



CHALMERS

Småskalig cementmalning för lokal SCM-användning i Tanzania

Dimensionering och processutformning av
småskalig cementmalningsanläggning i låg
infrastrukturmiljö

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet maskinteknik
Rami Muhammad Ali

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2026
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

Småskalig cementmalning för lokal SCM- användning i Tanzania

Rami Muhammad Ali

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Extern Handledare: Raine Isaksson, Engineers Without Borders Sweden

Examinator: Arezou Baba Ahmadi, Chalmers Tekniska Högskola

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2026

Småskalig cementmalning för lokal SCM-användning i Tanzania

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Maskinteknik

Rami Muhammad Ali

© RAMI MUHAMMAD ALI, 2026

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2026

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

SAMMANFATTNING

Cementindustrin står för en betydande del av världens koldioxidutsläpp samtidigt som efterfrågan på byggmaterial ökar kraftigt i låg- och medelinkomstländer. I småskalig blockproduktion används ofta kommersiellt portlandcement som huvudsakligt bindemedel, vilket medför både höga kostnader och stor klimatpåverkan. Ett möjligt alternativ är att delvis ersätta portlandcement med lokalt tillgängliga Supplementary Cementitious Materials (SCM), såsom vulkanaska och kalcinerad lera.

Syftet med detta examensarbete var att undersöka hur ett småskaligt kulkvarnssystem för malning av SCM-material kan utformas för användning i miljöer med begränsad industriell infrastruktur med särskilt fokus på småskalig blockproduktion i Tanzania. Arbetet genomfördes i samarbete med Engineers Without Borders Sweden och fokuserade på teknisk genomförbarhet, enkel konstruktion och möjligheten till lokal tillverkning.

Metoden bestod av litteraturstudie, nulägesanalys, framtagning av kravspecifikation, konceptutveckling samt förenklad teknisk och ekonomisk dimensionering. Flera koncept genererades genom brainstorming, mindmapping och morfologisk matris, varefter koncepten utvärderades med hjälp av Pugh-matris.

Resultatet visade att ett robust kulkvarnssystem baserat på en stålcylander och remdrift bedöms vara den mest lämpliga lösningen för småskalig SCM-malning. Systemet dimensionerades för en kapacitet på cirka 1–2 ton per dag och en batchstorlek på cirka 50 kg SCM-material. Den uppskattade investeringskostnaden varierade mellan cirka 21 000 och 62 000 kronor beroende på komponentval och utförande.

Arbetet visar även att användning av SCM-material potentiellt kan minska koldioxidutsläppen med cirka 35 % jämfört med traditionell cementanvändning. Slutsatsen är att småskalig lokal cementmalning med SCM-material bedöms vara både tekniskt och potentiellt ekonomiskt genomförbar i låg-infrastrukturmiljöer, samtidigt som lösningen kan bidra till minskad klimatpåverkan och ökad lokal resurseffektivitet.

Nyckelord: Cementmalning, kulkvarn, SCM, kalcinerad lera, vulkanaska, småskaligblockproduktion, hållbar cementproduktion, Tanzania

Small-Scale Grinding for Local SCM Utilization in Tanzania

Design and Process Development of a Small-Scale Grinding System for Low-Infrastructure Environments

Department of Architecture and Civil Engineering

Division of Building technology

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The cement industry accounts for a significant share of global carbon dioxide emissions, while the demand for construction materials continues to grow rapidly in low- and middle-income countries. In small-scale block production, portland cement is commonly used as the primary binder, resulting in both high costs and substantial environmental impact. One potential solution is to partially replace cement with locally available Supplementary Cementitious Materials (SCMs), such as volcanic ash and calcined clay.

The aim of this thesis was to investigate how a small-scale ball mill system for grinding SCMs can be designed for use in environments with limited industrial infrastructure, with a particular focus on small-scale block production in Tanzania. The project was carried out in collaboration with Engineers Without Borders Sweden and focused on technical feasibility, simplicity of design, and the potential for local manufacturing.

The methodology consisted of a literature review, a current-state analysis, development of requirements specification, concept generation, and simplified technical and economic dimensioning. Several concepts were generated through brainstorming, mind mapping, and morphological analysis, and were subsequently evaluated using Pugh matrices.

The results indicated that a robust ball mill system based on a steel cylindrical drum and belt drive is the most suitable solution for small-scale SCM grinding. The system was dimensioned for a production capacity of approximately 1–2 tons per day and a

batch size of approximately 50 kg of SCM material. The estimated investment cost ranged between approximately SEK 21,000 and SEK 62,000, depending on component selection and design configuration.

The study also indicates that the use of SCMs may reduce carbon dioxide emissions by approximately 35% compared with conventional cement use. The conclusion is that small-scale local grinding of SCM materials appears to be both technically and potentially economically feasible in low-infrastructure environments, while also contributing to reduced environmental impact and improved local resource efficiency.

Keywords: Ball mill, SCM, supplementary cementitious materials, calcined clay, volcanic ash, small-scale block production, sustainable cement production, Tanzania

Innehåll

1	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund	1
1.1.1	Engineers Without Borders Sweden	2
1.2	Uppdragsbeskrivning	2
1.3	Avgränsningar	3
1.4	Precisering av frågeställningen	4
2	TEORETISK REFERENSRAM	5
2.1	Cement och hållbarhet	5
2.2	Alternativa bindemedel SCM	6
2.3	Cementmalning	8
2.3.1	Batch och kontinuerlig malning	8
2.3.2	Panmixer	9
2.3.3	Kulkvarn	9
2.4	Småskalig blockproduktion och lokal SCM användning	11
3	METOD	13
3.1	Nulägesanalys	13
3.2	Processflödesschema föreslaget koncept	15
3.3	Framtagning av kravbild	17
3.4	Referenslösning	19
3.5	Idégenerering	20
3.5.1	Brainstorming	20
3.5.2	Mindmapping	21
3.5.3	Morfologisk matris	22
3.6	Konceptutvärdering	23
3.6.1	Koncept 1, Lågkostnadskoncept	23
3.6.2	Koncept 2, Robust koncept	23
3.6.3	Koncept 3, Balanserat referenskoncept	23
3.6.4	Koncept 4, Högkapacitetskoncept	24
3.6.5	Koncept 5, Återbrukskoncept	24
3.6.6	Jämförelse av koncept	24
3.7	Slutkoncept	27
3.7.1	Ekonomisk uppskattning	28
3.7.2	Potentiell CO ₂ -reduktion	29
4	RESULTAT	30
4.1	Teknisk analys/dimensionering	30

4.2	Ekonomisk uppskattning	31
4.3	Miljöbelastning och potentiell CO ₂ -reduktion	32
4.4	Småskalig implementering	32
5	DISKUSSION	33
5.1	Slutsatser	35
5.2	Rekommendationer för vidare arbete	36
6	REFERENSER	38
7	BILAGOR	40

Förord

Detta examensarbete har genomförts som en del av högskoleingenjörsutbildningen i maskinteknik vid Chalmers tekniska högskola under våren 2026.

Examinator för arbetet var Arezou Baba Ahmadi vid Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik, Chalmers tekniska högskola. Extern handledare var Raine Isaksson från Engineers Without Borders. Jag vill rikta ett stort tack till Raine Isaksson för värdefull vägledning, engagemang och stöd under arbetets gång. Ett särskilt tack riktas även till Henrik Gustavsson från Engineers Without Borders för värdefulla synpunkter och stöd under projektets genomförande. Jag vill även tacka Arezou Baba Ahmadi för värdefull återkoppling som bidragit till arbetets utveckling. Slutligen vill jag tacka alla som på olika sätt bidragit till arbetets genomförande och stöttat mig under studietiden.

Göteborg juni 2026

Rami Muhammad Ali

Beteckningar

SCM

Supplementary Cementitious Materials, alternativa bindemedelsmaterial som delvis kan ersätta cement.

PC

Portlandcement, vanligaste typen av cement baserad på klinker.

Kalcinering

Upphettningsprocess av material för kemisk omvandling.

Batchdrift

Drift där material bearbetas satsvis.

BPR

Ball-to-Powder Ratio, förhållandet mellan malmedia och material i kulkvarnen.

N_c Kritisk hastighet.

D Kvarndiameter.

kWh Kilowattimme.

CO_2 Koldioxid

1 Inledning

Tillgången till kostnadseffektiva byggmaterial är en viktig förutsättning för bostadsbyggande i många delar av världen. I låg- och medelinkomstländer sker produktionen ofta småskaligt med enkla metoder, där cementbaserade block är ett vanligt byggmaterial. Ett sätt att minska både kostnad och miljöpåverkan är att delvis ersätta cement med lokalt tillgängliga material, såsom lera eller vulkanaska. För att möjliggöra detta krävs enkla och robusta processer som kan fungera i miljöer med begränsad teknisk infrastruktur. Tidigare forskning visar att användning av alternativa bindemedel och lokalt tillgängliga SCM kan minska både klimatpåverkan och kostnader inom småskalig blockproduktion i Sub-Saharan Afrika (Isaksson et al., 2023). Blockproduktion avser tillverkning av byggblock genom blandning av bindemedel, sand och vatten, följt av kompaktering och härdning. De färdiga blocken används som byggmaterial för bostäder och mindre byggnader.

1.1 Bakgrund

Cementindustrin står för en betydande andel av världens koldioxidutsläpp. Enligt Rodgers (2018) står cementindustrin för cirka 8 % av världens koldioxidutsläpp. Vilket har lett till ett ökat fokus på att utveckla mer hållbara alternativ till traditionell cementproduktion. En lovande strategi är att ersätta delar av klinkern med kalcinerad lera, exempelvis metakaolin, vilket kan minska klimatpåverkan avsevärt samtidigt som funktionella egenskaper bibehålls.

Afrika står inför en kraftigt ökande efterfrågan på byggmaterial. I snabbt växande regioner, såsom Dar es Salaam i Tanzania, finns ett ökande behov av byggmaterial i takt med urbaniseringen och befolkningstillväxt. Enligt Rasmussen et al. (2025) förväntas cementefterfrågan i Afrika öka kraftigt med ungefär 230% fram till år 2050, vilket riskerar att medföra betydande CO₂-utsläpp om traditionell cementproduktion fortsätter dominera. Samtidigt finns stora tillgångar av naturliga material som kan användas som Supplementary Cementitious Materials (SCM), exempelvis vulkanaska och kalcinerad lera. Tillgången till lokala SCM-material såsom vulkanaska och kalcinerad lera bedöms skapa möjligheter för mer hållbar och kostnadseffektiv blockproduktion i Afrika. Samtidigt är tillgången till avancerad industriell

infrastruktur begränsad, vilket skapar behov av småskaliga och kostnadseffektiva lösningar för bearbetning av SCM lokalt.

Examensarbetet genomförs i samarbete med Engineers Without Borders Tanzania och syftar till att undersöka möjligheten att utveckla en småskalig cementmalningsanläggning baserad på lokalt tillgängliga resurser, särskilt lera och vulkanaska. Detta arbete är en del av en övergripande feasibility-studie för hållbar byggmaterialproduktion i låg-infrastrukturmiljöer.

1.1.1 Engineers Without Borders Sweden

Organisationen Engineers Without Borders Sweden (EWB-SWE) även kallad Ingenjörer utan gränser Sverige, är en ideell, politisk och religiöst obunden organisation som grundades 2007 och har sitt ursprung på Chalmers tekniska högskola. Organisationen arbetar med utmaningar relaterade till FNs globala mål för hållbar utveckling. EWB driver projekt i samarbete med lokala aktörer, universitet och företag, med fokus på att utveckla tekniska lösningar som möter samhällsutmaningar i låg- och medelinkomstländer (EWB-SWE, 2025).

1.2 Uppdragsbeskrivning

Examensarbetet genomförs i samarbete med Engineers Without Borders Sweden. Syftet med arbetet är att undersöka hur ett småskaligt kvarnsystem för malning av SCM-material kan utformas för användning i småskalig blockproduktion i miljöer med begränsad industriell infrastruktur. Projektet undersöker möjligheten att minska användningen av portlandcement (PC) genom att ersätta delar av cementen med alternativa bindemedel, såsom vulkanaska och kalcinerad lera.

En viktig del av arbetet är att uppskatta om en småskalig tillverkning och användning av cementkvarnar är ekonomiskt genomförbart. I nuläget tillverkas enklare blandare och kompakteringsutrustning lokalt för små tillverkare med en cementförbrukning på ca 1 ton per dag. Frågeställning är om denna anläggning skulle kunna utökas med en kvarn för lokal malning och hur investering och driftkostnader för en implementerad kvarn förhåller sig till möjliga besparingar i cementanvändning. Det föreslagna

småskaliga malningssystemet syftar därför inte enbart till att reducera kostnader utan även till att möjliggöra lokal användning av SCM i småskalig blockproduktion. Genom lokal bearbetning av material såsom vulkanaska kan behovet av importerad cement potentiellt reduceras samtidigt som transportrelaterade utsläpp minskar.

Arbetet omfattar nulägesanalys, framtagning av kravspecifikation, idégenerering samt konceptutveckling av ett föreslaget kulkvarnssystem. Målet är att ta fram en referenslösning som är tekniskt genomförbar och anpassad för småskalig produktion. Arbetet inkluderar även en ekonomisk uppskattning på den föreslagna lösningen och en översiktlig skattning av möjlig minskning av koldioxidutsläpp vid användning av SCM istället för enbart PC.

Den utvecklade processen ska vara generell och anpassningsbar, med särskilt fokus på tillämpning i miljöer med begränsad industriell infrastruktur. Resultatet ska kunna fungera som ett tekniskt underlag för vidare utveckling av småskalig cementproduktion, inklusive användning av alternativa bindemedel såsom kalcinerad lera.

1.3 Avgränsningar

Med hänsyn till arbetets omfattning har vissa avgränsningar gjorts. Examensarbetet fokuserar på konceptutveckling och övergripande utformning av ett småskaligt kulkvarnssystem för malning av SCM-material i låg-infrastrukturmiljöer.

Arbetet omfattar inte detaljerad konstruktion eller fullständig hållfasthetsdimensionering på komponentnivå. Inte heller ingår konstruktion av fysisk prototyp, praktiska malningsförsök eller experimentell verifiering av systemets prestanda. Dimensioneringen baseras istället på litteratur, tillgängliga data och ingenjörsmässiga antaganden.

Vidare genomförs inga detaljerade investeringskalkyler eller fullständiga ekonomiska analyser. De ekonomiska uppskattningarna syftar främst till att ge en översiktlig bedömning av konceptets potentiella genomförbarhet.

Arbetet ska därför främst betraktas som en teknisk förstudie med fokus på systemutformning, processutveckling och möjlig implementering av småskalig SCM-malning för blockproduktion.

1.4 Precisering av frågeställningen

De frågeställningar som kommer att behandlas löpande i rapporten och som tydligt redogörs för i slutsatser och rekommendationer är följande:

Huvudfrågeställning

Kan småskalig blockproduktion i miljöer med begränsad industriell infrastruktur utökas med en lokal kulkvarn för SCM-malning på ett tekniskt och ekonomiskt genomförbart sätt?

Delfrågeställningar

- Hur kan ett småskaligt kvarnssystem utformas för lokal malning av SCM-material som t.ex. kalcinerad lera och vulkanaska?
- Hur kan enkelhet, låg kostnad och lokal tillverkbarhet kombineras med tillräcklig malningsprestanda?
- Hur kan SCM-material integreras i småskalig blockproduktion för att minska cementanvändning och klimatpåverkan?

2 Teoretisk referensram

Den teoretiska referensramen fokuserar på cementmalning och användning av SCM-material eftersom dessa områden är centrala för dimensioneringen av det föreslagna kvarnsystemet

2.1 Cement och hållbarhet

Enligt Bărbulescu och Hosen (2025) är cementproduktion en flerstegsprocess där råmaterial, främst kalksten tillsammans med mindre mängder lera, skiffer, sand eller bauxit, omvandlas till ett användbart bindemedel. Processen inleds med utvinning och insamling av råmaterialen, vilket därefter krossas till mindre fragment, vanligtvis omkring 10 cm i diameter. Materialet mals sedan till ett fint pulver, så kallat "rå klinkermjöl".

Med hjälp av heta rökgaser från ugnen så förvärms rå klinkermjölet. Det sker oftast i flera cykler för att öka energieffektiviteten. Därefter sker en förkalcinering där kalksten sönderdelas termiskt. Materialet förs sedan in i en roterugn där temperaturen uppnår cirka 1450 °C för att möjliggöra bildning av klinker. Efter att klinkern har bildats kyls materialet snabbt ned till cirka 100–200 °C för att stabilisera mineralstrukturen. Den kylda klinkern blandas därefter med gips och mals till färdig PC. På grund av processens komplexitet från råmaterialutvinning och transport till högtemperaturprocesser och slutlig malning uppstår flera utsläppskällor inom cementproduktionen. Varje steg bidrar till miljöpåverkan, särskilt i form av energianvändning och utsläpp av växthusgaser.

Portlandcement (PC) är den vanligaste typen av cement och består huvudsakligen av klinker, vanligtvis omkring 95 viktprocent (European Committee for Standardization [CEN], 2011). För att minska klinkerandelen och därmed klimatpåverkan används även blandcement där delar av klinkern ersätts med material som har liknande egenskaper. Enligt National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA, 2008) genererar produktion av PC ungefär 900–1100 kg CO₂ per ton producerat cement, beroende på energikälla och produktionsprocess. Samma källa anger, baserat på senare undersökningar från Portland Cement Association, ett genomsnittligt utsläpp på cirka 927 kg CO₂ per ton PC. Cirka 50–60 % av utsläppen kommer från själva kalcineringsprocessen medan resterande utsläpp kommer från energianvändning och bränsleförbränning under cementtillverkningen.

Cheng et al. (2023) visar att utvecklingsländer, särskilt i Afrika, förväntas få kraftigt ökade cementrelaterade utsläpp till följd av växande behov av bostäder och infrastruktur. Samtidigt riskerar detta att leda till ökade CO₂-utsläpp från cementindustrin. Tidigare studier visar därför att alternativa bindemedelsmaterial såsom SCM-material kan spela en viktig roll för att minska klimatpåverkan från framtida cementproduktion. Särskilt i miljöer med begränsad industriell infrastruktur kan lokal bearbetning och användning av SCM-material bidra till minskad klinkeranvändning och reducerade utsläpp från cementbaserade byggmaterial.

2.2 Alternativa bindemedel SCM

Ett alternativ till traditionell PC är kalksten-kalcinerad lera-cement, även känt som LC3. Detta är en lågkoldioxidalternativ där en betydande del av klinkern byts ut mot kalcinerad lera och kalksten. Cementen innehåller ungefär 50 % klinker. Den mest energikrävande komponenten är klinkern, genom att minska andelen klinker så kan koldioxidutsläppen minskas med upp till cirka 40% jämfört med konventionell PC. Fördelen med LC3 är att råmaterialen, särskilt lera och kalksten är allmänt tillgängliga vilket gör teknologin skalbar och möjlig att implementera i en stor del av världens cementproduktion. Dessutom kan man använda lågkvalitativa leror som inte annars används industriellt utnyttjas i produktion. Det bidrar till ökad resurseffektivitet. Kalcinering av lera kräver lägre temperatur än klinkerproduktion vilket minskar energikostnaderna vilket är fördelaktigt ekonomiskt. Dessutom uppvisar LC3 goda mekaniska egenskaper trots den reducerade klinkerhalten och kan i många fall prestera likvärdigt eller bättre än traditionell cement särskilt när det kommer till beständighet mot exempelvis kloridinträngning (Steinemann, Mueller, & Shukla, 2022).

CEM II är en typ av Portland-kompositcement där en del av klinkern ersätts med andra material, såsom kalksten eller puzzolaner. Detta möjliggör en minskning av både energianvändning och koldioxidutsläpp jämfört med traditionell PC. Principen bakom CEM II är relevant för denna studie, då den visar att delvis ersättning av klinker är tekniskt genomförbar (European Committee for Standardization [CEN], 2011).

Ett puzzolanskt material är ett kiselhaltigt eller aluminiumhaltigt material som i sig själv har begränsade cementserande egenskaper. När materialet finmås och reagerar med kalciumhydroxid i närvaro av vatten bildas kalciumsilikathydrat (CSH) och andra cementserande föreningar som bidrar till hållfasthetsutvecklingen i betong. CSH är den viktigaste produkten vid cementets hydratisering och är den huvudsakliga orsaken till betongens hållfasthet. Reaktiviteten hos puzzolanska material påverkas bland annat av partikelstorlek, kemisk sammansättning och temperatur. Finare partiklar ger större specifik yta, vilket ökar reaktionshastigheten. Detta innebär att malningsprocessen är särskilt viktig för att uppnå god prestanda hos SCM-material. Vanliga naturliga puzzolaner inkluderar kalcinerad lera, metakaolin och vulkanaska. Medan vissa material, såsom lera och skiffer, kräver värmebehandling för att utveckla puzzolanska egenskaper kan vulkanaska uppvisa puzzolansk aktivitet med begränsad vidare bearbetning (Hanson, 2017).

I detta arbete används kalcinerad lera som ett SCM för att delvis ersätta cement i småskalig blockproduktion. Kalcinerad lera valdes eftersom råmaterialet är vanligt förekommande i många delar av Tanzania, kräver lägre bränsleförbrukning vid framställning än klinker och har visat god potential som cementsättare i tidigare studier. Materialet är även en central komponent i LC3-konceptet, vilket har identifierats som en lovande metod för att minska cementindustrins klimatpåverkan.

Fokus ligger inte på exakt materialsammansättning utan på möjligheten att lokalt producera och bearbeta SCM-material för att delvis ersätta cementen i småskalig blockproduktion. I de genomförda försöken har den kalcinerade leran blandats med ett kommersiellt PC. Även vulkanaska är ett intressant alternativ eftersom naturliga vulkaniska material finns tillgängliga i norra Tanzania, bland annat i områden nära Kilimanjaro. Studier från Tanzania visar att vulkanaska från områden nära Kilimanjaro kan användas som puzzolanskt material för att delvis ersätta cement i betongproduktion (Samizi & Josephat, 2017).

Konceptet bygger på att utnyttja lokalt tillgängliga material och enkla processer, såsom kalcinering av lera vid omkring 800 °C och malning i enkla kulkvarnar. Däremot kan vulkanaska malas direkt utan behov av termisk behandling. Tidiga resultat inom området indikerar att en betydande andel av cementen kan ersättas med exempelvis upp till cirka 40 % i system baserade på CEM II, samtidigt som tillräcklig prestanda för blockproduktion kan uppnås. Detta gör SCM baserade lösningar särskilt relevanta i småskaliga och resursbegränsade sammanhang där kostnad, enkelhet och lokal tillgänglighet är avgörande faktorer (Isaksson, 2026).

Isaksson et al. (2023) identifierar vulkanaska, kalcinerad lera och jordbruksaska som lovande SCM-material för småskalig blockproduktion i Subsahariska Afrika. Studien visar att lokal produktion av alternativa bindemedel kan minska beroendet av PC samtidigt som både kostnader och koldioxidutsläpp reduceras.

2.3 Cementmalning

Cementmalning är det processteg där klinker eller andra material mals ned till ett fint pulver för att erhålla önskade egenskaper hos det färdiga bindemedlet. Malningen har stor betydelse för cementets reaktivitet eftersom finare partiklar ger större specifik yta och därmed snabbare hydratiseringsreaktioner. För SCM-material såsom kalcinerad lera och vulkanaska är malningen särskilt viktig eftersom materialens puzzolanska aktivitet i hög grad påverkas av partikelstorleken.

2.3.1 Batch och kontinuerlig malning

Malningsprocessen kan ske i batch eller kontinuerlig drift. Vid batchdrift vägs en bestämd mängd råmaterial in och mals under en viss tid innan hela mängden töms ur kvarnen. Detta möjliggör enkla förändringar av materialsammansättningen mellan olika körningar, vilket gör metoden lämplig när råmaterial eller recept varierar. Batchdrift kännetecknas av låg investeringskostnad, enkel drift och hög flexibilitet. Vid kontinuerlig malning så matas råmaterial in konstant under ett kontrollerat flöde där mixning och tömning sker samtidigt. Produktionen är kontinuerlig utan stopp vilket möjliggör mycket högre produktionsvolym men lägre flexibilitet. Däremot krävs det mer avancerad styrning och ett konstant inflöde av material. Processen tillämpas oftast i industriella sammanhang där processen är fullt automatiserad.

2.3.2 Panmixer

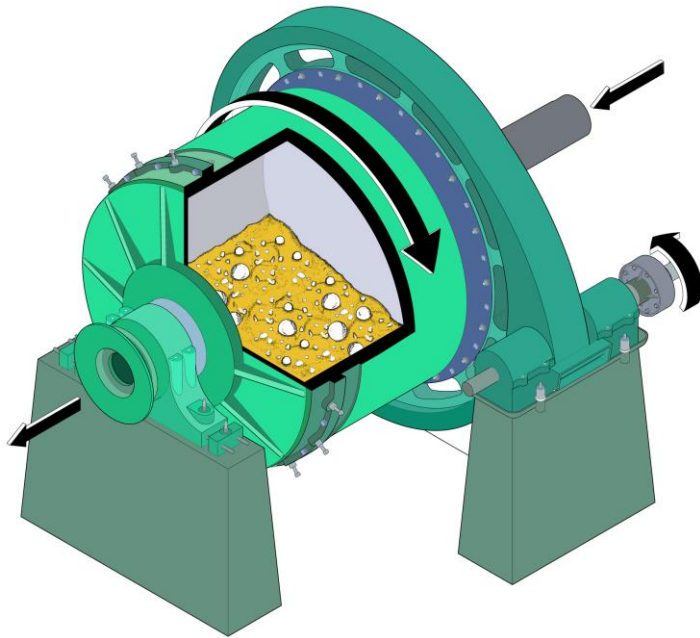
Batch mixers kan vidare delas upp i panmixer. En panmixer är en betongblandare där materialet blandas i en cylindrisk panna med hjälp av roterande blandningsblad. Blandningen sker i en öppen och kompakt konstruktion som ger god kontroll över blandningsprocessen.

Panmixers används ofta inom småskalig blockproduktion eftersom de är särskilt lämpade för styva och torra betongblandningar som används vid blocktillverkning. Enligt Ferraris (2001) kan panmixers ge en homogen blandning även för material med låg vattenhalt vilket är viktigt för att uppnå jämn kvalitet i komprimerade block.

2.3.3 Kulkvarn

Kulkvarnen är en av de mest använda teknikerna för cementmalning och består i sin enklaste form av en roterande cylindrisk trumma som delvis är fylld med malmedia, vanligtvis stålkulor som visas i Figur 1 nedan. När kvarnen roterar lyfts kulorna upp och faller ned, vilket orsakar slag- och nötningskrafter som reducerar partikelstorleken på materialet.

Materialet matas in i ena änden av kvarnen och transporteras successivt genom trumman innan det lämnar systemet som finmalet pulver (Richardson, Harker, & Backhurst, 2002).



Figur 1 Genomskäring av en kulkvarn (Rusch, 2007).

I industriella tillämpningar är kulkvarnar ofta uppdelade i två kammare. Den första kammaren innehåller grövre kulor för grovmalning, medan den andra innehåller finare kulor för finmalning. Denna uppdelning möjliggör en mer effektiv partikelreduktion och en bättre kontroll över slutprodukten finhet. Malningsprocessen i kulkvarnar är energikrävande och mycket av energin omvandlas till värme snarare än effektiv malning. Detta ger kulkvarnen en låg energieffektivitet och verkningsgrad. Trots sin relativt låga energieffektivitet används kulkvarnen fortfarande i stor utsträckning på grund av dess robusthet, driftsäkerhet och enkla konstruktion, vilket gör den särskilt lämplig i sammanhang där enkel drift och underhåll är viktiga faktorer (Hewlett & Liska, 2019).

Kulkvarnar, enligt Shlanz(1987), arbetar vanligtvis vid 70–80 % av den kritiska hastigheten vilket är den rotationshastighet som tillåter kataraktrörelse hos kulorna och ökad slagpåverkan på partiklarna. Vid för låg rotationshastighet uppstår främst glidning och rullning av kulorna längs trummans botten. Detta leder till begränsad slag verkan och därmed sämre malningseffektivitet. Materialet riskerar då att endast blandas snarare än att finmalas, vilket kan öka malningstiden och energiförbrukningen per producerat ton material.

Vid för hög rotationshastighet ökar istället centrifugalkrafterna så mycket att kulorna hålls fast mot trummans innerväggar. När detta sker minskar kulornas fria fallhöjd och därmed reduceras slagenergin kraftigt. Detta kan leda till försämrade malning trots högre energiförbrukning. Dessutom kan hög rotationshastighet orsaka ökade vibrationer, högre belastning på lager och drivsystem samt ökat slitage på trumma och malmedia. Kvarnens kritiska hastighet (N_c) beräknas enligt:

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (1.1)$$

Kulorna i en kulkvarn upptar vanligtvis mellan 30 och 50 % av kvarnens volym, där fyllnadsgraden har stor påverkan på malningseffektiviteten. Mellan kulorna uppstår samtidigt tomrum, vilket enligt Shlanz (1987) motsvarar ungefär 44 % av kulbäddens volym. Dessa tomrum är viktiga eftersom materialet som ska malas fyller utrymmena mellan kulorna där malningsprocessen sker.

Kuldiametern varierar vanligtvis mellan 12 och 125 mm beroende på materialets egenskaper och partikelstorlek. Under drift slits kulorna kontinuerligt och ersätts därför med nya, vilket leder till en naturlig blandning av olika kulstorlekar i kvarnen. Detta är fördelaktigt eftersom större kulor effektivt bryter ned grövre partiklar medan mindre kulor bidrar till finmalning av materialet (Richardson, Harker, & Backhurst, 2002).

Enligt Rajesh och Kandasamy (2025) påverkar kombinationen av kulstorlekar och mängden malmedia malningseffektiviteten samt möjligheten att snabbt uppnå en fin partikelstorlek. Studien beskriver även att ball-to-powder ratio (BPR), vilket är förhållandet mellan kulmassa och mängden material som mals, är en viktig parameter vid dimensionering av kulkvarnar. Tidigare studier som refereras i artikeln visar att BPR vanligtvis varierar mellan 5:1 och 20:1 beroende på material och önskad finhetsgrad.

2.4 Småskalig blockproduktion och lokal SCM användning

Småskalig blockproduktion är vanligt förekommande i regioner med begränsad industriell infrastruktur och snabbt växande behov av byggmaterial. Produktionen baseras ofta på enkla och lokalt tillverkade system där cement, sand och vatten blandas och kompakteras till block. Jämfört med storskalig industriell produktion kännetecknas småskaliga system av låg investeringskostnad och enkel drift.

En viktig drivkraft för småskalig blockproduktion är behovet av byggmaterial i snabbt växande regioner särskilt låg och medelinkomstländer såsom Tanzania. I dessa områden används cement i stor utsträckning för låghållfasta tillämpningar såsom betongblock där hållfastheten ofta är i intervallet 1–7 MPa enligt kursmaterial från KTH (Isaksson, 2026). Tillgången till avancerad utrustning är begränsad vilket ställer krav på robusta och enkla lösningar.

I många afrikanska länder används så kallade sandcrete-block, vilket består av en torr blandning av cement, sand och vatten som kompakteras till block. Blocken tillverkas ofta nära användningsplatsen i små och relativt enkla produktionsanläggningar som vanligtvis består av en blandare (pannmixer) och en utrustning för kompaktering. I många länder ligger minimikraven för sandcrete-block omkring 2,2–3,5 MPa, jämfört med cirka 18–35 MPa för vanlig konstruktionsbetong. Eftersom hållfasthetskraven är relativt låga finns goda

möjligheter att delvis ersätta portlandcement med alternativa bindemedelsmaterial utan att blockens funktion påverkas negativt. Cement utgör dessutom en betydande del av produktionskostnaden och blocktillverkare strävar därför ofta efter att minimera cementinnehållet. Vilket motiverar användning av lokalt tillgängliga SCM-material för att minska kostnader och reducera klimatpåverkan (Isaksson et al., 2023).

En viktig möjlighet inom småskalig blockproduktion är användningen av SCM, såsom kalcinerad lera, vulkanaska och jordbruksbaserade askor. Dessa material kan användas för att delvis ersätta cement och därmed minska både materialkostnader och klimatpåverkan. Vulkanaska är särskilt intressant eftersom materialet kan malas direkt utan behov av kalcinering, medan lera kräver kalcinering före användning.

Trots potentialen finns flera utmaningar kopplade till småskalig SCM-användning. Variationer i råmaterial och begränsad processtyrning kan påverka kvaliteten hos det färdiga bindemedlet och därmed även blockens egenskaper. Detta ställer krav på robusta processer och enkla men tillförlitliga lösningar för malning och materialhantering.

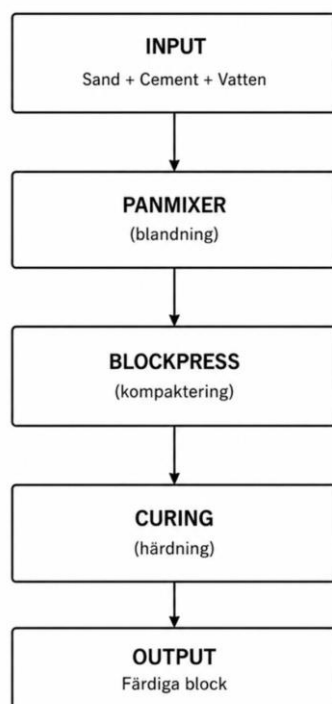
Sammanfattningsvis bedöms småskalig användning av SCM-material vara särskilt intressant i regioner där cement är kostsamt och tillgången till industriell infrastruktur är begränsad. För att denna potential ska kunna utnyttjas krävs enkla och robusta lösningar för lokal bearbetning av materialen. Detta utgör utgångspunkten för föreliggande studie, där fokus ligger på utveckling av ett småskaligt kulkvarnsystem för SCM-malning.

3 Metod

I detta kapitel beskrivs den metod som använts för att utveckla och utvärdera ett malningssystem anpassat för småskalig cementproduktion. Arbetet bygger på en ingenjörsmässig metod där befintlig kunskap från litteraturen kombineras med konceptutveckling och förenklad teknisk analys. Utgångspunkten är de begränsningar som präglar småskaliga produktionsmiljöer, såsom låg investeringskostnad, enkel drift och begränsad tillgång till avancerad utrustning. Metoden syftar därmed till att ta fram en lösning som är praktiskt genomförbar snarare än teoretiskt optimal.

3.1 Nulägesanalys

I nuläget sker blockproduktion genom att cement, sand och vatten blandas i en panmixer, följt av kompaktering och härdning enligt processflödet i Figur 2. Processen är enkel och anpassad för småskalig produktion, men är starkt beroende av kommersiellt producerad cement. Detta medför både höga kostnader och ett fortsatt beroende av kommersiellt producerat PC. Samtidigt begränsas möjligheten att utnyttja lokalt tillgängliga SCM-material, vilket kan innebära både ekonomiska och miljömässiga nackdelar. Dessa begränsningar motiverar behovet av att utveckla ett alternativt system där bindemedel kan produceras lokalt genom malning.



Figur 2 Förenklat processflöde för småskalig blockproduktion, nuläge.

Processflödet visar att den nuvarande produktionen är beroende av inköpt cement som huvudsakligt bindemedel. Någon lokal bearbetning av alternativa bindemedel förekommer inte, vilket innebär att möjligheten att använda lokalt tillgängliga SCM-material är begränsad.

För att bättre förstå de praktiska förutsättningarna studerades befintlig produktionsutrustning som används vid småskalig blocktillverkning i Tanzania. Exempel på utrustningen visas i Figur 3 och Figur 4.



Figur 3 *Befintlig panmixer. (Engineers Without Borders Sweden, Foto: Linh Paul).*

Figur 3 visar den panmixer som används för blandning av cement, sand och vatten före blocktillverkningen. Konstruktionen är relativt enkel och bygger på lokalt tillverkade komponenter, vilket möjliggör underhåll och reparation med begränsade resurser.



Figur 4 *Kompaktering i blockpress. (Engineers Without Borders Sweden, Foto: Linh Paul).*

Figur 4 visar blockpressen där blandningen kompakteras till färdiga block. Utrustningen kännetecknas av robust konstruktion, låg grad av automatisering och begränsat behov av avancerat underhåll. Gemensamt för utrustningen är att den bygger på enkla mekaniska lösningar, lokal tillverkning och begränsad automatisering. Dessa egenskaper bedömdes därför vara viktiga att ta hänsyn till vid utvecklingen av ett malningssystem.

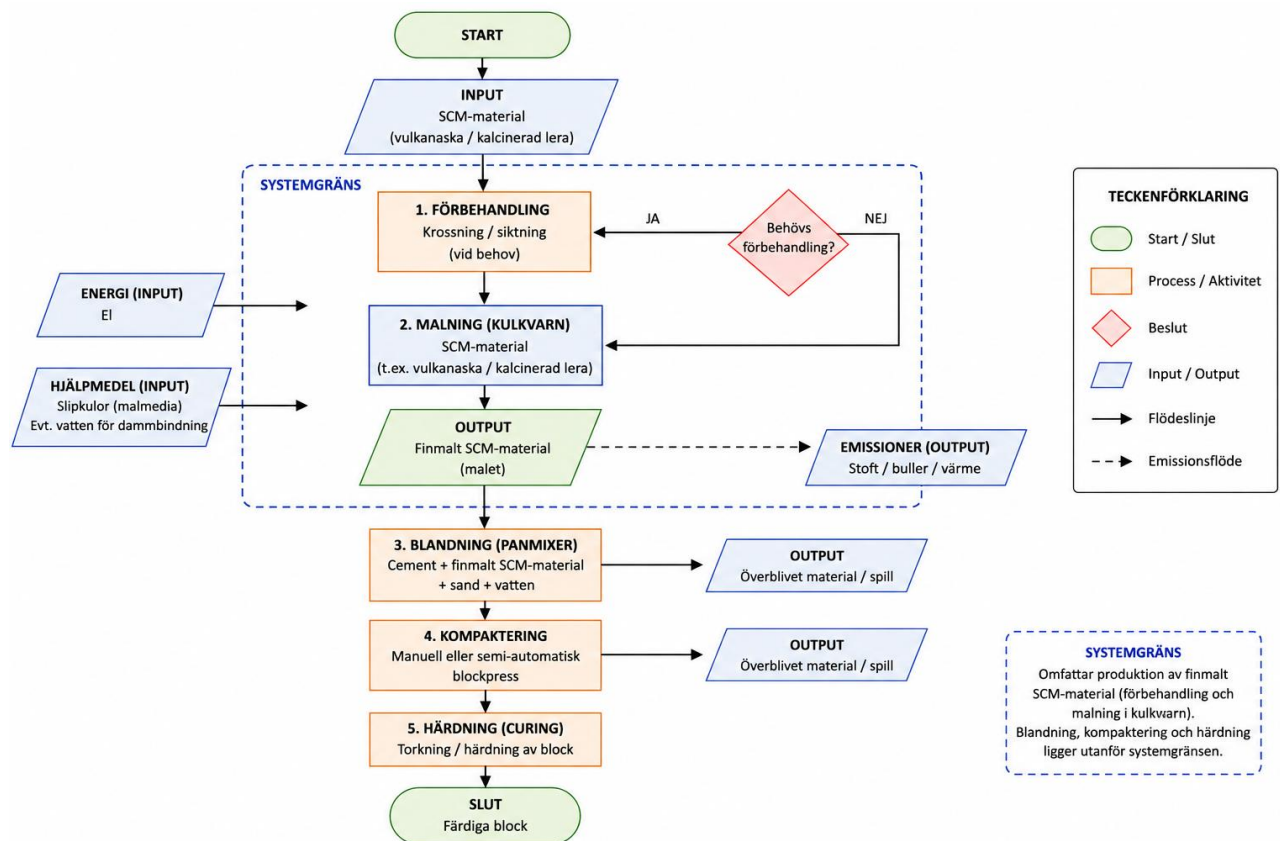
Observationerna visar att den befintliga produktionen är anpassad till en miljö med begränsad industriell infrastruktur. Utrustningen är huvudsakligen lokalt tillverkad och prioriterar enkelhet, robusthet och låg kostnad framför hög automatiseringsgrad. Dessa förutsättningar utgjorde en viktig grund vid framtagningen av kravspecifikationen. Fokus lades därför på att utveckla ett kvarnsystem som är enkelt att tillverka, underhålla och använda lokalt samtidigt som tillräcklig malningsprestanda kan uppnås för bearbetning av SCM-material. För att minska beroendet av kommersiellt PC och samtidigt möjliggöra användning av lokalt tillgängliga SCM-material. Därför undersöks möjligheten att komplettera den befintliga processen med ett småskaligt malningssystem.

3.2 Processflödesschema föreslaget koncept

Det föreslagna processflödet för småskalig produktion och användning av finmalt SCM-material i blockproduktion illustreras i Figur 5. Processen inleds med inmatning av SCM-material såsom vulkanaska eller kalcinerad lera. Vid behov sker en förbehandling i form av krossning för att reducera partikelstorleken innan materialet förs vidare till kulkvarnen för malning.

Inom systemgränsen ingår huvudsakligen malningsprocessen där SCM-materialet finmals med hjälp av malmedia och elektrisk energi. Processen genererar även emissioner i form av damm, buller och värme. Det färdigmalda SCM-materialet används därefter tillsammans med cement, sand och vatten vid blandning inför blockproduktion.

Efter blandning kompakteras materialet i en manuell eller semiautomatisk blockpress innan blocken slutligen efterbehandlas genom torkning eller kontrollerad härdning. Figur 5 illustrerar även systemets huvudsakliga material- och energiflöden samt avgränsning av den studerade processen



Figur 5 Processflödeschema med malningskoncept (illustration genererad med AI)

Processflödet utformades med fokus på enkelhet, lokal tillverkbarhet och begränsade underhållsbehov. Genom att endast inkludera ett fåtal processteg inom systemgränsen kan systemets komplexitet hållas låg samtidigt som de mest kritiska funktionerna för SCM-bearbetning uppfylls. Förbehandling i form av krossning inkluderas endast vid behov, vilket ger flexibilitet för olika typer av råmaterial. Efter malning kan det finmalda SCM-materialet integreras i befintliga produktionsprocesser utan större förändringar av utrustningen för blandning, kompaktering och härdning. Det viktiga med det föreslagna processflödet är att den kan integreras i befintlig småskalig blockproduktion utan att hela produktionssystemet behöver förändras.

3.3 Framtagning av kravbild

Kravbilden för malningssystemet har tagits fram med utgångspunkt i småskalig produktion och de begränsningar som råder i den aktuella miljön. Fokuset ligger på att utveckla en lösning som är kostnadseffektiv, robust och enkel att använda. De identifierade kraven och önskemålen sammanfattas i Tabell 1 nedan.

Systemet ska dimensioneras för en kapacitet på cirka 1–2 ton per dag. Malningen ska utföras i en enkammars kulkvarn som har valts för att minimera komplexitet och underhållsbehov. Den önskade produktfinheten ligger i intervallet 0,05–0,09 mm vilket bedöms vara tillräckligt för användning i blockproduktion. Där ingående material i kvarn behöver vara <4mm.

Vidare ställs krav på att systemet ska vara lågt kostsamt både i investering och drift, samt att det ska kunna hanteras av operatörer med låg teknisk utbildning. Detta innebär att avancerade styrsystem och komplex utrustning undviks. Av säkerhetsskäl bör konstruktionen också vara robust då tillgång till skyddsutrustning kan vara begränsad.

Drivningen av kvarnen baseras på en elmotor som möjliggör relativt enkel drift och tillgång till standardkomponenter. Samtidigt bör energibehovet hållas på en rimlig nivå för att anpassas till lokala förutsättningar. Systemet dimensioneras för batchdrift då kontinuerlig produktion är mer lämplig för större volymer.

En förmalningsprocess anses också vara ett krav i processen där målet är att uppnå en finhet på mindre än 4mm innan huvudmalningen sker. Det sker genom att krossa materialet för att uppnå en grövre finhet innan malningen. Detta för att minska påfrestningar för kulkvarnen vilket också minskar energianvändningen i kulkvarnen. På grund av de förutsättningar som råder så kan det vara en värdefull idé att implementera förmalning för hand. Detta eftersom priset för arbetskraft är så pass lågt att investeringar i förmalningsmaskiner inte är givande. Alternativt kan en mindre käftkross implementeras vid behov av större produktion.

Tabell 1 Kravspecifikation för kulkvarnsystemet.

Kriterium	Funktion/krav	Målvärde	K/Ö	Vikt	Verifieringsmetod
1. Funktion					
1.1	Minska partikelstorlek	90 % < 0,09 mm	K	-	Siktanalys
1.2	Matning av material	Manuell inmatning möjlig	K	-	Observation/test
1.3	Tömning av material	Full tömning < 5 min	K	-	Tidtagning
1.4	Spill	< 5 % materialförlust	K	-	Vägning före/efter
2. Prestanda					
2.1	Kapacitet	1–2 ton/dag	K	5	Produktionstest
2.2	Batchstorlek	50–100 kg/batch	Ö	3	Mätning
2.3	Malningstid	< 60 min per batch	K	4	Tidtagning
2.4	Överbelastning	Klarar +20 % last	Ö	2	Belastningstest
3. Drift					
3.1	Driftläge	Batchdrift	K	-	Verifiering
3.2	Användning	Enkel, utan avancerad styrning	K	5	Användartest
3.3	Underhåll	Lokalt möjligt (enkla verktyg)	K	5	Inspektion
4. Energi					
4.1	Drivning	Elmotor	K	-	Verifiering
4.2	Effekt	< 10 kW	Ö	3	Mätning
5. Konstruktion					
5.1	Kvarntyp	1-kammare	K	-	Designval
5.2	Material	Stål eller lokalt tillgängligt	K	4	Inspektion
5.3	Tillverkning	Möjlig lokalt	K	5	Bedömning
6. Säkerhet					
6.1	Skydd	Enkel kåpa över roterande delar	K	5	Inspektion
6.2	Riskenivå	Säker drift utan skyddsutrustning	K	5	Risikanalys
7. Miljö					
7.1	Driftförhållanden	10–40 °C	K	-	Test
7.2	Damm	Begränsad dammspridning	Ö	3	Observation
8. Ergonomi					
8.1	Buller	<95 dB	Ö	4	Ljudmätning
9. Storlek					
9.1	Max längd	< 3 m	Ö	2	Mätning
9.2	Max bredd	< 1,5 m	Ö	2	Mätning
10. Kostnad					
10.1	Investering	Så låg som möjligt (< 5000 USD)	K	5	Kostnadsanalys
10.2	Driftkostnad	Låg energiförbrukning	Ö	4	Beräkning

Tabell 1 visar att de högst prioriterade kraven är kopplade till användarvänlighet, lokalt underhåll, säker drift, lokal tillverkning och låg investeringskostnad. Detta speglar de förutsättningar som identifierades i nulägesanalysen där tillgången till avancerad utrustning, reservdelar och teknisk kompetens bedömdes vara begränsad. Kravspecifikationen användes därefter som grund för konceptgenerering och konceptutvärdering.

3.4 Referenslösning

Innan konceptutvecklingen genomfördes studerades en befintlig referenslösning från Engineers Without Borders. Referenslösningen användes som inspiration och jämförelseobjekt under konceptutvecklingen. Referenslösningen, se Figur 6, bestod av en lokalt tillverkad kulkvarn uppbyggd av en svetsad stålkonstruktion med enkel drivning och ett begränsat antal komponenter.



Figur 6 Kulkvarn lokalt tillverkad för småskalig malning (Foto: Raine Isaksson, 2026)

Syftet med referenslösningen var inte att kopiera en färdig design utan att skapa förståelse för vilka typer av lösningar som är realistiska att tillverka, använda och underhålla i miljöer med begränsad industriell infrastruktur. Lösningen illustrerar hur enkla tillverkningsmetoder, såsom svetsning och användning av standardkomponenter, kan användas för att skapa funktionella system för lokal materialbearbetning.

Eftersom projektet genomfördes i samarbete med Engineers Without Borders bedömdes referenslösningen vara relevant för den aktuella tillämpningen. Den användes därför som utgångspunkt under konceptutvecklingen och bidrog med inspiration kring konstruktion, materialval, tillverkningsbarhet och underhåll. Referenslösningen fungerade även som ett jämförelseobjekt vid utvärdering av de framtagna koncepten.

3.5 Idégenerering

För att utveckla ett koncept för småskalig malning av SCM genomfördes en idégenereringsfas. Syftet med avsnittet är att generera möjliga lösningar utifrån de krav och begränsningar som identifierats i kravspecifikationen.

3.5.1 Brainstorming

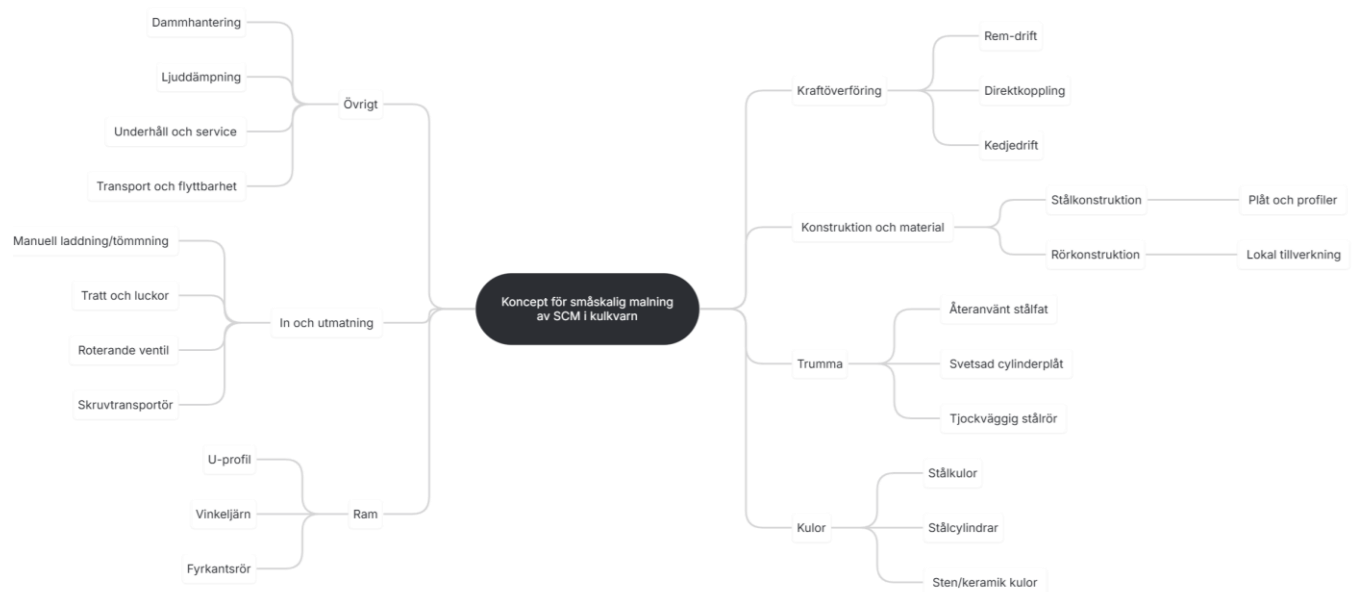
Som ett första steg i idégenereringsprocessen genomfördes en brainstorming för att identifiera möjliga lösningar och funktioner. Syftet med brainstorming var att generera flera alternativa lösningar utan att begränsas av teknisk utvärdering. Under brainstorming identifierades flera delsystem och funktioner som bedömdes viktiga för kvarnen. Dessa inkluderade bland annat trummans utformning, ramkonstruktion, kraftöverföring, malmedia, driftprincip samt in- och utmatning av material. För varje funktion identifierades flera möjliga dellösningar. Här användes AI-verktyg för att hjälpa generera idéer till möjliga dellösningar som sedan utvärderades. För trummans konstruktion exempelvis så identifierades alternativ såsom återanvänt stålfat, svetsad cylinderplåt och tjockväggigt stålrör. För kraftöverföring identifierades remdrift, kedjadrift och direktkoppling som möjliga alternativ. Även olika typer av malmedia och lösningar för materialhantering undersöktes under brainstormingen.

Resultatet från brainstormingen användes därefter som underlag för den fortsatta konceptutvecklingen. De identifierade funktionerna och dellösningarna strukturerades senare i en mindmap och användes vidare i framtagningen av den morfologiska matrisen.

3.5.2 Mindmapping

Som en del av idégenereringsprocessen användes en mindmap för att strukturera och vidareutveckla de idéer som framkom under brainstorming fasen. Syftet var att skapa en översikt över de huvudsakliga konstruktionsområden som påverkar utformningen av ett småskaligt kulkvarnssystem för malning av SCM-material. Resultatet av mindmapping visas i Figur 7.

Arbetet utgick från den centrala funktionen, småskalig malning av SCM-material, och delades därefter upp i flera delområden. Som framgår av Figur 7 identifierades flera delsystem och alternativa lösningar som senare användes vid framtagning av den morfologiska matrisen. Fokus lades på konstruktion och materialval, trummans utformning, kraftöverföring, val av malmedia, in- och utmatning av material samt stödkonstruktionens utformning.



Figur 7 Mindmap använd för strukturering av idéer och delsystem under konceptutvecklingen

Genom att visualisera sambanden mellan de olika delsystemen skapades en tydligare förståelse för vilka konstruktionsval som hade påverkan på systemets funktion, kostnad och tillverkningsbarhet. Mindmapping fungerade därmed som ett stöd inför den efterföljande konceptgenereringen och framtagningen av den morfologiska matrisen.

3.5.3 Morfologisk matris

Delsystemen och funktionerna från mindmapping användes i en morfologisk matris för att kombinera dessa och generera flera möjliga koncept för kvarnsystemet. Metoden bygger på att del funktioner delas upp i del lösningar för varje del funktion. Genom att korsbefrukta dessa dellösningar kan nya koncept och kombinationer tas fram och jämföras mot kravspecifikationen. Den framtagna morfologiska matrisen presenteras i Tabell 2.

Eftersom matrisen genererade ett stort antal möjliga lösningar genomfördes en första konceptsällning baserad på kravspecifikationen (Tabell 1). Lösningar från mindmapping (Figur 7) som bedömdes vara för komplexa, kostsamma eller svåra att tillverka lokalt sorterades bort. Roterande ventil sållades bort då det anses vara för avancerat och dyrt. Även skruvtransportör sållades bort på grund av att den är onödigt komplex för småskalig drift.

Tabell 2 Morfologisk matris.

Sub-Functions	Sub-Solutions		
Trumma	Cylinderplåt	Stålrör	Återanvänt Stålfat
Malmedia	Stålkulor	Stålcylindrar	Sten/keramik kulor
In/ut matning	Manuell	Tratt och luckor	Lucka och tömningsgaller
Ram	U-balk	Vinkeljärn	Fyrkantsprofil
Kraftöverföring	Remdrift	Direktkoppling	Kedjedrift

Tankesättet bakom urvalet av koncept från den morfologiska matrisen var att välja koncept som representerade olika konstruktionsfilosofier och prioriteringar. Syftet var att skapa koncept med varierande egenskaper för att möjliggöra en bredare konceptutvärdering. Exempelvis valdes koncept med fokus på låg kostnad, hög robusthet, balanserad helhetslösning, hög kapacitet samt lokal återanvändning av material. Alltså valdes fem koncept ur den morfologiska matrisen (se Bilaga 1) ut för vidare konceptutvärdering.

3.6 Konceptutvärdering

Utifrån den morfologiska matrisen genererades fem konceptförslag som representerar olika avvägningar mellan kostnad, robusthet, kapacitet och lokal tillverkbarhet. Koncepten presenteras nedan och utvärderas därefter med hjälp av en Pugh-matris för att identifiera den mest lämpliga lösningen för den aktuella tillämpningen.

Koncepten representerar olika designstrategier. Vissa koncept prioriterar låg investeringskostnad och enkel tillverkning medan andra fokuserar på högre kapacitet, robusthet eller längre livslängd. Detta möjliggör en jämförelse mellan olika lösningsprinciper innan slutligt koncept väljs.

3.6.1 Koncept 1, Lågkostnadskoncept

Detta koncept representerar en lösning där fokuset ligger i låg tillverkningskostnad och enkel lokal tillverkning. Trumman är tillverkad av återanvända stålfat med stålkulor som malmedia. In och utmatning sker manuellt för att hålla kostnaden så lågt som möjligt. Ramen är uppbyggd av vinkeljárn och kraftöverföringen sker med remdrift. Konceptet karakteriseras av mycket låg kostnad, enkel konstruktion och lätt att reparera. Däremot har den en begränsad robusthet och livslängd.

3.6.2 Koncept 2, Robust koncept

Detta koncept representerar en mer robust och industriliknande lösning med fokus på hållbarhet och stabil drift. Trumman är ett stålrör där malningen sker med stålkulor. Inmatning sker genom en lucka och utmatning genom ett tömningsgaller. Drivningen sker med remdrift för stabil drift. Den grövre stålkonstruktionen ger bättre styvhet och minskar risken för deformation under drift. Konceptet kännetecknas av hög robusthet, stabil drift, längre livslängd och något högre kostnad.

3.6.3 Koncept 3, Balanserat referenskoncept

Detta koncept representerar en balanserad lösning mellan kostnad, robusthet och lokal tillverkning. Konceptet bygger på referenslösningen där plåtar svetsats ihop till en cylinderplåt. In och utmatning sker manuellt där drivkraften bygger på remdrift.

3.6.4 Koncept 4, Högkapacitetskoncept

Konceptet fokuserar på hög kapacitet och effektivitet. Detta koncept bygger på mer industri liknande kulkvarnar. Den består av ett stålrör med stålkulor som malningsmedia där trumman drivs av kedjedrift. Nackdelen med detta koncept är det ökade underhållet som krävs.

3.6.5 Koncept 5, Återbrukskoncept

Det sista konceptet är uppbyggt på återanvända komponenter och fokuserar på lokal återanvändning av material och enkel tillverkning. Kulkvarnen består av ett återanvänt stålfat med stenar som malningsmedia. Användning av återbrukade stålfat reducerar kostnaden kraftigt men innebär samtidigt låg styvhet och begränsad livslängd vid kontinuerlig cementmalning.

3.6.6 Jämförelse av koncept

Koncepten jämfördes i en Pugh-matris där de olika koncepten viktas relativt mot ett referenskoncept. Jämförelsen genomfördes kvalitativt där (+) indikerade bättre egenskaper än referensen, (0) motsvarande egenskaper och (-) sämre egenskaper. Utvärderingen baserades på kriterier hämtade från kravspecifikationen. I den första itereringen av Pugh-matrisen, se Tabell 3.1, användes koncept 3 som referenskoncept eftersom det bedömdes representera en balanserad lösning mellan kostnad, robusthet och lokal tillverkbarhet. Konceptet användes även som den initiala referenslösningen i arbetet.

I den andra itereringen av Pugh-matrisen användes koncept 4 som referenskoncept, se Tabell 3.2, eftersom det rankades näst högst i den första utvärderingen och representerade konceptet som är kapabel till hög kapacitet. Detta möjliggjorde en vidare jämförelse mot ett koncept med större fokus på prestanda och materialhantering.

Koncept 1 och 5 uppvisade fördelar avseende kostnad och enkelhet men bedömdes ha begränsad robusthet och kortare livslängd. Koncept 1 och 5 använde återanvänt stålfat som trumma, vilket bedömdes ge begränsad robusthet och slitstyrka då den är alldeles för tunn för cementmalning. Detta påverkade konceptens malningseffektivitet och lämplighet negativt.

Koncept 4 visade potential men bedömdes vara mindre lämpligt för småskalig drift på grund av högre komplexitet och ökad ljudnivå.

Tabell 3.1 Pughmatrix.

Chalmers		Pughmatrix			
			Skapad: 2026-05-15		
Kriterier	Koncept				
	3	1	2	4	5
Malningseffektivitet	R	-	+	+	-
Underhåll	E	0	-	-	+
Låg ljudnivå	F	0	0	-	0
Kostnad	E	+	-	-	+
Robusthet	R	-	+	+	-
Livslängd	E	-	+	+	-
Lämplighet	N	-	+	-	-
	S				
Σ+		1	4	3	2
Σ 0		2	1	0	1
Σ -		4	2	4	4
Nettovärde		-3	2	-1	-2
Rangordning		4	1	2	3
Vidareutveckling		Nej	Ja	Nej	Nej
Beslut					

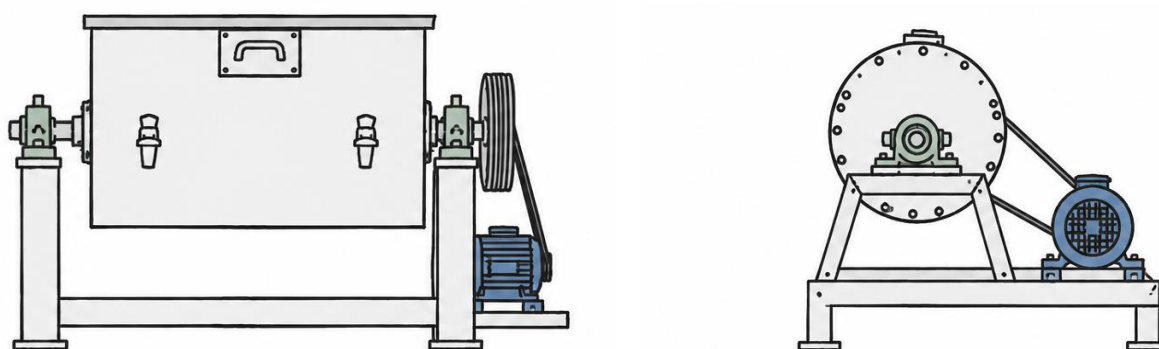
Tabell 3.2 Pughmatrix.

Chalmers		Pughmatrix			
			Skapad: 2026-05-15		
Kriterier	Koncept				
	4	1	2	3	5
Malningseffektivitet	R	-	0	-	-
Underhåll	E	+	+	+	+
Låg ljudnivå	F	+	+	+	+
Kostnad	E	+	+	+	+
Robusthet	R	-	0	0	-
Livslängd	E	-	0	-	-
Lämplighet	N	+	+	+	-
	S				
Σ+		4	4	4	3
Σ 0		0	3	1	0
Σ -		3	0	2	4
Nettovärde		1	4	2	-1
Rangordning		3	1	2	4
Vidareutveckling		Nej	Ja	Delvis	Nej
Beslut					

Resultat visar att koncept 2 fick högst nettovärde och rangordnades högst av de utvärderade koncepten. Konceptet bedömdes vara starkt inom malningseffektivitet, robusthet och livslängd. Samtidigt identifierades vissa fördelaktiga egenskaper hos koncept 3 som bedömdes vara relevanta för den fortsatta utvecklingen av slutkonceptet. Särskilt användningen av cylinderplåt som trummateriell bedömdes vara intressant ur ett kostnadsperspektiv och skulle potentiellt kunna bidra till lägre tillverkningskostnad jämfört med användning av tjockväggigt stålrör.

3.7 Slutkoncept

Efter konceptutvärderingen valdes koncept 2 för vidare utveckling i det fortsatta arbetet. Konceptet bedömdes ge bäst balans mellan robusthet, malningseffektivitet och långsiktig hållbarhet samtidigt som det uppfyllde majoriteten av kraven. Det slutliga konceptet, som visas i Figur 8, består av en horisontell kulkvarn uppbyggd kring en cylindrisk rörkonstruktion i stål monterad på en svetsad stålram. Trumman bärs upp av två lagerhus och drivs av en elmotor via remdrift.



Figur 8 Skiss på koncept 2, Robust koncept

Ett kraftigt stålrör eller valsad cylinderplåt är de enda alternativen som klarar 1–2 tons daglig produktion. Ett återanvänt stålfat faller bort direkt eftersom plåten är för tunn för att klara av trycket från stålkulorna och vulkanstenar. Stålrör som trumma bedömdes ge högre stabilitet och bättre slitstyrka. Dessutom att köpa en färdig rörsektion i grovt konstruktionsstål sparar enormt mycket tid och säkerställer att röret inte har svetsfogar längs med omkretsen som kan spricka av de konstanta slagen från stålkulorna. Det är också lättare att få balanserat, vilket minskar vibrationerna i lagren.

För att möjliggöra effektiv malning kan trummans insida inte vara helt slät. Om innerväggarna är släta riskerar mal mediet och SCM-materialet att glida längs trummans botten istället för att lyftas upp och falla ned genom gravitation, vilket minskar malningseffektiviteten. Därför utformades slutkonceptet med invändiga lyftare monterade längs trummans insida. Lyftarna kan exempelvis bestå av längsgående stålprofiler eller plattjärn som svetsas fast på innerväggen och fungerar genom att lyfta stålkulorna till en högre nivå innan de faller ned och skapar slag- och nötnings effekter.

Eftersom vulkanaska och andra SCM-material kan innehålla hårda partiklar ställs även höga krav på slitstyrkan hos trummans inneryta. För att minska slitage och öka livslängden kan insidan förses med slitfoder av exempelvis hardox-stål. Ett alternativ vid begränsad budget är att använda tjockväggigt konstruktionsstål och dimensionera konstruktionen för framtida underhåll och reparationer vid slitage.

Trots att konceptet innebär något högre kostnad och konstruktionskomplexitet än vissa övriga koncept bedömdes detta vara acceptabelt i relation till de förbättrade driftsegenskaperna och den ökade robustheten.

3.7.1 Ekonomisk uppskattning

För att bedöma den praktiska genomförbarheten genomfördes en förenklad ekonomisk uppskattning av det valda kvarnkonceptet. Syftet var inte att ta fram en exakt kostnadskalkyl utan att uppskatta om ett småskaligt malningssystem för SCM kan vara ekonomiskt rimligt i miljöer med begränsad industriell infrastruktur.

Den ekonomiska uppskattningen baserades främst på kostnader för huvudkomponenter såsom trumma, elmotor, malmedia och remmar. Eftersom systemet är avsett för småskalig och lokal produktion prioriterades standardkomponenter och material som bedöms vara möjliga att få tag på lokalt eller tillverka med enklare verkstadsutrustning.

Kostnadsuppskattningen baserades på ungefärliga marknadspriser för huvudkomponenter. Priserna hämtades från tillgängliga marknadspriser och leverantörssidor samt kompletterades med uppskattningar baserade på standardkomponenter och materialkostnader. Kostnaderna ska ses som ungefärliga uppskattningar baserade på tillgängliga marknadspriser och används främst för att bedöma konceptets ekonomiska genomförbarhet.

Den valda konstruktionen innebär högre initial kostnad jämfört med enklare koncept baserade på återanvända stålfat. Samtidigt bedöms den robustare konstruktionen ge längre livslängd, bättre slitstyrka och minskat underhållsbehov, vilket potentiellt kan minska driftkostnader över tid. En viktig ekonomisk aspekt är även möjligheten att minska användningen av PC genom användning av SCM såsom vulkanaska och kalcinerad lera. Eftersom cement vanligtvis är den dyraste komponenten i blockproduktion kan även en partiell ersättning av cement bidra till betydande kostnadsbesparingar över tid.

3.7.2 Potentiell CO₂-reduktion

En förenklad uppskattning av potentiell CO₂-reduktion genomfördes för att bedöma den miljömässiga potentialen hos användning av SCM-material i småskalig blockproduktion. Uppskattningen baserades på antagandet att delar av portlandcementen kan ersättas med SCM-material såsom vulkanaska och kalcinerad lera.

Beräkningen genomfördes genom att jämföra ett referensscenario med traditionell cementanvändning mot scenario där en viss andel cement ersätts med SCM-material. Som grund för beräkningen användes litteraturvärden för CO₂-utsläpp från PC. Fokus låg främst på reducerad klinkeranvändning eftersom klinkerproduktion utgör den största källan till CO₂-utsläpp inom cementindustrin.

Även kvarnens energianvändning och potentiella miljöbelastning från drift uppskattades översiktligt baserat på motoreffekt och antagen drifttid.

4 Resultat

Resultatet från konceptutvärderingen ledde till att koncept 2 valdes som lösning för det fortsatta arbetet. I detta kapitel presenteras den tekniska dimensioneringen av kvarnsystemet, det slutliga konceptet samt en översiktlig ekonomisk och miljömässig utvärdering.

4.1 Teknisk analys/dimensionering

Kulkvarnen dimensionerades för malning av 50 kg SCM-material per batch före blandning med kommersiellt PC i efterföljande panmixer. Dimensioneringen baserades på att slutblandningen skulle bestå av 40% SCM och 60% cement.

Vid dimensioneringen valdes ett BPR på 6:1, vilket ligger inom intervallet som rekommenderas för finmalning av cementbaserade material och SCM-material (Rajesh & Kandasamy, 2025). Detta gav en mängd malmedia på cirka 300 kg stålkulor vid 50 kg pulver enligt:

$$BPR = \frac{m_{kulor}}{m_{pulver}}$$

För att förbättra malningseffektiviteten används en blandning av olika kulstorlekar. De större kulorna bidrar främst till slagmalning och nedbrytning av grövre partiklar medan mindre kulor förbättrar finmalningen genom nötning.

Kulkvarnar arbetar vanligtvis med en kulfyllnadsgrad på cirka 30–50 % av trummans volym. Den återstående delen av volymen behövs för materialrörelse och för att malmediet ska kunna lyftas och falla under rotation. Mellan kulorna uppstår samtidigt tomrum motsvarande ungefär 40 % av kulbäddens volym, vilket möjliggör att SCM-materialet kan fylla utrymmena mellan kulorna där själva malningen sker.

Densitet för stål 7,85 kg/L. Sfärpackning innebär att kulorna upptar bara cirka 60–62 % av den totala volymen, medan resterande 38–40 % är ren luft.

$$Bulkdensitet_{Stålkulor} = 7,85 \text{ kg/L} \times 0,61 \approx 4,8 \text{ kg/L}$$

Utifrån stålkulornas bulkdensitet uppskattades kulvolymen till cirka 0,063 m³. En fyllnadsgrad på 40% ger en trumvolym på ungefär 0,16 m³. För att skapa tillräckligt utrymme för materialrörelse, tomrum mellan kulorna samt kaskad- och kataraktrörelse avrundades trumvolymen uppåt till cirka 0,2 m³. För konstruktionen valdes en cylindrisk trumma med diametern 600 mm och längden 800 mm.

Den kritiska hastigheten för kvarnen beräknades enligt ekvation (1.1). För en diameter på 600 mm erhöles en kritisk hastighet på cirka 55 rpm. För att skapa kataraktrörelse hos kulorna dimensionerades kvarnen för drift vid cirka 70–80 % av den kritiska hastigheten, vilket motsvarar ungefär 38–44 rpm. Valet av ett driftområde på cirka 70–80 % av den kritiska hastigheten bedömdes vara en kompromiss mellan malningseffektivitet, energianvändning och mekanisk belastning.

4.2 Ekonomisk uppskattning

Den ekonomiska uppskattningen visade att det valda kvarnkonceptet kan tillverkas med relativt enkla standardkomponenter. Resultatet som sammanställs i Tabell 4 nedan visar att kostnaden för ett småskaligt kulkvarnssystem främst påverkas av drivlina, frekvensomriktare (VFD), malmedia och stålkonstruktion. En VFD används för att reglera elmotorns varvtal och möjliggör därmed justering av kulkvarnens rotationshastighet för att uppnå önskade driftförhållanden.

Tabell 4 Kostnadssammanställning.

Kategori	Budgetlösning	Standardlösning
Drivlina och VFD	7 000 kr	20 000 kr
Stål till trumma och ram	5 000 kr	12 000 kr
Malmedia	4 000 kr	18 000 kr
Lager och remmar	3 000 kr	6 000 kr
Slitfoder	2 000 kr	6 000 kr
Total kostnad	21 000 kr	62 000 kr

Priserna är grova uppskattningar exklusive moms och förutsätter att man svetsar och monterar allt själv. Vid köp av färdigbyggda maskiner i denna storleksklass rör det sig ofta om 150 000 kr eller mer.

4.3 Miljöbelastning och potentiell CO₂-reduktion

Resultatet indikerade att användning av SCM-material såsom vulkanaska och kalcinerad lera potentiellt kan minska CO₂-utsläppen genom reducerad cementanvändning. Produktion av PC uppskattas generera i genomsnitt 927 kg CO₂ per ton producerat cement.

Vid ett antagande om 35 % ersättning av cement med SCM-material uppskattades den potentiella reduktionen till:

$$0,35 \times 927 \approx 324 \text{ kg CO}_2 / \text{ton}$$

vilket motsvarar ungefär 324 kg CO₂ per ton. Vid 35 % ersättning av cement med SCM-material uppskattades CO₂-utsläppen reduceras med ungefär 35 % jämfört med ett referensscenario baserat på enbart PC.

Samtidigt uppskattades miljöbelastningen från kvarnens drift vara relativt låg i förhållande till den potentiella utsläppsreduktionen från minskad klinkeranvändning. Vid användning av en 7.5 kW elmotor och cirka 8 timmars drift per dag uppskattades energianvändningen till cirka 60 kWh per dag. Enligt Climatiq (2025) uppskattas utsläppsfaktorn för Tanzanias elnät till cirka 0,329 kg CO₂/kWh. Det motsvarar ungefär 20 kg CO₂-utsläpp per dag från kvarnens drift.

4.4 Småskalig implementering

Resultatet indikerar att det föreslagna kvarnsystemet potentiellt kan implementeras i småskalig blockproduktion i miljöer med begränsad industriell infrastruktur. Konstruktionen bygger huvudsakligen på standardkomponenter och relativt enkla tillverkningsmetoder såsom svetsning och lokal stålkonstruktion, vilket möjliggör lokal produktion och underhåll. Den största potentiella miljövinsten bedöms komma från reducerad klinkeranvändning snarare än från själva malningsprocessen. Även om kvarnen medför energianvändning under drift är den uppskattade klimatpåverkan från elförbrukningen relativt låg jämfört med den potentiella CO₂-reduktionen som uppnås genom användning av SCM-material.

5 Diskussion

Syftet med detta arbete var att undersöka möjligheten att utveckla ett småskaligt malningssystem för SCM-material anpassat för blockproduktion i miljöer med begränsad industriell infrastruktur, med särskilt fokus på Tanzania. Resultatet indikerar att ett småskaligt kulkvarnssystem potentiellt kan vara både tekniskt och ekonomiskt genomförbart, samtidigt som användning av lokala SCM-material kan bidra till reducerad cementanvändning och minskad klimatpåverkan. Samtidigt finns flera tekniska, ekonomiska och praktiska begränsningar som behöver diskuteras.

En central slutsats i arbetet är att robusthet och enkelhet bedöms vara viktigare än maximal energieffektivitet i den aktuella tillämpningen. Industriella malningssystem har generellt högre kapacitet och bättre energieffektivitet än småskaliga kulkvarnar, men kräver samtidigt avancerad styrning, högre investeringskostnader och mer specialiserat underhåll. För småskalig blockproduktion i Tanzania bedöms detta vara mindre lämpligt eftersom tillgången till avancerad utrustning, reservdelar och teknisk kompetens ofta är begränsad. Valet av kulkvarn motiverades därför främst av dess robusta konstruktion, enkla drift och möjlighet till lokal tillverkning och reparation.

Samtidigt innebär valet av kulkvarn vissa nackdelar. Kulkvarnar har relativt låg energieffektivitet där en stor del av energin omvandlas till värme och buller istället för effektiv malning. Detta kan vara problematiskt i miljöer där tillgången till elektricitet är begränsad eller där elkostnader utgör en betydande del av driftkostnaden. Även damm och buller kan innebära arbetsmiljöproblem, särskilt i småskaliga verksamheter där tillgång till skyddsutrustning och ventilationssystem kan vara begränsad. Arbetet har endast behandlat dessa aspekter översiktligt och vidare studier kring arbetsmiljö och säkerhet rekommenderas därför.

Dimensioneringen av kvarnen baserades huvudsakligen på litteraturvärden och förenklade antaganden. Parametrar såsom fyllnadsgrad, BPR och rotationshastighet valdes utifrån rekommenderade intervall i tidigare forskning. Eftersom inga praktiska experiment eller prototyp tester genomfördes finns osäkerheter kring den verkliga malningseffektiviteten och energiförbrukningen. Faktorer såsom variationer i råmaterial, fukthalt, partikelstorlek och

slitaget på malmedia kan påverka systemets prestanda betydligt i praktisk drift. Resultatet bör därför ses som en ingenjörsmässig uppskattning snarare än en verifierad konstruktion.

Den ekonomiska uppskattningen indikerar att ett småskaligt kulkvarnssystem potentiellt kan vara ekonomiskt genomförbart, särskilt om lokala SCM-material finns tillgängliga nära produktionsplatsen. Samtidigt är kostnadsuppskattningen förenklad och baserad på ungefärliga marknadspriser. Faktorer såsom transportkostnader, valutaförändringar, reservdelstillgång och underhåll har inte analyserats i detalj. Det finns även en risk att slitaget på trumma och malmedia blir större än förväntat, vilket kan öka driftkostnaderna över tid.

Trots dessa begränsningar visar arbetet att småskalig lokal malning av SCM-material har potential att bidra till mer hållbar byggmaterialproduktion i Tanzania och liknande regioner. Den största miljövinsten bedöms komma från reducerad klinkeranvändning snarare än från själva malningsprocessen. Resultatet indikerar att även relativt enkla och småskaliga tekniska lösningar kan bidra till minskade CO₂-utsläpp om de anpassas till lokala förutsättningar och tillgängliga resurser.

En viktig aspekt som framkommit under arbetet är avvägningen mellan teknisk prestanda och praktisk genomförbarhet. Flera koncept med högre kapacitet och mer avancerad materialhantering bedömdes tekniskt fördelaktiga men valdes bort eftersom de ansågs för komplexa och kostsamma för den aktuella tillämpningen. Detta illustrerar att lösningar som är optimala ur ett rent tekniskt perspektiv inte nödvändigtvis är mest lämpliga i låg infrastrukturmiljöer.

En intressant aspekt är skillnaden mellan hållbarhetsprioriteringar i höginkomstländer och låginkomstländer. I många europeiska länder finns redan en välutbyggd infrastruktur och en hög levnadsstandard, vilket har möjliggjort ett ökat fokus på att minska klimatpåverkan från bygg- och cementindustrin. I länder som Tanzania är situationen ofta annorlunda. Där finns ett stort behov av nya bostäder och infrastruktur samtidigt som ekonomiska resurser är begränsade. Kostnad, tillgänglighet och teknisk genomförbarhet blir därför ofta avgörande faktorer vid val av byggmaterial och produktionsmetoder.

Detta innebär dock inte att hållbarhetsfrågor saknar betydelse. Tvärtom kan lösningar som minskar både kostnader och cementanvändning vara särskilt attraktiva eftersom de samtidigt

kan ge ekonomiska och miljömässiga fördelar. Användning av lokalt tillgängliga SCM-material kan därför ses som en möjlighet att kombinera ökad resurseffektivitet med minskad klimatpåverkan utan att kräva avancerad teknik eller stora investeringar.

Sammanfattningsvis indikerar resultaten att ett småskaligt kulkvarnssystem för SCM-malning kan utgöra ett realistiskt alternativ för lokal produktion av bindemedel i miljöer med begränsad industriell infrastruktur. Även om flera tekniska och ekonomiska osäkerheter kvarstår visar studien att det är möjligt att kombinera enkel konstruktion, lokal tillverkbarhet och tillräcklig malningskapacitet inom ramen för småskalig blockproduktion. Arbetet visar även att tekniska lösningar behöver anpassas till lokala förutsättningar och inte enbart optimeras utifrån maximal prestanda. För den studerade tillämpningen bedöms därför robusthet, tillgänglighet och låg komplexitet vara minst lika viktiga som hög energieffektivitet. Användning av lokalt tillgängliga SCM-material framstår dessutom som en möjlighet att samtidigt minska cementanvändningen, reducera klimatpåverkan och öka resurseffektiviteten i framtida byggmaterialproduktion.

5.1 Slutsatser

Den första delfrågeställningen behandlade hur ett småskaligt kvarnssystem kan utformas för lokal malning av SCM-material. Arbetet resulterade i ett koncept baserat på en cylindrisk ståltrumma, remdrift och standardiserade komponenter. Konstruktionen utformades med fokus på robusthet, enkel tillverkning och möjlighet till lokalt underhåll.

Den andra delfrågeställningen behandlade hur enkelhet, låg kostnad och lokal tillverkbarhet kan kombineras med tillräcklig malningsprestanda. Resultaten visar att ett relativt enkelt kulkvarnskoncept kan uppfylla dessa krav samtidigt som systemets komplexitet hålls låg. Flera mer avancerade lösningar bedömdes ge högre teknisk prestanda men ansågs mindre lämpliga för den aktuella tillämpningen på grund av högre kostnader och större underhållsbehov.

Den tredje delfrågeställningen behandlade hur SCM-material kan integreras i småskalig blockproduktion för att minska cementanvändning och klimatpåverkan. Resultaten visar att lokalt tillgängliga SCM-material såsom kalcinerad lera och vulkanaska potentiellt kan

användas för att ersätta en del av cementen i bindemedlet. Miljöanalysen indikerar att detta kan reducera utsläppen med cirka 320–370 kg CO₂ per ton ersatt cement.

Huvudfrågeställningen i arbetet var om småskalig blockproduktion i miljöer med begränsad industriell infrastruktur kan kompletteras med en lokal kulkvarn för SCM-malning på ett tekniskt och ekonomiskt genomförbart sätt. Utifrån de genomförda analyserna bedöms svaret vara ja. Resultaten visar att ett robust och lokalt tillverkningsbart kulkvarnssystem kan integreras i befintlig blockproduktion och samtidigt möjliggöra ökad användning av SCM-material med potential att minska både cementanvändning och klimatpåverkan.

5.2 Rekommendationer för vidare arbete

Arbetet baserades huvudsakligen på konceptutveckling och förenklade tekniska uppskattningar. För att vidareutveckla och verifiera konceptet rekommenderas därför fortsatt arbete inom flera områden.

Ett viktigt nästa steg är konstruktion och testning av en fysisk prototyp för att experimentellt undersöka olika funktioner av kvarnen. Praktiska tester skulle även möjliggöra analys av partikelstorleksfördelning och optimal malningstid. Vidare arbete bör även inkludera mer detaljerad dimensionering av drivsystem, lager och trumma för att undersöka långsiktig hållfasthet och dynamiska belastningar vid kontinuerlig drift. Även optimering av invändiga lyftare och rotationshastighet kan studeras för att förbättra malningseffektiviteten.

En mer detaljerad ekonomisk analys rekommenderas också för att undersöka investeringskostnader, driftkostnader och potentiella besparingar vid implementering. Detta kan kompletteras med en mer omfattande livscykelanalys för att fastställa klimatpåverkan och miljönytta vid användning av olika SCM-material.

Vidare arbete bör även inkludera analys av behovet av förkrossning och dimensionering av eventuell käftkross för olika typer av SCM-material och produktionskapaciteter.

Slutligen rekommenderas vidare studier kring praktisk implementering i resursbegränsade miljöer, inklusive underhåll, tillgång till reservdelar, arbetsmiljö och lokal tillverkbarhet. Detta skulle kunna bidra till bättre förståelse för systemets långsiktiga genomförbarhet i

småskalig produktion. Arbetet bör även inkludera fältstudier och platsbesök i områden där systemet är tänkt att implementeras. Detta skulle möjliggöra bättre förståelse för lokala förutsättningar såsom tillgång till material, energiförsörjning, verkstadsutrustning, transportmöjligheter och underhållskapacitet. Praktiska observationer från småskalig blockproduktion skulle även kunna bidra till mer realistisk dimensionering och anpassning av kvarnsystemet.

6 Referenser

Bărbulescu, A., & Hosen, K. (2025). *Cement industry pollution and its impact on the environment and population health: A review*. *Toxics*, 13(7), 587.

<https://www.mdpi.com/2305-6304/13/7/587#>

Cheng, D., Reiner, D. M., Yang, F., Cui, C., Meng, J., Shan, Y., Liu, Y., Tao, S., & Guan, D. (2023). Projecting future carbon emissions from cement production in developing countries. *Nature communications*, 14(1), 8213. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43660-x>

Climatiq. (2025). *Electricity supplied from grid in Tanzania*

<https://www.climatiq.io/data/emission-factor/6dad5e9d-6785-4265-9919-444f7d22100b>

European Committee for Standardization. (2011). *EN 197-1: Cement – Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. CEN.

Engineers Without Borders. (2025). *Annual report 2025*. <https://www.ewb-swe.org/annual-reports>

Hanson, K. (2017, September 22). *SCMs in concrete: Natural pozzolans*. National Precast Concrete Association. <https://precast.org/2017/09/scms-in-concrete-natural-pozzolans/>

Hewlett, P. C., & Liska, M. (Eds.). (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete* (5th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://www.slideshare.net/slideshow/leas-chemistry-of-cement-and-concrete-2019pdf/267091607#79> (sida 52)

Isaksson, R., Rosvall, M., Babaahmadi, A., Buregyeya, A., Hazarika, A., Marangu, J. M., Olonade, K., Ramanathan, S., Rucukye, A., & Valentini, L. (2023). Supplementary Cementitious Materials in Building Blocks—Diagnosing Opportunities in Sub-Saharan Africa. *Sustainability*, 15(7), 5822. <https://doi.org/10.3390/su15075822>

Isaksson, R. (2026). *BLEX – Block Excellence (Product and Process Sustainability)* [PowerPoint slides]. KTH Royal Institute of Technology.

National Ready Mixed Concrete Association. (2008). *Concrete CO₂ fact sheet* (Publication No. 2PCO2). NRMCA.

Rasmussen, L., Allee, A., & Nanavatty, R. (2025, September 12). The opportunity for green cement and concrete in Africa. Rocky Mountain Institute. <https://rmi.org/the-opportunity-for-green-cement-and-concrete-in-africa/>

Rajesh, J. & Kandasamy, S. (2025). *Particle size reduction effects on fly ash pozzolanic performance in cement*. Construction and Building Materials, 494, 143458. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143458>

Rusch, H. (2007). *A section cut-through of ball mills* [Illustration]. Library of Congress. <https://www.loc.gov/pictures/item/co0922.sheet.00021a>

Rodgers, L. (2018, December 17). *Climate change: The massive CO₂ emitter you may not know about*. BBC News. <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>

Richardson, J. F., Harker, J. H., & Backhurst, J. R. (2002). *Coulson & Richardson's chemical engineering: Volume 2: Particle technology and separation processes* (5th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/ball-mill>

Samizi, M., & Josephat, J. (2017). *Utilizing volcanic ashes as partial replacement of cement in concrete production*. International Journal of Innovative Research & Development, 6(6). https://internationaljournalcorner.com/index.php/ijird_ojs/article/view/128885/89439

Steinemann, M., Mueller, A. D., & Shukla, A. (2022, December 7). *LC3 – A sustainable alternative for the cement industry*. <https://lc3.ch/wp-content/uploads/2022/11/LC3-A-sustainable-alternative-FINAL-WEB.pdf>

7 Bilagor

Bilaga 1, Morfologisk matris med markerade lösningar

Sub-Functions	Sub-Solutions		
Trumma	Cylinderplåt	Stålrör	Återanvänt Stålfat
Malmedia	Stålkulor	Stålcylindrar	Sten/keramik kulor
In/ut matning	Manuell	Tratt och luckor	Lucka och tömningsgaller
Ram	U-balk	Vinkeljärn	Fyrkantprofil
Kraftöverföring	Remdrift	Direktkoppling	Kedjedrift

Bilaga 2, Lågkostnads koncept

Sub-Functions	Sub-Solutions		
Trumma	Cylinderplåt	Stålrör	Återanvänt Stålfat
Malmedia	Stålkulor	Stålcylindrar	Sten/keramik kulor
In/ut matning	Manuell	Tratt och luckor	Lucka och tömningsgaller
Ram	U-balk	Vinkeljärn	Fyrkantprofil
Kraftöverföring	Remdrift	Direktkoppling	Kedjedrift

Bilaga 3, Robust koncept

Sub-Functions	Sub-Solutions		
Trumma	Cylinderplåt	Stålrör	Återanvänt Stålfat
Malmedia	Stålkulor	Stålcylindrar	Sten/keramik kulor
In/ut matning	Manuell	Tratt och luckor	Lucka och tömningsgaller
Ram	U-balk	Vinkeljärn	Evrkantsprofil
Kraftöverföring	Remdrift	Rektkoppling	Kedjedrift

Bilaga 4, Balanserat koncept

Sub-Functions	Sub-Solutions		
Trumma	Cylinderplåt	Stålrör	Återanvänt Stålfat
Malmedia	Stålkulor	Stålcylindrar	Sten/keramik kulor
In/ut matning	Manuell	Tratt och luckor	Lucka och tömningsgaller
Ram	U-balk	Vinkeljärn	Evrkantsprofil
Kraftöverföring	Remdrift	Rektkoppling	Kedjedrift

Bilaga 5, Hög kapacitetkoncept

Sub-Functions	Sub-Solutions		
Trumma	Cylinderplåt	Stålrör	Återanvänt Stålfat
Malmedia	Stålkulor	Stålcylindrar	Sten/keramik kulor
In/ut matning	Manuell	Tratt och luckor	Lucka och tömningsgaller
Ram	U-balk	Vinkeljärn	Evrkantsprofil
Kraftöverföring	Remdrift	Rektkoppling	Kedjadrift

Bilaga 6, Återbruks koncept

Sub-Functions	Sub-Solutions		
Trumma	Cylinderplåt	Stålrör	Återanvänt Stålfat
Malmedia	Stålkulor	Stålcylindrar	Sten/keramik kulor
In/ut matning	Manuell	Tratt och luckor	Lucka och tömningsgaller
Ram	U-balk	Vinkeljärn	Evrkantsprofil
Kraftöverföring	Remdrift	Rektkoppling	Kedjadrift



CHALMERS