



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Direkte genbrug af mursten fra murværk med stærke mørtler

MUDP Rapport

December 2020

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:
Mette Moesgaard, Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7038-247-2

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

1.	Forord	5
2.	Opsummering og konklusion	6
2.1	Store mængder murværksaffald	6
2.2	Udvikling af opvarmningsprofiler	6
2.3	Delvis omstilling af energiforbrug til vedvarende energi	7
2.4	Tilsætning af restmateriale til nye mursten	7
2.5	Udvikling af produktionsudstyr	7
2.6	Udvikling af forretningsmodel	7
2.7	Fuldskalaforsøg	7
3.	Indledning og formål	8
3.1	Genbrug og genanvendelse af murværksaffald i dag	8
3.1.1	Mekanisk afrensning af mørtel	8
3.1.2	Murværk med stærke mørtler	9
3.1.3	Økonomisk perspektiv	9
3.2	Formål	9
3.2.1	Miljømæssigt perspektiv	10
3.2.2	Kombination af adskillelse og farveændring	11
3.2.3	Anvendelse af mikrobølger baseret på vedvarende energi	11
3.2.4	Anvendelse af eksisterende produktionsudstyr	12
3.3	Projektets hypoteser	12
4.	Optimerede opvarmningsprofiler (AP1)	13
4.1	Baggrund	13
4.1.1	Termisk nedbrydning af bindemidler i mørtel	13
4.1.2	Termisk længdeudvidelse af murværksmaterialer	14
4.1.3	Sammensætning af gængse mørteltyper	17
4.1.4	Genbrænding sikrer PCB-frie materialer	18
4.2	Udvikling af opvarmningsprofil	19
4.2.1	Systematiske brændinger i laboratorieskala	19
4.2.2	Forsinket effekt af genbrænding – rehydratisering af mørtel	21
4.2.3	Pilotskalaforsøg	21
4.3	Adskillelse og farveændring	24
4.3.1	Dæmpning ved lavede temperaturer	27
4.4	Anvendelse af delvis mikrobølgebaseret energi	28
4.5	Restmateriale i nye mursten	30
4.5.1	Forsøg i laboratorieskala	30
4.5.2	Forsøg i pilotskala	31
4.6	Nærmere undersøgelse af revnedannelse	34
4.6.1	Årsag til revnedannelse i sten	34
4.6.2	Avancerede opvarmningsprofiler	36
4.7	Selektiv opvarmning med mikrobølger	37
5.	Udvikling af produktionsudstyr (AP2)	40
5.1	Baggrund	40

5.2	Udvikling af beholder til brokker og håndtering af mørtelrester	41
5.3	Test af udviklet prototypebeholder	43
5.4	Håndtering af vedhængende mørtel	43
5.5	Grænseværdi for fugtindhold	44
6.	Udvikling af forretningsmodel (AP3)	45
6.1	Workshop og interviews	45
6.2	Mulig anvendelse	46
6.3	Forretningsmodellens ni byggesten	47
6.3.1	Nøgleaktiviteter	47
6.3.2	Kundesegmenter	47
6.3.3	Værditilbud	48
6.3.4	Kanaler	48
6.3.5	Kunderelationer	49
6.3.6	Indtægtsstrømme	49
6.3.7	Nøgleressourcer	49
6.3.8	Nøglepartnere	49
6.3.9	Omkostningsstruktur	49
7.	Fuldskalaforsøg (AP4)	51
7.1	Fuldskalaforsøg – ikke gennemført	51
8.	Diskussion	52
8.1	Årsag til revnedannelse	52
8.2	Estimeret energiforbrug til genbrænding	53
8.3	Knust restmateriale som erstatning for sand i nye mursten	54
9.	Konklusion	56
10.	Litteraturliste	58

1. Forord

Projektet er udført af Teknologisk Institut, Byggeri og Anlæg samt Bachmanns Teglværk under Miljøstyrelsens Program for Udviklings- Test- og Demonstrationsprojekter - Område Cirkulær Økonomi og Genanvendelse. Projektet er udført i perioden 1. november 2017 til 31. december 2019.

Projektet undersøger muligheden for udvikling af en ny metode, som skal gøre det muligt at genanvende mursten fra murværk opført med stærk cementholdig mørtel. Metoden baserer sig på genbrænding af nedrevne murværksbrokker. I projektet arbejdes også med udvikling af produktionsudstyr, som skal gøre det muligt at udføre genbrænding i eksisterende ovne med fri kapacitet hos Bachmanns Teglværk.

Af rapporteringen er opbygget med et kapitel for hver af projektets fire arbejdsopgaver. Disse findes i kapitel 4 til 7.

Tak til Jesper Arent Andersen, Kingo Karlsen for at bidrage med viden om - og demonstration af nedrivningsarbejdet samt leverance af nedrevne murværksbrokker til test.

Tak til ERIK Arkitekter for deltagelse i workshop og input til udvikling af forretningsmodel.

2. Opsummering og konklusion

Halvdelen af det murværk, som i dag rives ned i forbindelse med renovering eller nedrivning af eksisterende byggeri, har intet potentiale for genbrug af murstenene. Årsagen er, at der i dag ikke eksisterer en metode, som muliggør adskillelse af murværk opmuret med stærk cementholdig mørtel. I nærværende projekt arbejdes med udvikling af en metode til adskillelse af nedrevne murværksbrokker og direkte genbrug af murstenene fra murværk opmuret med stærke cementholdige mørtler. Metoden baserer sig på genbrænding af de nedrevne murværksbrokker.

2.1 Store mængder murværksaffald

I Danmark produceres årligt omkring 450.000 tons affald baseret på nedrevet murværk. Den fremherskende metode i forbindelse med genanvendelse af dette er som vejfyld efter knusning, og her kan murværk endog kun anvendes som fyld for veje med lav belastning. Udgifterne forbundet med knusning af det nedrevne murværk er større end værdien af det fremstillede vejfyld. I dag foretages også i mindre grad genanvendelse af hele mursten efter mekanisk adskillelse af mursten og mørtel. Denne metode er dog kun anvendelig for murværk baseret på svage kalkmørtler. Murværk opført efter omkring 1955, hvor stærkere cementholdige mørtler vandt indpas i Danmark, kan således ikke med eksisterende metoder adskilles til direkte genbrug af mursten.

I nærværende projekt arbejdes med udvikling af en metode, som skal muliggøre adskillelse af murværk baseret på stærke cementholdige mørtler og efterfølgende genbrug af de hele sten. Metoden baserer sig på genbrænding af nedrevne murværksbrokker. Genbrændingen foretages ved temperaturer, som er væsentligt lavere end de temperaturer (1000-1050°C), som anvendes til fremstilling af nye mursten. Ved genbrænding nedbrydes de styrkegivende komponenter i mørtlen. Ifølge teorien kan de styrkegivende komponenter i cement nedbrydes ved lavere temperaturer (op til 400-500°C) end de styrkegivende komponenter i kalkbaseret mørtel (ca. 800°C).

Projektets arbejde falder i fire arbejdsplaner. Nedenstående opsummeres i hovedaktiviteter og konklusioner for de fire arbejdsplaner.

2.2 Udvikling af opvarmningsprofiler

Arbejdsplan 1 beskæftiger sig overordnet med udvikling og optimering af opvarmningsprofiler til genbrænding af murværket baseret på rene cementmørtler og mørtler, hvor både kalk og cement er tilsat som bindemiddel.

Til dette arbejde testes 6 forskellige mørteltyper, som repræsenterer de gængse mørteltyper anvendt til opmuring. Dette inkluderer test af svag kalkmørtel, de fire kalkcementmørtler, som udgør normmørtlerne, samt stærk funktionsmørtel (M5) med cement som eneste bindemiddel. Disse forsøg viser, at de mest udbredte opmuringsmørtler KC 50/50/700 og KC 35/65/650 kan adskilles efter opvarmning til temperaturer på ca. 550°C. Temperaturer på omkring 750°C er dog krævet for adskillelse af mørtlerne med størst cementindhold; KC 20/80/550 og M5. Efterfølgende opskalering af de udførte forsøg til genbrænding af større murværksbrokker bestående af et tredimensionelt "netværk" af både lodrette og vandrette mørtelfuger viser, at temperaturer omkring 700°C kræves for adskillelse af større brokker opmuret med mørtlerne

KC 50/50/700 og KC 35/65/650. Desuden ses markant revnedannelse i stenene. Tendensen til revnedannelse stiger ved stigende temperaturer.

2.3 Delvis omstilling af energiforbrug til vedvarende energi

Arbejdspakke 1 indeholder også undersøgelse af mulighederne for at udføre genbrænding af murværk med kombineret gas- og mikrobølgebrænding.

Test med genbrænding af murværksbrokker ved kombination af traditionel gasfyring og opvarmning med mikrobølger drevet af el, har vist, at brændingsmetoden er anvendelig til genbrænding af murværksbrokker. Dvs. både mursten og mørtel er modtagelige for mikrobølger. Ved genbrænding i pilotskalaovn øges det totale energiforbrug med 12-13% ved omstilling fra ren gasbrænding til kombinationen af gas og mikrobølger. Da en stor del af den anvendte energi kommer fra mikrobølger drevet af el, som potentielt kan stamme fra vedvarende energi, viser de udførte forsøg, at der er potentiale for at reducere forbruget af energi fra fossile brændsler med 40-45% ved omstillingen til delvis mikrobølgebaseret genbrænding.

2.4 Tilsætning af restmateriale til nye mursten

I arbejdspakke 1 er det desuden vist, at det restmateriale, som dannes ved adskillelse af murværk og genbrug af de hele sten, kan anvendes som erstatning for sand ved fremstilling af nye mursten. Restmaterialet består primært af genbrændt mørtel.

På baggrund af forsøg udført i mindre skala med varierede tilsætning af knust restmateriale til nye mursten, er der på teglværket udført et pilotskalaforsøg med fremstilling af 300 mursten med knust restmateriale. Dette forsøg har vist, at det uden optimering af råmateriale-blanding er muligt at tilsætte 5% knust restmateriale til nye tegl.

2.5 Udvikling af produktionsudstyr

Arbejdspakke 2 omhandler udvikling af produktionsudstyr til genbrændingen af nedrevne murværksbrokker. Rammen for udvikling af produktionsudstyr er, at ledig kapacitet på eksisterende batchovne, som anvendes til fremstilling af nye mursten, skal kunne udnyttes til genbrænding af nedrevne murværksbrokker. Der fokuseres således på udvikling og optimering af udstyr, som vil gøre det muligt let at omstille mellem den nuværende produktion af nye mursten og genbrænding af murværksbrokker.

I projektet er der udviklet en beholder til håndtering af nedrevne murværksbrokker under genbrænding. Beholderen har en størrelse, som gør den egnet til anvendelse i eksisterende ovne, og beholderen kan fyldes, placeres i ovn og tømmes med eksisterende løfteudstyr på teglværket. Den udviklede beholder har desuden en bund, som sikrer, at løse mørtelrester forbliver i beholderen og ikke falder ned på ovnens bund.

Grundet uforudsete revnedannelser i sten, som følge af genbrænding til højere temperaturer, er der ikke udført arbejde omkring udvikling af en automatiseret metode til fjernelse af de sidste mørtelrester på stenoverflader.

2.6 Udvikling af forretningsmodel

I arbejdspakke 3 udvikles en forretningsmodel for ydelsen, der består i adskillelse af murværk med stærke mørtler, klargøring af mursten til direkte genbrug samt nyttiggørelse af restmateriale til fremstilling af nye sten. Forretningsmodellen baserer sig på arbejdet udført i arbejds-pakke 1 og 2 samt på interview og workshop afholdt med repræsentanter fra nedrivningsbranchen samt arkitekter.

2.7 Fuldskalaforsøg

I arbejdspakke 4 var planlagt et fuldskalaforsøg. Da der som nævnt opstod uforudsete revnedannelser i mursten i forbindelse med genbrænding, kunne opskalering af resultater ikke opnås i arbejdspakke 1. Denne arbejdspakke med fuldskalaforsøg er således ikke gennemført.

3. Indledning og formål

Bygge- og anlægsbranchen i Danmark producerer store mængder affald. I 2017 skønnedes affaldsmængden af murværk og tegl at være omkring 450.000 tons. Det udgør $\approx 10\%$ af den samlede mængde byggeaffald. Murværk opført efter ca. 1955 kan, grundet mørtlens høje styrke, i dag kun genanvendes som vejfyld efter nedknusning. I projektet arbejdes med udvikling af en metode, som skal muliggøre adskillelse af murværk opført med stærke cementholdige mørtler og derved gøre direkte genbrug af murstenene muligt.

3.1 Genbrug og genanvendelse af murværksaffald i dag

Bygge- og anlægsbranchen producerer store mængder affald. Således blev der i 2017 registreret 4,5 mio. tons affald, hvoraf tegl og murværk udgør ca. 10% ¹. Inkluderet det ikke registrerede affald estimeres en årlig mængde på over 5 mio. tons. Den totale genanvendelsesprocent for bygge- og anlægsaffald i Danmark er høj og ligger på omkring 90% .

For murværk og tegl er knusning og anvendelse til vejfyld den fremherskende metode, og omkring $\approx 85\%$ af genanvendt beton, tegl og murværk bruges til vejfyld.

Med henvisning til affaldshierarkiet er genanvendelse til vejfyld en mere lavværdig genanvendelse (down-cycling) end direkte genbrug af hele mursten, der betragtes som up-cycling. Desuden begrænser materialets høje porøsitet, anvendelsen som vejfyld. Vejfyld indeholdende tegl kan, i modsætning til vejfyld baseret på ren beton, kun anvendes til veje med lav belastning. Afskaffelsen af nedrevet murværk som vejfyld, har i dag en omkostning på 53 til 74 DKK pr. tons afhængig af affaldets renhed (Kingo, 2019), svarende til årlig omkostning på omkring 25-30 mio. kroner for afskaffelse af nedrevet murværk i Danmark.

3.1.1 Mekanisk afrensning af mørtel

I dag foretages i mindre grad genanvendelse af hele mursten efter mekanisk adskillelse af mursten og mørtel samt efterfølgende rensning af mursten for fastsiddende mørtelrester. Denne mekaniske rensning er mulig for murværk opført før ca. 1955, hvor svage mørtler uden cement blev anvendt til opførelse af murværk i Danmark.

Mekanisk afrensning af mørtel foretages i dag enten ved håndrensning med hammer og mejsel eller ved automatiserede maskinelle metoder. En ulempe ved den eksisterende teknologi for automatiserede maskinelle metoder er dog et efterfølgende krav om manuel rensning til fjernelse af vedhængende mørtelrester fra stenene. Dette behov for manuel rensning medfører en mandskabskrævende arbejdsgang, som er fordyrende for processen og sætter begrænsninger i forhold til kapaciteten af en maskinel produktionslinje. Arbejdet er desuden grundet gener fra støj og støv belastende for arbejdsmiljøet.

Det skønnes, at der ved håndrensning kan renses ca. 250-1.000 sten pr. person pr. dag. Anvendes kombinationen af maskinel og manuel rensning produceres pr. produktionslinje i dag 5.500 – 8.500 sten pr. dag. En sådan produktionslinje suppleres af 2-3 personer, som foretager den manuelle efterrensning af de maskinelt rensede sten.

Desuden vil stenene ved maskinel afrensning få et meget patineret udseende, da mørtlen raspes af stenoverfladen. Herved fremstår genbrugsstenene med rustikt, slidt og afrundet look. Dette kan være en ulempe ved nogle anvendelser f.eks. i forbindelse med renovering eller tilbygning, hvor nyt byggeri, skal ligne eksisterende i udtryk.

¹ Affaldsdatasystemet, 7% af affaldsmængden udgøres af tegl og mursten, mens 11% udgøres af blandinger af beton, mursten, tegl og keramik. Samlet laves et estimat på ca. 10% murværk og tegl.

3.1.2 Murværk med stærke mørtler

Omkring 1955 blev det i Danmark udbredt at anvende cement i mørtler til opmuring af murværk. Cementen blev anvendt i kombination med kalk, og frem mod i dag er indholdet af cement i mørtlerne steget stødt. I dag er opmuringsmørtler baseret på cement som eneste bindemiddel meget populære.

Anvendelse af cement i mørtler til opmuring resulterer i mørtler med væsentlig højere styrke end de rene luftkalkmørtler, som man tidligere har anvendt. Murværk opmuret med cementholdige mørtler kan således ikke adskilles og afrenses for mørtelrester med den eksisterende teknologi. Det er således i dag ikke muligt direkte af genbruge mursten fra murværk opført efter perioden omkring 1955.

Det skønnes, at 50% af de nedrivninger, som foretages i dag, er bygninger fra efter 1955. I dag er det således kun halvdelen af det murværk, som rives ned, der har potentiale for genbrug med eksisterende metoder. Fremadrettet vil procentdelen af murværk opmuret med stærke mørtler, som nedrives stige. Udfordringer omkring manglende teknologier til genbrug eller højværdi-genanvendelse vil således fremadrettet kun blive større.

Flere initiativer omkring genanvendelse af murværk baseret på stærke mørtler er i gang. Her kan nævnes et demonstrationsprojekt omkring genbrug af murværkselementer (ca. 1 m x 1 m) udskåret fra facaden af eksisterende murværk fra bygninger under nedrivning. De udskårne elementer er bagstøbt med beton og anvendt som facadeelementer til nyt boligbyggeri. Dette projekt demonstrerer således en mere højværdig genanvendelse af murværk baseret på stærke mørtler end knusning til vejfyld. Dokumentation omkring kvalitet og CO₂-belastning vil dog skulle tilvejebringes før det endeligt kan vurderes, om sådanne metoder for genanvendelse kan finde generel udbredelse.

3.1.3 Økonomisk perspektiv

Tal fra brancheorganisationen Danske Tegl viser, at der i perioden fra 1955 til i dag er solgt omkring 8.500 mio. danskproducerede mursten i Danmark. Disse mursten indgår i byggeri opmuret med stærk cementholdig mørtel, hvorfor der med de nuværende dokumenterede metoder til adskillelse og rensning således ikke er potentiale for genbrug af disse sten til renovering og nybyggeri. Såfremt disse sten efter endt levetid skal genanvendes som vejfyld, vil det med de nuværende priser på afskaffelse af murværksaffald til vejfyld medføre en total omkostning på omkring 550 mia. DKK. Dertil skal lægges udgiften samt forbruget af primære råstoffer til produktion af nye mursten ved renovering eller ny-opførelse af murstensbyggeri. Nærværende projekt søger at komme med en mulig løsning på denne udfordring ved udvikling af en ny adskillelsmetode, som kan anvendes uafhængig af mørtlens styrke.

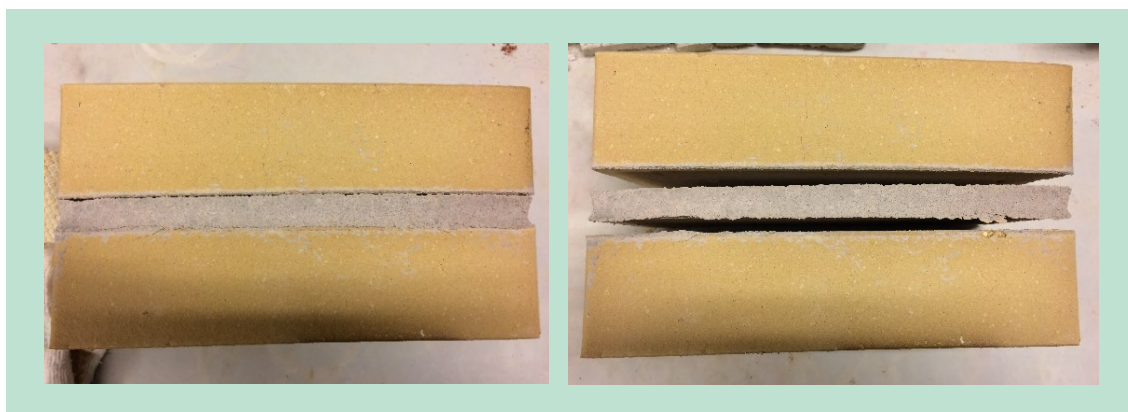
3.2 Formål

Formålet med nærværende projekt er udvikling af en ny og robust metode til adskillelse og rensning af mursten med henblik på at skabe grundlag for cirkulær økonomi baseret på affaldsstrømme fra murværksbyggeri. Metoden baseres på opvarmning af murværksbrokker udtaget fra eksisterende byggeri. Ved denne opvarmning nedbrydes mørtlens bindemiddel og mursten og mørtel kan adskilles. Desuden udnytter metoden, at cement og mursten udvider sig forskelligt ved opvarmning, hvilket forventes at være med til at lette adskillelsen af materialerne. Opvarmningen til adskillelse og rensning foregår under markant lavere energiforbrug end fremstillingen af nye sten. Metoden vil kunne anvendes til murværk baseret på både svage og stærke cementholdige mørtler. Et mål med metoden er ligeledes at eliminere behovet for manuel rensning af mørtelrester forud for genanvendelse.

Projektets idé bygger på tidligere undersøgelser udført på Teknologisk Institut. Her blev det ved et pilotprojekt vist, at genbrænding af murværksbrokker fra nedrivning af eksisterende byggeri kan være en anvendelig metode til adskillelse af mursten opmuret med svage kalk-

mørtler, men ikke til murværk baseret på cementholdige mørtler. Genbrændingen blev her foretaget i tunnelovne til fremstilling af nye mursten under de temperaturer, som normalt anvendes til fremstilling af mursten dvs. 1000-1050°C. Ved forsøgene sås revnedannelse i mursten fra murværk med cementholdige mørtler. Ved undersøgelser blev der ikke foretaget optimeringer omkring de anvendte temperaturer (Hansen, H, 1993).

Forsøg udført på murværksbrokker fremstillet i laboratoriet ved sammenmuring af to mursten har efterfølgende vist, at det er muligt at adskille brokker baseret på cementholdige mørtler ved opvarmning til temperaturer omkring 550°C. Dvs. ved væsentlig lavere temperaturer sammenlignet med det tidligere udførte projekt. Efter genbrænding var der ikke yderligere krav om manuel rensning af murstenenes flader forud for efterfølgende genbrug. De testede brokker baserede sig på forskellige typer af mursten. Test med adskillelse er foretaget 7 år efter opmuring. Disse forsøg er udført som 'proof of concept' til dette projekt. FIGUR 1 viser eksempel på gul maskinsten baseret på en kalkcementmørtel, KC 50/50/700 adskilt under 'proof of concept' forsøg ved opvarmning til 530°C.



FIGUR 1. Eksempel på murværksbrok baseret på cementholdig mørtel (kalkcementmørtel KC 50/50/700) adskilt ved 530°C ved 'proof of concept'-forsøg.

En hollandsk undersøgelse har ligeledes vist positive resultater omkring genbrug af mursten for murværksbrokker baseret på cementholdige mørtler opvarmet til 540°C. Her opnås for et enkeltstående pilotforsøg en genanvendelsesprocent for mursten på 45% (Van der Graaf, 2004). Det har ikke været muligt at finde eksempler for videre udvikling af eksperimentet udført i Holland.

Dette åbner således op for videre arbejde bl.a. omkring optimering af opvarmningsprocessen afhængig af anvendt mørteltype med henblik på at øge genanvendelsesprocenten, minimere energiforbrug til opvarmning og eliminere behovet for efterfølgende manuel rensning.

3.2.1 Miljømæssigt perspektiv

Fremstilling af nye mursten giver anledning til udledning af 0,492 og 0,651 kg CO₂ pr. mursten for hhv. røde og gul mursten (Københavns Kommune, 2016). Råmaterialerne til fremstilling af gule mursten indeholder kalksten, hvilket under opvarmning giver anledning til en direkte udledning af CO₂ fra råmaterialerne. Dette er årsagen til forskellen i CO₂ udledningen fra hhv. røde og gule mursten. Beregninger har vist, at genbrug af gamle mursten med de nuværende rensemetoder resulterer i en gennemsnitlig CO₂-udledning på 0,03 kg CO₂ pr. mursten. CO₂-udledning til transport er ikke medtaget i beregningen (Københavns Kommune, 2016). Miljøbelastningen er således markant reduceret ved genbrug af mursten efter mekanisk adskillelse af murværk sammenlignet med produktion af nye sten. Metodens anvendelighed er dog begrænset, da den ikke egner sig til murværk opført efter ca. 1955. Som nævnt udgør sådant nyere

murværk omkring halvdelen af de nedrivninger, som foretages i dag. Og procentdelen af nedrevet murværk, som ikke vil kunne adskilles med den eksisterende metode, vil fremadrettet stige.

Genbrænding af murværksbrokker i forbindelse med adskillelse og genbrug af mursten vil være energikrævende. Energiforbruget vil dog være markant reduceret i forhold til fremstillingen af nye sten grundet kortere brændingstid, lavere brændingstemperatur og fravær af energikrævende fasereaktioner, som finder sted under første brænding. Et præliminært førsteestimat på energiforbrug ved genbrænding, resulterer i et energiforbrug på omkring 5 MJ pr. sten sammenlignet med omkring 8-9 MJ pr. sten for nye gule og røde sten². Dette resulterer i en reduktion i udledningen af CO₂ på ca. 0,2 kg CO₂ pr. genbrugssten svarende til 30-40% sammenlignet med produktionen af nye sten. I projektet søges denne reduktion optimeret til 50% reduktion i energiforbruget. Foretages sammenligningen med nye mursten med grålige nuancer, vil reduktionen i CO₂-udledning være ca. 0,6 kg CO₂ pr. sten. Dette svarer til en reduktion af CO₂-udledningen på ca. 60%.

Ud fra den forventede CO₂-udledning alene, forventes adskillelse af murværk ved genbrænding ikke at kunne konkurrere med den eksisterende metode baseret på mekanisk adskillelse. Metoden vurderes således primært at kunne anvendes for murværk, som ikke kan adskilles med eksisterende teknologi.

3.2.2 Kombination af adskillelse og farveændring

Mursten med grålige farvenuancer har over de sidste år været meget populære blandt bygherrer og arkitekter. Gennemfarvede murstens i det gråsorte farvespektrum kaldes blå- og grådæmpede mursten. Disse fremstilles ved, at ny-producerede mursten efter den første brænding brændes en yderligere gang i reducerede atmosfære til en toptemperatur omkring 850°C. Denne yderligere brænding resulterer i en øget CO₂-udledning sammenlignet med sten i gule og røde nuancer, som kun er brændt én gang. Blå/grå-dæmpede mursten tilskrives således en CO₂-udledning på ca. 0,9-1,0 kg CO₂ pr. sten.

I projektet afdækkes mulighederne for at kombinere adskillelse af mursten med ændring i genbrugsstenenes farvenuancer fra gule og røde til grålige nuancer. En sådan kombination vil medføre fremstilling af nye produkttyper, som ikke eksisterer på markedet i dag.

3.2.3 Anvendelse af mikrobølger baseret på vedvarende energi

I projektet undersøges desuden mulighederne for at anvende en kombination af mikrobølgebaseret opvarmning og konventionel opvarmning baseret på fossile brændstoffer. Ved delvis anvendelse af mikrobølgebaseret energi, vil en andel af energiforbruget til genbrændingen kunne baseres på grøn energi, da mikrobølger genereres på baggrund af elektricitet. Omlægning af en andel af energiforbruget ved genbrændingen til mikrobølgeenergi baseret på vedvarende energi, vil give en yderligere reduktionen i CO₂-udledningen.

Forskellige materialer har forskellig modtagelighed over for mikrobølger. Det er således muligt, at anvendelse af mikrobølger, vil medføre selektiv opvarmning af nogle af murværkets materialer frem for andre. En sådan selektiv opvarmning kan, afhængig af hvilke materialer, som opvarmes mest, bidrage til en reduceret risiko for revnedannelse under genbrændingsprocessen. Dette undersøges i projektet.

² Estimat for opvarmning af brokker til 500°C i 1 døgn med 12.000 sten i batchovn og naturgasforbrug på 1000 m³. Blå-dæmpning af nye sten giver et yderligere CO₂-bidrag på 0,4 kg CO₂ pr. sten. For genanvendelsen regnes med en genanvendelsesprocent på 65%.

3.2.4 Anvendelse af eksisterende produktionsudstyr

Mursten med grålige farvenuancer kan i dag også fremstilles uden en ekstra brænding af de nyproducerede sten under reducerende betingelser. Ved påføring af engobe på overfladen af de tørrede sten forud for brænding, kan der opnås sten med grålige farver på de overflader, som er synlige i det færdige byggeri. Engobe er en vandig lerblanding. Ofte anvendes lerminerale, som efter brænding fremstår med en hvidlig farve. Engoberede sten brændes i modsætning til gennemfarvede grå sten kun én gang, hvorfor disse har et mindre CO₂-aftryk i forbindelse med produktionen. Engoberede sten har således de senere år opnået større popularitet, og flere teglværker har periodevis ledig kapacitet på de ovne, som bruges til fremstilling af de gennemfarvede grå sten.

I projektet undersøges således muligheden for at anvende disse eksisterende batchovne til genbrænding af murværksbrokker med henblik på adskillelse og genbrug af mursten.

I projektet arbejdes med koncepter for håndtering af murværksbrokker med irregulære størrelser samt med håndtering af de mørtelrester, som frigives ved nedbrydning af mørtlen under genbrænding. Fokus er således på optimering af eksisterende udstyr til at kunne veksle mellem den nuværende produktion af blå/grådæmpede mursten samt genbrænding af murværksbrokker.

3.3 Projektets hypoteser

Nedenfor ses de hypoteser, som ligger til grund for projektet

- I. Murværk opmuret med cementholdig mørtel kan adskilles ved genbrænding af murværksbrokker
- II. Farveændring af mursten til grålige nuancer kan kombineres med adskillelsen af murværk ved brænding af brokkerne under reducerende betingelser
- III. Anvendelse af kombineret mikrobølgeenergi og energi fra forbrænding af fossile brændsler vil kunne reducere CO₂-udledningen forbundet med genbrændingen
- IV. Restmateriale fra adskillelse af murværk og genbrug af hele sten kan tilsættes nye mursten som erstatning for sand
- V. Genbrænding kan foretages ved brug af eksisterende produktionsudstyr til blådæmpning af ny-producerede mursten på teglværk.

4. Optimerede opvarmningsprofiler (AP1)

Arbejdspakke 1 indeholder følgende aktiviteter:

- Udvikling af opvarmningsprofiler til genbrænding af murværksbrokker
- Vurdering af mulighed for kombination af adskillelse og farveændring af genbrugsmursten ved brænding under reducerende betingelser.
- Udførelse af genbrænding med kombineret gas- og mikrobølgebrænding.
- Vurdering af muligheden for genanvendelse af restmateriale fra processen som erstatning af sand til fremstilling af nye mursten.

Grundet udfordringer omkring revnedannelse i stenene under genbrænding er der desuden i et forsøg på at løse disse udfordringer arbejdet med årsagen til revnedannelse, udvikling af mere avancerede opvarmningsprofiler, yderligere neddeling af brokker forud for genbrænding samt selektiv opvarmning af delmaterialer ved ren mikrobølgebrænding.

4.1 Baggrund

Forud for udførelse af eksperimentelt arbejde, laves et teoretisk studie omkring adskillelse af murværksbrokker ved opvarmning og efterfølgende genbrug af de adskilte sten.

Det teoretiske studie omfatter undersøgelse af termisk nedbrydning af bindemidler i mørtel samt termiske længdeudvidelser i murværksmaterialer. Desuden undersøges mulighederne for at fjerne eventuel PCB-forurening i murværksmaterialerne under genbrændingen.

4.1.1 Termisk nedbrydning af bindemidler i mørtel

Som det fremgår ovenfor, har der i Danmark frem til omkring 1955, været tradition for at anvende rene kalkmørtler til opmuring. Omkring år 1955 blev det normalt at anvende stærkere mørtler indeholdende en blanding af kalk og cement. Her er både kalk (calciumhydroxid) og cement tilsat som bindemiddel. I dag anvendes i stort omfang også funktionsmørtler med cement som eneste bindemiddel.

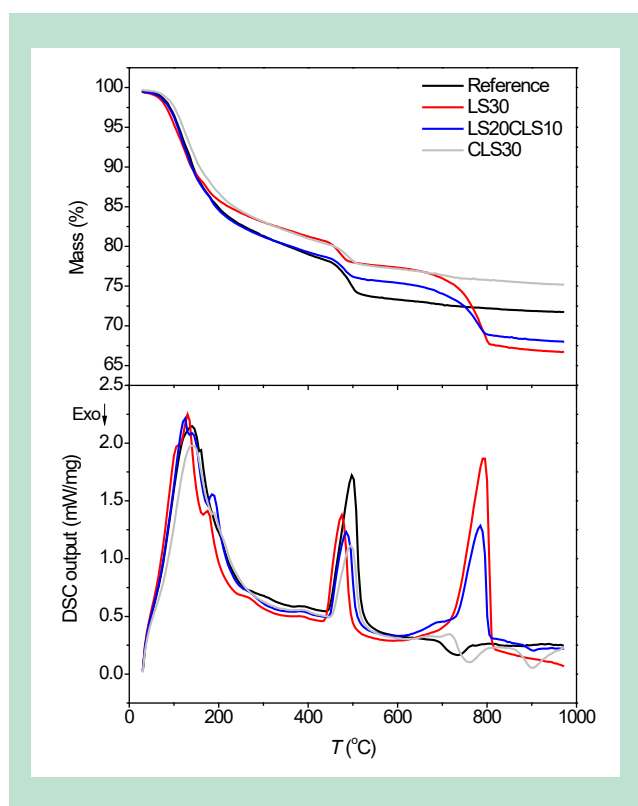
Rene kalkmørtler har relativt svag styrke, hvorfor murværk opmuret med rene kalkmørtler som nævnt kan adskilles ved en mekanisk rensning. Mørtler indeholdende cement har højere styrke, hvorfor disse ikke kan adskilles mekanisk. Generelt gælder, at stigende cementindhold i mørtlen giver stigende styrke.

Rene kalkmørtler opnår deres styrke, når calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagerer med CO_2 fra luften og carbonatiserer, hvorved CaCO_3 dannes. I cement udvikles styrken, når cementminerale reagerer med vand og hydratiserer. Herved dannes en række forskellige hydratfaser. De to primære hydratfaser er calciumsilikathydrat (CSH) og calciumhydroxid også kaldet Portlandite. Calciumhydroxid vil langsomt over tid reagere med CO_2 fra luften og danne CaCO_3 tilsvarende hærkning af kalkmørtler. En færdighærdet cement vil indeholde omkring 50-60% calciumsilikathydrat og 25-35% calciumcarbonat.

Ved opvarmning nedbrydes de styrkegivende komponenter, som er dannet under mørtlens hærkning. For cementholdige mørtler nedbrydes den primære styrkegivende komponent, CSH og evt. ikke-carboniseret calciumhydroxid ved temperaturer op til ca. 500°C . Calciumcarbonat (CaCO_3) nedbrydes ved temperaturer omkring $700-800^\circ\text{C}$ (Song et al., 2018, Moesgaard et al., 2012).

FIGUR 2 nedenfor viser termisk analyse af cementpasta dvs. blandinger af cement og vand hydratiseret i 90 dage. Den sorte kurve (reference) viser ren Portland cement, CEM I. I temperaturområdet op til 300°C ses et massetab på ca. 20% samt et bredt endothermt dsc-peak. Dette svarer til fordamning af vand fra porevæsken og frigivelse af vand ved nedbrydning af CSH og calciumaluminhydrat-faser. I området 440-540°C ses peak fra nedbrydning af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Portlandite). Grundet cementpastaens lave alder ses ikke et peak for nedbrydning af CaCO_3 ved højere temperaturer. Til de to prøver LS30 og LS20CLS10 er der tilsat kalkstenfiller. Her ses nedbrydning af dette i temperaturområdet 700-820°C.

Det forventes således, at opvarmning af murværksbrokker opmuret med cementholdige mørtler til temperaturer på 400-550°C vil resultere i nedbrydning af cementens styrkegivende komponenter. Dette forventes at medføre et markant styrketab af mørtlen, hvorefter murværket forventes at kunne adskilles. Eventuel kalk i mørtel forventes dog at bibeholde sin styrke til temperaturer omkring 800°C. Rene kalkmørtler vil således skulle opvarmes til en højere temperatur end cementholdige mørtler for at opnå nedbrydning af mørtlens styrkegivende komponenter.



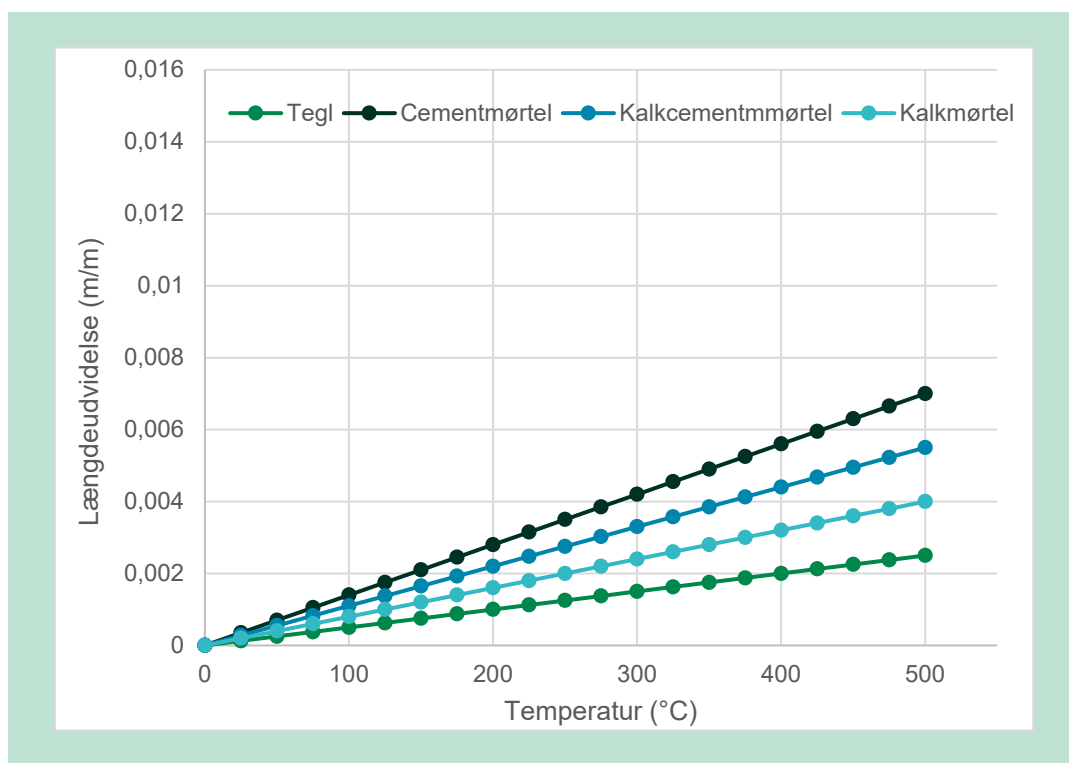
FIGUR 2. Termisk analyse af cementpasta hydratiseret i 90 dage. Den øverste graf viser termogravimetrisk data, mens den nederste graf viser differential scannings calorimetri data. Reference er ren Portland cement, CEM I, LS30 er en CEM1 blandet med 30% kalkstenfiller, LS20CLS10 er CEM1 blandet med 20% kalkstenfiller og 10% puzzolan, CLS30 er CEM I blandet med 30% puzzolan.

4.1.2 Termisk længdeudvidelse af murværksmaterialer

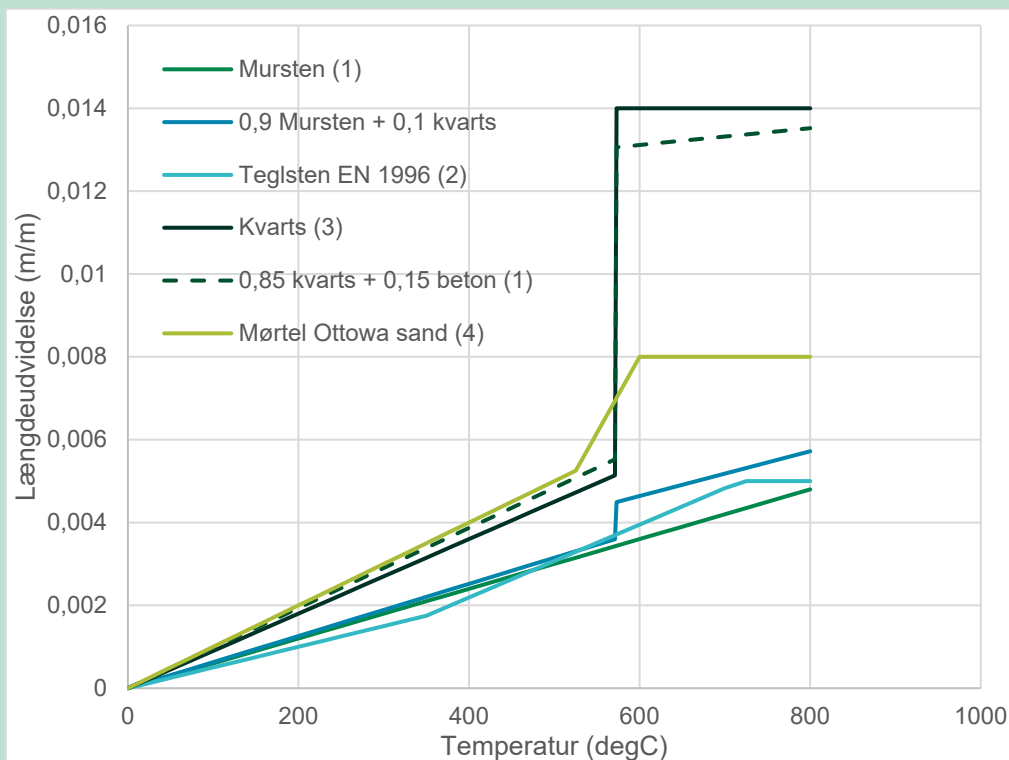
Når murværk opvarmes, sker der en længdeudvidelse af de forskellige materialer. Forskellige materialer må forventes at udvide sig forskelligt under opvarmning. Længdeudvidelsen bestemmes af materialets termiske udvidelseskoefficient, α . Længdeudvidelseskoefficienter opgives normalvis for temperaturer på 25°C, og afhængig af materialet kan det ikke nødvendigvis antages, at denne er konstant over et større temperaturinterval. F.eks. udvider kvarts sig omkring 1% ved faseovergangen fra α -kvarts til β -kvarts ved 572°C. Mørtel indeholder store

mængder kvarts, mens tegl ofte er tilsat mindre mængder af kvarts. Den termiske udvidelse af både mørtel og tegl må således forventes at være påvirkede af denne volumenudvidelse ved 572°C for kvarts.

I forbindelse med vurdering af afstanden mellem dilatationsfuger i murværk, anvendes værdier for lineære termiske udvidelseskoefficienter for hhv. tegl, cementholdig mørtel, kalkcementmørtel og kalkmørtel. FIGUR 3 nedenfor illustrer på baggrund af disse værdier længdeudvidelser i de fire materialetyper op til temperaturer på 500°C. Da de opgivne værdier ikke tager højde for volumenudvidelser ved kvarts faseovergang ved 572°C er kurven kun vist op til 500°C. Af figuren ses, at den største forskel i længdeudvidelse ses mellem tegl og cementholdig mørtel. Dvs. de største spændinger i murværk ved opvarmning må forventes for murværk med cementholdige mørtler. Dette stemmer overens med tidligere udførte forsøg med genbrænding af murværk fra nedrivninger ved temperaturer omkring 1000-1050°C. Her opstod omfattende revnedannelse i mursten fra murværk med cementholdig mørtel, mens samme grad af revnedannelse ikke sås i murværk baseret på ren kalkmørtel (Hansen, 1993).



FIGUR 3. Termiske udvidelse for murværksmaterialer til brug for vurdering af afstand mellem dilatationsfuger. Data anvendes for temperaturer lavere end 572°C dvs. under kvartspunktet.



FIGUR 4. Termiske længdeudvidelse for murværkmaterialer for temperaturer op til 800°C. Data baserer sig på følgende kilder: (1) Falk 1980 + Engineeringtoolbox.com, (2) DS/EN 1996-1-2:2007, (3) Bauleke, 1978 (4) Cruz & Gillen, 1980

FIGUR 4 ovenfor viser længdeudvidelse af mursten (blå/grønne kurver) og mørtel (sorte og gullige kurver) ved opvarmning til 800°C. Her er volumenuddvidelsen ved kvarts faseovergang taget med i betragtning. Den analyserede mørtel fra Cruz & Gillen, 1980 er baseret på Portland cement. Der ses tre kurver for hvert materiale. Forløbet af de tre kurver primært omkring kvartspunktet ses at variere afhængig af de anvendte kilder og beregningsmetoder. Overordnet ses dog overensstemmelse mellem kurvernes forløb.

Generelt gælder, at der må forventes en relativt stor pludselig længdeudvidelse for mørtel, omkring kvartspunktet ved ca. 572°C. Mens en mere langsom og konstant stigende længdeudvidelse forventes for teglet. Det betyder, at des højere opvarmningstemperatur des større er forskellen mellem længdeudvidelsen for hhv. tegl og mørtel især ved opvarmning over 572°C.

Denne forskel i længdeudvidelse af hhv. mursten og mørtel forventes at bidrage til udvikling af spændinger i materialet. Disse spændinger kan også bidrage til, at mursten og mørtel kan adskilles. Afhængig af sammenhængskraften i murværket, er der dog også en risiko for at disse spændinger kan forårsage revnedannelse i stenene. Dette vil have en negativ effekt på kvaliteten af de genanvendte sten. Såfremt mørtels sammenhængskraft er tilstrækkelig nedbrudt, grundet nedbrydning af cementens styrkegivende komponenter, og materialerne således har mulighed for at bevæge sig uafhængigt af hinanden, forventes spændingerne forårsaget af variation i længdeudvidelseskoefficienter ikke at give anledning til revnedannelse af teglet, men i stedet at bidrage positivt i forhold til at kunne adskille materialerne.

4.1.3 Sammensætning af gængse mørteltyper

Med murværksnormen i 1969 introduceres fire receptmørtler også kaldet kalkcementmørtler (KC-mørtler). Disse svarer i sammensætning til de tidligere anvendte bastardmørtler, hvor man på byggepladsen har blandet ren kalkmørtel med ren cementmørtel i forskellige forhold. I 2001 introduceredes de såkaldte funktionsmørtler, hvor producenten deklarerer en bestemt styrke af mørtlen og ikke er forpligtiget til at oplyse mørtlens sammensætning. Mange funktionsmørtler indeholder cement som eneste bindemiddel. En meget typisk funktionsmørtel er en M5 mørtel med en deklareret 28 døgns trykstyrke på 5 MPa. Undersøgelser af sådanne mørtler fra flere danske producenter har vist cementindhold på niveau med normmørtlen KC 20/80/550. TABEL 1 viser sammensætningen af de fire normmørtler.

TABEL 1. Sammensætning af normmørtler samt relation til trykstyrke jf. DS/INF 167:2015.

Normmørtel	Kalkindhold (%)	Cementindhold (%)	Bindemiddelindhold, totalt (%)	Sandindhold (%)	Minimum trykstyrke ^a (MPa)
KC 60/40/850	6,3	4,2	10,5	89,5	0,8
KC 50/50/700	6,3	6,3	12,5	87,5	0,9 ^b
KC 35/65/650	4,7	8,7	13,3	86,7	2
KC 20/80/550	3,1	12,3	15,4	84,6	4,5

^a MC – dvs. forsøg udført uden afsug fra mørtelprismer jf. DS/INF 167:2015.

Traditionelt er KC-mørtler fremstillet på byggepladsen ved tilsætning af cement til kalkmørtel. Blandingen udmåles som skovfulde. Denne procedure for fremstilling fører til, at den præcise sammensætning af kalkcementmørtler kan variere. Det vurderes, at den mest anvendte sammensætning for KC-mørtler til opmuring er mørtler som ligner KC 50/50/700 til KC 35/65/650.

Hvorvidt mursten og mørtel vil kunne adskilles efter opvarmning til temperaturer, hvor cementens styrkegivende komponenter nedbrydes forventes således ifølge afsnit 4.1.1 være afhængig af fordelingen mellem kalk og cement i mørtlen.

Hvad med hydrauliske kalkmørtler?

Ud over mørtler baseret på kalk (calciumhydroxid), cement eller en kombination af kalk og cement som bindemiddel, anvendes også mørtler baseret på hydraulisk kalk. Hydraulisk kalk består overordnet af en blanding af calciumhydroxid og det hydrauliske bindemiddel belite. Belite er også et af de primære hydrauliske mineraler i cement. Fra et materialeteknisk perspektiv svarer en hydraulisk kalkmørtel således til en kalkcementmørtel. Styrkeudviklingen af den hydrauliske del i hydraulisk kalk er dog væsentlig langsommere end for cement. Over tid kan en hydraulisk kalk dog udvikle styrker, som svarer til de klassiske cementholdige mørtler.

Mekanisk afrensning af murværk og genbrug af mursten med eksisterende metoder kan således ikke forventes for murværk baseret på hydrauliske kalkmørtler. Hydrauliske kalkmørtler kan i stedet i denne sammenhæng sidestilles med kalkcementmørtler.

4.1.4 Genbrænding sikrer PCB-frie materialer

PCB (polychlorede biphenyl) er en række miljøskadelige stoffer, der kan forekomme i byggematerialer i eksisterende byggeri. Stofferne er omfattet af EU's POP-forordning og der er derfor krav til kortlægning, sortering og bortskaffelse af PCB ifm. nedrivning og renovering. PCB blev tidligere brugt i byggematerialer såsom elastiske fuger, maling og termoruder, men herfra kan det brede sig til andre materialer i bygningen enten ved direkte kontakt (sekundær forurening) eller via luften (tertiær forurening).

Murværk er således ikke en primær kilde til PCB, men stoffet kan forekomme i murværk som sekundær eller terciær forurening i bygninger, som er opført eller renoveret i perioden fra ca. 1950, hvor PCB blev udbredt, til 1977, hvor al anvendelse af PCB i byggematerialer blev forbudt (Miljøstyrelsen, 2011). Da der i projektet netop arbejdes på en metode, som skal muliggøre genanvendelse af murværk opført fra ca. 1955 og frem vil det således være relevant at forholde sig til muligheden for PCB-forurening i materialerne.

Tidligere undersøgelser viser, at vandring af PCB i et materiale afhænger af materialets porøsitet, og i både tegl og mørtel aftager koncentrationen relativt hurtigt med afstanden til kilden (Teknologisk Institut, 2014). Målinger omkring PCB-holdige fuger viser således, at koncentrationen i både tegl og mørtel typisk er faldet til under grænseværdien for farligt affald (50 mg/kg) i en afstand af maks. 5 cm fra den PCB-holdige fuge, mens grænseværdien for rent affald (0,1 mg/kg) typisk er nået i omkring en murstens længde (228 mm). Typisk skal murværk i en halv til en hel stens bredde omkring vinduer og døre med PCB-holdige kalfatringsfuger derfor fjernes ifm. miljøsanering.

Mens den korte vandring af PCB i tegl og mørtel er en stor fordel i forhold til at frasortere de forurenede materialer, er den en udfordring i forhold til at dokumentere om materialerne er sorteret korrekt. Det er således vanskeligt at dokumentere om genbrugte mursten indeholder under 0,1 mg PCB-total/kg, som oftest vil være grænsen for, at materialerne kan genbruges direkte og uden forudgående rensning. Tilstedeværelsen af én mursten med PCB-indhold større end 100 ppm vil blandet i en bunke med 1000 PCB-frie mursten medføre, at hele bunken af mursten i gennemsnit har en PCB-indhold højere end grænseværdien for genanvendelse på 0,1 ppm. Denne udfordring kan løses ved genbrug af mursten efter genbrænding.

PCB afgives til luften ved gradvis afdampning selv ved stuetemperatur, hvilket er årsagen til den negative effekt på indeklimaet. Afdampningen er større ved højere temperatur, hvilket kan udnyttes til termisk rensning.

Termisk rensning udføres allerede in situ på PCB-forurenede bygninger, som ønskes bevaret, men har behov for rensning for at opnå et bedre indeklima. Her indgår den termiske behandling typisk som en del af saneringen efter de primære kilder er fjernet, og sekundære kilder eventuelt forseglet. Rensningen foregår ved at opvarme hele bygninger eller bygningsdele til omkring 60°C for at øge afdampningen. Parallelt med opvarmningen bortventileres PCB og fjernes fra inde-luften ved filtrering gennem kulfiltre. Ved denne metode tager rensninger uger til måneder.

I forbindelse med et tidligere MUDP-projekt (Miljøstyrelsen, 2019) har forsøg på Teknologisk Institut dog også dokumenteret muligheden for at fjerne PCB langt hurtigere, når der anvendes højere temperaturer. Ved forsøget blev borekerner med PCB-forurenede beton opvarmet med mikrobølger og samtidig blev ovnkammeret med boreprøverne ventileret. Prøverne blev opvarmet til omkring 200°C i 24 timer, og i det tidsinterval skete der en betydelig reduktion af PCB-koncentrationen, så der efter behandling ikke kunne måles indhold af PCB. Luftmålinger udtaget fra ovnkammeret under forsøget viser desuden at langt hovedparten af afgangningen sker inden for de første 2 til 4 timer. Dette er interessant i forhold til, at adskillelse af mursten og fuger vha. termisk nedbrydning af mørtlen potentielt kan medføre PCB-rensning af materialerne som sidegevinst.

Murbrokker kan derfor potentielt forvandles fra at være farligt affald til at kunne genbruges direkte for teglets vedkommende, og nyttiggøres som råmateriale i nye byggematerialer for den nedbrudte mørtels vedkommende.

Ved genbrænding af PCB-holdige murbrokker skal man dog være opmærksom på, at PCB'en ikke nedbrydes til uskadelige stoffer ved opvarmning. Ved afbrænding af PCB ved op til 900°C kan der dannes toksiske biprodukter, herunder dioxiner, furaner, nye PCB og hexachlorbenzen, som er skadelig for miljøet (og potentielt mere skadelige end den oprindelige PCB). Nedbrydning af PCB til disse skadelige stoffer øges kraftigt ved temperaturer over 250°C, hvorunder der primært sker en fordampning af PCB (Miljøstyrelsen, 2019). PCB'en skal således afgasses ved en temperatur under denne grænse på 250°C og opsamles i et filter.

Optimering af opvarmningsprofilen med henblik på at fjerne PCB vil således kræve, at der udføres kontrollerede forsøg med måling af emissioner som funktion af temperaturen ved genbrænding af PCB-holdigt murværk. Dette har ikke være inkluderet i dette projekt. Det må ligeledes forventes, at der bliver ændrede krav til rensning af røggasser, og at teglværket eventuelt skal godkendes som et anlæg til afbrænding af PCB-holdigt affald.

4.2 Udvikling af opvarmningsprofil

Arbejdet med udvikling af opvarmningsprofiler til genbrænding af murværksbrokker udføres i flere stadier. Først udføres systematiske brændinger i laboratorieskala. Her testes hvilken temperatur som kræves for adskillelse af små murværkselementer afhængig af mørteltype. Med baggrund i de udførte forsøg i lille skala udføres pilotskalaforsøg. Her inkluderes både forsøg på små murværkselementer fremstillet i laboratoriet samt på brokker fra nedrivning af murværk opført i 1993. Udfordringer med denne opskalering har efterfølgende ført til arbejde omkring mere avancerede opvarmningsprofiler.

4.2.1 Systematiske brændinger i laboratorieskala

Mulighederne for adskillelse af murværk opført med forskellige mørteltyper er undersøgt ved systematiske genbrændinger af 2 sammenmurede sten. Mellem de to sten er således en liggefuge. Der opmures sammenmurede sten med seks forskellige mørteltyper jf. TABEL 2. I tabellen er mørtlerne opgivet efter faldende cementindhold. Funktionsmørtlen M5 har cement som eneste bindemiddel, mens 9% bakkemørtel er en ren kalkmørtel indeholdende 9% kalk. De resterende fire mørtler er kalkcementmørtler med sammensætninger svarende til de 4 normmørtler (TABEL 1). Her ses varierende forhold mellem kalk og cement.

Efter en periode med hærdning af mørtlen brændes de sammenmurede sten i el-ovn. Der anvendes en opvarmningsrate på 50°C/time samt en holdetid ved toptemperaturen på 3 timer. Herefter slukkes ovnen.

TABEL 3 viser resultatet af de systematiske genbrændinger. Her markerer udfyldning af feltet med grøn, at genbrænding til den pågældende temperatur gav anledning til adskillelse af sten og mørtel, mens mørk grå markering angiver betingelser, som ikke gav anledning til adskillelse.

TABEL 2. *Oversigt over mørtler testet ved systematiske brændinger i laboratorieskala.*

Mørteltype
M5, funktionsmørtel (ren cementbaseret)
KC 20/80/550
KC 35/65/650
KC 50/50/700
KC 60/40/850
9% bakkemørtel (kalkmørtel)

TABEL 3. Oversigt over resultat af forsøg med systematisk genbrænding i laboratoriet. Udfyldning af felt med grøn angiver, at genbrænding til den pågældende temperatur gav anledning til adskillelse af sten og mørtel, mens udfyldning med grå angiver betingelser, som ikke gav anledning til adskillelse.

Temp. (°C)	M5	KC 20/80/550	KC 35/65/650	KC 50/50/700	KC 60/40/850	9% kalkmørtel
450				NPD	NPD	NPD
500						
550						
600						
650						
700				NPD	NPD	NPD
750				NPD	NPD	NPD
850				NPD	NPD	NPD

For de tre mørteltyper med lavest cementindhold KC 50/50/700, KC 60/40/850 og 9% kalkmørtel er der kun foretaget tests ved de temperaturer, som blev vurderet relevant. Relevansen er vurderet på baggrund af forsøg udført med de mest cementholdige mørtler.

Der gøres følgende observationer:

- 500°C er den laveste temperatur, som giver anledning til adskillelse af sten og mørtel. Her adskilles KC 50/50/700.
- Ved 550°C er det muligt at adskille både KC 50/50/700 og KC 35/65/650.
- Ved 600°C adskilles alle mørtler undtagen M5.
- M5 kan adskilles ved 750°C.

Da de styrkegivende komponenter i cement nedbrydes ved temperaturer mindre end 600°C, mens calciumcarbonat dannet ved hærdning af kalk først nedbrydes ved temperaturer større end 700°C, er det overraskende, at der kræves en højere temperatur for nedbrydning af M5 og KC 20/80/550 med højest cementindhold og lavest kalkindhold sammenlignet med KC 35/65/650 og KC 50/50/700.

En mulig forklaring kan være, at disse to mørtler også har det højeste totale indhold af bindemiddel af de undersøgte mørtler. Der ses således en tendens til at både fordelingen mellem de to bindemidler kalk og cement samt det totale indhold af bindemiddel har betydning for, ved hvilke temperaturer adskillelse af sten og mørtel bliver mulig.

Resultaterne viser, at mørtlerne KC 50/50/700 og KC 35/65/650, hvori både cement og kalk indgår i betydelige mængder, nedbrydes ved de laveste temperaturer. Disse mørtler nedbrydes ved lavere temperaturer end både mørtlerne med højere cementindhold og højere kalkindhold.

Ved opvarmning til temperaturer over 572°C passeres kvartspunktet (faseovergang fra α - til β -kvarts), hvor kvarts til stede i tegl og mørtler udvider sig ca. 1%. Modsat ses en volumenreduktion, når kvartspunktet passeres under nedkøling. Denne volumenreduktion af kvarts i teglet giver risiko for revnedannelse i stenene, hvis nedkølingen omkring kvartspunktet sker for hurtigt. Ved genbrænding af murværksbrokker med henblik på genanvendelse vil det derfor være en fordel, hvis genbrændingen kan foretages ved en temperatur under kvartspunktet, dvs. under 572°C.

Da størstedelen af de anvendte cementholdige opmuringsmørtler i perioden indtil omkring 2010 forventes at have sammensætninger omkring KC 50/50/700 og KC 35/65/650 vurderes

det fornuftigt at teste adskillelse af murværksbrokker i større skala ved 550°C. Ved denne temperatur var det muligt at adskille murværksbrokker baseret på både KC 50/50/700 samt KC 35/65/650.

Desuden udvælges genbrænding til 700°C også til test i større skala, da højere temperaturer giver anledning til adskillelse af flere mørteltyper.

4.2.2 Forsinket effekt af genbrænding – rehydratisering af mørtel

Under de systematiske brændinger af sammenmurede sten ses en overraskende effekt. For de sammenmurede sten, hvor KC 35/65/650 og KC 50/50/700 er anvendt som mørtel, er det for flere af genbrændingerne i temperaturintervallet 500-650°C umiddelbart efter nedkølingen af de sammenmurede sten ikke muligt at adskille sten og mørtel. Efter nogle dage, hvor de genbrændte sten er opbevaret i laboratoriet, er det dog muligt at adskille sten og mørtel.

For at bestemme årsagen til denne effekt laves test med bestemmelse af mørtlernes glødetab ved forskellige temperaturer med efterfølgende bestemmelse af masseoptag i mørtlerne ved henstand i laboratoriet. Til sidst bestemmes igen glødetab ved forskellige temperaturer. På baggrund af disse tests vurderes det, at årsagen til denne forsinkede effekt er, at de nedbrudte hydratiseringsprodukter fra cementen reagerer med fugt fra luften. Dvs. mørtlen rehydratiserer efter opvarmningen. Herved sker udvidelser i materialet, hvilket gør, at materialerne til sidst kan adskilles.

4.2.3 Pilotskalaforsøg

Hvis genbrænding skal finde anvendelse i praksis, kræves det, at metoden også fungerer på murværksbrokker af den størrelsesorden som en nedrivning typisk resulterer i. Da tegl og mørtel som tidlige beskrevet har forskellig termisk udvidelseskoefficient, er metodens skalerbarhed ikke umiddelbar. I forbindelse med de systematiske brændinger af 2 sammenmurede sten er kontaktfladen mellem tegl og mørtel således et plan (2D), mens den i større brokker er et netværk i 3D. Det stress, der opstår i materialerne under opvarmningen, vil derfor være sværere at forudsige for større brokker. Dette er tidligere beskrevet i afsnit 4.1.2.

Muligheden for at adskille større murværksbrokker ved genbrænding er derfor undersøgt ved forsøg i pilotovn. Til forsøgene er der anvendt murværksbrokker fra nedrivning af bygningsværk på Skejbyvej i Aarhus. Bygningen er opført i 1993. Kemisk analyse af den anvendte mørtel har vist, at der er tale om en kalkcementmørtel med et kalkindhold på 5-7% og et cementindhold på 9-10%. Mørtlen har således en sammensætning som ligger tæt op ad en KC 35/65/650. Den anvendte murstentype er en rød blødstrogen sten. De genbrændte brokker har en størrelse på 2-5 skifters højde. For at sikre test af effekterne med øgede spændinger i materialerne grundet større netværk af brokker, er der for hver brænding inkluderet brokker med minimum 3 skifter, jf. FIGUR 5.

Ved hver brænding er der desuden medtaget et udvalg af de sammenmurede sten med forskellige mørteltyper, jf. TABEL 2 med henblik på at underbygge resultater fra forsøgene i el-ovnen med et større datagrundlag.

Brændingerne er alle udført i pilotovn til teglbrænding på Teknologisk Institut med ca. 1 m³ brændkammer. Ovnens er udstyret med gasbrændere, som fyrer direkte ind i brændkammeret, hvor godset placeres. Ovnens er desuden udstyret med to mikrobølgegeneratorer, så det er muligt at opvarme godset med mikrobølgeenergi eller en kombination af gas og mikrobølger (Microwave-Assisted Gas Firing, MAGF). Effekten af mikrobølgerne er testet i en senere stadi af projektet (se afsnit 4.4 og 4.7). I de to brændinger beskrevet herunder er ovnen således anvendt til traditionel gasfyring.

Der blev udført to forsøg i pilotovnen med gasbrænding til hhv. 550°C og 700°C. Forsøgene blev udført med opvarmningsrate, holdetid og toptemperatur, som det er opsummeret i TABEL

4. Placeringen af murbrokkerne og de sammenmurede sten i ovnen er for hver af forsøgene er illustreret i FIGUR 5.

TABEL 4. Anvendte indstillinger i pilotskalaforsøg med gasbrænding.

ID	Opvarmningsmetode	Opvarmningsrate (°C/time)	Toptemperatur (°C)	Holdetid ved toptemperatur (timer)
Pilot-550	Gasfyring med to brændere	50	550	4
Pilot-700	Gasfyring med to brændere	50	700	4



FIGUR 5. Sætning i ovnen for de to pilotskalaforsøg med gasbrænding. Til venstre ses sætningen for forsøg Pilot-550 og til højre ses sætning for forsøg Pilot-700. Aftrækket til skorstenen ses bagest i ovnen.

Efter genbrænding blev det vurderet, om murstenene kunne adskilles fra mørtlen ved håndkraft, og om stenene havde taget synlig skade af brændingen.

For de sammenmurede sten fremstillet i laboratoriet er der ligeledes bestemt en succesrate for adskillelse. Denne succesrate er udregnet som antallet af mursten, der kunne skilles fra mørtlen divideret med det samlede antal mursten med den givne mørteltype. Resultaterne er opsummeret i TABEL 5.

TABEL 5. Oversigt over resultater omkring adskillelse af brokker fra laboratorieforsøg. Succesraten er angivet som andelen af mursten, der er adskilt fra mørtlen ud af det samlede antal mursten, som er testet med den givne mørtel.

Temp. (°C)	M5	KC 20/80/550	KC 35/65/650	KC 50/50/700	KC 60/40/850	9% kalkmørtel
500	0%	50%	0%	83%	100%	100%
700	75%	100%	100%	100%	100%	100%

Resultatet viser, at efter genbrænding til 550°C kan brokker med de tre svageste mørtler adskilles med stor succesrate. For tilsvarende brænding i el-ovn sås adskillelse af KC 50/50/700 og KC 36/65/650, men hverken stærkere eller svagere mørtler. Der er således ikke fuld overensstemmelse mellem resultaterne opnået ved brænding i el-ovn i laboratoriet og i pilotskala-ovn med gasfyring. 550°C vurderes således at være lige på grænsen for, hvornår der kan opnås adskillelse af de mest gængse kalkcementmørtler.

Resultatet af brændingen ved 700°C stemmer overens med resultaterne af de systematiske brændinger af enkelte prøver i elovnen. Her opnås med fuld succesrate adskillelse af alle KC-mørtler samt den rene kalkmørtel. Desuden opnås også relativ høj succesrate for adskillelse af den rene cementbaserede mørtel, M5.

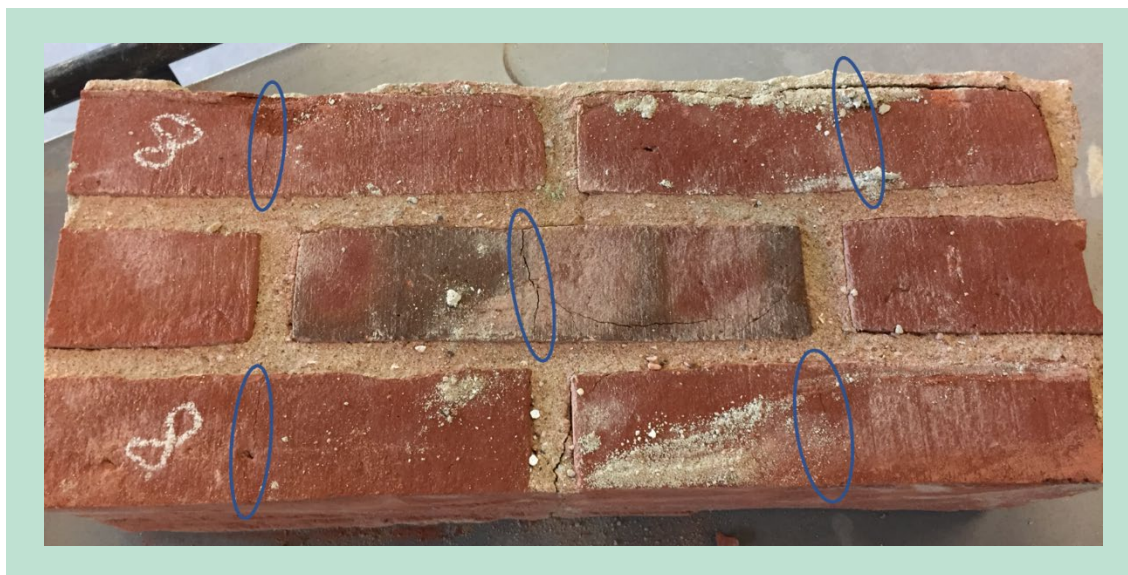
Samlet set peger resultaterne på, at genbrænding ved temperaturer omkring 700°C kan adskille alle receptmørtler og ren luftkalkmørtel, og at temperaturen muligvis bare skal hæves til 750°C for at adskille funktionsmørtel M5 med høj succesrate.

Tilsvarende evaluering af lavet for de større brokker fra nedrivning af murværk fra 1993 på Skejbyvej, Aarhus. Dvs. efter hver brænding blev det vurderet, om murstenene kunne adskilles fra mørtlen ved håndkraft, og om stenene havde taget synlig skade af brændingen. Resultaterne for adskillelse af brokker fra nedrivning af bygning fra 1993 ses i TABEL 6.

TABEL 6. Oversigt over resultater omkring adskillelse af brokker fra bygning fra 1993.

Temperatur (°C)	Adskillelse	Skader på mursten
550	Ikke mulig ved håndkraft	Der er revner på tværs af en stor del af murstenene – fortrinsvis ud for studsfugerne.
700	Brokkerne er sammenhængende, men de fleste sten kan adskilles ved håndkraft	Der er revner på tværs af murstenene ud for samtlige studsfuger. I enkelte sten er der også revner ved hjørner og kanter.

Forsøgene viser, at brokkerne kan adskilles efter genbrænding ved 700°C men ikke ved 550°C. Der er dog opstået revner på tværs af hovedparten af murstenene allerede ved 550°C og alle murstenene ved 700°C, og det er således ikke lykkedes at adskille nogen hele mursten. FIGUR 6 viser revnedannelse i murværksbrok genbrændt ved 700°C. Af figuren ses, at revnedannelsen sker ud for studsfuger. Dette er det generelle billede for revnedannelse i brokkerne. Årsagen til den observerede revnedannelse samt muligheder for at undgå revnedannelsen beskrives nærmere i afsnit 4.6.



FIGUR 6. Eksempel på brok opvarmet til 700°C (forsøg DG-04). De blå ringe markerer revnedannelse i stenene grundet opvarmningen.

4.3 Adskillelse og farveændring

Brænding af mursten under reducerende betingelser resulterer i reduktion af jernforbindelser i teglet, hvilket resulterer i en farveændring fra de traditionelle gule og rødlige nuancer af tegl til grålige og sorte nuancer. Genbrænding under reducerende betingelser åbner op for mulighederne for at kombinere direkte genbrug af mursten med fremstilling af et nyt produkt; genbrugssten med grålige nuancer.

Produktion af nye mursten med grålige nuancer foregår, som nævnt ovenfor, ved at gule eller røde sten efter normal produktion udsættes for endnu en brænding under reducerende betingelser. Her opvarmes stenene batchvis til en toptemperatur på ca. 850°C. Processen med brænding af mursten under reducerede betingelser kaldes for dæmpning. Under dæmpningen bliver de sorte og grålige sten gennemfarvede.

Der foretages forsøg med genbrænding af brokker under normal blådæmpningsproces. Der genbrændes brokker baseret på hhv. røde, rosé og gule mursten for at opnå sten med varierende sorte og grålige nuancer. FIGUR 7 viser stenene genbrændt under reducerende betingelser sammen med sten med de oprindelige farver.

Det ses, at der ved genbrænding under reducerende betingelser er opnået sten med grålige nuancer lignende dem, der dannes, når nye sten blådæmpes. De gule sten får ved blådæmpning en lys, grålig farve, mens de røde sten får en næsten sort farve. De rosé farvede sten, får en grå farve med en nuance imellem den lyse grå og den næsten sorte.



FIGUR 7. Indledende forsøg med brænding af genbrugsmursten under reducerende betingelser for ændring af stenenes farve.

Kombinationen af adskillelse og farveændring testes desuden i større skala. Her udføres et forsøg med blådæmpning af brokker fra Skejbyvej, Aarhus. Brokkerne før blådæmpningen ses i FIGUR 8 nedenfor.

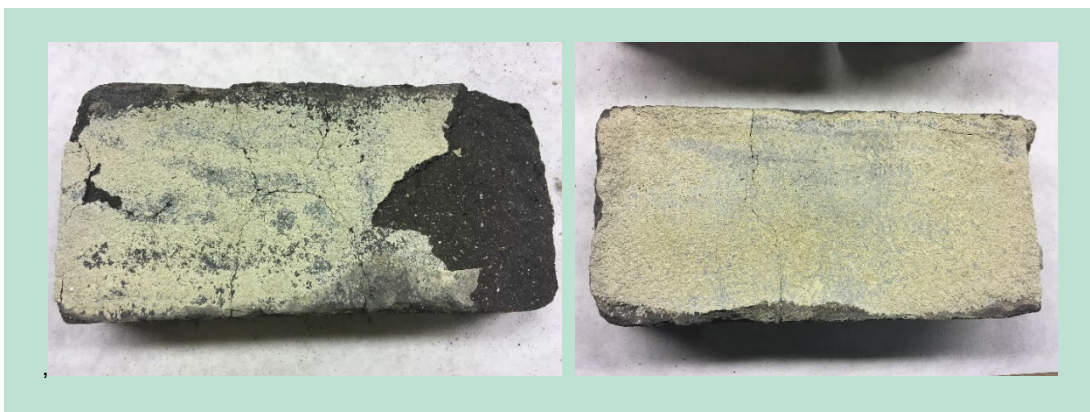
Efter genbrændingen er mørtlen nedbrudt og smuldrende og kan let fjernes fra stenene. Dog ses revnedannelser på tværs af de fleste sten, jf. FIGUR 9 og FIGUR 10 nedenfor. Revnedannelses ses primært ud for studsfugerne. Da flertallet af stenene er revnet, er der ikke lavet en yderligere optælling af adskilte sten.



FIGUR 8. Murværksbrokker fra Skejbyvej, Aarhus til genbrænding under reducerende betingelser.



FIGUR 9. Murværksbrokker fra Skejbyvej, Aarhus efter blådæmpning.



FIGUR 10. Liggeflader af brokker genbrændt under reducerende betingelser til toptemperatur på 850°C. Der ses revnedannelse i begge sten.

De udførte tests har således vist, at det er muligt at ændre farveudtrykket af mursten fra nedrivning af eksisterende byggeri ved brænding under reducerede betingelser.

Ved dæmpning af røde, gule og rosé mursten vil man, jf. FIGUR 7 ovenfor, opnå en grundfarveskala i gråsorte nuancer. Man kan samtidig forvente at mursten i ældre murværk har en uens brændingsgrad og derfor vil dele eller hele sten ikke nødvendigvis opnå den forventede farve i skalaen gråsort. Sten med relativ lave brændingsgrader vil typisk opnå følgende farver ved dæmpning:

- Røde sten vil typisk have brune nuancer
- Reducerede røde sten vil ligeledes forblive brunlige
- Gule sten vil delvist forblive gule
- Reducerede gule sten vil forblive gulgrønne
- Rosé farvede sten vil dels blive brunlige og dels bibeholde den rosé farve.

Desuden må variation i fugtindhold i de sten som genbrændes under reducerende betingelser forventes at have effekt på det opnåede farveudtryk.

Resultatet kan derfor være en gråsort grundtone iblandet mange forskellige farvenuancer. Og der må således forventes et større spænd i nuancerne sammenlignet med nyproducerede dæmpede mursten.

4.3.1 Dæmpning ved lavere temperaturer

Som det var tilfældet ved skalering til pilotskala for brændinger under oxiderende betingelser, ses også for disse brændinger under reducerende betingelser omfattende revnedannelse i stenene, når der udføres tests for større murværksbrokker. En forstærkende årsag til denne revnedannelse kan være, at de udførte genbrændinger under reducerende betingelser er udført under normale dæmpningsbetingelser for nye mursten. Dvs. ved opvarmning til en toptemperatur på ca. 850°C.

Som tidligere nævnt vil genbrændingstemperaturer større end 572°C, hvor kvarts ændrer krystalstruktur, medføre øgede spændinger i materialet (FIGUR 4). Dette kan give en øget risiko for revnedannelse i murstenene. Genbrænding ved en lavere temperatur kan således forventes at reducere risikoen for revnedannelse. Desuden vil genbrænding ved lavere temperatur give et lavere energiforbrug til processen. I det følgende undersøges hvorvidt det er muligt at reducere toptemperaturen under dæmpningsprocessen.

Dæmpning foretages traditionelt ved opvarmning af fuldblændte sten til 800-850°C under oxiderende betingelser. Ved 800-850°C lukkes for lufttilførslen til ovnen, mens der fortsat tilføres naturgas. Her forbruges først ilt i atmosfæren, dernæst ilt bundet til Fe³⁺ i teglmaterialet.

Herved reduceres Fe^{3+} til Fe^{2+} . Resultatet er en farveændring af stenene fra rød til sort og gul til grå.

Ved indfrysning af overskud af naturgas i ovnen fungerer gassen samtidig som kølemiddel. Når temperaturen er faldet til ca. 720°C erstattes naturgassen med kvælstof, som også fungerer som kølemiddel og samtidig hindrer kvælstof-atmosfæren, at ilt kan tilføres ovnen. Kvælstofilt-sætningen sikrer således, at ovnen tømmes for naturgas, før der sker en ilttilførsel. Ved ca. 550°C er de reducerede faser i stenene nu så stabile, at det er muligt at køle videre med luft uden der sker en oxidation, hvor farven vil skifte tilbage til hhv. rød og gul.

Der er flere årsager til den valgte brændingstemperatur ved dæmpning. Dels skal dæmpningstemperaturen være over ca. 700°C for at undgå grafitdannelse på produkterne, dels forløber faseændringerne i materialet hurtigere ved høje temperaturer.

Erfaringsmæssigt har det vist sig, at grafitdannelse af uforbrændt kulstof (soddannelse) sker i temperaturområdet $600\text{-}700^\circ\text{C}$. Dette er i overensstemmelse med teorien vedr. Boudouard-reaktionen. Iflg. Boudouard-reaktionen dannes en ligevægt med 2 CO og $\text{CO}_2 + \text{C}$ omkring 650°C ved overskud af kulstof. I relation til dæmpningsprocessen skal dæmpningstemperaturen, hvor man har overskud af gas i ovnen, derfor være over minimum 650°C for at hindre der afsættes sod/grafit på produkterne. Da gassen fungerer som "kølemiddel", bør dæmpningstemperaturen således ikke være under 700°C . Det vil således ikke være muligt at foretage genbrændinger under reducerende betingelser ved temperaturer under kvartspunktet (572°C).

4.4 Anvendelse af delvis mikrobølgebaseret energi

Anvendelse af mikrobølger er blandt de mulige løsninger, når teglindustrien skal omstilles til vedvarende energi. Tidligere forsøg på Teknologisk Institut har vist, at man med en kombination af traditionel gasfyring og opvarmning med mikrobølger drevet af el fra vedvarende energikilder, kan opnå en væsentlig reduktion af CO_2 -udledningen til teglproduktion. Det er derfor muligt, at fremtidens teglværker anvender en kombination af gas og mikrobølger, også kaldet Microwave-Assisted Gas Firing (MAGF).

For at undersøge effekten ved en kombination af gas og mikrobølgeopvarmning ifm. genbrænding af murbrokker, er der derfor udført to forsøg med MAGF-teknologien. Forsøgene er udført med opvarmningsrate, holdetid, toptemperatur, godstype og mængde, der så vidt muligt svarer til de to pilotforsøg med gasbrænding, således eneste forskel er, at gasbrændingen suppleres af mikrobølger. Indstillinger er opsummeret i TABEL 7.

TABEL 7. Anvendte indstillinger i pilotskalaforsøg med Microwave-Assisted Gas Firing (MAGF).

ID	Opvarmningsmetode	Opvarmningsrate ($^\circ\text{C}/\text{time}$)	Toptemperatur ($^\circ\text{C}$)	Holdetid med toptemperatur (timer)
MAGF-550	MAGF	50	550	4
MAGF-700	MAGF	50	700	4

Efter forsøgene blev det vurderet, om murstenene kunne adskilles fra mørtlen ved håndkraft samt hvorvidt stenene havde taget synlig skade af brændingen. Vurderingen blev foretaget på samme måde som ved de traditionelle gasbrændinger beskrevet i afsnit 4.2.3.

For de sammenmurede sten fremstillet i laboratoriet er succesraten ved hhv. traditionel gasbrænding og MAGF-brænding sammenlignet i TABEL 8. Heraf ses det, at der ved brændingerne foretaget ved 550°C er opnået meget sammenlignelige resultater med gas og MAGF. Ved 700°C har succesraten ved MAGF derimod været lavere end ved den traditionel gasbrænding. Årsagen kan være, at mikrobølger opvarmer materialerne forskelligt afhængig af materialernes dielektriske egenskaber. Der kan dermed være opnået forskellig temperatur i

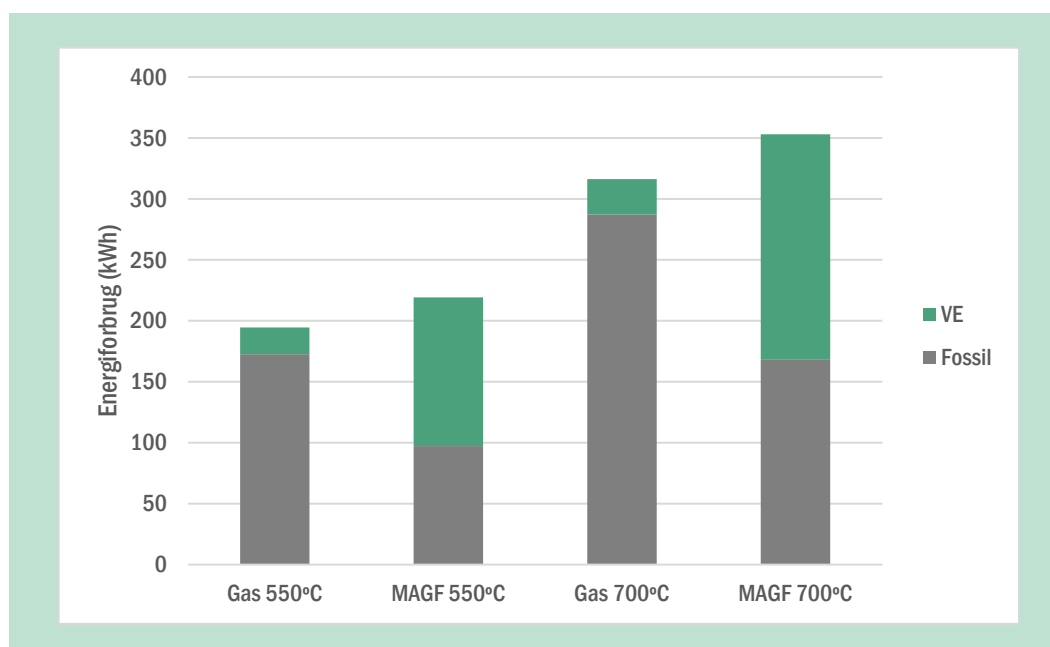
tegl og mørtel, og dermed også andre spændinger i brokkerne. I afsnit 4.7 afsøges om dette kan udnyttes til en fordel.

TABEL 8. Sammenligning af succesrater for adskillelse ved traditionel gasbrænding og delvis mikrobølgebrænding (MAGF). Succesraten er angivet som andelen af mursten, der er adskilt fra mørtlen ud af det samlede antal mursten som er testet med den givne mørtel. Succesraten er baseret på brokkerne, der er fremstillet i laboratoriet.

Temperatur	Type	M5	KC 20/80/550	KC 35/65/650	KC 50/50/700	KC 60/40/850	9% kalk
550	Gas	0%	50%	0%	83%	100%	100%
550	MAGF	0%	67%	0%	100%	100%	100%
700	Gas	75%	100%	100%	100%	100%	100%
700	MAGF	50%	50%	50%	100%	100%	100%

For de større brokker fra nedrivning af murværk på Skejbyvej i Aarhus er resultaterne fra den traditionelle gasbrænding og MAGF-brændingerne sammenlignelige. For begge brændinger ved 700°C er mørtlen således smuldrende og mursten og mørtel er lette at skille ad ved håndkraft. Dog ses revner på tværs af murstenene ud for samtlige studsfuger. For begge brændinger ved 550°C gælder, at murstenene ikke kan adskilles fra mørtlen ved håndkraft.

En sammenligning af energiforbruget ved hhv. gasbrændinger og MAGF-brænding (FIGUR 11) viser, at der vha. mikrobølger kan være potentiale for at omstille processen til vedvarende energi, hvis udfordringer med revner i murstenene kan løses. Sammenligningen viser, at det samlede energiforbrug til brændingen ved 550°C og 700°C er steget med hhv. 12% og 13% ved suppleret med mikrobølger, men gasforbruget er samtidigt reduceret med hhv. 44% og 41%. Hvis strømforbruget til mikrobølgegeneratorene dækkes af vedvarende energi, er forbruget af fossile brændsler dermed reduceret tilsvarende.



FIGUR 11. Energiforbrug fordelt på hhv. fossil energi (gasforbrug til gasbrændere) og vedvarende energi, VE (el, primært til mikrobølgegeneratore og blæser til forbrændingsluft) i de fire brændinger på pilotskala udført ved 550°C og 700°C og hhv. konventionel gasbrænding, og kombineret gas- og mikrobølgebrænding, MAGF.

4.5 Restmateriale i nye mursten

Ved direkte genbrug af hele mursten fra murværk dannes også restmateriale, som ikke finder anvendelse ved direkte genbrug. Dette restmateriale består af den afrensede mørtel samt skadede mursten.

Mørtel udgør 20-25% af murværk, og hele denne fraktion af mørtel vil gå til restmateriale.

Mængde af tegl i restmateriale vil afhænge af genanvendelsesprocenten for hele sten. I dag anvendes tegl f.eks. fra fejlproduktioner allerede som tilsætning til fremstilling af nye tegl. Her kan teglet erstatte sand, som ellers tilsættes som magringsmiddel. Det er således kendt, at knuste og formalede teglrester uden videre vil kunne tilsættes ved fremstilling af nye tegl. Ved erstatning af sand med knust tegl kan indholdet af kvarts i teglet reduceres, hvilket mindsker risikoen for revnedannelse bl.a. grundet faseovergangen af kvarts ved 572°C.

Tilsætning af brændt mørtel til råmaterialeblandingen vil antageligt give udfordringer med fremstilling af tegl. Er den brændte mørtel ikke formalet tilstrækkelig fint, vil der være risiko for dannelse af kalkspringere i det færdige produkt. Desuden vil tilstedeværelsen af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i den brændte mørtel påvirke bearbejdigheden af lerblandingen. Tidligere erfaringer har vist, at blot 0,2% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i en lerblending bevirker, at denne bliver stiv og svær at arbejde med under formgivningen af tegl.

Forsøg omkring tilsætning af restmateriale til nye mursten udføres i to trin. Først i mindre skala i laboratoriet med fremstilling af nedskalerede teglemner og dernæst i større skala på teglværket med fremstilling af 300 mursten med restmateriale.

4.5.1 Forsøg i laboratorieskala

Da den kritiske parameter omkring genanvendelse af restmaterialet netop er kalkindholdet i mørtlen og ikke rester af tegl, udføres forsøg med tilsætning af brændt mørtel til produktion af nyt tegl. Resultaterne, opnået med den rene brændte mørtel, vil således give en sikkerhedsmargin, når det faktiske restmateriale skal anvendes.

Til forsøget anvendes en KC 50/50/700 mørtel. Forud for genbrænding har mørtlen hærdet 3 måneder. Mørtlen brændes ved toptemperatur på hhv. 550°C og 850°C. For mørtlen brændt ved 850°C er calciumcarbonat nedbrudt til calciumhydroxid, mens denne reaktion ikke har fundet sted for mørtlen brændt ved 550°C. Den brændte mørtel nedknuses i valseværk med spaltebredde på 3 mm. De to nedknuste materialer sigtes på 1 mm sigte. Mørtlen brændt ved 850°C har en sigterest på 15% på 1 mm. Mørtlen brændt ved 550°C har en sigterest på 30% på 1 mm. Sigteresten på 1 mm sigten reduceres til 15% for mørtlen brændt ved 550°C. Dette gøres ved at sigte halvdelen af den brændte mørtel og kassere sigteresten. Herved opnås to materialer med en sigterest på 15% på 1 mm.

For hvert restmateriale fremstilles lerblandinger med hhv. 5, 10 og 15% brændt mørtel. Det anvendte ler er ren rødler. Under normal teglproduktion tilsættes 5-7 vol% sand til leret. I forsøgene erstattes dette sand af brændte mørtelrester.

Ved blanding tilsættes vand til formbar konsistens. Desuden vurderes lerblandingskonsistens ved indtryk med Mertz kegle. Vandindholdet i de forskellige sten bestemmes ved at veje de formede sten før og efter tørring.

Tilsætning af mørtel brændt ved 550°C har en lille effekt på vandbehovet. Generelt er anvendt mindre vand til blandingen med stigende indhold af mørtel brændt ved 550°C. Ved tilsætning af mørtel brændt ved 850°C ses vandindholdet derimod at være stigende med stigende mørteltilsætning. Her stiger det anvendte vandindhold fra 18,8% i referenceblandingen til 22,8% i blandingen med 15% mørtel.

Efter fremstilling tørres og brændes stenene sammen med produktionen af almindelige røde sten på teglværket.

FIGUR 12 nedenfor viser de fremstillede teglsten med indhold af brændt mørtel. Generelt gælder, at selve formgivningsprocessen med tilsætning af ler til formene ved håndkraft har været

mangelfuld. Derfor ses lagdeling og revnedannelse i stenene. Alle blandinger giver dog anledning til en sammenhængende sten med en given styrke.



FIGUR 12. Fremstillede sten med restmateriale i form af brændt mørtel. Øverste række viser serien med tilsat mørtel brændt ved 550°C. Nederste række viser serien med tilsat mørtel brændt ved 850°C. For begge serier gælder, at emnet længst til venstre er referencen med ren ler - herefter ses stigende indhold af brændt mørtel fra venstre til højre med 5, 10 og 15%.

For testserien med tilsætning af mørtel brændt ved 550°C ses stigende tilsætning af mørtel at give anledning til et mere plettet udtryk med gullige partikler i den røde teglmatrix. Kvaliteten af blandingen med 5% mørtel vurderes at være sammenlignelig med reference uden mørteltilsætning. For blandinger med 10% og 15% brændt mørtel er emnerne mere sprøde, og cylindernes kanter kan relativt let brækkes af.

For testserien med tilsætning af mørtel brændt ved 850°C ses, at selve teglmaterialet får en gullig farve ved tilsætning af den brændte mørtel. Farven bliver mere gul ved stigende indhold af brændt mørtel. Her vurderes materialet fra blandingen med 5% brændt mørtel at være lidt sprødt, mens materialet fra blandingerne med 10% og 15% brændt mørtel vurderes mere sprødt og med nedsat styrke.

Forskellen i farvefremtoningen af de fremstillede teglemner afhængig af, om mørtel forud for blanding er brændt ved 550°C eller 850°C viser, at typen og graden af reaktion mellem tegl og brændt mørtel afhænger af denne temperatur.

På baggrund af de udførte test i lille skala vurderes potentialet for tilsætning af det brændte restmateriale til fremstilling af nye tegl at være lovende. Ved blanding i større skala vil selve blandingen af materialerne samt formgivningsprocessen være markant bedre end for disse forsøg. Dette forventes at føre til en bedre materialekvalitet. Ved tilsætning af restmateriale til nye tegl må der dog stadig forventes en effekt på fremtoning af materialet.

4.5.2 Forsøg i pilotskala

Med udgangspunkt i forsøgene udført i laboratorieskala laves på teglværket et forsøg i større skala med tilsætning af restmateriale til nye tegl. På baggrund af de udførte forsøg fremstilles tegl med 5% tilsat brændt mørtel.

Til forsøget anvendes murværksbrokker med både gule og røde blødstrøgne sten. Brokkerne er fra udstillingsmure på teglværket. Murerne stammer fra perioden 2000-2008. Analyse af

mørtlen har vist en sammensætning omkring KC 35/65/650. Brokkernes brændes i prototype på beholder til blådæmpningsovn udviklet og fremstillet under AP2, afsnit 5.2. Brokkerne brændes med normal temperaturprofil for blådæmpning dvs. til en toptemperatur på 850°C og under reducerende betingelser. Efter genbrænding af brokker adskilles sten og mørtel manuelt. Mørtlen anvendes som det restmateriale, der tilsættes til fremstilling af nye tegl. **FIGUR 13** på næste side viser billeder fra fremstillingen af mursten med restmateriale.

Med baggrund i de tidligere udførte forsøg i lille skala besluttet det at tilsætte 5% brændt mørtel til leret. Lerblandingen er desuden tilsat sand som magringsmiddel (5-7vol%). Der blandes ca. 1000 kg råmaterialeblanding. Blandingen tilberedes i ælter under tilsætning af vand. Ælteren giver en væsentlig bedre opblanding end blanding i røremaskine udført under forsøg i mindre skala. Der fremstilles 50 sten baseret på ren rødler samt 300 sten baseret på blandingen med 5% restmateriale. Stenene tørrer i 8 døgn og brændes derefter i tunnelovn med den almindelige produktion af røde sten. **FIGUR 13** viser nederst en fremstillet sten.

Med baggrund i de udførte forsøg, kan det konkluderes, at det er muligt at tilsætte restmateriale fra processen med adskillelse af murbrokker og genbrug af hele sten under fremstilling af nye mursten. 5% brændt mørtel kan tilsættes til røde sten, hvor der allerede er tilsat sand. Hvis sandet udelades vurderes 8-10% mørteltilsætning af være realistisk. Såfremt restmaterialet indeholder tegl, og ikke er ren mørtel vil et endnu højere indhold af restmateriale kunne anvendes.

Tilsætning af restmateriale til fremstilling af nye mursten



FIGUR 13. Billeder fra fremstilling af nye mursten med tilsætning af restmateriale. Forsøgene er udført hos Bachmanns Teglværk. Øverst ses arbejde med opdeling af udstillingsmur forud for genbrænding. Murbrokker i beholder fremstillet i AP2 genbrændes. Adskillelse af mørtel og sten fra genbrændte murbrokker. Midterst ses arbejde med klargøring af ælter til tilberedning af lerblanding. Igangværende tilberedning af lerblanding. Nederst ses fremstillet mursten med 5% restmateriale.

4.6 Nærmere undersøgelse af revnedannelse

Systematiske undersøgelser i laboratoriet med adskillelse af to sammenmurede sten giver positive resultater. De udførte forsøg viser en systematik i muligheden for adskillelse af stenene i forhold til temperatur for genbrænding og sammensætning af mørtlen. Efter udførelse af de systematiske undersøgelser i laboratorieskala opsættes forsøg i pilotskala til eftervisning af de opnåede resultater. Disse tests udføres på brokker fra nedrivning af bygningsværk fra 1993 på Skejbyvej i Aarhus. Under denne opskalering opstår uforudsete forhold, da det ikke er muligt at adskille de opvarmede brokker uden, at der opstår revnedannelse i stenene. I det følgende beskrives tiltag for at forstå, hvorfor revnedannelse opstår samt mulige og undersøgte tiltag for at undgå denne.

4.6.1 Årsag til revnedannelse i sten

Ved opvarmning af murværksbrokker opstår spændinger i materialet, da mørtel og cement har forskellige termiske udvidelseskoefficienter. Des større en murværksbrok er, des større spændinger vil kunne forventes. Derfor kan der være risiko for, at de spændinger, som opstår i de to sammenmurede sten, ikke er repræsentative for de spændinger, som opstår senere i større brokker. For at komme årsagen til revnedannelse nærmere undersøges bl.a. i det følgende kvalitet af mursten, mønster for revnedannelse i relation til murværkets forbandt samt betydningen af nedkølingsrate. Sidst beskrives yderligere forsøg udført for i forsøg på at undgå revnedannelsen.

Kvalitet af mursten

Trykstyrke bestemmes for 6 tilfældigt udvalgte sten fra det nedrevne bygningsværk på Skejbyvej, Aarhus. Her vælges 6 sten, som i forvejen er modtaget som enkelte sten med vedhængende mørtel. Trykstyrken af stenene bestemmes. Den gennemsnitlige normaliserede trykstyrke er 24,0 MPa. Den laveste af de seks gentagelser er 19,9 MPa, mens den højeste er 29,6 MPa. Denne trykstyrke betegnes som normal for røde blødstrøgne sten.

Der er således ingen indikation af, at stenene i de modtagne murværksbrokker er af en forringet kvalitet. Dette stemmer overens med, at omfattende revnedannelse også ses ved test af ældre murværk baseret på andre stentyper.

Betydning af nedkølingsrate

Som nævnt indeholder især mørtel store mængder af kvarts. Ved opvarmning og nedkøling omkring 572°C sker en ændring i kvarts krystalstruktur, som giver anledning til en 1% volumenudvidelse eller sammentrækning. Især volumenreduktionen under nedkøling kan, hvis nedkølingen sker for hurtigt, give anledning til spændinger i materialet.

Ved forsøg i laboratorieskala er der ikke gjort foranstaltninger for at kontrollere nedkølingen af de genbrændte brokker. For et forsøg med opvarmning til 650°C bestemmes nedkølingen omkring kvartspunktet til mere end 100°C/timen. Nedkølingsraten er baseret på data fra termoføler placeres lige over de opvarmede brokker. Den opnåede nedkølingsrate omkring kvartspunktet vurderes her at være så hurtig, at det kan føre til risiko for revnedannelse. Revnedannelse er dog ikke set i disse forsøg.

For opvarmning i pilotskalaovn er opvarmningsrater og nedkølingsrater bestemt på baggrund af måling med termofølere mellem de opvarmede brokker. Data fra genbrænding ved 700°C viser en nedkølingsrate på 20°C/time omkring kvartspunktet. Under blødæmningsprocessen på teglværket køles med en rate på ca. 50°C/timen omkring kvartspunktet. Denne rate er tilstrækkelig langsom til at undgå revnedannelse grundet volumenreduktionen af kvarts. Hurtigt køling under pilotskalaforsøg vurderes således ikke at være årsagen til den observerede revnedannelse i stenene.

Udvidelser af mørtlen omkring kvartspunktet

Forsøg med sten fra nedrivning på Skejbyvej, Aarhus viser, at revnedannelsen sker midt på stenene (FIGUR 6). Da murværket er opmuret i halvstensløberforbandt svarer til det, at revnedannelsen i stenene generelt sker ud for studsfugerne. Forsøg med murværk i et andet forbandt viser, at revnedannelsen i stenene er afhængig af murværkets forbandt. Og generelt ses, at revnedannelsen sker omtrent ud for studsfugerne, jf. FIGUR 14. Dette peger i retning af, at netop udvidelsen af den kvartsrige mørtel omkring kvartspunktet ved 572°C, jf. FIGUR 4 kan være en medvirkende årsag til revnedannelsen.



FIGUR 14. Revnedannelse i genbrændte murværksbrokker baseret på murværk i ¼-stens løberforbandt. Øverst ses murværk baseret på gul maskinsten. Nederst ses murværk baseret på røde blødstøgne sten.

Det udførte litteraturstudie omkring termisk nedbrydning af bindemidler i mørtel viser, at cements primære bindemidler nedbrydes ved opvarmning til temperaturer på 400-550°C. Hvis denne nedbrydning er sket i tilstrækkeligt omfang forud for opvarmning til temperaturer over kvartspunktet, hvor forskellene i materialerne termiske udvidelse bliver markant, er der mulighed for, at de opståede spændinger kan optages i den nedbrudte mørtel. Nedbrydning af mørtlen forventes i et vist omfang at give de to materialer hhv. mursten og mørtel mulighed for at bevæge i uafhængigt af hinanden. Dette undersøges nærmere ved arbejde med mere avancerede opvarmningsprofiler.

Type af mursten

Gule mursten har generelt højere trykstyrke end røde mursten, mens maskinsten generelt har højere trykstyrke end blødstøgne sten. Derfor udføres også forsøg med adskillelse af murværksbrokker baseret på gule mursten både som blødstøgne sten og som maskinsten. Til disse forsøg anvendes udstillingsmure fra Bachmanns Teglværk. Murene er opmuret i perioden 2000-2008. Kemisk analyse af mørtlen viser, at denne har en sammensætning som ligger tæt op ad normmørtlen KC 35/65/650. Til forsøgene anvendes brokker med en højde på 3 skifter. Genbrænding foretages først ved 550°C og efterfølgende 650°C for den samme brok.

For begge temperaturer anvendes en holdetid på 3 timer og nedkøling foretages langsomt omkring kvartspunktet. Genbrænding til 550°C giver ikke mulighed for adskillelse af brokkerne, og der ses ingen revnedannelse i de gule sten. Efter genbrænding til 650°C kan brokken baseret på gule blødstøgne sten stadig ikke adskilles på trods af, at mørtlen viser begyndende tegn på nedbrydning. Den genbrændte sten fremstår uden revner. For brokken baseret på gule maskinsten kan sten og mørtel adskilles. Flere sten fremstår dog med revner, som det fremgår af FIGUR 14.

Genbrænding af gule blødstøgne sten testes desuden ved genbrænding til 850°C i bløddæmpningsovn på teglværket. Her genbrændes en større brok (ca. 1 m x ½ m) af hhv. gule og røde blødstøgne sten fra udstillingsmure på Bachmanns Teglværk. For de røde sten ses det, at flertallet af stenene revner og deles sig i to. For de gule sten ses ligeledes, at der opstår revnedannelse i stenene. Revnerne er dog finere og de gule sten forbliver hele.

De udførte forsøg indikerer således, at gule sten, grundet den højere trykstyrke, under genbrænding har lavere tendens til revnedannelse og til at deles i to.

4.6.2 Avancerede opvarmningsprofiler

I forsøg på at finde en metode til at undgå revnedannelse i murstenene laves forsøg med mere avancerede opvarmningsprofiler. Her arbejdes bl.a. med gentagne opvarmninger til lav temperatur, opvarmning af våde brokker, samt opvarmning i to trin. Resultaterne beskrives i det følgende.

Forlænget holdetid ved toptemperatur

Som tidligere nævnt vil det være en fordel om forsøgene kan udføres ved en temperatur lavere end kvartspunktet, dvs. lavere end 572°C. Hvis temperaturen svinger omkring kvartspunktet, øges risikoen for revnedannelse, hvorfor det vurderes nødvendigt at holde temperaturen lidt under grænsen på 572°C. 550°C vurderes som en god øvre grænse.

Med en holdetid på 3 timer ved 550°C kunne der for de sammenmurede nødder opnås adskillelse af brokkerne muret med KC 35/65/650 og KC 50/50/700, mens det ikke var muligt at adskille hverken de to mørtler med højere indhold af cement og de to med højere indhold af kalk. For de tre mørtler med højest cementindhold gentages forsøget blot med en øget holdetid på 12 timer. Den øgede holdetid har ingen effekt i forhold til at adskille flere mørteltyper fra murværksemner fremstillet i laboratoriet.

Et lignende forsøg laves med en brok fra nedrivningen på Skejbyvej, Aarhus. Her foretages opvarmning til 575°C med 50°C i timen og holdetid på 12 timer. Den testede brok har en højde på 2 skifter. Opvarmningen giver ikke anledning til adskillelse af stenene, men der ses revnedannelse.

Gentagen opvarmning

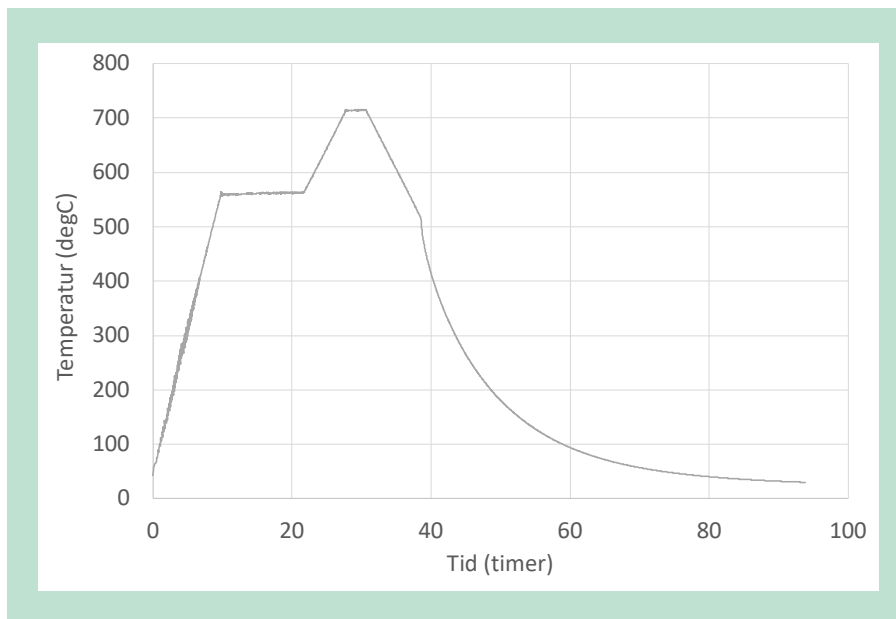
Der laves desuden et forsøg med gentagne opvarmninger til 550°C. Opvarmningsrate er 50°C i timen. Der laves tre gentagne opvarmninger. Sten og mørtel kan ikke adskilles efterfølgende. Der ses ingen revnedannelse hverken i sten eller mørtel. Forsøg laves med brokker fra Skejbyvej, Aarhus. Mellem hver opvarmning evalueres brokkens tilstand.

