Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Recirkulering af murværk til mursten MUDP-projekt

MUDP

Oktober 2026

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:
Abelone Køster, Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7564-165-9

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.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrations-program

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Lerchesgade 35, 5000 Odense| Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
MUDP's hjemmeside

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	**Forord**	**5**
1.1	Læsevejledning	5
1.2	Definitioner og begreber	5
2.	**Opsummering og konklusion**	**6**
2.1	Cirkulær økonomi for byggeaffald	6
2.2	Projektets gennemførelse i 4 arbejdspakker	6
2.3	Konklusion	7
3.	**Indledning og formål**	**8**
3.1	Genbrug og genanvendelse af murværksaffald i dag	8
3.2	Formål	10
4.	**Fra murværksaffald til nyt råmateriale – Gensand (AP1)**	**12**
4.1	Indledning og overblik	12
4.2	Krav til Gensand som råmateriale til teglproduktion	12
4.3	Prøveproduktion af Gensand	13
4.4	Forretningsmodel	16
5.	**Udvikling af recept for mursten med knust murværk (AP2)**	**18**
5.1	Indledning	18
5.2	Forsøg med anvendelse af Gensand i laboratorieskala	18
6.	**Udfasning af byggeaffald i deponi (AP3)**	**23**
6.1	Indledning	23
6.2	Byggeaffald med PCB: Litteraturstudie	23
6.3	Udvikling af metode til eliminering af PCB: Pilotskala-forsøg	27
6.4	Andre mineralske affaldsfraktioner	33
7.	**Fuldskalaforsøg med Gensand på teglværk (AP4)**	**38**
7.1	Indledning	38
7.2	Fuldskalaforsøgsproduktion af mursten med Gensand	38
7.3	Tekniske egenskaber af mursten	42
7.4	Beregning af CO_2-udledning	44
8.	**Diskussion**	**47**
9.	**Konklusion**	**49**
10.	**Perspektivering**	**51**
11.	**Referencer**	**53**

1. Forord

Projektet ”Recirkulering af murværk til mursten” er udført af Teknologisk Institut, Byggeri og Anlæg samt projektpartnerne Egernsund Wienerberger (EW) og RGS Nordic under Miljøstyrelsens Program for Udviklings- Test- og Demonstrationsprojekter (MUDP) – Område Cirkulær Økonomi og Genanvendelse. Projektet er udført i perioden 1. marts 2021 til 31. december 2022. Projektet vil udvikle metoder til at oparbejde murværksaffald fra nedrivninger til et dokumenteret råstof, Gensand, som erstatter naturligt sand, som i dag tilsættes lerblandingen ved fremstilling af mursten. Projektet vil dermed muliggøre cirkulær ressourceøkonomi for typer af murværk, som i dag kun kan nedknuses og anvendes til fyld, samt udvikle en forretningsmodel for at fremstille en værdifuld sekundær ressource, som kan genanvendes i fremstilling af nye mursten.

1.1 Læsevejledning

Et resumé af projektets baggrund, gennemførelse og konklusion ses i **afsnit 2 Opsummering og konklusion.**

Afsnit 3 Indledning og formål redegør for projektets baggrund og formål, set ud fra såvel økonomiske som miljømæssige perspektiver.

De følgende fire afsnit, **afsnit 4 til 7 vedr. projektets arbejdspakker 1 til 4**, redegør for gennemførelse i fire arbejdspakker og de opnåede resultater.

I **afsnit 8 Diskussion** behandles en række grundlæggende udfordringer ved at udnytte affaldsstrømme til sekundære råvarer samt de specifikke udfordringer, som er opstået og håndteret i projektet.

I **afsnit 9 Konklusion** opstilles, på baggrund af projektets resultater, de overordnede, begrundede konklusioner af projektet.

Afsnit 10 Perspektivering beskriver de muligheder, som åbner sig på baggrund af projektets resultater, hvor disse ikke direkte er udnyttet af projektets partnere i forlængelse af projektet.

En **referenceliste** findes i **afsnit 11**. Der henvises til referencer med tal i [ ].

1.2 Definitioner og begreber

Naturligt sand: Sand udvundet som primært råstof (en naturressource)
Sekundært råstof, her: råstof oparbejdet fra en eller flere affaldsfraktioner

2. Opsummering og konklusion

2.1 Cirkulær økonomi for byggeaffald

Projektet udvikler metoder til at genanvende murværksaffald til erstatning af sand i produktion af tegl, hvorved projektet sikrer et cirkulært materialekredsløb, hvor materialer fra nedrevet byggeri oparbejdes og indgår i fremstilling af nye byggevarer. Murværksaffaldet oparbejdes til et sekundært råstof, Gensand, der erstatter naturligt sand til teglbranchen i Danmark, som i dag anvender ca. 120.000[1] tons naturligt sand om året til produktion af tegl. Dette sand udgør en ikke fornybar ressource. Samtidig udgør murværksaffald pr. år ca. 400.000 tons, hvoraf kun en mindre del genbruges direkte som mursten. Mere end 90% af nedrevet murværk nyttiggøres efter knusning til vejfyld, dvs. en genanvendelsesstrategi, som placerer sig i affaldshierarkiets nederste del og med mindst miljømæssig værdi. Dertil kommer, at knust murværk, grundet materialernes lave densitet, ikke er optimalt som vejfyld, hvorfor affaldet ofte kun anvendes som ekstra fyld, hvor der egentlig ikke er behov for det.

I projektet samarbejder den deltagende affaldsmodtager, RGS Nordic, og den deltagende teglproducent, Egernsund Wienerberger, om at etablere et nyt samarbejde i værdikæden, hvor byggeaffald udnyttes som en sekundær ressource. I projektet udvikles metoder til at oparbejde og genanvende murværksaffaldet til et brugbart råstof, som dokumenteret opfylder teglproducenters kravsspecifikationer. Det udviklede sekundære råstof, Gensand, skal fuldt eller delvist erstatte anvendelsen af naturligt sand som primært råstof til fremstilling af mursten.

Projektet undersøger desuden muligheden for at inddrage mere problematiske affaldsstrømme, som typisk skal deponeres, herunder især affald der er forurenet med PCB. For de PCB-forurenede affaldsfraktioner undersøges det specifikt, om teglbrændingen, som er en højtemperaturproces, kan nedbryde eller fjerne PCB, så disse materialer i stedet kan recirkuleres frem for at ende i deponi.

2.2 Projektets gennemførelse i 4 arbejdspakker

I arbejdspakke 1, Fastlæggelse af kravsspecifikationer og proces for oparbejdning, tages der udgangspunkt i teglværkets krav til sand. Det kræver dog også en nærmere vurdering af fx renhedskrav, som normalt ikke er en egenskab, det er nødvendigt at forholde sig til for naturligt sand. I arbejdspakken fastlægges og testes, hvad der kan betegnes som en ”acceptabel kvalitet” for Gensand og dokumentationsmetoder til at sikre denne.
I arbejdspakke 2, Recepter for teglproduktion med Gensand, udvikles i laboratorieskala forskellige recepter for teglproduktion med Gensand. Gennem mindre serier af prøveproduktioner undersøges egenskaber for tegl med tilsætning af Gensand i forskellige mængder.
I arbejdspakke 3, Håndtering af PCB-forurenet byggeaffald, undersøges såvel PCB-forurenet byggeaffald samt andre typer af affald, som typisk ender i deponi af andre grunde (sanitet, filtermaterialer mv.). Specielt undersøges det, om murværk og andet mineralsk byggeaffald – fx beton – indeholdende uønskede organiske stoffer, særligt PCB, kan renses effektivt ved brænding i teglovnen under fremstilling af nye mursten. Herved bidrages til at løse samfundsudfordringen med deponi af farligt murværks- og betonaffald.
I arbejdspakke 4, Fuldskalaforsøg, gennemføres en produktion af mursten på teglværket, hvor såvel proces som produktegenskaber kan undersøges 1-1.

[1] På tidspunktet for ansøgningen af dette projekt blev det totale forbrug estimeret til 175.000 tons sand om året. I dag er estimatet pba. oplysninger fra branchen nedjusteret.

2.3 Konklusion

Projektet har vist, at det er muligt at erstatte naturligt sand 1-1 med ”Gensand” i form af nedknust murværk uden negative effekter for murstenene. Dette forudsætter, at det nedknuste murværk leveres med en specificeret kornstørrelse og renhedsgrad.

Forretningsmodellen for Gensand viser, at produktet i øjeblikket er dyrere i indkøb for teglværkerne end naturligt sand. Da der er tale om en mindre margin, betyder det, at der kun skal ske små ændringer i markedssituationen, for at forretningen bliver attraktiv. Det kan være stigende råstofpriser eller øget afgift på råstoffer.

Projektet har desuden testet og vist, at eventuelle PCB-rester, som på trods af miljøsanering og kontrol måtte findes i Gensand, under alle omstændigheder er nedbrudt og fjernet fra det færdige produkt i forbindelse med brændingsprocessen. Brændte teglmursten med et indhold af byggeaffald vil derfor under alle omstændigheder være PCB-frie. Der er taget luftprøver under processen i forbindelse med opvarmning af prøver af byggeaffald med højt indhold af PCB efter den temperaturkurve, som anvendes til teglmursten. Det er hermed vist, at afgasning fra PCB er en hindring for, at teglprocessen kan udnyttes med det specifikke formål at fjerne PCB fra forurenet affald.

Analyser af alternative affaldsstrømme og forsøg i laboratorieskala med iblanding i ler og brænding har vist, at:

- Letklinker brugt som filternødder i biogasanlæg har for højt svovlindhold til direkte anvendelse.
- Letklinkerblokke fra byggeri vurderes at kunne anvendes til Gensand, men det kræver en særskilt afprøvning.

Affaldsfraktionen sanitet og keramik er ikke umiddelbart attraktiv til Gensand af æstetiske årsager. Test i laboratorieskala viser, at materialet ikke forringer teglets egenskaber, men rester af højt brændt porcelæn kan være synligt i det færdige produkt.

Nedenfor, i TABEL 1, findes en oversigt over projektets hypoteser og tilhørende konklusioner.

TABEL 1. Overblik over projektets hypoteser og konklusioner.

Følgende hypoteser er undersøgt:	Konklusion:
Sand til murstenproduktion kan erstattes af nedknuste murværksmaterialer	Bekræftet
Efter brænding er mursten med Gensand PCB-frie	Bekræftet
Højtemperaturprocessen på teglværket kan udnyttes til at fjerne PCB fra forurenet byggeaffald	Afvist
Andre byggeaffaldsfraktioner kan indgå i blandingen til ”Gensand”	Delvist bekræftet

3. Indledning og formål

Bygge- og Anlægsbranchen i Danmark producerer store mængder affald. I Miljøstyrelsens affaldsstatistik for 2019 [1.] oplyses fraktionen ”blandinger eller separerede fraktioner af beton, mursten, tegl og keramik” at udgøre 568.000 ton (murværksaffald og tegl anslås i ansøgningen at udgøre 400.000 tons heraf), en stigning på næsten 30% siden 2015. Mængden har i perioden 2015-19 udgjort godt 10% af den samlede mængde byggeaffald, og stigningen er derfor et udtryk for en stigende affaldsmængde.

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 oparbejde nedknust murværk opført med stærke cementholdige mørtler til et råmateriale, som kan erstatte sand til teglproduktion.

Samtidig undersøges andre mineralske affaldsstrømme til anvendelse som potentiel erstatning for sand til teglproduktion. Projektet vil udvikle valide metoder til at oparbejde murværksaffald til et dokumenteret råstof, som erstatter dette sand.

Projektet muliggør cirkulær ressourceøkonomi for alle fraktioner af murværksaffald og udvikler en forretningsmodel for at fremstille en værdifuld sekundær ressource, som kan genanvendes i fremstilling af nye mursten.

Anvendelse af sand i teglproduktionen

Tegl i form af mursten og tagsten fremstilles i Danmark af lokale ler-ressourcer. Leret skal have en tilpas kornkurve, det vil sige, at det hverken må være for finkornet eller for fedt. Til de mest fede lertyper i Danmark tilsættes der op til 40% magringsmiddel, overvejende i form af sand fra grusgrave for at opnå en passende kornkurve i produktionsblandingen. Kornkurven har betydning for blandingens stabilitet under tørring og brænding, så revner og brækage undgås. Kornkurven har også betydning for de tekniske egenskaber af det færdige produkt, såsom trykstyrke og vandoptagelse.

Ud over at tilsætte naturligt sand fra grusgrave, anvendes også chamotte i form af knust tegl, fx fra fejlproduktioner, som tilsætning til fremstilling af nye tegl. Her kan det knuste tegl 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 faseændringen af kvarts ved 573°C.

Samlet anvender teglbranchen i Danmark ca. 120.000 tons sand om året til produktion af tegl.

3.1 Genbrug og genanvendelse af murværksaffald i dag

En tidligere undersøgelse af genbrug af byggematerialer udgivet af Miljøstyrelsen siger følgende: *”Den totale genanvendelses-procent 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 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 upcycling. 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. ton afhængig af affaldets renhed (Kingo, 2019), svarende til en årlig omkostning på omkring 25-30 mio. kroner for afskaffelse af nedrevet murværk i Danmark" [2.].

I ovenstående tekst refereres der ved "(*Kingo, 2019*)" til [3.] **Murværk med stærke mørtler**
Omkring 1955 blev det udbredt i Danmark 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 støt. I dag er opmuringsmørtler, baseret på cement som eneste bindemiddel, stadig dominerende på markedet. Dog er der øget fokus på, at mursten også i fremtiden kan genanvendes, og svagere kalk-baserede mørtler vinder i en vis grad frem.

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 at genbruge mursten fra murværk opført efter perioden omkring 1955. Det skønnes, at 50% af de nedrivninger, som foretages i dag, er bygninger opført 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.

Flere initiativer omkring genanvendelse af murværk baseret på stærke mørtler er i gang. Det gælder dels udskæring af hele murværkselementer (ca. 1 m x 1 m) fra facaden af eksisterende murværk fra bygninger under nedrivning og nye mekaniske rensemetoder for stærke mørtler. Mekaniske metoder vil dog altid have en begrænsning for murværk, hvor mørtlen er hårdere end murstenene, hvilket kan forekomme.

I 2017-19 gennemførte Teknologisk Institut i samarbejde med Bachmanns Teglværk MUDP-projektet "Direkte genbrug af mursten fra murværk med stærke mørtler" [2.]. Projektets idé var at nedbryde cementens bindinger med opvarmning, så vidt muligt med mikrobølger for at minimere CO_2-emissionen. Projektet viste, at nedbrydning af mørtlen var mulig med opvarmning, men på bekostning af revner i de mursten, som skulle udvindes. I samme projekt blev der udført forsøg med at iblande mørtelrester fra murværk, hvor murstenene var udvundet, i lermassen til mursten. Dette lagde bl.a. grunden til nærværende projekt. Dette uddybes nærmere i afsnit 3.2 Formål.

Ved direkte genbrug af hele mursten fra murværk dannes således 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.

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 [2.]. Såfremt disse sten efter endt levetid skal genanvendes som vejfyld, vil det med de nuværende priser [3.] på afskaffelse af murværksaffald til vejfyld medføre en total omkostning på omkring 550 mia. DKK.

3.2 Formål

Projektet vil udvikle en sekundær råvare, baseret på murværksaffald, til erstatning af naturligt sand i produktion af tegl, hvorved projektet sikrer et cirkulært materialekredsløb:
Materialer fra gammelt byggeri oparbejdes og indgår i fremstilling af nye byggevarer, der returnerer til byggeriet. Projektet vil udvikle et nyt råstof, Gensand, der erstatter sand til teglbranchen i Danmark, som i dag anvender ca.120.000 tons sand om året til produktion af tegl.
Projektets idé bygger på forsøg gennemført i forbindelse med projektet "Direkte genbrug af mursten fra murværk med stærke mørtler" [2.]. Her blev der bl.a. forsøgt at anvende mørtelrester fra murværksbrokker i produktionen af nye mursten, men grundet genbrænding af mørtelresterne, kunne kalket i mørtlen karbonatisere (hærde) på ny, hvilket gav en række problemer ifm. fremstillingen af nye mursten. Det var således kun muligt at tilsætte 5% brændt mørtel til røde sten ud over det sand, som allerede var tilsat lerblandingen.
I nærværende projekt arbejdes der med affaldsstrømme, som ikke genbrændes. Dermed vil indhold af kalk og cement forventeligt være fuldt karbonatiseret og dermed inaktivt ift. teglprocessen. Da der samtidig er et vist indhold af tegl i affaldet, forventes en langt højere tilsætning byggeaffald at være realistisk, og projektets mål er, at Gensand kan sammensættes, så det på sigt kan erstatte naturligt sand 100%.

Miljømæssigt perspektiv

Fremstilling af mursten kræver indvinding af de ikke-fornybare råstoffer; ler og sand, som udgør råmaterialerne til mursten. Fremstilling af mursten sætter således et stort aftryk på forbrug af naturressourcer. Projektet reducerer anvendelsen af ikke-fornybare naturressourcer ved at erstatte sand i teglproduktionen med nedrevet knust murværksaffald. Dette er i overensstemmelse med FN's verdensmål nr. 12, om ansvarligt forbrug og produktion. I delmål til verdensmålet udspecificeres det, at der inden 2030 skal opnås en bæredygtig og effektiv udnyttelse af naturressourcer samt at affaldsmængder væsentligt skal reduceres. Projektet vil bidrage til opfyldelse af dette. Vores danske naturressourcer er ikke ubegrænsede, og undersøgelser viser, at der fremadrettet kan forventes udfordringer med at skaffe tilstrækkelige mængder sand af en kvalitet, som gør det egnet til fremstilling af mursten og andre byggematerialer. Regionerne har tidligere estimeret, at der er 14-43 års forbrug af råstoffer tilbage i de udlagte graveområder [4.]. Næsten hele Danmarks areal er i brug fx til landbrug, skov, natur, byer og veje, hvorfor det kan være en udfordring at udlægge nye graveområder. Genbrug og genanvendelse af byggeaffald vil være en tilgang til at reducere dette træk på jomfruelige råstoffer.
I Danmark produceres årligt ca. 750.000 tons tegl, hvortil der anvendes ca. 120.000 tons sand.

Det er projektets mål, at Gensand skal opnå tekniske egenskaber, så det på sigt kan erstatte naturligt sand 1 til 1. Sand udgør i gennemsnit 15-20%[2] af råmaterialerne til fremstilling af tegl. Forsigtigt sat erstattes mindst 75% af dette sand af Gensand. Det er tidligere beskrevet, at ressourcen baseret på affald er tilstrækkelig stor til at dække behovet for sand til fremstilling af tegl, og stor nok til, at hele mursten kan udvindes først, hvor relevant. Derved er det realistisk, at den danske teglindustri bliver i stand til at reducere sit forbrug af ikke-fornybare naturressourcer med 12-15%. Samtidig er det i afsnit 3.1 beskrevet, at en stor del af det knuste murværksaffald bortskaffes som fyld uden egentlig funktion. Anvendelsen til Gensand vil derfor ikke føre til ressourcemangel et andet sted.

Anvendelse af eksisterende produktionsudstyr

Virksomhedspartnerne RGS Nordic og Egernsund Wienerberger råder allerede ved projektstart over udstyr og kompetencer for udvikling, produktion og udnyttelse af Gensand.

[2] I ansøgningen blev sandmængden anslået at udgøre i gennemsnit 20-25% af lerblandingen til mursten. På baggrund af oplysninger fra EW er dette nedjusteret til 15-20%

RGS Nordic arbejder i dag med modtagelse af murværksaffald og salg af dette til vejfyld efter knusning. RGS Nordic har udstyr og kompetence til at modtage og knuse byggeaffald, og har dermed grundlaget for i projektet at udvikle yderligere kompetencer og metoder, til at behandle, teste og dokumentere råvarer fra affald som ressource, og derved opnå en højere pris. På længere sigt kan virksomheden tilføje flere produkter af højere værdi til sin produktportefølje. RGS Nordic har ved deltagelse i MUDP-projektet ”Genanvendt beton-tilslag til beton-produktion i industriel skala” erfaring med oparbejdning af nedrevet beton til erstatning for tilslag i ny beton.

De deltagende teglværker under Egernsund Wienerberger, Vesterled Teglværk og Helligsø Teglværk, arbejder rutinemæssigt med at justere recepter og proces i teglfremstilling, og har derfor kompetencerne til at implementere et nyt råstof, og til at medvirke til at definere acceptkriterierne. Typisk valses lerblandingen ned til 0,8 mm før formgivning. På nogle produktionssteder sker valsning efter tilsætning af sand, på andre før. Dette har betydning for kravet til nedknusning af Gensand. Kravet til kornstørrelse er mindre kritisk, hvor lerblandingen valses efter tilsætning af sand eller Gensand.

4. Fra murværksaffald til nyt råmateriale – Gensand (AP1)

4.1 Indledning og overblik

Arbejdspakke 1 omhandler oparbejdning af murværksaffald til et råmateriale – Gensand – som helt eller delvist kan erstatte sand som råmateriale til fremstilling af mursten. Der udføres empiriske undersøgelser af sammensætningen af typiske murværksaffaldsfraktioner. Her bestemmes indhold af tegl, mørtel og fremmede materialer; både uorganiske i form af beton, bindere og mineraluld og organiske i form af træ og plast.

De generelle kvalitetskrav til magringsmiddel må identificeres. Normalt anvendes sand, hvor forhold som renhed og kornstørrelse er givet, så det er nødvendigt at vurdere betydningen af fremmede materialer som fx bindere og isolering på baggrund af teoretiske studier, erfaring med teglproduktion samt fra empiriske undersøgelser med teglfremstilling i laboratorieskala i Arbejdspakke 2, som udføres sideløbende.

Arbejdspakke 1 udvikler også et oplæg til procesbeskrivelse med proceskontrol for modtagelse af murværksaffald og oparbejdning til et råmateriale til teglfremstilling. På baggrund af proceskontrollen kan den råvare, som fremstilles hos affaldsmodtageren, leveres til teglværket med dokumentation for de identificerede kvalitetskrav.

På baggrund af kvalitets- og proceskrav til råvaren kan der opstilles en forretningsmodel, ud fra omkostninger til transport og behandling, samt teglværkernes eksisterende omkostninger til magringsmiddel.

4.2 Krav til Gensand som råmateriale til teglproduktion

Ved identifikation af relevante kriterier og kravgrænser er der dels trukket på teglværkets generelle erfaringer samt på erfaringer fra et tidligere MUDP-projekt [2.], hvor der hos Teknologisk Institut blev udført simple forsøg med iblanding af knust murværk, som havde været genbrændt og derfor indeholdt calciumhydroxid, $Ca(OH)_2$. Vandbehovet var ikke væsentligt påvirket, og da murværksaffaldet i det aktuelle tilfælde ikke genbrændes, er det usandsynligt, at der findes ikke-karbonatiseret kalk af betydning i Gensand. Erfaringsmæssigt anvendes der på teglværkerne andre typer af magringsmiddel, som fx chamotte, dvs. knust tegl fra fejlproduktioner og lignende.

Kriterier med betydning for magringsmiddel til tegl, som bl.a. blev identificeret i det tidligere MUDP-projekt:

- Det er erfaringsmæssigt kendt, at indhold af calciumhydroxid i mørtlen har betydning for vandbehov og bearbejdelighed af råmaterialeblandingen på teglværket. Et indhold af $Ca(OH)_2$ helt ned til 0,2% kan nedsætte bearbejdeligheden i lermassen og øge kravet til vanddosering, hvilket kan øge energibehovet til tørring.
- Kalk i større partikler kan give såkaldte ”kalkspringere” i mursten. Hvis magringsmidlet indeholder større kalkkorn, som ikke nedknuses tilstrækkeligt, kan disse forårsage kalkspringere i det færdige teglprodukt. Derfor er kornstørrelsen af betydning.
- Desuden er renhed for fremmedlegemer af betydning, et forhold som normalt ikke er nødvendigt at kontrollere for naturligt sand. Fremmedlegemer så som skruer, søm, bindere og lignende i lermassen kan sætte sig fast i maskinerne og dermed øge produktionstiden og

maskinomkostningerne. Mindre emner kan indlejres i færdigproducerede mursten og kan efter indmuring resultere i misfarvninger eller afskalninger og dermed øgede omkostninger til udskiftning af mursten.

Overordnede krav ift. produktion:

- Det væsentligste er en ensartet kvalitet.
  Det blev tidligt i projektet drøftet, om Gensand kunne leveres med fx deklaration af teglindhold i hver batch, så teglværket kunne regulere receptens sammensætning af magringsmiddel i form af Gensand, sand og chamotte. Dette ville kræve for omfattende styring af lager og proces hos teglværkerne, og blev derfor forkastet til fordel for én produkttype.
- Tegl må ikke blive "en skraldespand": Det skal være fri for tungmetaller og andre skadelige stoffer i koncentrationer, der kan medføre at tegl klassificeres som farligt affald.

De opstillede kriterier og kvalitetskrav til knust murværk (Gensand) ses i TABEL 2.

TABEL 2. Kvalitetskriterier, kravgrænser og kontrolmetoder for Gensand.

Kvalitetskriterier	Krav eller grænseværdi	Kontrolmetode
Indhold af kalksten [a)]	0% kalkkorn med en kornstørrelse over 1 mm	Bestemmelse af kalkkornindhold ved vådsigtning og titrering
Indhold af sulfat og sulfid [b)]	Under 0,1 vægt%	Analyse af stikprøver Kemisk bestemmelse af total svovl og sulfat
Kornstørrelse	Op til 4 mm, hvis teglværket valser efter tilsætning Op til 1 mm, hvis teglværket valser før tilsætning [c)]	Sigtes efter knusning og evt. valsning
Renhed for fremmedlegemer	• Helt fri for bindere, søm, skruer og lignende. Rustfast stål kan ødelægge valsekapper • Fri for glasuld (lavt smeltende)	Visuel kontrol Magnetisk sigtning Rensning ved sigtning [d)] I tvivlstilfælde kan indhold af organisk materiale testes ved måling af glødetab
Miljøkrav	Der anvendes kun miljøscreenet og rent byggeaffald	Miljøscreening og stikprøver for PCB

a) Krav til indhold af kalksten i Gensand afhænger af processen på teglværket. Når lerblandingen valses efter tilsætning af Gensand, forfalder kravet; påvist under AP4, hvor TI udførte test af læskningsdygtige partikler i mursten fra fuldskalaforsøg. På teglværker, hvor Gensand tilsættes efter valsning, er det et krav, at produktet nedknuses til <1 mm.
b) Sulfatindholdet i produktionsblandinger kan neutraliseres ved tilsætning af bariumkarbonat. Indholdet af sulfid kan ikke neutraliseres og giver risiko for misfarvninger på det brændte produkt.
c) Krav til kornstørrelse af Gensand afhænger af processen på teglværket. Når lerblandingen valses efter tilsætning af Gensand, er kravet, at kornstørrelsen skal være max 4 mm. På teglværker, hvor Gensand tilsættes efter valsning, skal produktet nedknuses til 1 mm.
d) Ved sigtning til maksimal kornstørrelse 4 mm fjernes erfaringsmæssigt skadelige stålpartikler mv.

4.3 Prøveproduktion af Gensand

RGS har udført forsøg med knusning og oparbejdning af murværksaffald kaldet "ballast" for at opfylde de opstillede kvalitetskrav.
Der blev udvalgt fraktioner med primært tegl/mursten ud fra ballast-bunker. Da teglværket anvender chamotte (frasorterede mursten) som magringsmiddel, og der er erfaring for, at chamotte kan erstatte op til 90% af sand, er der ingen øvre grænse for, hvor meget tegl Gensand kan indeholde. Der er således ingen relevant maksimumsgrænse for indhold af tegl i Gensand.

RGS har derved fremstillet første batch af Gensand baseret på murværksaffald fra i alt to bigbags. Der blev udtaget ca. 12 kg af denne batch til forsøg på laboratorium på TI, mens resten blev leveret til Helligsø Teglværk til fuldskalaforsøg.

Der blev udtaget to stikprøver af batch 1, G01/A og G01/B, til laboratorieanalyser (rapport nummer 924701-1) for indhold af kalk og organisk materiale. Kalkindholdet i form af calciumcarbonat $CaCO_3$ blev målt til hhv. 13,16 og 13,12 vægt%. Værdien indgår i beregning af CO_2-belastningen ved brænding af tegl med Gensand. Indholdet af organisk materiale blev beregnet ud fra målt værdi for glødetab ved opvarmning til 950°C. Det organiske indhold blev beregnet til <0,5 vægt%. Murværksmaterialer indeholder normalt intet organisk materiale, så organisk indhold ses som udtryk for forurening med plast, træ etc. Indholdet af forurening med organiske stoffer ses altså at være meget lavt og betragtes som negligerbart.

RGS har i processen udnyttet sine generelle metoder for oparbejdning af affald til råmateriale, fx nedknusning og frasortering af uønsket materiale. Der blev afholdt en projektworkshop den 14. april 2021 hos Teknologisk Institut, hvor procestrin og proceskontrol blev gennemgået, drøftet og tilpasset produktkravene, jf. 4.2. RGS anvender sit eksisterende Fabriks Produktions Kontrol-system (FPC-system), som er udviklet for betonaffald, der oparbejdes til tilslag til ny beton.

FPC-systemet består i korte træk af:

- Registrering af modtaget affald, mængder, type etc.
- Dokumentation af miljøscreening før nedrivning, som sikrer, at affaldet ikke indeholder uønskede stoffer
- Modtagekontrol
- Proceskontrol, herunder regelmæssige renhedstest, se nedenfor
- Færdigvarekontrol; her udtages stikprøver til ekstra kontrol for PCB samt hvis aftalt, andre identificerede egenskaber for anvendelsen. Stikprøver analyseres hos underleverandør.

Det samme FPC-system er anvendeligt til Gensand, hvor der ud fra identificerede kriterier og grænseværdier samt erfaringer fra prøveproduktion skal udvikles specifik prøvningsplan og acceptkriterier.

Den første batch er lavet ud fra ”rent” murværk, dvs. uden beton. Procestrin for batch:

1. Visuel bedømmelse – Batchen er karakteriseret ved højt indhold af tegl
2. Nedknust til 0-32 mm
3. Sortering i sorterværk, 0-4 mm, 4-16 mm, 16-32 mm
4. Fraktionen 0-4 mm viderebehandles til Gensand (16-32 mm fraktion går til vejfyld).

Et eksempel på renhedstest af et kontrolafsnit er indsat nedenfor (FIGUR 1):

VBM Prøvenr.	R-17-1195A		1
Materiale			GBM
Renhedsgrad jf. DS/EN 933-11			
Temperatur (ved nedtørring)		°C	105
Materialetype, andel			
FL		cm^3/kg	10,6
X		%	0,1
Rc		%	4,0
Ru		%	0,7
Rb		%	92,2
Ra		%	1,3
Rg		%	1,7
Materialetype, andel i.h.t. AAB, knust beton og tegl			
Rc + Ru + Rb		%	96,9
Rc + Ru		%	4,7
Rb		%	92,2
Ra		%	1,3
Rg		%	1,7
X		%	0,1

Kommentarer og observationer til kontrolafsnit

- GBM (Genbrugsmateriale)

- X : Ler, jord (ikke grus og sten), metal, gips samt ikke flydende træ, plastic og gummi,
- Rc : Beton, betonprodukter og mørtel.
- Ru : Natursten samt ubundne og hydraliske bundne materialer.
- Rb : Tegl, fliser, kakler, porcelæn, kalksandsten og letbeton.
- Ra : Asfalt.
- Rg : Glas.
- FL : Flydende lette partikler

Flydende består af

Træ/pap	68%
Leca/letbeton	15%
Plastik	17%

FIGUR 1. Uddrag af kvalitetsprotokol fra RGS.

RGS anvender forskellige rensekoncepter efter behov:

- Rystesold (som kan frasortere mørtel, hvis der vurderes at være for lidt tegl i en batch)
- Magnetisk sortering (anvendes som standard til at fjerne jern/stål, men kan ikke frasortere fx rustfri bindere)
- Rensning med ”blæs og sug” (kan fjerne både tunge og lette komponenter fra 0-4 mm).

Efter fremstilling af batch 1 af Gensand, som er anvendt i Arbejdspakke 2 til laboratorieforsøg og i Arbejdspakke 4 til fuldskalaforsøg, samt på baggrund af workshop og drøftelse, kan følgende konkluderes:

- Det blev besluttet at anvende 0-4 mm fraktionen efter sigtning (trin 3 jf. ovenstående)
- 0-4 fraktionen kan iht. TABEL 2 anvendes direkte på produktionsstedet Helligsø Teglværk, da produktionsblandingen valses efter tilsætning af sand. Samtidig bevirker sigtningen, at rester som rustfri skruer, som kan ødelægge valser på teglværket, frasigtes.

På baggrund af senere forsøg lavet ifm. AP2 og AP4 er den afprøvede fremstillingsproces efterfølgende vurderet tilfredsstillende, og der var ikke behov for yderligere justeringer.

Produktionen af Gensand kræver ikke nogen specielle tiltag ud over den allerede etablerede produktionsproces som beskrevet i trin 1 til 4 ovenfor og med benyttelse af det etablerede FPC-system. Gensand kan herefter fremstilles som et ”basisprodukt”, som kan justeres med fx ”mere tegl”, hvis det vurderes nødvendigt ved slutkontrollen.

En del teglværker, inklusive teglværket Helligsø, som fremstillede fuldskala mursten med Gensand, tilsætter en del eller alt magringsmiddel efter valsning. For at kunne levere Gensand i en finere kvalitet med kornstørrelse ≤1 mm, har RGS indkøbt en valse, der oprindeligt har været anvendt til valsning af korn. Valsen er repareret, og den har været afprøvet på blandt andet tegl. Udbyttet var ikke ensartet, idet der var indhold af overstørrelseskorn efter valsning. Valsekapperne tog skade af anvendelsen, og udskiftning af valsekapper til en type mere hårdt stål ville kunne løse denne udfordring. Dette blev ikke gennemført i projektet, idet teglværket selv kunne stå for valsning.

Dermed vil konceptet være, at RGS leverer et produkt med faste grænseværdier til teglværket, fremfor et produkt med deklaration, hvor teglværket så skal justere sin produktion efter deklarationen. Det sidste blev drøftet på workshop, men blev afvist af teglværkerne som for omkostningstungt, da der så skal etableres flere oplagringsmuligheder for adskillelse af leverancer.

4.4 Forretningsmodel

For opstilling af en forretningsmodel er det nødvendigt at kortlægge logistikken og typiske transportomkostninger for råmaterialer til den danske teglbranche sammenholdt med transportomkostninger til Gensand og ”råmaterialer” til Gensand.

Teglværker betaler op til 95-100 kr./m^3 for sand, afhængigt af transportafstand. Da RGS Nordic i dag modtager dels et beløb på 50-75 kr./m^3 for murværk og blandet beton/tegl til knusning, og i dag sælger til en pris af ca. 15,- kr. /m^3, var der en estimeret margin på 50-75 kr./m^3 til yderligere oparbejdning, transport, kontrol og proces, som i udgangspunktet ville give mulighed for en større fortjeneste ved at producere og sælge Gensand, end ved at levere knust murværk til veje/fyld.

Helt simpelt kan problemstillingen opstilles således: $Profit_{Gensand} > Profit_{vejfyld}$
Hvor i profit beregnes som: $Profit_x = (modtagerbetaling + salgspris) - omkostninger$
Der opstilles nu to scenarier hvor vi antager en værdi for omkostninger til behandling for begge produkter.

TABEL 3. Eksempel med værdier:

Omkostninger inden for estimeret margin (50 < 60 < 75):		
Post	**Vejfyld** $(kr./m^3)$	**Gensand** $(kr./m^3)$
Modtagerbetaling fra kunde	60	60
Salgspris	15	95
Omkostninger til behandling	10	60
Bruttoresultat	**60+15=75**	**60+95=155**
Nettoresultat	**75-10=65**	**155-60=95**

Omkostninger uden for estimeret margin (75 < 100):		
Post	**Vejfyld** $(kr./m^3)$	**Gensand** $(kr./m^3)$

Omkostninger inden for estimeret margin (50 < 60 < 75):		
Post	**Vejfyld** $(kr./m^3)$	**Gensand** $(kr./m^3)$
Modtagerbetaling fra kunde	60	60
Salgspris	15	95
Omkostninger til behandling	10	100
Bruttoresultat	**60+15=75**	**60+95=155**
Nettoresultat	**75-10=65**	**155-100=55**

Projektet viste, at ved sigtning af det knuste murværksaffald i fraktionen 0-16 mm, fås ca. 60% 0-4 mm og 40% 4-16 mm. Det er her en fordel, at 0-4 mm fraktionen er bedst egnet til Gensand (da uønskede fremmedlegemer som rustfast stål frasigtes), og da 4-16 mm fraktionen uden den fine fraktion er bedre egnet til ballast/vejfyld. Ballasten får dermed højere værdi, når den fine del frasigtes.

Efter test af produktionsproces mv. viser parternes beregning af forretningsmodellen for brug af knust, ”rent” murværk som Gensand, at når teglværkerne skal betale en pris, der modsvarer prisen pr. ton af naturligt sand, så vil der være et mindre underskud hos RGS. Da materialet kan sælges til vejfyld med et positivt resultat, kan det for nuværende ikke betale sig at sælge knust murværk som alternativ til naturligt sand. Da der er tale om en mindre margin, betyder det, at der kun skal ske små ændringer i markedssituationen, for at forretningen bliver attraktiv. Det kan være stigende råstofpriser eller øget afgift på råstoffer.

Andre affaldsfraktioner og fremgangsmåder kan dog vise sig mere rentable på sigt:

- Udsortering af letklinkerblokke fra byggeaffald til Gensand. Indholdet i letklinkerblokke er for en stor dels vedkommende brændt ler, og de vurderes uproblematiske at iblande Gensand.
- Sanitet og glaseret tegl: I AP3 er der foretaget laboratorieforsøg med knust sanitet i mursten. Her vil være basis for en god forretningsmodel. Bortset fra en mindre andel til ny stenuldsisolering, så er sanitet et produkt, som i dag svært kan afsættes og alternativt må lægges i deponi. Disse omkostninger vil bevirke, at en alternativ anvendelse kan betale sig for parterne.

RGS Nordic vil efter projektet udnytte projektets resultater og erfaringer ved en fortsat udvikling af forretningsområdet med udvikling og salg af råmaterialer som magringsmiddel til teglværker, hvor råmaterialet sælges med dokumentation for relevante egenskaber. En kombination af murværk og andre affaldsfraktioner forventes at vise sig mere rentabelt end udnyttelse af den rene murværksfraktion til Gensand.

Da adgangen til og prisen for naturligt magringsmiddel i form af sand fortsat er mere fordelagtig for Egernsund Wienerberger (EW) end genbrugsmaterialer, vil forretningen ligge i den konkurrencefordel, som opnås ved at anvende et bæredygtigt råstof. Som det tidligere er vist, kan anvendelsen af primære råmaterialer reduceres med 12-15% ved at anvende Gensand. EW har et ønske om at videreudvikle deres produktion, så den bliver mere bæredygtig, men den forretningsmæssige fordel ved at anvende Gensand er vanskelig at kvantificere. Projektet har imidlertid vist, at det er relativt enkelt at implementere mineralske affaldsstoffer som magringsmiddel, så EW forventer på længere sigt at udfase de naturlige råstoffer i størst muligt omfang.

5. Udvikling af recept for mursten med knust murværk (AP2)

5.1 Indledning

I denne arbejdspakke udvikles recepter for fremstilling af mursten, hvor naturligt sand i større eller mindre grad erstattes af knust oparbejdet murværk. Der er taget udgangspunkt i teglværkets recepter for en lertype med relativt høj dosering af magringsmiddel for at kunne undersøge forskellige grader af erstatning med Gensand. På baggrund af recepterne er der lavet forsøg i laboratorieskala med blanding og brænding af små teglemner (teglstænger i format 20 x 20 x 100 mm). Arbejdet blev udført sideløbende med AP1, hvor input fra AP1 danner udgangspunkt for det eksperimentelle arbejde, mens resultatet fra det eksperimentelle arbejde kan føre til reevaluering af opsatte kvalitetskrav i AP1. Med baggrund i arbejdet udført i laboratorieskala var det planen at gennemføre en række test i pilotskala hos deltagende teglværk med fremstilling af mursten i fuld størrelse indeholdende oparbejdet murværksaffald. Da resultaterne i laboratorieskala var helt uproblematiske, blev det besluttet at gå direkte til fuldskalaforsøg på teglværket, i AP4. Derved blev nogle aktiviteter overflødiggjort, så projektet kunne fuldføres med et mindre ressourceforbrug end planlagt.

5.2 Forsøg med anvendelse af Gensand i laboratorieskala

Receptkatalog

Et receptkatalog for fremstilling af mursten med knust murværk blev opstillet med baggrund i teglværkets recepter. Der er valgt to referencesten, en rosé og en gul. Recepter, som bruges på teglværk, ses i nedenstående TABEL 4. Begge mursten er af typen blødstrøgen, BS, som henviser til formgivningen.

TABEL 4. Recepter for de to referencesten, som de daværende aktuelle recepter, angivet i vægt%.

Murstens-type	Rødler	Blåler	Restler*	Sand	Chamotte	Savsmuld	Barium
Gul BS	14	51	5	22	6	1,4	0,1
Rosé BS	30	42	0	21	6	1,4	0,2

*) i forbindelse med den daglige opstart af produktionen genereres restler (færdigblanding), som anvendes i nye lerblandinger. Derved genereres ikke affald.

Begge stentyper indeholder relativt meget magringsmiddel (sand og chamotte), i alt 27-28%, samt 1-2% organisk materiale (savsmuld). Der er altså potentiale for at tilsætte en ret stor mængde Gensand, som i praksis bør kunne erstatte både sand og chamotte. Recepter for laboratorieprøver beregnet ud fra værkets recepter ses i TABEL 5.

På baggrund af indledende drøftelser blev det besluttet at erstatte al chamotte i prøverecepterne med Gensand, mens sandfraktionen blev erstattet hhv. 50% i G 1.1 og R 1.1 og 100% i G 1.2 og R 1.2. For G 1.1 / R 1.1 udgør Gensand ca. 17% af den totale lerblanding og for G 1.2 / R 1.2 ca. 28%. Gensand fra batch 1, der er baseret på murværksaffald fra to bigbags, er nedknust på laboratoriet til under 1 mm kornstørrelse svarende til valsningen på teglværket.

TABEL 5. Recepter for de to referencesten, som de daværende aktuelle recepter, angivet i vægt%.

	Rødler	Blåler	Restler*	Sand	Gensand	Sav-smuld	Barium	Sum
Gul serie 1								
Gul 1.01	udskåret fra tørre mursten modtaget fra teglværk, recept i TABEL 3							
G 1.02	tør sten fra teglværk lagt i blød og formgivet, recept i TABEL 3							
G 1.1**	14,1	51,3	5,0	11,0	17,1	1,4	0,1	100,0
G 1.2***	14,1	51,3	5,0	0,0	28,1	1,4	0,1	100,0
Rosé serie 1								
R 1.01	udskåret fra tørre mursten modtaget fra teglværk, recept i TABEL 3							
R 1.02	tør sten fra teglværk lagt i blød og formgivet, recept i TABEL 3							
R 1.1**	29,8	41,7	0,0	10,5	16,5	1,4	0,2	100,1
R 1.2***	29,8	41,7	0,0	0,0	26,9	1,4	0,2	100,0

**) Gensand erstatter 100% chamotte og 50% sand
***) Gensand erstatter 100% chamotte og 100% sand

Af alle recepter er der fremstillet 6 prismer 20 x 20 x 100 mm. De er tørret i laboratorie-klima og brændt i elektrisk ovn til samme temperatur som på teglværket.

Kommentar til recepter:

- G 1.01 og R 1.01 er fremstillet ved at udsave prismer på 20x20x100 mm fra tørrede mursten fremstillet på teglværket. Det vil sige, at strukturen i prismerne svarer til reference-murstenene, da vandindhold i leret og strygemetoden er den samme.
- G 1.02 og R 1.02 er fremstillet ved at opbløde tørre reference-mursten, fremstillet på værket. Dermed er sammensætningen præcis som i reference-mursten, men vandindhold og strygemetode svarer til laboratorieprøverne.
- De øvrige prøvestænger er fremstillet ud fra råmaterialer (ler, sand, savsmuld, barium) modtaget fra teglværket, samt batch 1 af Gensand, tørret og afvejet på laboratoriet og herefter tilsat vand til passende konsistens og formgivet.

Med udgangspunkt i disse recepter var det muligt at undersøge effekter af såvel forskelle mellem recepter som at vurdere forhold, som kunne skyldes formgivning, ud fra reference-stængerne. Indhold af ler, savsmuld og barium er uændret ift. referenceblandingerne.

FIGUR 2. Laboratoriefremstillede teglstænger efter brænding, G-serie. Stængerne til venstre er blandet på laboratoriet. De fremstår mere gule, da der ikke er tilsat mangan. Mangan tilsættes på værket for at farve stenene og har ikke indflydelse på de målte egenskaber.

FIGUR 3. Laboratoriefremstillede teglstænger efter brænding, R-serie. Stængerne til venstre er blandet på laboratoriet. De fremstår mere rosa, da der ikke er tilsat mangan. Mangan tilsættes på værket for at farve stenene og har ikke indflydelse på de målte egenskaber.

Resultater af laboratorieforsøg

Teknologisk Institut gennemførte forsøgene med dosering og blanding samt brænding ved samme temperaturkurve som på teglværket. På grund af prøveemnernes lille størrelse blev toptemperatuen dog ikke holdt i lige så lang tid som ved teglværkets normale brænding. I TABEL 6 ses målte og evaluerede egenskaber for prøverne i forskellige stadier af fremstilling.

TABEL 6. Egenskaber for laboratorieprøver af tegl.

Stade	**Våde emner**		**Tørring og brænding**			**Brændte emner**	
Egenskab	Kalkindhold	Vandindhold ved formning	Tørrings-svind	Brændings-svind		Vandoptagelse	Bøjnings-styrke
Enhed	Vægt%	Vægt%	% målt på længde	Vægt%	% målt på længde	Vægt%	* = lav *** = høj
Gul serie 1							
G 1.01		-	-	12,7	0,22	18,3	*
G 1.02	13,4	16,3	5,1	12,1	0,05	16,4	*
G 1.1	15,7	16,6	4,8	13,4	0,60	17,6	***
G 1.2	17,1	17,8	4,6	14,2	0,73	18,8	***
Rosé serie 1							
R 1.01	-	-	-	9,8	0,16	16,7	*
R 1.02	11,1	18,4	5,9	10,8	0,00	16,6	*
R 1.1	13,4	18,6	5,7	13,3	0,40	18,3	***
R 1.2	14,7	19,7	5,9	14,0	0,45	19,5	***

Resultaterne i TABEL 6 blev drøftet på workshop 2021-08-31. Hovedkonklusionerne er gengivet nedenfor:

Målte egenskaber:

Det ses, at **kalkindholdet** stiger i prøver med Gensand. Det er forventeligt, da sandet, som normalt anvendes, ikke indeholder kalk, og Gensand indeholder i den aktuelle prøve ca. 13% Se 7.4, FIGUR 16, for uddybning. EW vurderer ikke, at kalkindhold fra Gensand vil påvirke farver i tegl, da der er tale om kalkkorn. Normalt er det kun kalkpartikler <5 µm, som påvirker farven.

Vandindholdet ved formgivning (målt som tørringssvind) er lidt højere end ved produktion på teglværk. Det er dog forventeligt, når små portioner ler skal blandes ”i hånden”, og det kan ikke konkluderes, at vandbehovet vil være større end normalt ved produktion på teglværket. I laboratoriet sås dog et lidt større vandbehov i blandinger med mest Gensand (G 1.2 og R 1.2).

Længdesvindet målt ved tørring og brænding ser normalt ud sammenlignet med tilsvarende svind på mursten.

Vandoptagelse, brændt tegl: Der ses en tendens til let øget vandoptagelse med øget mængde Gensand i recept. Dette er en uønsket effekt, da vandoptagelsen typisk er ret høj i mange typer af danske teglsten, og ikke ønskes højere.

Vurderede forhold:

Kalkspringere, visuelt: Der ses små kalkspringere i prismer, som ikke ses i mursten fra fuldskalaproduktionen i AP4. Gensand i prismer er nedknust til samme kornstørrelse som efter valsning på teglværket. Det vurderes, at kalkspringerne i laboratorieprøverne opstår pga. den korte brænde- og holdetid i lab ovn – der bliver ikke dannet ny fase.

Styrke, ”knækkeprøve”: Det er ikke muligt at udføre en egentlig styrkemåling på de små teglprismer, men ved at brække dem med fingrene var det tydeligt at erkende en betydelig styrkeforskel: Prismer uden Gensand kunne nemt brækkes, prismer med Gensand var vanskelige at knække. Det bemærkes, at der er korrelation mellem bøjningstrækstyrke og trykstyrke for tegl, således at en høj bøjningsstyrke svarer til en høj trykstyrke. Gensand ser altså ud til at have en positiv effekt på teglets styrkeværdier.

6. Udfasning af byggeaffald i deponi (AP3)

6.1 Indledning

I denne arbejdspakke undersøges dels mulighederne for at anvende den eksisterende højtemperaturproces ved brænding af tegl til at eliminere PCB (Polyklorerede Biphenyler) i murværksaffaldet, og dels muligheden for at anvende andre problematiske affaldsstrømme fra byggeaffald som delmaterialer til Gensand.

Fremstilling af tegl er en højtemperaturproces, og det er kendt, at PCB nedbrydes ved høje temperaturer. Projektet vil for det første dokumentere, at mursten fremstillet med byggeaffald er PCB-frie, og for det andet undersøge, om højtemperaturprocessen kan udnyttes til at rense byggeaffald med et PCB-indhold højere end grænseværdien for ikke-forurenet affald på 0,1 mg/kg [5.].

Som baggrund for undersøgelserne er der gennemført et litteraturstudie om byggeaffald med PCB og nedbrydning af PCB ved opvarmning (afsnit 6.2). Herefter er der gennemført en eksperimentel brænding af PCB-forurenet affald under kontrollerede betingelser i laboratoriet (afsnit 6.3). Under de eksperimentelle forsøg er der udført måling af emissioner fra processen samt måling af PCB-indhold i affald før og efter brænding. Der var desuden planlagt at foretage beregninger på de udledte emissioner, så disse kunne overføres til relevante emissioner hos teglværkerne ved opstart af produktionen af tegl indeholdende PCB-holdigt materiale. Resultaterne af prøveafbrændingen førte dog til, at skalering ved beregning var formålsløs og blev derfor udeladt. Resultater fra undersøgelsen af anvendelse af andre mineralske affaldsfraktioner, herunder letklinker og sanitetsporcelæn, fremgår af afsnit 6.4.

6.2 Byggeaffald med PCB: Litteraturstudie

Ifølge Affaldsstatistikken [1.] blev der i bygge- og anlægsbranchen i Danmark i 2019 produceret 8.000 tons byggeaffald indeholdende PCB. Byggeaffald indeholdende PCB i koncentrationer større end 50 mg/kg klassificeres som miljøfarligt og finder således ingen mulighed for genanvendelse. Sådant affald med PCB skal i deponi og placerer sig således nederst i affaldshierarkiet. Da affald i deponi ikke kan genanvendes, vil dette ophobes, og mængden af affald i deponi stiger år efter år. Tidligere undersøgelser har vist, at PCB kan fjernes fra bygninger og byggeaffald ved opvarmning. Ved genanvendelse af murværksaffald til fremstilling af nye mursten gennemgår murværksaffaldet en højtemperaturproces med relativt langsom opvarmning til temperaturer højere end 1.000°C. Denne højtemperaturproces giver mulighed for at eliminere PCB fra murværksaffaldet. Det skal understreges, at udgangspunktet for Gensand er miljøscreenede materialer med PCB-indhold under grænseværdien for rent affald på 0,1 mg/kg PCB. Men der ses et potentiale for at eliminere PCB fra forurenet byggeaffald ved at udnytte en eksisterende højtemperatur-proces, som vil gøre det muligt at løfte forurenede fraktioner væk fra affaldshierarkiets nederste placering ”deponi” til ”genanvendelse”, som ligger midt i hierarkiet.

Metoder til at sikre PCB-frie materialer

PCB er en række miljøskadelige stoffer, der kan forekomme i byggematerialer i eksisterende byggeri. Stofferne er omfattet af EU’s POP-forordning[3], og der er derfor krav til kortlægning,

[3] POP-stoffer er persistente organiske miljøgifte

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 tertiær 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 [6.]. Da der i projektet netop arbejdes på en metode, som skal muliggøre genanvendelse af murværk opført fra ca. 1955, vil dette litteraturstudie fokusere på potentialet for at eliminere eventuel PCB-forurening i materialerne til Gensand.

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 [7.]. 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. 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.

I forbindelse med et tidligere MUDP-projekt [8.] på Teknologisk Institut har forsøg dokumenteret muligheden for at fjerne PCB ved opvarmning. Afrensning af byggeaffald forurenet med PCB ved opvarmning under kontrollerede forhold er kendt som termisk stripning. Ved forsøget blev borekerner med PCB-forurenet 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 viste desuden, at langt hovedparten af afgasningen skete inden for de første 2 til 4 timer. Resultaterne fra forsøgene er vist i store træk i FIGUR 4 og FIGUR 5 nedenfor.

TABEL 3. PCB-koncentrationer i betonkerner før og efter behandling.

Undersøgelse af maling/ betonkerne	Før Mikroovn		Efter Mikroovn	
	Kerne 1. (K.1/reference)		Kerne 9. (K.9)	
	Prøve-id	Resultat (mg/kg)	Prøve-id	Resultat (mg/kg)
Maling	M.1	81	M.9	Ikke påvist
Beton, 0-3 mm	D.1.1	0,71	D.9.1	Ikke påvist
Beton, 5-8 mm	D.1.2	0,18	D.9.2	Ikke påvist
Beton, 10-13 mm	D.1.3	0,061	D.9.3	Ikke påvist
Beton, 15-18 mm	D.1.4	0,0000001	D.9.4	Ikke påvist
Beton, 20-28 mm	D.1.5	0,069	D.9.5	Ikke påvist
Beton, 30-38 mm	D.1.6	0	D.9.6	Ikke påvist
Beton, 40-48 mm	D.1.7	Ikke analyseret (Depot)	D.9.7	Ikke analyseret (Depot)

Før behandling er der indhold af PCB på 81 mg/kg i malingslaget og op til 0,71 mg/kg i betonen før behandling. Efter behandling er der ikke konstateret indhold af PCB i hverken maling eller beton over detektionsgrænsen.

FIGUR 4. Gengivelse af TABEL 3 fra [8.]. Det ses, at forurening med PCB op til 81 mg/kg (prøve M.1), dvs. over grænsen for farligt affald, er fjernet efter opvarmning. Prøve M.1 var en malingsprøve. Betonprøverne ses at have indeholdt langt mindre PCB, men D.1.1 og D.1.2 havde dog indhold over grænseværdien for rent affald.

TABEL 4. PCB-koncentrationer i ovnkammerluften før, under og efter behandling.

Id	minutter	Tidsinterval (timer)	PCB total (ng/m³)
L1	120	0 - 2	10000
L2	240	2 - 4	400
L3	360	4 - 6	170
L4	1160	6 - 19	63
L5	1280	19 - 21	100
L6	1400	21 - 23	Ikke påvist
L7	1460	23 - 24	Ikke påvist

Som det fremgår af TABEL 4 er der konstateret en PCB-koncentration i ovnkammeret på 10.000 ng/m^3 i luftprøverne udtaget over de første to timer. Derefter falder koncentrationen kraftigt til 400 ng/m^3 ved målingen fra 2-4 timer. Koncentration forbliver derefter lav og falder til et niveau, hvor der ikke kan konstateres PCB i ovnkammeret ved de sidste to målinger.

FIGUR 5. Gengivelse af TABEL 4 fra [8.]. Det ses, at afgasningen efter 4 timers opvarmning er faldet kraftigt.

I Miljøstyrelsens luftvejledning, er der angivet grænseværdier for emission og immission af luftforurenende stoffer fra virksomheder, herunder PCB. Emissionsgrænseværdien for ikke-dioxinlignende PCBer ligger på 100 ng/normal m^3 [9.].

Det vil sige, at i forsøget med opvarmning af beton er afgasningen fra ovnen efter 19 timer underemissionsgrænsen, og efter 21timer er PCB ikke påvist i ovnkammerluften.'.

For termisk stripning konkluderes desuden i [10.]:
"Den samlede konklusion på forsøgene er, at termisk rensning af sekundært og tertiært forurenede materialer nedknust til en kornstørrelsesfordeling svarende til genbrugsstabil 0-32 mm er mulig, og at metoden er velegnet til at afprøve i stor skala.

Metoden er dog følsom over for forekomst af primære kilder med høje indhold af PCB. I værste fald vil forekomst af primære kilder hindre korrekt rensning og under alle omstændigheder medføre længere behandlingstider og øget energiforbrug.

Metodens energiforbrug er betydeligt, og det anbefales derfor, at et anlæg i fuld skala opføres i tilknytning til et eksisterende forbrændingsanlæg, hvor varmen fra stripningen kan udnyttes, og den fjernede PCB kan forbrændes sikkert."

Som det fremgår, ses energiforbruget som en hindring for opskalering. Dette gør det interessant at undersøge eksisterende højtemperatur processer.

Fortsatte udfordringer med PCB i byggeaffald

I Energistyrelsens kortlægning af PCB [5.] anføres det, at der i materialerne i de undersøgte bygninger er fundet koncentrationer af PCB over renhedskriteriet på 0,1 mg/kg i 75% af de undersøgte en- og tofamiliehuse, 90% af etageejendommene og i 80% af kontorejendommene og offentlige kontorer. Bygningerne var opført i perioden 1950 til 1977. Som nævnt blev det forbudt at anvende PCB fra 1977.

PCB har været anvendt i fugemasser, maling mv. Indholdet af PCB har medført en meget lang levetid for produkterne, og som en konsekvens heraf er mange af disse produkter fortsat i brug. Det har medført, at PCB-holdige byggematerialers levetid er blevet underestimeret, og det forventede fald i mængden af PCB-holdigt byggeaffald er derfor ikke indtruffet [11.]. Hertil kommer, at da Miljøprojekt 1984 [12.] blev udarbejdet, var man ikke opmærksom på den luftbårne spredning af PCB til andre materialer og de meget store mængder affald med relativt lave koncentrationer af PCB, det medfører.

Sekundære kilder er materialer, der har været i direkte fysisk kontakt med primære kilder og er blevet forurenet med PCB via kontaktdiffusion. Tertiære kilder er materialer, der er blevet forurenet med PCB via luften.

Tertiære kilder er karakteriserede ved overfladenære forureninger med koncentrationer, der sjældent overskrider 100-200 mg/kg. Typisk aftager koncentrationen til under 0,1 mg/kg inden for en afstand på 5 mm fra den eksponerede overflade.

Man er generelt først blevet opmærksom på tertiære forureninger efter ca. år 2000. Ind til da skelnes der typisk ikke mellem sekundære og tertiære forureninger. I praksis må man derfor påregne, at en meget betydelig del af den beton og tegl, der ellers kunne genanvendes som erstatning for naturlige råstoffer, indeholder PCB i koncentrationer over 0,1 mg/kg. Jf. foranstående om overfladenære forureninger vil der samlet set være tale om små mængder PCB spredt ud i en stor mængde materiale. Det gælder i et vist omfang også for affald fra bygninger, hvor PCB aldrig har været anvendt. Derfor er det relevant at dokumentere, at produkter med Gensand efter brænding er helt fri for PCB, så yderligere spredning undgås.

6.3 Udvikling af metode til eliminering af PCB: Pilotskala-forsøg

I projektet undersøges mulighederne for at aftage PCB-forurenede fraktioner af byggeaffald. I udgangspunktet er Gensand fremstillet af miljøscreenede og testede og dermed forureningsfri fraktioner. Undersøgelserne har derfor to formål:

A. At dokumentere, at en eventuel mindre mængde affald, som slipper gennem screening og stikprøver – fx en enkelt mursten – med et indhold af PCB over grænseværdien, ikke resulterer i PCB-forurenede nye mursten.
B. At undersøge, om højtemperaturprocessen kan udnyttes aktivt til at eliminere PCB i forurenet byggeaffald.

Følgende delopgaver var planlagt for at gennemføre undersøgelserne:

1. Beskrive en metode til sikker håndtering af PCB-forurenet affald og råvarer. Metoden skal sikre, at der ikke er risiko for at sprede forurenet materiale.
2. Udvikle et koncept for optimering af brændingsprocessen med det formål at eliminere PCB.
3. Gennemføre pilotskalaforsøg med eliminering af PCB ved opvarmning og brænding af PCB-holdigt murværksaffald inkl. emissionsmålinger.
4. Gennemføre beregninger, som gør det muligt at overføre de målte emissioner i pilotskala til forventelige emissioner ved produktion på teglværk.

De fire ovenstående delopgaver beskrives herunder. Herefter opstilles et scenarie for PCB-mængder under grænseværdi for rent affald og til sidst laves en konklusion på litteraturstudiet og brændingsforsøget.

Håndtering af PCB forurenet affald i praksis

Primært skal det forurenede materiale opbevares i lukkede beholdere, så PCB ikke kan sprede-des via luften ved fordampning fra materialet. Fordampning foregår meget langsomt ved stuetemperatur, og der er derfor ikke krav om særlige foranstaltninger, når forurenet materiale kortvarigt skal håndteres og fx overføres mellem beholdere.

RGS håndterer allerede forurenede materialer i form af fx blæsesand fra PCB-renovering og har rutiner for dette. Instituttet har egne rutiner ved håndtering af PCB-prøver, som benyttes i forbindelse med forsøgene. Da konklusionen på pilotforsøgene var, at det ikke vil være relevant at skulle håndtere affald på teglværkerne med et PCB-indhold over grænseværdien, er der ikke udviklet metoder for dette.

Koncept for optimering af brændingsprocessen af tegl mhp. at eliminere PCB

Kogepunktet for PCB varierer mellem 285-456°C afhængig af kloreringen af benzen-ringen: jo mere klor i benzen-ringen, jo højere kogepunkt. Ved afbrænding på temperatur mellem 285-456°C vil PCB fordampe. Ved afbrænding af PCB kan der dannes toksiske biprodukter, herunder dioxiner, furaner, nye PCB og hexachlorbenzen, som er skadelige for miljøet (og potentielt mere skadelige end det oprindelige PCB). Formation af dioxiner og furaner fra PCB øges kraftigt ved temperaturer over 250°C og elimineres ved temperaturer over 900°C. Ved afbrænding under 250°C sker der primært en fordampning af PCB [8.].

Den eksisterende litteratur viser, at nedbrydning til ikke-problematiske stoffer kræver temperaturer mellem 700-1.500°C ([13.]; [14.]; [15.]; [16.]) og behandlingstid >2 sekunder afhængig af den ønskede outputkoncentration.

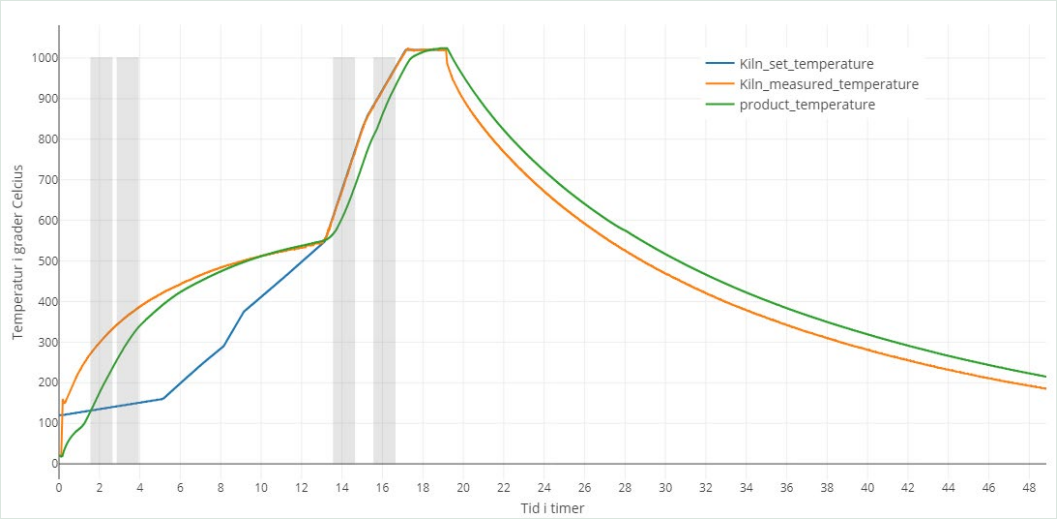
I Danmark bliver PCB-farligt affald (>50 mg PCB/kg) forbrændt ved 1.100°C hos Fortum, mens PCB-forurenet affald (<50 mg PCB/kg) forbrændes ved 850°C hos almindelige forbrændingsanlæg [17.].

En af de største udfordringer ved forbrænding af farligt affald er slaggehåndtering, da ikke-brændbart byggeaffald (fx beton) forbrændes sammen med farligt støttebrændsel (fx affald som indeholder metaller). I forbrændingen destrueres de organiske stoffer, mens de skadelige metaller opsamles i slagger, filterkage og flyveaske. Dette betyder, at PCB-fri betonbrokker og mursten, som findes i bundaske, ikke kan genbruges eller genanvendes pga. højt niveau af metaller (forurening fra støttebrændslet), og skal deponeres som farligt affald.

Potentialet ved eliminering af PCB via højtemperaturprocessen på et teglværk er, at der ikke anvendes farligt støttebrændsel, og slaggeproblemet fuldstændig undgås. ”Restproduktet” i form af mursten vil være renset for PCB.

Litteraturstudiet har samlet set vist, at den optimale proces for afrensning af PCB-forurenet affald er en relativt langsom opvarmning op til 250°C, hvor der tilføres tilstrækkelig luft til, at der ikke opstår mætning i gasfasen, og PCB opsamles i kulfiltre. Hvis koncentrationen af PCB i luften overstiger mætningskoncentrationen, vil PCB udfælde, og fordampningen vil først fortsætte, når en tilstrækkelig mængde ny luft er tilført. Det er vigtigt, at al PCB fordamper, før temperaturen overstiger 250°C, hvor der opstår risiko for nedbrydning til potentielt farligere stoffer. Ved temperaturer over 900°C nedbrydes PCB til risikofrie stoffer, men da opvarmningen af tegl ikke kan forceres, vil der være mange timers opvarmning mellem 250-900°C.

I FIGUR 6 vises temperaturkurven, som omtrent svarer til opvarmningsfasen ved teglbrænding (blå graf ”Kiln_set_temperature”). Det ses, at opvarmning til 250°C varer ca. 7 timer. Risikoområdet mellem 250-850°C varer ca. 9 timer.



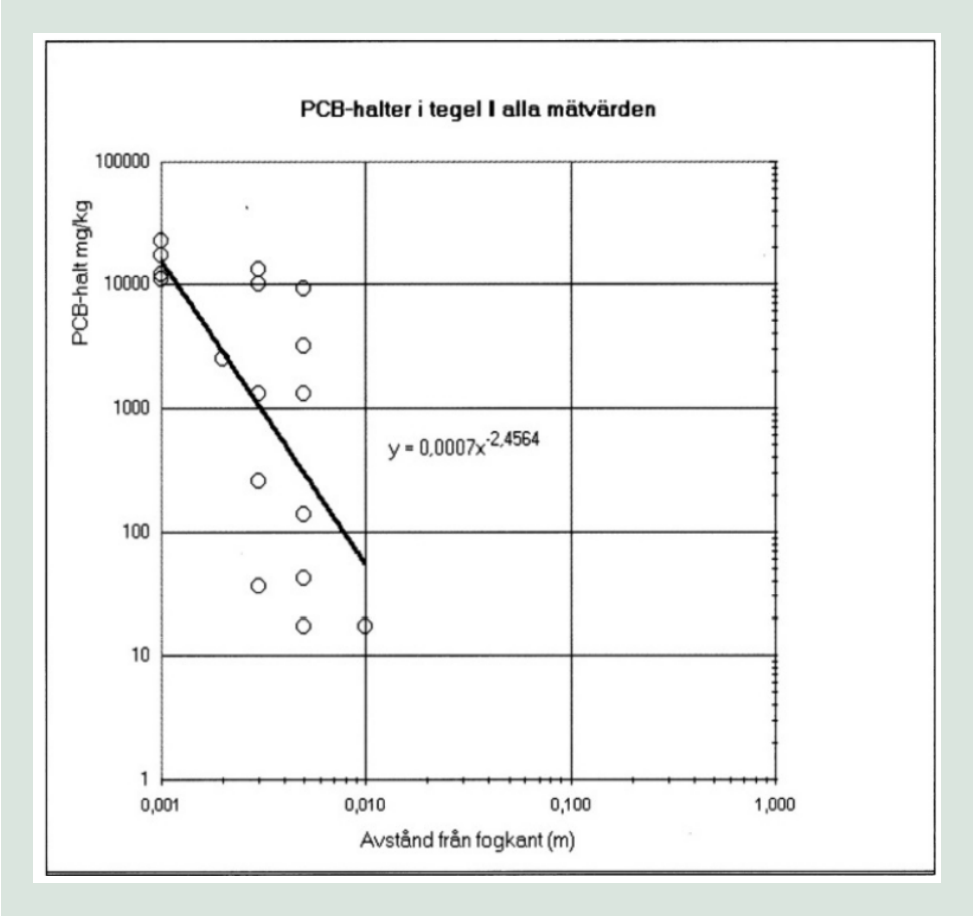
FIGUR 6. Blå graf er den programmerede brændingskurve. Orange graf er den faktiske brændingstemperatur (målt lufttemperatur). Grøn graf er produkttemperaturen. De 4 lodrette, grå områder på grafen viser tidspunkt for udtagning af luftprøver.

Det blev vurderet, at denne temperaturkurve (blå kurve i FIGUR 5) ville være egnet for pilotskalaforsøg, og ikke ville kræve ekstra energi, da den svarer til opvarmningskurven for tegl.

Pilotskalaforsøg med afbrænding af PCB med emissionsmålinger

For at anskaffe sand med et højt indhold af PCB, blev en gummifuge med PCB-indhold anvendt til at inficere en prøve af naturligt sand under kontrollerede forhold i 8 uger, således at

sandet blev sekundært forurenet og herefter havde et PCB-indhold på 2.100 mg/kg (2,1 g/kg) eller ca. 20.000 gange grænseværdien for rent affald. Dette er en ekstremt høj forurenings-grad, som ifølge [12.] og [18.] kun findes i ganske kort afstand fra kilden, typisk en fugekant. Det ses af FIGUR 7, at PCB-indhold over 1.000 mg/kg kun er fundet i op til 5 mm afstand fra fugen. Indtrængningsdybden er sammenlignelig i beton og kan være lidt højere i letbeton. Før ovenstående blev forsøgt, blev flere tilgængelige affaldsfraktioner undersøgt, herunder blæse-sand fra PCB-sanering. Det viste sig dog, at selv blæsesand, som havde været benyttet til PCB-sanering, indeholdt for lidt PCB til, at det kunne bruges til forsøget. Derfor blev det nød-vendigt at fremstille forsøgsmaterialet kunstigt forurenet i laboratoriet.



FIGUR 7. Dobbeltlogaritmisk afbildning af PCB-indhold (mg/kg) mod indtrængnings-dybde i murværk. [18.] Rex et al (2002).

Prøvebrænding blev herefter gennemført med 0,5 kg forurenet sand med et indhold af PCB på 2.100 mg/kg.

Som nævnt ovenfor, blev opvarmningskurven ”Kiln_set_temperature” i FIGUR 6. Blå graf er den programmerede brændingskurve. Orange graf er den faktiske brændingstemperatur (målt lufttemperatur). Grøn graf er produkttemperaturen. De 4 lodrette, grå områder på grafen viser tidspunkt for udtagning af luftprøver. anvendt til det kontrollerede forsøg med måling af emissi-oner som funktion af temperaturen ved brænding af PCB-holdigt affald.

Brændingen gennemføres i den samme ovn, som blev anvendt til forsøg med afgasning i [8.], omtalt i afsnit 6.3.1 ovenfor. I nærværende forsøg blev der opvarmet med gasbrændere sva-rende til opvarmningsmetoden i teglværksovne.

Det ses i FIGUR 6. Blå graf er den programmerede brændingskurve. Orange graf er den faktiske brændingstemperatur (målt lufttemperatur). Grøn graf er produkttemperaturen. De 4 lodrette, grå områder på grafen viser tidspunkt for udtagning af luftprøver., at den faktiske brændingstemperatur (orange kurve) afviger en del fra den programmerede temperatur (blå kurve) de første ca. 13 timer af brændingen. Opvarmningen til de 250°C var programmeret til at vare 7 timer, men varede i virkeligheden knap 3 timer. Det betyder, at tidsrummet hvor PCB-afgasning var mulig, blev reduceret markant.

FIGUR 8. Fotoet til venstre viser den forurenede prøve af sand, som blev opbevaret i en keramisk beholder under brænding. Fotoet til højre viser ovnkammeret, hvor den keramiske beholder blev anbragt mellem opstablede brændte mursten, som fungerede som ballast for at kunne styre temperaturen under opvarmning.

Der blev udtaget tre luftprøver til måling af PCB, P1-P3. Hver luftprøve blev udtaget over 1 time og mængden var 114 liter pr. prøve. I FIGUR 6 er tidsintervallerne og temperaturintervallerne for prøveudtagning markeret med grå søjler. I TABEL 7 ses start- og sluttidspunkterne for prøveudtagning i timer efter brændingens start, start- og sluttemperaturerne samt det målte PCB-indhold i luften udtrykt i ng/m^3.

TABEL 7. Oversigt over prøveudtagning og PCB-indhold i luft ved prøveafbrænding.

Prøveudtagning ID	Tidspunkt start	Tidspunkt slut	Temperatur start °C	Temperatur slut °C	PCB i luftprøve ng/m^3
P1	01:37	02:37	150	248	504.921
P2	02:53	03:53	270	343	298.334
P3	13:36	14:36	578	703	324.473

Der er som ventet målt en høj koncentration for prøven P1 udtaget i temperaturområdet 150-248°C. Koncentrationen er ca. 50 gange højere end målt i tilsvarende temperaturområde ved opvarmning af beton, se FIGUR 5 (TABEL 4 i projektet [8.]), et opvarmningsforsøg som blev foretaget i samme ovn på Teknologisk Institut. Den samlede mængde PCB i ovnen ved forsøg i MUDP-rapporten er ikke kendt, men ud fra oplyste koncentrationer i materialerne, anslås det,

at mængden af PCB i nærværende forsøg (ca. 1.000 mg) var 500-1.000 gange større end mængden ved forsøg med beton i et tidligere MUDP-projekt [8.]. For prøven P2, udtaget umiddelbart over grænseværdien 250°C, er der stadig et meget højt indhold af PCB, og dette fortsætter for prøven P3 udtaget ved en langt højere temperatur end i betonforsøget, og på et ret sent tidspunkt, efter 14 timer. Som det fremgår af FIGUR 5 (TABEL 4 i projektet [8.]) i afsnit 6.2.1 ovenfor, faldt afgasningen i forsøget med beton allerede efter 2 timer ved en konstant temperatur omkring 200°C.

Det vurderes, at årsagen til den vedvarende høje koncentration i luftafkastet ved forsøget med opvarmning af PCB-forurenet sand er, at koncentrationen af PCB har været højere end mætningskoncentrationen, dvs. at luftmængden og lufttilførslen i ovnen har været for lille til at bort-transportere stoffet. Dette understøttes af, at luftkoncentrationen i den første prøve er ca. 50 gange højere end i beton-forsøget på trods af, at mængden af PCB har været 500-1.000 gange højere. Derfor fortsætter fordampningen i mange timer samtidig med, at der også konstateres dannelse af dioxiner.

Efter brændingen blev PCB-indholdet i sandet afslutningsvist analyseret. Resultaterne viste, at PCB-indholdet var under detektionsgrænsen.

En fjerde prøve P4 blev udtaget kort efter P3. I TABEL 8 ses start- og sluttidspunkterne for prøveudtagning i timer efter brændingens start samt start- og sluttemperaturerne. For P4 blev indholdet af dioxiner analyseret med GC-HRMS i henhold til EN 1948-1. Analyseresultaterne fremgår af TABEL 9.

TABEL 8. Prøveudtagning for dioxin i henhold til EN 1948-1

Prøveudtagning ID	Tidspunkt start	Tidspunkt slut	Temperatur start °C	Temperatur slut °C
P4	15:33	16:33	820	928

TABEL 9. Oversigt over målinger af dioxiner. Værdierne er angivet i ng/prøve, hvor luftprøven har en volumen på 113,8 L.

	P4	TEF
2,3,7,8- tetraCDD, (ng/prøve)	0,003	1
1,2,3,7,8-PentaCDD, (ng/prøve)	0,007	1
1,2,3,4,7,8-HexaCDD, (ng/prøve)	<0,006	0,1
1,2,3,6,7,8-HexaCDD (ng/prøve)	<0,006	0,1
1,2,3,7,8,9-HexaCDD (ng/prøve)	<0,006	0,1
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD (ng/prøve)	<0,007	0,01
OctaCDD (ng/prøve)	<0,028	0,0003
2,3,7,8 TetraCDF (ng/prøve)	10,62	0,1
1,2,3,7,8 PentaCDF (ng/prøve)	1,629	0,03
2,3,4,7,8 Penta CDF (ng/prøve)	5,73	0,3
1,2,3,4,7,8 HexaCDF (ng/prøve)	0,945	0,1
1,2,3,6,7,8 HexaCDF (ng/prøve)	0,422	0,1
1,2,3,7,8,9 HexaCDF (ng/prøve)	0,018	0,1
2,3,4,6,7,8 HexaCDF (ng/prøve)	0,388	0,1

	P4	TEF
1,2,3,4,6,7,8 HeptaCDF (ng/prøve)	0,151	0,01
1,2,3,4,7,8,9 HeptaCDF (ng/prøve)	0,009	0,01
OctaCDF (ng/prøve)	<0,040	0,0003

Koncentrationsgrænsen for miljøskadeligt indhold af PCDD/PCDF i affald er 15 µg TEQ/kg, hvor TEQ er toksisk ækvivalens og kan beregnes ud fra toksisk ækvivalens faktor, TEF [19.]. Her kan TEF fx bruges til at angive, hvilke masser der er ækvivalent toksisk for to stoffer, der ikke er lige toksiske. TCDD er den farligste dioxin og er derfor referencen for TEQ, hvorfor den har en TEF = 1,0[4]. TEQ kan beregnes med funktionen nedenfor:

$$TEQ = \sum [koncentration\ af\ toksin * TEF\ for\ den\ konkrete\ toksin]$$

Sum af TEQ for P4 er 3,0 ng/prøve. Så for prøven på 0,5 kg er der udledt minimum 6,0 ng TEQ/kg, hvilket er langt under grænsen for miljøskadeligt affald.

Skalering af målte emissioner

Der blev detekteret emission af PCB ved langt højere temperaturer end det, der var forventet baseret på litteraturstudiet. Der blev desuden målt dioxin i ikke-ubetydelige mængder. På baggrund af forsøget i delprojekt 2 i et tidligere MUDP-projektvar det forventet, at PCB kunne afdampes inden for 4 timers opvarmning før "faregrænsen" på 250°C [8.]. Imidlertid fortsatte afdampningen af PCB i adskillige timer og kunne stadig måles i høje koncentrationer efter 14 timer og i temperaturområdet 580 til 720°C, hvor det må antages, at der samtidig er forekomst af spaltningsprodukter. Det vurderes, at den fortsatte afdampning skyldes den store mængde PCB i ovnen i forhold til den begrænsede ventilation i ovnen.

Det var planlagt, at målingerne ved afbrænding i pilotskala skulle skaleres til forholdene ved brænding af tegl med henblik på at afklare, om teglbrændingen kan målrettes eliminering af PCB fra forurenet affald. Resultaterne tyder på, at fordampningen af PCB har været påvirket af begrænsning i luftmængden set i forholdet til mængden af PCB i ovnen. Det er urealistisk, at tilsvarende forhold mellem luftmængde og PCB-mængde kan forekomme i en tunnelovn, fordi her er et typisk forhold mellem luftmængde og teglmængde i opvarmningszonen på 2-4 m^3 luft pr. kg tegl pr. time, i temperaturområdet 150-200°C. Det er derfor vurderet, at en skalering af de målte emissioner til en teglværksovn ikke er relevant.

Det vurderes desuden, at teglbrænding ikke er egnet til eliminering af forhøjet indhold af PCB over grænseværdierne. I givet fald må det forventes, at der bliver ændrede krav til rensning af røggasser, og at teglværket skal godkendes som et anlæg til afbrænding af PCB-holdigt affald. Den samlede mængde PCB i den forurenede prøve var ca. 1.000 mg. Elimineringen af PCB afhænger dels af koncentrationen af PCB i materialet og dels af luftmængden pr. kg gods ved brænding.

Konklusion på litteraturstudie og brændingsforsøg

Forsøg med brænding af forurenet materiale viser, at teglprocessen ikke er egnet til specifikt at rense forurenet materiale, idet fordampningen ville lede til koncentrationer i afkastluften, som vil kræve filtrering og opsamling.

[4] Ifølge https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/06/mono100F-27.pdf

Den afsluttende måling af det brændte, forurenede materiale viste, at selv med den høje forureningsgrad var indholdet af PCB i materialet nu under detektionsgrænsen, dvs. at al PCB var elimineret. Materiale, som har gennemgået en teglbrændingsproces, vil således være helt uden PCB.

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. Det svarer til, at én mursten med PCB-indhold større end grænseværdien på 50 mg/kg for farligt affald skal blandes med mere end 1.000 PCB-frie mursten for at hele bunken af mursten i gennemsnit kommer under et indhold på 0,05 mg/kg.. Men man ved ikke, hvor murstenen er og kan ikke frasortere den. Denne udfordring løses ved, at hele batchen efter brænding i teglprocessen vil være ren.

6.4 Andre mineralske affaldsfraktioner

Gensand er som udgangspunkt baseret på murværksfraktionen af byggeaffald, da der allerede var erfaringer med at anvende chamotte (knust teglsten fra produktionen), og forundersøgelser havde godtgjort, at en mindre mængde karbonatiseret mørtel (inklusive sand etc.) ikke havde en skadelig virkning i teglproduktionen. I projektet undersøges derfor mulighederne og konsekvenserne for produktkvalitet ved at aftage andre fraktioner end murværk. Ved at reducere graden af erstatning af sand med restmateriale fx fra 75-100% erstatning til 30-50% erstatning vurderes det muligt også at anvende affald af fx porebeton og mineraluld i teglfremstillingen. Herved kan en større mængde byggeaffald flyttes fra affaldshierarkiets nederste placering.
Relevante affaldsfraktioner til undersøgelse i denne arbejdspakke er foreslået af RGS ud fra behovet for at finde nye veje til afsætning for visse fraktioner. Herved er identificeret følgende mineralske affaldsfraktioner, som i øjeblikket ikke kan afsættes i form af ballast, og som derfor ender i deponi.

- Letklinker, i form af ”nødder” brugt som filternødder i biogasanlæg, eller som letklinker blokke
- Sanitet, sanitetsknus.

Fraktionerne er undersøgt ud fra de tidligere identificerede kriterier, anført i afsnit 4.2.

Letklinker ”nødder” fra filtermateriale

Letklinker nødder er brændt, ekspanderet plastisk ler. Letklinker ”nødder” brugt som filternødder i biogasanlæg udgør en affaldsfraktion, som i dag ingen afsætningsmulighed har og anbringes derfor i deponi. Derudover anvendes letklinker også som isoleringsmateriale i bygninger og som tilslag til letklinkerblokke, se FIGUR 9.

Letklinker er et porøst, keramisk materiale. Foto: Wikipedia

Letklinkerblokke (foto FC Beton), fremstilles af beton med letklinker som tilslag i stedet for grus og sten.

FIGUR 9. Til venstre ses letklinker som ”nødder”, dimensioner op til ca. 20 mm, til højre ses letklinker-byggeblok.

Indledningsvis blev anvendelsen som filter i biogasanlæg gennemgået, og da et potentielt indhold af svovl identificeres som en mulig hindring for at anvende klinkerne i Gensand, blev svovlindholdet derfor analyseret. Resultatet fremgår af FIGUR 10.

Udtagning:	Prøverne er fremsendt af RGS Nordic A/S og modtaget på Teknologisk Institut i september 2021. Prøven var mærket ”letklinker”.	
Periode:	Prøvningen er gennemført i perioden 22-11-2021 til 13-12-2021.	
Metode:	DS/EN 1744-1:2009+A1:2013	Metoder til prøvning af tilslags kemiske egenskaber. Del 1: Kemisk analyse, Punkt 11: Bestemmelse af totalt svovlindhold ved syreoptag, Punkt 12: Bestemmelse af syreopløselige sulfater.
Resultat:	Resultaterne fremgår af efterfølgende tabel.	

Prøvens mærke	Totalt svovlindhold % S	Syreopløseligt sulfat % SO_3
Letklinker	2,55	5,53

FIGUR 10. Uddrag af laboratorierapport fra Teknologisk Institut vedr. analyse af svovlindhold i letklinker, der har været anvendt som filtermateriale i biogasanlæg.

Da der ikke er etableret grænseværdier for indhold af svovl som grundstof i produktionsblandinger til murstensproduktion, er analyseværdierne vurderet i forhold til scenarier for forekomsten af svovl, dvs. hvilke kemiske forbindelser, svovlet antages at forekomme i.

Baseret på resultaterne i laboratorierapporten kan indholdet af reduceret svovl beregnes. Dette gøres ved at anvende det totale svovlindhold til at beregne, hvor meget syreopløseligt sulfat letklinkerne potentielt kan indeholde:

$$m_{SO_3} = m_S * \frac{M_{SO_3}}{M_S} = 2{,}55\ vægt\% * \frac{80{,}06\ g * mol^{-1}}{32{,}06 g * mol^{-1}} = 6{,}37\ vægt\%\ SO_3$$

$$Reduceret\ S = m_{SO_3,beregnet} - m_{SO_3,analyseret} * \frac{M_S}{M_{SO_3}} = 6{,}37w\% - 5{,}53w\% * \frac{32{,}06\ g * mol^{-1}}{80{,}06\ g * mol^{-1}}$$

$$= 0{,}33w\%$$

Sammenlignes analyseresultatet af sulfatindhold med det beregnede sulfatindhold, er der 0,33 vægt% reduceret svovl. I teglproduktionen giver reducerede svovlforbindelser udfordringer og bør derfor helt undgås.

Ud fra indholdet af totalt svovl kan det maksimale potentielle indhold af gips beregnes:

$$m_{CaSO_4*2H_2O} = m_S * \frac{M_{CaSO_4*2H_2O}}{M_S} = 2{,}55w\% * \frac{172{,}172\ g*mol^{-1}}{32{,}06\ g*mol^{-1}} = 13{,}7\ w\%$$

Hvis indholdet af svovl udelukkende indgår i gips, vil letklinkerne indeholde op til 13,7% gips, hvilket er ekstremt højt.

Uanset kilden til svovl repræsenterer den en mulig kilde til misfarvninger på teglet, såvel under brændingsprocessen som efterfølgende, hvis svovlet findes i vandopløselige forbindelser, som kan udvaskes fra murværket og afsættes på murens yderside som misfarvninger. I dansk teglværksler forekommer små mængder af svovl. Hos EW har leret et sulfatindhold på under 0,1 vægt%, og her er det nødvendigt at bruge barium for at neutralisere det, så misfarvninger undgås.

Efter beregning i forhold til iblanding i teglværksler konkluderer EW, at indholdet er for højt og vurderes at kunne misfarve teglet. Fraktionen kan derfor ikke anvendes til Gensand.

Letklinkerblokke vurderes derimod at være mulige at anvende som en del af Gensand. En evt. svovlforurening kan dog komme fra det anvendte ler til letklinkerne, og der må derfor foretages tests. Den keramiske del af blokkene vil være fordelagtig for anvendelsen som magringsmiddel, idet den medvirker til at sænke andelen af kvarts. RGS vil overveje mulighed for at udsortere letklinkerblokke fra byggeaffald til brug i Gensand.

Glaserede affaldsfraktioner og herunder sanitetsporcelæn

Fraktionen er ikke omfattet af Restproduktbekendtgørelsen (nr. 1672 af 15. december 2016, §2, stk. 11) – og anvendelse i produktion kræver miljøgodkendelse.

Fraktionen består overordnet af glaseret keramisk materiale fra sanitet (håndvaske, toiletter etc.) og fliser. Typisk er der tale om porcelæn eller såkaldt stentøj (visse fliser), som er brændt ved høje temperaturer over 1.100°C. Dog omfatter fraktionen også glaseret keramik som fx glaserede tegltagsten og mursten.

En del af fraktionen (bl.a. hvid sanitet og hvide glaseringer med hvid kerne) kan i dag anvendes ved fremstilling af stenuld, og ellers er der mulighed for anvendelse i ”lukkede kredsløb”, fx som tilslag i beton til betonklodser til internt brug i entreprenørvirksomheder, hvor senere anvendelse dog altid skal være sikret og ikke kunne ”forurene” ny beton. Og endeligt kan deponering være den sidste mulighed.

Ældre sanitet kan være glaseret med farvede glasurer, som kan indeholde tungmetaller. Derfor frasorteres farvet sanitet.

Et særligt forhold er de høje temperaturer, som sanitet og fliser normalt er brændt ved. Det betyder, at materialet ikke vil smelte og integreres i den keramiske matrix når produktet tilføres teglværksler som magringsmiddel. Temperaturen er simpelthen ikke høj nok ved teglbrænding. Derfor vil materialet bevares som korn i det færdige tegl.

Der blev gennemført laboratorieforsøg med nedknust materiale fra RGS's anlæg. Det blev visuelt vurderet, at der var en del mørtel og beton i den anvendte portion. Materialet blev nedknust på laboratoriet på Teknologisk Institut.

Forsøget blev gennemført efter samme principper og recepter som laboratorieforsøgene med Gensand omtalt i afsnit 5.2, dvs. der blev fremstillet teglstænger ud fra blandinger svarende til G 1.1 og G 1.2, hvor der i stedet for tilsætning af Gensand er tilsat knust sanitet. Det vil sige, at i blanding GS1.1 er 50% af sandet erstattet med sanitet, og i blanding GS1.2 er 100% af sandet erstattet med sanitet.

Da sanitet til dels består af porcelæn brændt ved høje temperaturer, så er der en del synligt materiale til stede, som ikke indgår i forbindelse med lermaterialerne. Se FIGUR 11 nedenfor.

FIGUR 11. Fotos af brændte teglstænger med knust sanitet. Ikke-omdannede rester ses tydeligt som hvide korn, både på overfladen (til venstre) og ved brud inden i stængerne (til højre).

Måleresultater fra undersøgelse af teglstænger ses i TABEL 10.

TABEL 10. Registreringer vedr. referenceemner (G) og prismer tilsat knust sanitet (GS).

Fase	**Formning**	**Tørring og brænding**			**Brændte emner**	
Egenskab	Vandindhold ved formning	Tørrings-svind	Brændings-svind		Vandopta-gelse	Bøjnings-styrke
Måleenhed:	vægt%	% målt på længde	Vægt%	% målt på længde	vægt%	*= lav ***= høj
Gul serie 1						
G 1.01	-	-	12,7	0,22	18,3	*
G 1.02	16,3	5,1	12,1	0,05	16,4	*
GS 1.1	20,1	5,3	15,8	1,1	21,1	***
GS 1.2	23,3	5,6	17,4	0,4	25,1	***

Vurdering af målte egenskaber:

Vandindholdet ved formgivning (målt som tørringssvind) er markant højere, når der tilsættes knust sanitet. Det kan til dels skyldes blanding "i hånden", og dels at kornene i knust sanitet er "skarpere". Forholdet bør undersøges nærmere, herunder kan det overvejes kun at tilsætte en delmængde sanitet til Gensand af murværksknus. Der ses en betydeligt større spredning i

værdierne for de seks stænger i hver serie med sanitet. Det kan også tyde på udfordringer i blanding ”i hånden”.

Længdesvindet målt ved tørring og brænding ser normalt ud og afviger ikke markant fra svindet i prøver uden sanitet.

Vandoptagelse, brændt tegl: Der ses en tydelig tendens til øget vandoptagelse med øget mængde sanitetsknus i recept. Når vandbehovet stiger til formgivning, vil der også være en tendens til en øget porøsitet som følge af fordampning af vandet, som igen kan føre til øget vandoptagelse i det færdige produkt. Dette er en uønsket effekt, da vandoptagelsen typisk er ret høj i mange typer af danske teglsten og ikke ønskes højere. Inden anvendelsen af sanitet evt. opskaleres, bør dette undersøges nærmere.

Vurderede forhold:

Visuel vurdering: De små korn af sanitet er tydeligt synlige i overfladen af stængerne, se FIGUR 11. Fotos af brændte teglstænger med knust sanitet. Ikke-omdannede rester ses tydeligt som hvide korn, både på overfladen (til venstre) og ved brud inden i stængerne (til højre).. Om dette er en ulempe eller fordel afhænger af kundernes syn på genbrugsprodukter – i heldigste fald vil kunder vurdere det positivt, at man kan se, at der er tale om et produkt med sekundære råstoffer, men der vil også være kundesegmenter, som vil være kritiske over for det visuelle udtryk, og som måske er bekymrede for ”hvad der er blandet i”. EW vurderer ikke, at dette er markedsmæssigt interessant i øjeblikket.

Styrke, ”knækkeprøve”: Som for prismer med Gensand af murværksknus var der en tydeligt højere bøjningsstyrke for prismer med sanitetsknus.

7. Fuldskalaforsøg med Gensand på teglværk (AP4)

7.1 Indledning

Fuldskalaforsøget i arbejdspakke 4, med fremstilling af mursten baseret på recirkuleret murværk som erstatning for sand, blev gennemført tidligt i projektet med udgangspunkt i den første batch af Gensand, bestående af to bigbags. Kvaliteten af de fremstillede mursten er testet som normalt på teglværket. Der er udført en beregning af CO_2-belastning ved metoden baseret på kalkindholdet i Gensand.

Arbejdspakken bygger oven på arbejdet udført i AP1 og AP2. Således er der i AP1 produceret en batch Gensand (to bigbags med materialet) for udførelse af fuldskalaforsøg på teglværk.

7.2 Fuldskalaforsøgsproduktion af mursten med Gensand

Alle arbejdsgange fra modtagelse af murværksaffald hos affaldsmodtager til fremstilling af mursten med recirkuleret murværk på teglværket blev gennemført i fuldskala. Oparbejdning af murværksaffald hos affaldsmodtager tager udgangspunkt i den i AP1 udviklede proceskontrol. Der blev fremstillet to bigbags Gensand.

Råmaterialeblanding og brænding på teglværket er foretaget efter de sædvanlige arbejdsgange og med udgangspunkt i samme recept for rosébrændende ler, som anvendt i laboratorieskala forsøg i AP2. Der er dog kun tilsat i alt 13% Gensand til blandingen, hvilket er lidt mindre end i R1.1, hvor der er tilsat 16,5%. Der er tilsat 15% naturligt sand, således at den samlede mængde af magringsmiddel, 28%, svarer til laboratorieforsøgene. Årsagen var, at Gensand kun kunne tilsættes i lertilberedningen, dvs. før valsning i produktionen, mens der sædvanligvis doseres yderligere sand efter valsning. Denne sanddosering blev bibeholdt. Kvaliteten af de fremstillede sten i fuldskalaforsøg er efterfølgende sammenlignet med egenskaberne for tilsvarende mursten uden Gensand. Der blev fremstillet ca. 5.000 mursten med Gensand. Fotos fra fuldskalaforsøget ses nedenfor i FIGUR 12 til FIGUR 15.

FIGUR 12. Bigbag med Gensand transporteres ind til teglværkets råvarelager.

FIGUR 13. Gensand doseres til lerblanding.

FIGUR 14. Færdig lerblanding med tilsat Gensand, efter valsning.

FIGUR 15. Fotos af fuldskala-fremstillede mursten på teglværket. På foto til højre ses knækket mursten. Korn af rødt og gult tegl kan ses i skærven. Dette forekommer også, når der iblandes chamotte i blandingen.

7.3 Tekniske egenskaber af mursten

Teglværket foretager normal færdigvarekontrol for mursten, hvor egenskaber listet i TABEL 11 løbende måles efter standardiserede metoder.

TABEL 11. Oversigt over egenskaber, som måles ved færdigvarekontrol af mursten.

Egenskab	Metode	Enhed	Antal mursten til hver test
Dimensioner, længde x bredde x højde	EN 772-16	Mm	6
Minutsug	EN 772-11	kg/m^2	6
Vandoptagelse	EN 772-21	vægt%	6
Brutto tørdensitet	EN 772-13	kg/m^3	6
Trykstyrke	EN 772-1	MPa	6

I TABEL 12 og TABEL 13 nedenfor ses måleresultater for udtaget prøve fra mursten med Gensand samt måleresultater fra tre andre produktioner (batches) af mursten af samme produktfamilie (samme recept), uden Gensand, fra samme produktionsperiode. Valgt til dette projekt er Egernsund Wienerbergers Bisonmursten med variationerne Blødstrøgen, Coal.

TABEL 12. Oversigt over målte egenskaber for Bison mursten.

Batch ID	Navn	Nr.	Dimensioner			Minut-sug	Vand-opta-gelse	Brutto tør-densitet	Styrke
			Længde	Bredde	Højde	kg/m²	vægt%	kg/m³	N/mm²
25.21	Bison blødstr. **med Gen-sand**	1	224,0	108,0	52,0	1,8	14,9	1725,0	51,0
		2	225,0	110,0	53,0	1,9	15,2	1669,5	54,4
		3	225,0	109,0	53,0	1,9	16,0	1670,2	51,5
		4	226,0	110,0	52,0	2,1	16,3	1689,5	54,3
		5	224,0	109,0	53,0	2,0	15,4	1687,7	50,2
		6	224,0	108,0	53,0	2,4	15,2	1697,1	50,1
		M				2,0	15,5	1689,8	51,9
18.10.21	Bison blødstr.	1	228,0	108,0	55,0	1,9	15,7	1670,9	37,5
		2	227,0	108,0	53,0	1,8	13,5	1744,0	47,4
		3	226,0	107,0	54,0	1,8	13,4	1734,5	45,9
		4	228,0	108,0	53,0	2,0	14,7	1747,8	44,7
		5	227,0	109,0	55,0	2,0	14,7	1665,1	42,3
		6	230,0	109,0	53,0	1,9	15,6	1703,9	39,4
		M				1,9	14,6	1711,0	42,9
22.21	Bison Coal	1	230,0	111,0	54,0	2,3	15,5	1701,0	45,9
		2	229,0	110,0	54,0	2,2	14,7	1735,0	40,9
		3	229,0	112,0	55,0	2,2	15,6	1681,5	36,0
		4	229,0	111,0	54,0	2,2	14,8	1702,6	35,3
		5	229,0	111,0	53,0	2,1	14,7	1729,5	37,3
		6	229,0	110,0	55,0	2,2	15,7	1706,3	44,2
		m				2,2	15,2	1709,3	40,0
29.21	Bison	1	225,0	110,0	54,0	2,1	14,1	1705,2	46,2
		2	226,0	108,0	54,0	1,9	14,8	1723,0	46,5
		3	225,0	108,0	55,0	2,1	14,8	1705,9	44,8
		4	225,0	109,0	55,0	1,8	14,6	1691,0	46,4
		5	226,0	107,0	54,0	2,0	14,9	1749,8	47,5
		6	225,0	107,0	55,0	1,9	14,9	1720,4	45,1
		m				2,0	14,7	1715,9	46,1

TABEL 13. Oversigt over middelværdier af resultater i TABEL 11, bortset fra dimension.

Dato	Navn	Minutsug	Vandoptagelse	Brutto tørdensitet	Styrke
		kg/m²	vægt%	kg/m³	N/mm²
25.21	Bison blødstrøgen Gensand	2,0	15,5	1690	51,9
18-10-2021	Bison blødstrøgen	1,9	14,6	1710	42,9
22.21	Bison Coal	2,2	15,2	1710	40,2
29.21	Bison	2,0	14,7	1720	46,1

Dato	Navn	Minutsug	Vandoptagelse	Brutto tørdensitet	Styrke
		kg/m²	vægt%	kg/m³	N/mm²
	Statistisk signifikant forskel på middel-værdier	Ja	Nej	Ikke undersøgt	Ja

Det ses af TABEL 12, at data for dimensioner, minutsug, vandoptagelse og densitet for mursten med Gensand generelt ligger på niveau med den normale produktion. Derimod ser trykstyrken umiddelbart ud til at være 10-20% højere.

Der er gennemført en statistisk analyse (anova) med α = 5% af måleresultater for trykstyrke, vandoptagelse og minutsug for at undersøge, om forskellen i middelværdi er statistisk signifikant. Anova-analysen afgør om de målte middelværdier reelt udtrykker en forskel i middelværdi for de målte populationer, eller om den observerede forskel blot skyldes tilfældig variation.

Trykstyrke:

Der er statistisk signifikant forskel på de målte middelværdier for trykstyrke, og typen med Gensand har den højeste trykstyrke.

Trykstyrken blev ikke målt for prismer fra laboratoriet, men det blev noteret, at disse prismer var markant sværere at brække over end prismer med almindeligt sand. Det tyder på, at styrken også her var højere, idet der er erfaring for korrelation mellem tegls trykstyrke og bøjningstrækstyrke. Det konkluderes, at Gensand har en effekt på trykstyrken, så den øges.

I den aktuelle murstenstype er trykstyrken i forvejen rigeligt høj. I andre tegltyper kunne det være en fordel at øge trykstyrken ved at anvende Gensand i blandingen. Dette kunne styrke forretningsmodellen for Gensand af rent murværksknus, såfremt det kunne retfærdiggøre en lidt højere pris for produktet. I øjeblikket er der ikke murstenstyper med for lav trykstyrke i vareprogrammet for EW, men det kan tænkes på andre teglværker.

Minutsug:

Der er statistisk signifikant forskel på de målte middelværdier af minutsug. Men da alle værdier ligger i området for middel minutsug (1,5-3,0 kg/m^2), resultatet for mursten med Gensand ligger i midten af de målte værdier, og der samtidigt ses en tilsvarende signifikant forskel mellem enkeltpartier produceret uden Gensand, konkluderes det, at det ikke er tilsætning af Gensand, som giver en signifikant forskel. Det vil sige, at Gensand ikke påvirker minutsug i højere grad end andre parametre i produktionen.

Vandoptagelse:

Der er ikke statistisk signifikant forskel på de målte middelværdier for vandoptag. Stentypen med Gensand har den højeste værdi, og laboratorieprøverne viste en lille tendens til at have øget vandoptag med øget mængde af Gensand. Imidlertid viser fuldskalaforsøget, at vandoptagelsen for sten med Gensand ikke skiller sig statistisk ud fra variationen i den løbende produktion, når der tilsættes 13% Gensand.

7.4 Beregning af CO_2-udledning

For at vurdere den miljømæssige gevinst ved at erstatte naturligt sand med Gensand er der gennemført en afgrænset beregning af CO_2-udledningen forbundet med materialesammensætningen i murstensproduktionen.

Beregningen tager udgangspunkt i den anvendte mængde Gensand i recepterne for Rosé Serie 1 ved forsøg med anvendelse af Gensand i laboratorieskala (Se Afsnit 5) samt materialets kalkindhold som angivet i laboratorierapport 924701-1 (Se uddrag i FIGUR 16).

CO_2-beregningen omfatter udelukkende det materielle forbrug samt indholdet af $CaCO_3$, da dette har direkte indvirkning på CO_2-udledning fra kalkspaltning. Der er hermed ikke foretaget videre vurdering af drivhusgasemissioner forbundet med brændingsprocessen, intern transport, hjælpematerialer, emballage m.v. samt den resterende livscyklus efter fabriksporten.

TABEL 14 opgiver den estimerede CO_2-udledning ved 1 ton brændte mursten for referencerecepten (R 1.02) samt de to Gensand-recepter (R 1.1 & R 1.2), fordelt på enkeltmaterialer inklusivt direkte emissioner forbundet med kalkspaltning. Som angivet i TABEL 5 fastsættes et fugtindhold på 19% i lerblandingerne samt et brændingssvind på 14% af massen. Til beregning af CO_2-emissioner ved kalkspaltning benyttes de respektive molmasser: 100,086 g/mol for $CaCO_3$ og 44,009 g/mol for CO_2.

TABEL 14. Materialesammensætning og estimeret CO_2 udledning for referenceblanding (R 1.02) og to Gensand recepter (R 1.1 og R 1.2) pr. 1 ton brændte mursten, fordelt på enkeltmaterialer.

Materiale	R 1.02		R 1.1		R 1.2		Datasæt
	kg	kg CO_2-eq	kg	kg CO_2-eq	kg	kg CO_2-eq	
Ler	815	9,1	815	9,1	815	9,1	ecoinvent 3.12
heraf $CaCO_3$ til kalkspaltning	127	55,7	153	67,2	168	73,9	Elementært flow
Sand	238	3,1	120	1,5	0	0,0	ecoinvent 3.12
Gensand	0	0,0	187	0,0	307	0,0	Sekundært mat.
Chamotte	68	0,0	0	0,0	0	0,0	Sekundært mat.
Savsmuld	16	0,5	16	0,5	16	0,5	ecoinvent 3.12
Barium	2	2,7	2	2,7	2	2,7	ecoinvent 3.12
Sum	1140	71,1	1140	81,1	1140	86,2	

Som det fremgår af FIGUR 16 medfører overgangen fra jomfrueligt sand til Gensand en reduceret CO_2-udledning, der er knyttet til råmaterialeindvinding og forarbejdning. Denne reduktion modvirkes dog af et øget kalkindhold i recepterne, der medfører forøget procesemissioner fra kalkspaltning under brændingen og dermed højere CO_2-udledning.

Målingerne af $CaCO_3$ i Gensand (G01/A og G01/B) som angivet i FIGUR 16 indikerer imidlertid, at der potentielt kunne forekomme en videre rekarbonatisering af CO_2 fra atmosfæren i brugsfasen og efter endt levetid tilsvarende CO_2-udledningen fra kalkspaltning.

Samlet set vurderes den beregnede CO_2-effekt derfor som overvejende konservativ, idet potentielle optag ved rekarbonatisering endnu ikke er kvantificeret og kræver yderligere undersøgelse.

Resultater

Prøve	G1.1	G1.02	G1.2	R1.1	R1.02	R1.2	G01 / A	G01 / B
Kalkindhold [vægt %]								
Kalk, $CaCO_3$	15.66	13.37	17.11	13.41	11.11	14.74	13.16	13.12
Kuldioxid beregnet fra $CaCO_3$ indhold, CO_2	6.89	5.88	7.52	5.89	4.89	6.48	5.78	5.77
Glødetab [vægt %]								
v. 950°C							6.24	6.21
Organisk indhold (inkl. kemisk bundet vand) beregnet fra glødetab og CO_2 indhold							0.46	0.44

FIGUR 16. Uddrag af laboratorierapport nr. 924701-1 fra Teknologisk Institut vedr. analyse af kalkindhold i Gensand.

8. Diskussion

At udvikle en sekundær råvare til fremstilling af tegl på baggrund af murværksaffald, som ikke kan genanvendes på anden måde, har ikke været prøvet før. Teglværkerne har hidtil kun anvendt rent tegl fra egen produktion til recirkulering og været tilbageholdende med tilsætning af knust mørtel til nye teglmaterialer, da man antog, at bindemidlerne i mørtlen - kalk og cement - ville øge risikoen for kalk- og cementspringere i murværket og ville bevirke, at lerets bearbejdelighed nedsættes. Det ville i sådanne tilfælde føre til øget vandbehov af råmaterialeblandingen, som igen ville øge energiforbruget til tørring og give dårlig produktkvalitet.

Der var desuden en reel bekymring for, at murværksaffald kan være forurenet med bindere og isoleringsrester, som ved iblanding i teglprodukterne ligeledes vil forårsage procestekniske udfordringer eller ligefrem kunne ødelægge fx valsekapper. I et nyligt afsluttet MUDP-projekt ”Direkte genbrug af mursten fra murværk med stærke mørtler” [2.] sås positive resultater ved fremstilling af nye mursten med 5% knust murværksaffald efter udtagning af hele sten. Dvs. materialet bestod primært af mørtel, og der blev ikke foretaget yderligere optimering af råmaterialeblandingen, som allerede indeholdt sand. Nærværende projekt har bygget på dette ”proof of concept” forsøg.

Det er nu vist, at gængse metoder til behandling af affald – visuel kontrol, nedknusning og udsortering af fraktionen 0-4 mm – i praksis har kunnet sikre opfyldelse af de opstillede kriterier for Gensand, så tilstedeværelse af netop bindere og rester af isoleringsmateriale i skadeligt omfang kan undgås.

Projektet havde en ambitiøs plan om at vise, at det er muligt at udnytte en eksisterende, industriel højtemperaturproces specifikt til at eliminere PCB fra forurenet affald. I MUDP-projektet ”Termisk og mikrobølge-behandling af PCB i bygninger i byggeaffald” [8.] blev det påvist, at PCB kan afgasses og dermed fjernes fra beton ved varmebehandling i 2-4 timer ved 200°C. Det har dog vist sig, at muligheden for at fjerne og destruere PCB i murværksaffald over grænseværdien for rent affald via opvarmning og brændingen under fremstilling af tegl fører til udledning af høje koncentrationer af uønskede stoffer i afgangsluften.

Forsøgene har dog samtidig dokumenteret, at eventuel tilstedeværende PCB i affald, som indgår i Gensand, er effektivt elimineret i slutproduktet. Det er således sikkert, at brændte mursten produceret med et indhold af byggeaffald ikke kan indeholde PCB.

Generel udbredelse af en genanvendelsesmetode kræver, at denne er veldokumenteret. Dette adresseres i projektets første arbejdspakke, hvor omdrejningspunktet er oparbejdning af murværksaffald til et veldokumenteret råmateriale. I arbejdspakken udpeges kvalitetskrav og testmetoder for evaluering af disse krav. Generel udbredelse kræver desuden en robust metode. Robusthed sikres ved en variabel proces, hvor variation i råmaterialekvalitet inden for en given ramme kan kontrolleres og kompenseres ved fx at ændre på fordelingen mellem knust murværk og naturligt sand til en given teglproduktion samt ved om nødvendigt at tilsætte ekstra tegl til det knuste murværk.

Med dette projekt er teknologien løftet entydigt fra TRL 3-4 til TRL 7. Før projektets start var anvendelsen af knust murværksaffald i teglproduktion kun dokumenteret som proof-of-concept og i laboratorieskala. Gennem projektet er der udviklet og implementeret robuste processer, kvalitetsstyring og fuldskala demonstrationsforsøg. Projektet har med succes gennemført en sammenhængende industriel proces fra oparbejdning af murværksaffald hos affaldsmodtager til produktion af cirka 5.000 mursten med Gensand på teglværk. Dermed er Gensand nu klart

dokumenteret som et robust og anvendeligt råmateriale til teglproduktion i operativ industriel skala.

Udfordringen efter projektet er at udnytte de tekniske resultater til at videreudvikle forretningsmodellen for Gensand, så fordelene for begge parter, køber og sælger, er store nok til at implementere konceptet.

9. Konklusion

Projektet har vist, at det er muligt at erstatte naturligt sand 1-1 med ”Gensand” i form af nedknust murværk uden væsentlige negative effekter for murstenene. Dette forudsætter, at det nedknuste murværk leveres med en specificeret kornstørrelse og renhedsgrad, og at mængden tilpasses, så murstenenes vandoptagelse ikke øges ud over den naturlige variation i produktionen. For den murstenstype, som blev anvendt til fuldskalaforsøg, kunne der tilsættes 13% Gensand, uden at der opstod signifikant forskel i vandoptaget. Potentialet kan måske være 20%.

Det er også vist, at tilsætning af Gensand kan hæve trykstyrken for denne stentype, bison blødstrøgen. Da den valgte stentype i forvejen har en høj trykstyrke, er dette ikke en effekt, som gør Gensand attraktivt, men for andre stentyper med lav trykstyrke vil det være relevant at foretage forsøg for at undersøge, om Gensand kan hæve trykstyrken signifikant.

Projektet har desuden testet og vist, at eventuelle PCB-rester, som på trods af miljøsanering og kontrol måtte findes i Gensand, under alle omstændigheder er nedbrudt og fjernet fra det færdige produkt i forbindelse med brændingsprocessen. Brændte teglmursten med et indhold af byggeaffald vil under alle omstændigheder være PCB-frie.

Det skal understreges, at udgangspunktet for Gensand er miljøscreenet affald, som yderligere testes for PCB ved stikprøver hos RGS. At den sekundære råvare er PCB-fri, dvs. under grænseværdien på 1 mg/kg, illustreres af vanskeligheden ved at fremskaffe affald med et indhold af PCB til afbrændingsforsøget; selv blæsesand, som havde været benyttet til PCB-sanering, indeholdt for lidt PCB til forsøget.

I forbindelse med opvarmning af prøver af byggeaffald med høje indhold af PCB, efter den temperaturkurve som anvendes til brænding af teglmursten, er der taget luftprøver under processen. Det er hermed vist, at afgasning fra PCB er en hindring for, at teglprocessen kan udnyttes med det formål at fjerne PCB fra forurenet affald.

Forretningsmodellen for Gensand viser, at produktet i øjeblikket er dyrere i indkøb for teglværkerne end naturligt sand. Da der er tale om en mindre margin, betyder det, at der kun skal ske små ændringer i markedssituationen, for at forretningen bliver attraktiv. Det kan være stigende råstofpriser eller øget afgift på råstoffer.

Analyser af alternative affaldsstrømme og forsøg i laboratorieskala med iblanding i ler og brænding har vist, at:

- letklinker fra filter i biogasanlæg har for højt svovlindhold til direkte anvendelse.
- letklinkerblokke fra byggeri vurderes at have et potentiale for anvendelse til Gensand. Det bør undersøges nærmere. Det vil øge værdien af byggeaffald til fyld eller ballast, at letklinkerblokkene frasorteres.
- affaldsfraktionen sanitet og keramik er ikke umiddelbart attraktiv til Gensand, primært af æstetiske grunde. Test i laboratorieskala viser, at materialet ikke forringer teglets egenskaber, men rester af højt brændt porcelæn kan være synligt i det færdige produkt.

De alternative affaldsstrømme kan på sigt gøre forretningsmodellen for Gensand økonomisk bæredygtig for begge parter (sælger og køber).

Følgende hypoteser er undersøgt:

I. Sand til murstenproduktion kan erstattes af nedknuste murværksmaterialer
II. Andre byggeaffaldsfraktioner kan indgå i blandingen til ”Gensand”
III. Højtemperaturprocessen på teglværket kan udnyttes til at fjerne PCB fra forurenet byggeaffald
IV. Efter brænding er mursten med Gensand PCB-frie

Konklusion:

I. Bekræftet
II. Delvist bekræftet
III. Afvist
IV. Bekræftet

10. Perspektivering

RGS er på baggrund af projektets resultater i stand til at udbyde en sekundær råvare, Gensand, til danske teglværker, som magringsmiddel til teglproduktion. Gensand kan dels erstatte den primære råvare sand og dels erstatte chamotte, idet Gensand indeholder brændt tegl i form af murstensrester, og på sigt har brændte letklinker fra letklinker-betonblokke også et potentiale. Chamotte er foreløbig tilgængeligt på teglværkerne i form af kasserede mursten fra egne fejlproduktioner, men den stadige optimering af produktionskvaliteten forventes på sigt at eliminere chamotte fra fejlproduktioner.

Gensand er via projektets aktiviteter dokumenteret ift. anvendelseskriterier på teglværker. Endvidere vil teglværkerne kunne udbyde mursten af sædvanlig kvalitet, men produceret på recirkuleret murværk. Dette vil medvirke til at indføre cirkulær økonomi i Byggeindustrien. Da slutbrugerne, herunder bygherrer og deres rådgivere, i høj grad har fokus på bæredygtigt byggeri, vil dette medvirke til at forbedre konkurrencesituationen for teglværkerne. Teglværkerne eksporterer i dag 25% af deres produktion, og denne andel forventes at kunne øges, når miljøprofilen for produkterne forbedres.

Der vil i mange år være adgang til nedrivningsaffald af murværk til Gensand. Det skønnes, at halvdelen af de nedrivninger, som foretages i dag, er murværk opført efter 1955. Fremadrettet vil denne procentdel stige, og færre og færre mursten vil kunne anvendes direkte (ved brug af de eksisterende afrensningsmetoder). Potentialet for sekundært råstof er derfor stigende. Metodikken, som er udviklet i dette projekt, forventes at kunne anvendes på andre typer affald, så affaldsmodtager i stadigt stigende omfang kan oparbejde affaldet til en ressource målrettet industrier med definerede kvalitetskriterier for råvarerne.

Egernsund Wienerberger vil med fremstilling af mursten baseret på Gensand kunne introducere en ny type mursten, hvor anvendelsen af ikke-fornybare råstoffer er reduceret 15-18%. Gensand forventes at kunne anvendes for hele teglværkets produktsortiment med mursten af varierende æstetisk udtryk i form af farvenuance. Gensand vil således introducere en ny mulighed for tilvalg af en bæredygtig byggesten for alle typer murværk uafhængig af øvrige krav til æstetisk fremtoning.

Råstoffer som sand afsættes primært lokalt, da der er tale om tunge fraktioner, hvorfor omkostninger ved transport har stor betydning for pris og afsætningsmulighederne. Normalt afsættes tunge råstoffer i Danmark inden for en radius på 100 km. Ifølge publikationen 'Fremtidens Byggematerialer, Har vi mangel på råstoffer?' udgivet af Teknologisk Institut og Grundejernes Investeringsfond i 2020 koster transporten af råstoffer omkring 1 kr. pr. ton pr. kørt km 53, i storbyer dog op til 2-3 gange højere. Over de sidste år har bl.a. teglværker flere steder i Danmark oplevet udfordringer med den lokale tilgængelighed af sand. Det er bl.a. et krav, at sandet ikke indeholder kalkkorn, hvilket en del forekomster på Fyn har. Det er ikke unormalt, at teglværkerne får leveret sand fra sandgrave i en afstand af 100-150 km fra teglværket. Som eksempel får Vesterled Teglværk, som er en del af Egernsund Wienerberger, således i dag sand fra Sønder Omme 145 km fra teglværket. Denne transport giver en væsentlig øget omkostning for sandet. På sigt forventes Gensand, afhængig af sammensætning af det nedrevne murværk, at kunne produceres lokalt ved anvendelse af mobilt udstyr til oparbejdning og knusning. Den lokale oparbejdning kan ske på baggrund af analyser hos affaldsmodtager af udtagne prøver af både murværksaffald før og efter oparbejdning. Der vil således kunne opnås en transportbesparelse ved at hente råmaterialer mere lokalt end i dag.

Forretningsmodellen udviklet i dette projekt viste, at Gensand i de aktuelle beregninger ikke er økonomisk rentabel for projektpartnerne. Da der er tale om en mindre margin, betyder det, at der kun skal ske små ændringer i markedssituationen, for at forretningen bliver attraktiv. Det kan være stigende råstofpriser eller øget afgift på råstoffer.

11. Referencer

[1.] Miljøstyrelsen (2020): Affaldsstatistik 2019, ISBN: 978-87-7038-249-6

[2.] Direkte genbrug af mursten fra murværk med stærke mørtler, MUDP-rapport 2020, ISBN nr. 978-87-7038-247-2

[3.] Kingo (2019): Prisliste Kingo Recycling Silkeborg, gældende fra 1. november 2019

[4.] Danske Regioner. Videncenter for miljø og ressourcer (2017): ”Råstoffer er der behov for en national strategi?”

[5.] Energistyrelsen 2013: Faktaark vedr. PCB-kortlægningen

[6.] Miljøstyrelsen: PCB faktaark. 1-11 (2011)

[7.] 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.

[8.] Termisk og mikrobølge- behandling af PCB i bygninger og byggeaffald, MUDP-rapport Maj 2019, ISBN: 978-87-7038-071-3

[9.] Luftvejledningen, Begrænsning af luftforurening fra virksomheder REVIDERET, MUDP, Dec. 2024.

[10.] Termisk stripning af PCB fra sekundært og tertiært forurenede byggematerialer, Miljø-styrelsen 2014, ISBN nr. 978-87-93283-35-0

[11.] Jensen, A.A., Schleicher, O., Sebastian, W., Trap, N., Zeuthen, F. (2009): Forekomst af PCB i en- og tofamiliehuse. Rapport til Erhvervs- og Byggestyrelsen, Miljøstyrelsen og Arbejdstilsynet, EBST sagsnr. 09/02028.

[12.] Trap, N., Lauritzen, E.K., Rydahl, T., Egebart, C., Krogh, H., Malmgren-Hansen, B., Høeg, P., Jakobsen, J.B. & Lassen, C. (2006): Problematiske stoffer i bygge- og anlægsaffald – kortlægning, prognose og bortskaffelsesmuligheder (Miljøprojekt 1084, 2006). København: Miljøstyrelsen.

[13.] L. E. Johnston, “Decontamination and disposal of PCB wastes,” Environ. Health Perspect., vol. 60, pp. 339–346, 1985.

[14.] H. W. Schulz, “Decontamination of PCB contaminated solids,” 1993.

[15.] Y. Ishikawa, Y. Noma, T. Yamamoto, Y. Mori, and S. I. Sakai, “PCB decomposition and formation in thermal treatment plant equipment,” Chemosphere, vol. 67, no. 7, pp. 1383–1393, 2007.

[16.] B. Ahling and A. Lindskog, “Thermal destruction of PCB and hexachlorobenzene,” Sci. Total Environ., vol. 10, no. 1, pp. 51–59, 1978.

[17.] B. E. Jensen, C. Maria, H. Knudsen, and A. S. Heinrichsen, “Eliminering af PCB i kontaminerede mursten,” 2011.

[18.] K. H. Smith, S. C. Andersen, ”Fremtidens byggematerialer – Har vi mangel på råstoffer?”, Teknologisk institut 2020.

[19.] REGULATION (EC) No 850/2004 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, of 29 April 2004. Lokalitet på: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02004R0850-20060828#src.E0002

Resumé
Projektet har udviklet metoder til at oparbejde murværksaffald fra nedrivninger til et dokumenteret råstof, Gensand, som erstatter naturligt sand, som i dag tilsættes lerblandingen ved fremstilling af mursten. Projektet har dermed muliggjort cirkulær ressource-økonomi for typer af murværk, som i dag kun kan nedknuses og anvendes til fyld. Dermed er der udviklet en forretningsmodel for at fremstille en værdifuld sekundær ressource, som kan genanvendes i fremstilling af nye mursten.

Projektet har vist, at det er muligt at erstatte naturligt sand 1-1 med ”Gensand” i form af nedknust murværk uden negative effekter for de nye fremstillede mursten. Dette forudsætter, at det nedknuste murværk leveres med en specificeret kornkurve og renhedsgrad.

Miljøstyrelsen
Lerchesgade 35
5000 Odense C

www.mst.dk