



CHALMERS



Användningen av tunnelavfall som cementersättare vid tunnelprojekt

Examensarbete inom högskoleprogrammet Samhällsbyggnadsteknik.

DANYA ALZAHER

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2024

www.chalmers.se

EXAMENSARBETE 2024

Användningen av tunnelavfall som cementersättare vid tunnelprojekt

DANYA ALZAHER



CHALMERS

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2024

Användningen av tunnelavfall som cementersättare vid tunnelprojekt
DANYA ALZAHER

© DANYA ALZAHER, 2024.

Handledare: Jon Banyai. Senior Chief Tunnel Specialist, Ramboll. Bruna Frydman.
CEng MIMechE, Senior Engineer, Arup.

Examinator: Arezou Baba Ahmadi. Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Examensarbete 2024

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: En bild som visar gjutning av FSC vid ett tunnelprojekt. Bilden är tagen av konsulter från Arup (Köpenhamn) och Ramboll (Köpenhamn).

Skriven i L^AT_EX

Göteborg 2024

Sammanfattning

Denna rapport är ett resultat av det gemensamma intresset hos konsulter från Ramboll och Arup att identifiera hållbara lösningar för framtida tunnelbaneprojekt i Köpenhamn. Ett framträdande förslag är att utforska möjligheten att återanvända tunnelavfall (utgrävda jordmassor) som delvis cementersättare i betongplattan i tunnelns invert, vilket skulle minska cementanvändningen och främja principerna för hållbart och cirkulärt byggande.

Syftet med denna studie är att utforska det utgrävda materialets reaktivitet och bedöma dess potential som en delvis ersättning för cement i betongblandningar med hänsyn till bevarandet av den önskade mekaniska hållfastheten. Förbehandling av materialet sker genom torkning och malning, följt av gjutning av betongkuber med 15% och 30% substitut av cementmängden med det utgrävda materialet. Därefter genomförs tryckhållfasthetstester för att bedöma materialets prestanda. För att analysera materialets kemiska sammansättning används röntgendiffraktion (XRD), medan ett R3-test genomförs för att bestämma dess reaktivitet och pozzolanitet.

Resultaten tyder på att det undersökta materialet inte uppvisar pozzolaniska egenskaper och är därmed olämpligt som en cementersättare. Tryckhållfasthetstesterna visar på avsevärt lägre värden jämfört med traditionell portlandcement. Betongkuberna med 15% cementsubstitut visar liknande tryckhållfasthetsvärden som fyllmedel. Analysen med röntgendiffraktion (XRD) antyder att materialet har mineraliska egenskaper liknande kalksten, vilket möjligen kan förklara de observerade resultaten i tryckhållfasthetstestet.

Nyckelord: tryckhållfasthet, cementsubstitut, pozzolaner, kalk, SCM, fyllmedel.

Abstract

This report is a result of the mutual interest of consultants from Ramboll and Arup to identify sustainable solutions for future subway projects in Copenhagen. A prominent proposal is to explore the possibility of reusing tunnel waste (excavated soil) as a partial cement substitute in the concrete slab in the tunnel invert, which would reduce cement usage and promote principles of sustainable and circular construction.

The purpose of this study is to explore the reactivity of the excavated material and assess its potential as a partial replacement for cement in concrete mixtures while preserving the desired mechanical strength. Material pretreatment involves drying and grinding, followed by casting of concrete cubes with 15% and 30% substitution of the cement quantity with the excavated material. Subsequently, compressive strength tests are conducted to assess the material's performance. X-ray diffraction (XRD) is used to analyze the material's chemical composition, while an R3 test is conducted to determine its reactivity and pozzolanic properties.

The results suggest that the investigated material does not exhibit pozzolanic properties and is thus unsuitable as a cement substitute. The compressive strength tests indicate significantly lower values compared to traditional Portland cement. Concrete cubes with 15% cement substitute show similar compressive strength values to fillers. X-ray diffraction (XRD) analysis suggests that the material has mineral properties similar to limestone, which may possibly explain the observed results in the compressive strength test.

Keywords: compressive strength, cementsubstitute, pozzolans, limestone, SCM, fillers.

Förord

Följande rapport är författarens avslutande arbete på högskoleingenjörsprogrammet i Samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola.

Jag vill framföra mitt djupa tack till min examinator, Arezou, för hennes genuina intresse och omfattande kunskap. Hennes stöd och närvaro har varit ovärderliga. Jag vill även uttrycka min tacksamhet till mina handledare, Jon och Bruna, för de inspirerande diskussionerna och deras ovärderliga hjälp under arbetets gång.

Danya Alzaher, Göteborg, Juni 2024.

Begrepp och förkortningar

Nedan finns en lista över förkortningar som har använts i denna avhandling i alfabetisk ordning:

FSC	First stage concrete, betong platta i tunnelens invert
OPC	Portlandcement
SCM	Supplementary Cementitious materials, alternativa bindemedel till portlandcement
VCT	Vattencementtal
XRD	X-Ray Diffraction

Innehåll

Akronymer	x
Nomenklatur	xiii
Figurer	xv
Tabeller	xvii
1 Inledning	1
1.1 Syfte	2
1.2 Avgränsingar	2
2 Bakgrund	3
2.1 Betong	4
2.2 Cement	4
2.2.1 Vattencementtal	5
2.2.2 Kalk i cement	5
2.3 Supplementary Cementitious Materials (SCM)	6
2.3.1 Vanliga tillsatsmaterial	6
2.4 Olika typer av bindemedel	7
2.5 Vad är pozzolaner?	7
3 Metod	9
3.1 Förbehandling av materialet	9
3.2 Tryckhållfasthet	9
3.2.1 Gjutning	10
3.2.2 Utförande av tryckhållfasthetstest	11
3.3 Materialets reaktivitet mha R3-testet	11
3.4 X-Ray Diffraction (XRD)	12
4 Resultat	13
5 Diskussion	15
6 Slutsats	19

Bibliography	21
A Appendix 1	I

Figurer

2.1	FSC i metrotunnel	3
3.1	Tryckhållfasthetstest av ett murbruksprov	11
4.1	Tryckhållfastheten för betongkuber med SCM och för traditionell OPC.	13
4.2	Tryckhållfastheten för betongkuber med SCM och för betongkuber med fyllmedel.	14
4.3	XRD-analys av det utgrävda materialet (SCM)	14

Tabeller

3.1	Tabell över exakta mängder i gjutningsrecepten	10
3.2	Provpastans sammansättning	12

1

Inledning

I den rådande tidens ökande fokus på hållbarhet och miljömedvetenhet står byggbranschen inför en betydande utmaning att minska sin miljöpåverkan. För att uppfylla FN:s mål som rör hållbara städer och samhällen samt bekämpning av klimatförändringar, och kraven i Parisavtalet krävs en omfattande ansträngning som involverar ett samarbete mellan entreprenörer och konsulter för att identifiera och implementera innovativa lösningar. Inom ramen för EU:s långsiktiga målsättning att vara klimatneutralt till 2050 har unionen satt upp delmål där nettoutsläppen av växthusgaser ska minska med 55% till 2030 jämfört med nivåerna från 1990 [1].

Med ökad befolkning förväntas behovet av nya bostäder och infrastrukturella anläggningar att växa. För närvarande utgör byggnader cirka 39% av de globala energirelaterade koldioxidutsläppen, med byggmaterialets tillverkning som bidrar med ungefär 11% av detta totala utsläpp, senast 2030 är det målsatt att nya byggnader, all infrastruktur och renoveringar ska visa minst 40% mindre inbyggd koldioxid [2].

Betong beaktas som ett av de mest använda material i världen, näst efter vatten [3]. Det är av yttersta vikt att kontinuerligt förbättra betongens egenskaper för att säkerställa hög kvalitet och att aktivt arbeta mot att göra den klimatneutral. Bland betongens karakteristiska egenskaper återfinns dess långa livslängd och det begränsade behovet av drift och underhåll. En ytterligare karakteristisk egenskap är dess hållfasthet, vilken klassificeras i olika nivåer.

Betong är ett kompositmaterial bestående av cement, ballast, och vatten. För att kontrollera sättningen och förbättra prestandaegenskaper, såsom arbetsbarhet, korrosionsbeständighet och motstånd mot termisk sprickbildning, används olika tillsatsmedel [4]. Cementen fungerar som bindemedel och omvandlar betongens flytande form till en fast struktur. Tillverkningen av cement har visat sig ha en betydande miljöpåverkan. Därmed utgör cementproduktionen en central aspekt vid bedömningen av betongens totala miljöpåverkan.

Hydratiserade cement består primärt av kalciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, även känt som bränd kalk, vilket erhålls genom att hetta upp kalksten vid temperaturer på cirka 1450°C . Denna process medför frigörande av koldioxid som har varit bunden i kalkstenen under långa tidsperioder, vilket genererar betydande utsläpp av växthusgasen koldioxid under cementtillverkningen. Utsläppen från produktionen av en ton cement uppgår till cirka 700-800 kilo koldioxid CO_2 [5]. Det bör noteras att cementtillverkningens utsläpp utgör ungefär 7% av de totala globala koldioxidutsläppen [3].

Under de senaste decennierna har cementindustrin aktivt utforskat lösningar för att minska användningen av traditionell cement. En framstående metod som har implementerats i praktiken är att delvis ersätta cementklinker med så kallade Supplementary Cementitious Materials (SCM). För närvarande används alternativa bindemedel såsom masugnsslagg, en biprodukt från järn- och stålindustrin eller flygaska från kolkraftverk [6]. Trots detta förväntas tillgången på sådana material minska i framtiden, vilket ökar behovet av att utforska och testa nya material med potential att ersätta traditionell cement.

I en innovativ satsning i Köpenhamn utforskar konsultföretagen Ramboll och Arup nya strategier för hållbart och cirkulärt byggande i samband med planerna för en framtida metrotunnel. Projektet undersöker potentialen att använda utgrävt material som SCM för att producera miljövänlig First Stage Concrete (FSC), en betongplatta i tunnels invert.

1.1 Syfte

Syftet med detta projekt är att utforska och analysera potentialen hos utgrävt material som en hållbar ersättning för ren portlandcement (POC) för tillverkning av FSC. Genom systematiska tester av dessa material som SCM i varierande andelar, ämnar studien att utvärdera deras inverkan på betongens hållfasthet samt deras förmåga att fungera som SCM i betongblandningar. Dessutom kan detta projekt lägga en solid grund för framtida studier relaterade till användningen av utgrävt material som SCM inom betongindustrin.

1.2 Avgränsingar

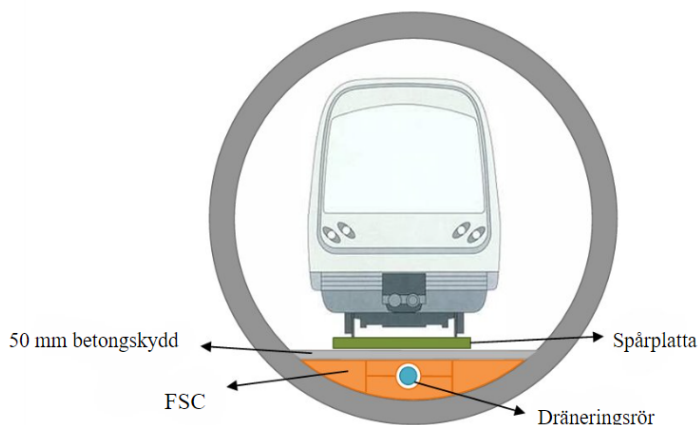
I denna studie har avgränsningar införts avseende de parametrar som undersöks, i linje med det primära syftet att bedöma möjligheten till partiell ersättning av cement med tunnelavfall. Särskild vikt läggs endast på tryckhållfasthetsparametrar. Parametrar såsom värmeutveckling, böjhållfasthet, E-modul eller hållbarhet omfattas inte av denna studien. I R3-testet utförs enbart analys av mängden bundet vatten, vilket ger en direkt indikation på materialets förmåga att reagera med portlandcement.

2

Bakgrund

I ett samarbete mellan konsulter från Arup (Danmark) och Ramboll (Danmark) utfördes en omfattande studie på uppdrag av Metroselskabet (MS, Köpenhamns tunnelbana). Studiens huvudsyfte var att noggrant utforska och utvärdera olika strategier för att minska koldioxidutsläppen som uppstår vid användningen av betong i de tidiga byggfaserna av tunnelbanetunnelarna. Denna forskningsinsats är en integrerad del av en omfattande serie av innovationsprojekt som MS aktivt driver med fokus på att identifiera och implementera lösningar som minimerar miljöpåverkan från deras infrastruktur.

En av de föreslagna strategier som undersöks är direkt återanvändning av det utgrävda materialet, som en delvis ersättning för cement vid tillverkning av FSC. Denna åtgärd syftar till att minska behovet av nytt råmaterial och samtidigt minska användningen av cement. First stage concrete är ett betongskikt som placeras i tunnelns invert och kan vara upp till 500 mm tjock i mitten av tunneln. Dess huvudsyfte är att skapa en jämn utloppsöppning för tunneln och förbereda den för installation av spårplattor och järnvägssystem. Traditionellt tillverkas det av oarmerad betong som gjuts på plats. Att täcka den nödvändiga betongvolymen kan kräva betydande mängd material. Med tanke på att tunnelbanestationer vanligtvis är cirka 1000 m från varandra kan det kräva över 60 betongbilar för att täcka sträckan mellan stationerna med betong.



Figur 2.1: FSC i metrotunnel

Med hänsyn till den tidigare nämnda bakgrunden och de hållbara utmaningarna

som är förknippade med traditionell betongproduktion, uppkommer intresset att utforska den mineralogiska sammansättningen av det utgrävda materialet och dess potentiella roll som SCM.

2.1 Betong

Betong utgör ett av de mest betydande byggnadsmaterialen som används inom en mångfald sektorer, inklusive användning för husgrunder, fasader, industrigolv, vägar och broar. Den är känd för sin mångsidighet och hållbarhet. Det finns få material som kan matcha betongens beständighet och styrka. Vidare är betong välkänt för sin höga termiska massa, vilket bidrar till att minska energiförbrukningen för uppvärmning och kylning av byggnader.

Betongens huvudkomponenter inkluderar cement, vatten och ballastmaterial (sten, grus och sand). För att ytterligare anpassa betongens egenskaper efter specifika krav och önskemål används olika tillsatsmedel. Dessa tillsatsmedel kan användas för att förbättra betongens bearbethet, styrka, stelningstid eller öka dess beständighet. Genom att variera proportionerna av dessa komponenter kan betongen framställas med olika önskade egenskaper.

2.2 Cement

Cement är ett hydrauliskt bindemedel, vilket innebär att det stelnar genom en kemisk reaktion med vatten och resulterar i bildandet av en vattenbeständig produkt [6]. Dess primär syfte är att agera som en bindande komponent för att integrera olika material och åstadkomma en homogen massa. Den vanligaste typen av cement som används idag är portlandcement (OPC).

Huvudkomponenten vid framställningen av cement är kalksten som huvudsakligen består av kalciumkarbonat (CaCO_3). Kalkstenen bryts och transporteras till fabriken, där den krossas och torkas innan den mals ner till ett fint pulver med en partikelstorlek på mindre än 0.09 mm. Efter detta genomgår pulvret en brännprocess vid temperatur upp till 1450°C , vilket resulterar i frigörandet av koldioxid och omvandlingen av råmaterial till små hårda kulor, kallade cementklinker. Dessa cementklinker är karakteristiska för cement och utgör dess primära beståndsdelar. Därefter mals cementklinkers till ett fint pulver och tillsätts sedan sulfat i form av gips. Syftet med gipstillsatsen är att reglera hastigheten på cementens reaktion med vatten [7].

Det är viktigt att notera att över hälften av utsläppen från cementsektorn är resultatet av kalcineringen (Upphettning) av kalksten för att producera cementklinker. Dessutom genereras cirka 40% av utsläppen från förbränningen av fossila bränslen för att nå de höga temperaturer som krävs för att värma cementugnarna under tillverkningsprocessen [8].

Cementklinker består av olika kemiska föreningar, kallade klinkermineral. Huvudsakliga kemiska grundämnen är kalcium, kisel, aluminium och järn. Dessa mineraler reagerar olika snabbt med vatten, och bildar reaktionsprodukterna såsom kalsiumsilikathydrat (C-S-H) och kristaller av kalciumhydroxid (Portlandit, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) [9].

2.2.1 Vattencementtal

Vatten och cement sammanlänkar aggregatkornen och betecknas som cementpasta. Egenskaperna hos cementpastan påverkas i stort sett av proportionerna mellan vatten och cement. Denna proportion, benämnd vattencementtal (VCT), och representerar förhållandet mellan den totala mängden blandningsvatten och mängden cement [9]. När de olika materialen blandas i betongblandningar initieras omedelbart kemiska reaktioner mellan cement och vatten, kända som hydratisering. Denna kemiska process leder till gradvis härden av betong över tiden där hållfasthetsutvecklingen genomgår flera distinkta faser [7].

Under fas 1 inträffar en initial tillstyvning av betongen vilket innebär att materialet fortfarande är formbart och kan vibreras. Under fas 2 börjar den aktiva härden. Denna fas är kritisk då betongen är känslig för uttorkning, temperatupåverkan och belastning, särskilt under de första timmarna efter gjutning. Fas 3, som infaller 1–3 dagar efter gjutning karakteriseras av en accelererad härden av betong. Trots att betongen fortfarande är känslig under denna fas, minskar dess sårbarhet gradvis och den påverkas minde av yttre faktorer mot fasens slut [7].

2.2.2 Kalk i cement

Kalksten är en karbonatbergart som bildas av organiskt material av skalrester och marina djur. Dessa skalrester ackumulerats på havsbotten och under miljontals år bildats tjocka lager av dessa rester. Under en lång tid utsätts lagerna för högt tryck, vilket resulterar i bildandet av den hårda bergarten [10].

Kalksten kan utnyttjas i tillverkningsprocessen för portlandcement genom att inblandas i den konventionella cementen [11]. Fördelen med att integrera kalksten i OPC är den ökade totala cementvolymen, vilket innebär att mängden klinker som krävs för att producera en given mängd cement minskar.

Tidigare forskningar har visat att vid blandningen av kalksten och cement uppvisar hållfastheten vanligtvis ingen signifikant minskning vid tillsatsnivåer mellan 5% och 10%. Det är först vid högre koncentrationer av kalksten uppstår en utspädningseffekt som minskar hållfastheten. En potentiell strategi för att motverka detta fenomen är att finmala cementet för att öka reaktiviteten hos OPC [11].

Användning av kalksten som inert material, ett fint fyllmedel kan resultera i en ökning av hållfastheten genom förbättrad packning av kalkstenpartiklar. Partiklarna fyller ut tomrummen och förbättrar packningstätheten, vilket skapar fler kärnplatser där hydratiseringprodukter kan växa [12].

2.3 Supplementary Cementitious Materials (SCM)

Under de senaste decennierna har det ägnats betydande uppmärksamhet åt utforskningen av möjligheterna för att minska cementanvändningen genom att finna alternativa material som delvis kan ersätta cementklinker. Dessa material kända som tillsatsmaterial, och har varierande källor, de inkluderar material såsom lera, flygaska från kolkraftverk och malda granulerade slaggprodukter från stålindustrin. Substitutionen av vanlig portlandcement med SCM kan sträcka från 5% upp till 65%, vilket resulterar i en minskning av de antropogena utsläppen [11].

För att ett material ska kunna klassificeras som SCM måste det uppfylla specifika fysikaliska och kemiska kriterier. Dessa kriterier innefattar reaktivitet och tillräckliga leveransvolym, samtidigt som de inte får negativt påverka betongens konsistens, hydratiseringsprocess, styrkeutveckling, hållbarhet eller miljöpåverkan [13]. Även om vissa material uppfyller samtliga kriterier kan de ändå inte användas på grund av avvikelser från befintliga standarder och specifikationer. I de flesta SCM utgörs de reaktiva komponenterna vanligtvis av amorfa faser, vilket resulterar i att amorfa material har vanligtvis högre ytarea per enhetsvolym på grund av avsaknaden av en regelbunden kristallstruktur. Därför är materialets specifika ytarea (SSA) en avgörande parameter, och en ökning av SSA tenderar att korrelera med en ökad reaktivitet, vilket gör att amorfa material kan reagera snabbare med andra ämnen [14].

2.3.1 Vanliga tillsatsmaterial

De vanligaste tillsatsmaterial i dagens klimatsmarta betong är flygaska och masugnsslagg. Flygaska är en biprodukt från förbränningen av pulveriserat kol i kraftverk och används ofta som tillsats i betongindustrin. Den består av den icke-brännbara mineraliska delen av kolet, och innehåller oxider av kisel, aluminium, järn och kalcium, beroende på koltypen som används. Flygaska innehåller även en viss mängd oförbränt kol, kallat restkol. Det finns två huvudtyper av flygaska: kiselrik och kalciumrik. Endast den kiselrika flygaskan accepteras som tillsatsmaterial av typ II i betong. För att möta efterfrågan på mer klimatvänliga alternativ används idag Bascement, ett portlandflygaskecement, i produktionen.

Masugnsslagg är en biprodukt från järnframställning där syre avlägsnas från järnmalm med hjälp av kol och koks. Järnmalm består inte enbart av järnoxid utan innehåller även andra mineraler, vilka avskiljs genom tillsats av slaggbildare som kalksten och dolomit. Vid snabbkylning med vatten erhålls ett grusliknande material som kallas granulerad masugnsslagg. Den snabba kylningen förhindrar slaggen från att kristallisera, vilket resulterar i en glasig (amorf) struktur. Slaggen mals därefter till malda granulerad masugnsslagg, som kan tillsättas till betong som ett mineraliskt tillsatsmaterial av typ II eller användas som en huvudbeståndsdel i cement.

Trots att dessa två tillsatsmaterial är mycket effektiva för att ersätta en del av

cementen, förväntas deras tillgänglighet minska kraftigt på grund av förändringar i produktionsmetoder och övergången till förnybara energikällor som sol- och vindkraft. Minskad kolanvändning samt effektivare och modernare förbränningstekniker bidrar också till denna minskning. En annan faktor som påverkar är den minskade efterfrågan på stål och ökad återvinning av stål.

Tillgången på lämpliga SCM betraktas som den främsta begränsningen för att implementera denna lösning, snarare än den eventuella försämringen av prestanda på grund av utspädning av klinker [13]. Bristen på tillgängliga SCM förväntas sannolikt förvärras över tiden, främst på grund av den gradvisa utfasningen av kolbaserade kraftverk och övergången inom stålproduktionen från masugnar till skrot återvinning. Därför är det av stor vikt att identifiera och utveckla nya tillsatsmaterial som kan användas utan att äventyra betongens prestanda.

2.4 Olika typer av bindemedel

Bindemedlets primära funktion är att limma ihop sand och stenpartiklar i betong och att underlätta dess härdning. Den traditionella bindemedlet som används i cement är portlandscementklinker, vilket är av kalksten ursprung. Kalkstenens främsta bidrag till cementens hållfasthetsutveckling härrör från dess små korn, vilka fungerar som nukleationstjärnor för hydratiseringsprodukter av portlandcement [15]. Bindemedel i betong består av finkorniga mineraliska material, och den kemiska reaktionen som binder samman betongen kan vara antigen hydrauliskt, latent hydrauliskt, pozzolanisk, eller en kombination av dessa reaktionstyper.

Hydrauliska bindemedel reagerar med vatten och bildar ett fast material exempelvis portlandcement, medan latent hydrauliska kräver aktivator för att reagera som ett hydrauliskt bindemedel. Ett vanligt hydrauliskt bindemedel är malda granulerade masugnsslagg. Pozzolaniska bindemedel består främst av kiseldioxid SiO_2 , vilket reagerar med kalciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ som frigörs när portlandcement reagerar med vatten. Denna reaktion resulterar i bildandet av kalciumsilikat CaSiO_3 med goda cementegenskaper [15].

2.5 Vad är pozzolaner?

Pozzolaner är material bestående av silikat- och/eller aluminiumhaltiga ämnen som uppvisar cementerande egenskaper när de finfördelas och exponeras för fuktighet, vilket resulterar i en kemisk reaktion med kalciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [11]. Denna egenskap möjliggör delvis ersättning av klinker i cementtillverkning med pozzolaniska material. Exempel på sådana material inkluderar vulkanaska, kalcinerade leror och flygaska.

Naturliga pozzolaner är material som inte kräver ytterligare behandling förutom finmalning för att kunna reagera med kalk och successivt stelna över tiden [11]. Dessa material betraktas som attraktiva på grund av deras tillgänglighet i stora volymer

och den relativt enkla bearbetningen, vilken vanligtvis bara inkluderar torkning och malning [13] .

Även om naturliga pozzolaner uppvisar fördelaktiga egenskaper, utgör det ökade vattenbehovet och den minskade bearbetbarheten i betongblandningen en potentiell utmaning för deras användning [13]. Denna utmaning kan dock bemötas genom att tillsätta olika typer av tillsatsmedel.

3

Metod

Metoden involverar genomförandet av en empirisk undersökning som grundas på en litteraturgenomgång. Processen inleds med att förbereda materialet för att förbättra dess prestanda som SCM och för att eliminera eventuella skadliga komponenter. Därefter kommer murbrukets hållfasthet att utvärderas genom tryckhållfasthetstester. Vidare kommer reaktivitetstester, inklusive R3-test, att genomföras för att mäta olika reaktionsparametrar. Dessa tester är av avgörande betydelse för att särskilja mellan reaktiva och inerta material.

3.1 Förbehandling av materialet

Förberedande processer är avgörande för att flera material ska kunna användas som tillsatsmaterial. Genom att modifiera deras egenskaper strävar man efter att göra dem mer lämpliga som pozzolanblandningar. Aktivering av materialet innebär en förändring av dess ursprungliga kristallina struktur för att öka deras reaktivitet. Denna förändring kan uppnås genom mekanisk, kemisk och termisk påverkan.

Processen inleds med en torkning av materialet för att avlägsna överflödigt fritt vatten. Detta åstadkommas genom att jämnt fördela materialet i en form som sedan placeras i ugnen vid en temperatur av 110° C under ungefär 18 timmar. Eftersom materialets specifika ytarea har stor betydelse för dess reaktivitet, är malning av materialet av yttersta vikt för att öka dess reaktivitet. Efter torkningen krossas materialet manuellt i mindre bitar med hjälp av en hammare för att underlätta malningsprocessen.

3.2 Tryckhållfasthet

Styrka och beständighet hos betongen utvärderas huvudsakligen genom tryckhållfasthetstester, då denna parameter betraktas som en av dess mest centrala och dimensionerande egenskaper. Tryckhållfastheten är starkt korrelerad med cementtypen i betongblandningen och utgör därigenom en pålitlig indikator på materialens prestanda.

Tryckhållfasthetstesterna genomförs enligt svenska standarden SS-EN-186-1, fastställd av Swedish Standard Institute [16]. Testprocedurerna innebär en central belastning av provkroppen med en gradvis ökning av belastningen vid en fördefinierad hastighet på $(2\ 400 \pm 200)$ N/s. Utrustningen är försedd med en indikator som

Tabell 3.1: Tabell över exakta mängder i gjutningsrecepten

Recept	OPC	SCM	Sand	Vatten	[g]
15%	191,25	33,75	675,00	112,50	
30%	157,50	67,50	675,00	112,50	

registrerar den maximala belastningen vid uppkomst av sprickor, vilken utgör det kritiska brottögonblicket.

För att utvärdera materialets lämplighet som potentiellt substitut för portlandcement krävs en grundlig jämförelse av dess hållfasthetsegenskaper gentemot konventionellt portlandcement. Denna jämförelse genomförs genom utförandet av tryckhållfasthetstester på prover vid två tidpunkter: först 7 dagar efter gjutningen, för att få insikt om materialets sammanhållning och beteende i de tidiga stadierna av härdning, och sedan 28 dagar efter gjutningen, då samtliga hydratiseringsfaser har avslutats och betongen har uppnått fullständig härda tillstånd.

3.2.1 Gjutning

Enligt SS-EN-196-1:2016, specificeras massförhållandena som en del cement till tre delar standard sand, med ett vattencementtal på 0,50 [16]. Vid utförandet av experimentet utförs gjutningar av två olika receptvarianter, där POC successivt ersätts med materialet i två olika procentandelar, 15% respektive 30%. För att säkerställa pålitliga resultat vad gäller hållfastheten gjuts tre provkroppar för varje recept. Observera att den cement som används i gjutningsreceptet är bascement och innehåller 15% flygaska. Valet av denna cement beror på dess befintliga andel SCM, vilket ger resultat som bättre speglar verkligheten.

Inledningsvis vägs sand, vatten, OPC samt det utgrävda materialet och placeras i separata kärl. Därefter blandas materialet först manuellt med vatten och sedan vid låg hastighet i en matberedare under ungefär 60 sekunder. Därefter tillsätts sand och OPC och blandningen fortsätter vid låg hastighet i ytterligare 60 sekunder, följt av en högre hastighet i 30 sekunder. Blandaren stängs av och dess sidor skrapas för att säkerställa att inget material har fastnat.

Efter en noggrann blandning appliceras murbruksblandning i en form som förbehandlas med formolja för att underlätta lossningen. Formen med dimensionerna 40 mm × 40 mm × 40 mm, fylls helt och placeras sedan på en vibrerande platta för att komprimera materialet och eliminera eventuella luftbubblor. Vid behov tillsätts ytterligare material och vibreras upprepade gånger tills formarna är fullständigt fyllda och ytan är jämn. Därefter placeras formarna för att härda vid rumstemperatur i 24 timmar täckta med plastfolie.

Efter 24 timmar avlägsnas proverna från formarna och märks med deras respektive recept. Efter avformningen förvaras provkropparna i vatten fram till hållfasthetstesten för att möjliggöra hydratisering och utveckling av hållfasthet.

3.2.2 Utförande av tryckhållfasthetstest

Proverna extraheras från vattenlådan och avtorkas med absorberande papper. Varje prov positioneras mellan två tryckplattor med noggrannhet för att säkerställa att provets slätaste yta är i direkt kontakt med pressytan. Därefter utsätts provet för gradvis ökande tryckbelastning tills det når brottgränsen och sprickor observeras. Vid detta tillfälle registreras den maximala kraften som provet kan motstå. Tryckhållfastheten för varje recept beräknas genom att beräkna medelvärdet av de tre enskilda resultaten.



Figur 3.1: Tryckhållfasthetstest av ett murbruksprov

3.3 Materialets reaktivitet mha R3-testet

R3-testet används för att utvärdera den kemiska reaktiviteten hos potentiella cementbaserade material. Två olika tillvägagångssätt tillämpas: Metod A mäter värmeutvecklingen med isotermisk kalorimetri, medan Metod B mäter mängden kemiskt bundet vatten med en ugn. Valet mellan Metod A och Metod B är flexibelt och baseras inte på specifika krav eller preferenser för en given tillämpning, då både kumulativ värmeavgivning och bundet vatteninnehåll har visat god korrelation med 28 dagars tryckhållfasthet [17].

Testet följer ASTM C1897-standarden och används alltmer inom industriell sektor. Dessa tester möjliggör differentiering mellan inert och reaktivt material. Resultaten från testerna kan förutse egenskaper som hållfasthet och beständighet hos cementpasta eller betong.

I detta experiment bestäms reaktiviteten med Metod B, vilket innebär att mängden

Tabell 3.2: Provpastans sammansättning

SCM	Ca(OH) ₂ (s)	Ca(OH) ₂ (aq)	[g]
10	30	36	

bundetvatten inom intervallet 100°C till 400°C mäts, vilket beräknades genom att jämföra provets massa före och efter upphettningen.

Experimentet inleddes genom att blanda fast kalciumhydroxid (Ca(OH)₂) och materialet i torkad form enligt ett förhållande på 3:1. Därefter tillsatts en flytande kaliumhydroxidlösning med vatten, med en koncentration på 0,5 mol per liter, och detta blandades noggrant med det fasta materialet med ett förhållande mellan vätska och fast ämne på 0,9:1. Blandningen genomförs med hjälp av en vibrationsblandare av modellen Vib2.

Den resulterande blandningen av det torkade materialet och vattenlösningen överförs sedan till ett plaströr. Provpastan härddas i ugnen under 24 timmar vid en konstant temperatur på 50°C. Därefter torkas materialet ytterligare under en period om cirka 24 timmar vid en temperatur på 110°C. Sedan vägs materialet och utsätts för en ytterligare uppvärmning till en temperatur av 400°C under två timmar, varefter en efterföljande vägning utfördes.

3.4 X-Ray Diffraction (XRD)

Röntgendiffraktion (XRD) används primärt för kvalitativ mineralidentifiering av kristallina faser i ett material, särskilt när det gäller att karaktärisera okända material [18]. Vid en XRD-mätning utsätts provet i pulverform för röntgenstrålning vid olika vinklar, vilket resulterar i reflektion av strålarna i olika riktningar från provet. Dessa reflekterade strålar fångas upp av en detektor och omvandlas till elektriska signaler [19]. Signalernas mönster används sedan för att analysera provet genom identifiering av de olika reflektionerna och deras jämförelse med referensdata för kända kristallstrukturer. Med detta i åtanke utförs XRD-analys på materialet i pulverform för att identifiera dess mineralsammansättning och få en detaljerad bild av dess verkliga innehåll.

4

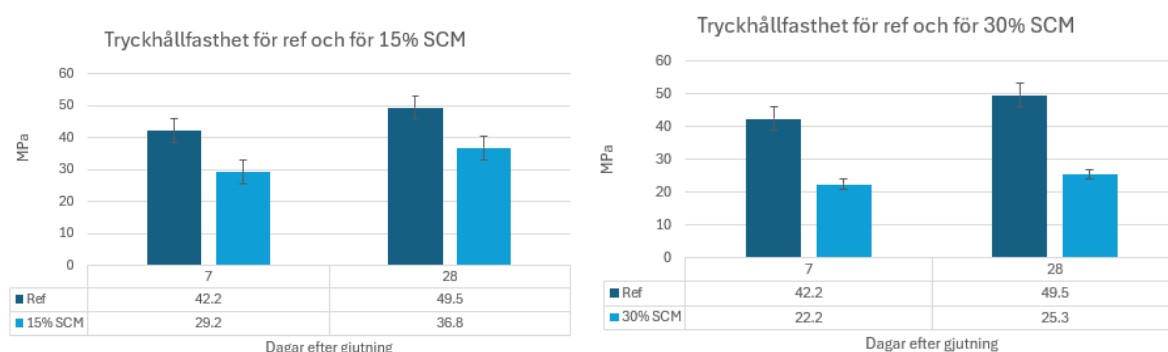
Resultat

Reaktivitet:

Resultaten av R3-testet observerades genom att mäta massan av provet både efter uppvärmning vid 110° C och efter ytterligare upphettning till 400° C. En precisionsvåg, känslig för små variationsområden i massan, användes för att utföra dessa mätningar. Resultaten visade ingen betydande förändring i massan hos provet mellan de två testtillfällena. Denna stabilitet i provets massa antyder att inga betydande avdunstningsfenomen eller kemiska reaktioner som resulterar i en förändring av massan ägde rum vid de undersökta temperaturerna.

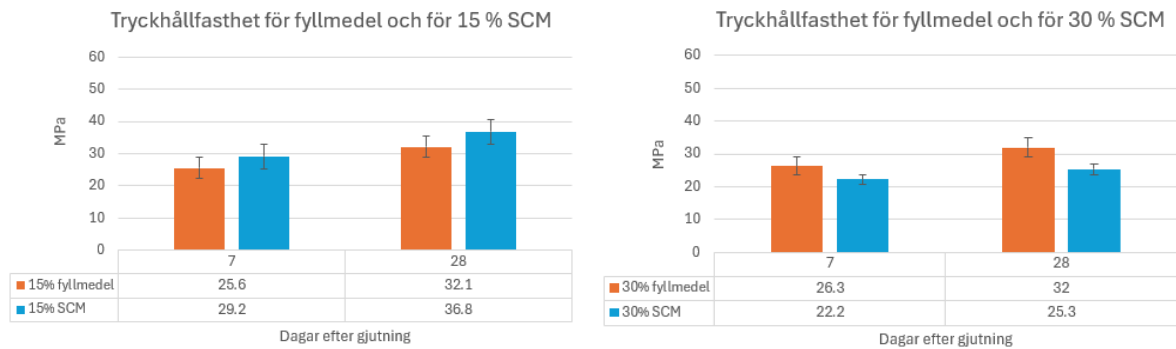
Tryckhållfasthet:

Hållfastheten, både vid 7 och 28 dagar efter gjutning presenteras här. Varje mätpunkt representerar ett medelvärde av tre mätningar med standardavvikelse angivet som vertikala streck. I figur 4.1 visas tryckhållfastheten för recepten med 15% respektive 30% ersättning. Referensvärden, inklusive hållfastheten för traditionell portlandcement, är också plottade i samma diagram för att möjliggöra enkel jämförelse av materialets styrka i förhållande till vanlig portlandcement. För att bedöma materialets fyllningsegenskaper, presenteras hållfasthetsvärden för prover med fyllmedelseffekt i figur 4.2, där fyllmedel ersätter 15% respektive 30% av cementmängden. Det bör noteras att referensvärden och värden för fyllmedelshållfasthet har tillhandahållits av Joel Eriksson för att öka studiens effektivitet.



Figur 4.1: Tryckhållfastheten för betongkuber med SCM och för traditionell OPC.

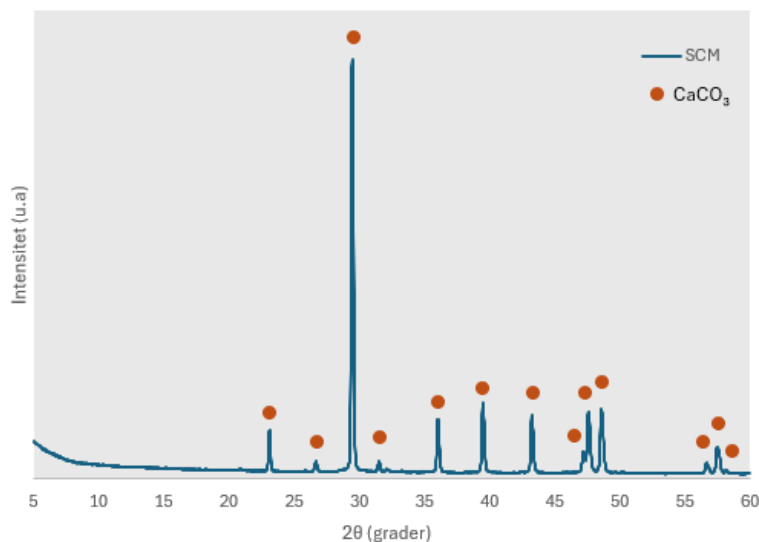
4. Resultat



Figur 4.2: Tryckhållfastheten för betongkuber med SCM och för betongkuber med fyllmedel.

Materialets mineralogiska egenskaper:

Figur 4.3 illustrerar ljusets spridning i olika riktningar beroende på materialets kristallina struktur. Genom att noggrant analysera detta diffraktionsmönster kan de specifika kristallstrukturerna i materialet identifieras. Varje peak i diagrammet representerar en unik riktning där röntgenstrålarna har spridits till följd av materialets kristallina struktur. Genom att jämföra de observerade diffraktionsvinklarna med kända diffraktionsmönster för olika material, som finns i referensdatabaser, kan mineralogiska egenskaper hos det undersökta materialet fastställas. I figuren visas materialet i pulverform betecknat som SCM. De orange markeringarna indikerar platser där diffraktionspeaken för kalciumkarbonat (CaCO_3) uppstår. Kalciumkarbonat är en vanlig mineral i kalksten och dess närvaro i diffraktionsmönstret ger ytterligare insikt i materialets sammansättning och mineralogiska egenskaper.



Figur 4.3: XRD-analys av det utgrävda materialet (SCM)

5

Diskussion

I detta kapitel diskuteras resultaten av tryckhållfastheten hos murbruket med olika SCM andelar som ersättning för OPC. Målet är att bedöma materialets styrka och dess effektivitet som ersättning för traditionell cement. För att säkerställa resultaten diskuteras även R3-testet, en metod för att mäta materialets reaktivitet och styrka. Vidare analyseras mineralerna i det okända materialet genom tolkning av XRD-analysen. Denna information är avgörande för att bedöma materialets användbarhet och dess potential att förbättra betongens hållbarhet.

Hållfasthet

För att bedöma hållfastheten hos SCM-material är det av stor betydelse att jämföra vanlig portlandcement (OPC) med cement som är blandat med SCM. Referensvärdena observeras vid två tidpunkter, 7 dagar och 28 dagar efter gjutning. En annan viktig faktor att beakta är fillereffekten som härrör från fyllmedel i betongen. Även om dessa fyllmedel inte besitter cementliknande egenskaper och inte kan reagera med andra material, kan de ändå ersätta en liten del av OPC och resultera i goda prestanda avseende hållfastheten. Detta beror på att de fina partiklarna i fyllmedlet fyller ut tomrummen, vilket förbättrar packningen och minskar porositeten. En vanlig typ av fyllmedel är kalksten.

Resultaten från tryckhållfasthetstestet visar att att 15% cement ersättning uppvisar högre hållfasthet jämfört med 30% ersättning. Detta beror på den reducerade mängden OPC, vilket är avgörande för betongens styrka. Särskilt märkbar är skillnaden vid 28 dagars testet, där en tydlig variation i tryckhållfastheten observeras mellan 15% och 30% ersättning, med värdena 36,8 MPa respektive 24,3 MPa. Även om 15% ersättning visar lovande resultat, ligger dess hållfasthet något under referensvärdet på 12,7 MPa.

Figur 4.2 presenterar signifikanta resultat som belyser hållfasthetsegenskaperna hos betongkuber som innehåller 15% SCM i jämförelse med betongkuber med 15% fyllmedel, särskilt vid 28 dagarstestet. Resultaten avslöjar att betongkuberna med 15% SCM uppvisar liknande hållfasthetsvärden som de med 15% fyllmedel, särskilt vid 28 dagar efter gjutning. Denna observation illustreras i figuren, där det tydligt framgår att en ökad andel SCM resulterar i lägre hållfasthet jämfört med betongkuber som innehåller fyllmedel.

Det är värt att notera att betongkuberna med 15% ersättningsmaterial uppvisar

marginellt högre tryckhållfasthet jämfört med de med 15% konventionellt fyllmedel, både vid 7 dagar och 28 dagar. Denna observation indikerar att användningen av SCM som ersättningsmaterial kan ha en viss inverkan på betongens tidiga hållfasthetsegenskaper, men att skillnaderna tenderar att minska över tid. Sammantaget ger dessa resultat viktiga insikter i betongens prestanda och kan vara av betydelse vid utformning och tillverkning av betongstrukturer med olika ersättningsmaterial.

Reaktivitet och pozzolaniska egenskaper

Resultaten från R3-testet har visat sig vara välkorrelerade med mubrukets hållfasthet för en ett antal SCM. Genom att mäta bundet vatten möjliggörs en effektiv screening av reaktiviteten hos olika typer av SCM oavsett deras sammansättning [13]. Syftet med R3-testet var att skapa en reaktionsmiljö för materialet i en realistisk cementblandning, där materialet kunde reagera med kalciumhydroxid. Resultaten visade ingen förändring i massan av provpastan efter uppvärmning till 400° C, vilket indikerar att mängden bundet vatten är noll. Det är värt att notera att efter att provpastan härdades i 24 timmar vid 50° C, uppvisade pastan en mjuk konsistens, vilket var det första tecknet på att materialet inte besitter starka pozzolaniska egenskaper och inte hade reagerat fullständigt.

Vad består materialet av egentligen?

För att bekräfta resultaten från tryckhållfasthetstestet och R3-testet genomfördes en XRD-analys på det torkade materialet utan några tillsatser. Analysen visade en kristallin profil som var identisk med kalkstensprofilen enligt databasen. Detta förklarar de tidigare diskuterade hållfasthetsresultaten och stärker slutsatserna från R3-testet, som visade att materialet saknar pozzolaniska egenskaper.

Förbättringsmöjligheter och vidareforskning

Kalksten har betydande fördelar och spelar en nyckelroll inom betongteknologi. Användning av kalk som fyllmedel ger flera tekniska, ekonomiska och ekologiska fördelar. Bland de tekniska fördelarna kan nämnas ökad tidig hållfasthet. De ekonomiska fördelarna är relaterade till möjligheten att erhålla ett cement med en hållfasthetsutveckling som liknar den hos portlandcement, men till lägre produktions- och investeringskostnader per ton cement. De ekologiska fördelarna inkluderar minskningen av CO₂-utsläpp per ton cement som tillverkas [20].

Kalk som fyllmedel kan förbättra hållbarheten genom att reducera porositeten och därmed skydda betongen mot kemiska angrepp och frostsador. Som tidigare nämnts i rapporten bidrar kalksten till en tätare packning av betongens fasta komponenter, vilket förbättrar dess densitet och hållbarhet. Dessa fördelar bekräftar vikten av att använda kalksten i betong. Fortsatta studier bör fokusera på att granska befintliga standarder för kalkanvändning och det undersöka materialets potential att uppfylla dessa krav och standarder.

Med tanke på att mindre partiklar har en större specifik yta, vilket innebär att

de reagerar snabbare med vatten (hydration) och bidrar till en snabbare utveckling av betongens styrka, vore det intressant att analysera partikelstorleken hos det utgrävda materialet och studera hur materialet reagerar efter malning.

Egenskaper relaterade till rheologin bör undersökas i fortsatta studier, inklusive kemisk renhet hos det utgrävda materialet. Kalk bör ha en hög procentandel kalciumkarbonat, vanligtvis över 90-95%, för att säkerställa konsekventa egenskaper. Formen på kalkpartiklarna kan påverka betongens flytbarhet och packning; sfäriska partiklar tenderar att förbättra arbetbarheten, medan kantiga partiklar kan bidra till bättre mekanisk låsning och styrka. Vidare kan segregationstester ge värdefulla insikter om betongens homogenitet och stabilitet, vilket är av stor vikt.

6

Slutsats

Slutsatsen av denna studie indikerar att det undersökta materialet inte uppvisar några pozzolaniska egenskaper och har låg reaktivitet, vilket tyder på att materialet fungerar som ett fyllmedel än SCM. Materialet visar dock positiva resultat i fråga om tryckhållfasthet, särskilt vid en ersättningsgrad om 15% efter fullständig hydratisering. XRD-analysen bekräftar att materialet är av kalkstensnatur, vilket leder till slutsatsen att det undersökta materialet består av kalksten och inte kan ersätta cement i stora mängder..

Litteraturförteckning

- [1] Boverket, “Miljöindikatorer – aktuell status,” 2024. .
- [2] World Green Building Council, “Bringing embodied carbon upfront.” .
- [3] Rise, “Vanliga frågor om cement och betong.” .
- [4] L. Ekman and K.-O. Jönsson, “Betongens miljöpåverkan-en studie om betongens klimatpåverkan och branschens syn på materialet,” *LUTVDG/TVBM*, 2020.
- [5] , “Cement, klimat och miljö,” 2022.
- [6] Sveriges geologiska utredningsverket, “Alternativa bindemedel- nödvändiga för att minska beroende av kalksten i betong,” 2023.
- [7] Per Gunnar Burström, *Byggnadsmaterial : tillverkning, egenskaper och användning*. Studentlitteratur, 2021.
- [8] Chatham House, “Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete,” 2020.
- [9] M. Janz and S.-E. Johansson, *Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering*. Svensk djupstabilisering, 2001.
- [10] I. WG, “The physical science basis,” *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, vol. 1535, 2013.
- [11] A. A. Ramezani-pour, “Cement replacement materials,” *Springer geochemistry/mineralogy, DOI*, vol. 10, pp. 978–3, 2014.
- [12] V. Bonavetti, H. Donza, G. Menéndez, O. Cabrera, and E. Irassar, “Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy,” *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 6, pp. 865–871, 2003.
- [13] R. Snellings, P. Suraneni, and J. Skibsted, “Future and emerging supplementary cementitious materials,” *Cement and concrete research*, vol. 171, p. 107199, 2023.
- [14] P. Suraneni, “Recent developments in reactivity testing of supplementary cementitious materials,” *RILEM Technical Letters*, vol. 6, pp. 131–139, 2021.
- [15] G. Mortensen, H. Tarras, M. Göransson, O. Taromi Sandström, K. Malaga, E. Helsing, P. Utgenannt, and E. Sundling, “Alternativa bindemedel till betong -en sammanfattning av kunskapsläget, i ett hållbarhetsperspektiv februari 2023,” 02 2023.
- [16] “SVENSK STANDARD SS-EN 196-1:2016,” Standard SS-EN 196-1:2016, SIS, 2016.
- [17] F. Avet, R. Snellings, A. A. Diaz, M. B. Haha, and K. Scrivener, “Development of a new rapid, relevant and reliable (r3) test method to evaluate the pozzolanic

- reactivity of calcined kaolinitic clays,” *Cement and Concrete Research*, vol. 85, pp. 1–11, 2016.
- [18] Rise, “Analys med mikroröntgenfluorescens och röntgendiffraktion.” .
- [19] Barbara L Dutrow, Louisiana State University , Christine M. Clark,, “X-ray Powder Diffraction (XRD),” 2024. .
- [20] V. Bonavetti, H. Donza, G. Menendez, O. Cabrera, and E. Irassar, “Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy,” *Cement and concrete research*, vol. 33, no. 6, pp. 865–871, 2003.

A

Appendix 1

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige

www.chalmers.se



CHALMERS