Opvarmningsprofil i to trin

Herefter forsøges med opvarmningsprofiler i to trin; en lang holdetid lige under kvartspunktet og så derefter opvarmning og kortere holdetid ved 650°C-700°C (FIGUR 15). Idéen er, at den lange holdetid ved 500-550°C skal føre til svækkelse af mørtlens styrke, sådan at de spændinger, som opstår ved den efterfølgende yderligere opvarmning kan optages i den svækkede mørtel i stedet for at føre til revnedannelse i stenene.

Der er foretaget flere kombinationer af opvarmningen i to trin og med murværksbrokker af forskellig størrelse fra forskellige kilder. Test er udført med både røde sten og gule sten samt

med flere forskellige forbandter. Ingen af de udførte tests har dog gjort det muligt at undgå revnedannelse i stenene for brokker større end 2 skifter i højden. Dog ses som tidligere omtalt en tendens til, at revnedannelsen er mindre omfattende for gule sten sammenlignet med røde sten.



FIGUR 15. Eksempel på opvarmningsprofil for opvarmning i to trin.

Opvarmning af våde brokker

Der foretages test med opvarmning af brokker mættet med vand. Disse forsøg udføres for at teste, om frigivelsen af vanddamp fra stenene kan have en positiv effekt i forhold til at opnå adskillelse ved en tilstrækkelig lav temperatur til at undgå revnedannelsen i stenene. Der foretages test med opvarmningsprofil i to trin. Her opvarmes først til 500°C med en holdetid på 12 timer og efterfølgende opvarmes til 650°C med en holdetid på 3 timer. Test udføres på brokker fra Skejbyvej, Aarhus. Den udførte test gav ikke anledning til, at sten og mørtel efterfølgende kunne adskilles.

Denne tilgang er ikke yderligere forfulgt, da opfugtning af brokkerne vil give anledning til et øget energiforbrug forbundet med fordampning af vand ved den efterfølgende genbrænding jf. afsnit 5.5.

4.7 Selektiv opvarmning med mikrobølger

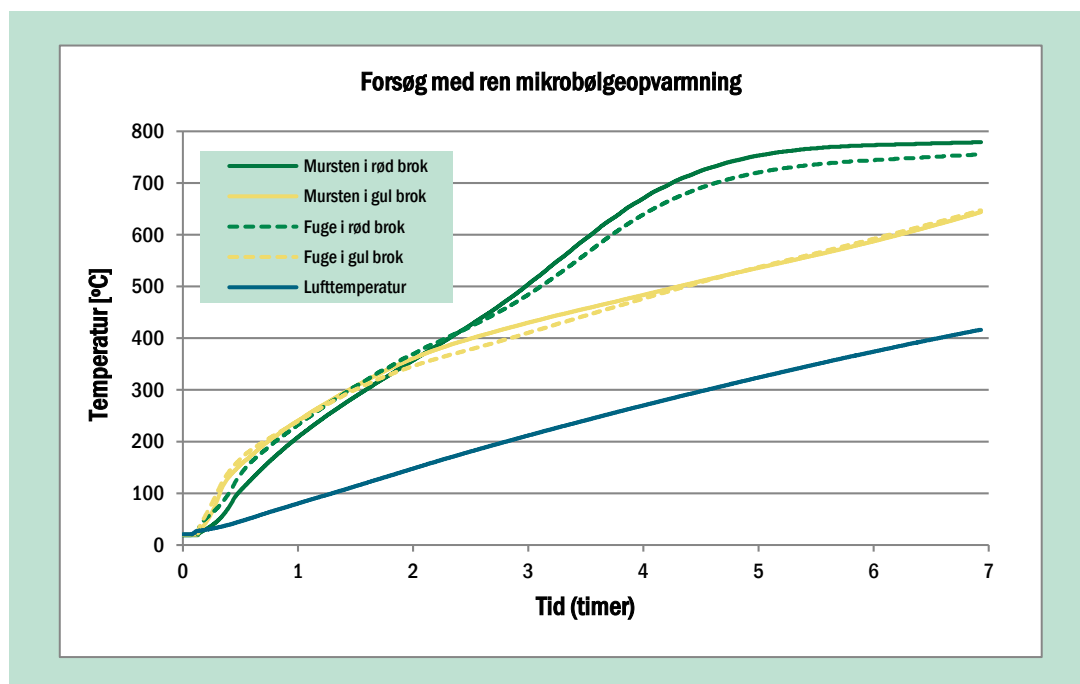
Forskellige materialer har forskellig modtagelighed over for mikrobølger (Walkiewicz et al., 1988). Når man anvender mikrobølger, er det således muligt at opnå vidt forskellig temperatur i forskellige materialer, der opvarmes samtidigt. I forbindelse med genbrænding af murbrokker vil det umiddelbart være en fordel, hvis mørtlen er mest modtagelig, så fugerne opvarmes og dermed nedbrydes mest muligt, samtidig med at mindst mulig energi anvendes på opvarmning af murstenene. I lyset af problemerne med revnedannelse i stenene, er den største forventning imidlertid, at selektiv opvarmning af tegl kan reducere de spændinger, der opstår i brokkerne som følge af, at mørtlen har den højeste termiske ekspansionskoefficient jf. afsnit 4.1.2.

For at undersøge effekten af selektiv opvarmning i praksis, er der udført et enkelt forsøg, hvor der opvarmes med mikrobølger alene. Forsøget er udført med henblik på at opnå størst mulig forskel på temperaturen i tegl og mørtel. I forsøget er ovnsens gasbrændere og temperaturstyring slået fra, og mikrobølgegeneratorerne er indstillet til maksimal effekt, så der opnås hurtigst mulig opvarmning. Dette er gjort for at reducere varmeledningen, som vil reducere temperaturforskellen mellem materialerne, hvis opvarmningen er langsom.

I forsøget er der placeret forskellige murbrokker i ovnen – herunder en brok fra nedrivningen på Skejbyvej, Aarhus og fire brokker fra forskellige udstillingsmure fra teglværket. I to af brokkerne, hhv. en med røde og en med gule mursten, er der boret huller, og placeret en termoføler midt i en mursten og midt i en fuge, jf. FIGUR 16. Udviklingen af temperaturen i de forskellige materialer er vist i FIGUR 17.



FIGUR 16. Placering af murbrokker og termofølere i forsøg med ren mikrobølgeopvarmning.



FIGUR 17. Temperaturforskelle opnået pga. mikrobølgenes selektiv opvarmning af materialerne.

Ud fra forsøget vurderes det, at alle materialerne er modtagelige for mikrobølgeenergien, idet de alle når en temperatur, som er over 200°C varmere end luften i ovnen. De røde mursten er mest modtagelige for mikrobølgeenergien og opnår dermed en temperatur på 780°C, mens de gule mursten kun når 650°C. Dette bekræftes ved efterfølgende vurdering af brokkerne, hvor det ses, at temperaturen har været utilstrækkelig til at nedbryde mørtlen i de gule brokker, som

er vanskelige at adskille med hammer og mejsel, mens mørtlen i de røde brokker ikke kan adskilles ved håndkraft, men er lette at adskille med hammer og mejsel.

I den gule brok er der desuden begrænset forskel på temperaturen af mursten og fuger, hvilket betyder, at eventuelle forskelle i modtageligheden for mikrobølger er så små, at de tilnærmelsesvis udlignes af varmeledningen mellem materialerne.

I den røde brok er der større forskel på materialernes modtagelighed over for mikrobølger, og der opnås en temperaturforskel mellem mursten og fuger på maksimalt 33°C. Fugens modtagelighed er sandsynligvis sammenlignelig med fugerne i de gule brokke, mens murstenene er langt mere modtagelige. Pga. varmeledning fra mursten til fuger opnås alligevel begrænsede temperaturforskelle i materialerne, og efterfølgende vurdering af brokkerne viser, at spændingerne i brokkerne ikke er reduceret tilstrækkeligt til at undgå revner i murstenene, jf. FIGUR 18.

I de gule brokker er der ikke opstået revner i murstenene ifm. genbrændingen, jf. FIGUR 18, hvilket dels kan forklares af den lavere temperatur, dels kan hænge sammen med at murstenene er stærkere, som diskuteret i afsnit 4.6.1.

På baggrund af forsøget forventes det, at opvarmning med mikrobølger hverken vil øge eller mindske risikoen for revner i murstenene. Gevinsten ved at benytte mikrobølger til processen er dermed udelukkende at reducere forbruget af fossilt brændsel.



FIGUR 18. Brokker opvarmet udelukkende med mikrobølger og adskilt med hammer og mejsel. Der ses ingen revner i gule mursten, mens der er opstået revner i 3 ud af 4 af de tilnærmelses hele røde mursten.

5. Udvikling af produktionsudstyr (AP2)

Arbejdspakke 2 indeholder følgende aktiviteter:

- Udvikling af idéer og koncepter omkring håndtering af murværksbrokker med varierende størrelse og geometri i eksisterende batchovne
- Udvikling af idéer og koncepter omkring håndtering af mørtelrester og støv dannet under genbrændingsprocessen.
- Arbejde omkring fastsættelse af grænseværdi for acceptabelt fugtindhold i murværksbrokker til genbrænding

Grundet uforudsete forhold omkring opskalering af resultaterne opnået i laboratoriet for små murværksemner til større skala med genbrænding af større murværksbrokker, er alle dele af arbejdsplanen 2 jf. aftale med MUDP ikke gennemført.

5.1 Baggrund

I arbejdsplanen arbejdes på udvikling af procesudstyr med den indgangsvinkel, at det skal være nemt at anvende eksisterende produktionsudstyr på teglværket. Desuden skal det være muligt at skifte mellem normal produktion af dæmpede mursten og genbrænding af brokker med henblik på genbrug af mursten. Der tages således udgangspunkt i anvendelse af eksisterende ovne til genbrændingen.

De eksisterende ovne hos Bachmanns Teglværk, som skal anvendes til genbrænding af murværksbrokker, er batchovne eller klokkeovne. Ovnene anvendes til blådæmpning af nyproducerede mursten. Ved blådæmpning genbrændes nyproducerede mursten til en toptemperatur på ca. 850°C. Under nedkølingen udsættes stenene for en reducerende atmosfære. Herved reduceres teglstenenes jernholdige forbindelser, og teglet opnår grålige og sorte nuancer. Ved blådæmpning af nyproducerede mursten har de eksisterende klokkeovne en kapacitet på 18.000-19.000 sten. Denne kapacitet kan opnås ved stabling af murstenene i 168 hoveder, som står direkte på ovns bund. Stablingen foretages maskinelt på paller i forbindelse med produktionen af mursten.

Håndtering af murværksbrokker til genbrænding vil være anderledes end håndtering af mursten, da murværksbrokkerne ikke har veldefinerede størrelser og således ikke kan stables og læsses med det eksisterende udstyr, som i dag anvendes til at fylde og tømme klokkeovnene på teglværket. Ved modtagelse af murværksbrokker fra nedrivning må i stedet forventes brokker af varierende størrelse fra enkelte mursten med vedhængende mørtel til sammenhængende murværksfelter op til 1 m². FIGUR 19 viser foto af murværksbrokker fra nedrivning af bygning fra 1993 på Skejbyvej i Aarhus. Her ses stort spænd i størrelse af murværksbrokker fra nedrivningen. Ved nedbrydning af mørtlens styrke under genbrænding må der desuden forventes dannelse af mørtelgulder og mørtelstøv, som vil falde ned og blive liggende i ovnen, såfremt murværksbrokkerne stables direkte på ovns bund.

Ved genbrænding af murværksbrokker vil det således være nødvendigt at udvikle nyt udstyr og nye metoder til at kunne håndtere disse murværksbrokker samt mørtelstøv i de eksisterende ovne.



FIGUR 19. Billede fra nedrivning af murværk, Skejbyvej Aarhus.

5.2 Udvikling af beholder til brokker og håndtering af mørtelrester

I AP2 er indledningsvist gennemført brainstorming vedr. muligheder for at håndtere brokkerne under genbrændingen. Her holdes fokus på udvikling af et koncept som lettest muligt kan implementeres for eksisterende ovne, og som i videst muligt omfang kan håndteres med det udstyr, som er tilgængeligt på teglværket i dag. Konceptet skal således kunne tages i brug uden krav om store investeringer.

På baggrund af idéudviklingen er der efterfølgende designet og fremstillet en prototype på en beholder til opbevaring af brokker under genbrændingen. Beholderen har samme dimension, som en palle nyproducerede mursten således, at beholderen kan erstatte de nuværende paller med 4 hoveder af mursten en til en. Der vil således være plads til 42 beholderen i den fyldte ovn.

FIGUR 20 nedenfor viser prototypen af beholderen. Dimensionerne er ca. 95 cm x 95 cm x 95 cm. Beholderen er lavet sådan, at den kan løftes og flyttes med en gaffeltruck. På den ene side er der monteret to "øjne", sådan at beholderen kan løftes og tømmes vha. eksisterende kran på teglværket. For bedre udveksling af den varme gas i ovnen er to af beholderens sider udformet med gitter. Den modsatte side, som er påmonteret "øjne" til at løfte med kran, er lukket og hælder lidt udad mod toppen. Her tømmes brokkerne ud efter brænding. Bunden er ligeledes lukket og med en lille kant, sådan at mørtelrester holdes i beholderen og ikke falder ud i ovnen.



FIGUR 20. *Prototype af beholder til håndtering af brokker og mørtelstøv under genbrænding.*

Beholderens dimensioner er relativt små sådan at den kan håndteres med gaffeltruck og eksisterende kranudstyr, når den skal læsse ind og ud af ovnen samt tømmes. Dog vil beholderen stadig kunne rumme relativt store murværksbrokker. Kombinationen af lukkede sider samt åbne sider med gitter gør, at beholderen samtidig kan håndtere små brokker og enkelte sten med vedhængende mørtel.

Den udviklede beholder til opbevaring af brokkerne under genbrænding adresserer således to af projektets milepæle hhv. vedr. udvikling af koncept for opsætning og stabling af brokker samt koncept for håndtering af mørtelrester og støv genereret under genbrændingen. På baggrund af testbrænding med beholdere vil designet kunne optimeres.

Prototypen er fremstillet af almindeligt 'stål 37'. Dette er ikke højtemperaturbestandigt, og det forventes således at prototypen vil kunne anvendes til et begrænset antal brændinger med en makstemperatur omkring 700-800°C. Der er desuden udført test af ståltype til fremstilling af beholdere med længere levetid. Her er der udvalgt stål i kvalitet MA253. Dette er en højtemperaturbestandig rustfri ståltype. Et mindre svejset testemne af denne ståltype er udsat for 11 opvarmninger og nedkølinger under normal brændingsprocedure for blådæmpning af mursten. Dvs. emnet er opvarmet til 850°C og udsat for reducerende betingelser under nedkølingen i til 780°C. Dette har ikke medført skadesudvikling for emnet (FIGUR 21). Såfremt materialet ikke kan modstå temperaturer og betingelser under brændingsprocessen, forventes skader at opstå allerede efter de første brændinger. Det konkluderes således, at det valgte materiale er egnet til betingelserne med høj temperatur og både oxiderende og reducerende atmosfære under hhv. opvarmning og dele af nedkølingen.



FIGUR 21. Testemne af stål MA253 efter 11 testbrændinger i normal blådæmpningsproces.

5.3 Test af udviklet prototypebeholder

Den udviklede prototypebeholder til håndtering af murværksbrokker er i projektet testet i forbindelse med fremstilling af nye mursten med restmateriale fra processen (afsnit 4.5). Her blev to større murværksbrokker (omkring $\frac{1}{2}$ m² pr. stk.) brændt i beholderen under normale betingelser for dæmpning af sten på teglværket. Ved dette forsøg blev det eftervist af opfyldning af beholder, indsætning af beholder i ovn samt tømning af beholderen fungerede efter hensigten.

Ved den udførte test af beholderen er dennes kapacitet 155 sten. Disse er som nævnt fordelt i to større murværksbrokker. Med denne kapacitet for én beholder opnås en total kapacitet på ca. 6500 for hele ovnen med 42 beholdere.

5.4 Håndtering af vedhængende mørtel

Genbrændingsforsøg udført i arbejdsmappe 1 har vist, at murstenen efter genbrænding og adskillelse fra mørtelfugen stadig har rester af vedhængende mørtel. Ifølge projektansøgningen er et succeskriterie for projektet, at den udviklede metode eliminerer behovet for manuel rensning af mørtelrester, som det foregår ved den eksisterende mekaniske metode for genbrug af sten baseret på murværk med svage mørtler.

Da genbrændingen bevirker, at mørtelstyrken reduceres, forventes det, at vedhængende mørtelrester vil kunne fjernes vha. af børster i en automatiseret proces. Der laves indledende forsøg for test af dette. Test foretages for gule og røde blødstrøgne sten. Enkelte mursten med vedhængende mørtel udskæres fra udstillingsmure. Murene er som nævnt fremstillet i perioden 2000-2008, og kemisk analyse har vist, at mørtlen har en sammensætning som ligger tæt op ad normmørtlen KC 35/65/650.

Opvarmning foretages til hhv. 700°C, 750°C og 800°C. Der anvendes langsom opvarmning og nedkøling (25°C/time) og holdetiden ved toptemperaturen er 12 timer.

TABEL 9 viser de opnåede resultater. Af tabellen ses, at mørtlen efter opvarmning til 700-750°C kan fjernes med en stålbørste. Mørtlen sidder dog stadig forholdsvis godt fast. Først efter opvarmning til 800°C slipper størstedelen af mørtlen selv stenene under genbrændingen, og de sidste mørtelrester kan fjernes med en blød børste.

TABEL 9. Genbrænding af enkelte sten med vedhængende mørtel

Temperatur / Sten	Nedbrydning af mørtel	Revnedannelse i sten
700/rød	Styrke reduceret. Mørtlen kan fjernes med stålbørste. Mørtel kan ikke fjernes med blød børste	Ingen revnedannelse
700/gul		Ingen revnedannelse
750/rød	Styrke reduceret. Yderste lag af mørtel fjernes let. Længere inde sidder mørtlen mere fast. Stålbørste er nødvendig	Lille revne i sten
750/gul		Ingen revnedannelse
800/rød	Meget af mørtlen er faldet af under genbrænding. Rester af vedhængende mørtel fjernes let med mekanisk afrensning	Sten revnet
800/gul		Lille revne i sten

Forsøget viser desuden, at der trods neddeling af murværksbrokker til enkelte sten med vedhængende mørtel stadig opstår revnedannelse i stenene ved opvarmning til 750-800°C. Revnedannelsen er mest markant for de røde sten sammenlignet med de gule sten.

Grundet de observerede revnedannelser i stenene ved genbrænding er der ikke arbejdet videre med udviklingen af en automatiseret metode for afrensning af sten for de sidste mørtelrester.

5.5 Grænseværdi for fugtindhold

Som nævnt i afsnit 4.3 må der ved genbrænding af sten fra nedrivning af murværk under reducerede betingelser forventes en variation i det farveudtryk, som opnås. Bl.a. vil brændingsgrad af mursten samt fugtindhold kunne påvirke den opnåede farve i retning mod mere brunlige og grønne farver afhængig af hvilke sten, der arbejdes med. Ud over effekt på den opnåede farve ved genbrænding under reducerende betingelser vil evt. indhold af fugt i de nedrevne murværksbrokker have betydning for energiforbruget til genbrændingen.

Fordampning af vand er en energikrævende proces. Fordampning af 1 kg vand ved 100°C og 1 atm kræver således 2.257 kJ. I ansøgningen estimeres et energiforbrug for genbrændingsprocessen på 5 MJ pr. sten for genbrænding ved 500°C. Med udgangspunkt i dette estimat for energiforbrug til genbrændingen beregnes det øgede energiforbrug ved let, moderat og fuld opfugtning af murværksbrokker (TABEL 10).

Af tabellen ses, at selv et lettere fugtindhold i brokkerne vil have en mærkbar effekt på energiforbruget til genbrænding. Forsøg udført under AP1 (afsnit 4.6) har desuden vist, at opfugtning af brokkerne ikke har positiv effekt i forhold til at kunne reducere den krævede temperatur for adskillelse eller i forhold til at undgå revnedannelse i murværket.

Det anbefales således ikke at udføre genbrænding på opfugtede brokker. Ved modtagelse af opfugtede brokker anbefales det i stedet at disse tørrer naturligt forud for genbrænding.

TABEL 10. Estimat af øget energiforbrug til genbrænding ved 550°C ved genbrænding af opfugtede brokker. Det øgede energiforbrug afhænger af den pågældende kapacitetsudnyttelse.

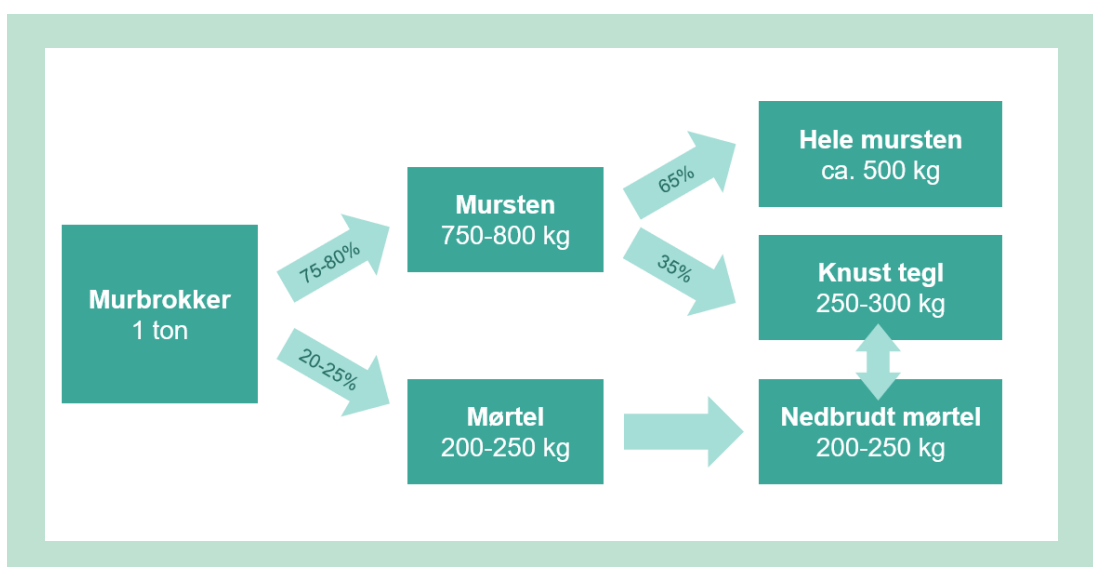
Fugtindhold i murværk (%)	Mætningsgrad (%)	Øget energiforbrug grundet fugt (%)
5	ca. 25	6
10	ca. 50	12
20	ca. 100	25

6. Udvikling af forretningsmodel (AP3)

Arbejdspakke 3 indeholder følgende aktiviteter:

- Afholdelse af workshops med hhv. arkitekter og nedrivningsbranchen for input til projektets realisering.
- Udvikling af forretningsmodel for den nye type af genbrugsmursten.

Forretningsmodellen skitserer det forretningsmæssige potentiale for en ydelse, der består i adskillelse af murværk med stærke mørtler, klargøring af murstenene til direkte genbrug og nyttiggørelse af restmateriale bestående af nedbrudte mørtelfuger og teglmateriale fra den del af murstenene, som er for beskadigede til direkte genbrug. Materialestrømmen, som er grundlag for forretningsmodellen, er skitseret i FIGUR 22.



FIGUR 22. Materialestrøm hvor 65% af murstenene fra murbrokker med 20-25% mørtel indvindes til direkte genbrug. 1 ton murbrokker resulterer således i ca. 500 kg mursten til direkte genbrug og 500 kg restmateriale bestående af omtrent lige dele tegl og mørtel.

6.1 Workshop og interviews

For at forstå de kundesegmenter der danner grundlag for forretningsmodellen, er der foretaget interview med nedbrydningsvirksomheden Kingo Karlsen og afholdt en workshop med ERIK arkitekter.

Inddragelse af nedrivningsbranchen er foretaget ved interview med Kingo Karlsen omkring nuværende praksis og resulterende affaldsfraktioner i forskellige nedrivningsscenarier og de nuværende afsætningsmuligheder for murværket. Denne metode til indhentning af information blev vurderet mere relevant end afholdelse af en egentlig workshop. Desuden kunne interviewet kombineres med rundvisning ved igangværende nedrivning af nyere bygningsværk med facader baseret på murværk opmuret med cementholdig mørtel. Nedrevne brokker er desuden modtaget fra denne nedrivning til test i projektet.

Blandt de væsentligste punkter fra interview med nedrivningsbranchen opsummeres følgende:

- Indtægt fra salg af nedknust murværk til vejfyld (21-50 kr. pr. ton afhængig af renhed) er ikke tilstrækkelig til at der er forretning i nedknusning. Modtagelse af murværk til knusning koster derfor 53-74 kr. pr ton.
- Nedrivning af murværk og beton foretages så vidt muligt altid selektivt, da det er billigere at bortskaffe ren beton end både murbrokker og beton blandet med murbrokker.
- Udgifter til miljøsanering kan udgøre hovedparten af de samlede omkostninger i et nedrivningsprojekt

Workshoppen med ERIK arkitekter fokuserede dels på interessen for genbrug af mursten generelt og dels på interessen for udtrykket af de termisk rensede mursten.

Blandt de væsentligste punkter fra workshoppen nævnes:

- **Pris:** Prisen på stenene er meget vigtig. Er genbrugssten dyrere end nye sten, så bliver det svært. Så skal der være en anden drivende kraft fra bygherrer som f.eks. en god historie, godt image, noget politisk, bæredygtighed. Historien om en ny "bæredygtig" løsning med lavere CO₂-udledning vs. en ny sten er god og har en vis værdi, men prisen bliver det udslagsgivende, medmindre der er andre vægtige argumenter for genbrug. Priserne på byggeri er efterhånden så høje, at det at vælge tegl i forvejen er en svær størrelse. Spørgsmål fra arkitekterne er, om der er en totaløkonomisk gevinst ved genbrug? Hvis der er, skal den mere frem i lyset.
- **Tilgængelighed:** Flere af arkitekterne fortæller, at de på projekter har haft lyst til at anvende genbrugssten. Men at de ikke ved, hvordan de skal få fat på genbrugssten, hvis de ikke lige har en bygning, som skal rives ned. Synligheden af genbrugspotentialet bør belyses bedre, mener de. Og det er meget afgørende for brug af sten, at man ved, hvor man får fat i dem. Kan der produceres til lager? Kan der laves aftale om bygherreleverance?
- **Er der et marked for mindre patinerede genbrugssten:** Genbrugssten som i dag fremstilles ved mekanisk adskillelse af murværk med svage kalkmørtler "raspes" under adskillelse, hvorved stenedes hjørner afrundes og stenene får en meget rustikt, slidt og afrundet look. Genbrugssten, som fremstilles under dette projekt, bliver ikke i samme grad afrundet og slidt. Er dette mere kantede look en hæmsko for anvendelse af genbrugsstenene? En af arkitekterne fortæller, at hun har været med til at fravælge genbrugssten netop pga. det meget afrundede look, som ikke passede til eksisterende byggeri. Det afrundede look kan således være en ulempe ved renovering eller andre tilfælde, hvor det nye byggeri skal ligne eksisterende byggeri i udtryk. Arkitekterne er enige om, at de fuldkantede genbrugssten, som mere ligner sten i eksisterende byggeri, kan finde mange anvendelser. Og det er et interessant produkt. Ikke alle arkitekterne kan lide udtrykket af maskinsten. Heller ikke som genbrugssten. Men de små afslag, der trods alt kommer ved genanvendelse af maskinsten, kan være det, der gør det tåleligt at se på rent æstetisk. Men der er en udfordring i maskinsten i udgangspunktet. Maskinsten opfattes som kedelige og kunne vinde ved at blive bearbejdet til genbrug.
- **Er der et marked for dæmpede (grå og sorte) genbrugssten:** Ja, grå genbrugssten vurderes at være et interessant produkt. Der findes mange sammenhænge, hvor genbrugssten som vi kender dem, er for rustikke og dermed slet ikke relevante, f.eks. i nybyggeri, hvor der sjældent er en åbenlys grund til at anvende så patinerede genbrugssten, medmindre man bygger et sted, hvor der har stået noget andet, som er nedrevet og har kunnet bidrage med materialer til det nye byggeri.

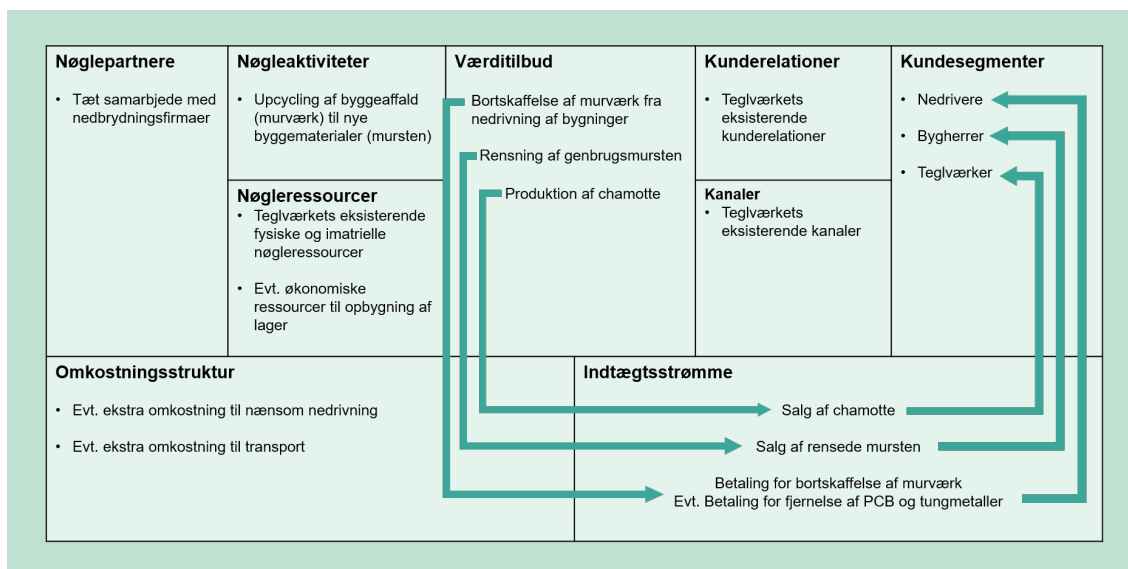
6.2 Mulig anvendelse

Forretningsmodellen er udviklet for den ydelse som består af adskillelse af murværk med stærke mørtler, klargøring af murstenene til direkte genbrug og nyttiggørelse af restmateriale til fremstilling af nye mursten. Under arbejdsplanen 1 blev det dog klart, at metoden med adskillelse af murværk efter genbrænding ikke kunne opskaleres til større murværksbrokker uden omfattende revnedannelse i de adskilte mursten. Metoden vurderes således i sin nuværende form ikke anvendelig for direkte genbrug af mursten fra murværk med stærke mørtler.

Meget af den viden som er indsamlet og fremkommet ved arbejdet med udvikling af forretningsmodellen vil dog kunne løftes op og anvendes helt generelt omkring genbrug og genanvendelse af murværksmaterialer uafhængig af den valgte metode. Dette gælder f.eks. informationer og input indsamlet ved workshop med ERIK arkitekter og interview med Kingo Karlsen samt flere dele af forretningsmodellen især omkring kundesegmenter, værditilbud og indtægtsstrømme.

6.3 Forretningsmodellens ni byggesten

Forretningsmodellen bygger på principperne beskrevet af Osterwalder & Pigneur (2010), og består således af ni byggesten, som er skitseret i FIGUR 23.



FIGUR 23. Kortlægning af forretningsplanens ni byggesten.

6.3.1 Nøgleaktiviteter

Nøgleaktiviteten består i adskillelse af murværk med stærke mørtler, klargøring af murstenene til direkte genbrug og nyttiggørelse af restmateriale til fremstilling af nye mursten.

Forudsat at teglværket kan godkendes som anlæg til rensning for PCB, vil aktiviteten desuden kunne erstatte nuværende aktiviteter til miljøsanering af murværk med PCB.

6.3.2 Kundesegmenter

Forretningen er en dobbeltsidet platform, hvor kunderne primært vil være nedrivere af ældre ejendomme på den ene side og bygherrer på nye ejendomme på den anden side. På begge sider er der eksisterende markeder, som modellen er i konkurrence med.

På nedriversiden kan kunden enten være et nedbrydningsfirma, som har den samlede entrepris på miljøsanering, nedrivning og bortskaffelse af affaldsfraktioner fra byggeriet, eller bygningsejer, som i sidste ende står for udgiften til bortskaffelsen.

På bygherresiden må genbrug af mursten på nuværende tidspunkt endnu betegnes som et nichemarked. Begrænsede erfaringer med genbrug af mursten i moderne byggeri samt manglende uvildig dokumentation af disse stens kvalitet og holdbarhed kan betyde større usikkerhed vedr. brug af disse og herunder vurdering af omkostninger i både projekterings- og byggefasen.

I fremtiden er der brug for dokumentation af kvalitet og holdbarhed, ligesom der er brug for first-movers og demonstrationsprojekter som f.eks.:

- Offentligt byggeri, hvor politiske målsætninger om bæredygtighed kan være en drivkraft

- Større private "prestigebyggerier", hvor brug af genbrugsmaterialer kan være et led i et firmas CSR-strategi og bidrage til et grønt image
- Private boliger, hvor bygherre er særligt optaget af bæredygtighed

Termisk rensning af murstenene giver desuden mulighed for en ny kundegruppe. Nuværende metoder til adskillelse af murværk og rensning af murbrokker foregår ved en mekanisk raspning, som resulterer i afrundede stenkanten og dermed mursten med et mere rustikt udtryk, som kan være uønsket ifm. renovering. Ved den termiske rensning vil det derimod i højere grad være muligt at bevare stenene fuldkantede og med det oprindelige udtryk. Det vil især være en fordel i forhold til renovering af huse fra 60'erne og 70'erne, hvor der synes at være et stort potentiale, idet mange private ønsker opdatering af deres typehuse fra denne periode. Der fås oftest ikke nye sten af samme type, men der nedrives meget fra perioden og hvis det lykkes at bevare stenedes udtryk, vil de antageligt være attraktive for disse kunder.

Endelig kan der være tale om et tredje kundesegment som aftager af biprodukter fra rensningen. Her har forsøg udført som en del af arbejdsplanen 1 afsnit 4.5 vist, at det nedknuste restmateriale kan anvendes som erstatning for sand ved produktion af nye mursten på teglværket og sand er en råstofressource, som vi vil mangle i fremtiden.

6.3.3 Værditilbud

Værditilbuddet for nedrivere vil være bortskaffelse af murværk ifm. nedrivning og eventuelt en omkostningsreduktion i den forbindelse.

Nedbrydningsfirmaer foretager allerede en selektiv nedrivning, hvor murbrokker og beton holdes adskilt. Begge fraktioner bliver typisk knust og anvendt til vejfyld, men holdes adskilt fordi betonen har en god bæreevne og kan afsættes til en relativt høj værdi. Bæreevnen af nedknust murværk er derimod ikke bedre end grus, og udgifter til nedknusning og transport kan, afhængig af geografi, ofte overstige prisen på grus. Bortskaffelse af murværk med stærke mørtler til vejfyld er derfor lige nu en omkostning for nedbryder.

Den nye rensningsmetode vil medføre følgende fordele for nedriver:

- Flere afsætningsmuligheder for murværk med stærk cementholdig mørtel, der hidtil primært har kunnet afsættes som vejfyld af lav værdi. Øgede afsætningsmuligheder vil formentlig betyde reducerede omkostninger til bortskaffelse af pågældende fraktion af byggeaffaldet.
- Eventuel betaling for modtagelse. Dog er værdien af en mursten, der indgår i en murbrok ikke sammenlignelig med værdien af en nystrøget og tørret sten, idet omkostningerne til håndtering og brænding af murbrokker er væsentlig højere end for en nystrøget, tørret sten. F.eks. vil den varierende geometri af de nedrevne brokker give en væsentlig lavere kapacitetsudnyttelse af eksisterende ovne sammenlignet med brænding af nye mursten.
- Øget konkurrence på modtagelse af murværk med kalkmørtel.

Værditilbuddet for bygherre:

- Større udvalg af genbrugssten
- Risikoreduktion: Genbrugssten i mere ensartet højere kvalitet – typisk er nyere mursten (som pt ikke kan genbruges pga. stærk mørtel) mere ens pga. bedre processtyring
- Genbrugssten med nyt udtryk (mindre rustikke)
- Status: genbrugssten er in
- Tilgængelighed: Produktet bliver tilgængeligt for folk der tidligere ikke havde råd – og let tilgængeligt, da de købes samme sted som nye mursten

6.3.4 Kanaler

Teglværket har allerede alle kanaler ift. salg af mursten. Produktion til lager og salg af genbrugssten af samme kanaler som nye sten, vil en være en stor forbedring i forhold til den øgede tilgængelighed, som arkitekterne har efterspurgt. Det bliver samtidig mere enkelt at

kombinere gamle sten med nye sten med lignende udtryk og kompatible egenskaber, da teglværket fører begge produkter.

6.3.5 Kunderelationer

Teglværket kan benytte samme kunderelationer og services som ved salg af nye mursten

6.3.6 Indtægtsstrømme

Indtægtsstrømmen forventes primært at komme fra salg af rensede mursten til direkte genbrug. Et ton murværksaffald vil indeholde 750-800 kg mursten. Afhængig af typen svarer dette til ca. 300-400 mursten. Regnes med en genanvendelsesgrad for stenene på 65% fås ca. 200-250 sten til direkte genbrug. Baseret på en salgspris på genbrugssten på 7,50 kr. pr. sten fås en indtægt på 1.500 til 2.000 kr. pr. ton rensed murværk.

Betaling for modtagelse af murbrokker forventes at udgøre en lille del af indtægterne. Baseret på listepriiser fra Kingo Karlsen A/S på 53-74 kr. pr. ton murværk (afhængig af renhed) forventes en indtægt i den størrelsesorden.

Forudsat at teglværket kan godkendes som anlæg til rensning for PCB, og dermed kan overflødig gøre forudgående miljøsanering, som omtalt i afsnit 4.1.4, kan betaling for modtagelse af PCB-holdige murbrokker blive en vigtig indtægtskilde, da bygherre kan spare udgifter til miljøsanering, som kan være den største post på budgettet ifm. nedrivning og bortskaffelse.

6.3.7 Nøgleressourcer

Teglværket har i høj grad både de påkrævede fysiske nøgleressourcer såsom ovne, maskiner til pakning og lagerkapacitet og de immaterielle nøgleressourcer i form af kundedatabaser og en kendt platform at handle på.

Der er derfor primært behov for investeringer ifm. udstyr til at håndtere murbrokker og mørtelrester i teglværkets eksisterende periodiske ovne, som beskrevet i afsnit 5.2.

Forretningen kan opstartes med relativt få ressourcer, hvis der udelukkende produceres efter bestilling, hvilket vil sige at rensning udelukkede foretages i det tilfælde en nedriver har en tilgængelig bygning, hvorfra en bygherre er interesseret i murstenene.

Det må dog overvejes at investere ressourcer i opbygning af et lager af genbrugssten, for at imødekomme den lettere tilgængelighed af genbrugssten, som arkitekterne efterspørger.

6.3.8 Nøglepartnere

Det vurderes ikke, at teglværket har behov for nye partnere for at tilbyde ydelsen. Der vil dog være behov for samarbejde med nedbrydningsfirmaet i form af løbende erfaringsudveksling og udarbejdelse af retningslinjer for at sikre den mest hensigtsmæssige håndtering af murbrokkerne og levering af de bedst egnede brokker. Nyttige erfaringer med henblik på at opnå den højeste mulige genanvendelsesgrad og mindst mulig transport er beskrevet af Københavns Kommune (2017).

6.3.9 Omkostningsstruktur

Opstart af forretningen forventes ikke at påvirke teglværkets faste omkostninger idet man planlægger at udnytte fri kapacitet på eksisterende produktionsanlæg. Forudsat produktionen ikke overstiger denne kapacitet, vil produktionen fortrinsvis medføre variable omkostninger i form af lønninger og energiforbrug, som kan opskaleres med produktionen. Dertil kan komme behov for øget lagerkapacitet og øget lagerbeholdning, hvis behovet for tilgængelighed også skal opfyldes.

På nuværende tidspunkt står nedrivere med udgifter til transport til nedknusningsstedet og nedknusning af murværket. En stor andel af nedrivninger må antages at finde sted i de større byer, og der findes faciliteter til nedknusning i nærheden af flere af de større byer. Der må derfor generelt forventes at være øgede omkostningerne til transport af murbrokkerne til teglværket. Dog er transportstrukturen således, at vognmænd for at få en rentabel forretning typisk efterspørger returlæs. Der er ofte ledig transportkapacitet. Dog er det ikke alle vognmænd som

har køretøjer/lad, hvor det er muligt at transportere murbrokker. Transport af murbrokker kan også forventes at være dyrere end transport af ordinært gods.

Det må forventes at teglværket vil have omkostninger til indkøb af murbrokker, hvis ydelsen skal konkurrere på lige fod med bortskaffelse af murværk til nedknusning og vejfyld.

7. Fuldskalaforsøg (AP4)

7.1 Fuldskalaforsøg – ikke gennemført

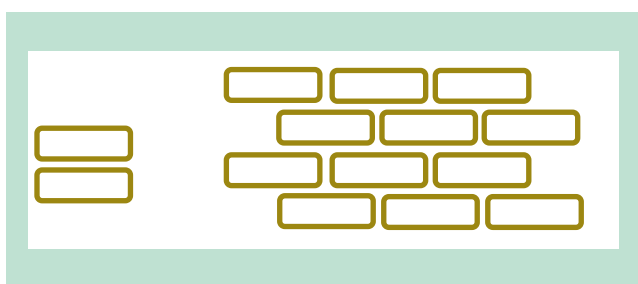
Ifølge projektansøgningen afsluttes projektet med fuldskalaforsøg. Disse fuldskalaforsøg skulle ifølge ansøgningen gennemføres på teglværket og skulle basere sig på de resultater, som er opnået i arbejdspakke 1 og 2 omkring hhv. optimerede opvarmningsprofiler samt koncepter for håndtering af brokker og mørtelrester i blådæmpningssovnene. Under fuldskalaforsøgene skulle der udføres måling af energiforbrug til de endelige energiberegninger for processen.

I arbejdspakke 1 har det ikke været muligt at opskalere de positive resultater opnået for mindre murværkselementer til større murværksbrokker. For større murværksbrokker var det ikke muligt at opnå adskillelse af mursten og mørtel uden at der opstod omfattende revnedannelser i stenene. Med baggrund i disse udfordringer blev det, jf. aftale med MUDP, besluttet, at arbejdspakke 4 ikke skulle gennemføres.

8. Diskussion

8.1 Årsag til revnedannelse

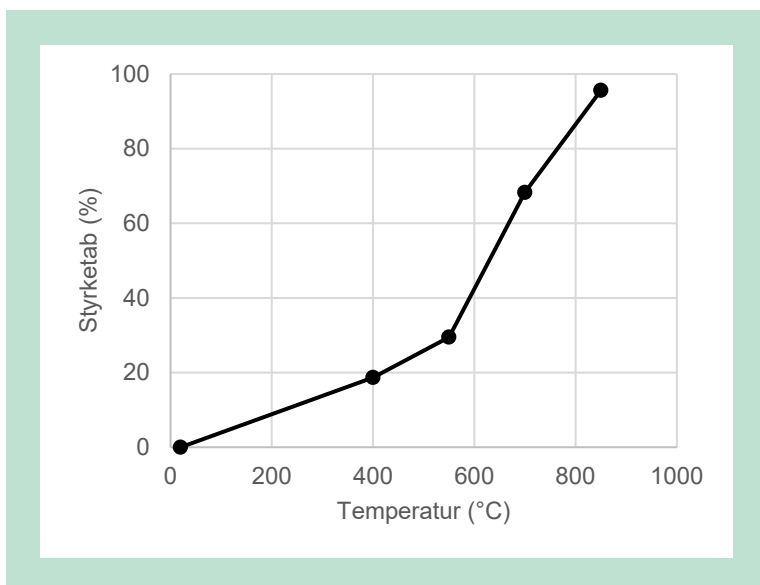
Ved opskalering af forsøg udført i laboratorieskala på små murværkselementer med kun én liggefuge mellem sammenhængende sten opstod uforudsete forhold. Ved opskalering blev forsøg udført på større murværksbrokker bestående af mursten i et større netværk af både liggefuger (vandrette) og studsfuger (lodrette). FIGUR 24 nedenfor viser skematisk illustration af de to typer af testede murværkselementer. I det større murværkselement vil der være færre frihedsgrader, når mørtel og tegl under opvarmning udvider sig forskelligt. Dette kan føre til øgede spændinger i materialet. For det større murværkselement vil det således være endnu vigtigere, at mørtlens styrke og sammenhængskraft er nedbrudt, før større grad af termiske længdeudvidelser indtræffer.



FIGUR 24. Skematisk illustration af murværksbrokker. Venstre – lille element med én liggefuge mellem to sammenhængende sten. Højre – større murværkselement med sten i et sammenhængende netværk af ligge- og studsfuger, dvs. vandrette og lodrette fuger.

En yderligere forskel mellem murværkselementerne fremstillet i laboratoriet samt større brokker fra nedrivning af bygningsværker er mørtlens alder. Cement færdighærdet under normale betingelser på 28 dage, mens carboniseringen af kalk er en langsommere proces. For murværkselementerne fremstillet i laboratoriet er de første genbrændinger på de mest cementrige mørtler opstartet efter 1½ måneders hærkning. For de mest kalkrige mørtler er genbrænding opstartet efter 5 måneders hærkning. Det er således tilstræbt, at den fulde mørtelstyrke er udviklet med opstart af genbrændingsforsøg. Murværket på Skejbyvej i Aarhus er opført i 1993. Ved nedrivning har dette murværk således en alder på ca. 25 år. Den markante forskel i alder kan således også have en medvirkende årsag. Ved 'proof of concept' forsøg blev anvendt sammenmurede sten, hvor mørtlen havde en alder på 7 år. Disse sammenmurede sten med én liggefuge imellem kunne efter opvarmning adskilles.

Styrketabet af normmørtlen KC 36/65/650 ved opvarmning er testet for prismer hærdet ved 20°C og min. 50% relativ luftfugtighed i 56 døgn. Mørtelprismerne er herefter genbrændt ved temperaturer op til 850°C. Genbrændingen er udført med en holdetid ved toptemperaturen på 3 timer og opvarmningsrate og nedkølingsrate til 500°C på 50°C/time. FIGUR 25 viser resultatet. Her ses, at ved opvarmning til 550°C mister mørtlen 30% af sin styrke, mens opvarmning til 700°C giver et styrketab op ca. 70%. Dvs. disse forsøg viser i modsætning til litteraturstudie, jf. afsnit 4.1.1 omkring termisk nedbrydning af bindemidlerne i cement, at betydelige styrketab først ses ved opvarmning til temperaturer over kvartspunktet på 572°C. Dette kan være en del af forklaringen på, at temperaturer på 750-800°C kræves for at mørtlens styrke er tilstrækkelig reduceret til let at kunne fjernes ved børstning. Højere temperaturer end forventet vil således også være krævede, før mørtlens styrke er tilstrækkelig lav til at kunne optage de spændinger, som opstår ved opvarmning af murværksbrokker til temperaturer over kvartspunktet.



FIGUR 25. Styrketab for KC 35/65/650 som funktion af genbrændingstemperaturen. Mørtlen er støbt til prismer, som har hærdet 56 døgn forud for genbrænding. Holdetid ved toptemperaturen er 3 timer. Opvarmning og nedkøling til 500°C er foretaget med 50°C/time.

8.2 Estimeret energiforbrug til genbrænding

Test i pilotskala viste, at det ikke var muligt at opnå tilstrækkelig nedbrydning af mørtelstyrken ved opvarmning til temperaturer under kvartspunktet, hvor der sker en pludselig volumenudvidelse af kvarts. I stedet var det nødvendigt at opvarme murværksbrokkerne til temperaturer på omkring 750-800°C. Denne stigning i temperatur kombineret med de reducerede frihedsgrader for bevægelse i større murværkselementer gav i de udførte forsøg anledning til omfattende revnedannelse i de genbrændte sten.

Krav om øget temperatur vil ud over øget risiko for revnedannelse i stenene give et øget energiforbrug under genbrændingen. Da der ikke er udført fuldskalaforsøg, har det ikke været muligt at lave den endelige beregning af energiforbrug til processen. Med udgangspunkt i teglværkets målinger af energiforbrug under en almindelig blådæmpningsproces i ovnen kan det øgede energiforbrug ved anvendelse af en højere temperatur for genbrændingen groft estimeres. Temperaturerne for estimat er udvalgt på baggrund af målingerne af energiforbrug udført på teglværket. Energiforbruget er således estimeret med 550°C, 750°C og 850°C (TABEL 11). Ved beregningerne er det desuden antaget, at energiforbruget i ovnen er uafhængigt af ovenens kapacitetsudnyttelse. Der er lavet beregning ved tre forskellige kapacitetsudnyttelser.

Disse er:

- 18.500 sten. Det svarer til blådæmpning af nyproducerede mursten. Disse kan grundet stenenes ensartede geometri stables tæt, hvilket giver mulighed for høj kapacitetsudnyttelse.
- 10.000 sten. Det svarer til estimatet for kapacitet lavet ved ansøgning af projektet.
- 6.500 sten. Dette svarer til den kapacitetsudnyttelse ved brænding af 155 sten pr. beholder, som er udviklet i AP2.

Til beregningerne i TABEL 11 er det antaget, at alle genbrændte sten kan genbruges. Der er således ikke taget højde for en øget risiko for revnedannelse i stenene ved forsøgets temperaturer. Til sammenligning kræver fremstilling af en ny rød eller gul mursten 8-9 MJ/sten.

Af tabellen nedenfor ses, at det estimerede energiforbrug stiger med 67% ved forøgelse af temperaturen fra 550°C til 750°C, mens energiforbruget mere end fordobles, hvis temperaturen øges fra 550°C til 850°C.

TABEL 11. *Estimeret energiforbrug ved genbrænding af murværk i blådæmpningssovn. Estimatet er baseret på måling af energi under normal blådæmpningsproces.*

Temperatur for genbrænding (°C)	Energiforbrug til genbrænding (MJ/sten)		
	6.500 sten kapacitet	10.000 sten kapacitet	18.500 sten kapacitet
550	6,2	4,0	2,2
750	10,4	6,7	3,6
850	13,4	8,7	4,7

Selv hvis udfordringen omkring revnedannelse i stenene kunne løses, vil krav om temperaturer på 750-850°C for effektiv adskillelse og automatiseret fjernelse af de sidste mørtelrester på stenenes overflader resultere i en alt for energikrævende proces.

Dertil kommer, at aftagere af genbrugsmursten jf. den skitserede forretningsmodel har to incitamenter for valg af genbrugssten:

- Anvendelse af genbrugssten er et mere økonomisk favorabelt valg sammenlignet med anvendelse af nye mursten.
- Anvendelse af genbrugssten medfører en mindre CO₂-belastning end anvendelse af nye sten.

Disse krav vil ikke kunne opnås ved en proces, hvor energiforbruget er på niveau med eller større end fremstilling af nye mursten.

Tendensen til revnedannelse er mindre for gule mursten sammenlignet med røde mursten. Revnedannelse ses dog stadig i flere genbrændinger med gule sten. En metode med stor følsomhed over for sten- og mørteltype kombineret med et højt energiforbrug, vurderes ikke at være tilstrækkelig robust til at finde generel anvendelse. Derfor vurderes det ikke relevant at forsætte arbejdet med optimering af genbrændingsprocessen for murværk baseret på gule sten og mørtler med lavt cementindhold.

8.3 Knust restmateriale som erstatning for sand i nye mursten

I AP1 er der arbejdet med en aktivitet omkring tilsætning af det knuste restmateriale til fremstilling af nye mursten. Restmaterialet udgøres af det materiale, som er tilbage efter, at de hele mursten er taget ud. Denne aktivitet har givet positive resultater. Jf. afsnit 4.5 er det muligt at fremstille nye sten med 5% restmateriale uden at foretage optimeringer omkring råmaterialeblandingen. Det kunne således være interessant, som alternativ til direkte genbrug af mursten fra murværk med stærke mørtler, at forsætte arbejdet med genanvendelse af knust murværk som erstatning for sand til fremstilling af nye mursten. Ved optimering af råmaterialeblanding og processen omkring tilsætning af knust murværk forventes andelen af genbrugsmateriale at kunne øges.

Denne tilgang vil arbejde med genanvendelse af det knuste murværk og ikke med direkte genbrug af hele sten. Metoden vil således være lavere placeret i affaldshierarkiet end den metode, der er arbejdet med i dette projekt. Anvendelse af knust murværk til fremstilling af nye mursten vil dog give en mulig løsning på den stigende udfordring med affald af murværk beskrevet i kapitel 3. Ved tilgangen vil det knuste murværk anvendes som erstatning af primære råstoffer.

Fordele ved genanvendelse af knust murværk til fremstilling af nye sten sammenlignet med direkte genbrug af hele sten efter genbrænding er:

- Ved genanvendelse af knust murværk til nye sten kan både mursten og mørtel genanvendes. Ved direkte genbrug af mursten kan kun sten og ikke mørtel genanvendes.
- Genbrænding forud for adskillelse er en energikrævende proces. Denne energikrævende proces vil ikke være til stede ved knusning og genanvendelse til nye sten.

Da nye mursten fremstilles ved brænding vil evt. PCB-indhold i det murværk, som ønskes genanvendt, kunne fjernes og opsamles i et filter under denne brænding. Dette er beskrevet i AP1, og vil være en fordel i forhold til den direkte genbrug af hele mursten efter mekanisk adskillelse af murværk baseret på svage mørtler. Dette er metoden som anvendes i praksis i dag.

Ifølge interview med nedrivningsfirma udført under arbejdet med udvikling af forretningsmodel kan udgiften til miljøsanering udgøre hovedparten af udgifterne til en nedrivning. Ved anvendelse af knust murværk som erstatning for sand ved fremstilling af nye mursten er det muligt, at miljøsanering i forhold til PCB helt kan undgås. Dette kan således give endnu et økonomisk incitament for anvendelse af det knuste murværk som delvis erstatning for primære råstoffer til fremstilling af nye mursten.

9. Konklusion

I afsnit 3.3 opstilles projektets 5 hypoteser. Nedenstående konkluderes på hver af de 5.

- I. Murværk opmuret med cementholdig mørtel kan adskilles ved genbrænding af murværksbrokker.

Med baggrund i et litteraturstudie opsættes laboratorieskalaforsøg til eftervisning af denne hypotese. Til dette arbejde testes 6 forskellige mørteltyper, som repræsenterer de gængse mørteltyper til opmuring. Dette inkluderer test af svag kalkmørtel, de kalkcementmørtler, som udgør normmørtlerne, samt stærk funktionsmørtel (M5) med cement som eneste bindemiddel. Disse forsøg viser, at de mest udbredte opmuringsmørtler KC 50/50/700 og KC 35/65/650 kan adskilles efter opvarmning til temperaturer på ca. 550°C, som ligger lige under kvartspunktet, hvor risikoen for revnedannelse i stenene øges. Temperaturer på omkring 750°C er dog krævet for adskillelse af mørtlerne med størst cementindhold samt det højeste totale indhold af bindemiddel; KC 20/80/550 og M5.

Efterfølgende opskalering af de udførte forsøg til genbrænding af større murværksbrokker bestående af et tredimensionelt netværk af både lodrette og vandrette mørtelfuger viser, at temperaturer omkring 700°C nu kræves for adskillelse af murværk med mørtlerne KC 50/50/700 og KC 35/65/650, som i laboratorieskalaforsøg kunne adskilles ved lavere temperaturer. Desuden ses markant revnedannelse i stenene. Tendensen til revnedannelse stiger ved stigende temperaturer.

De udførte forsøg bekræfter således, at genbrænding kan anvendes til adskillelse af murværk opmuret ved cementholdig mørtel. Adskillelsen kan dog ikke foretages uden høj grad af revnedannelse i de adskilte sten. Revnedannelsen følger murværkets forbandt. Desuden kræver effektiv adskillelse af murværk en genbrændingstemperatur, som er 200-250°C højere end den forventede temperatur. Dette giver et markant forøget energiforbrug på niveau med fremstilling af nye sten.

- II. Farveændring af mursten til grålige nuancer kan kombineres med adskillelsen af murværk ved brænding af brokkerne under reducerende betingelser.

Denne hypotese er ved udførelse af forsøg principielt eftervist. Dog opstår samme uforudsete forhold med omfattende revnedannelse af sten, som ved brænding af murværksbrokker under betingelser, som ikke fører til farveskift af teglmaterialet.

- III. Anvendelse af kombineret mikrobølgeenergi og energi fra forbrænding af fossile brændsler vil kunne reducere CO₂-udledningen forbundet med genbrændingen.

Test med genbrænding af murværksbrokker ved kombination af traditionel gasfyring og opvarmning med mikrobølger drevet af el, har vist, at brændingsmetoden er anvendelig til genbrænding af murværksbrokker. Dvs. både mursten og mørtel er modtagelige for mikrobølger. Ved genbrænding i pilotskalaovn øges det totale energiforbrug med 12-13% ved omstilling fra ren gasbrænding til kombinationen af gas og mikrobølger. Da en stor del af den anvendte energi kommer fra mikrobølger drevet af el, som potentielt kan stamme fra vedvarende energi, viser de udførte forsøg, at der er potentiale for at reducere forbruget af energi fra fossile brændsler med 40-45% ved omstillingen til delvis mikrobølgebaseret genbrænding.

- IV. Restmateriale fra adskillelse af murværk og genbrug af hele sten kan tilsættes nye mursten som erstatning for sand.

Denne hypotese er eftervist i projektet. På baggrund af forsøg udført i mindre skala med varierede tilsætning af knust restmateriale til nye mursten, er der på teglværket udført et pilotskalaforsøg med fremstilling af 300 mursten med knust restmateriale. Dette forsøg har vist, at det uden optimering af råmaterialeblandingen er muligt at tilsætte 5% knust restmateriale til nye tegl.

- V. Genbrænding kan foretages ved brug af eksisterende produktionsudstyr til blådæmpning af nyproducerede mursten på teglværk.

Denne hypotese er ved arbejdet i AP2 eftervist, for så vidt angår håndtering af murværksbrokker med varierende størrelse og geometri i eksisterende batchovne. Hypotesen er eftervist ved udvikling af en beholder til opbevaring af nedrevne murværksbrokker under genbrændingen. Den udviklede beholder har en størrelse, som gør den egnet til anvendelse i eksisterende ovne, og beholderen kan fyldes, placeres i ovn og tømmes med eksisterende løfteudstyr på teglværket.

Hypotesen er desuden delvist eftervist, hvad angår håndtering af mørtelrester og støv dannet under genbrændingsprocessen. Den udviklede beholder har en bund, som sikrer, at løse mørtelrester forbliver i beholderen og ikke falder ned på ovnens bund. Grundet de uforudsete udfordringer med revnedannelse i sten som følge af genbrænding til højere temperaturer, er der ikke udført arbejde omkring udvikling af en automatiseret metode til fjernelse af de sidste mørtelrester på stenoverflader.

10. Litteraturliste

Bauleke, M. P. (1978): How to solve the problems of body Cracking and Glaze Popping in Stoneware Bodies, Kansas Geological Survey, Bulletin 211, part 4, 23-27.

Cruz & Gillen (1980): Thermal Expansion of Portland Cement Paste, Mortar and Concrete at High Temperatures, Fire and Materials, vol 4 no. 2.

DS/EN 1996-1-2:2007 Eurocode 6: Murværkskonstruktioner – Del 1-2: Generelle regler – Brandteknisk Dimensionering

DS/INF 167:2015 Supplerende vejledning for murværk i forbindelse med brug af Eurocode 6

Falk C. (1980): Tegl 10 – Tegl, mørtel, murværk – egenskaber, Kalk- og Teglværkslaboratoriet, 1980

Hansen, H. (1993): Genbrug af mursten og mørtel efter genbrænding, Murværkscenteret, Teknologisk Institut (inter rapport)

Kingo (2019): Prislister Kingo Recycling Silkeborg, gældende fra 1. november 2019

Københavns Kommune (2016): Genbrug af mursten, forslag til undersøgelse af muligheder for genbrug af mursten i forbindelse med renovering af kommunale bygninger, Københavns Kommune, Teknik og Miljøforvaltningen, Byens Anvendelse, Jord og Affald

Københavns Kommune (2017): Genbrug af mursten, Erfaringer fra nedrivning af bygning 13 på Bispebjerg Hospital og genbrug af mursten til nybyggeri på Katrinedals Skole i Vanløse, , Københavns Kommune, Teknik og Miljøforvaltningen, Center for Miljøbeskyttelse, Jord og Affald

Miljøstyrelsen. Termisk og mikrokølge-behandling af PCB i bygninger og byggeaffald. (2019).

Miljøstyrelsen. PCB faktaark. 1–11 (2011)

Moesgaard, M et al (2012): Hydration of Blended Portland Cements Containing Calcium-aluminosilicate Glass Powder and Limestone, J. Am. Ceram. Soc. 95 [1] 403-409 (2012)

Osterwalder A. & Pigneur Y.: Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers, John Wiley & Sons Inc. 2010

Song, H et al. (2018): A study of thermal decomposition of phases in cementitious systems using HT-XRD and TG, Construction and Building Materials 169 (2018) 548-661.

Teknologisk Institut (2014): Sundheds- og arbejdsmiljørigtig metode til fjernelse af fuger med og uden PCB Delprojekt: Håndtering af mørtelfuger ved siden af elastiske PCB-holdige fuger.

Van der Graaf, A (2004): Refiring bricks at 540°C, Delft University

Walkiewicz, J et al. (1988): Microwave heating characteristics of selected minerals and compounds, Minerals and Metallurgical Processing 5 (1) 39-42.

Direkte genbrug af mursten fra murværk med stærke mørtler

Halvdelen af det murværk, som i dag rives ned i forbindelse med renovering eller nedrivning af eksisterende byggeri, har intet potentiale for direkte genbrug af murstenene. Årsagen er, at der i dag ikke eksisterer en metode, som muliggør adskillelse af murværk opmuret med stærk cementholdig mørtel. I nærværende projekt arbejdes med udvikling af en metode til adskillelse af nedrevne murværksbrokker og direkte genbrug af murstenene fra murværk opmuret med stærke cementholdige mørtler. Metoden baserer sig på genbrænding af de nedrevne murværksbrokker.

I projektet udføres forsøg i laboratorie- og pilotskala. De udførte forsøg bekræfter, at genbrænding kan anvendes til adskillelse af murværk opmuret ved cementholdig mørtel. Adskillelsen kan dog ikke foretages uden høj grad af revnedannelse i de adskilte sten. Revnedannelsen følger murværkets forbandt.

I projektet udføres forsøg med genbrænding af murværksbrokker med kombineret gas- og mikrobølgebrænding. Forsøgene viser, at både mursten og mørtel er modtagelige for opvarmning med mikrobølger. Mikrobølger genereres på baggrund af elektricitet, som kan baseres på vedvarende energi. De udførte forsøg viser således, at der er potentiale for at reducere forbruget af energi fra fossile brændsler med 40-45% ved omstilling til delvis mikrobølgebaseret teknologi.

Projektet viser desuden et potentiale for, at det restmateriale, som dannes ved adskillelse af murværk og genbrug af de hele sten, kan anvendes som delvis erstatning for sand ved fremstilling af nye mursten. Udførte forsøg viser, at det uden optimering af råmaterialeblandingen er muligt at tilsætte 5% knust restmateriale til nye tegl.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk