

Investigation of the essential heat treatment step in the CemShale process - Et MUDP projekt

MUDP Rapport

Oktober 2022

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram, MUDP, som er et program 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
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk

Web: www.ecoinnovation.dk

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

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: Stefan Larsen

Grafiker/bureau: CemGreen ApS

Tryk: CemGreen ApS

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.	Baggrund	5
2.	Selskab	6
3.	Projektets formål	7
4.	Teknologi	8
5.	Projektgennemførsel og teknologiske resultater	9
5.1	Fase 1 – Screening og udvælgelse af råmateriale	9
5.2	Fase 2 – Test af råmateriale på CemTower® pilotanlæg	10
5.3	Fase 3 – Forberedelse af råmateriale til test af kontinuerlig drift	10
5.4	Fase 4 – Test af kontinuerlig drift	10
5.5	Sammenfatning af resultater	12
6.	Forretningsmæssige resultater	13
7.	Konklusion og perspektiv	14

1. Baggrund

Omtrent 8% af al menneskeskabt CO₂-udledning stammer fra cementindustrien. Baggrunden er, at cement er det primære bindemiddel i beton, der er det materiale, der fremstilles mest af i verden, og som er den næstmest anvendte ressource efter vand. Den omfattende CO₂-udledning skyldes, at Cement fremstilles ved at opvarme knust kalksten til 1.450°C, hvorefter det formales til pulver. Udover den store mængde CO₂, der udledes som følge af energiforbruget, stammer halvdelen af udledningen fra den kemiske proces, der indtræffer i kalkstenen ved opvarmning.

For at nedbringe klimabelastningen har Cementindustrien i en årrække anvendt Supplerende Cement Materialer (SCM), der er en fællesbetegnelse for tilsætningsstoffer med cementlignende egenskaber. Det mest udbredte SCM er flyveaske, der er et restprodukt fra kulkraftværker, og som har udgjort op til 10% af den endelige cement siden det blev introduceret i 1970'erne. Da kulkraft mange steder i verden er under udfasning som energikilde er udbuddet af flyveaske på hastig retræte, hvilket allerede nu har resulteret i en mangelsituation.

CemGreen ApS har udviklet den patentanmeldte CemClay™-proces teknologi, der ved kalci-nering (varmebehandling) kan omdanne lerholdige råmaterialer til Supplerende Cement Materiale (SCM) med egenskaber, der er bedre end flyveaske, og som inden for eksisterende lov-givning kan erstatte op til 35% af den endelige cement. Ler er et mineral, der er tilgængeligt i store mængder og forefindes i tilstrækkeligt rene forekomster de fleste steder i verden. Såle-des er det et råmateriale, der har en relativt lav pris, og som med CemClay™-teknologien har en 95% lavere CO₂-udledning end den cement, som erstattes. Den store CO₂-besparelse stammer fra CemGreens egenudviklede udstyrsteknologi CemTower®, udviklet specielt med henblik på fremstilling af SCM.

Samlet set betyder det, at CemClay™ ved 35% substitution har et potentiale til at reducere CO₂-udledningen fra et ton cement med op til en tredjedel – uden at kompromittere slutproduk-tet.

2. Selskab

CemGreen ApS er stiftet i 2016 med visionen om at levere den næste generation af SCM-produkter. Før stiftelsen er en række indledende undersøgelser blevet foretaget som led i et forskningsprojekt på DTU. Baggrunden er en tidlig identifikation af, at flyveaske som SCM vil blive en mangelvare, og at alternative teknologier og løsninger har en lang tidshorisont eller ikke er tilstrækkeligt effektive til at kunne blive reelle løsninger på den opgave, der ligger i at nedbringe cement- og betonindustriens klimaaftryk.

I 2020 modtog CemGreen tilsagn om støtte fra Miljøstyrelsens MUDP-ordning på udviklingsprojektet *Investigation of the essential heat treatment step in the CemShale Process*¹. Med tilskuddet har CemGreen opnået finansiering til at afslutte udviklingen af teknologien og bringe den frem til Technology Readiness Level 8 (TRL8).

¹ Projektet blev senere ændret til at omhandle CemClay™ processen

3. Projektets formål

MUDP udviklingsprojektet *Investigation of the essential heat treatment step in the CemShale Process* har til formål at undersøge de optimale procesparametre for kalcinering af ler under kontinuerlig kørsel på CemTower®-udstyret. Således opnås TRL 8, der er sidste teknologiske niveau inden kommerialisering af teknologien (TRL 9).

De procesparametre, der bliver undersøgt i forbindelse med projektet er 1) detaljeret screening af mulige egnede lerforekomster og den potentielle adgang i både projektets pilotskala og efterfølgende fuldskala, 2) forundersøgelse af egnet råmateriale, herunder laboratorietests af procesparametre og efterfølgende trykstyrketests for at fastslå SCM-potentiale, 3) forberedelse af råmateriale og fastlæggelse af optimale inputparametre med hensyn til størrelsen af det granulat, der skal processeres og 4) gennemførelse af kontinuerlig drift og resulterende høj kvalitets SCM-produkt.

4. Teknologi

Siden erkendelsen af, at det primært anvendte SCM, flyveaske, er på vej til at blive en mangelvare, har cement- og betonindustrien ledt efter alternativer. En af de mest lovende kandidater er lerminerale, der i naturen findes som løse sedimenter (fx lerholdig jord) og faste sedimenter (skifer). Lerminerale har i sin naturlige form ikke cementlignende egenskaber, men ved varmebehandling, kaldet kalcinering, kan cementlignende egenskaber frembringes. Der er dog nogle essentielle opmærksomhedspunkter i forbindelse med anvendelse af ler som SCM; 1) der er risiko for overopvarmning/overbrænding af råmaterialet, hvilket resulterer i et inert slutprodukt uden cementlignende egenskaber, 2) tilstedeværelsen af andre stoffer i råmaterialet øger risikoen for uønskede emissioner og 3) jernindholdet i lerminerale bliver i kalcineringsprocessen oxideret, hvilket medfører en stærk rødlig misfarvning af slutproduktet.

CemGreens patentanmeldte CemClay™ procesteknologi tager højde for disse forhindringer, og sigter således mod en større udbredelse og anvendelse af ler som SCM. Processen er optimeret til anvendelse på CemGreens CemTower® udstyrsteknologi.

Et essentielt element i CemClay™-processen er, at der opereres med inputmateriale i granulatform, modsat andre teknologier til kalcinering af ler, der benytter pulver. Fordelen ved at anvende granulat er blandt andet, at det minimerer risikoen for overbrænding, da den samlede overflade formindskes, og opholdstiden i CemTower®-enheden kan varieres for at opnå optimale procesparametre og optimalt slutprodukt. Ved den mindre samlede overflade minimeres ligeledes oxidering og således misfarvning af slutproduktet. For at opnå det ønskede optimum er bestemmelse af den bedste granulatstørrelse vigtig at få bestemt, da det har indflydelse på de øvrige procesparametre.

5. Projektgennemførsel og teknologiske resultater

Projektperioden har omfattet undersøgende arbejde omkring bestemmelse af følgende, der udgør projektets hovedaktiviteter:

1. Undersøgelse af råmaterialesammensætninger og disses betydning for optimale procesparametre
2. Råmateriale forbehandling (granulatstørrelse samt egnede teknologier til kontinuerlig proces)
3. Kalcinering og bestemmelse af optimale procesparametre, samt gennemførsel af kontinuerlig proceskørsel til verifikation af processen i pilotskala
4. Efterbehandling med hensyn til optimal formaling af outputprodukt (partikelstørrelse, så den maksimale trykstyrkeudvikling opnås)

Til løbende analyse af testkørselsresultater er der blevet foretaget et større antal trykstyrketests i henhold til den europæiske cement standard EN 196-1:2016.

Sideløbende er gennemført en række formidlingsmæssige opgaver, der har til formål at øge kendskabet til teknologien med den ultimative målsætning, at medvirke til den forretningsmæssige fremdrift og gøde jorden for de partnerskaber, der kan sikre en endelig implementering af teknologien ved at bane vejen for etablering af et fuldskala procesanlæg, der opererer med CemClay™-teknologien, hvormed den miljø- og forretningsmæssige gevinst kan realiseres.

5.1 Fase 1 – Screening og udvælgelse af råmateriale

Første fase i projektet bestod i bred råmaterialescreening med henblik på at vælge et egnet råmateriale til gennemførsel af kontinuerlig proceskørsel. Her havde vi opstillet følgende kriterier, der blev undersøgt; 1) evne til at opnå cementlignende egenskaber, dvs. SCM-potentiale, 2) mulighed for adgang til tilstrækkelig volumen til projektgennemførsel, og 3) adgang til råmateriale i fuldskala. Samtidig med de tre kriterier, gav den bredere råmaterialescreening mulighed for at opnå en essentiel viden omkring råmaterialesammensætninger, og deres indflydelse på efterfølgende procesparametre. Denne viden er afgørende for fremtidig implementering af teknologien med hensyn til at etablere leverandøraftaler og identifikation af velegnede placeringer til et anlæg i fuld industriel skala.

Vi indledte dialog med et antal potentielle råmaterialeleverandører, og endte med at indhente råmateriale fra fire forskellige brud, hvorefter proceduren omkring analyse og efterfølgende udvælgelse gik i gang. Dette arbejde bestod i simuleret forbehandling, hvor testmaterialet blev homogeniseret og forarbejdet til granulatstørrelse, hvorefter en testkalcinering i laboratorieskala blev gennemført. Herefter blev outputmaterialet formalet til fint pulver og støbt til prismar til trykstyrketest. I denne indledende fase blev gennemført trykstyrketests efter 1 døgn, 7 døgn og 28 døgn.

Resultatet blev en udvælgelse af en passende lerforekomst, der i alle henseender levede op til de førnævnte udvælgelseskriterier.

5.2 Fase 2 – Test af råmateriale på CemTower® pilotanlæg

Næste fase i projektet havde til formål at fastslå endelige procesparametre specifikt på Cem-Greens egenudviklede, patentanmeldte CemTower®-teknologi. CemTower®-enheden har i sin pilotskala en kapacitet på op til 10 tons materiale pr. dag. Således blev der indkøbt en større volumen af det bedst egnede råmateriale til gennemførelse af tests og den efterfølgende kontinuerlige proceskørsel. De afgørende parametre, undersøgelsen skulle vise og fastslå var 1) optimal granulatstørrelse af inputmateriale, 2) temperaturprofil i CemTower®-enhedens ovntrin, 3) materialeflow, 4) opholdstid, 5) gasflow.

Forbejdningen af materialet til testkørsel blev gennemført ved at køre materiale gennem en specialmodificeret valse, hvor udformningen afgjorde materialets granulat-størrelse mht. kompakthed, diameter og længde. Derefter gennemførtes en række eksperimentelle proceskørsler på CemTower®-enheden, hvor de øvrige parametre blev søgt optimeret.

Resultatet af tidlige testkørsler (testkørsel 1-5) viste, at CemClay™-processen i samspil med CemTower®-enheden giver en hidtil uset høj energieffektivitet og varmevekslingsvirkningsgrad, der rækker ud over, hvad vi på forhånd havde estimeret. For fuldt ud at forstå og sidenhen udnytte denne effektivitet, måtte vi gennemføre en række ekstra testkørsler, for at identificere de optimale parametre (testkørsel 6-15). I forlængelse af hver enkelt testkørsel gennemførtes trykstyrketests jævnfør beskrivelsen i Fase 1.

Hver testkørsel strakte sig over en samlet testdag, der dækkede 10-14 timers kørsel inkl. indkøring, hvormed anlægget blev bragt i ligevægt og driften stabil inden for de parametre, testkørslen skulle undersøge.

TABEL 1. Tabellen viser testparametre for de enkelte kørsler.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nodule size	X	X	X			X	X								
Temp.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Mat. Flow				X	X				X	X	X	X	X	X	X
Gas Flow				X	X							X	X	X	X
Retention Time	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			

På baggrund af testkørslerne kunne vi identificere de optimale procesparametre til brug ved det afsluttende forsøg med kontinuerlig drift.

5.3 Fase 3 – Forberedelse af råmateriale til test af kontinuerlig drift

Som forberedelse af materiale til test af kontinuerlig drift blev indkøbt en forarbejdningsskåne, der med passende modifikationer kan fremstille inputmateriale med de egenskaber, forsøgene i Fase 2 havde vist som de optimale, i en volumen, der var passende i forhold til CemTower®-enhedens kapacitet.

5.4 Fase 4 – Test af kontinuerlig drift

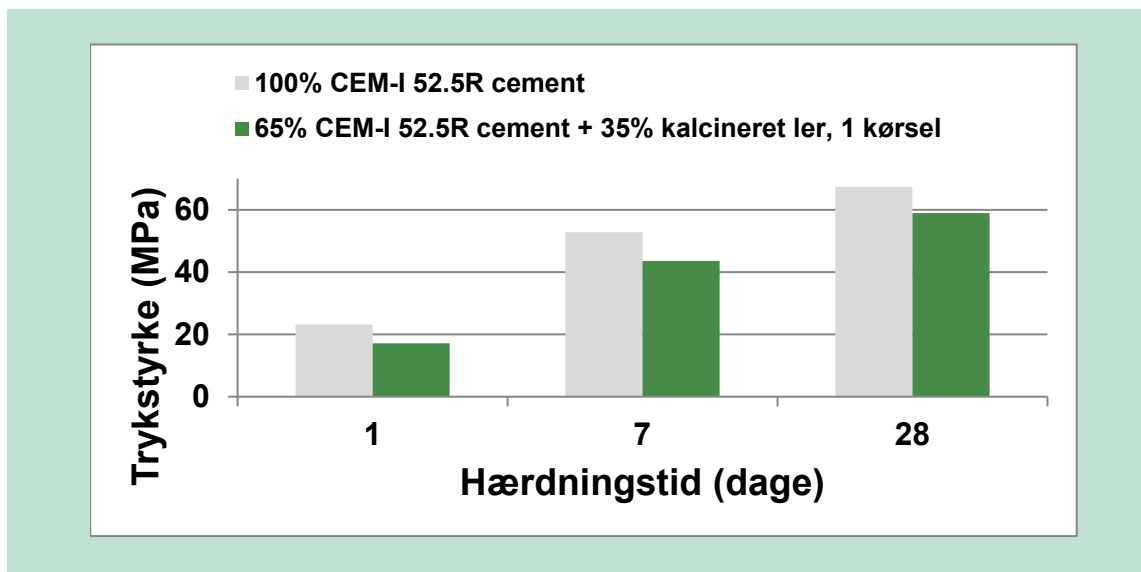
Med den forudgående forberedelse gennemført var det ultimative skridt mod verifikation af CemClay™-processteknologiens potentiale og egnethed i en kommerciel, industriel kontekst, at eftervise processen i kontinuerlig drift med de procesoptimale parametre, der blev identificeret i projektets tidligere faser.

Således gennemførtes en kontinuerlig drift over fire gange 16 timer timer, hvor en samlet råmaterievolumen på 40 tons blev processeret på CemTower®-pilotanlægget.

Fremgangsmåden ved hver kørsel var følgende;

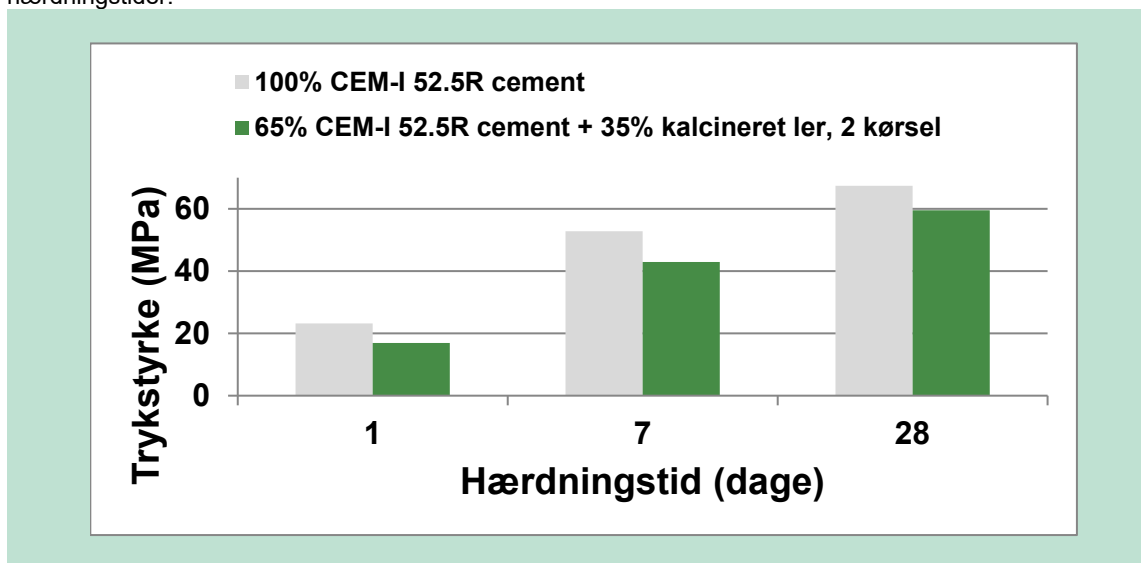
- 1) Igangsætning af materialeforberedelse/forarbejdning af råmateriale til prædefineret granulattørrelse.
- 2) Idriftsættelse af CemTower®-pilotanlægget inkl. indkøring, således at enheden blev bragt i den korrekte balance og opnåede stabil drift med de prædefinerede procesparametre.
- 3) Kontinuerlig drift uden stop.
- 4) Løbende udtagning af materialeprøver.
- 5) Laboratorietests af udtagne materialeprøver.

Resultaterne af første kontinuerte kørsel vises nedenfor. Diagrammet viser den gennemsnitlige trykstyrke af de udtagne prøver over de to gange 16 timers kørsel.



FIGUR 1. 1. kørsel

Resultaterne af anden kontinuerte kørsel viser en næsten identisk styrkeudvikling ved alle tre hærdningstider:



FIGUR 2. 2. Kørsel

Udsvingene mellem de to kørsler er minimale, på baggrund af hvilket, vi konkluderer, at der ikke er yderligere behov for driftsscenarioverifikation. Dette bakkes op af, at proceskørslerne

blev gennemført uden væsentlige forhindringer og uforudsete vanskeligheder, og uden produktionsstop undervejs. Som det ses opnås der en stabil produktkvalitet med høj trykstyrke, der bekræfter slutproduktets SCM-potentiale.

5.5 Sammenfatning af resultater

Samlet set er resultatet af projektet, at CemClay™-processteknologien er blevet bragt til Technology Readiness Level 8 (TRL8).

Vi har således gennem projektet testet en række forskellige lerforekomster og skabt en materialeprofilering mht. mineralogisk sammensætning og deraf følgende SCM-potentiale på baggrund af de tests, vi i de første aktivitetspakker har gennemført. Efterfølgende har vi med den valgte lerforekomst til videre test gennemført en længere forsøgsrække, for at fastslå de optimale procesparametre. Undervejs konstaterede vi, at CemTower®-pilotanlæggets energieffektivitet langt overstiger hvad vi på forhånd havde estimeret, hvilket betød, at flere forsøg var nødvendige med det resultat, at vi har fået defineret procesmæssige optima på alle de parametre, projektet har omhandlet.

På den baggrund kan vi konkludere, at samspillet mellem CemTower®- og CemClay™-teknologierne baner vejen for produktion af kalcineret ler med en høj energieffektivitet, lav CO₂-udledning, stabil og høj produktkvalitet og minimal misfarvning af slutprodukt.

6. Forretningsmæssige resultater

Fremdriften i CemGreens teknologiudvikling, hvor CemTower®-udstyrteknologien er blevet udviklet parallelt med MUDP-projektet, der undersøger CemClay™-processteknologien har betydet, at CemGreen i 2021 indgav en ansøgning om tilskud under Miljøstyrelsens MUDP Fyrtårnsprojektordning, med målsætning om at opføre og indkøre det første kommercielle CemTower® procesanlæg til fremstilling af lerbaseret SCM ved brug af CemClay™-processen. I forlængelse af, at projektet er blevet bevilget har CemGreen søgt efter en industriel partner, der kan sikre, at resultatet bliver en industriel implementering af teknologierne og produktet fra CemTower®-anlægget, således at produktet kommer på markedet. Umiddelbart efter afslutning af udviklingsprojektet *Investigation of the essential heat treatment step in the CemShale Process* indgik CemGreen en aftale med den globale aktør inden for cement- og betonindustrien, CRH Group, omkring opførelse af CemTower®-anlægget og den efterfølgende implementering og kommercialisering.

Således har MUDP-projektet været af afgørende betydning for, at miljøbesparelsen og de forventede forretningsmæssige resultater af teknologiudviklingen kan blive realiseret inden for kort tid. Samtidig er aftalen med CRH Group den bedst mulige bekræftelse af de resultater, som projektet har opnået.

Perspektivet er, at såfremt det lykkes at demonstrere og verificere teknologierne i samspil på CemTower®-procesanlægget, mht. både miljøbesparelse, konkurrence- og forretningsmæssig fordel, er vejen banet for en global udrulning af teknologierne.

7. Konklusion og perspektiv

Samlet set er konklusionen på MUDP-projektet *Investigation of the essential heat treatment step in the CemShale Process*, at vi gennem projektet har opnået målsætningerne omkring 1) identifikation af optimale procesparametre i CemClay™-processen og 2) bekræftelse på teknologiens industrielle potentiale ved dels at fungere i kontinuerlig drift og dels at skabe et produktoutput af høj og ensartet kvalitet.

De opdagelser, vi i løbet af projektet har gjort med hensyn til optimering af de essentielle processer har flyttet vores vurdering af teknologiens potentiale i en positiv retning. Dette gælder både det miljømæssige og kommercielle potentiale. Dette skyldes, at procesteknologien i samspil med CemTower®-udstyrsteknologien har vist en højere energieffektivitet, end den på forhånd estimerede.

Projektets perspektiv er således, at vi med den kommende opskalering, implementering og kommercialisering af CemClay™ og CemTower®-teknologierne er i stand til at nedbringe CO₂-aftrykket ved cement- og ultimativt set betonfremstilling markant, sammenlignet med den nuværende situation. MUDP-projektet og det tilskud til MUDP-fyrtårnsprojektet *'Next generation plant for producing sustainable low-CO₂ emission Supplementary Cementitious Materials'* vi i CemGreen efterfølgende har fået bevilget, har sat os i stand til inden for en kort tidshorisont at kunne etablere et fuldskala kommercielt procesanlæg, hvormed de kommercielle, erhvervs-mæssige og miljømæssige fordele kan realiseres

Investigation of the essential heat treatment step in the CemShale proces

MUDP udviklingsprojektet Investigation of the essential heat treatment step in the CemShale

Process har til formål at undersøge de optimale procesparametre for kalcinering af ler under kontinuerlig kørsel på CemTower®-udstyret. Således opnås TRL 8, der er sidste teknologiske niveau inden kommerialisering.

De procesparametre, der blev undersøgt i forbindelse med projektet er 1) detaljeret screening af mulige egnede lerforekomster og den potentielle adgang i både projektets pilotskala og efterfølgende fuldskala, 2) forundersøgelse af egnet råmateriale, herunder laboratorietests af procesparametre og efterfølgende trykstyrketests for at fastslå SCM-potentiale, 3) forberedelse af råmateriale og fastlæggelse af optimale inputparametre med hensyn til størrelsen af det granulat, der skal processeres og 4) gennemførelse af kontinuerlig drift og resulterende højkvalitets SCM-produkt. Samlet set er resultatet af projektet, at CemClay™-processteknologien er blevet bragt til TRL8.

Vi har således gennem projektet testet en række forskellige lerforekomster og skabt en materialeprofilering mht. mineralogisk sammensætning og deraf følgende SCM-potentiale på baggrund af de tests, vi i de første aktivitetspakker har gennemført. Efterfølgende har vi med den valgte lerforekomst til videre test gennemført en længere forsøgsrække, for at fastslå de optimale procesparametre. Undervejs konstaterede vi, at CemTower®-pilotanlæggets energieffektivitet langt overstiger hvad vi på forhånd havde estimeret, hvilket betød, at flere forsøg var nødvendige med det resultat, at vi har fået defineret procesmæssige optima på alle de parametre, projektet har omhandlet.

Det konkluderes, at samspillet mellem CemTower®- og CemClay™-teknologierne baner vejen for produktion af kalcineret ler.



Miljøstyrelsen
Tolderundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk