endnu var almindeligt med

murede sokler og bygninger opført uden horisontal fugtspærre. Det er dog også sandsynligt, at manglende diagnosticering spiller en rolle. En del af den terrænnære fugeforvitring, der observeres i bygninger uden, eller med forkert udført, fugtspærre og cementholdig mørtel, kan desuden skyldes en kombination af thaumasitdannelse og saltprovokeret forvitring.

Luftforurening kan medføre ekstern sulfatiltførsel til murværk, hvilket var særligt udbredt i større byer, da man endnu fyrede med kul og koks. Dette har derfor betydet mørke belægninger bestående af gipsudfældninger og sodpartikler på overfladen af mange murede facader i byerne. Gipsen dannes ved reaktion mellem svovlsur regn og calciumhydroxid eller calciumkarbonat fra mørtlen, og typisk ses, at en del af kalken er erstattet af gips i et tyndt lag i fugeoverfladen. Det lader dog ikke til at denne sulfat trænger ret dybt ind i fugen, og der er tale om en gradvis tilførsel af sulfat til overfladen af fugen over mange år. Samtidig med dette, karbonatiserer fugen dybere og dybere. Herved bliver pH i mørtlen neutral og der vil derfor overvejende dannes gips fremfor thaumasit.

På ovenstående baggrund kan det konkluderes, at eksterne sulfatangreb ikke er et udbredt problem i murværk i Danmark.

#### *Interne sulfatangreb*

I de murværksskader, der er beskrevet af Crammond [5] er murstenene beskrevet som sulfatholdige eller N-type iht. den udgåede britiske standard BS3921:1985.

I Danmark ses et naturligt forekommende indhold af gips og dermed sulfat i blåler, som udvindes til fremstilling af gule og andre lyse mursten. Det vurderes derfor, at sulfatindhold fra murstenen oftest er kilden til sulfat ved thaumasitangreb observeret for dansk murværk.

## **Kalk i filler og tilslag**

Thaumasitdannelse kræver tilstedeværelse af karbonationer. Karbonationerne kan stamme fra kalkfiller, kalkholdigt tilslag og/eller indtrængning af bikarbonatholdigt grundvand eller havvand.

Tidlige studier mistænker særligt kalkfiller for at bidrage til thaumasitdannelse, da fillerens fine kornstørrelser betyder, at der er et stort overfladeareal til rådighed for den kemiske reaktion.

Senere laboratorieforsøg har dog vist, at tilstedeværelse af kalk i tilslaget kan være tilstrækkeligt til at reaktionen kan foregå, og dette underbygges af, at der i visse undersøgelser [5] ses en overvægt af skadessager i beton med kalkholdigt tilslag. Desuden er der beskrevet skadessager på beton, som ikke indeholder kalkfiller og hvor kalk endog kun er til stede som meget grove tilslagskorn [6].

Forsøg med mørtelprismer af en KC-mørtel med luftblandingsmiddel har desuden vist at kalkfiller også kan have en positiv effekt i forhold til at reducere omfanget af thaumasitangreb [13]. I forsøgene blev mørtelprismer uden kalkfiller således mere nedbrudt af TSA end prismerne med kalkfiller. Observationen blev af forfatterne begrundet med, at kalkfilleren har reduceret mørtelens optagelse af vand/sulfatholdig opløsning og dermed reduceret omfanget af TSA, selvom tilstedeværelsen af karbonationer i kalkfilleren teoretisk set bør øge risikoen for thaumasitdannelse.

Tilsvarende kan kalkfiller tilsat direkte til cementen (CEM II(A/B-LL)) medføre en risiko for thaumasitdannelse. Således fraråder Aalborg Portland, at deres BASIS cement anvendes i omgivelser med højt sulfatindhold netop med henvisning til øget risiko for thaumasitdannelse [3].

Kravet om tilstedeværelse af både calcium- og karbonationer gør, at en zone omkring den aktuelle karbonatiseringsfront i en mørtel kan være det oplagte sted for dannelse af thaumasit.

## 4. Opsamling på skadessager

Teknologisk Institut observerede første gang thaumasit i murværk udført med mursten af tegl i forbindelse med en sag i juli 2018. Sagen omhandlede murværk under terræn, som var udført som en slags "understøbning" af linjefundamentet på en ældre villa hvor man på et ukendt tidspunkt havde sænket gulvet i kælderen. Thaumasitangrebet blev opdaget, da husets nye ejer fik fundamentet undersøgt i forbindelse med etablering af omfangsdræn pga. fugt i kælderen.

Da Instituttet på daværende tidspunkt ikke tidligere havde observeret thaumasit i teglstensmurværk, blev forekomsten tilskrevet de særligt fugtige forhold, der kan forekomme i murværk under terræn, som også indikeret af behovet for omfangsdræn i pågældende sag. Det var usikkert, om der var tale om et eksternt sulfatangreb, hvor sulfatkilden er den omgivende jord og sulfatholdigt grundvand, eller et internt sulfatangreb, hvor sulfatkilden kunne være de gule mursten. Der var på daværende tidspunkt ikke mistanke om en reel risiko for thaumasit i dansk murværk over terræn.

Efterfølgende er der i Teknologisk Instituts skadessager mellem juni 2019 og juni 2021 fundet 12 eksempler på sulfatangreb i murværk, hvor thaumasit er observeret i større eller mindre omfang. Sagerne omhandler alle teglstensmurværk over terræn, hvor der vurderes at være tale om internt sulfatangreb.

### Fællestræk mellem sagerne

Ved en systematisk gennemgang af sagerne er der fundet følgende fællestræk:

- Der er tale om murværk med mursten af gult tegl i alle 12 sager.
- Der er anvendt kalkcementmørtel i halvdelen af sagerne og cementbaseret funktionsmørtel i den anden halvdel af sagerne.
- Teknologisk Institut er blevet involveret i sagerne alt mellem et halvt år og 13 år efter opmuringen – og indenfor 5 år i 70% af sagerne.

### Makroskopisk skadesbillede

Det makroskopiske skadesbillede i sagerne varierer en del, som det fremgår af Tabel 1.

Særligt to af sagerne skiller sig ud fra andre skadestyper ved at have et specielt revnemønster. I den ene sag (869017) er der hårfine revner i tyndpuksen i kontakten mellem mørtel og mursten – typisk hele vejen rundt om murstenene (Fig. 2). I den anden sag (973931) er der revner i mørtlen langs kontakten til murstenene samt lodrette revner gennem mange mursten (Fig. 3). Der er observeret lodrette revner gennem mursten i yderligere en sag (907753), men her er det mere uklart om revnerne relaterer til sulfatangrebet, idet der er mange revner, der skyldes konstruktive forhold.

I to sager er der desuden tale om afskalning af begitning fra murstenene (907753 og 971771).

Derudover har sagerne handlet om farveforskelle i fugeoverfladen og/eller fugeforvitring og lav styrke af mørtlen.

Endelig har en enkelt sag (870936) drejet sig om, hvorvidt en omfugning er udført korrekt – skadesbilledet før omfugningen kendes således ikke. I denne sag er murværket opført i 2006 og allerede omfugget i 2018. Sulfatangrebet i opmuringsmørtlen (identificeret vha. tyndslib) er sandsynligvis (en medvirkende) årsag til fugens korte levetid.

For 10 af de 11 sager med thaumasitdannelse over terræn indplaceres det pågældende murværk i eksponeringsklasse MX 3.2. Dette bekræfter, at kraftig vandpåvirkning spiller en rolle for risikoen for thaumasitdannelse.



Figur 2. Hårfine revner i tyndpudsen i sag 869017. Revnerne følger kontakten mellem mursten og fuge. Desuden ses mørkfarvning af pudsen.



Figur 3. Revner i kontakten mellem mursten og fuge, samt revner på tværs af fuger og lodret gennem mursten i sag 973931. Revner forekommer meget konsekvent i områder hvor murværket er vejrslagsudsat, opfugtet og fremstår med mørk misfarvning.

Tabel 1. Oversigt over hhv. makro- og mikroskopisk skadesbillede/skadesårsag i de omtalte sager.

Opgavenummer	Makroskopisk skadesbillede	Mikroskopisk skadesbillede
817821*	Murværk under terræn. Ingen makroskopiske skader observeret, men mørtel er uhardet og virker stedvist klæg.	Kraftig udludning, thaumasitdannelse i bindemidlet (TSA) og meget grove ettringitudfældninger i luftporer.
869017	Tyndpudset murværk med kraftig opfugtning og manglende karbonatisering. På områder med størst fugtbelastning, ses mørkfarvning af pudsen, stedvis afskalning af pudsen over fugerne og hårfine revner i tyndpudsen omkring hver enkelt mursten.	Mørkfarvning skyldes udfældning af natriumsulfat (identificeret i SEM). Revner i pudsen ses at udgå fra områder i opmuringsmørtlen, hvor der observeres thaumasitdannelse i bindemidlet (TSA).
870936	Umiddelbart ingen skader. Opgavens formål var at undersøge om omfugning med fugepistol er udført korrekt. Bygningen opført i 2006 og allerede i 2018 har der været behov for omfugning.	I opmuringsmørtlen ses udludning af kalken og thaumasitdannelse i bindemidlet (TSA), samt revner omkring områder med thaumasit. Udludning og dannelse af thaumasit og/eller gips er sandsynligvis årsag til den forvitring, der har medført behov for omfugning.
880009	Farveforskelle i fugeoverfladen.	Hyppig ettringit i mørtlens luftporer ved kontakt til murstenene, thaumasitdannelse i bindemidlet (TSA) og revnedannelse omkring dette. Udfældning af kalk og gips på fugeoverfladen.

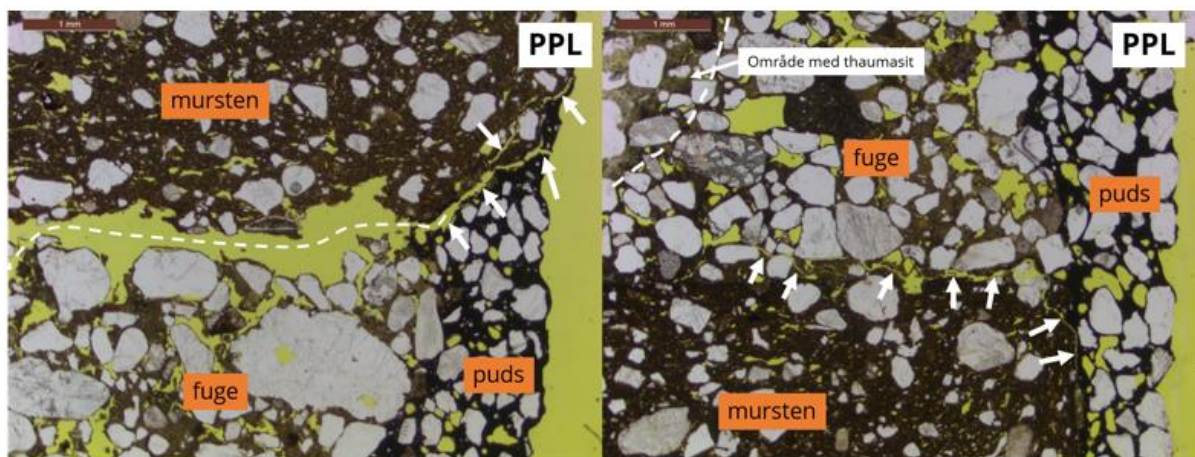
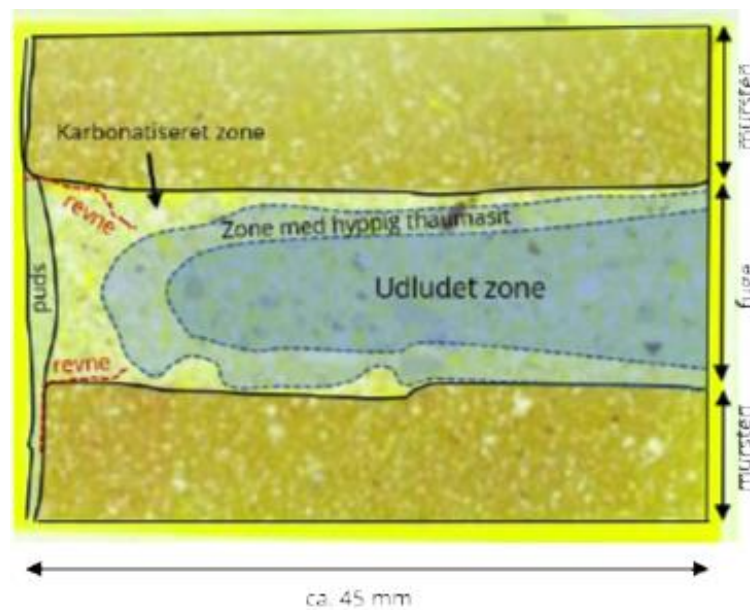
906993 A	Stedvis fugeforvitring og afskalning samt nogen farveforskel i fugeoverflader. Fuger kan kradses ud til 8-10 mm dybde med enden af en tommestok og mørtlen virker klæg.	Meget hyppig vækst af ettringit og thaumasit i luftporer. TSA nær fugeroverfladen i prøve 2.
907753	Komplekst skadesbillede med flere skadesårsager – bl.a. revner ifm. overliggerens vederlag og for få dilatationsfuger. Desuden afskalning fra begittede mursten, mørkfarvning af eksponeret murværk og lodrette revner i mursten.	Omfattende udludning af bindemidlet og mange udfældninger af thaumasit (TF og muligvis TSA), ettringit og kalk i luftporer.
924123	Stedvis fugeforvitring.	Petrografi og kloridanalyse viser entydigt at murværket er kraftigt afsyret, hvilket vurderes at være den primære årsag til forvitringen. Der ses dog også udfældning af gips i luftporer og thaumasitdannelse i bindemidlet (TSA).
943350	Smuldrende mørtelfuger, farveforskel i fugeoverflader og uhardet kalk ved overfladen.	Massiv gips i luftporer nær fugeoverfladen og revner i mørtlen omkring disse. Thaumasit (muligvis TSA) i områder af mørtlen.
960033	Svage fuger.	Udbredt vækst af gips, ettringit og thaumasit (TSA),.
971771	Afskalning af begitning, mørkfarvning af eksponerede dele af murværket, kalkudfældninger og uhardet kalk ved overfladen.	Gipsudfældninger i overfladenære luftporer og revner i mørtel og mursten samt stedvis ettringit og thaumasit (TSA) i ukarboniserede dele af fugen.
973931	Revner langs kontakt mellem mursten og fuger, på tværs af fuger og lodret gennem mursten. Revnerne forekommer meget konsekvent i eksponerede dele af murværket, som fremstår mørkt og har højt fugtindhold.	Omfattende thaumasitdannelse i bindemidlet (TSA) i en dybde på 2-8 mm fra fugeoverfladen, samt i en zone langs kontakten til murstenene.
985046	Farveforskelle i fugeoverflader.	Forskellig grad af reaktion i ferriten. Udfældninger af kalk og gips og TSA i dele af bindemidlet.

\*Der findes ingen rapport på denne sag, da rekvirenten aflyste resten af opgaven efter at besigtigelse og tyndslibsfremstilling var udført.

## Mikroskopisk skadesbillede

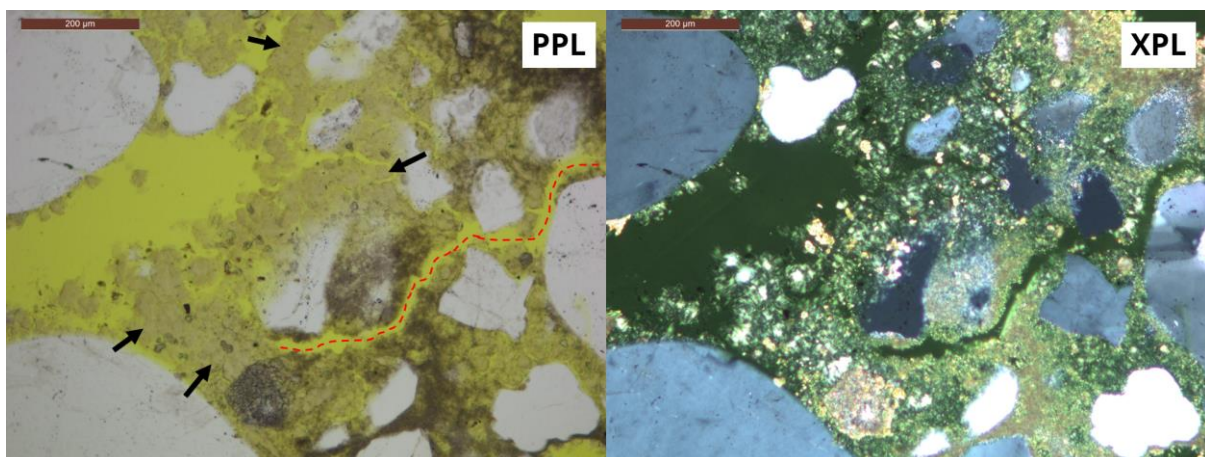
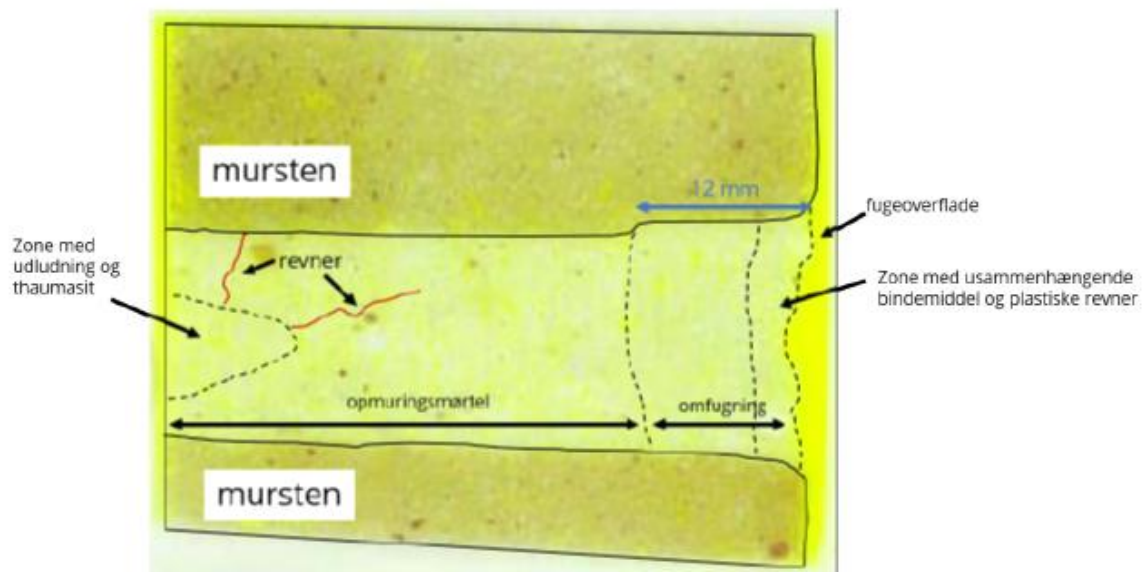
I flere sager ses, at der udgår revner fra områder med omfattende thaumasitdannelse i bindemidlet, som illustreret i Figur 4. Dette gælder begge sager, hvor der er observeret revner omkring murstenene ved besigtigelsen. Det er desuden set i sag 870936 (Fig. 5), hvor sulfatangrebet/thaumasitdannelsen kan være årsagen til at der har været behov for omfugning. I pågældende snit fortsætter revnerne dog ikke til overfladen af opmuringsmørtlen. I alle tilfælde er der tale om en thaumasitdannelse i den ukarboniserede del af mørtlen et stykke fra overfladen, og revner der løber mod overfladen i den karboniserede del af mørtlen.





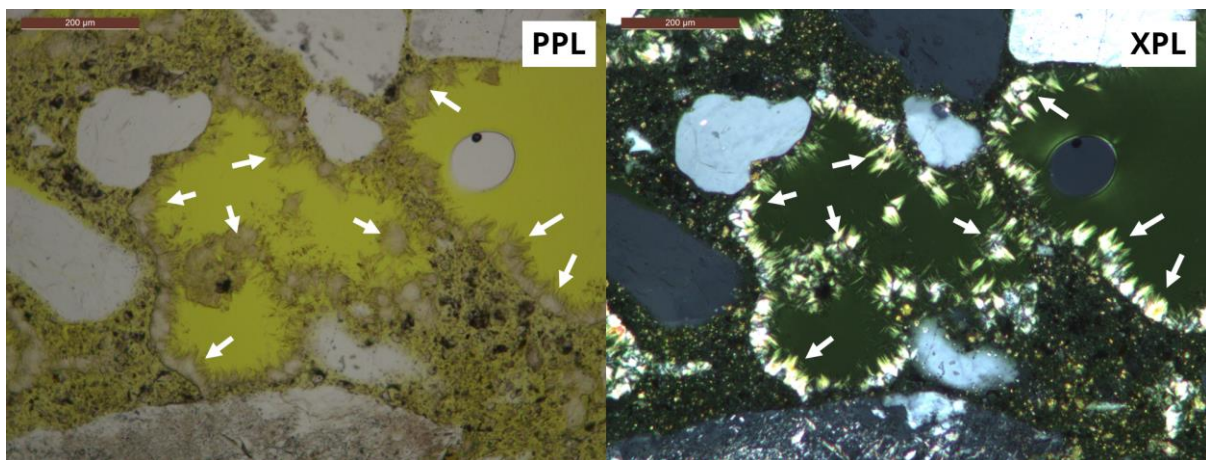
Figur 4. Øverst: Skitse af tyndslibet i sag 869017. Revner der ses i tyndpudsens omkring murstenene ses at starte omkring en zone med hyppig thaumasitdannelse af bindemidlet. Herfra løber revnerne mod kontakten mellem tegl og mørtel, som de følger ud til overfladen af murværket, hvor de ses som hårfine revner i tyndpudsens.

Nederst: mikroskopifotos af revner (markeret med stiplet linje og hvide pile). Revnerne udgår fra områder med thaumasit og løber langs murstenene til synsfladen af murværket.



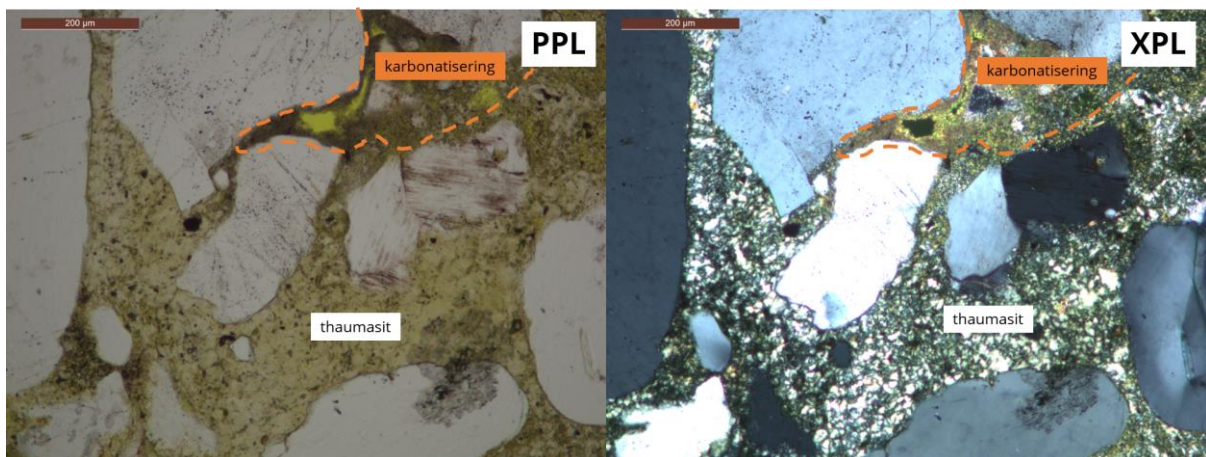
Figur 5. Øverst: Skitse af tyndslibet i sag 870936. Der udgår revner fra område med udludning og thaumasitdannelse i bindemidlet. I det givne snit løber revnerne dog ikke helt ud i overfladen. Nederst: mikroskopifotos, der viser en revne (rød stiplede linje), der udgår fra område med thaumasit (sorte pile).

Et eksempel på TF ses i Figur 6. I sager hvor der udelukkende ses TF, og ikke TSA, forventes udfældningerne ikke at have stor betydning for mørtlens styrke. Udfældningerne er dog udtryk for at der er, eller har været, de rette betingelser for dannelse af thaumasit. Hvis bindemidlet ikke er karbonatiseret, kan der stadig være de rette betingelser, og man bør være opmærksom på at problemet kan udvikle sig.

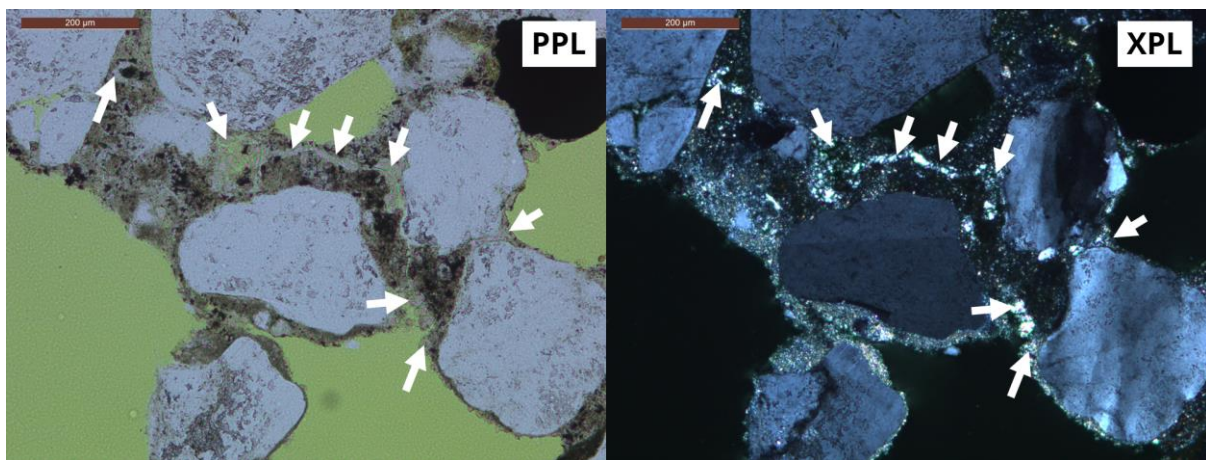


Figur 6. Eksempel på TF hvor thaumasit vokser i mørtlens luftporer.

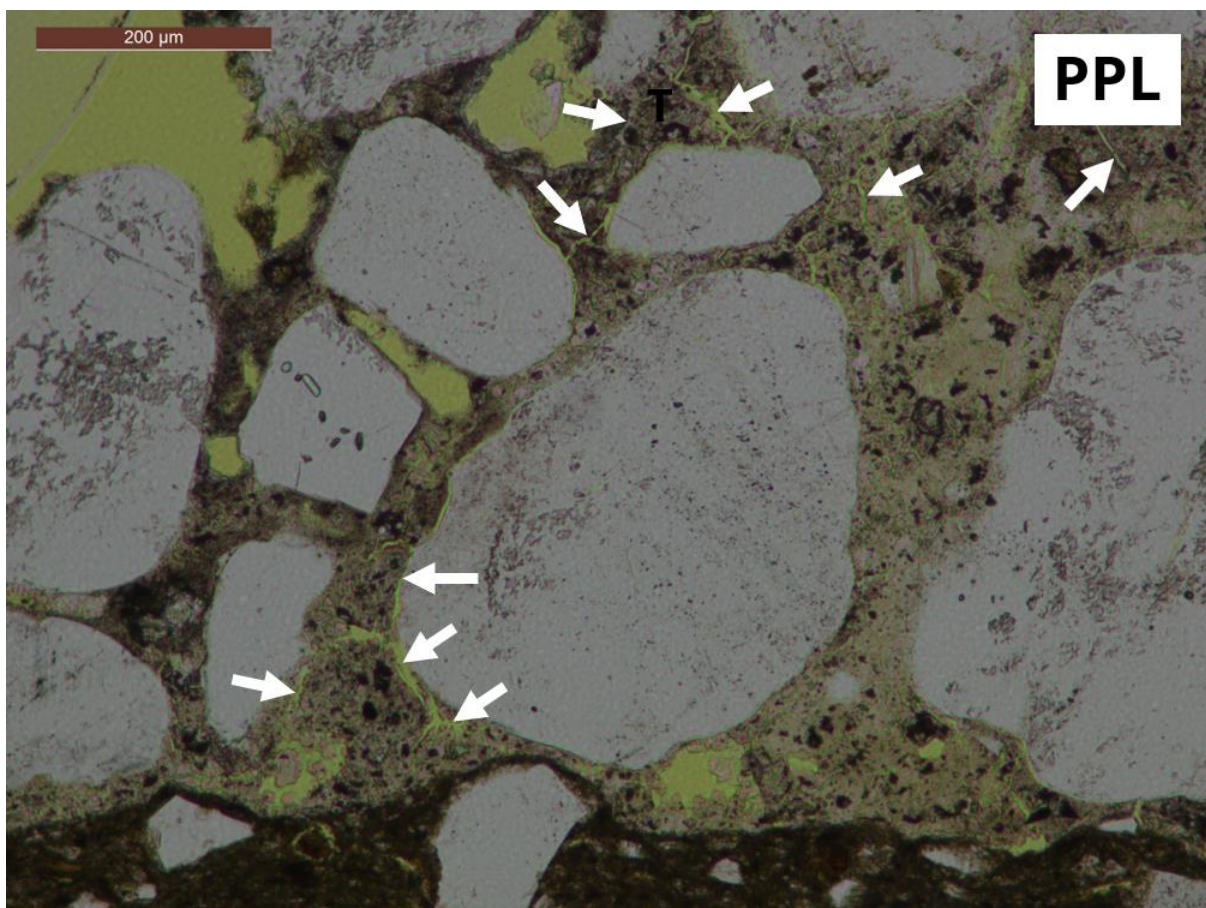
Eksempler på TSA er vist i Figur 7, 8 og 9. I disse tilfælde er større eller mindre dele af bindemidlet omdannet til thaumasit og det må derfor forventes at mørtlen i større eller mindre grad har mistet sin styrke. Det er på nuværende tidspunkt vanskeligt at vurdere styrketabet på baggrund af tyndslibsanalysen, men dette kan måles ved anvendelse af krydsbor [14].



Figur 7. Eksempel på omfattende thaumasitdannelse af bindemidlet (TSA).



Figur 8. Thaumasit, gips og revner i bindemidlet ifm. TSA.



Figur 9. Mikrorevner i bindemidlet i og omkring område med thaumasitdannelse i bindemidlet (TSA)

## 5. Effekt af thaumasitdannelse på mørteltrykstyrken

Thaumasitdannelse som følge af sulfatangreb på mørtler medfører omdannelse af den styrkegivende komponent, CSH, til thaumasit.

Effekten af thaumasitdannelse på mørtlens styrke er undersøgt for én af de opgaver, hvor Teknologisk Institut har konstateret dannelse af thaumasit, som medvirkende årsag til revnedannelse i mørtelfuger og sten (sagsnummer 973931, Figur 3).

Mørteltrykstyrken er målt vha. krydsbors-metoden [14]. Styrken er målt i fire positioner hhv. to (A og B) hvor thaumasit enten er påvist eller forventet ud fra murværkets fremtoning i området samt to positioner (C og D), hvor thaumasit ikke forventes.

De udførte forsøg viser, at de højeste trykstyrker for mørtlen findes i de to positioner, hvor thaumasit ikke forventes. Her findes i gennemsnit en trykstyrke på 6,3 MPa.

I position A, hvor thaumasit er påvist i tyndslib findes trykstyrken af være reduceret til 75% af gennemsnittet for position C og D. Tilsvarende findes i position B, hvor thaumasit på baggrund af murværkets udtryk mistænkes, en trykstyrke, som er 72% af gennemsnittet for position C og D.

Disse indledende forsøg omkring effekten af thaumasitdannelse på mørtlens trykstyrke indikerer således, at sulfatangreb med thaumasitdannelse til følge kan have målbar betydning for mørtlens styrke.

Den anvendte mørtel er en cementbaseret funktionsmørtel styrkeklasse, M5. De to målinger i områder, hvor sulfatangreb og thaumasitdannelse ikke forventes viser mørteltrykstyrker større end den nedre grænse for mørteltypen på 5 MPa. I de to positioner, hvor thaumasitdannelse er hhv. påvist og forventet er mørteltrykstyrken reduceret til under den nedre grænse.

## **6. Opsamling**

Ud fra litteraturstudiet kan det konkluderes, at evt. igangværende thaumasitdannelse i mørtelfuger i murværk, kan standses ved at sikre, at mørtlen færdigkarbonatiserer. Thaumasit dannes kun under basiske forhold ved pH større end 10,5.

Ved at sikre forhold i murværket, som fører til færdigkarbonatisering af mørtlen kan pH bringes under 10,5 og dannelsen af thaumasit vil stoppe.

Gunstige forhold for karbonatisering kan ofte skabes med udkradsning af fuger og afskærmning af murværket mod kraftig vandbelastning i perioden indtil karbonatiseringen er færdig.

Det udførte forsøg med bestemmelse af trykstyrker for mørtel udsat for thaumasitdannelse påviser, at thaumasitdannelse i mørtel kan føre til målbar reduktion af mørtlens styrke. Yderligere undersøgelser er dog nødvendige for at opsætte egnede udbedringsmetoder for murværk, som allerede er udsat for thaumasitdannelse.

Med henblik på at reducere risikoen for at thaumasit dannes bør fokus være på at reducere ét eller flere af de forhold, som skal være til stede for at thaumasit kan dannes.

Det drejer sig om høj pH, sulfatkilde, karbonatkilde, relativt lave temperaturer og højt fugtindhold.

#### *Høj pH*

Begrænsning af den periode, hvor mørtlen fremstår ikke-karbonatiseret og dermed basisk vil reducere den periode, hvor thaumasit kan dannes.

#### *Sulfatkilde*

Da sulfat ofte er naturligt til stede i gule mursten, vil det være svært at reducere denne kilde.

#### *Karbonatkilde*

Det vil være værd at undersøge om der ses samme reaktivitet af kalkfiller tilsat mørtlen, som der ses af kalkfiller tilsat til cementen. Såfremt denne kalkfiller tilsat cementen udgør en større risiko for thaumasitdannelse end kalkfiller tilsat til mørtlen, kan man overveje at ophøre med at bruge cementer af typen CEM II (A/B-L/LL) til mørtler i forbindelse med udsatte murværk.

#### *Lave temperaturer*

Denne parameter kan kun med stort besvær – afdækning og opvarmning - ændres.

#### *Højt fugtindhold*

Fugtbelastningen af murværk kan potentielt reduceres i designfasen så der bygges i lavere eksponeringsklasse, f.eks. MX 3.1 frem for MX 3.2.

## 7. Litteraturliste

1. Taylor, H. F. W. (1997): Cement Chemistry, Thomas Telford
2. Betonhåndbogen (2019), 19-11, Sulfatangreb, Gitte Normann Munch-Petersen
3. Cement og Betonhåndbogen (2023), Aalborg Portland, 25. udgave
4. DS/EN 197-1:2012, Cement – Del 1: Sammensætning, krav til egenskaber og overensstemmelseskriterier for almindelige cementer
5. Crammond, N. (2002): The occurrence of thaumasite in modern construction – a review, Cement and Concrete Composite 24, 393-402
6. Crammond, N. J. (2003): The thaumasite form of sulfate attack in the UK, Cement and Concrete Composites, 25, 809-818
7. Sibbick, R. G. & Crammond, N. J. (2001): Microscopical investigation into recent field examples of the thaumasite form of sulfate attack (TSA), 9<sup>th</sup> Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials.
8. Bensted J. Some problems with ettringite and thaumasite in the gypsum plaster/cement contact area. Proceedings of the International RILEM Symposium on Calcium Sulfates and Derived Materials, France, 1977. p. 479–87 (editors Murat M., Foucault M.)
9. Collepardi, M. (1999): Thaumasite formation and deterioration in historic buildings, Cement and Concrete Composites 21, 147-154
10. Knudsen, T., Thaumasite. Its stability and formation. A literature review and report. Eureka Project EU-772, Eurocare-Thaumasite, 1990 1-21.
11. Veniale, F et al (2003): Thaumasite as decay product of cement mortar in brick masonry of a church near Venice, Cement and Concrete Composite, 25, 1123-1129
12. European autoclaved aerated concrete association, Recommendation, Test conditions for thin bed mortar, Eaca R7:2002
13. Gaze M.E., Crammond, N. J (2000): The formation of thaumasite in a cement:lime:sand mortar exposed to cold magnesium and potassium sulfate solutions, Cement and Concrete Composites 22 209-222
14. P. D. V. Christiansen: In situ determination of the compressive strength of mortar joints using an X-drill, [International Masonry Society](#)