



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Sil-Brick

Miljøvenlige, silikat bundne sandsten



MUDP rapport

Juli 2021

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Christian Løjtved, Engineering Consulting Corporation

Stuart Clyens, STEKKER

Jesper Boelt, Slico Innovation

ISBN: 978-87-7038-329-5

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

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

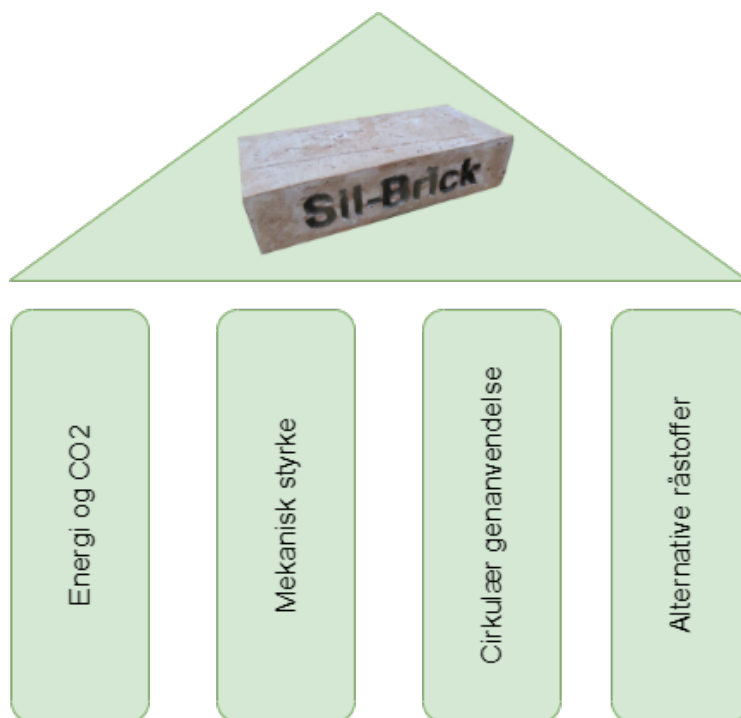
1.	Indledning	4
2.	Sammenfatning	5
3.	Konventionelle mursten	6
3.1	Specifikt energi -og CO2 forbrug	6
3.2	Cyklustider ved produktion af mursten	8
3.3	Styrkekrav	8
4.	Produktion af Sil-Brick	9
4.1	Støbeprocess	9
5.	Forudgående resultater	10
6.	Test & Datavalidering	11
7.	Fugtabsorbering	14
7.1	Baggrund	14
7.2	Fugtabsorbering ved konventionelle mursten	14
7.3	Koldtvandsabsorbering	14
7.4	Varmtvandsabsorption	15
7.5	Opmuringsstudie	16
7.6	Delkonklusion	17
8.	Trykstyrke	18
8.1	Konventionelle mursten	18
8.2	Sil-Brick	18
8.3	Delkonklusion	22
9.	Cirkulær økonomi	23
9.1	Genbrugsproces	23
9.2	Trykstyrke - Tør	23
9.3	Delkonklusion	24
10.	Energi & CO2	25
10.1	Delkonklusion	26
11.	Prisestimat	27
12.	Bibliography	29

1. Indledning

Hovedformålet med Sil-Brick projektet har været at afdække hvorvidt det er muligt at producere et alternativ til traditionelle ler mursten, som anvender og udleder mindre energi og CO₂. Et formål som er blevet gennemført via konceptudvikling og validering af en ny type sandbaseret mursten produceret ved lav-temperatur hærkning.

Den høje temperatur brugt i forbindelse med produktionen af traditionelle mursten kræver meget energi, idet stenene brændes ved over 1000°C. Sil-Brick hærkning foregår i kontrast ved omtrent 60 °C og det er primært denne fordelagtige parameter der har inspireret projektteamet til at undersøge hvorvidt Sil-Brick teknologien, i form af mursten, kan finde indpas i en industri hvor energi og CO₂ reduktion, både er et voksende krav, men også en afgørende konkurrenceparameter. Et sekundært mål har været at afdække hvorvidt mindre attraktive sandtyper som eksempelvis ørkensand kan indgå i fremtidens byggerier, et spørgsmål som har voksende interesse i takt med øget efterspørgsel og faldende udbud af konventionelt byggesand verden over.

Projektet er afviklet som et teknologiudviklings-projekt baseret på screeningstests, til afdækning af Sil-Brick teknologiens potentiale. Projektet begrænser sig til fire arbejdsopgaver, produktion, trykstyrke, vejrbestandighed samt cirkulær økonomi som danner grundlag for afdækningen af de fire fokusområder, Energi & CO₂, Mekanisk styrke, Cirkulær genanvendelse og alternative råstoffer.



FIGUR 1. De fire fokusområder

2. Sammenfatning

Projektet har eftervist at sand-bundne mursten (Sil-Brick) kan produceres via simpelt produktionsudstyr og samtidig opnå en tør gennemsnits trykstyrke på 40MPa, hvilket er mere end tilstrækkeligt hvis teknologien skal bruges som erstatning for mursten.

Produktionsprocessen anvendt i projektet har involveret en tvangsblender, et vibrationsbord og en (lav-temperatur) tørringsovn, hvilket gør etableringsomkostninger for produktion lav og tillader at teknologien kan udbredes til fx tredjeverdenslande. Desuden er tiden og temperaturen forbundet med hærdning af Sil-Bricks reduceret med henholdsvis 72% og 94%. Dette åbner for afprøvning af forskellige tilsatsmaterialer og tillader designkombinationer der ikke er mulige for konventionelle mursten, grundet den høje hærdetemperatur.

Den primære del af Sil-Brick mursten består af rund kornet sand, et materiale som forefindes i rigelige mængder fordelt over hele Danmark. Ørkensand er blevet testet som et alternativ med gode resultater til følge. Ingen af de anvendte materialer er på nuværende tidspunkt klassificeret som en knap ressource hvilket er med til at fremtidssikre produktet. Indledende forsøg af Sil-Bricks genanvendelighed har vist lovende resultater, et tegn på at teknologien kan indgå i en cirkulær økonomi.

Fugtabsorptionen af Sil-Bricks er omkring 6% sammenlignet med konventionelle mursten, der typisk ligger omkring 10% til 15%. Minutoptaget af Sil-Bricks er ligeledes blevet estimeret meget lavt, hvilket blev afspejlet i forbindelse med opførelsen af en testmur som blev bygget af en uddannet murer. Mureren konstaterede også, at Sil-Bricksnes vandoptag var lavt, hvilket der bør korrigeres for ved at justere fugtindholdet i den anvendte mørtel.

Screeningtest af vædede Sil-Bricks har påvist et tab i trykstyrken på omkring 10-72% som er omvendt proportional med belastningshastigheden, en afgørende parameter for stenens EN-klassificering. Det har ikke været muligt at afdække årsagen til styrkereduktionen inden for projektets rammer, men test har indikeret at sandtype kan reducere denne effekt, da Sil-Bricks produceret med Ørkensand ikke har udvist samme krybningstendens. Det skal nævnes at Sil-Brick produceret på DK-sand genopnår fuld styrke efter udtørring.

Frosttest på mindre emner gav anledning til afskalning/krakelering og en reduceret trykstyrke på ca. 59% efter 50 cykler. Til sammenligning var trykstyrke reduktionen af udendørs eksponerede fuldstørrelses Sil-Bricks 23% og der blev ikke konstateret revnedannelse eller afskalning. Udendørseksponeringen forløb i perioden december 2019 til september 2020. Sammenligningen danner grundlag for tvivl vedrørende den udførte frosttest afspejling af virkeligheden.

LCI-beregninger på Sil-Bricks har afdækket en potentiel CO2 reduktion på 11% til 35% sammenholdt med konventionelle mursten. Besparelsen kommer primært fra den reducerede hærdetemperatur som står for 60% af CO2 udledningen i konventionel murstenproduktion. I kontrast udgør hærdeprocessen kun 3% af den samlede CO2 omkostning i forbindelse med Sil-Bricks produktion.

Det estimeres at én Sil-Brick, vil kunne markedsføres til en pris på mellem 5 og 10 kr. per sten, en acceptabel pris og et attraktivt alternativ til konventionelle mursten. Sil-Bricksne, i deres nuværende teknologiniveau, bør derved have potentiale til at finde indpas i tørre miljøer, så som indervægge eller verdensdele med begrænset nedbør.

3. Konventionelle mursten

3.1 Specifikt energi -og CO2 forbrug

Formålet med Sil-Brick teknologien var at reducere mængden af energi forbundet med murstensproduktion. Det var derfor vigtigt at have et estimat over den mængde energi, der bruges til fremstilling af konventionelle mursten. Heldigvis er der udført adskillige undersøgelser for både at måle og optimere energiforbruget og CO2 udledningen i forbindelse med produktionen af murværk. Et af disse energistudier "Energy efficiency in the South African clay brick industry" [1], præsenterer værdierne i TABEL 1. Tabellen viser den energi, der blev brugt til at producere 1 kg mursten, i 16 forskellige lande herunder 9 fra EU.

TABEL 1. Murstenproduktion og specifikt energiforbrug (SEC) til tørring og fyring.

Land	Murstens produktion [Mio. ton]	SEC tørring og brænding [MJ/kg]
Marokko	1,50	1,78
Tyskland	10,00	1,94
Grækenland	2,16	1,96
Irland	0,95	1,97
Italien	17,60	2,37
Spanien	12,60	2,40
Frankrig	3,41	2,57
U.K.	5,00	2,66
Danmark	0,86	2,69
Nederlandene	3,10	2,76
Indien	55,00	2,80
Portugal	4,15	2,86
Algeriet	3,00	3,14
Syd Afrika	11,1	3,42
Canada	0,84	3,59
Australien	5,73	3,88
Gennemsnit	8,56	2,67

Til sammenligning præsenterede "The Carbon Trust" (CT), et samarbejde mellem den britiske regering og 74 teglværker lokaliseret i EU, i 2007 en rapport med en detaljeret gennemgang af murstensproduktionen i EU [2]. Dette blev gjort for at fremme og accelerer overgangen til en mere bæredygtig produktion. De præsenterede værdier for delprocesser og deres energifordelinger kan findes i TABEL 2. Tabellen tager udgangspunkt i et gennemsnitlig energiforbrug på 706 kWh/ton, svarende til ca. de 2,542 MJ/kg. Værdien stemmer godt overens med gennemsnitsværdien fra overstående tabel. Ligeledes stemmer værdien igen overens med værdien præsenteret i en nylig (2016) udgivet rapport fra "The Brick Development Association" (BDA).

I BDA indgår 15 UK lokaliserede teglværker, de fremlagde et SEC gennemsnit på 727 kWh/ton; svarende til 2,6 MJ/kg.

TABEL 2. Mursten, specifikt energiforbrug

Livscyklusfase	Proces	Energiforbrug [%]	SEC [MJ/kg]
Udgravning + Transport	Sted- og ler-type afhængig	N/A ¹	N/A
	Blanding og ekstrudering	2,05	0,049
Sten produktion	Stabling	0,59	0,014
	Tørring og brænding	95,2	2,422
	Af-stabling	0,10	0,003
	Andet (kompressorer, belysning,)	1,92	0,046
	Total	100	2,542²

Som det kan ses i TABEL 2 anvendes over 95% af den samlede produktionsenergi (på fabrikken), til tørring og brænding. Største delen af energien, der bruges til tørring og brænding kommer fra fossile brændstoffer som fx naturgas

Tallene i de to rapporter præsenteres begge som indeholdende energiforbruget fra "cradle-to-factory-gate" men granskes den specifikke CO₂ udledning i CT og BDA-rapporterne fremgår en væsentlig forskel. CT præsenterer en gennemsnitlig specifik udledning på 150 g CO₂/kg og BDA fremlægger 230 g CO₂/kg. Tallet fra BDA [3] består af posterne "direct fuels and indirect electricity" og "process emissions". "Proces emissions" beskrives indirekte i BDA-rapporten som værende energi og CO₂ omkostninger relateret til opgravning, transport og forberedelse af leret. Fratrækkes "process emissions" de 230 g CO₂/kg fås 150 g CO₂/kg hvilket stemmer overens med tallet præsenteret i CT rapporten. Derfor antager Sil-Bricks teamet at SEC værdierne og fordelingen i TABEL 2, fundet i CT rapporten, kun relaterer sig til produktionen af mursten fra det øjeblik leret ankommer til fabrikken.

Kombineres CO₂ værdierne fra BDA-rapporten med den CO₂ fordeling der præsenteres i CT-rapporten fås TABEL 3.

TABEL 3. Mursten, specifikt CO₂ forbrug (cradle-to-factory-gate)

Livscyklusfase	Proces	CO ₂ [%]	g CO ₂ / kg
Udgravning + Transport	Sted- og ler-type afhængig	32,7	73
	Blanding og ekstrudering	3,1	7
	Stabling	0,7	2
Sten produktion	Tørring og brænding	59,7	137
	Af-Stabling	0,2	1
	Andet (kompressorer, belysning,)	4,5	10
	Total	100	230³

Da CO₂ værdien præsenteret i BDA-rapporten både er nyere og virker til at indeholde større dele af murstensproduktionsprocessen benyttes denne værdi fremadrettet som sammenligningsgrundlag for Sil-Brick miljømæssige performance.

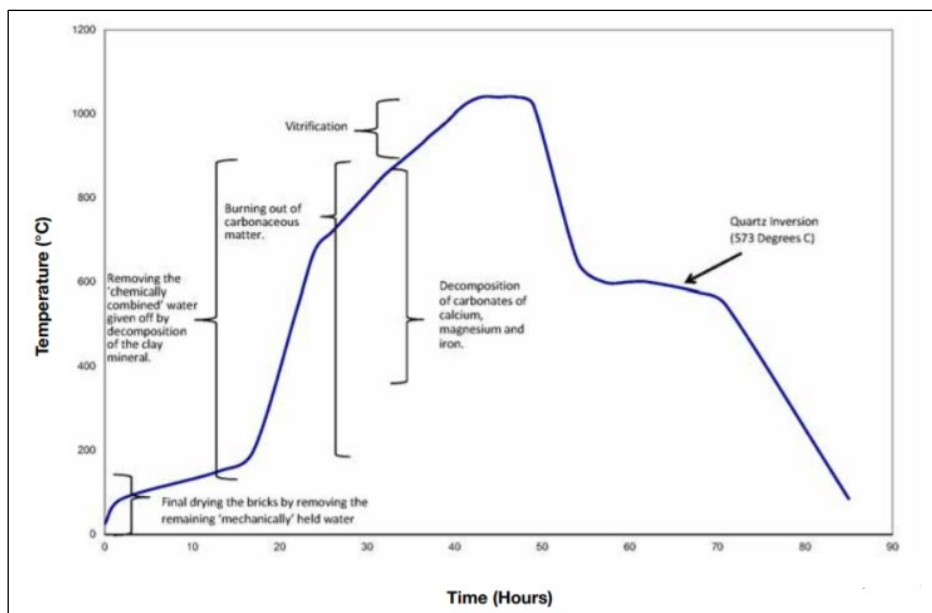
¹ N/A: Data, der ikke er tilgængelige ved udarbejdelse af denne rapport.

² Gennemsnitlig SEC på 74 murproduktionsanlæg over hele EU [2], jf. TABEL 2, UDEN minedrift.

³ Gennemsnitlig CO₂ baseret på 15 murstenproduktionsanlæg i UK

3.2 Cyklustider ved produktion af mursten

FIGUR 2 viser hele temperaturkurven i forbindelse med tørring, brænding og til sidst nedkøling af murstenene til en temperatur, der gør det muligt at fjerne murstenene fra ovnen. Som det kan ses på denne kurve, er den samlede cyklustid ca. 85 timer.



FIGUR 2. Cyklustid ved murstensproduktion [4]

3.3 Styrkekrav

En række EU-standarder (f.eks. EN 771-1 [5]), der dækker konventionelle ler baserede mursten, beskriver detaljeret de forskellige tests, der skal udføres for at en mursten kan kvalificeres til brug i byggeri i EU, men der er ingen krav angående minimums trykstyrke anført i disse standarder udover at det er én af mange ting murstensproducenten skal anfører i murstensens datablad. I EU, specificeres den mindst tilladelige trykstyrke på anvendte mursten primært af de bygningsingeniører der regner på en given bygning. Denne afhænger generelt af højden på den bygning, der skal opføres, hvor den står samt brugen af murstenen i strukturen fx facade versus bærende. Derfor blev det besluttet at anvende den amerikanske standard ASTM-C26, til at definerer kravene til den mindst tilladelige trykstyrke for, at have et udgangspunkt.

Ifølge American Society for Testing and Materials C62 (ASTM-C26) skal den gennemsnitlige trykstyrke over 5 mursten valgt fra et produktionsparti overstige 20,7 MPa [6]. Denne trykstyrke er brugt som udgangspunkt for den mindst tilladelige gennemsnits trykstyrke for Sil-Brick stenene. En styrke, som muliggør, at en kilometer mursten kan stables oven på hinanden, før den nederste mursten fejler - baseret på en murstensdensitet på 2 g/cm³, hvilket er mere end tilstrækkelig til hvis stenene fx skulle anvendes i en typisk 2-3 etagers konstruktion; såsom en klassiske familievilla.

EN-standarderne er blevet anvendt som inspiration for udførelsen og opstilling af de test der er blevet lavet i Sil-Brick projektet. Det vil sige at det ikke kan garanteres af kravene præsenteret i EN-771-1 og i de underliggende standarder er blevet overholdt til punkt og prikke, da komplet kvalifikation ligger uden for projektets rammer. Hver gang der henvises til en standard i de følgende afsnit, betyder det derfor blot at der er taget udgangspunkt i standarden.

4. Produktion af Sil-Brick

Produktionen af Sil-Brick kan opdeles i to grupper, sten produceret med DK sand og sten produceret med namibisk ørkensand. Partikelstørrelsesfordeling af ørkensand er særdeles fin og er derfor blevet testet op mod DK sand med en partikelstørrelse på 0-2mm, en sandtype som er let tilgængelig i det meste Danmark.

4.1 Støbeproses

Den første række tests, der blev udført under Sil-Brick projektet, involverede undersøgelse af muligheden for at bruge DK sand (0-2mm), idet denne type sand er den mest udbredte sandtype og samtidig prisbillig. Sandtypen benyttes sjældent alene og har ofte et højt indhold af flint, hvilket gør denne type sand mindre attraktiv til anvendelse i produktionen af byggematerialer såsom beton. Beton produceret af fint og flintholdigt sand udviser dårlige mekaniske egenskaber, hvis denne fremstilles alene af denne type sand. Da afrundede partikler pakker bedre sammen end skarpe partikler, gør det denne type sand ideel til binding vha. geopolymerer, hvor bindinger dannes mellem partiklernes kontaktpunkter.

Teknikkerne til fremstilling af mursten af ovenfor beskrevne sandtyper, er meget enkle og kan bestemt bruges i tredjeverdenslande, til at fremstille mursten manuelt ved hjælp af simple blandemaskiner og træforme. Processen kan også tilpasses til automatisk murstenproduktion; som fx kompressions eller -ekstruderings støbning.



FIGUR 3. Sil-Bricks simple fremstillingsproces; forme, vibrationsbord og tvangsblender.

Gennem Sil-Bricks projektet er maskiner som vist på FIGUR 3 anvendt til produktionen af testemner og mursten. Disse har bestået af:

- En orbital tvangsblender i stand til at blande op til ca. 30 kg ad gangen – Sil-Bricks.
- En Køkkenmaskine i stand til at blande op til 3 kg. – screeningstest.
- Et mellem størrelse vibrationsbord til pakning af fuldstørrelses testemner.
- Et lille vibrationsbord til pakning af små testemner.
- Diverse forme, herunder viste træforme til støbning af hel størrelses Sil-Bricks.
- Tørringsovn.

5. Forudgående resultater

OBS! I de følgende afsnit bliver der benyttet et testsæt nummereringssystem der beskriver typen af test emne, typen af test og om emnet er blevet testet tørt eller fugtigt, nummereringssystemet kan findes i Bilag 1.1.

Første års screeningstest viste at DK -og namibisk sand bundet med geopolymere binder havde gode styrke og fugtmodstandsegenskaber udtrykt ved et lille fald i brudstyrken på mellem 0 og 14%, afhængigt af anvendt sandtype. Se TABEL 4 og TABEL 5.

TABEL 4. DK-sand blandet med 40% binder

Testserie	D-N-S-00.1		D-B-S-0.01	
Antal emner	10		10	
-	Densitet	Trykstyrke	Densitet	Trykstyrke, kogning
Enhed	[g/cm ³]	[MPa]	[g/cm ³]	[MPa]
Gennemsnit	1,9	56,4	2,0	56,4
Standardafvigelse	0,1	5,8	0,1	4,6

TABEL 5. Namibisk ørkensand blandet med 40% binder

Testserie	D-N-S-00.2		D-B-S-00.2	
Antal emner	10		10	
-	Densitet	Trykstyrke	Densitet	Trykstyrke, kogning
Enhed	[g/cm ³]	[MPa]	[g/cm ³]	[MPa]
Gennemsnit	2,0	49,6	2,0	42,5
Standardafvigelse	0,1	8,8	0,1	9,4

Alle emner blev tryktestet tørre, den ene halvdel blev udsat for kogning i en time, den anden halvdel blev tryktestet direkte efter produktion. Indledningsvist viste LCI-beregninger at der var omkring 30% energibesparelse at opnå ved denne råmaterialefordeling. Øget viden og et bedre data grundlag resulterede i en opdateret LCI og gav indblik i behovet for at reducere binderindholdet.

Det blev besluttet at reducere binder indholdet til 25% og acceptere et tab i trykstyrke. Beslutningen blev truffet på baggrund af den opdaterede LCI og et binder følsomhedsstudie der viste at 30% binder ville give en gennemsnits trykstyrke, for Sil-Bricks baseret på DK-sand, på ca. 45 MPa. Hvilket resulterede i at den forventede opnåelige trykstyrke overholdte den fastsatte minimumstyrke på 20,7 MPa fastsat i ASTM-standarden.

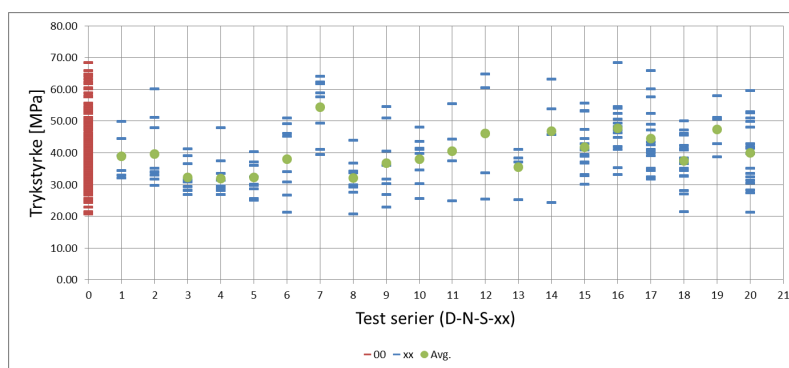
Disse test og mange screenings-studier omhandlende partikelfordeling, sandkornsstruktur, binderkomposition og bindertype har dannet fundamentet for det fortsatte arbejde præsenteret i de følgende afsnit.

6. Test & Datavalidering

Dette afsnit giver en kort beskrivelse af, hvordan testresultaterne er databehandlet, samt hvordan resultater på tværs af forskellige testserier sammenlignes.

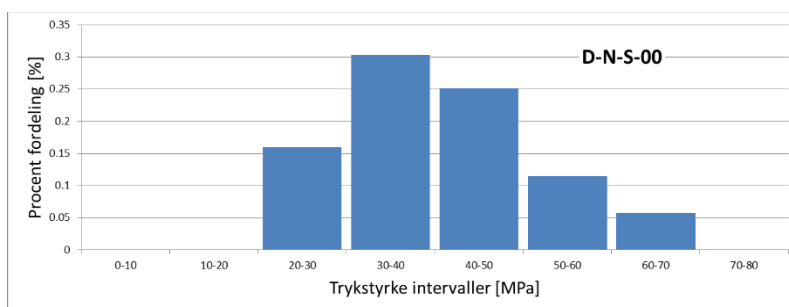
Formålet med databehandlingen er at fastslå, hvorvidt der er statistisk signifikant forskel på målte værdier, gennem antagelse om normalfordeling, i de forskellige test serier.

Kontrolgruppen (D-N-S-00) indeholder Sil-Brick's produceret på DK-sand og består af sten produceret med 25% binder hærdet i 24 timer ved ca. 60°C. Den består af 200 emner, alle testet, efter afkøling til rumtemperatur, lige efter hærdning. Det vil sige hverken udsat for fugt, frost eller kogning. Den eneste forskel på emnerne er produktions-tidspunktet, derfor er emnerne blevet under-grupperet (D-N-S-01 til -20) i FIGUR 4 for at afsløre indledningsvist, om der skulle være markant forskel på de forskellige underserier.



FIGUR 4. Trykstyrkefordelinger af test serierne indeholdt i kontrolserieren og samlet kontrolseriefordeling (rød)

Fra data fordelingerne i de 20 test serier er det tydeligt at der ingen markant forskel på serierne 01 – 20, ift. gennemsnit og spredning. Derfor godtages en sammenlægning til et kontrolsæt. Herefter tjekkes kontrolsættets tendens til normalfordeling ved at plote sættet i et histogram, se FIGUR 5.



FIGUR 5. Tryk styrke histogram af kontrolgruppen

Som det kan ses på FIGUR 5, er der asymmetri men også tildens til at resultaterne fordeles nogenlunde ud fra en normalfordelingsfunktion derfor benyttes t-test og tilhørende konfidensintervaller, på trods af det store datasæt.

TABEL 6 herunder ses en sammenligning af alle kontrolemnerne i serie D-N-S-00, testemnerne i serie D-N-S-19 og testemnerne i serie W-N-C-01 omhandlende kryb-trykstyrke test af emner udsat for fugt.

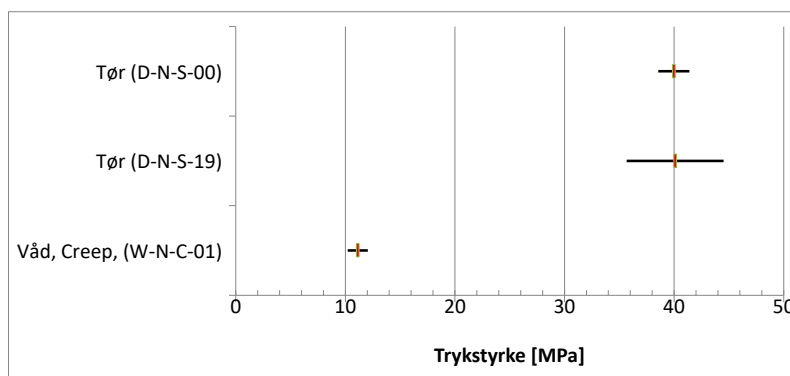
TABEL 6. Trykstyrke (DK sand)

Testserie	D-N-S-00	D-N-S-19	W-N-C-01
-	Tør test		Våd test, kryb
Gens. Trykstyrke [MPa]	40,0	40,1	11,1
Standardafvigelse	10,2	10,1	2,3
Antal målinger	200	20	25
Konfidens-niveau	0,95	0,95	0,95
Konfidensinterval	1,4	4,4	0,9

En statistisk tommelfingerregel siger at:

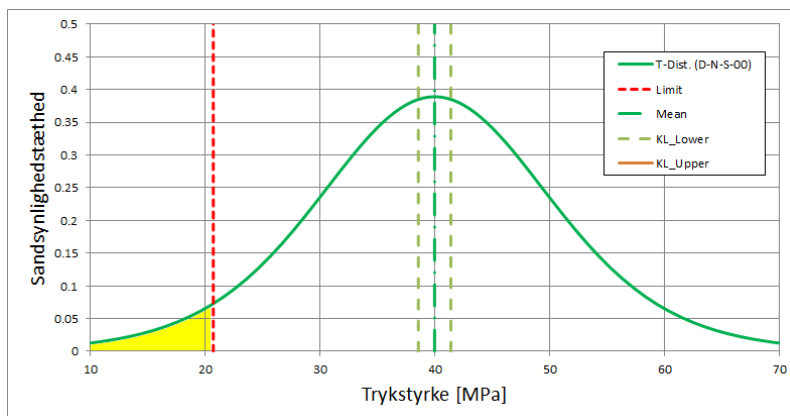
- Overlap mellem gennemsnit og konfidensintervaller er lig ingen statistisk signifikant forskel mellem to testserier for et givent konfidensniveau
- Intet overlap mellem konfidensintervaller er lig statistisk signifikant forskel mellem to test serier for et givent konfidensniveau
- Overlap mellem konfidensintervaller uden overlap af gennemsnit taler hverken for eller imod og yderligere statistisk analyse kan udføres for at determinerer den statistiske signifikans af et resultat.

Plottes konfidensintervallerne og gennemsnittene bliver det tydeligt i følgende eksempel, ved brug af overstående tommelfingerregel, at kontrolserie D-N-S-00 og serie D-N-S-19 ikke er statistisk signifikant forskellige. Hvorimod testserie W-N-C-01 tydeligt afviger statistisk signifikant fra test serie D-N-S-00 og D-N-S-19 (ingen overlap mellem gennemsnit og konfidensintervaller), se FIGUR 6.



FIGUR 6. Gennemsnits trykstyrker og konfidensintervaller

FIGUR 7 indeholder foruden T-fordelingskurven fire vertikale linjer, yderst til venstre grænseværdien fra ASTM-C62 (rød), som angiver en minimumsværdi på 20,7MPa. Centralt placeret findes gennemsnitsværdien (grøn om givet af konfidensintervallet (lysegrøn)). Det gule areal under den grønne T-Dist. kurve op til ASTM-C62 linjen, repræsenterer summen af det procentvise antal af emner, som statistisk vil have en trykstyrke under de 20,7MPa og svarer her til 3,8% af kontrolsættet.



FIGUR 7. T-Fordeling af kontrolgruppe med indsat 20,7 MPa nedre grænse (rødstreg)

7. Fugtabsorbering

7.1 Baggrund

Murstenens fugtabsorbering, er vigtig, fordi den påvirker mørtlens evne til at klæbe til murstens overflade. Meget porøse mursten har tendens til hurtigt at absorbere fugt, og især på varme dage kan dette få mørtel til at stivne alt for hurtigt. Dette får mørtlen til at miste vital plasticitet, hvilket forhindrer korrekt og nøjagtig placering af murstenen.

Et andet problem som følge af anvendelsen af meget porøse mursten er, at vandet trækkes ud af mørtlen, vand som en afgørende for at sikre den kemiske reaktion i mørtlen der sikrer tilstrækkelig udhærdning. Det er således vigtigt, at der tages forbehold for denne effekt, for at undgå at meget porøse mursten i sidste ende føre til murstensstrukturer, som er mekanisk svage. I praksis, kan mureren kompensere for denne effekt, enten ved brug af en bestemt type mørtel eller ved at fugte stenene med vand inden brug.

7.2 Fugtabsorbering ved konventionelle mursten

Fugten, der absorberes af en mursten, måles normalt ved den procentvise stigning i vægten af murstenen før og efter eksponering. Generelt afhænger mængden af fugt, der kan absorberes af en mursten, af den anvendte fremstillingsmetode. Håndlavede mursten, som generelt er meget porøse, kan absorbere fugtmængder op til 35% af deres tørvægt. I modsætning hertil absorberer masseproducerede, ekstruderede og tråd-skårne mursten, generelt mellem 5-15% af deres tørvægt [7].

Murstenproducenter er forpligtet til at specificere den mængde fugt, deres mursten er i stand til at optage. For at en mursten kan kvalificeres i Europa, måles i hvilken grad murstenen absorberer fugt ved hjælp af proceduren beskrevet i den europæiske standard EN 772-21. Proceduren for denne standard er ret ligetil. Først tørres murstens testemnerne, så vejes de og efterfølgende nedsænkes de i vand i mindst 24 timer. Efter de 24 timer fjernes testemnerne fra vandet, overskydende overfladevand med f.eks. et papirhåndklæde og til sidst vejes testemnerne igen. Fra vejningstestresultaterne bestemmes den procentvise stigning i tørvægt.

7.3 Koldtvandsabsorbering

Test af kold vandoptagelse blev udført så tæt som muligt i henhold til EN 772-21. Testterninger på 30x30x30mm blev først tørret ved en temperatur på $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ i 24 timer. Testemnerne blev derefter nedsænket i en vandtank i 48 timer. Vandtemperaturen i tanken blev holdt ved en temperatur på $22\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Mængden af vand absorberet af testprøven blev målt i perioderne 1, 6, 12, 24 og 48 timer. Testemnerne blev herefter fjernet fra det kolde vand ved hjælp af en pincet, tørret med et papirhåndklæde og derefter vejtes. Resultaterne er vist i TABEL 7 og som det kan ses, er den gennemsnitlige mængde vand, der blev absorberet under kolde forhold, efter 6 timers nedsænkning ca. 6%. Dette er relativt lavt sammenlignet med koldtvandsabsorbtionen af mursten, som er ca. 10-15%. En statistisk sammenligning af resultaterne viser, at der efter 6 timer ikke er fortsat vandoptag.

Standardafvigelse virker procentvist meget store, dette kan skyldes individuelle forskelligheder i testemnerne, som er mindre emner skåret ud af en større Sil-Brick.

TABEL 7. Koldtvandsabsorption

Testserie	W-C-M-01								
Nedsænkningstid	30s	60s	10m	30m	1t	6t	12t	24t	48t
Gns. Absorbering [%]	2,3	2,5	3,1	3,3	4,9	5,9	6,0	5,9	5,9
Standardafvigelse	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7
Antal samples	25	25	25	25	50	50	50	50	50
Konfidensniveau	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Konfidensinterval	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

7.4 Varmtvandsabsorption

Test af varmtvandsabsorptionen blev udført ved at koge testemnerne i 1, 6 og 12 timer og derefter tørre dem efter metode som beskrevet i forrige afsnit. For at begrænse fordampningen af absorberet vand fra emnerne blev prøverne hver fjernet fra det kogende vand individuelt ved hjælp af en pincet, deres overflader blev tørret med et papirhåndklæde eller lignende og vejet straks.

TABEL 8. Varmtvandsabsorption

Testserie	W-B-M-01		
Kogetid	1t	6t	12t
Gens. Vand absorbering [%]	9,3	9,1	9,3
Standard-afvigelse	1,8	1,6	1,8
Antal samples	25	25	25
Konfidensniveau	0,95	0,95	0,95
Konfidensinterval	0,7	0,6	0,7

T-test er som for koldtvands resultaterne blevet brugt til analyserer resultaterne af varmtvandsabsorption. Hvad angår varmtvandsabsorption, er der ingen statistisk signifikant forskel mellem mængden af vand absorberet efter 1 time, 6 timer og 12 timer kogning, hvilket indikerer at mætningspunktet allerede er nået efter 1 time, se TABEL 8.

Da testemnerne brugt i de to forsøg var produceret efter samme metode kunne to sandsynlige årsager til forskellen i vandoptag mellem koldt -og varmtvandstestene være at kogende vand har en bedre indtrængningsevne.

7.5 Opmuringsstudie

Et studie er foretaget for at afdække om Sil-Bricksne er praktisk anvendelige. Studiet er foretaget i samarbejde med en uddannet murer og har ledt til opførelsen af muren vist på FIGUR 8.



FIGUR 8. Testvæg

Gennem sparing med omtalte murer, er Sil-Brick som murstenserstatning, blevet evalueret. Opførelsen førte til følgende pointer fra mureren:

- Materialet minder meget om beton, hvad angår udseende og vægt.
- Mørtelen tørrer ikke ud som ved almindelige mursten, der var behov for en jordfugtig mørtel for at undgå at stenene sejlede.
- Vores murstensklipper kan ikke klippe materialet.
- Materialet er meget ensformigt, hvilket giver en pæn fuge med ens tykkelse.

7.5.1 Minutsugning

Er et udtryk for hvor meget en mursten suger over 60 sekunder over et givet areal og angives i kg/m^2 , jf. EN 772-11. Murstensleverandører skal deklarere minutsugningen for deres sten i form af en middelværdi og en tolerance. Hvorefter stenen kan kategoriseres inden for intervallerne lav ($<1.5 \text{ kg}/\text{m}^2$), mellem ($1.5\text{-}3 \text{ kg}/\text{m}^2$) og høj ($>3 \text{ kg}/\text{m}^2$).

Kombinationen af en traditionel mørtel og en sten med lav minutsugning vil give anledning til et "sejlende" murværk. Med udgangspunkt i Sil-Bricks gennemsnitlige fugtabsorbering efter 60 sekunder, jf. TABEL 7 og emnernes overflade areal, er det muligt at beregne gennemsnits minutsugning. Resultatet er en minutsugning for Sil-Brick materialet er på $0,25 \text{ kg}/\text{m}^2$, hvilket er at betegne som meget lav. En værdi som igen afspejler den lave vandabsorbering observeret. Med udgangspunkt i tilbagemeldingerne fra mureren, er der blevet foretaget overfladespændings test, hvor dråber, påført via pipette, er blevet dryppet ned på tre sten. En Sil-Brick og to blødstrogen mursten, se FIGUR 9.

Bagerst ses en Sil-Brick, i midten en nyere blødstrogen mursten fra Randerstegl og sidst en ældre mursten uden reference.



FIGUR 9. Simpel fugtoptags dryptest

Resultatet af dryptesten er at, Sil-Brick materialet hurtigt suger dråben ind i materialet, en effekt som er langsommere for de to ler-mursten. Dette modstrider resultatet af vandabsorptions-testene samt minutsugning som begge var mindre for Sil-Brick materialet. En årsag kunne være at Sil-Brick materialet, grundet dets overflade struktur, indledningsvist har stor sugsevne som hurtig bliver svækket som følge af at materialets lave totale fugtoptagsevne. En påstand som ikke er blevet nærmere undersøgt. Udsende, vægt og sammenspillet med mørtlen, er sandsynligvis punkter som der kan optimeres på gennem tilføjelse af tilsætningsstoffer og designændringer, men også punkter som grundet projektet afgrænsning, ikke er blevet undersøgt nærmere.

7.6 Delkonklusion

Sil-Brick materialet og dets evne til at absorbere fugt er blevet testet og sammenholdt med konventionelle mursten. Resultatet viser at materialets fugtabsorberingsevne ligger i den lave ende af skalaen sammenlignet med mursten. Det praktiske studie understøtter dette resultat og det blev tydeligt at mørtel med lavt fugt indhold skal benyttes i forbindelse med op muringen af den nuværende udgave af Sil-Bricks.

Kold/varm-vands forsøgende indikere at accelererede forsøgsserier kan gennemføres, ved at koge test emnerne.

8. Trykstyrke

8.1 Konventionelle mursten

De følgende afsnit beskriver Sil-Bricks performance i forskellige tests derfor blev en konventionel mursten delt op i test samples og testet på samme måde som Sil-Bricksne i de følgende afsnit, med undtagelse af kognings -og frost tests. TABEL 4 viser, tør og våd styrken med udgangspunkt i EN 772-1, samt vådstyrken ved meget langsom trykpåvirkning.

TABEL 9. Tør -og våd test af konventionel mursten.

Testserie	D-N-E-01	W-C-E-01	W-C-C-01
-	Tør trykstyrke	Våd trykstyrke	
Standard	EN 772-1	EN 772-1	Custom test⁴
Hastighed	[~0,3MPa/s]	[~0,3MPa/s]	[~0,03MPa/s]
Gns. Trykstyrke [MPa]	22,3	19,1	16,7
Standard-afvigelse	2,0	4,3	3,6
Antal samples	5	13	5
Konfidensniveau	0,95	0,95	0,95
Konfidensinterval	2,5	2,6	4,5

Resultat af testene viser at der er indikationer på et fald i den gennemsnitlige trykstyrke når stenen testes vædet. Dette fald forøges yderligere hvis den vædede sten trykpåvirkes langsomt. T-testen afslørede dog at, det ikke er til at sige om tendensen er et resultat af tilfældighed ved udvælgelse af testemnerne eller om det rent faktisk skyldes fugt påvirkning og tøjningshastigheden.

8.2 Sil-Brick

8.2.1 Trykstyrke – Tør

Forudgående tryk -og fugtmodstandstests viste at kogning, gav anledning til reduceret trykstyrke (0-14%) og større fugtabsorbering, hvilket førte til en række ekstra kogningstest hvor 3 testsæt, blev sammenholdt med kontrolgruppen. De tre test sæt blev kogt i henholdsvis 1, 6 og 12 timer og fik en ekstra varmebehandling på 60°C i 24 timer, for at reducere deres fugtindhold til samme niveau som kontrolgruppen. Efter denne ekstra varmebehandling blev de kompressionstestet ved hjælp af en hydraulisk presse og brudspændingen målt via en monteret tryktransducer. Den gennemsnitlige brudspænding for disse test sæt er vist i TABEL 10.

TABEL 10. Tør trykstyrke før og efter kogning (DK Sand)

Testserie	D-N-S-00	D-B-S-01	D-B-S-02	D-B-S-03
Kogetid	0t	1t	6t	12t
Gns. Trykstyrke [MPa]	40,0	34,5	35,9	38,8
Standard-afvigelse	10,2	6,9	9,3	8,3
Antal samples	200	25	20	24
Konfidensniveau	0,95	0,95	0,95	0,95
Konfidensinterval	1,4	2,7	4,1	3,3

⁴ Testproceduren for "costum test" beskrives i afsnit 8.2.2

Resultaterne af t-testen indikerer ingen statistisk signifikant forskel mellem trykstyrken af den ikke-kogte kontrolgruppe og testserierne kogt i 1 time, 6 time og 12 timer.

8.2.2 Trykstyrke - Våd

Vådstyrken i koldt vand, blev målt ved først at nedsænke testprøver i en vandtank, indeholdende vand ved stuetemperatur (~20°C), i 24 timer. Individuelle prøver blev derefter fjernet fra vandtanken, og deres trykstyrke blev målt ved hjælp af en hydraulisk presse.

Disse trykstyrketest afslørede, at styrken afhænger meget af den hastighed hvorved testemnerne bliver belastet. Den europæiske standard EN 772-1 beskriver den hastighed hvorved trykket skal påføres. For murstensmaterialer med trykstyrke mellem 21-40 MPa påføres trykket ved en hastighed på 0,3MPa/s. Resultaterne af disse tests er vist i TABEL 11 sammen med trykstyrken af tørt materiale, til sammenligning.

TABEL 11. Tør, våd og vådkrybningsstyrke i Sil-Bricks baseret på DK Sand.

Testserie	D-N-S-00	W-C-E-00	W-C-C-00
-	Tør trykstyrke	Våd trykstyrke	
Standard	N/A	EN 772-1	Custom test
Hastighed	[-]	[~0,3MPa/s]	[~0,03MPa/s]
Gns. Trykstyrke [MPa]	40,0	35,9	11,1
Standard-afvigelse	10,2	7,6	2,4
Antal samples	200	25	25
Konfidensniveau	0,95	0,95	0,95
Konfidensinterval	1,4	3,0	0,9

Som det fremgår, har fugtniveau samt hastigheden hvorved testemnerne bliver belastet indflydelse på trykstyrken. Der opnås en gennemsnitlig våd-trykstyrke på 36MPa når emnerne belastes "i henhold" til EN 772-1. Anvendelse af T-test afslører ikke om der er statistisk signifikant forskel mellem tør-styrken af kontrolgruppen og vådstyrken målt i henhold til EN 772-1.

Men den reducerede gennemsnitsstyrke ved langsom belastningshastighed gav anledning til en yderligere testserie, for at undersøge den mekaniske respons af prøven under krybningslignende forhold. Det skal bemærkes, at denne krybetest ikke er dækket af EN-byggestandarderne.

Krybningstesten blev udført ved 5kN belastningstrin med to minutters pause, mellem hvert trin. Som det kan ses i TABEL 11, afslørede disse tests, at den gennemsnitlige våd trykstyrke af testemnerne under disse krybtestningsbetingelser blev reduceret til 11MPa. Det skal supplerende bemærkes, at indledende forsøg med alternative kombinationer af bindemidler, har vist positive tegn, hvad angår evnen til at modstå krybning, som følge af fugtniveauet i materialet.

I kontrast til resultaterne med DK-sand, udviste lignende tests, udført på testprøver fremstillet fra Namibisk ørkensand, ikke samme markante fald som følge af belastningshastigheden, se TABEL 12. Den gennemsnitlige trykstyrke er faldende, ved reduceret belastningshastighed, men samtidig overlappes gennemsnitsværdierne af konfidensintervallerne. Det er derfor nødvendigt, fra et statistisk synspunkt, at udføre flere test for at kunne sige noget definitivt om denne tendens.

TABEL 12. Våd trykstyrke og krybningsstyrke i Sil-Bricks baseret på Namib. ørkensand.

Testserie	D-N-S-00	W-C-E-00	W-C-C-00
-	Tør trykstyrke		Våd trykstyrke
Standard	N/A	EN 772-1	Custom test
Hastighed	[-]	[~0,3MPa/s]	[~0,03MPa/s]
Gns. Trykstyrke [MPa]	36,4	32,0	30,8
Standard-afvigelse	6,0	8,2	9,1
Antal samples	12	12	12
Konfidensniveau	0,95	0,95	0,95
Konfidensinterval	3,4	4,6	5,2

Sammenlignes det procentlige trykstyrke tab, mellem DK-sand og Namibisk ørkensand på henholdsvis 72% og 15%, er der indikationer på, at krybetendensen ikke kun afhænger af den anvendte binder, men også af den anvendte sandtype.

8.2.3 Trykstyrke - Frys-tø-cykler

Frys-tø-test af mursten er dækket af den europæiske standard EN 772-22. Standarden kræver at et helt murstykke afkøles til forskellige temperaturer på for og bagside, for at opnå den såkaldte pinch-effekt. Fryser typen og dens styreenhed er relativt dyre og uden for Sil-Brick's projektrammer. Derfor er Frys-tø-testen for Sil-Brick-projektet blevet udført i en almindelig kumrefryser med testemner i størrelsen 33x33x33mm, der var sat til minus 25°C.

Sil-Brick materialet er blevet udsat for to frys-tø-test serier. Testene involverede en indledende nedsænkning af testemnerne i vand i 48 timer for at sikre, at de blev fuldt vædet. Dernæst blev testemnerne anbragt i fryseren. En testcyklus har bestået af en nedfrysningsperiode på 24 timer, hvor i emnerne blev placeret i fryseren efterfuldt af en optøningsperiode på 24 timer hvor i emnerne blev placeret i vand med en indledende temperatur på ca. 20°C±2°C. Testemnerne blev udsat for henholdsvis 25 og 50 frys-tø-cykler. Testemnerne blev efter sidste optøningscyklus kompressionstestet "i henhold" til EN 772-1, mens de stadig var våde. Trykstyrke resultaterne er vist i TABEL 13.

TABEL 13. Våd trykstyrke efter 25 og 50 tø-frys-cykler

Testserie	D-N-S-00	W-F-E-01	W-F-E-02
-	Tør trykstyrke		Våd trykstyrke
Standard	N/A	EN 772-1	
Cykler	0	25	50
Gns. Trykstyrke [MPa]	40,0	30,7	16,3
Standard-afvigelse	10,2	5,2	6,1
Antal samples	200	20	20
Konfidensniveau	0,95	0,95	0,95
Konfidensinterval	1,4	2,3	2,7

Sammenlignes resultaterne af testserierne D-N-S-00, W-F-E-01 og W-F-E-02 er der tendens til at trykstyrken af Sil-Bricksne reduceres med antallet af frys-tø-cykler. Dette mindsker antallet af de praktiske anvendelsesmuligheder for Sil-Bricks men udelukker ikke kvalificering til fx brug i indervægge.

8.2.4 Trykstyrke - Udendørs eksponering

Testene blev udført ved at placerer et antal Sil-Brick's udendørs i Næstved, hvor stenene har stået ubeskyttet i 9 måneder, i perioden 19/12/2019 – 17/9/2020. Se figur FIGUR 10.



FIGUR 10. Sammenligning mellem ikke eksponerede Sil-Bricks (nederste række) og eksponerede Sil-Bricks (øverste række) – udendørs test.

Som det fremgår af billedet, er det svært at skelne mellem de tre sæt af sten og en nærmere overfladeundersøgelse, af murstenene udsat for udendørs miljø afslørede ingen indikationer på overfladesprækker eller afskalninger, som følge af udendørseksponeringen. Trykstyrken, af testemner der blev udskåret af de udendørs eksponerede mursten, blev målt (uden indledende ovntørring) og sammenlignet med kontrolgruppen, som alle stammer fra et beskyttet værkstedsmiljø. Resultaterne af disse tests er vist i TABEL 14.

TABEL 14. Tør trykstyrke af sten udsat for udendørs eksponering (DK Sand).

Testserie	D-N-S-00	D-O-E-01
Gens. Trykstyrke [MPa]	40,0	30,8
Standard-afvigelse	10,2	3,6
Antal samples	200	8
Konfidensniveau	0,95	0,95
Konfidensinterval	1,4	2,5

Som det kan ses af resultaterne, giver udendørs eksponering anledning til reduceret trykstyrke, en reduktion som svarer overens med resultaterne af de våde tests.

8.3 Delkonklusion

Sil-Brick materialets trykstyrke har vist sig at afhænge af materiales fugtniveau samt den hastighed hvorved materialet bliver belastet. Sil-Brick materialets trykstyrke reduceres med omkring 10% når det op-fugtes i dets nuværende sammensætning og testet med en belastnings-hastighed svarende til EN-772-1. Under lav-hastighedsbelastning mindskes styrken samlet med ca. 72%. Tendensen er ikke observeret for ørkensand baserede Sil-Bricks og er endnu ikke be- eller afkræftet for konventionelle mursten. Det skal understreges at observationer peger på at våde testemner genvinder styrken når de udtørres.

Sil-Bricks teamets frosttest gav anledning til afskalning/krakelering af testemnerne og en reduceret trykstyrke på ca. 59% efter 50 cykler. Samme reduktion i styrke og afskalning/krakelering blev ikke observeret i udendørs-eksponeringstesten. Her blev en trykstyrke reduktion på 23% observeret, en værdi der ligger noget tættere på styrkeværdien for de vædede emner.

Overstående har indflydelse på hvilken klassificering Sil-Bricks kan opnå jf. EN-771-1 som afgiver i hvilke konstruktionssammenhænge stenen må indgå.

Det skal afsluttende bemærkes, at holdet bag Sil-Brick har fortaget indledende forsøg med alternative kombinationer af bindemidler, og at de har vist positive tegn, hvad angår evnen til at modstå krybning, som følge af fugtniveauet i materialet.

9. Cirkulær økonomi

Formålet med cirkulær økonomi, er at bryde den lineære værdikæde, ved materialegenanvendelse og affaldsforebyggelse. Den cirkulære genanvendelse er blevet afdækket, ved at undersøge egenskaberne af genanvendte Sil-Bricks produceret på 100% knust Sil-Brick materiale, som erstatning for sand delen.

9.1 Genbrugsproces

Genbrugstest blev udført på knust materiale, tilovers fra trykstyrketestene. Materialet gennemgik efterfølgende yderligere knusning og sigtning i forskellige størrelsesfraktioner. Det knuste og sigtede materiale, blev efterfølgende sorteret i henhold til partikel-størrelsesfordelingen i DK-sandet. De nye Sil-Bricks blev indledningsvist blandet efter samme opskrift som ikke genanvendte Sil-Bricks. Disse forsøg viste imidlertid at resultere i en for tør blanding. Yderligere blandingsforsøg blev derfor gennemført og det lykkedes at finde et forhold som både kunne blandes og støbes med succes.

TABEL 15. Materiale fordeling i nye og genanvendte Sil-Bricks.

Materiale	Nye Sil-Bricks	Genanvendte Sil-Bricks
Sand	75	-
Knuste og sigtede Sil-Bricks	-	73
Binder	24	24
Andet	1	3

Som det fremgår af TABEL 15 blev binder andelen bibeholdt på 24%, hvilket betyder at energi og prisestimerne, hvad angår bindermaterialet holdes konstant, dette er klart fordelagtigt, som følge af binderens vægtning hvad angår CO2 og pris.

9.2 Trykstyrke - Tør

De genanvendte Sil-Bricks testemner blev fremstillet, af knust Sil-Bricks materiale, hærdet og varmebehandlet i henhold til samme fremgangsmetode for nye Sil-Bricks. Trykstyrken af det genanvendte Sil-Brick materiale blev målt tør og sammenlignet med trykstyrken af kontrolmener fremstillet af rent DK-sand. Resultaterne af disse tests er vist i TABEL 16.

TABEL 16. Tør trykstyrke af genanvendte Sil-Bricks

Testserie	D-N-S-00	D-R-E-01
Type	Kontrol	Genanvendt
Gens. Trykstyrke (MPa)	40,0	35,5
Standard-afvigelse	10,2	7,1
Antal samples	200	25
Konfidensniveau	0,95	0,95
Konfidensinterval	1,4	2,8

Den gennemsnitlige trykstyrke for genanvendte Sil-Bricks er 5MPa lavere end kontrolgruppen og da konfidensintervallerne overlapper uden at gennemsnitsværdierne ligger inden for disse kan det ikke konkluderes at der er, eller ikke er statistisk signifikant forskel på de to testserier.

Det er endnu for tidligt at konkludere, hvorvidt yderligere optimering vil kunne minimere forskellen.

9.3 Delkonklusion

Ét af delmålene med Sil-Brick projektet var at fremstille et materiale, med en direkte CO2 besparelse i forhold til konventionelle mursten, men som også kan knuses og genanvendes, for på den måde at opnå en indirekte besparelse i forbindelse med produktion af nye sten.

Målet er delvist eftervist, idet det er lykket at fremstille genanvendte Sil-Bricks med samme mængde binder og med et begrænset fald i trykstyrken på omtrent 11%. Mængden af binder er afgørende, idet binderen både er pris og CO2 dominerende. Yderligere test og optimering er anset som nødvendige for at understøtte de ellers lovende resultater.

10. Energi & CO2

Det indledende energistudie indikerede at Sil-Bricks havde et væsentligt potentiale til at konkurrere med konventionelle mursten. Når man sammenlignede energiforbruget ved tørring og hærkning af mursten med energien indeholdt i Sil-Brick's råmaterialer og hærningen af Sil-Bricks gav det en energibesparelse på ca. 50%.

Løbende indsamling af viden og råmateriale data, har afsløret kompleksiteten i at lave en præcis LCI. Dette skyldes primært alderen på den tilgængelige data, variation i LCI systemgrænser samt variation i konkrete materiale værdier. Desuden har transport type -og længde, af råmaterialer, vist sig at have en betydelig indvirkning på den mængde energi og CO2 der forbruges. Derudover har det været svært at få pålidelige og konkrete data på energiforbruget forbundet med produktionen af Sil-Bricks råmaterialer derfor fokuseres der i dette afsnit primært på den opnåelige CO2 besparelse. Da disse værdier oftest har stemt overens i krydstjek af værdier mellem forskellige kilder. Sil-Brick teamet har estimeret et konservativt og et optimistisk bud på det specifikke CO2 forbrug i forbindelse med produktionen af Sil-Bricks, se TABEL 17.

TABEL 17. Sil-Brick specifik CO2 udledning – "cradle-to-factory-gate"

Type	Konservativt estimat	Optimistisk estimat
Sil-Brick CO2 [kg CO2 / kg]	0,21	0,15
Mursten CO2 [kg CO2 / kg]	0,23	0,23
Forskel [%]	-11%	-35%

I begge estimater indgår samme transport længde -og type.

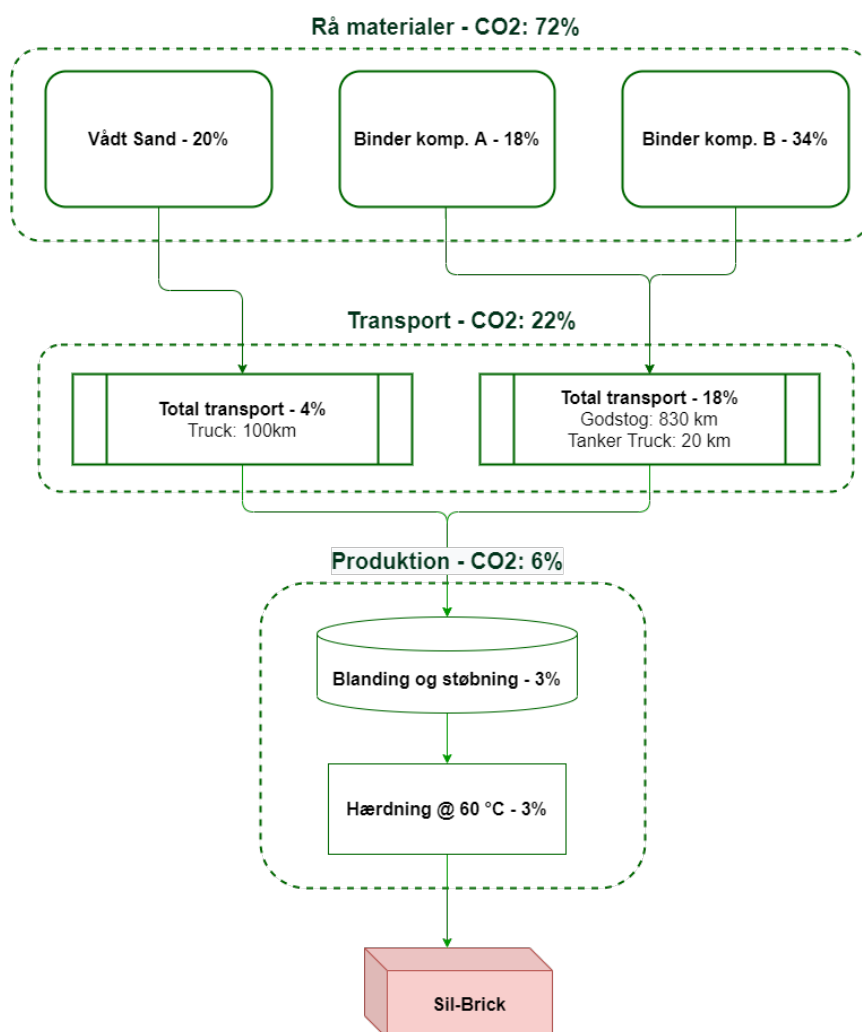
Forskellen i estimaterne kommer primært fra forskellige udledningseværdier for sand. Da omkring 75% af Sil-Bricks består af sand, giver denne værdiforskel anledning til 0,04 kg CO2 / kg af forskellen mellem de to estimater. Værdierne er udarbejdet af IMA (The Industrial Mining Association) som består af 9 europæiske minedriftsvirksomheder.

De vurderer at vådt sand, (værdi brugt i det optimistiske estimat), med en gennemsnitlig partikel størrelse på 0,26mm kræver 0,04 kg CO2 / kg sand at udvinde. Hvorimod tørt sand med samme gennemsnitlige partikel størrelse kræver 0,09 kg CO2 / kg sand. [8]

Til sammenligning er tørt sand med en gennemsnitlig partikel størrelse på ca. 0,46mm anvendt i Sil-Bricks projektet. Typen af sand er dog primært blevet anvendt fordi det er let tilgængeligt og fordi det har gjort det nemmere at styre vandindholdet i forhold til repeterbarheden af prøveemnerne; det er nemmere at tilføje en bestemt mængde vand (<1%) end det er at fjerne det. Forfatterne af denne rapport mener at det er teknisk muligt at benytte vådt sand i stedet for tørt så længe fugtindholdet kan kontrolleres.

Den sidste del af forskellen i CO2 estimatet stammer fra usikkerhed i tallene præsenteret for geopolymer-binderens 2 hovedkomponenter. Komponent A's værdier stammer fra en omkring 30 år gammel kilde. Det er svært at vurdere om anvendelsen af et sådan tal skal regnes for konservativt eller optimistisk. I dette studie er værdien blevet regnet som værende konservativ og inkluderet i det konservative estimat. Baseret på komponent A's opskrift, som fremgår i samme kilde, er et nyt og optimistisk estimat, for komponent A, regnet ud fra nyere tilgængelige råmateriale data. Denne værdi er blevet inkluderet i det optimistiske estimat. Komponent

B's LCI-data er en del nyere men der er desværre stor variation i litteraturens værdier og systemgrænser, derfor blev det besluttet at anvende den mest konservative værdi fundet i begge af estimerne. I FIGUR 11, herunder vises den procentvise fordeling af CO2 udledningen forbundet med produktionen af et kg Sil-Brick i det optimistiske estimat.



FIGUR 11. Sil-Bricks specifikke CO2 udledning baseret på det optimistiske estimat.

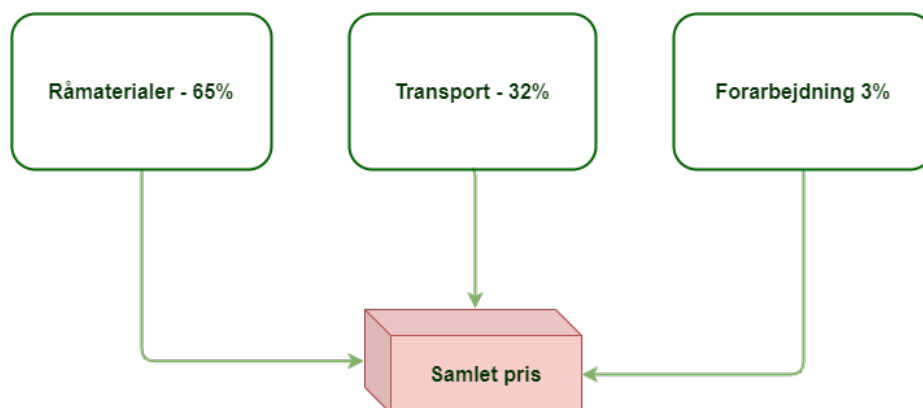
Den viser tydeligt at største delen af CO2 omkostningerne er bundet i råmaterialerne og dernæst transporten. I kontrast benyttes blot 6% til produktionen.

10.1 Delkonklusion

LCI-beregningen i dette afsnit har vist at Sil-Bricks mursten har potentialet til at udlede mellem 11% og 35% mindre CO2 end konventionelle mursten. Besparelsen opstår som et resultat af lave energi og CO2 omkostninger ved hærdningen af Sil-Bricks sammenlignet med konventionelle mursten. Desuden er det blevet tydeligt gjort at transport distance og type har en væsentlig indflydelse på den samlede udledning derfor bør disse vælges med omhu.

11. Prisestimat

Engrosprisen for en typisk konventionelle mursten i Danmark er ca. 5 DKK, hvis sådanne mursten købes i bulk af omkring 10.000. Prisen på 5 DKK per mursten er derfor brugt som en benchmarking pris, som priserne på Sil-Brick's sammenlignes med. Prisen på enhver fremstillet vare er naturligvis afhængig af produktionsomkostningerne. De samlede omkostninger ved fremstilling af en Sil-Brick omfatter følgende:



FIGUR 12. Omkostningsfordeling

Omkostningerne i forbindelse med transport afhænger naturligvis af materialeleverandørernes placering⁵. Mens sand kan hentes lokalt fra flere leverandører i Danmark, er binderen anvendt i projektet indkøbt i Tyskland, som ligeledes danner grundlag for transportomkostningerne. Det antages, at transport af industrielle mængder af binder transporteres fra midten af Tyskland til Fredericia, som vil resultere i en ekstra omkostning, som udgør cirka 26% af den samlede produktionspris.

TABEL 18. Omkostningsfordeling af Sil-Bricks engrosprisestimer.

Materiale/Proces	Omkostningsfordeling [%/Tons]
Sand	9.3%
Binder materiale ⁶	55.6%
Andet	0.3%
Transport	31.6%
Blanding	1.4%
Tørring	1.8%
SUM	100.0%

Konventionelle facademursten vejer omkring 2,4kg, en Sil-Brick med samme vægt, vil kunne produceres og sælges for omkring 5-10kr per sten, hvilket gør Sil-Brick konkurrencedygtige, idet prisen matcher prislejet for både konventionelle maskin- og blødstrøgne sten. Supplerende skal det oplyses, at engrosprisen for binder materialerne i prisestimatet, ikke matcher

⁵ Faktorer som, fx covid-19 kan påvirke fragt tider og priser i stort omfang!

⁶ Kommerciel engrospris. En binderpris som er blevet delvis krydstjekket mod den binder, som er anvendt til afdækning af Sil-Brick potentialet.

priserne på binderkomponenter, afvendt til screeningstestene til afdækning af Sil-Brick teknologien. Dette er et resultat af projektets afgrænsning samt binder og litteratur tilgængelighed. Til valideringen af prisestimatet, er der derfor foretaget 50 test delt på to testserier for at krydstjekke trykstyrken på tværs af andre mere tilgængelige bindertyper; resultatet heraf var en samlet gennemsnits trykstyrke på 36MPa, hvilket er cirka 74% højere end fastsatte grænseværdi på 20,7MPa.

12. Bibliography

- [1] M. H. C., "Energy efficiency in the South African clay brick industry.," Dept. of Mechanical Engineering, University of Cape Town, Cape Town, 1996.
- [2] C. Trust, "Industrial Energy Efficiency Accelerator - Guide to the brick sector," Carbon Trust , 2010.
- [3] Brick Development Association, "Brick - Sustainability Report," Brick Development Association, London, 2016.
- [4] Anon, "Industrial energy efficiency accelerator: Guide to the brick sector," Carbon Trust, U.K., 2010.
- [5] E. Standard, *Specification for masonry units. Clay masonry units*, European Standard, 2011.
- [6] ASTM, *ASTM C62 - Standard Specification for Building Brick*, West Conshohocken: www.astm.org, 2017.
- [7] R. Tegl, "Randers Tegl Mursten," Randers Tegl, [Online]. Available: <https://www.randerstegl.dk/dk/mursten>. [Accessed 12 5 2020].
- [8] Industrial mineral association, "IMA LCI assumptions and results," 20 Oktober 2012. [Online]. Available: <https://www.ima-europe.eu/content/ima-lci-assumptions-and-results>. [Accessed 22 10 2020].
- [9] J. S. J. Y. o. X. L. G. Zhang, "Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand," *ELSEVIER*, p. 1478–1481, 2006.

Bilag 1. Sil-Brick

Bilag 1.1 Testkode system for Sil-Brick

Code System for Sil-Brick Testing			
1	2	3	4
Test Condition	Treatments	Compression Test Method	
D	N	S	00
W	C	E	01
	B	C	.
	F	M	.
	O		
	R		
D=Dry	N=None	S=Screening compression test	00 = Entire population
W=Wet	C= Submersion in cold water	E= EN772-1 compression test	01= Sample of population
	B= Submersion in boiling water	C=Creep compression tests	
	F=Freeze/Thaw	M= Moisture absorption tests	
	O= Outdoor exposure		
	R=Recycled		
Example:	D-N-E-01		
			Testserie 01, testet tørre (D), uden forudgående behandling (N) og i henhold til EN772-1

Test-serierne og resultaterne er navngivet ud fra emnernes tilstand når de testes, den behandling de har gennemgået samt testproceduren. Ligeledes angiver navnet hvorvidt der er tale om én enkelt testserie eller et samlet testserie "sæt" udformet på baggrund af flere testserier.

Sil-Brick - Miljøvenlige, silikat bundne sandsten

Sil-Brick projektet har testet og valideret hvorvidt det er muligt at fremstille sandbaserede mursten med lavere CO2 udledning end konventionelle mursten. Projektet har haft fokus på at opnå CO2 reduktion ud fra LCI-principper, teknologiens mekaniske kunnen og dennes økonomiske konkurrenceevne. Projektet har via screeningstest dokumenteret Sil-Bricks potentiale, som bl.a. omfatter simpel produktion, høj kompressionsstyrke og materiale genanvendelse. Projektet har ligeledes afdækket teknologiens begrænsninger, som indledningsvist afgrænser teknologiens nuværende anvendelses muligheder til tørre miljøer. Sil-Brick teknologien kan, hvis den anvendes under de rette omstændigheder, give anledning til store CO2 reduktioner, hvilket bliver en afgørende konkurrenceparameter i fremtiden. Teamet bag Sil-Brick ser i den forbindelse flere potentielle anvendelses muligheder i Sil-Brick teknologien, i fremtidens byggeri.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk