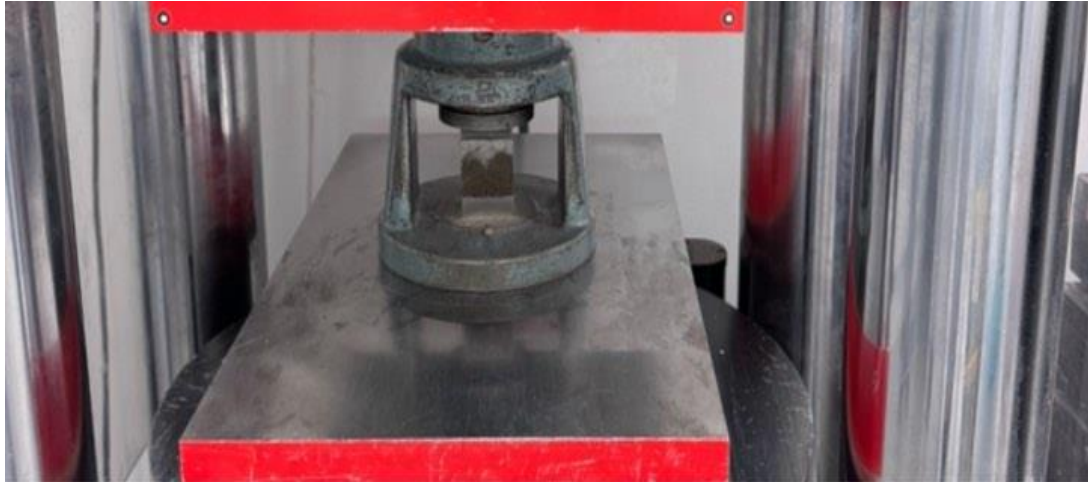




CHALMERS



Alternativa bindemedel till betong:

En studie av reaktivitet av industriella- och naturliga askor

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

NABHAN ALNABHAN

MUHAMAD FADEL RISHI

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

Alternativa bindemedel till betong:

En studie av reaktivitet av industriella- och naturliga askor

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

NABHAN ALNABHAN

MUHAMAD FADEL RISHI

© NABHAN ALNABHAN/MUHAMAD FADEL RISHI, 2024

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2024

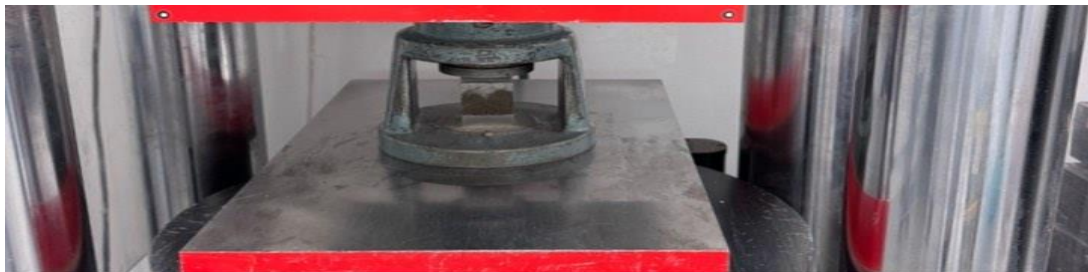
Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00



Chalmers tekniska högskola/Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Chalmers Reproservice 2024

Alternativa bindemedel till betong:
En studie av reaktivitet av industriella- och naturliga askor

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

NABHAN ALNABHAN

MUHAMAD FADEL RISHI

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Chalmers tekniska högskola

Omslagsbilden: En bild som visar tryckhållfasthet test för provkopporna.

Sammanfattning

Betong är ett av de mest använda byggmaterialen globalt och har en stor betydelse för olika konstruktioner, från broar och vägar till bostäder och kontor. Dess popularitet beror på dess hållbarhet, prisvärde och användarvänlighet. Dock har betong- och cementindustrin en betydande miljöpåverkan, främst genom koldioxidutsläpp från cementproduktionen. För att möta hållbarhetsmålen och minska miljöpåverkan har forskningen fokuserat på att minska användningen av cement genom att ersätta en del av det med alternativa bindemedel, så kallade Supplementary Cementitious Materials (SCM).

Ett av de mest intressanta alternativen är återanvändning av askor från avfallsförbränning i betongproduktionen. Ett annat intressant alternativ är naturliga vulkaniska material. Denna strategi syftar till att minska användningen av cement samtidigt som avfall återanvänds och miljöpåverkan minskas. I detta arbete undersöks möjligheterna och utmaningarna med att använda industriella askor och vulkaniska material som SCM i betongproduktionen, med fokus på deras inverkan på betongens hållfasthetsutveckling, kemiska reaktivitet och miljöpåverkan.

För att genomföra denna studie valdes tre olika typer av askor: vattentvättad aska och återvunnen fluidbäddssand, som representerar industriella askor, samt finmalt pimpsten, en form av naturlig vulkaniska material. Dessa askor ersatte en del av portlandcementet i brukblandningar vid varierande procentandelar, nämligen 15% och 30%, för att utvärdera deras effekt på betongens egenskaper. Genom användning av experimentella metoder, inklusive reaktivitetstester och hållfasthetstester, analyserades betongens prestanda med olika ersättningsnivåer av askorna.

Nyckelord: *cement, alternativa bindemedel, industriella askor, vulkaniska material, supplementära cementbaserade material (SCM), hållfasthet, reaktivitet.*

Alternative Binders for Concrete:
A Study on the Reactivity of Industrial and Natural Ashes

*Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering*

NABHAN ALNABHAN

MUHAMAD FADEL RISHI

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Building Technology
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used building materials globally and plays a significant role in various constructions, from bridges and roads to residential and office buildings. Its popularity stems from its durability, affordability, and ease of use. However, the concrete and cement industry has a significant environmental impact, primarily due to carbon dioxide emissions from cement production. To meet sustainability goals and reduce environmental impact, research has focused on reducing the use of cement by replacing a portion of it with alternative binders, known as Supplementary Cementitious Materials (SCM).

One of the most interesting alternatives is the reuse of ashes from waste incineration in concrete production. Another intriguing option is natural volcanic materials. This strategy aims to reduce cement usage while simultaneously reusing waste and decreasing environmental impact. This work examines the possibilities and challenges of using industrial ashes and volcanic materials as SCM in concrete production, focusing on their impact on concrete's strength development, chemical reactivity, and environmental footprint.

To conduct this study, three different types of ashes were selected: washed ash and recycled fluidized bed sand, representing industrial ashes, and finely ground volcanic pumice, a type of natural volcanic material. These ashes replaced a portion of the Portland cement in concrete mixtures at varying percentages, namely 15% and 30%, to evaluate their effects on concrete properties. Through the use of experimental methods, including reactivity tests and strength tests, concrete performance with different levels of ash replacements was analyzed.

Keywords: cement, substitute, industrial ashes, natural ashes, Supplementary Cementitious Materials (SCM), strength, reactivity.

Förord

Detta examensarbete har utgjort den avslutande delen av Högscoleingenjörsprogrammet i Samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola. Examensarbetet har utförts på uppdrag av Ragn-Sells och har genomförts på Chalmers laborationer i Johanneberg, Göteborg.

Jag vill börja med att tacka min examinator, Arezou Baba Ahmadi, för hennes värdefull enastående hjälp och stöd under hela forskningsprocessen. Vi vill också tacka henne för att säkerställa att resultatet blev så välgrundat som möjligt. Utan hennes vägledning och kunskap hade vi inte kunnat göra detta.

Ett stort tack till vår handledare från Ragn-Sells, Emma Zhang, för alltid att finnas där för att svara på våra frågor och hjälpa oss när vi behövde det. Hennes tålamod och stöd har varit ovärderligt för oss.

Nabhan Alnabhan
Muhamad Fadel Rishi
Göteborg, maj 2024

Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	II
ABSTRACT	IV
FÖRORD	V
BEGREPP OCH BETECKNINGAR	VIII
Akronymer	VIII
Övriga begrepp	VIII
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte	1
1.2 Frågeställningar	2
1.3 Avgränsningar	2
2 BAKGRUND	3
2.1 Cement	3
2.2 Kalk i cement	4
2.3 Supplementary Cementitious Materials (SCM)	4
3 MATERIAL OCH METOD	6
3.1 Urval av material	6
3.2 Material innehåll	6
3.3 Materialhantering	7
3.4 Experiment beskrivning	7
4 RESULTAT	9
4.1 Hållfasthetstest efter 7 dygn	9
4.2 Hållfasthetstest efter 28 dygn	10
4.3 R3 test	11
5 DISKUSSION	12
6 SLUTSATS	14
7 BILAGOR	15
8 REFERENSER	21
VI	

Begrepp och Beteckningar

Akronymer

SCM: Supplementary Cementitious materials, alternativa bindemedel till portlandcement.

OPC: Ordinary Portland Cement, portlandcement.

AFm-faser: Tetrakalcium aluminatferrit

C₃A: Trikalciumaluminat.

Övriga begrepp

Trikalciumaluminat (C₃A): är en kemisk förening som är en av de huvudsakliga beståndsdelarna i Portlandcement. Genom att reglera halten av C₃A kan man påverka betongens hållfasthet, vattenkänslighet och härdningstid (Beischer, A, Svenberg,R, Melkersson,E, Nillson,T. 2023).

Tetrakalcium aluminatferrit (AFm): Alumina Ferrite Monosulfate spelar en roll i betongens hållfasthet och dess förmåga att motstå kemisk korrosion (Beischer, A, Svenberg,R, Melkersson,E, Nillson,T. 2023).

1 INLEDNING

Betong är ett av de mest använda byggmaterialen globalt och används för en rad olika konstruktioner såsom broar, tunnlar, vägar, och byggnader som bostäder och kontor. Dess popularitet beror på dess styrka, prisvärde, och användarvänlighet. Betong kan användas antingen prefabricerat eller gjutas på plats (Al-Emrani et al., 2019). Dess långa livslängd och minimala krav på underhåll gör det till ett ekonomiskt fördelaktigt alternativ jämfört med andra byggmaterial. Dessutom är betong fuktresistent, brandsäkert och ljudabsorberande, vilket skapar trygga och beboeliga miljöer. Återvinning och återanvändning av betong är möjligt för att minska miljöpåverkan och uppnå ekonomiska fördelar.

För att öka betongens hållbarhet är det avgörande att förstå dess miljöpåverkan. Betong består av cement, vatten och aggregat såsom grus, sand och sten, med tillsatser för att forma dess egenskaper (Hanar, A. 2022). Cement utgör en central del av betongen då det, när det blandas med vatten, stelnar och binder samman aggregaten. Dock är cement även en betydande källa till antropogena koldioxidutsläpp och bidrar till cirka 8% av de globala utsläppen (Nair et al., 2020).

Tillverkningsprocessen av cement är komplex och involverar brytning av kalksten, blandning med lera eller skiffer, och upphettning till höga temperaturer för att producera klinker. Dessa processer avger koldioxid, där främst kalcinerugnen av kalksten står för en betydande del av utsläppen. Diskussionen kring cementproduktionens miljöpåverkan har varit aktuell i Sverige under lång tid. Utöver kalcinerugnen påverkar även brytningen av kalkstengrundvattnet, vilket har skapat bekymmer, särskilt i området Silte på Gotland (Hanar, A. 2022). Med hänsyn till dessa utmaningar har sökandet efter alternativa material för betongproduktion ökat. En väletablerad strategi för att förbättra betongens miljöprestanda är att ersätta en del av cementklinkern med tillsatsmaterial av cement, så kallade SCM (Nair et al., 2020). Genom att göra detta kan betongens koldioxidutsläpp minskas betydligt samtidigt som dess hållbarhet förbättras.

1.1 Syfte

Syftet med vårt examensarbete är att undersöka möjligheterna för återanvändning av industriella askor och vulkaniska material i betongproduktionen eller cementbaserade material för att främja en hållbar och cirkulär byggsektor. Vi kommer att undersöka på hållfastheten för tillämpningar i betong, vilket är en central egenskap för att säkerställa byggnaders stabilitet och beständighet över tiden. Vidare kommer vi att jämföra hydrationshastigheten hos cement som blandats med aska med den hos konventionell portlandcement för att förstå eventuella skillnader i deras kemiska reaktionshastighet och därigenom deras påverkan på betongens egenskaper och miljöpåverkan. Projektet ska identifiera vilka typer av aska som ger passande, eller även motsvarande, attribut med avseende på dess tillgång.

1.2 Frågeställningar

1. Hur påverkar användningen av askor såsom vattentvättad flygaska, fluidbäddssand och pimpsten, hållfastheten hos betong och dess stabilitet?
2. Vilken inverkan har hydrationshastigheten hos cementblandningar med askor jämfört med portlandcement på betongens kemiska reaktionshastighet och miljöpåverkan?

1.3 Avgränsningar

I studien har ett urval gjorts av de askor som ska undersökas som potentiella Supplementary Cementitious Materials (SCM), och undersökningen är avgränsad till tre olika askor. Urvalet baseras delvis på tillgänglighet, det vill säga vilka askor som är tillgängliga för studiens syfte, samt vilka askor som kan vara tillämpliga som SCM inom industriell kontext. Valet att begränsa studien till svenska askor motiveras av en önskan att främst rikta resultatens relevans till den svenska industrin, även om slutsatserna kan ha värde även för internationella tillämpningar.

2 Bakgrund

Betongens popularitet som byggmaterial återspeglas av dess utbredda användning och fördelar såsom hållbarhet, styrka och brandsäkerhet. Trots dess fördelar har dock betong- och cementindustrin en betydande miljöpåverkan, med utsläpp av växthusgaser som bidrar till klimatförändringarna (Hanar, A. 2022). Cementproduktionen ensam står för en betydande del av dessa utsläpp. För att möta klimatmålen och främja hållbarhet inom byggsektorn har forskningen fokuserat på att minska betongens miljöpåverkan genom att ersätta en del av cementet med alternativa bindemedel, så kallade SCM.

En intressant möjlighet är återanvändning av industriella askor från olika processer, såsom avfallsförbränning, i produktionen av betong eller cementbaserade material (Beischer, A, Svenberg,R, Melkersson,E, Nillson,T. 2023). Denna strategi syftar till att minska mängden cement som används samtidigt som avfall återanvänds och miljöpåverkan minskas. Genom att integrera dessa askor som SCM i betongblandningar kan hållbarheten hos betongen förbättras samtidigt som klimatpåverkan minskas. Detta arbete syftar till att utforska möjligheterna och utmaningarna med att använda industriella askor som en del av betongproduktionen, med fokus på dess påverkan på betongens hållfasthet, kemiska reaktivitet och miljöpåverkan.

2.1 Cement

Cement är ett populärt bindemedel i byggkonstruktioner. Materialet är hydrauliskt, vilket innebär att det stelnar och blir hårt efter att det reagerar med vatten. Det är cementet som gör byggkonstruktionerna vatten- och fuktresistenta. Materialets huvudfunktion är att verka som ett bindemedel för att sammanföra olika material och bilda en enhetlig substans.

Kalksten, som till största delen innehåller kalciumkarbonat (CaCO_3), utgör den viktigaste råmaterialet i cementproduktionsprocessen. Efter brytning av kalken, delas och torkas den innan den finmalas till ett småkornigt pulver.

Pulvret utsätts därefter för en uppvärmningsprocess vid höga temperaturer, som kan överstiga 1400°C . Denna process medför att koldioxid avges och att råmaterialet omvandlas till cementklinker. Cementklinkern är viktig för cementets komposition och mals till ett finpulver efter uppvärmningen. För att optimera reaktionstiden mellan cementpulvret och vatten adderas gips, vilket säkerställer en lämplig och kontrollerad reaktionstakt (Per Gunnar Burström, 2021).

Vid tillverkning av cementklinker är det värt att notera att den största delen av utsläppen härrör från uppvärmningen av kalksten (Chatham House 2020). Cementklinker innehåller en uppsättning kemiska ämnen såsom kalcium, järn och aluminium. De ämnena reagerar med vatten i varierande hastighet och producerar kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) samt kalciumsilikathydrat (C-S-H).

2.2 Kalk i cement

I cementtillverkning tillåts OPC (Ordinary Portland Cement) att innehålla upp till 5% kalk, men det finns cementtyper med betydligt högre kalkhalt, upp till 40% (Beischer, A, Svenberg,R, Melkersson,E, Nillson,T. 2023). En viktig fördel med att tillsätta kalk till cement är att det möjliggör en minskning av andelen klinker i blandningen. Detta har flera positiva effekter, inklusive minskad energiförbrukning och minskade CO₂-utsläpp under tillverkningsprocessen. Dessutom minskar behovet av högkvalitativ kalksten för direkt användning i klinkertillverkningen, vilket gör att mindre lämplig kalksten kan användas effektivt. Denna övergripande effekt har gjort kalk till en av de mest använda SCM runt om i världen.

Det är dock viktigt att vara medveten om de miljökonsekvenser som är förknippade med brytning av kalk. Detta inkluderar påverkan på markytan, grundvattennivån och den lokala vegetationen. Överexploatering av kalkbrott kan leda till betydande förändringar i ekosystemen och därigenom förlust av ekosystemtjänster och minskad biologisk mångfald. Det är därför av stor vikt att noggrant överväga och hantera dessa miljökonsekvenser för att minimera den negativa påverkan på både naturen och samhället.

Kalk har flera funktioner i cementblandningar. Dels kan det användas som en fyllnadsprodukt, och dels kan det accelerera cementreaktionen med vatten. Däremot höga tillsatsnivåer av kalk kan dock orsaka en förtunnningseffekt, vilket kan leda till försämrade materialhållfasthet.

Detta kan dock motverkas genom cementmalning till finare partikelstorlek. Kalksten kan också fördröja reaktionen mellan cement och vatten vid samma malningsgrad, vilket resulterar i lägre värmeutveckling. Den begränsade mängden ersättning som är möjlig för att bibehålla egenskaperna beror på kalkstens låga kemiska reaktionsförmåga, som beror på dess låga aluminiumhalt. Därför kan en delvis ersättning med aluminiumrika material, såsom flygaska, i kombination med kalksten, möjliggöra en högre andel av cementklinker som kan ersättas.

Kalktillägg kan även påverka den tid som krävs innan reaktionen maximeras. Porerna i cementblandningen fylls med fina, malda kalkpartiklar, vilket leder till högre densitet och större kontaktyta för vatten, där vattenbildade produkter kan produceras. Detta kan resultera i snabbare reaktioner. Dessutom kan kalksten, i kombination med aluminiumrika material, främja bildningen av AFm-faser, som skyddar betongen mot sulfaten och klorider, samt förbättrar betongens motståndskraft mot saltiga miljöer.

2.3 Supplementary Cementitious Materials (SCM)

Forskning har på senare tid fokuserat på att reducera cementmängden i betongblandningar genom att substituera cementklinker med alternativa

bindemedel. Exempel på sådana ersättningsmaterial är askor och leror. Effektiviteten av utsläppsreduktion varierar beroende på andelen Portlandcement som ersätts med tillsatsmaterial, SCM (A. A. Ramezani-pour. 2014).

Den största utmaningen med att genomföra denna alternativ är den minimerad tillgänglighet på alternativa bindemedel. Det bedöms bli ännu mindre tillgång på sådana material framöver på grund av olika faktorer bland annat utvecklingen av återvinning och återanvändning. Därför är det avgörande att upptäcka eller skapa nya alternativa bindemedel som inte kompromissar med betongens kvalitet (R. Snellings, P. Suraneni, and J. Skibsted. 2023).

Ett material måste uppfylla flera krav för att betraktas som ett SCMs. Dessa krav omfattar bland annat materialets reaktivitet, tillgång och mängd, påverkan på betongens struktur, samt dess hållbarhet och styrka.

Alternativa bindemedel innehåller ofta reaktiva material som vanligtvis består av amorfa ämnen. På grund av bristen på en ordnad kristallstruktur har amorfa ämnen en högre specifik yta per volymenhet. Därmed blir den specifika ytan av de alternativa bindemedel en viktig faktor för att bedöma dess lämplighet som SCM (P. Suraneni. 2021).

3 Material och metod

Alternativa materialen som studeras kommer från avfallsförbränning och naturen. Askorna från avfallsförbränning innehåller en blandning av mineraler, salter och andra metallföreningar med olika löslighetsnivåer i vatten. Vanligtvis är flygaskor särskilt rik på lösliga metallföreningar, vilket klassificerar den som farligt avfall och komplicerar dess hantering och bortskaffande. Flera stabiliseringsmetoder för avfallsflygaska har utvecklats för att avlägsna klorider och sulfaten samtidigt som man binder de metaller som tidigare varit kemiskt bundna till klorid och sulfat och samtidigt binda metallerna tillbaka till askan.

Denna del av rapporten innehåller en undersökning av hur återanvändning av industriella flygaskor i produktionen av betong ska genomföras för att främja en hållbar och cirkulär byggsektor.

3.1 Urval av material

Ett urval görs av industriella och naturliga askor som potentiellt kan användas som Supplementary Cementitious Materials (SCM) i betongtillverkningen. Urvalet baseras på tillgänglighet av askorna som är relevanta för studiens syfte.

I undersökningen ska tre typer av flygaskor ersätta en del av portlandcementet i betongblandningen. De tre typerna är vattentvättadaskor, Pimsten aska och återvunnen fluidbäddsand. Mängden portlandcementet som ska ersättas med askorna är också viktig och betongens hållfasthet kan påverkas beroende på det. Därför ska olika mängder ersättningsmaterial testas, bland annat 15% och 30%. Vattencementtalet, vct, för betongblandningen är 0,5.

3.2 Material innehåll

Avfallet innehåller en mängd olika föroreningar som koncentreras i askan under förbränningen (Johansson, K. 2017). Flygaskan är främst berikad med lösliga metallföreningar, klorid och sulfat, vilket ofta klassificerar askan som farligt avfall. Förhållandet mellan dessa ämnen varierar beroende på bränslets sammansättning. För vissa askor är det främst lakbarheten av klorid och sulfat som överskrider lakningsgränserna, medan det för andra kan vara metaller som begränsar. De mest förekommande ämnena i flygaskan inkluderar Cl, Na, K, S och Ca, med höga halter av tungmetaller som Zn, Pb, Cu, Hg, Mo, Ni och Cd. Mindre mängder av andra icke-metaller som Sb, Br och P finns också närvarande, vilket innebär att i princip hela det periodiska systemet kan återfinnas i flygaskan.

Pimstenaska kan innehålla olika mineraler och föreningar som finns naturligt i pimstenen, såsom silikater, aluminiumoxid och järnoxid. När pimsten förbränns eller utsätts för höga temperaturer, kan dessa mineraler och föreningar omvandlas och frigöra sig i form av aska. Askan kan också innehålla spårämnen och tungmetaller som finns naturligt i pimstenen.

När biomassa eller avfall förbränns i en fluidiserad bädd, bildas aska som består av mineraler och oorganiska rester från det förbrända materialet. Fluidbäddsandaska kan ha olika egenskaper beroende på sammansättningen av

det förbrända materialet och de processparametrar som används i fluidiserad bädden.

3.3 Materialhantering

De utvalda askorna från avfallsförbränning genomgår en process för hantering och förberedelse inför testning. Denna process inkluderar avtorkning och malning av askorna innan de inkorporeras i betongblandningen och gjuts. Förberedelsen av askorna inleds med avtorkning för att avlägsna eventuell överflödigt fuktighet som kan påverka deras egenskaper och hanterbarhet under testningen. Denna avtorkningsprocess kan utföras under kontrollerade förhållanden för att säkerställa att askorna når en lämplig fuktnivå för vidare bearbetning.

Efter avtorkning genomgår askorna en malningsprocess för att minska deras partikelstorlek. Malningen av askorna utförs vanligtvis genom mekanisk krossning eller pulverisering för att producera partiklar av önskad storlek och distribution. Denna åtgärd syftar till att förbättra askornas reaktivitet och homogenitet i betongblandningen.

När askorna har avtorkats och malts enligt angivna parametrar är de redo att blandas in i betongblandningen för gjutning av provkroppar. Denna inkorporering av askorna i betongblandningen möjliggör för undersökningen av deras inverkan på betongens egenskaper, såsom hållfasthet, hållbarhet och kemiska reaktivitet.

3.4 Experiment beskrivning

Efter att askorna har genomgått förberedelsefasen, inklusive hantering, avtorkning och malning, blandas de med en del cement, vatten, grus och tillsatsmedel för att bilda en betongblandning. Denna blandning gjuts sedan och formges till små kuber för vidare testning. För att bedöma reaktiviteten genomförs reaktivitetstest (R3) genom att utsätta provkropparna för höga temperaturer. Detta test omfattar betongens reaktivitet med kalciumhydroxid, där tar man reda på mängden vatten i betongen genom att mäta den.

Efter att pastaproverna har blandats hålls de i plastbehållare och förseglas vid 50 °C under ett dygn vid 50 °C. Därefter tas små mängder av varje material. Dessa material torkas vid 110 °C i en ugn från Salvis. Slutligen bestäms det bundna vattnet enligt ekvation (1.1) genom att beräkna massförändringen efter att proverna har uppvärmts till 400°C i 2 timmar och sedan svalnat tillbaka till 110 °C. Den termiska behandlingen begränsas till 400 °C för att undvika dehydroxylering av porlandet, vilket inte är önskvärt i detta sammanhang.

$$\frac{(Bound\ water\% = m_{110^{\circ}C; stabilized} - m_{cooled; 110^{\circ}C})}{m_{110^{\circ}C; stabilized}} \quad (1.1)$$

Utöver reaktivitetstesten genomförs hållfasthetstest på provkropparna vid två olika tillfällen. Det första hållfasthetstestet utförs 7 dygn efter gjutningen för att utvärdera betongens tidiga styrka och reaktion på belastning. Det andra

hållfasthetstestet utförs 28 dygn efter gjutningen när betongblandningen antas vara fulltorkad och härdad. Dessa test används för att bedöma betongens långsiktiga hållfasthet och stabilitet över tid.

Genom att genomföra dessa testprocedurer kan effekterna av att använda industriella askor som en del av betongblandningen utvärderas, med avseende på både reaktivitet vid olika temperaturer och den resulterande betongens hållfasthet och prestanda.

4 Resultat

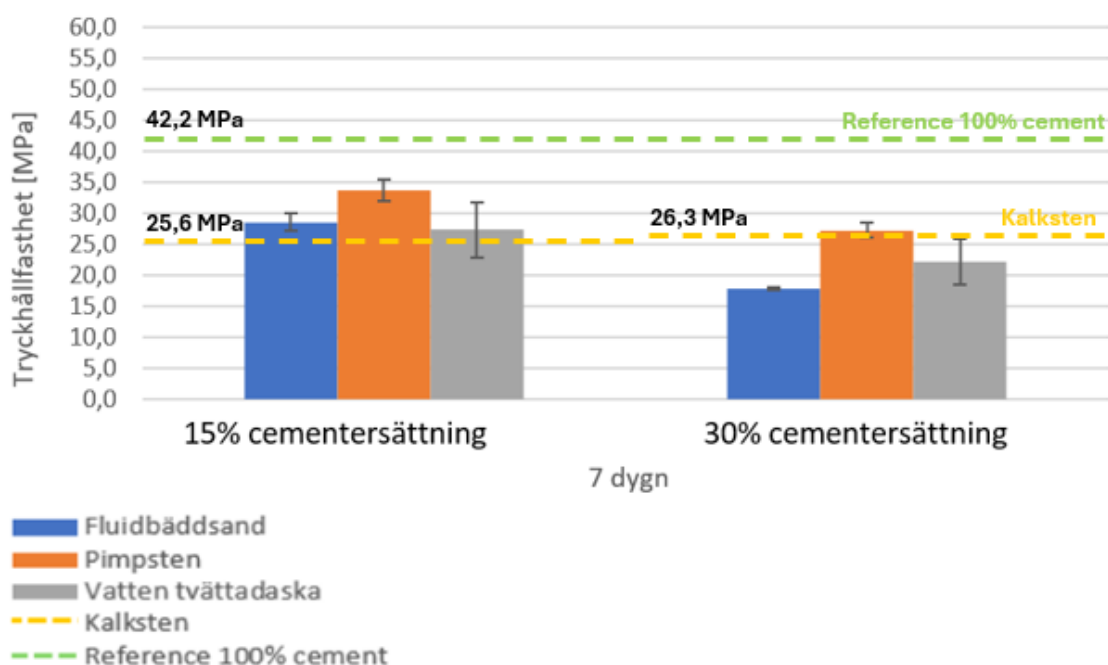
I denna del av rapporten ska resultaten för hållfasthetstesterna samt reaktiviteten för betongen att redovisas.

4.1 Hållfasthetstest efter 7 dygn

Sju dagar efter gjutning genomfördes tryckhållfasthetstester på olika cementblandningar med varierande cementsättningar, upprätthållande både 15% och 30% cementsättningar. Vid en cementsättning på 15% framvisade pimpsten den högsta tryckhållfastheten, uppmätt till cirka 33,7 MPa. Därefter följde fluidbäddsand med en tryckhållfasthet på 28,5 MPa och vattentvättad flygaska med 27,3 MPa. Kalksten uppvisade en något lägre tryckhållfasthet vid 25,6 MPa.

Vid en cementsättning på 30% fortsatte pimpsten att vara den starkaste komponenten, dock med en något reducerad styrka jämfört med 15% ersättningen, med en tryckhållfasthet på 27,2 MPa. Fluidbäddsand visade sig vara den svagaste blandningen med en tryckhållfasthet på cirka 17,9 MPa. Kalksten och vattentvättad flygaska uppvisade tryckhållfastheter på 26,3 MPa respektive 22,2 MPa.

Vissa data hämtades från Joel's examensarbete, vilket inkluderade tryckhållfasthetsmätningar för referensblandningen innehållande 100% cement samt 15% och 30% kalksten (Joel, 2024). Sammanfattningsvis visade samtliga cementsättningar en lägre tryckhållfasthet jämfört med referensblandningen innehållande 100% cement, vilken uppmättes till 42,2 MPa.



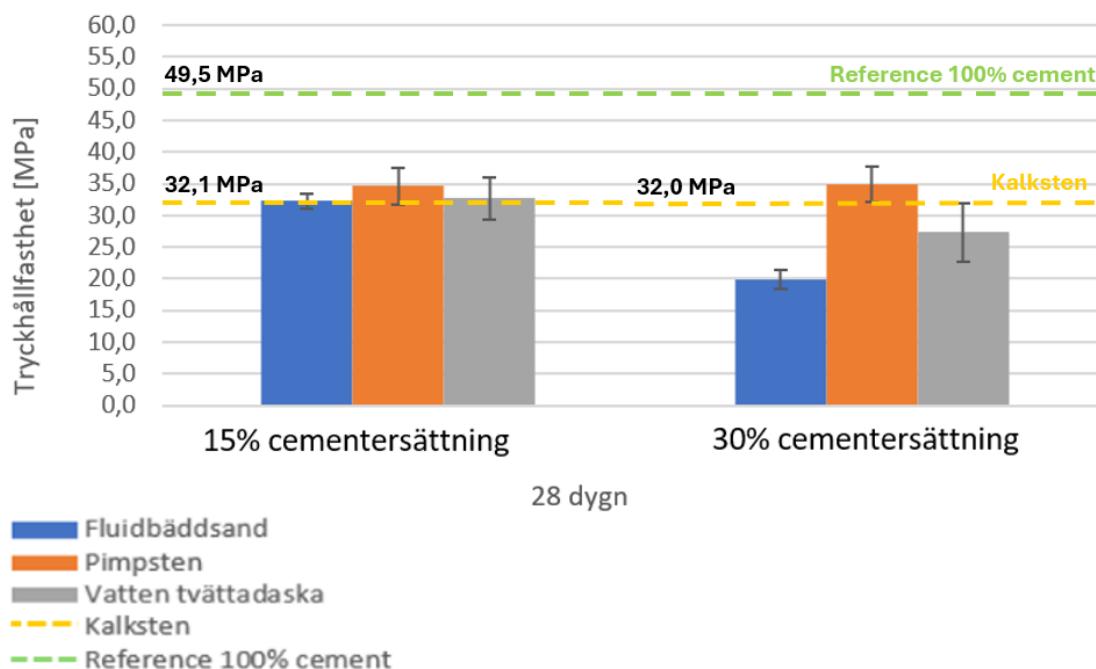
Figur 4.1. Tryckhållfasthet för olika ersättningsmedel med olika mängder efter 7 dygn

4.2 Hållfasthetstest efter 28 dygn

Efter en period av 28 dagar från gjutning genomfördes tryckhållfasthetstester igen på de olika cementblandningar med varierande mängder cementersättning, vilka även inkluderade både 15% och 30% cementersättningar. Vid en cementersättning på 15% uppvisade pimpsten den högsta tryckhållfastheten, vilken mättes till cirka 34,6 MPa. Därefter följde vattentvättad flygaska med en tryckhållfasthet på 32,7 MPa och fluidbäddsand med 32,3 MPa. Kalksten uppvisade en något lägre tryckhållfasthet vid 32,1 MPa.

Vid en cementersättning på 30% fortsatte pimpsten att vara den mest robusta komponenten, med en något förhöjd styrka jämfört med ersättningen på 15%, och en uppmätt tryckhållfasthet på 34,9 MPa. Fluidbäddsand visade sig vara den mest svagdragna blandningen med en tryckhållfasthet på cirka 19,9 MPa. Kalksten och vattentvättad flygaska uppvisade tryckhållfastheter på 32,0 MPa respektive 27,3 MPa.

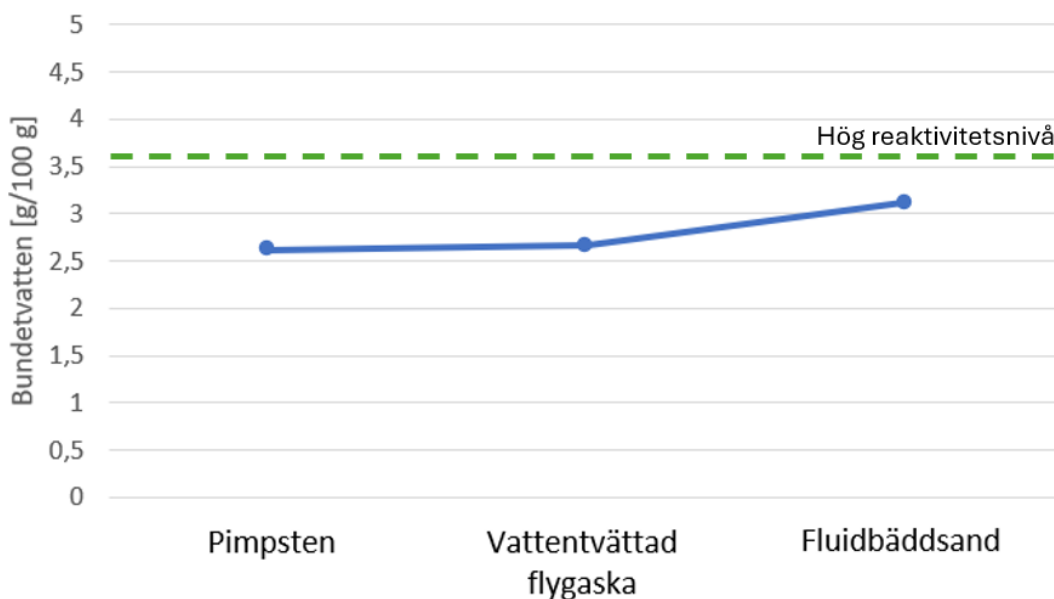
Slutsatsen är att samtliga cementersättningar generellt uppvisar lägre tryckhållfasthet jämfört med referensblandningen innehållande 100% cement, vilken mättes till 49,5 MPa. Denna forskning bygger på en metodisk användning av tryckhållfasthetstester och utvärderar effekterna av olika cementersättningar på materialens egenskaper, vilket ger insikter som är värdefulla för framtida tillämpningar inom byggindustrin.



Figur 4.2. Tryckhållfasthet för olika ersättningsmedel med olika mängder efter 28 dygn

4.3 R3 test

Tröskelvärde för R3 bundet vatten för en konfidensnivå på 66% fastställs till 3,6 gram per 100 gram torkad betong (RILEM, 2022). Detta indikerar att reaktivitetsnivån anses vara hög vid en mätning på 3,6 gram eller högre. Resultaten visade att samtliga tre prover uppvisade reaktivitetsnivåer som var mycket nära detta tröskelvärde, med fluidbäddsandet som hade den högsta nivån och pimpstenen den lägsta. Reactivitetsnivåerna för samtliga prover var också lite nära till 3,6 gram. Se figuren nedan.



Figur 4.3. Reactivitetsnivå för olika askor med avseende på bundet vatten

5 Diskussion

Att undersöka möjligheterna för återanvändning av industriella och naturliga askor i produktionen av betong eller cementbaserade material är avgörande för att främja en hållbar och cirkulär byggsektor. Genom att integrera industriella och naturliga askor som Supplementary Cementitious Materials (SCM) i betongblandningar kan betongens hållbarhet förbättras samtidigt som mängden cement som används minskas, vilket leder till en minskad miljöpåverkan. Vår undersökning syftade till att bedöma effekterna av att använda olika typer av industriella och naturliga askor som ersättning för en del av portlandcementet i betongblandningar.

Resultaten av hållfasthetstesterna visar på betydande skillnader i betongens prestanda beroende på mängden och typen av cementersättning som används. Vid en ersättning på 15% uppvisade pimpsten den högsta tryckhållfastheten efter både 7 och 28 dagar, följt av vattentvättad flygaska och fluidbäddsand. Dessa resultat indikerar att pimpsten har potential att vara en effektiv ersättning för en del av cementet i betongblandningar, med bibehållen eller till och med förbättrad hållfasthet jämfört med traditionell betong. Denna minskning av hållfastheten kan tillskrivas olika faktorer, inklusive partikelstorlek, sammansättning och reaktivitet hos de industriella och naturliga askorna.

Dock är det viktigt att notera att vid en ersättning på 30% visade fluidbäddsand signifikant lägre tryckhållfasthet jämfört med de andra blandningarna. Detta kan tyda på att höga ersättningsnivåer av fluidbäddsand kan påverka betongens prestanda negativt. Det är möjligt att den ökade mängden aska kan ha negativa effekter på betongens bindningsegenskaper och därmed dess hållfasthet.

En intressant observation är att samtliga cementersättningar, inklusive pimpsten, vattentvättad flygaska och kalksten, visade en lägre tryckhållfasthet jämfört med referensblandningen innehållande 100% cement. Detta indikerar att trots fördelarna med att ersätta en del av cementet med industriella och naturliga askor, finns det fortfarande utmaningar när det gäller att matcha den hållfasthet som traditionell betong kan uppnå. Det är därför viktigt att noggrant överväga och optimera blandningsförhållandena för att uppnå önskade hållfasthetsegenskaper samtidigt som man minskar cementanvändningen.

Vidare är det värt att notera att reaktivitetstesterna vid olika temperaturer undersökte betongens förmåga att motstå termiska belastningar. Trots att reaktiviteten för betongblandningar med askor var marginellt lägre än för blandningar med 100% cement, uppnåddes inte reaktiviteten fullständigt. Resultaten från dessa tester kan bidra till en bättre förståelse av betongens beteende under extrema förhållanden, vilket i sin tur kan underlätta utformningen av konstruktioner som utsätts för höga temperaturer.

Resultaten kan vara inte så noggranna och kan också ha påverkats av flera identifierade felkällor. Fel källor som vi tycker har uppstått vid denna forskning är, för det första, att Pimpsten hade mindre partikelstorlek jämför med andra askor och detta kan resultera i starkare bindning mellan partiklarna. För det

andra är att det kan ha uppstått fel i torkningsprocess. Under processen upptäckte vi att materialen inte uppnått den förväntade temperaturen, vilket tyder på att ugnen inte fungerade korrekt. Nästa dag kunde vi konstatera att ugnen var ur funktion. Detta felaktiga torkningssteg kan ha påverkat resultaten. Det tredje och sista felet är relaterat till provkropparnas geometri. De kubiska formarna var inte täckta upptill, vilket kan ha lett till att provkropparnas ytor inte blev helt plana. Detta kan ha inneburit att den ojämna ytan var den som utsattes för tryckhållfasthetstestet, vilket kan ha påverkat resultaten.

Sammanfattningsvis ger denna studie viktiga insikter om användningen av industriella och naturliga askor som ersättning för cement i betongblandningar. Hydrationshastigheten hos cementblandningar med askor jämfört med portlandcement kan ha betydande effekter på både betongens kemiska reaktionshastighet och miljöpåverkan. Det är av största vikt att beakta dessa effekter vid utformningen och användningen av sådana betongblandningar för att främja en hållbar och cirkulär byggsektor.

6 Slutsats

Sammanfattningsvis visade material med alternativa cementersättningar (SCM) att de generellt har lägre tryckhållfasthet jämfört med referensblandningen innehållande 100% cement. Detta indikerar att SCM-materialens reaktivitet inte är tillräckligt hög för att uppnå samma styrkenivåer som traditionellt cement, vilket begränsar deras effektivitet. Sist men inte minst, framtida arbete bör inriktas på att förbättra blandningarnas sammansättning och behandlingsmetoder för att uppnå bättre hållfasthet och reaktivitet, vilket kan leda till mer hållbara och effektiva lösningar för byggindustrin.

7 Bilagor

SCM		Fluidbäddsand		Pimpsten		Tvättad flygaska	
		15%	30%	15%	30%	15%	30%
Brott [MPa]	•Försök 1	30,5	17,9	31,3	25,7	28,6	26,5
	•Försök 2	27,3	17,6	35,7	27,2	31,9	22,5
	•Försök 3	27,7	18,2	34,1	28,6	21,2	17,6
Medelvärde		28,5	17,9	33,7	27,2	27,3	22,2
Standardavvikelse		1,4	0,3	1,8	1,2	4,5	3,6

Bilaga 1. Tryckhållfasthet efter 7 dygn

SCM		Fluidbäddsand		Pimpsten		Tvättad flygaska	
		15%	30%	15%	30%	15%	30%
Brott [MPa]	•Försök 1	32,4	17,6	33,6	38,8	36,4	32,7
	•Försök 2	33,8	21,0	31,8	32,9	33,4	27,7
	•Försök 3	30,8	21,0	38,4	32,9	28,2	21,5
Medelvärde		32,3	19,9	34,6	34,9	32,7	27,3
Standardavvikelse		1,2	1,6	2,8	2,8	3,4	4,6

Bilaga 2. Tryckhållfasthet efter 28 dygn

SCM	Fluidbäddsand	Pimpsten	Tvättad flygaska
Temperatur	Vikt [g]		
50°C	16,2	20,0	23,6
105°C	12,8	8,8	10,9
400°C	12,4	8,6	10,6
Bundet vatten	0,031	0,026	0,027

Bilaga 3. Reaktivitetstest



Bilaga 4. Fluidbäddsand-aska



Bilaga 5. Pimsten-aska



Bilaga 6. Vattenvättad flygaska



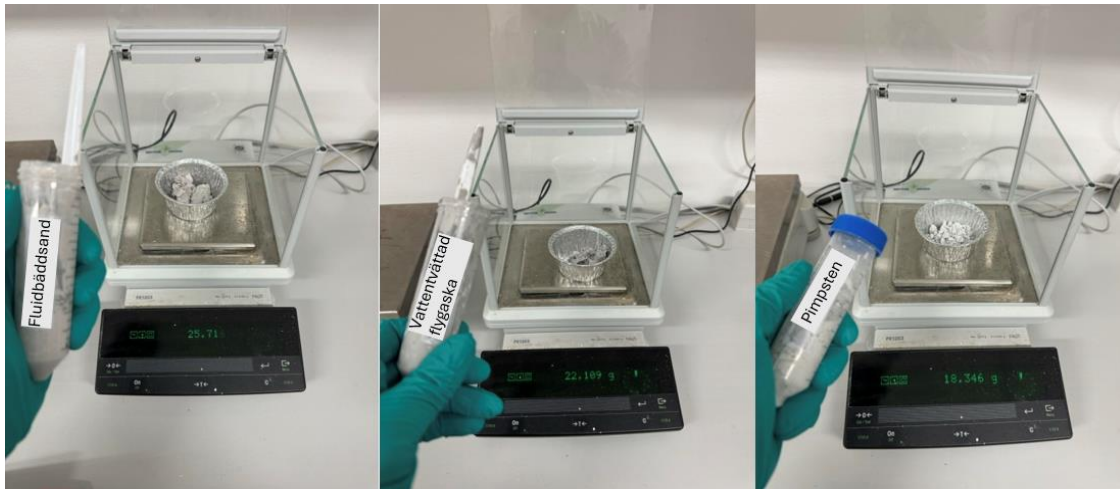
Bilaga 7. Malning av material med syftet att reducera partikelstorleken till mindre än 125 μ m



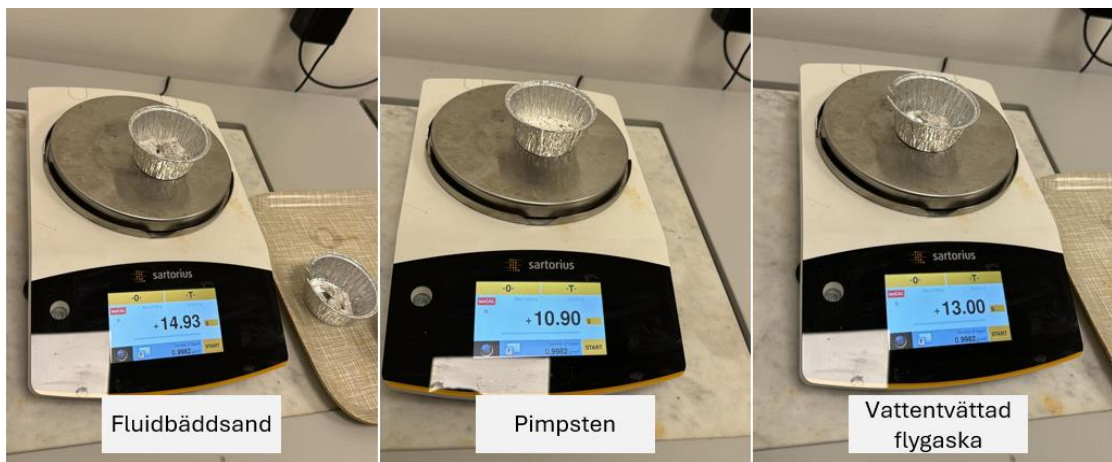
Bilaga 8. Betong blandning



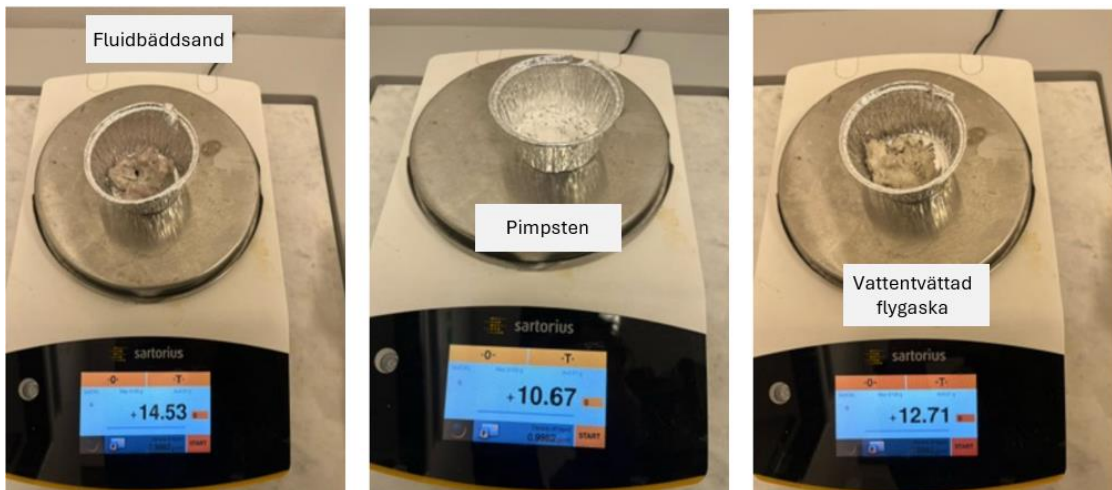
Bilaga 9. Material torkning vid 50 grader inför R3 testet



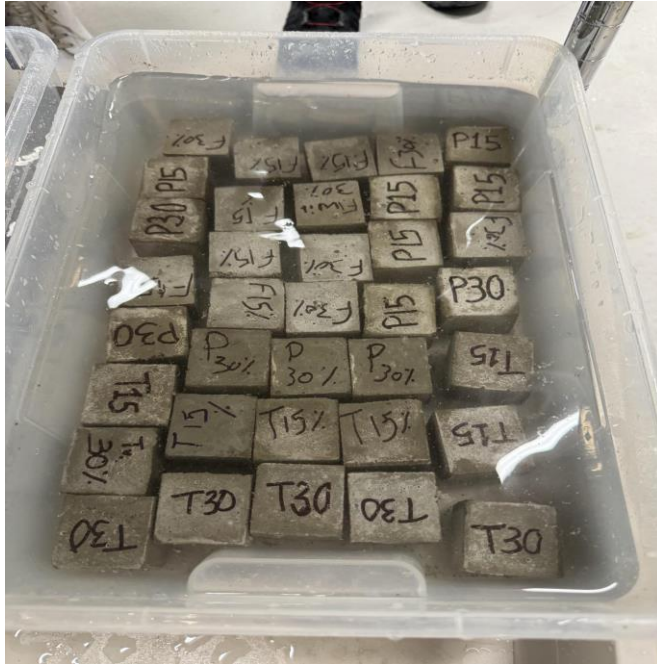
Bilaga 10. Viktmätning för tre olika askor efter uttorkning vid 50°C



Bilaga 11. Viktmätning för tre olika askor efter uttorkning vid 110°C



Bilaga 12. Viktmätning för tre olika askor efter uttorkning vid 400°C



Bilaga 13. Materialet efter gjutning



Bilaga 14. Tryckhållfasthetstest



CHALMERS

8 Referenser

- A. A. Ramezani-pour, "Cement replacement materials," Springer geochemistry/mineralogy, DOI, vol. 10, pp. 978–3, 2014.
- Al-Emrani, M., Engström, B., Johansson, M., Johansson, P. (2019). Bärande Konstruktioner-Del 1
- Beischer, A, Svenberg,R, Melkersson,E, Nillson,T. (2023): Aktiverade leror och musselskal som SCM. Ph.D. Thesis. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Publication No. 01:2, Göteborg, Sweden, 2023, 6 pp
- Burström, P. and Nilver, K. (2018). Byggnadsmaterial (tillverkning, egenskaper och användning). (3:e uppl). Studentlitteratur.
- Chatham House, "Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete," 2020.
- Clay blended cementitious systems. Construction and Building Materials, 254, 123 616.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820313313>
- Hanar, A. (2022): Flow properties of green cementitious binders. Ph.D. Thesis. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Publication No. 01:2, Göteborg, Sweden, 2022, 2 pp
- Johansson, K. (2017): Livscykelanalys av behandlingsprocesser för flygaska från avfallsförbränning. Ph.D. Thesis. Department of Structural Engineering, Swedish University of Agricultural sciences, Publication No. 01:2, Uppsala, Sweden, 2017, 16 pp
- Joel Erikson, master thesis, Exploring the Viability of Using Waste-to-Energy Incineration Ash as Cement Replacement in Concrete. Performed at Chalmers University of Technology, 2024.
- Londono-Zuluaga, D., Gholizadeh-Vayghan, A., Winnefeld, F., Avet, F., Ben Haha, M., Bernal, S. A., Cizer, O., Cyr, M., Dolenc, S., Durdzinski, P., Haufe, J., Hooton, D., Kamali-Bernard, S., Li, X., Marsh, A. T. M., Marroccoli, M., Mrak, M., Muy, Y., Patapy, C., Pedersen, M., Sabio, S., Schulze, S., Snellings, R., Telesca, A., Vollpracht, A., Ye, G., Zhang, S., & Scrivener, K. L. (2022). Report of RILEM TC 267-TRM phase 3: validation of the R3 reactivity test across a wide range of materials. Materials and Structures, 55:142.
<https://doi.org/10.1617/s11527-022-01947-3>
- Nair, N., Haneefa, K., Santhanam, M. (2020), A study on fresh properties of limestone calcined.
- Per Gunnar Burström, Byggnadsmaterial: tillverkning, egenskaper och användning. Studentlitteratur, 2021.

P. Suraneni, "Recent developments in reactivity testing of supplementary cementitious materials," RILEM Technical Letters, vol. 6, pp. 131–139, 2021.

R. Snellings, P. Suraneni, and J. Skibsted, "Future and emerging supplementary cementitious materials," Cement and concrete research, vol. 171, p. 107199, 2023.

Skogenscyklopedin, (2000): pimpsten, pimsten.

<https://www.skogen.se/glossary/pimpsten-pimsten/>