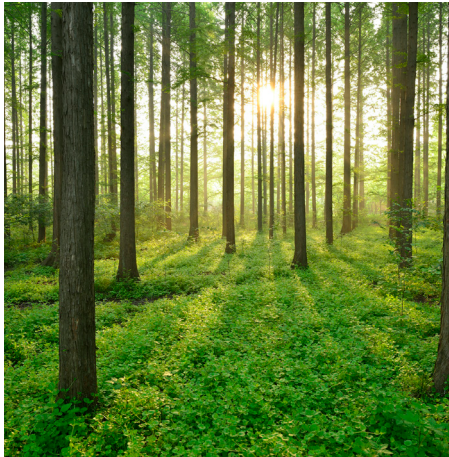


BOTTENASKA SOM ERSÄTTARE TILL CEMENT I KLIMATFÖRBÄTTRAD BETONG

RAPPORT 2025:1117



ASKPROGRAMMET



Bottenaska som ersättare till cement i klimatförbättrad betong

ALIREZA BAHRAMI, MATHIAS CEHLIN, MARITA WALLHAGEN, OLIVER NEXÉN, ELSA PAUL
Högskolan i Gävle

ISBN 978-91-89918-11-5 | © Energiforsk maj 2025

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Produktionen av cement släpper ut stora mängder koldioxid och bidrar till den globala uppvärmningen. I Sverige genereras över 1 miljon ton bottenaska som en biprodukt vid förbränning av hushållsavfall. Den kemiska sammansättningen av bottenaska liknar den hos cementbaserade material, vilket gör bottenaskan till en potentiell kandidat att ersätta en andel av cementen i betong och därmed minska koldioxidavtrycket från byggsektorn.

I det här projektet har forskarna undersökt vilken potential bottenaska har att ersätta en andel av cementen i betong. Ett av projektets mål har varit att undersöka hur en värdefull produkt till byggsektorn kan genereras av askan och samtidigt minska förbränningsansläggningskostnader för avfallshantering. Projektet bidrar till ökad cirkularitet, resursåtervinning och tillvaratagande av en underutnyttjad resurs, som aska faktiskt är.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Marie Kofod-Hansen

Programansvarig för Askprogrammet

Maj 2025

Sammanfattning

Projektet "Bottenaska som ersättare till cement i klimatiförbättrad betong" undersöker möjligheten att använda bottenaska, som produceras vid förbränning av kommunalt avfall (municipal solid waste incineration bottom ash, MSWIBA), som en delvis ersättning för cement i betong med avseende på betongens mekaniska egenskaper.

Betong är ett oundvikligt material inom byggindustrin och består av cement, vatten, finkorniga och grovkorniga ballastmaterial. Produktionen av cement förbrukar naturresurser, orsakar luftföroreningar och släpper ut växthusgaser, vilket leder till drastiska förändringar i klimatiförhållanden. För att motverka detta arbetar betongindustrin mot klimatneutral betong till år 2030, med en strategi som innefattar optimering av bindemedel och minskning av cementinnehållet.

En betydande ökning av produktionen av kommunalt avfall har noterats i samband med förändrade levnadsvanor och urbanisering. Bortskaffandet av det genererade avfallet genom förbränning producerar MSWIBA och flygaska från kommunalt avfall (municipal solid waste incineration fly ash, MSWIFA). MSWIBA utgör cirka 90% av restprodukten och innehåller olika oxider, vilket gör askan jämförbar med olika kompletterande bindemedel.

I detta projekt samlades in fem olika MSWIBA (benämnda BA1-BA5). De undersöktes avseende kemiska ingredienser, mineralsammansättningar och partikelstorleksfördelning (particle size distribution, PSD). Efter genomförda röntgendiffraktionsanalyser (X-ray diffraction, XRD) och PSD på alla prover valdes de prover (BA3 och BA5) som visade pozzolanska egenskaper och partikelstorlekar närmast konventionell cement för vidare studier.

Olika betongblandningar bereddes med 10% och 20% ersättning av cement med rå och aktiverad MSWIBA (BA3 och BA5). Totalt gjöts och analyserades 81 provkuber. Egenskaperna hos färsk och härdad betong jämfördes med kontrollblandningen. Prestanda och hållfasthetsökning för varje blandning undersöktes genom provning av tryckhållfastheten vid 7, 28 och 56 dygn.

Betongblandningar med rå MSWIBA uppvisade liknande bearbetbarhet som kontrollblandningen, medan blandningar med aktiverad MSWIBA visade en ökad bearbetbarhet. Betongens densitet minskade med en ökning av ersättningsandelen MSWIBA, vilket innebär att lättare betong kan framställas genom tillsats av MSWIBA. Dock hade aktivering av MSWIBA ingen betydande positiv effekt på tryckhållfastheten hos betongblandningarna. Även om tryckhållfastheten minskade med ökad ersättningsandel av MSWIBA uppnådde betongblandningen med 10% ersättning av rå BA5 cirka 77% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet efter 56 dygn.

För alla betongblandningar med MSWIBA visade blandningen med BA3 bättre prestanda än blandningen med BA5 efter 7 dygn. Vid längre härdningstider uppvisade dock betongblandningen med BA5 högre tryckhållfasthet än blandningen med BA3. Betongblandningen med 20% rå och aktiverad MSWIBA

uppnådde 58% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet efter 56 dygn. Trots minskningen i betongens tryckhållfasthet erbjuder denna hållbara betong potentiella fördelar inom avfallshantering. Användning av MSWIBA som en ersättning för cement kan också bidra till utvecklingen av klimätförbättrad betong.

Detta projekt kan utökas till två olika faser: (1) Att studera effekten av att blanda MSWIBA med andra kompletterande cementbundna material, såsom flygaska, silikastoft eller mald granulerad masugnsslagg, för att ersätta en del av cementen. På detta sätt kan MSWIBA lägre reaktivitet kompenseras. Följaktligen kan lika bra eller överlägsen tryckhållfasthet för betongen uppnås genom denna synergi, tillsammans med förbättrade hållbarhetsegenskaper. (2) Att undersöka MSWIBA som en ersättning för ballastmaterial i betong. En annan potentiell användning för MSWIBA är som ersättning för ballast i betong, vilket bidrar till utvecklingen av mer miljövänlig betong. Detta minskar efterfrågan på naturliga ballastmaterial och hjälper till att bevara naturresurser.

Nyckelord

Hållbar betong, bottenaska, aktivering, färska egenskaper, härdade egenskaper, partikelstorlek, mineraler, sättmått, tryckhållfasthet

Summary

The project “Bottom Ash as a Replacement for Cement in Climate-Improved Concrete” investigates the possibility of using bottom ash, produced from municipal solid waste incineration (municipal solid waste incineration bottom ash, MSWIBA), as a partial replacement for cement in concrete, with regard to the mechanical properties of concrete.

Concrete is an indispensable material in the building industry and consists of cement, water, fine aggregates, and coarse aggregates. The production of cement consumes natural resources, causes air pollution, and emits greenhouse gases, leading to drastic changes in climate conditions. To counteract this, the concrete industry is working toward climate-neutral concrete by 2030, with a strategy that includes optimizing binders and reducing cement content.

A significant increase in municipal waste production has been noticed due to changes in lifestyles and urbanization. The disposal of the generated waste through incineration produces MSWIBA and municipal solid waste incineration fly ash (MSWIFA). MSWIBA accounts for approximately 90% of the residue product and contains various oxides, making the ash comparable to different supplementary binders.

In this project, five different MSWIBAs (named BA1–BA5) were collected. They were examined for their chemical ingredients, mineral compositions, and particle size distribution (PSD). After conducting X-ray diffraction (XRD) and PSD analyses on all samples, the samples (BA3 and BA5) that exhibited pozzolanic properties and particle sizes closer to conventional cement were selected for further studies.

Various concrete mixes were prepared with 10% and 20% replacements of cement using raw and activated MSWIBAs (BA3 and BA5). A total of 81 test cubes were cast and analyzed. The properties of fresh and hardened concrete were compared to the control mix. The performance and strength developments of each mix were studied by conducting compressive strength tests at 7, 28, and 56 days.

Concrete mixes with raw MSWIBAs showed similar workability to the control mix while mixes with activated MSWIBAs exhibited increased workability. The density of concrete decreased as the MSWIBAs replacement percentage increased, indicating that lighter concrete can be produced by incorporating MSWIBAs. However, the activation of MSWIBAs had no significant positive effect on the compressive strength of the concrete mixes. Although the compressive strength decreased with increasing the replacement ratio of MSWIBAs, the concrete mix with 10% replacement of raw BA5 achieved around 77% of the compressive strength of the control specimen after 56 days.

For all concrete mixes containing MSWIBAs, the mix with BA3 showed better performance than the mix with BA5 after 7 days. However, at longer curing times, the concrete mix with BA5 exhibited higher compressive strength than the mix with BA3. The concrete mix with 20% raw and activated MSWIBAs obtained 58% of the compressive strength of the control specimen after 56 days. Despite the

reduction in the compressive strength of concrete, this sustainable concrete offers potential benefits in terms of environmental protection and waste management. The use of MSWIBA as a substitute for cement can also contribute to the development of climate-improved concrete.

This project can be extended into two different phases: (1) studying the effect of mixing MSWIBA with other supplementary cementitious materials, such as fly ash, silica fume, or ground granulated blast furnace slag, to replace part of cement. In this way, the lower reactivity of MSWIBA can be compensated. Consequently, similar or even superior compressive strength for concrete can be achieved through this synergy, along with improved durability properties. (2) Investigating MSWIBA as a substitute for aggregates in concrete. Another potential application of MSWIBA is replacing aggregates in concrete, contributing to the development of more environmentally friendly concrete. This reduces the demand for natural aggregates and helps conserve natural resources.

Keywords

Sustainable concrete, bottom ash, activation, fresh properties, hardened properties, particle size, minerals, slump value, compressive strength

Innehållsförteckning

1	Introduktion	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Litteraturöversikt	12
1.3	Projektets mål	14
1.4	Förväntat resultat av projektet	14
1.5	Struktur för rapporten	15
2	Material	16
2.1	XRD-analys av MSWIBA-prover	17
2.2	PSD för råa MSWIBA-prover	26
2.3	PSD för aktiverade MSWIBA-prover	26
3	Betongrecept och metodik	28
3.1	Aktivering av MSWIBA-prover	28
3.2	Proportionering av betongblandningar	30
3.3	Gjutning och härdning av betongprover	30
4	Resultat och diskussion	34
4.1	Provning av färsk betong	34
4.2	Provning av härdad betong	35
5	Slutsatser	44
6	Framtida arbetsområden	47
7	Referenslista	48

1 Introduktion

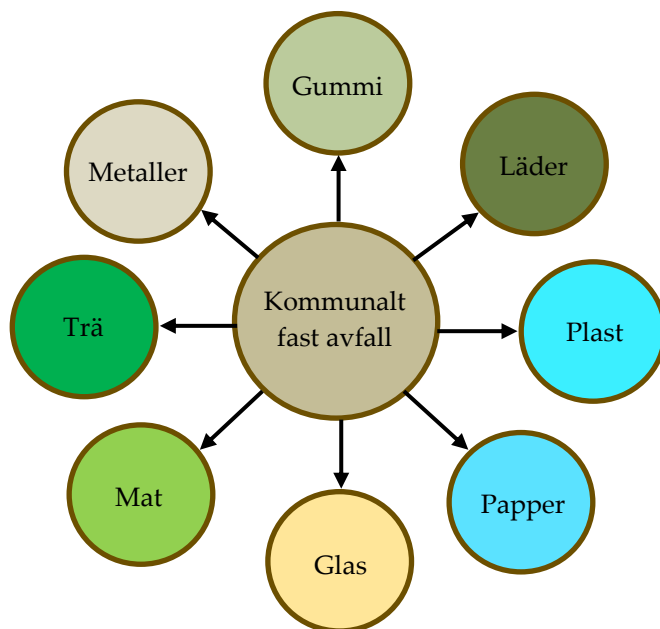
1.1 BAKGRUND

Betong anses vara ett oundvikligt material inom byggindustrin världen över. Det är en sammansättning av bindemedel, fint och grovt ballastmaterial. En av de huvudsakliga beståndsdelarna i traditionella betongblandningar är Portlandcement. Tillverkning av cement kräver en stor mängd energi, och utsläppen från cementproduktionen har en negativ påverkan på miljön, vilket leder till global uppvärmning. Cementproduktionen står för cirka 5–7% av världens CO₂-utsläpp. Dessutom förbrukar cementtillverkning naturresurser som kalksten och fossila bränslen (Bahrami et al., 2023, Miller et al., 2016).

Utsläpp av växthusgaser i atmosfären har orsakat drastiska förändringar i klimatförhållandena, såsom extrema väderförhållanden, stigande havsnivåer och så vidare. Tillverkning av cement producerar damm, vilket i sin tur orsakar luftföroreningar och till slut försämrar ekosystemet. De negativa effekterna av cementtillverkning har satt press på byggindustrin att minska cementproduktionen. Betongindustrin har lanserat en handlingsplan som syftar till klimatneutral betong till 2030, med en strategi som innefattar optimering av bindemedel och minskning av cementinnehållet. Forskare fokuserar därför på ett ersättningsmaterial som kan ersätta cement delvis eller helt utan att äventyra betongens egenskaper.

Flera forskare har undersökt effekten av att använda olika avfallsprodukter som ersättning för cement. Ersättning av cement med avfall minskar inte bara utsläppen av växthusgaser utan minskar också mängden avfall som hamnar på deponier. Dessutom minskar tillsatsen av avfall i betong som ersättning för ballastkostnaderna vid byggandet. Forskare har undersökt effekten av att ersätta cement med olika avfallsprodukter som flygaska, silikastoft, granulär masugnsslagg, bottenaska, ris-husaska och så vidare. (Afrin et al., 2021, Brito och Kurda, 2021). En betydande ökning av produktionen av kommunalt avfall har noterats på grund av snabb urbanisering och förändrade levnadsvanor. Figur 1 visar de olika källorna till kommunalt avfall (Blasenbauer et al., 2020, Mafalda Matos och Sousa-Coutinho, 2022).

Figur 2 illustrerar metodiken för avfallshantering. Enligt en rapport från Världsbanken kommer den årliga produktionen av kommunalt avfall att vara 3,4 gigaton år 2050 (Lu et al., 2024). Den konventionella metoden för bortskaffande av kommunalt avfall är deponering, vilket leder till att avfall tränger in i andra områden. Numera används olika metoder för att hantera kommunalt avfall, såsom förbränning, sanitär deponering och kompostering vid höga temperaturer, där varje metod har sina fördelar och nackdelar.



Figur 1. Källor till kommunalt avfall.

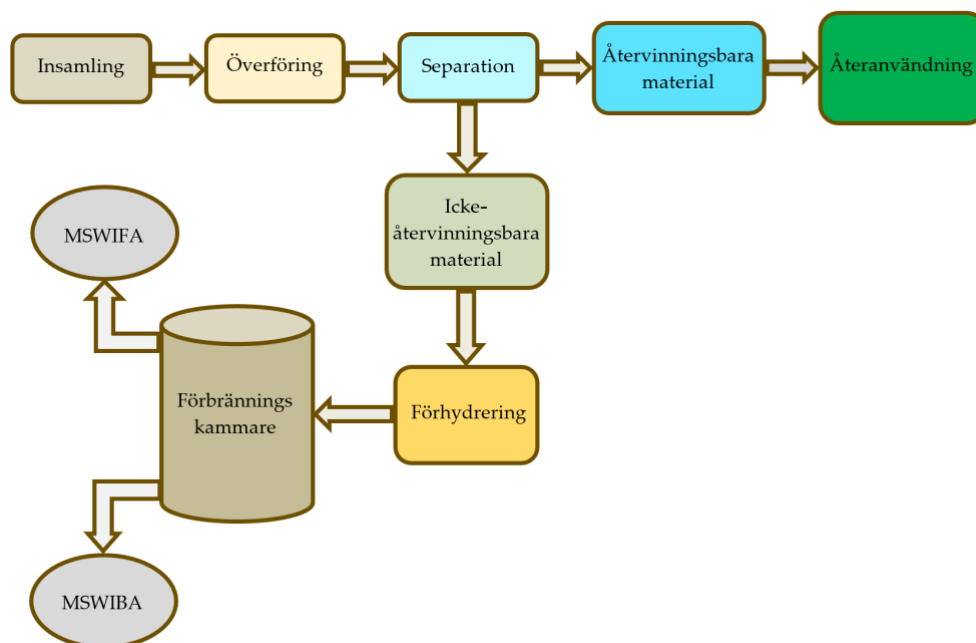
En av de vanligen använda metoderna är förbränning, genom vilken volymen avfallet kan minskas med cirka 80%. Förbränning av olika avfallsmaterial producerar olika typer av aska, inklusive jordbruksavfallsaska, farligt avfallsaska, medicinskt avfallsaska, industriavfallsaska, aska från förbränning av kommunalt fast avfall, och så vidare. Jordbruksavfallsaska bildas vid förbränning av olika jordbruksrester såsom rishuskor, halm, löv och andra växtbaserade material. Medicinskt avfallsaska uppstår vid förbränning av medicinskt och farmaceutiskt avfall. Industriavfallsaska och farligt avfallsaska genereras genom förbränning av industriavfall respektive farligt eller toxiskt avfall. Trots att det finns olika typer av förbränningsaska, fokuserar detta projekt på den aska som bildas som en restprodukt vid förbränning av kommunalt fast avfall.

Men dessutom producerar förbränning av kommunalt avfall sekundära produkter såsom bottenaska från kommunal avfallsförbränning (municipal solid waste incineration bottom ash, MSWIBA) och flygaska från kommunal avfallsförbränning (municipal solid waste incineration fly ash, MSWIFA). MSWIFA utgör cirka 10% av avfallsresterna, medan MSWIBA består av omkring 90% av avfallsresterna (Liu et al., 2024).

MSWIFA är mikropartiklar och kan filtreras med hjälp av olika luftfiltreringsanordningar. På grund av närvaron av farliga miljögifter betraktas MSWIFA som farligt avfall. Därför bör särskild försiktighet iakttas vid bortskaffandet av MSWIFA; annars kan det få livshotande konsekvenser för levande organismer och skada ekosystemet.

De insamlade MSWIFA-partiklarna bearbetades initialt genom cementstabilisering innan de användes som deponi (Liu et al., 2022). Effektiviteten av

förbehandlingsmetoden påverkas i hög grad av många faktorer, såsom närvaron och upplösningen av giftiga material, partikelstorleksfördelning, fasproportioner, och så vidare. Dessutom beror beteendet i stor utsträckning på närvaron av sulfat- och kloridhalter (Zhao et al., 2025). Trots att produktionen av MSWIFA är mindre än för MSWIBA, ökar närvaron av farliga komponenter i MSWIFA belastningen på hanteringen av MSWIFA-avfall.



Figur 2. Metodik för bortskaffande av kommunalt avfall.

MSWIBA består av spröda och porösa partiklar med oregelbunden storlek (Chen et al., 2023). Närvaron av kiseldioxid i MSWIBA gör att askan kan jämföras med olika tillsatsbindemedel. Dessutom hjälper de olika beståndsdelarna i askan till att utveckla hållfasthet i betong när MSWIBA används som ett substitut för cement. Men hållfastheten, hållbarheten och den gröna säkerheten hos den betong som utvecklas med partiell ersättning av cement med MSWIBA är relaterade till de olika storlekarna på partiklarna i askan. Grova partiklar är rika på kisel medan fina partiklar är rika på kalkspat och anhydrit. Dessutom varierar beståndsdelarna, proportionerna och partikelstorlekarna i MSWIBA för aska från olika platser (Cheng et al., 2024, Cheng et al., 2024).

I Sverige genereras över 1 miljon ton MSWIBA som restavfall vid förbränning av hushållsavfall (Kleib et al., 2021). Den aska som återstår efter förbränningen är cirka 90% av bottenaskan (Siddique, 2010). Flera forskningsarbeten pågår om användningen av hushållsavfallsaska från förbränning, men dess potential har ännu inte utnyttjats fullt ut (Brito och Kurda, 2021). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) har funnit att tillsatsmaterial (supplementary cementitious material, SCM) för cement är en viktig åtgärd för att minska betongens miljöpåverkan (IPCC, 2022). Den kemiska sammansättningen av MSWIBA liknar den för cementbaserade material, vilket gör MSWIBA till en potentiell kandidat för att ersätta cement i betong och därmed minska koldioxidavtrycket från byggsektorn (Clavier et al., 2021, Kleib et al., 2021). Den pozzolanreaktion som

bidrar till bindemedlets hållfasthet i betong kan förbättras genom finpartiklig bottenaska, som huvudsakligen innehåller oxider av järn, aluminium och kisel.

1.2 LITTERATURÖVERSIKT

Flera forskare har studerat den potentiella användningen av MSWIBA som fin ballast i betong. Song et al. (2010) bedömde effekten av partiell ersättning av MSWIBA som fin ballast i murbruk och rapporterade att tryckhållfastheten var mellan 150 och 220 kg/cm² efter 28 dagar, även om tryckhållfastheten minskade med en ökning av MSWIBA. Tang et al. (2015) och Lynn et al. (2016) visade att MSWIBA har högre vattenabsorption än traditionell ballast, och att tillsatsen av MSWIBA som ett komplementärt material för fin ballast minskar den vattenmängd som är tillgänglig för hydraulisk reaktion, vilket leder till att murbrukets hållfasthet minskar.

Flera forskare har genomfört experiment för att utvärdera effekten av MSWIBA som grov ballast i betong. Kuo et al. (2013) rapporterade att genomsläpplig betong med konventionell ballast och tvättad MSWIBA uppvisade jämförbar hållfasthet, genomsläpplighet och porositet. Dessutom förbättrades genomsläpplighetskoefficienten och böjhållfastheten när storleken på tvättad MSWIBA ökade från 9,5 mm till 12,5 mm. Användningen av MSWIBA som partiell ersättning för naturlig ballast minskar betongens enhetsvikt (Lynn et al., 2016). Ginés et al. (2009) genomförde experiment för att utvärdera användningen av avfallsförbränningsprodukter som en fullständig ersättning för ballast i betong. Betong blandad med upp till 10% flygaska från rökgasrening gav god mekanisk hållfasthet inom gränserna för lakning och kan användas för prefabricerade icke-strukturella delar. Sorlini et al. (2011) bevisade att genom att använda en högre mängd granulerad kommunal avfallsaska ökade frigörandet av bly och basalt, medan tillsatsen av jämn avfallsaska resulterade i minskat frigörande av basalt och fluor.

Li et al. (2012) indikerade att även om cementmatrisens egenskaper minskade med ökad mängd MSWIBA, kunde en blandad cementmatris med en hållfasthet på 32,5 MPa utvecklas genom att införa upp till 30% MSWIBA som partiell ersättning för cement enligt den kinesiska standarden. An et al. (2017) nämnde att MSWIBA kan användas som ett potentiellt material för ersättning av fin ballast och konventionellt cement i betong. Tang et al. (2016) undersökte effekten av termiskt behandlad MSWIBA som ersättning för cement i betong. Maximal hållfasthet uppnåddes när 30% av cementet ersattes med behandlad MSWIBA, vilket innebär att hydratiseringen av cement kan förbättras genom behandlad MSWIBA. Men enligt resultaten kunde inte oxidation av aluminium reduceras med behandlad MSWIBA, och därför minskade hållfastheten hos det härdade murbruket med tiden på grund av utvecklingen av sprickor.

Yang et al. (2018) visade användningen av tvättad flygaska och bottenaska från kommunalt avfall som SCM:er för konventionell cement. Även om betongens hållfasthet minskade med en ökning av procentandelen tvättad aska, uppnåddes en hållfasthet som var jämförbar med kontrollblandningen för 40% och 20% ersättning av cement med flygaska respektive bottenaska. Chen et al. (2019)

utvärderade stabiliseringen av förbränningsaska med ordinarie Portlandcementbindemedel. Vid beaktande av förbränningsaska som fyllnadsmaterial, visade blandning med 95% förbränningsaska vara mer ekonomisk. Cheng et al. (2024) konstaterade att murbruk med MSWIBA har en låg vikt och hög vattenabsorption. Trots att hållfastheten för blandningen med grov MSWIBA är lägre än kontrollblandningen, minskar hållfasthetsförlusten jämfört med kontrollblandningen när härdningstiden ökar. Efter 90 dagars härdning uppnådde blandningen med 30% MSWIBA 86% av böjhållfastheten hos kontrollblandningen. Dessutom uppfyllde blandningen standarderna för lakning av tungmetaller.

Cheng et al. (2024) rapporterade om porstorleksfördelningen hos cementpasta med MSWIBA. Med tillsatsen av MSWIBA vidgades porerna med storlek mindre än 50 nm, vilket orsakades av vätegasfrigöring på grund av upplösningen av olika oxider i matrisen. Den strukturella integriteten störs, och därmed ökar porutrymmet med minskad tillgång på kalciumjoner. Genom att införa MSWIBA i cementpasta minskas de medelstora porerna jämfört med kontrollblandningen genom att fungera som ett fyllnadsmaterial. Tidig cementhydratisering aktiverades också med närvaron av kalciumhydroxid i den finare MSWIBA-blandningen. Lu et al. (2024) visade att ersättningen av MSWIBA minskar de interstitiella porförbindelserna och förbättrar motståndet mot infiltration. Men vid exponering för frys-tö-cykler uppvisade blandningen med en andel MSWIBA över ett tröskelvärde låg motståndskraft.

Lin et al. (2024) utvärderade användningen av matavfallsaska och pappersaska som SCM och rapporterade att tillsatsen av förbränningsaska expanderade cementmatrisen, men expansionen var inom det intervall som anges i EN 197-1. En jämförelse av hållfastheten för blandningar med matavfallsaska och pappersaska visade att när 5% aska tillsattes i cementpastan, uppnådde matavfallsaska en hållfasthet som var nära kontrollblandningen. Samtidigt var förekomsten av tungmetaller i rå aska högre än de angivna gränserna, men förekomsten av tungmetaller i murbruket var inom standardgränserna. Chen och Yang (2017) presenterade att hydratiseringshastigheten var starkt beroende av partikelstorleken hos bottenaska från förbränningsanläggningar, medan bindemedelsegenskaperna och den genererade värmen också påverkades.

Forskning har visat att MSWIBA har kemiska och fysikaliska egenskaper som gör det till ett potentiellt partiellt ersättningsmaterial för cement i betong. Dock krävs ytterligare forskning för att förstå hur betongens egenskaper påverkas, särskilt när det gäller hållfasthet och hållbarhet. Dessutom belyser det tidigare arbetet som genomförts av olika forskare behovet av vidare undersökning av MSWIBA gällande materialkaraktärisering när det gäller kemisk sammansättning och partikelstorlek, samt nödvändiga behandlingar för att minska metalliska och alkaliska effekter, vilket i sin tur förbättrar betongens arbetbarhet, kvalitet och hållfasthet.

1.3 PROJEKTETS MÅL

Detta projekt undersökte potentialen att använda MSWIBA som SCM i betong, med fokus på betongens tryckhållfasthet. Bottenaska från fem olika förbränningsanläggningar samlades in. Enligt tidigare forskning om förbränningsaska är en av de största utmaningarna vid användning av MSWIBA partikelstorleksfördelningen (particle size distribution, PSD). När partikelstorleken ändras varierar också askans kemiska sammansättning (Lynn et al., 2016, Lynn et al., 2017). Därför har materialkaraktisering av bottenaskan genomförts som ett första steg innan den används som SCM.

Målet med detta projekt var att undersöka potentialen att använda MSWIBA som ett substitut för cement i relation till betongens mekaniska egenskaper. För att uppnå detta fokuserade projektet på:

- Karakterisering av MSWIBA
- Provning av färsk och härdad betong som delvis ersatts med MSWIBA.

Den insamlade MSWIBA karakteriserades baserat på dess fysiska, kemiska och mineralogiska egenskaper. De två mest lämpliga MSWIBA valdes ut och utvärderades sedan för sin pozzolanska reaktivitet. Därefter gjordes betongprover med olika ersättningsprocent av cement med rå och aktiverad MSWIBA. Slutligen genomfördes provning av betongproverna för tryckhållfasthet vid 7, 28 och 56 dagar för att bedöma betongens prestanda. Detta projekt är i linje med askprogrammets mål och syftar till att möjliggöra tillämpning av MSWIBA inom byggsektorn.

Projektet genomfördes främst vid Högskolan i Gävle (HiG) av ett tvärvetenskapligt team från olika ämnesområden på HiG, stöttat av en expertgrupp från byggindustrin. Expertgruppen har kompetens inom områden som bygga, resurseffektiv byggnation och miljöteknik.

1.4 FÖRVÄNTAT RESULTAT AV PROJEKTET

Resultaten kommer att:

- öka kunskapen om potentialen hos MSWIBA som ersättning för cement i betong.
- leda till riktlinjer och förslag för vidareutveckling av ett byggmaterial baserat på restavfall från avfallsförbränningsanläggningar.

Efterfrågan på klimatiförbättrad betong har ökat avsevärt, och för att möta denna efterfrågan måste kunskapsnivån förbättras. Projektet bidrar till att öka kunskapen om aska som ersättning för cement i betong, samt identifiera utmaningar och föreslå lösningar på dessa utmaningar. Genom att introducera MSWIBA som ett hållbart alternativ främjar detta projekt övergången till innovativa byggmaterial. Innovationen ligger i att utnyttja en avfallsprodukt från energisektorn för att förbättra hållbarheten och prestandan hos betong. Potentialen att använda MSWIBA för att ersätta en del av cementen i betong kommer att utvärderas, och

resultaten kommer att ge rekommendationer för vidare utveckling av klimatförbättrad betong.

1.5 STRUKTUR FÖR RAPPORTEN

Kapitel 1: Introduktion

Detta kapitel introducerar projektets bakgrund, olika forskningsarbeten som har gjorts inom ämnet, luckor i tidigare arbeten och projektets mål. Det förklarar också en sammanfattning av rapportens struktur.

Kapitel 2: Material

Detta kapitel förklarar de olika materialen som används i det aktuella projektet. Det förklarar också de olika preliminära analyser som utförts på materialen.

Kapitel 3: Betongrecept och Metodik

Detta kapitel förklarar de olika material som används vid gjutning. Det förklarar även de olika preliminära tester som genomförts på materialen.

Kapitel 4: Resultat och Diskussion

Detta kapitel presenterar resultaten från olika prov med hjälp av bilder och tabeller. Det diskuterar även de fynd som gjorts från de olika proven.

Kapitel 5: Slutsatser

Detta kapitel sammanfattar projektets resultat och viktiga insikter.

Kapitel 6: Framtida Arbetsområden

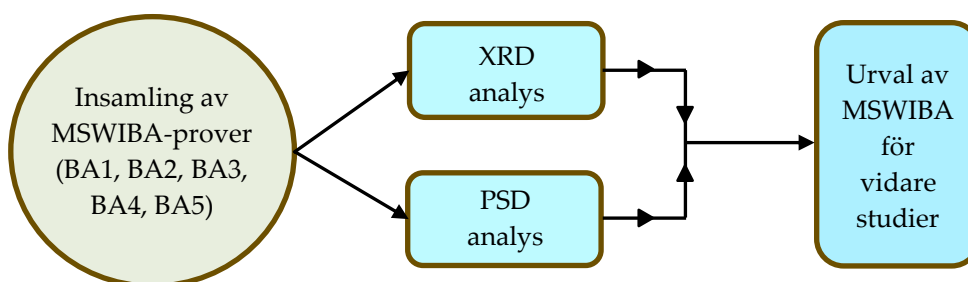
Detta kapitel föreslår de områden där projektet kan utvidgas och inkluderar det framtida arbetsområdet.

2 Material

Detta kapitel illustrerar de material som har använts i projektet. Cement, MSWIBA, grov ballast, fin ballast och vatten var de viktiga råmaterial som användes i det aktuella arbetet.

Cementet som användes i projektet var CEM I 42.5 N SR3 MH/LA, vilket inte innehöll någon flygaska och var kompatibelt med SCM. För att uppnå en effektiv ersättning för konventionellt cement är det viktigt att erhålla ett jämförbart material som bidrar till betongens hållfasthet. Figur 3 visar den metodologi som användes för att uppnå SCM. Inledningsvis samlades fem MSWIBA-prover från olika källor in i projektet. Efter att ha genomfört röntgendiffraktionsanalys (X-ray diffraction, XRD) och PSD-analyser valdes de två mest lämpliga proverna för vidare studier.

XRD-metoden används för att identifiera kristallgittret hos materialet. Dessutom bestäms de mineraler och element som finns i provet och den kan även upptäcka spår av oönskade avlagringar. PSD visar tydligt fördelningen av partiklar enligt deras storlek.

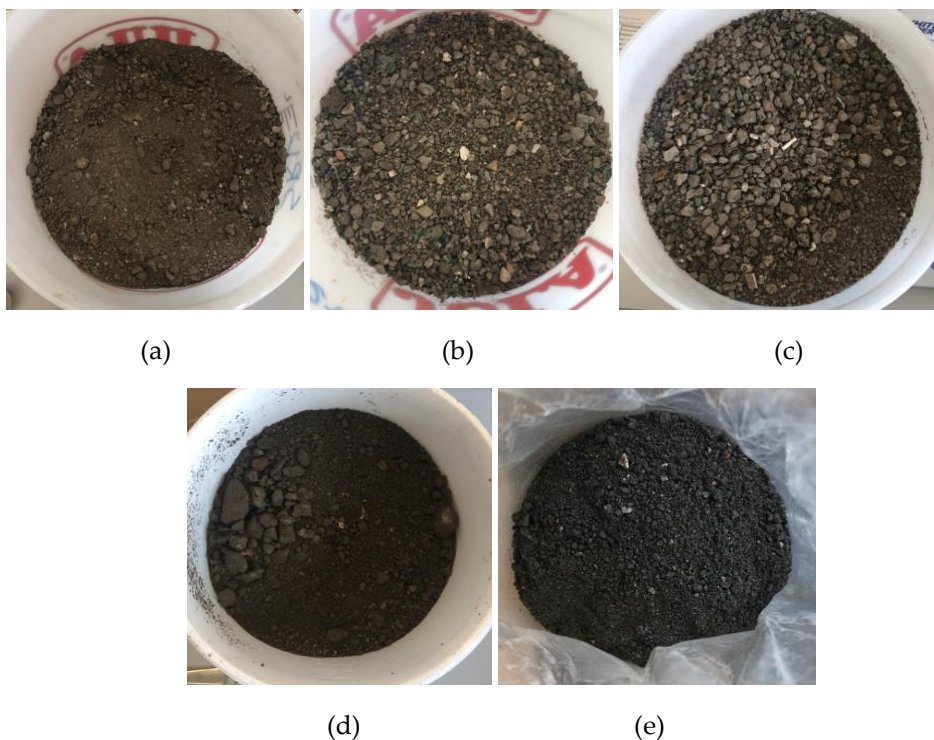


Figur 3. Metodik som används för urval av MSWIBA-prov.

Tabell 1 visar detaljerna för de olika MSWIBA-prover som samlades in och beaktades för studien. Tabellen visar tydligt att alla MSWIBA-prov utom BA5 var våtutmatade. För proverna BA1, BA2 och BA3 var PSD-intervallet 0–13 mm. Prov BA4 visade det bredaste PSD-intervallet jämfört med alla andra prover, medan prov BA5 hade den minsta variationsgraden. Figur 4 visar olika MSWIBA-prover.

Tabell 1. Detaljer om olika MSWIBA.

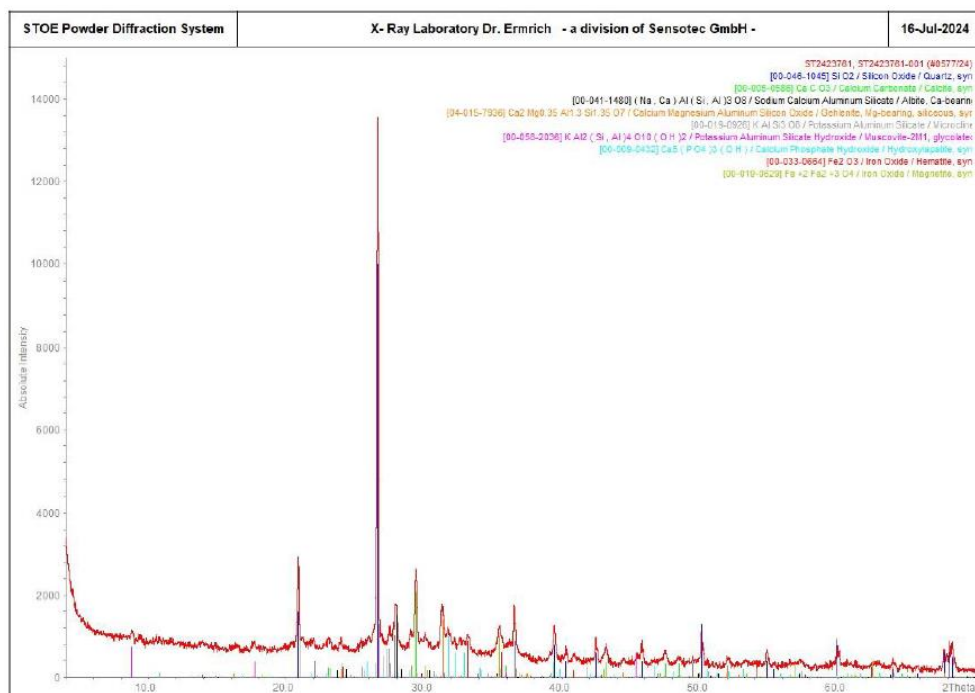
Prov	Utmatningsmetod	Storlek (mm)
BA1	Våt	0–13
BA2	Våt	0–13
BA3	Våt	0–13
BA4	Våt	0–50
BA5	Torr	0–2



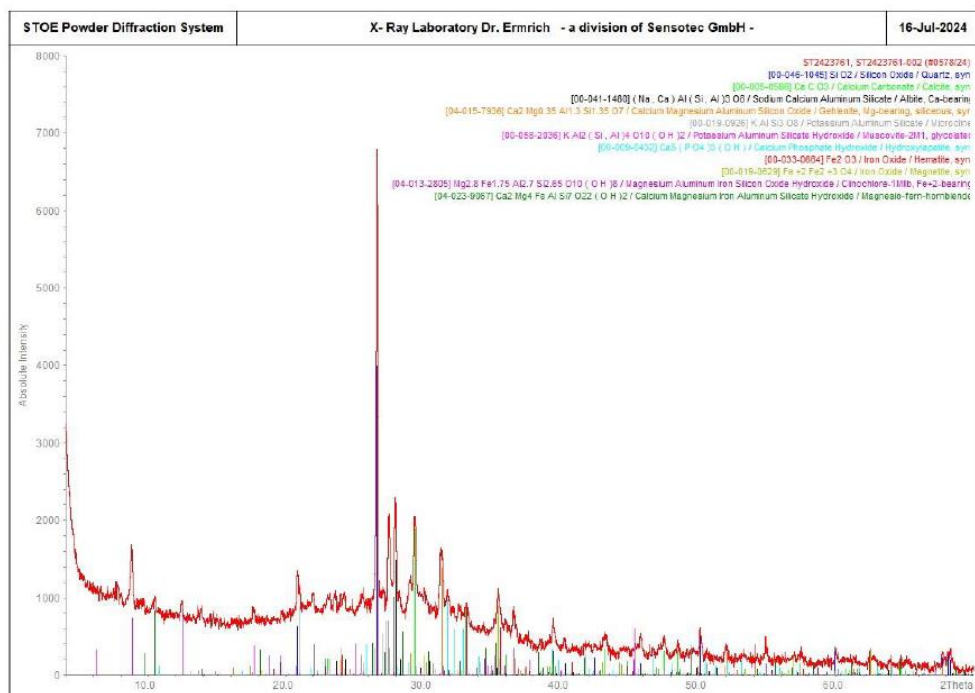
Figur 4. Olika MSWIBA-prover: (a) BA1, (b) BA2, (c) BA3, (d) BA4, (e) BA5.

2.1 XRD-ANALYS AV MSWIBA-PROVER

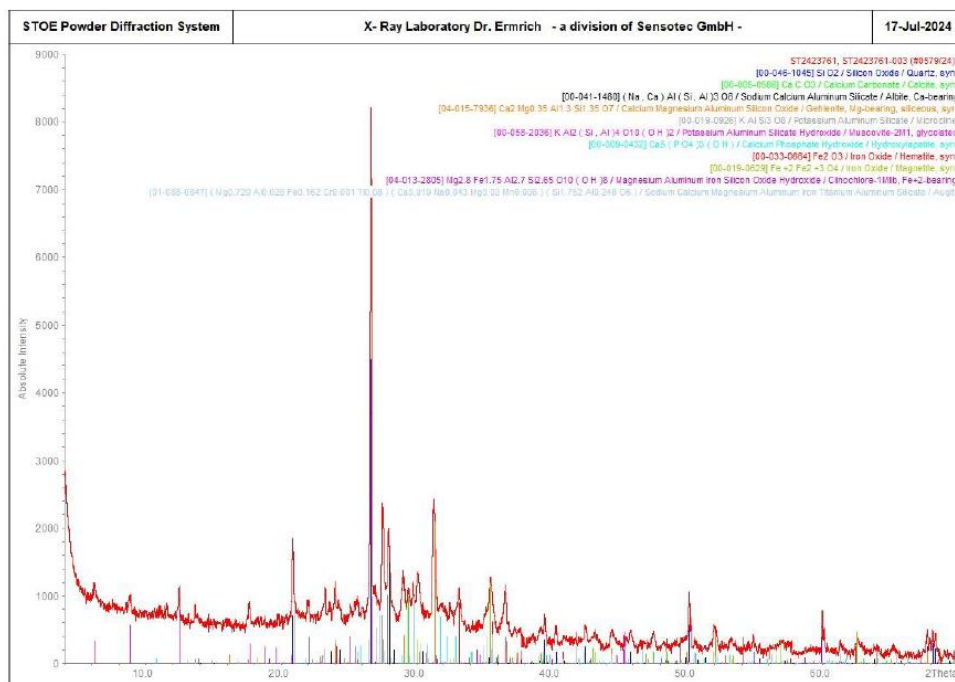
Alla fem prover av MSWIBA skickades för XRD-analys på ALS Scandinavia AB och för PSD på Vattenfall. Figur 5–9 visar XRD-analysresultaten för proverna BA1–BA5, respektive. Absolut intensitet och 2Theta visas på Y- och X-axeln. Förekomsten av olika föreningar i provet avslöjades genom XRD-analys. När röntgenstrålen träffar målmaterialet, bestämmer storleken och formen på beståndsdelarna diffusionsriktningen, medan den relativa mängden av en viss fas i blandningen bestämmer intensiteten på diffraktionslinjen för den fasen.



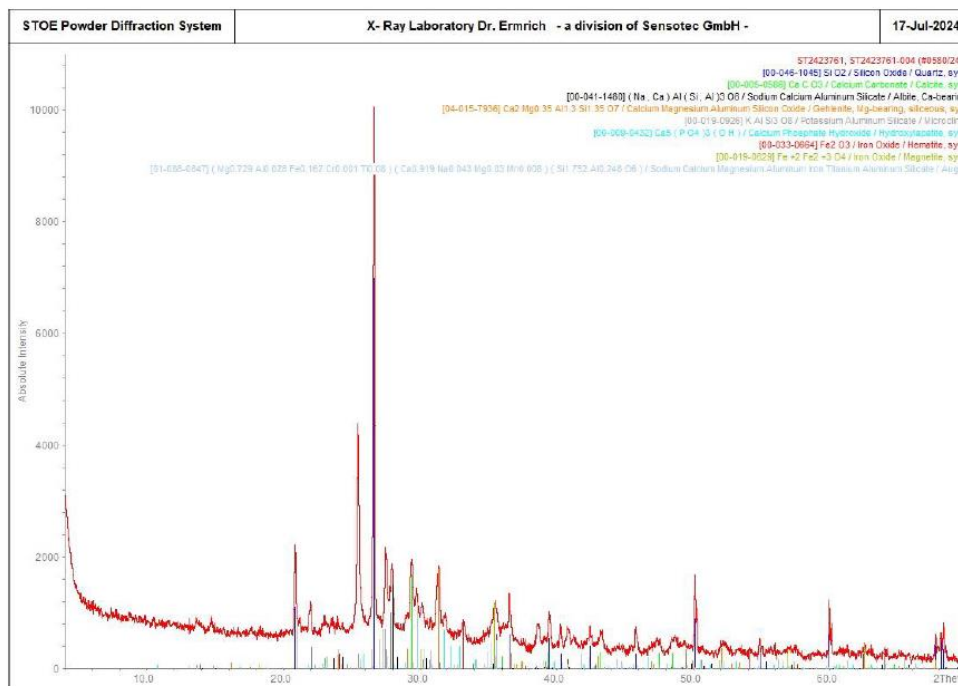
Figur 5. XRD-analys för prov BA1.



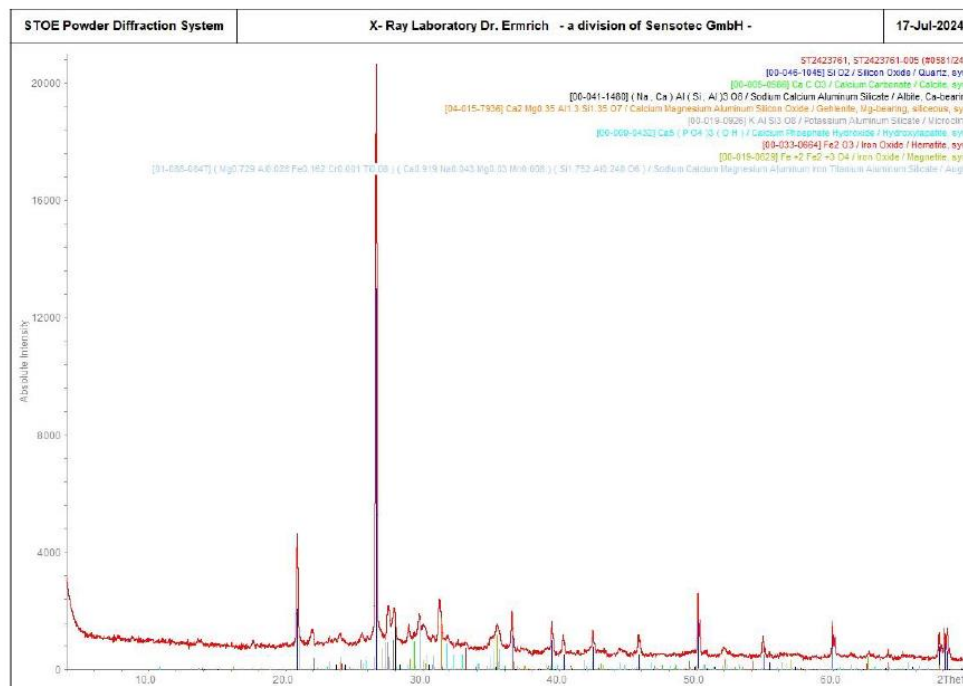
Figur 6. XRD-analys för prov BA2.



Figur 7. XRD-analys för prov BA3.



Figur 8. XRD-analys för prov BA4.



Figur 9. XRD-analys för prov BA5.

Tabell 2 sammanfattar procentandelen av olika mineraler i MSWIBA-proverna, och Tabell 3 visar mängden av olika element som finns i proverna med avseende på torrsubstansinnehållet (TS).

Tabell 2. Procentandel av mineraler som finnes i varje prov.

Mineraler	Procentandel av mineraler som finns i provet				
	BA1	BA2	BA3	BA4	BA5
Amorf/fint kristallin andel	Cirka 10%	Cirka 25%	Cirka 10–15%	Cirka 10–15%	Cirka 10–15%
Quartz (SiO ₂)	47,5 ± 1,0	30,4 ± 1,0	38,0 ± 1,0	41,8 ± 1,0	50,2 ± 1,0
Calcite (CaCO ₃)	12,3 ± 0,8	8,4 ± 0,8	3,2 ± 0,2	9,3 ± 0,8	3,6 ± 0,2
Albite ((Na,Ca)Al (Si,Al) ₃ O ₈)	11 ± 0,8	17,0 ± 0,8	12,6 ± 0,8	11,3 ± 0,8	11,8 ± 0,8
Gehlenite (Ca ₂ Mg _{0,35} Al _{1,3} Si _{1,35} O ₇)	11,3 ± 0,8	9,8 ± 0,8	12,1 ± 0,8	8,4 ± 0,8	10,1 ± 0,8
Microcline (KAlSi ₃ O ₈)	4,5 ± 0,5	12,9 ± 0,5	14,0 ± 0,8	14,1 ± 0,8	10,6 ± 0,8
Muscovite (KAl ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂)	2,8 ± 0,2	6,3 ± 0,2	2,1 ± 0,2	-	-
Hydroxyapatite (Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH))	6,4 ± 0,5	5,7 ± 0,5	3,5 ± 0,2	4,1 ± 0,2	4,8 ± 0,2
Hematite (Fe ₂ O ₃)	2,5 ± 0,2	1,4 ± 0,2	3,8 ± 0,2	3,4 ± 0,2	1,0 ± 0,2
Magnetite (Fe ₃ O ₄)	1,5 ± 0,2	2,7 ± 0,2	3,5 ± 0,2	3,6 ± 0,2	3,3 ± 0,2

Clinochlore (Mg _{2,8} Fe _{1,75} Al _{2,7} Si _{2,65} O ₁₀ (OH) ₈)	-	3,5 ± 0,2	3,9 ± 0,2	-	-
Hornblende (Ca ₂ Mg ₄ Fe AlSi ₇ O ₂₂ (OH) ₂)	-	1,9 ± 0,2	1,9 ± 0,2	-	-
Augit ((Mg _{0,729} Al _{0,028} Fe _{0,162} Cr _{0,001} Ti _{0,08}) (Ca _{0,919} Na _{0,043} Mg _{0,03} Mn _{0,008}) (Si _{1,752} Al _{0,248} O ₆))	-	-	3,3 ± 0,2	4,0 ± 0,2	4,6 ± 0,5

Tabell 3. Oxider (element) som finns i varje prov.

Parameter	Enhet	BA1	BA2	BA3	BA4	BA5
Al som Al ₂ O ₃	% TS	9,7	8,54	11,7	8,81	8,74
Ca som CaO	% TS	17	14,3	17	16,7	13,6
Fe som Fe ₂ O ₃	% TS	7,53	8,03	12,3	13,5	9,47
K som K ₂ O	% TS	1,21	1,21	1,05	1,26	1,39
Mg som MgO	% TS	1,85	1,59	2,12	2	1,78
Mn som MnO	% TS	0,162	0,868	0,209	0,164	0,12
Na som Na ₂ O	% TS	4,67	5,87	4,31	2,58	2,72
P som P ₂ O ₅	% TS	0,827	0,901	1	0,732	0,517
Si som SiO ₂	% TS	47,6	54	45,7	48,6	61
Ti som TiO ₂	% TS	1,02	0,756	1,69	1,8	0,974
As, arsenic	mg/kg TS	13,5	12,9	22,6	13,9	12,8
Ba, barium	mg/kg TS	1420	1390	2280	2610	1510
Be, beryllium	mg/kg TS	1,36	1,26	0,872	1,31	1,5
Cd, cadmium	mg/kg TS	11,6	2,39	6,92	4,8	1,04
Co, cobolt	mg/kg TS	54,9	38,4	74,2	76	43,5
Cr, chromium	mg/kg TS	1020	728	1070	1940	768
Cu, copper	mg/kg TS	2900	1620	4400	1800	6380
Hg, mercury	mg/kg TS	0,0212	0,0109	0,0214	0,0195	<0,01
Mo, molybdenum	mg/kg TS	7,97	7,28	46,9	26,3	19,7
Nb, niobium	mg/kg TS	11,1	9,45	19,5	13,5	11,4
Ni, nickel	mg/kg TS	162	263	304	457	204
Pb, lead	mg/kg TS	292	324	542	360	343

S, sulfur	mg/kg TS	6580	4540	3680	4460	3730
Sc, scandium	mg/kg TS	3,43	3,55	2,67	3,63	3,57
Sn, tin	mg/kg TS	66,4	238	220	65,2	260
Sr, strontium	mg/kg TS	362	286	370	405	309
V, vanadium	mg/kg TS	43,7	37,2	62,4	113	42,2
W, tungsten	mg/kg TS	4,98	4,8	24,3	19,6	12,8
Y, yttrium	mg/kg TS	11,3	10,9	13,6	14,2	11,2
Zn, zinc	mg/kg TS	2600	2400	3070	1970	2390
Zr, zirconium	mg/kg TS	284	194	278	258	258
LOI 1000 °C	% TS	6,75	5,86	1,99	2,64	2,44
Totala oxider	% TS	91,6	96,1	97,1	96,1	100
Torkad substans vid 105 °C	%	86,9	88,4	89,9	88	92,4

Inledningsvis torkades proverna vid 500 °C. De torkade proverna maldes i skivkvärl enligt ISO 11464:2006. Alla metaller (utom kvicksilver) analyserades enligt SS-EN ISO 17294-2:2023. Kviksilveranalys genomfördes enligt SS-EN ISO 17852:2008. Mängden oxider och ämnen i MSWIBA-proverna uttrycktes som procentandelar av TS och mg/kg TS, respektive.

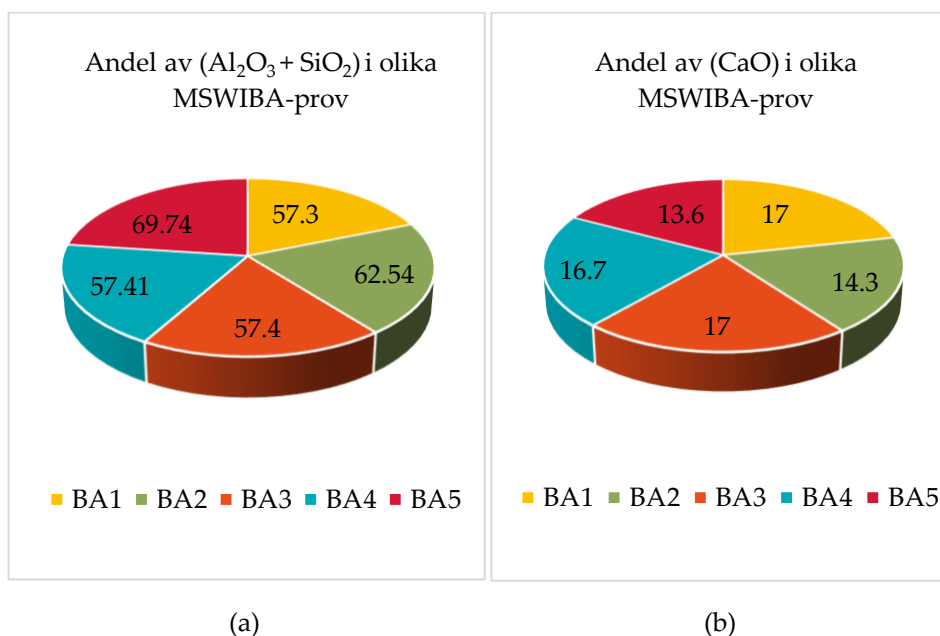
När vatten tillsätts till det konventionella cementet bryts bindningarna mellan klinkerpartiklarna och frigör värme och joner. Vattnet omvandlas sedan till en porlösning av olika joner. Beroende på klinkerns löslighet förändras koncentrationen av porlösningen. Hydrater fälls ut när porlösningarna är mättade med joner. Således omvandlas cementklinker till fasta hydrater. Denna hydrerade pasta fungerar som ett bindemedel och håller ihop ballasten. De flesta av betongens och murbrukets mekaniska egenskaper är relaterade till bindemedlets hållfasthet (Liu et al., 2023, Zhang et al., 2019).

Vissa mineraler, som aluminiumoxid (Al_2O_3), kiseldioxid (SiO_2) och kalciumoxid (CaO), spelar en avgörande roll för att utveckla betong med hög hållfasthet och hållbarhet. Cementmaterial får sina bindande egenskaper när dessa ämnen omvandlas till olika föreningar efter att ha reagerat med vatten. När kiseldioxid reagerar med kalciumoxid i närvaro av vatten, utvecklas kalciumsilikathydratbindningar som binder samman ballasten och ökar betongens hållfasthet. Betongens tidiga hållfasthet och hydratiseringens värme påverkas kraftigt av förekomsten av aluminiumoxid. Dessutom förbättrar aluminiumoxidens närvaro cementens kemiska motståndskraft. Kalciumoxid förbättrar cementets hydrauliska egenskaper och bildar kalciumaluminater och silikater. Emellertid, i en överflöd av kalciumoxid, expanderar cementet och leder så småningom till sönderfall. Förlust vid tändning (loss on ignition, LOI) mäter mängden flyktiga ämnen i provet.

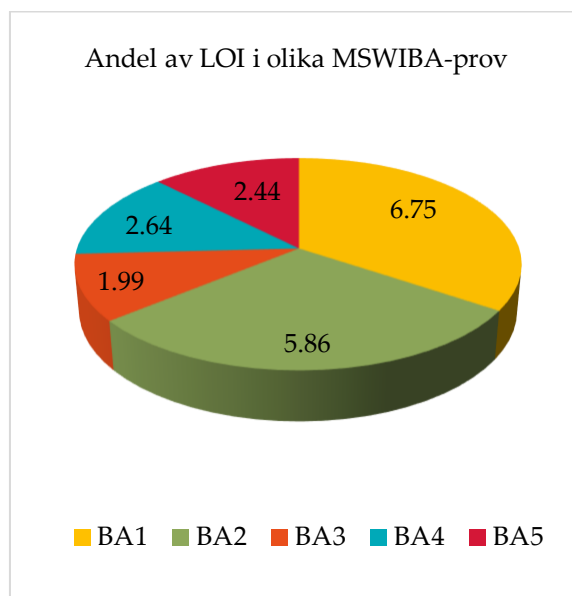
Sammanfattningsvis är kiseldioxid, kalciumoxid och aluminiumoxider integrerade delar av bildandet av bindfasen i konventionellt cement. Därför, när man väljer en ersättning för konventionellt cement, måste det valda materialet innehålla dessa ämnen i tillräcklig mängd. Dessutom bör de farliga elementen hållas på en låg nivå för att minska den miljömässiga påverkan.

Figur 10 visar andelen ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) och CaO i olika MSWIBA-prov, och figur 11 representerar närvaron av LOI i MSWIBA-prover. På grund av närvaron av föroreningar eller oförbränd kol, som indikeras som LOI i figur 11, kommer reaktiviteten att minskas, och därmed påverkas betongens hållfasthet. Mängden av alla andra oxider som finns i MSWIBA-proverna är också jämförbar.

Medan BA1 har ett bra CaO-innehåll och tillräcklig pozzolansk potential ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), visar det höga LOI-värdet närvaron av föroreningar eller oförbränd kol, vilket kan minska reaktiviteten och påverka betongens hållfasthet. Detta gör BA1 mindre fördelaktigt än BA3 och BA5. BA2 har hög pozzolansk potential på grund av sitt ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$)-innehåll, men den kommer efter BA3 på grund av lägre CaO-innehåll och ett mycket högre LOI, vilket visar att BA2 kan ha fler föroreningar och sämre cementegenskaper jämfört med BA3. BA3 ligger marginellt efter BA5 när det gäller pozzolansk aktivitet, men dess höga CaO-innehåll ger starkare cementegenskaper, vilket gör det idealiskt för utveckling av hållfasthet. BA3 har också det lägsta LOI, vilket indikerar närvaron av mycket få föroreningar, och BA5 har det näst lägsta LOI bland MSWIBA-proverna.



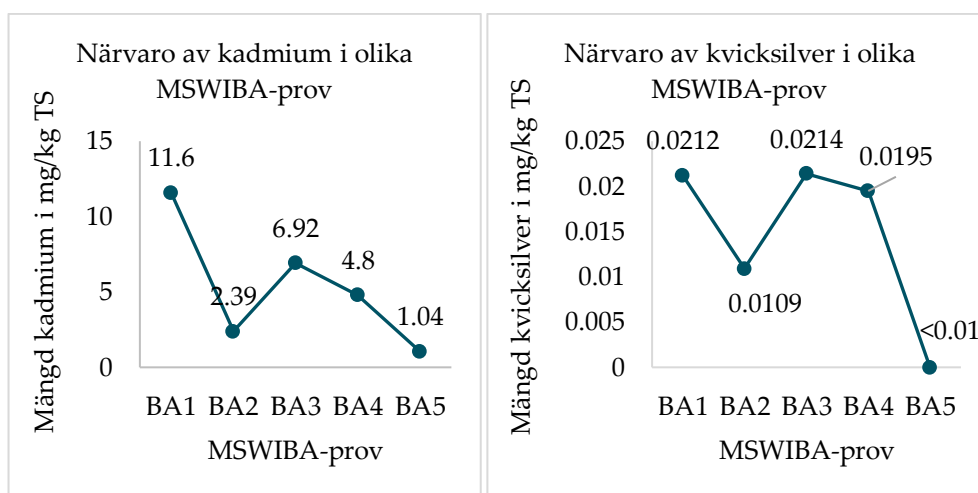
Figur 10. Andel av oxider i olika MSWIBA-prov: (a) ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$), (b) (CaO).



Figur 11. Andel av LOI i olika MSWIBA-prov.

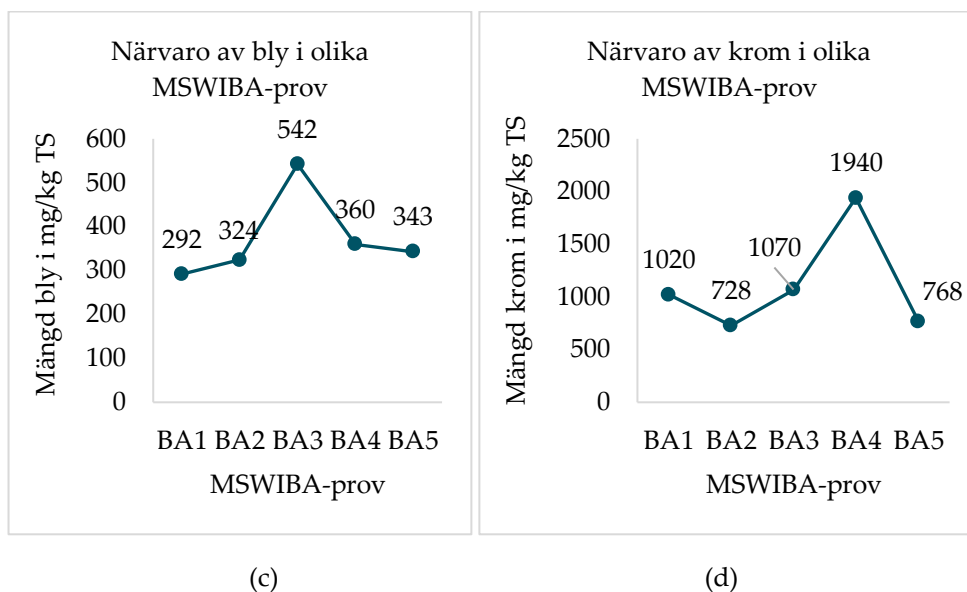
BA4 har liknande pozzolanskt potential som BA1 och BA3, och dess CaO-innehåll är ganska högt men något lägre än BA1 och BA3. Emellertid är BA4 inte lika reaktivt som BA5 och uppvisar inte jämförbara egenskaper som BA3. BA5 har det högsta pozzolanska innehållet, vilket indikerar utmärkt reaktivitet och potential att förbättra cementegenskaper. Dessutom är CaO-nivån i BA5 acceptabel, vilket ger måttliga bindande egenskaper. Den låga LOI:n i BA5 visar på färre föroreningar.

Den negativa påverkan som betong har på miljön påverkas direkt av närvaron av spårmetaller som Cd, Hg, Pb och Cr. Betongens miljöpåverkan kan minskas genom att sänka de farliga elementen i SCM. Figur 12 visar närvaron av några av de farliga spårämnena i MSWIBA-proven.



(a)

(b)



Figur 12. Andel av spårämnen i olika MSWIBA-prov: (a) kadmium, (b) kvicksilver, (c) bly, (d) krom.

BA1 uppvisar den högsta andelen kadmium jämfört med alla andra MSWIBA-prov. Även om BA1 har den lägsta andelen bly, innehåller det en betydande mängd kadmium och kvicksilver. Figur 12 visar att den totala nivån av farliga ämnen i BA2 är lägre än i alla andra prover, förutom BA5. Närvaron av farliga ämnen är högre i BA3 än i BA5. BA4 har den högsta andelen krom jämfört med alla andra prover. Dessutom är den relativa andelen av alla farliga ämnen relativt hög i BA4. BA5 har lägst andel kadmium och kvicksilver. Dessutom är andelen bly och krom även jämförbar med andra prover.

Från figur 10 kan BA5 betraktas som det mest pozzolanska materialet bland MSWIBA-proverna på grund av det högsta innehållet av ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) (69,74%). Dessutom, med en rimlig mängd CaO (13,6%), kan BA5 ha bra cementerande egenskaper. Från figur 11 visar LOI (2,44%) för BA5 att föroreningarna i provet är relativt låga. Dessutom innehöll provet BA5 en lägre andel av spårämnena.

Även om mängden ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) i BA3 (57,4%) är lägre än i BA2 och BA5, har det utmärkta cementegenskaper på grund av den höga andelen CaO (17%). Eftersom BA3 har lägst LOI (1,99%) kan det betraktas som den renaste ersättningen för cement bland alla tillgängliga MSWIBA-prover. Trots en högre andel farliga ämnen i BA3 än i BA5, kan BA3 också betraktas som ett starkt SCM, särskilt när höga cementegenskaper krävs. De sammantagna effekterna av högt LOI, lägre andel CaO eller högre nivåer av farliga ämnen i BA1, BA2 och BA4 minskar deras chanser att betraktas som lämpliga SCM. Från den ovanstående diskussionen i det aktuella kapitlet har BA3 och BA5 valts som de två mest lämpliga MSWIBA-proverna.

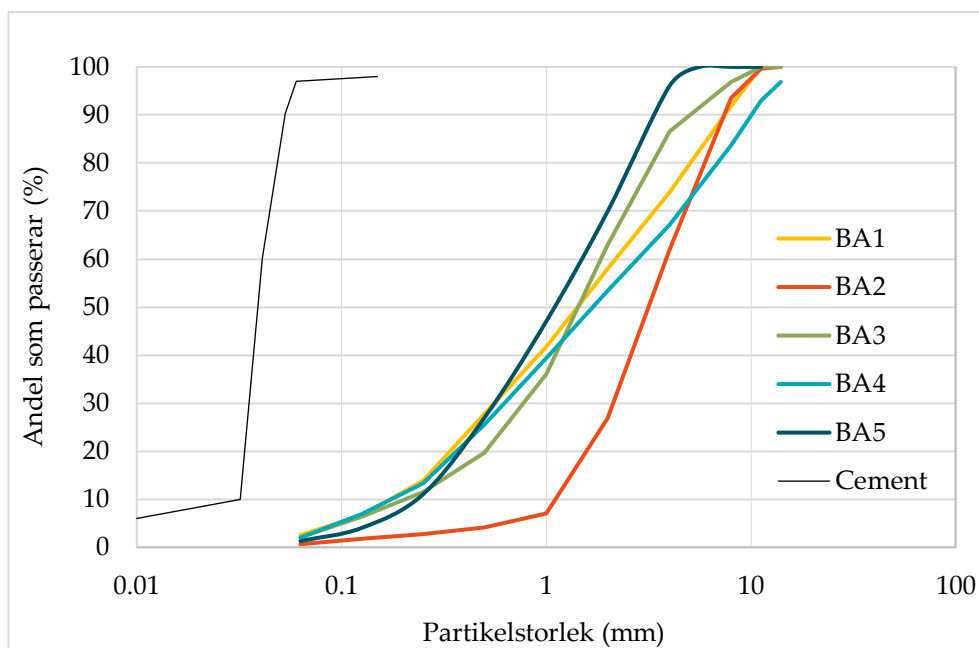
2.2 PSD FÖR RÅA MSWIBA-PROVER

PSD spelar en viktig roll vid val av SCM. Den pozzolanska aktiviteten och arbetbarheten hos betong påverkas i stor utsträckning av partikelstorleken i SCM och deras fördelning. Alla MSWIBA-prover siktades för PSD vid Vattenfall.

De silar som beaktades för analysen var 14 mm, 11,2 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm och 0,063 mm. Efter siktningen vägdes det kvarvarande provet på varje sil i gram. Procentandel av vikt som behölls på varje sil, kumulativ procentandel av vikt som behölls och procentandelen finare material för varje prov beräknades.

Figur 13 visar en jämförelse av PSD-kurvorna för traditionellt cement och MSWIBA-prover. Figuren visar att PSD-kurvorna för BA5 och BA3 ligger närmare PSD-kurvan för traditionellt cement än de andra proverna.

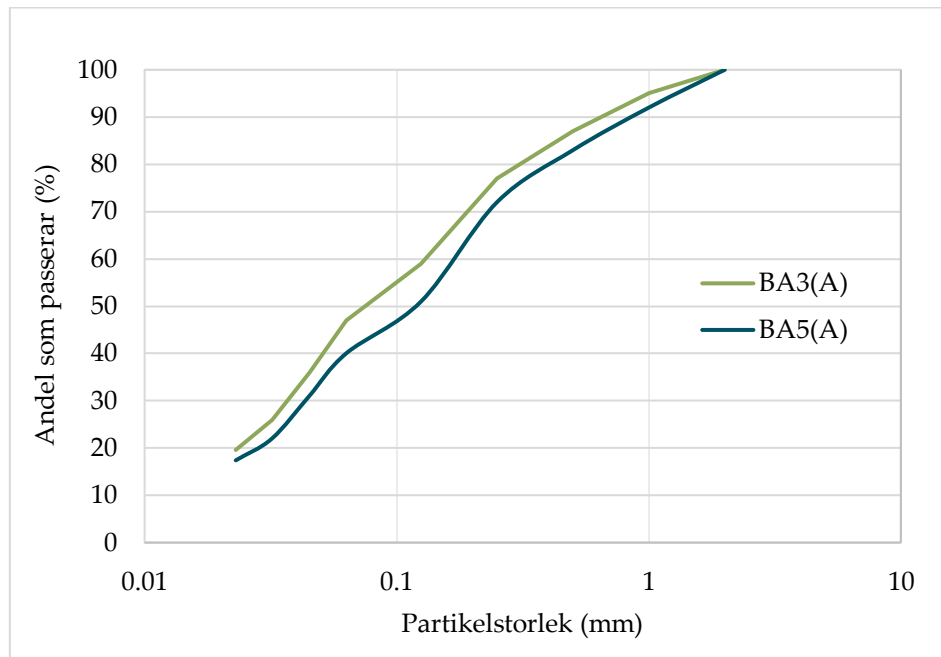
Baserat på XRD-analysen och PSD har BA1, BA2 och BA4 uteslutits från vidare analys. Testresultaten visar tydligt att BA3 och BA5 är mer lovande än de andra proverna och har potential att användas som mer hållbara SCM. Dessutom ligger PSD-kurvorna för BA3 och BA5 närmare cementets kurva än de andra MSWIBA-provernas.



Figur 13. PSD-kurvor för cement och MSWIBA-prover.

2.3 PSD FÖR AKTIVERADE MSWIBA-PROVER

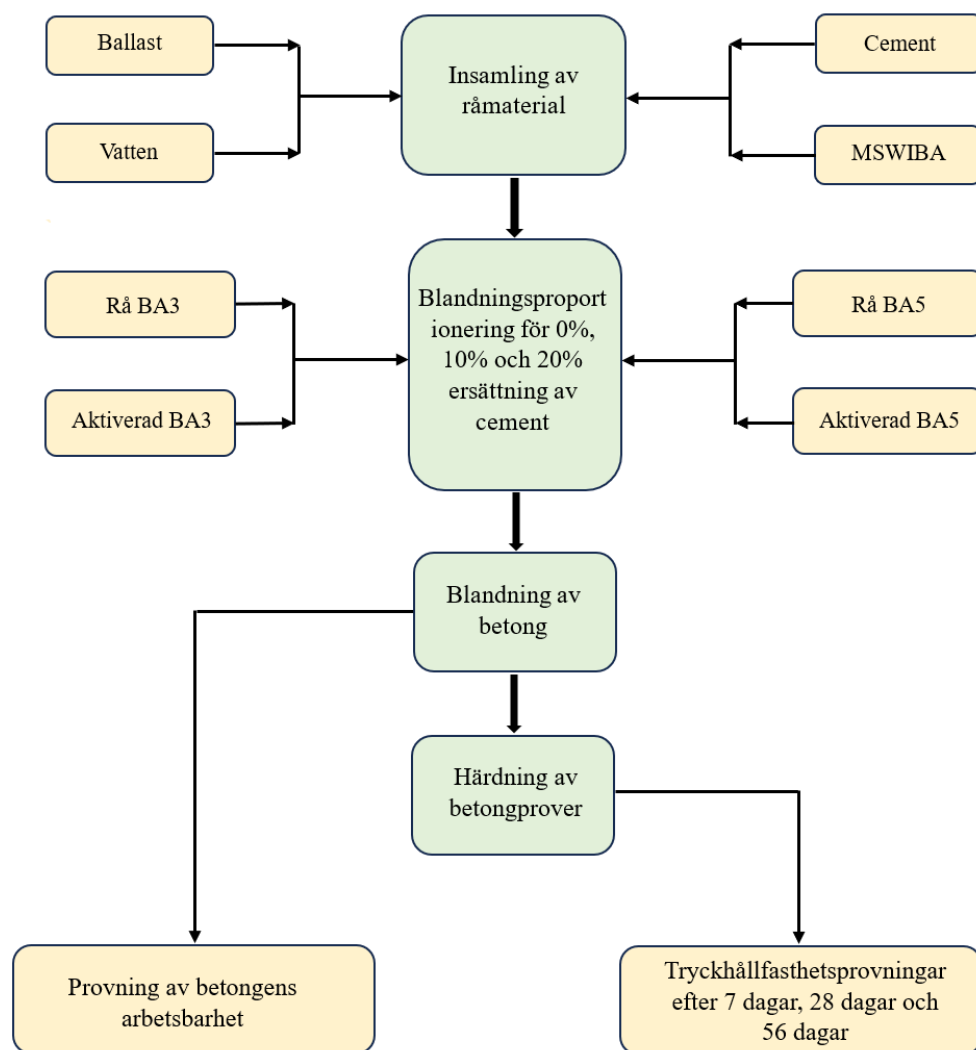
Aktivering utfördes för de valda MSWIBA-proven BA3 och BA5. Förfarandet för aktivering beskrivs i detalj i kapitel 3. PSD-kurvorna för de aktiverade BA3- och BA5-proverna visas i figur 14.



Figur 14. PSD-kurvor för aktiverade prover BA3 och BA5, betecknade som BA3(A) och BA5(A).

3 Betongrecept och metodik

Detta kapitel presenterar betongreceptet och metodiken för arbetet. I detta projekt ersattes 10% och 20% av cementen med råa och aktiverade BA3- och BA5-MSWIBA-prover. Den metodik som användes för arbetet illustreras i figur 15.



Figur 15. Arbetets metodik.

3.1 AKTIVERING AV MSWIBA-PROVER

De utvalda MSWIBA-proverna (BA3 och BA5) aktiverades på Vattenfall med en vibrerande koppkvarn, som visas i figur 16.



Figur 16. Vibrerande koppkvarn.

Ungefär 30–40 gram av MSWIBA-provet placerades i koppen och vibrerades. Efter en minut togs koppen bort från kvarnen, och det aktiverade provet överfördes till en påse. Återigen tillsattes 30–40 gram av provet i koppen och vibrerades i en minut. Processen upprepades tills den erforderliga mängden prover hade erhållits. Figur 17 visar MSWIBA-proverna före och efter aktivering.



(a)



(b)

Figur 17. MSWIBA-prover före och efter aktivering: (a) BA3, (b) BA5.

3.2 PROPORTIONERING AV BETONGBLANDNINGAR

Syftet med proportioneringen av betongblandningar är att utveckla hållbar betong med önskad hållfasthet och beständighet genom att blanda komponenterna i rätt proportioner. En kontrollblandning utan cementersättning framställdes för att jämföra egenskaperna hos betong med och utan SCM. 10% och 20% av cementen ersattes med råa och aktiverade MSWIBA-prover, BA3 och BA5. Vatten-cementförhållandet hölls konstant vid 0,54 för alla blandningar. Densiteten för ballast och cement var 2,65 ton/m³ respektive 3,1 ton/m³, och fukthalten för grov- och finballast var 2,2% respektive 1,9%. Tabell 4 visar proportioneringen av blandningarna för betong med och utan cementersättning. Blandnings-ID beskriver typen av MSWIBA och ersättningsprocenten. Till exempel betecknar BA3(10R) blandnings-ID för betongprover där cement ersatts med rå BA3 och ersättningsprocenten är 10%, medan BA3(10A) anger ersättning av cement med 10% aktiverad MSWIBA.

Tabell 4. Proportionering av blandning för varje betongsats.

Beståndsdelar	Kontrollblandning	Blandnings ID	
		BA3(10R), BA3(10A), BA5(10R), BA5(10A)	BA3(20R), BA3(20A), BA5(20R), BA5(20A)
Cement (kg)	6,65	5,99	5,32
MSWIBA (kg)	0	0,67	1,33
Vatten (kg)	3,63	3,63	3,63
Grov ballast (kg)			
8–16 mm	13,26	13,26	13,26
0–8 mm	11,19	11,19	11,19
4–8 mm	3,79	3,79	3,79
Fin ballast (kg)			
0–2 mm	6,26	6,26	6,26

3.3 GJUTNING OCH HÄRDNING AV BETONGPROVER

Tabell 5 visar antalet betongprover som gjordes i projektet. Totalt gjordes 81 betongprover för att testa deras tryckhållfasthet vid 7, 28 och 56 dagar.

Tabell 5. Detaljer för gjutna betongprover.

Prover	Rå MSWIBA som ersättning för cement		Aktiverad MSWIBA som ersättning för cement		Totalt antal prover
	10%	20%	10%	20%	
Antal BA3-betongprover	9	9	9	9	36
Antal BA5-betongprover	9	9	9	9	36
Antal kontrollbetongprover					9
Totalt antal prover					81

Figur 18 visar formar av storleken 100 mm × 100 mm × 100 mm som användes för att gjuta betongproverna.



Figur 18. Formar för gjutning av betongprover.

Blandningen gjordes i Rojo 25-blandaren. Först tillsattes de torra komponenterna för betongen i blandaren och blandades i ungefär en minut. Därefter tillsattes den nödvändiga mängden vatten och blandades i fem minuter, som visas i figur 19. Konsistensen hos den färska betongblandningen mättes med hjälp av en sättkon. Den färska betongblandningen hälldes sedan i formarna. Formarna fyllda med färsk betong visas i figur 20. De gjutna betongproverna vibrerades i några sekunder på ett vibrerande bord.



Figur 19. Blandning av betong.



Figur 20. Formar med färsk betong.

Efter 24 timmar togs betongproverna bort från formarna. Betongkuberna placerades sedan på en hylla med rinnande vatten. Efter fem dagar togs proverna bort från hyllan och förvarades i ett klimatkontrollerat rum med en konstant

4 Resultat och diskussion

Detta kapitel presenterar och diskuterar de olika testerna som genomfördes på färsk och härdad betong.

4.1 PROVNING AV FÄRSK BETONG

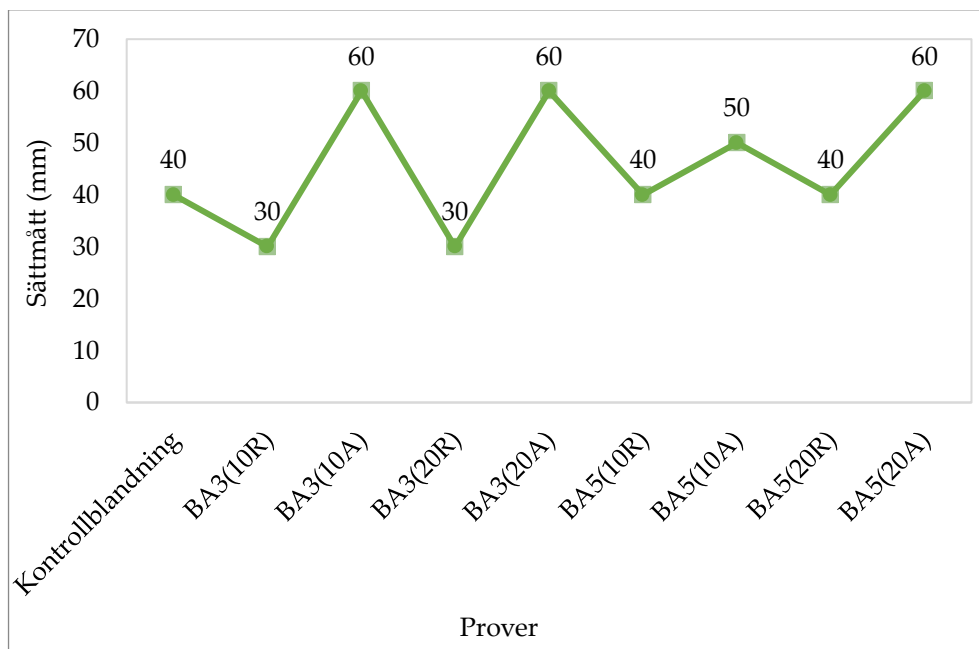
Arbetsbarheten hos färsk betong testades genom ett sättmått baserat på SS-EN 12350-2:2019, som visas i figur 22. Inledningsvis togs överskott av fukt bort från sättkonen och basplattan med en trasa. Konen hölls stadigt på basplattan genom att balansera på fotdelarna på vardera sidan av konen. Konen fylldes med tre lager färsk betong. Efter varje lager kompakterades betongen med en bearbetningsstång i 25 slag. Vid kompaktering av det första lagret lades särskild vikt vid att bearbetningsstång inte fick vidröra basen. För att slagen skulle tränga igenom det omedelbara underlaget kompakterades andra och tredje lagret över hela sin utsträckning. Innan det tredje lagret kompakterades, fylldes betongen ovanför konens yta.



Figur 22. Arbetbarhetstest på färsk betong.

Figur 23 visar sättmåttet för olika blandningar. Kontrollblandningen visade ett sättmått på 40 mm. För betong med delvis ersättning av cement med rå BA3, blandningar BA3(10R) och BA3(20R), minskade sättmåttet med 25% jämfört med kontrollblandningen. Denna minskning kan bero på flakigheten hos det råa BA3-provet jämfört med cement. När cement ersattes med aktiverat BA3 (BA3(10A) och BA3(20A)), ökade sättmåttet med 50% jämfört med kontrollblandningen. Dessutom var sättmåttet oberoende av procentandelen av cementsättningen med BA3. Vid ersättning av cement med rå BA5 förblev arbetsbarheten i blandningarna

BA5(10R) och BA5(20R) densamma som för kontrollblandningen. Arbetbarheten ökade med 25% respektive 50% för proverna BA5(10A) och BA5(20A).



Figur 23. Jämförelse av sättningsdjup för olika betongprover.

Ökningen i arbetbarheten kan bero på bildandet av rundformade vätebubblor som ett resultat av reaktionen mellan olika metallkomponenter som aluminium och zink i MSWIBA-proverna. På grund av spridningen av dessa vätebubblor minskar friktionen mellan partiklarna och ökar arbetbarheten hos betongen. Även om den ökade arbetbarheten gör hanteringen av betongen enklare, kan detta orsaka att betongen expanderar och ökar dess permeabilitet, vilket i slutändan minskar dess hållfasthet och hållbarhet (Kowalski et al., 2017, Xuan och Poon, 2018, Pera et al., 1997, Zhang et al., 2019).

4.2 PROVNING AV HÄRDAD BETONG

Härdade betongprover testades för tryckhållfasthet vid 7-, 28- och 56-dagars ålder, baserat på SS-EN 12390-3, som visas i figur 24. För varje blandning testades 3 kuber för tryckhållfasthet, och medelvärdet av de tre erhållna värdena användes som tryckhållfastheten för blandningen. Ett prov efter tryckhållfasthetstestet visas i figur 25.



Figur 24. Tryckhållfasthetsprovning.



Figur 25. Prov efter tryckhållfasthetsprovning.

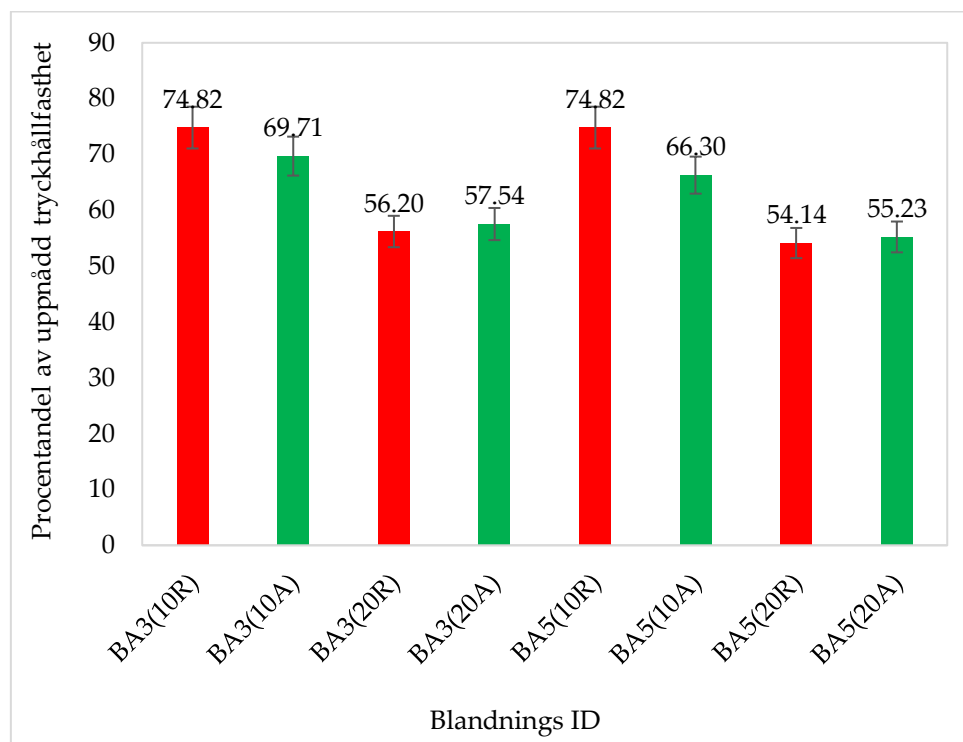
Tabell 6 listar de 7-dagars tryckhållfasthetsvärden för varje betongprov. Provets densitet minskade med en ökning av andelen ersättning av cement med MSWIBA. Detta överensstämde med studien som genomfördes av Lynn et al. (2016). Figur 26 visar en grafisk jämförelse av andelen 7-dagars tryckhållfastheter som uppnåddes av olika blandningar jämfört med kontrollblandningen. Andelen tryckhållfastheter för råa betongprover och aktiverade betongprover i förhållande till kontrollbetongprovet visas respektive i färgerna röd och grön.

Tabell 6. 7-dagars tryckhållfasthetsresultat för olika betongprover.

Blandnings ID	Genomsnittlig densitet för prov (kg/m ³)	Tryckhållfasthet för prov 1 (MPa)	Tryckhållfasthet för prov 2 (MPa)	Tryckhållfasthet för prov 3 (MPa)	Genomsnittlig tryckhållfasthet (MPa)
Kontrollblandning	2327	26,7	27,5	28,1	27,4
BA3(10R)	2317	21,4	20,8	19,3	20,5
BA3(10A)	2290	19,3	19,4	18,6	19,1
BA3(20R)	2267	14,6	15,6	16,0	15,4
BA3(20A)	2273	15,8	15,6	15,9	15,8
BA5(10R)	2307	20,6	20,6	20,2	20,5
BA5(10A)	2280	19,8	21,1	13,6	18,2
BA5(20R)	2297	14,9	14,5	15,1	14,8
BA5(20A)	2267	15,0	14,9	15,5	15,1

På den 7:e dagen uppvisade kontrollprovet en tryckhållfasthet på 27,4 MPa. När cement ersattes med rå BA3 och BA5, uppnådde proverna BA3(10R) och BA5(10R) cirka 75% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet. Hållfastheten minskade ytterligare när ersättningsprocenten av rå MSWIBA ökade från 10% till 20%. Genom att använda 20% rå BA3 och BA5 uppnådde proverna BA3(20R) och BA5(20R) 56,20% respektive 54,14% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet. När 10% aktiverad BA3 och BA5 användes, uppnådde provet BA3(10A) 69,71% och provet BA5(10A) uppnådde 66,30% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet. Genom att ersätta 20% av cementet med aktiverad BA3 och BA5 uppnådde provet BA3(20A) 57,54% och provet BA5(20A) uppnådde 55,23% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet.

När 10% av cementet ersattes med MSWIBA, visade betongen blandad med rå MSWIBA högre tryckhållfasthet än betongen blandad med aktiverad MSWIBA. Provet BA3(10R) uppnådde 7,3% högre tryckhållfasthet än provet BA3(10A), medan provet BA5(10R) uppnådde 12,84% högre tryckhållfasthet än provet BA5(10A). Detta indikerar att aktiveringen av MSWIBA hade en negativ inverkan på tryckhållfastheten för 10% ersättning av cement. För prover med 20% MSWIBA visade blandningen som innehöll aktiverad MSWIBA en något högre hållfasthet (ungefär 2%) än blandningen med rå MSWIBA. Detta visar att när ersättningsprocenten ökade, hade aktiveringen av MSWIBA en något positiv inverkan på tryckhållfastheten.



Figur 26. Procentandel av 7-dagars tryckhållfasthet uppnådd av varje blandning jämfört med kontrollblandningen.

Figur 26 visar att proverna BA3(10R) och BA5(10R) med 10% ersättning av cement med rå MSWIBA uppvisade den högsta 7-dagars tryckhållfastheten, följt av proverna BA3(10A), BA5(10A), BA3(20A), BA3(20R), BA5(20A) och BA5(20R). Dessutom visade alla betongblandningar med MSWIBA att blandningen med BA3 presterade bättre än blandningen med BA5. Detta kan bero på att BA3 innehåller en högre mängd CaO än BA5. CaO reagerar snabbt med vatten och bildar kalciumsilikathydratbindningar, vilket ger tidig hållfasthet till betongen med BA3 (Ju et al., 2020).

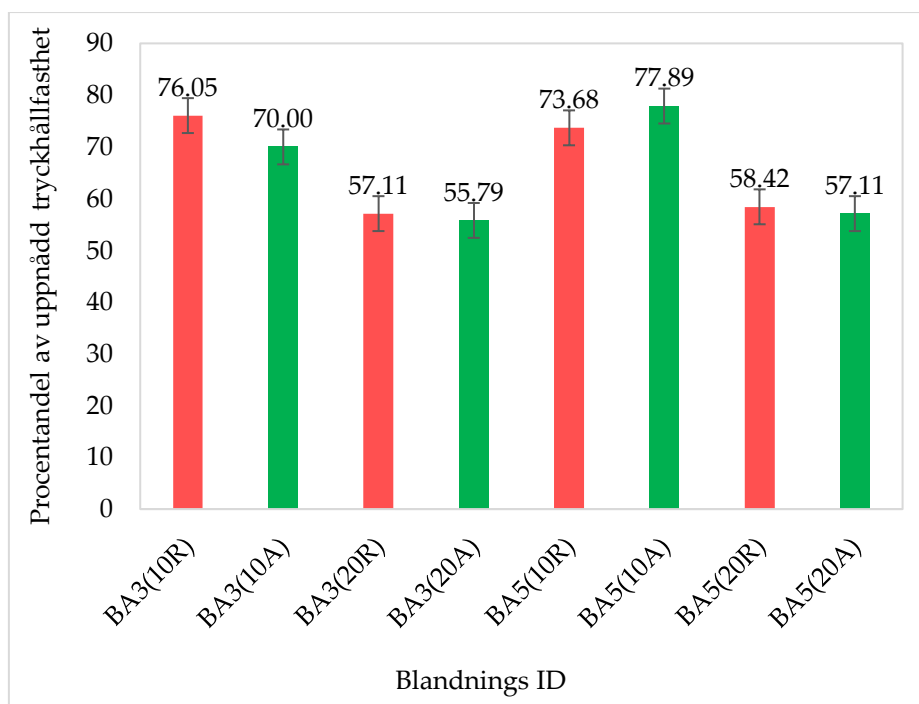
Tabell 7 visar 28-dagars tryckhållfasthetsresultatet för varje prov för olika blandningar, och figur 27 representerar procentandelen av den tryckhållfasthet som uppnåddes av varje blandning jämfört med kontrollblandningen.

Kontrollprovet hade en 28-dagars tryckhållfasthet på 38 MPa. Vid användning av 10% rå BA3 och BA5 i stället för cement uppnådde proverna BA3(10R) och BA5(10R) 76,05% respektive 73,68% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet. Men med tillsättning av 10% aktiverad BA5 och BA3 uppnådde provet BA5(10A) 77,89% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet, medan provet BA3(10A) fick 70% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet. Genom att ersätta 20% av cementet med rå MSWIBA uppnådde proverna BA3(20R) och BA5(20R) 57,11% respektive 58,42% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet. 55,79% respektive 57,11% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet uppnåddes av proverna BA3(20A) och BA5(20A), när 20% av cementet ersattes med aktiverad BA3 och BA5.

När 10% av cementet ersattes med rå och aktiverad MSWIBA, uppnådde provet BA3(10R) 8,65% högre tryckhållfasthet än provet BA3(10A), medan provet BA5(10A) fick 5,71% högre tryckhållfasthet än provet BA5(10R).

Tabell 7. 28-dagars tryckhållfasthet för olika betongblandningar.

Blandnings ID	Genomsnittlig densitet för prov (kg/m ³)	Tryckhållfasthet för prov 1 (MPa)	Tryckhållfasthet för prov 2 (MPa)	Tryckhållfasthet för prov 3 (MPa)	Genomsnittlig tryckhållfasthet (MPa)
Kontrollblandning 2330		37,5	38,0	38,5	38
BA3(10R)	2263	29,0	28,8	29,0	28,9
BA3(10A)	2263	26,8	26,4	26,6	26,6
BA3(20R)	2240	22,3	21,5	21,3	21,7
BA3(20A)	2250	21,4	20,6	21,6	21,2
BA5(10R)	2263	28,0	27,0	28,9	27,9
BA5(10A)	2280	29,9	29,3	29,6	29,6
BA5(20R)	2230	22,6	21,4	22,7	22,2
BA5(20A)	2230	21,6	21,6	21,8	21,7



Figur 27. Procentandel av 28-dagars tryckhållfasthet uppnådd av varje blandning jämfört med kontrollblandningen.

Figur 27 visar att proverna BA5(10A) med 10% ersättning av cement med aktiverad BA5 uppvisade den högsta 28-dagars tryckhållfastheten, följt av BA3(10R), BA5(10R), BA3(10A), BA5(20R), BA5(20A), BA3(20R) och BA3(20A). För blandningar med 10% rå MSWIBA uppvisade provet med BA3 bättre prestanda än provet med BA5. Men för alla andra blandningar visade proverna med BA5 högre tryckhållfasthet än proverna med BA3.

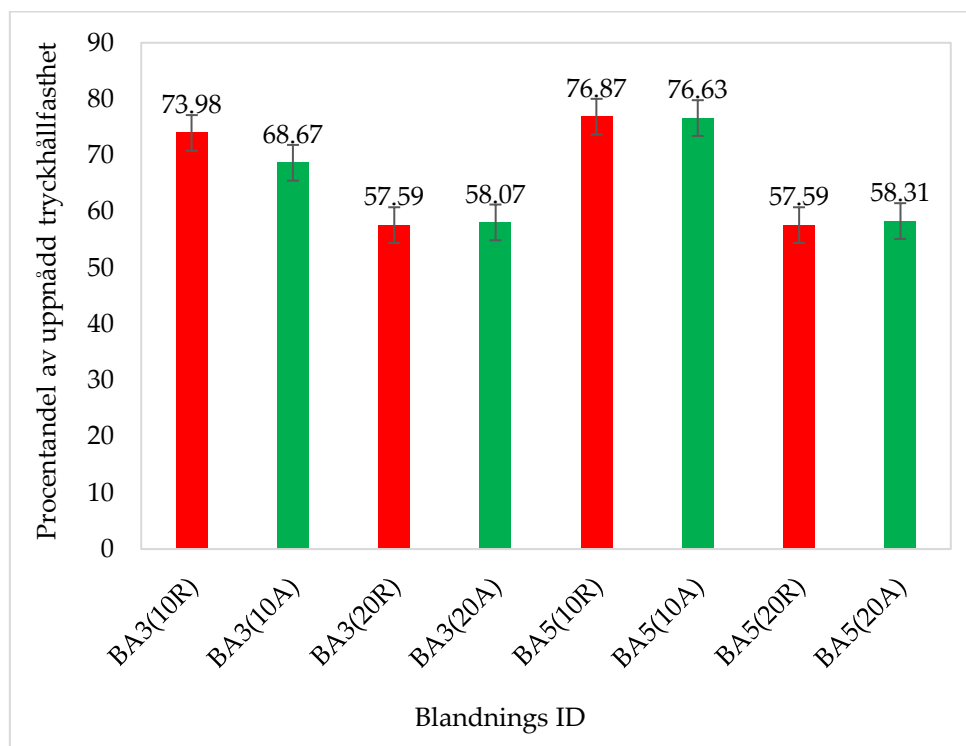
Tabell 8 visar 56-dagars tryckhållfasthetsresultat för varje prov för olika blandningar, och procentandelen av 56-dagars tryckhållfasthet som uppnåddes av varje blandning jämfört med kontrollblandningen illustreras i figur 28.

Tabell 8. 56-dagars tryckhållfasthet för olika betongblandningar.

Blandnings ID	Genomsnittlig densitet för prov (kg/m ³)	Tryckhåll fasthet för prov 1 (MPa)	Tryckhåll fasthet för prov 2 (MPa)	Tryckhåll fasthet för prov 3 (MPa)	Genomsnittlig tryckhållfasthet (MPa)
Kontrollblandning	2310	41,2	42,1	41,1	41,5
BA3(10R)	2240	30,0	31,3	30,8	30,7
BA3(10A)	2257	27,7	29,4	28,3	28,5
BA3(20R)	2220	24,1	23,9	23,7	23,9
BA3(20A)	2220	24,1	24,4	23,9	24,2
BA5(10R)	2267	31,2	31,6	32,8	31,9
BA5(10A)	2250	31,8	32,3	31,2	31,8
BA5(20R)	2233	23,9	24,1	23,6	23,9
BA5(20A)	2250	24,5	24,6	23,6	24,2

Densiteten för kontrollblandningen var 2310 kg/m³. När ersättningsprocenten ökade minskade densiteten för båda MSWIBA-proverna BA3 och BA5. Detta innebär att lättare betong kan tillverkas genom att ersätta cement med MSWIBA. 56-dagars tryckhållfasthet för kontrollprovet var 41,5 MPa. Proverna BA5(10R) och BA5(10A) med 10% ersättning av cement med rå och aktiverad BA5 uppvisade 76,87% respektive 76,63% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet. Samtidigt visade proverna BA3(10R) och BA3(10A) med 10% ersättning av cement med rå och aktiverad BA3 73,98% respektive 68,67% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet. När 20% av cementen ersattes med rå BA3 och BA5, uppvisade proverna BA3(20R) och BA5(20R) 57,59% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet. Däremot, med användning av aktiverad BA3 och BA5, visade proverna BA3(20A) och BA5(20A) 58,07% respektive 58,31% av tryckhållfastheten hos kontrollprovet.

56-dagars tryckhållfasthet för proverna med rå och aktiverad MSWIBA visade jämförbara resultat för alla blandningar utom betong med 10% ersättning av cement med BA3. Provet BA3(10R) uppnådde 7,72% högre tryckhållfasthet än provet BA3(10A).



Figur 28. Procentandel av 56-dagars tryckhållfasthet uppnådd av varje blandning jämfört med kontrollblandningen.

När ersättningsprocenten av cement med MSWIBA-prover ökade, minskade tryckhållfastheten, vilket är i linje med studier från olika forskare. Detta kan bero på en minskning av mängden hydratiseringsprodukter som resultat av minskningen av cementinnehållet med en ökning av mängden MSWIBA-prover (Chu et al., 2024, Brito och Kurda, 2021). Bildandet av vätebubblor i betongblandningar med MSWIBA kan försvaga kalciumsilikathydratstrukturen (Cheng et al., 2024). Dessutom skapar vissa MSWIBA-partiklar ett gränsskikt på de produkter som bildas som resultat av hydrering, vilket försvagar bindningarna och därmed minskar tryckhållfastheten. Vidare kan närvaron av vissa tungmetaller påverka strukturens stabilitet (Wang et al., 2020).

Från 56-dagars tryckhållfasthetsresultat visade provet BA5(10R) med 10% ersättning av cement med BA5 den högsta hållfastheten bland alla betongblandningar med MSWIBA. Alla betongblandningar med BA5 visade bättre prestanda än betongblandningar med BA3 för samma ersättningsprocent. Detta kan bero på närvaron av högre mängder CaCO_3 och lägre mängder Al_2O_3 i provet BA5 än i provet BA3. Närvaron av CaCO_3 har en positiv effekt på hydreringen av cement. Dessutom kan närvaron av högre Al_2O_3 långsamt initiera sprickor och porer (Cheng et al., 2024). Även om CaO är högre i BA3, bidrar det inte aktivt till den pozzolanska reaktionen på grund av dess stabila kristallina struktur (Cheng et al., 2024). Dessutom är närvaron av silikathaltiga material högre i BA5 än i BA3, vilket gör det mer potentiellt reaktivt än BA3. Närvaron av tungmetaller är högre i BA3 än i BA5, vilket förhindrar C3S-upplösning i BA3 och hindrar bildandet av kalciumsilikathydratbindningar.

Tryckhållfastheten hos betongblandningar med samma procent och typ av MSWIBA visade jämförbar hållfasthet för råa och aktiverade MSWIBA. För 10% ersättning av cement med MSWIBA visade betongblandningarna med rå MSWIBA högre tryckhållfasthet än betongblandningarna med aktiverad MSWIBA. Men för 20% MSWIBA visade blandningarna med aktiverad MSWIBA en liten ökning av tryckhållfastheten (ungefär 1%) jämfört med blandningarna med rå MSWIBA. Detta ger en inblick i att aktiveringen av MSWIBA inte hade någon signifikant effekt på tryckhållfastheten hos betongblandningarna. För betongblandningar med rå och aktiverad MSWIBA som ersättning för cement, visade betongproverna BA5(10R) och BA5(10A) den högsta tryckhållfastheten.

Tabell 9 visar procentandelen av tryckhållfasthetsökningen för olika blandningar med en ökning av härdningstiden. Kontrollprovet visade en tryckhållfasthet på 27,40 MPa, 38 MPa och 41,50 MPa vid 7-, 28- och 56-dagars provning, respektive, och visade en tryckhållfasthetsökning på 38,69% och 9,21% vid 28- och 56-dagars provning. Betongblandningen med 10% aktiverad BA5 (BA5(10A)) visade den största ökningen av tryckhållfastheten vid 28 dagar jämfört med 7 dagar. En ökning på 62,94% av tryckhållfastheten noterades för provet BA5(10A) vid 28 dagar jämfört med 7 dagar. Betongblandningarna BA3(10R), BA3(10A), BA3(20R), BA5(10A), BA5(20R) och BA5(20A) visade högre ökningsgrad av tryckhållfastheten vid 28 dagar än kontrollprovet. Prover med 10% BA3 (råa och aktiverade), BA3(10R) och BA3(10A), visade minimala skillnader i tryckhållfasthetsökning. När cement ersattes med 20% BA3 visade BA3(20R) en högre tryckhållfasthetsökning (40,91%) än BA3(20A) (34,46%). Vid 56 dagar visade BA3(20A) dock en större ökning av tryckhållfastheten (13,68%) jämfört med BA3(20R) (10,14%).

Provet BA5(10A) visade en ökning på 26,35% i tryckhållfasthet jämfört med BA5(10R) vid 28 dagar, medan vid 56 dagar visade BA5(10R) en 6,5% högre ökning av tryckhållfastheten än BA5(10A). Tryckhållfasthetsökningen för BA5(20R) och BA5(20A) var 49,66% respektive 43,39% vid 28 dagar och 7,66% respektive 11,52% vid 56 dagar. För 20% ersättning av cement med BA3 och BA5 visade betongblandningarna med rå MSWIBA mer tryckhållfasthetsökning vid 28 dagar än blandningarna med aktiverad MSWIBA, men för 56 dagar uppnådde blandningarna med aktiverad MSWIBA en högre procentandel i tryckhållfasthetsökningen. Betongblandningarna med 10% ersättning av BA3 (råa och aktiverade) visade högre tryckhållfasthetsökning vid 28 dagar och lägre hållfasthetsökning vid 56 dagar än blandningarna med 20% BA3. Detta kan bero på den fördröjda pozzolanska aktiviteten hos provet med 20% BA3, på grund av minskningen av cementinnehållet.

Tabell 9. Procentuell ökning av hållfasthet för olika betongblandningar.

Blandnings ID	7-dagars hållfasthet (MPa)	28-dagars hållfasthet (MPa)	Procentuell ökning i hållfasthet vid 28 dagar	56-dagars hållfasthet (MPa)	Procentuell ökning i hållfasthet vid 56 dagar
Kontrollblandning	27,40	38	38,69	41,50	9,21
BA3(10R)	20,50	28,90	40,98	30,70	6,23
BA3(10A)	19,10	26,60	39,27	28,50	7,14
BA3(20R)	15,40	21,70	40,91	23,90	10,14
BA3(20A)	15,77	21,20	34,46	24,10	13,68
BA5(10R)	20,50	28	36,59	31,90	13,93
BA5(10A)	18,17	29,60	62,94	31,80	7,43
BA5(20R)	14,83	22,20	49,66	23,90	7,66
BA5(20A)	15,13	21,70	43,39	24,20	11,52

För ersättning av cement med 10% rå MSWIBA visade BA3(10R) en 4,39% högre ökning i hållfasthet jämfört med BA5(10R) vid 28 dagar, och BA5(10R) uppnådde en 7,70% ökning i hållfasthet jämfört med BA3(10R) vid 56 dagar. Men med 10% aktiverad MSWIBA uppvisade provet BA5(10A) en betydande ökning i hållfasthet (23,67%) jämfört med blandningen BA3(10A) vid 28 dagar, men vid 56 dagar var skillnaden i hållfasthetsökningen minimal. När ersättningen var 20% visade blandningen med BA5 (både rå och aktiverad) en högre hållfasthetsökning (ungefär 8,8%) än blandningen med BA3 vid 28 dagar, och vid senare härdningstider (56 dagar) var hållfasthetsökningen något högre för BA3 (ungefär 2,3%) än BA5. För blandningar med 20% MSWIBA var procentandelen i hållfasthetsökningen högre med BA5 än blandningar med BA3 vid 28 dagars härdning, men för senare härdningstider var hållfasthetsökningen något högre för prov med BA3 än prov med BA5.

För alla blandningar var den procentuella ökningen i hållfasthet vid 28 dagar större än hållfasthetsökningen vid 56 dagar. Prover med rå BA3 visade en högre hållfasthetsökning vid 28 dagar än prover med aktiverat BA3, medan hållfasthetsökningen vid 56 dagar var större för prover med aktiverat BA3. Vid 10% BA5 var den procentuella ökningen i hållfasthet vid 28 dagar högre för blandningen med aktiverat BA5 jämfört med blandningen med rå BA5. Dock uppvisade blandningen med rå BA5 en högre hållfasthetsökning vid 56 dagar. I kontrast observerades en motsatt trend för 20%-ersättningen av BA5, där blandningen med rå BA5 visade en högre hållfasthetsökning vid 28 dagar, medan blandningen med aktiverad BA5 visade större hållfasthetsökning vid 56 dagar. Dessutom visade dessa jämförelser att prover med BA5 uppvisade en måttlig initial hållfasthetsutveckling på grund av den accelererade pozzolanska

reaktionen, och prover med BA3 fortsatte att öka hållfastheten långsamt över lång tid på grund av den gradvisa pozzolanska reaktionen.

5 Slutsatser

Detta projekt undersökte potentialen att använda MSWIBA som ett substitut för cement i klimatiförbättrad betong. Fokus låg på de mineralogiska beståndsdelarna och de fysiska egenskaperna hos MSWIBA från fem olika källor. MSWIBA-prov från fem olika platser samlades in och beaktades för denna studie. Närvaron av olika mineraler som Al_2O_3 , CaO , SiO_2 och CaCO_3 , samt den amorfa naturen, tyder på att MSWIBA har pozzolanska egenskaper. De olika slutsatserna från detta arbete sammanfattas nedan:

- Efter att ha genomfört XRD-analys och PSD valdes MSWIBA-proverna BA3 och BA5 för vidare studier.
- Betongblandningen med delvis ersättning av cement med aktiverad MSWIBA uppvisade högre bearbetbarhet än kontrollblandningen. Bearbetbarheten ökade med 50% för blandningar med 10% och 20% aktiverad BA3 och med 20% aktiverad BA5 jämfört med kontrollblandningen. När 10% av cementet ersattes med rå BA3 minskade bearbetbarheten med 25% jämfört med kontrollblandningen, men för blandningen med 10% och 20% rå BA5 var bearbetbarheten densamma som för kontrollblandningen. Ökningen i bearbetbarheten gör betongen lättare att arbeta med, men kan också orsaka expansion och öka porositeten i betongen och därmed minska hållfastheten.
- När andelen cementersättning med MSWIBA ökade, minskade densiteten för betongproverna. För storskaliga projekt är lättare betong lättare att hantera och placera än tyngre betong. Densitetsminskningen förbättrar även strukturens seismiska prestanda genom att minska den totala vikten.
- Kontrollblandningen uppvisade en 7-dagars tryckhållfasthet på 27,4 MPa. Betongblandningen med 10% rå BA3 och BA5 uppnådde cirka 75% av kontrollblandningens tryckhållfasthet. När 10% av cementet ersattes med aktiverad BA3 och BA5, uppnådde proverna 69,71% respektive 66,30% av kontrollprovet hållfasthet. När cementersättningen ökade till 20%, minskade tryckhållfastheten i betongblandningen, och alla prover visade mindre än 60% av kontrollprovet hållfasthet. Blandningen med rå MSWIBA uppvisade högre tryckhållfasthet än blandningen med aktiverad MSWIBA vid 10% cementersättning, medan vid 20% cementersättning visade betongblandningen med aktiverad MSWIBA högre tryckhållfasthet än blandningen med rå MSWIBA. Blandningar med BA3 visade högre ökning av tryckhållfastheten efter 7 dagar jämfört med blandningar med BA5, på grund av den högre andelen CaO i BA3, vilket påskyndade bildningen av kalciumsilikathydrater.
- 28-dagars tryckhållfasthet för kontrollblandningen var 38 MPa. Tryckhållfastheten för betongblandningen med 10% rå BA3 och BA5 var 76,05% respektive 73,68% av kontrollblandningens hållfasthet. Betongblandningen med 10% aktiverad BA3 och BA5 uppvisade 70% respektive 77,89% av kontrollblandningens tryckhållfasthet. För betong

med 10% aktiverad MSWIBA visade blandningen med BA5 högre tryckhållfasthet än blandningen med BA3. Prover som innehöll 20% rå och aktiverad BA3 uppnådde 57,11% respektive 55,79% av kontrollprovet hållfasthet, medan prover med 20% rå och aktiverad BA5 visade tryckhållfastheter på 58,42% respektive 57,11%, jämfört med kontrollprovet. Vid ersättning av cement med 20% MSWIBA (både BA3 och BA5) visade blandningen med rå MSWIBA något högre hållfasthet än blandningen med aktiverad MSWIBA.

- Kontrollprovet visade en 56-dagars hållfasthet på 41,5 MPa. Jämfört med alla betongblandningar med MSWIBA uppvisade betongblandningen som hade cement ersatt med BA5 den högsta hållfastheten. Provet med 10% rå och aktiverad BA5 uppnådde cirka 77% av kontrollprovets hållfasthet. När rå och aktiverad BA3 användes, uppvisade betongproverna 73,98% respektive 68,67% av kontrollprovets hållfasthet. När cementersättningen ökade till 20%, uppnådde alla blandningarna cirka 58 % av kontrollprovets hållfasthet. Vid ersättning av cement med 20% BA3 och BA5 visade blandningen jämförbara resultat för både rå och aktiverad aska. Från testresultaten kunde man observera att blandningarna med aktiverad MSWIBA inte uppvisade någon signifikant ökning av hållfastheten jämfört med blandningarna med rå MSWIBA.
- För betongblandningar med 10% aktiverad MSWIBA och 20% MSWIBA var den procentuella hållfasthetsökningen vid 28 dagar högre för betongblandningarna med BA5 än för betongblandningarna med BA3, på grund av den måttliga accelerationen av den pozzolanska reaktionen hos BA5. Betongprover med 10% ersättning av aktiverad BA5 uppvisade den högsta hållfasthetsökningen vid 28 dagar, som var 24,25% högre än kontrollprovet. Alla prover, utom BA3(20A) och BA5(10R), uppvisade högre ökning av tryckhållfastheten än kontrollprovet vid 28 dagar. Vid 10% cementsättning med BA3 (både rå och aktiverad) var ökningen av tryckhållfastheten lägre än för kontrollblandningen. Vid 20% ersättning var däremot ökningen av tryckhållfastheten högre än för kontrollprovet vid 56 dagar. Proverna BA5(10R) och BA5(20A) uppvisade högre ökning av tryckhållfastheten vid 56 dagar, medan proverna BA5(10A) och BA5(20R) visade lägre ökning av tryckhållfastheten vid 56 dagar än kontrollprovet. Betongblandningar med 10% ersättning av BA3 (rå och aktiverad) uppvisade högre hållfasthetsökning vid 28 dagar och lägre ökning vid 56 dagar än blandningar med 20% BA3. När procentandelen MSWIBA ökade minskade cementinnehållet och pozzolanska aktiviteter försenades. Maximal 28-dagars hållfasthetsökning visades av blandningen med 10% aktiverad BA5, medan provet med 10% rå BA5 uppvisade högst 56-dagars hållfasthetsökning.
- Det fanns ingen signifikant skillnad i tryckhållfasthet mellan de torra och våta MSWIBA-proverna som användes som partiell ersättning för cement i betong, även om betongblandningen med det torra provet (BA5) visade något högre tryckhållfasthet än blandningen med det våta provet (BA3).

De fysiska egenskaperna och sammansättningen hos MSWIBA-proverna varierade beroende på deras PSD och källa. Trots att hållfastheten i betongproverna minskade med en ökning av ersättningen av MSWIBA, kan MSWIBA betraktas som ett SCM för byggkonstruktion. Detta projekt ökar kunskapen om fördelarna med att använda MSWIBA som ett partiellt substitut för cement och på så sätt påskyndar övergången mot innovativ och hållbar byggteknik. Dessutom kommer användningen av MSWIBA som SCM att bidra till framsteg inom klimatförbättrad betong.

6 Framtida arbetsområden

Baserat på detta projekt som genomfördes med MSWIBA som ett substitut för cement i betong och de resultat som erhöles, kan det framtida arbetsområdet inkludera:

- 1) Blanda MSWIBA med andra SCM, som flygaska, silikastoft eller krossat granulerat masugnsslagg, för att kompensera den lägre reaktiviteten hos MSWIBA: MSWIBA fungerar som ett fyllmedel och ger fördröjda pozzolanska reaktioner, medan högreaktiva SCM bidrar till tidig hållfasthetsökning. Ett exempel kan vara att testa betongblandningar med 10% cementersättning av MSWIBA + 10% flygaska + 10% silikastoft. Genom denna synergi kan lika eller överlägsen hållfasthet för betong uppnås, med förbättrade hållbarhetsegenskaper.
- 2) Användning av MSWIBA som ett substitut för ballast i betong och undersökning av produktionen av mer miljövänlig betong: MSWIBA kan användas som ett fysiskt fyllmedel eller lättviktsballast, vilket minskar behovet av naturlig ballast och bevarar naturresurser.

7 Referenslista

- Afrin, H., Huda, N., & Abbasi, R. (2021, November). An overview of eco-friendly alternatives as the replacement of cement in concrete. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1200, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
- An, J., Kim, J., & Nam, B. H. (2017). Investigation on impacts of municipal solid waste incineration bottom ash on cement hydration. *ACI Mater. J*, 114(5).
- Bahrami, A., Lindqvist, M., Lindqvist Berglund, L., & Eriksson, B. (2023). Important criteria for Swedish construction companies to choose environmentally friendly concrete. *Civil Engineering Journal*, 9(1), 197-207.
- Blasenbauer, D., Huber, F., Lederer, J., Quina, M. J., Blanc-Biscarat, D., Bogush, A., ... & Fellner, J. (2020). Legal situation and current practice of waste incineration bottom ash utilisation in Europe. *Waste Management*, 102, 868-883.
- BS EN 197-1:2011 Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. 2011.
- BS ISO 11464:2006 Soil quality. Pretreatment of samples for physio-chemical analysis
- Chen, B., Perumal, P., Illikainen, M., & Ye, G. (2023). A review on the utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a mineral resource for construction materials. *Journal of Building Engineering*, 71, 106386.
- Chen, Z., & Yang, E. H. (2017). Early age hydration of blended cement with different size fractions of municipal solid waste incineration bottom ash. *Construction and Building Materials*, 156, 880-890.
- Chen, L., Wang, L., Cho, D.W., Tsang, D.C., Tong, L., Zhou, Y., Yang, J., Hu, Q. & Poon, C. S. (2019). Sustainable stabilization/solidification of municipal solid waste incinerator fly ash by incorporation of green materials. *Journal of Cleaner Production*, 222, 335-343.
- Cheng, L., Jin, H., Wu, Y., Ren, Y., Liu, J., & Xing, F. (2024). Influence of municipal solid waste incineration bottom ash particle size on cement hydration and performance. *Construction and Building Materials*, 432, 136516.
- Cheng, L., Liu, W., Jin, H., Wu, Y., Ren, Y., Liu, J., & Xing, F. (2024). Influence of municipal solid waste incineration bottom ash particle size on the evolution mechanism and distribution characteristics of multiscale pore structures in cement paste. *Construction and Building Materials*, 452, 138882.
- Cheng, Y., Gao, G., Chen, L., Du, W., Mu, W., Yan, Y., & Sun, H. (2024). Physical and mechanical study of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash with different particle size distribution. *Construction and Building Materials*, 416, 135137.

- Chu, H., Gu, Y., Shi, W., & Jiang, J. (2024). Assessing the performance and sustainability of ecological mortar with municipal solid waste incineration fly ash solidified by sulphoaluminate cement. *Construction and Building Materials*, 450, 138613.
- Clavier, K. A., Ferraro, C. C., & Townsend, T. G. (2021). Pilot-scale cement production using treated waste incineration bottom ash: physical and environmental performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105862.
- De Brito, J., & Kurda, R. (2021). The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, 281, 123558.
- Ginés, O., Chimenos, J. M., Vizcarro, A., Formosa, J., & Rosell, J. R. (2009). Combined use of MSWI bottom ash and fly ash as aggregate in concrete formulation: Environmental and mechanical considerations. *Journal of hazardous materials*, 169(1-3), 643-650.
- IPCC. (2022). Mitigation of Climate Change Climate Change 2022 Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc.ch
- Ju, C., Liu, Y., Jia, M., Yu, K., Yu, Z., & Yang, Y. (2020). Effect of calcium oxide on mechanical properties and microstructure of alkali-activated slag composites at sub-zero temperature. *Journal of Building Engineering*, 32, 101561.
- Kleib, J., Aouad, G., Abriak, N. E., & Benzerzour, M. (2021). Production of Portland cement clinker from French municipal solid waste incineration bottom ash. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00629.
- Kowalski, P. R., Kasina, M., & Michalik, M. (2017). Metallic elements occurrences in the municipal waste incineration bottom ash. *Energy Procedia*, 125, 56-62.
- Kuo, W. T., Liu, C. C., & Su, D. S. (2013). Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. *Cement and Concrete Composites*, 37, 328-335.
- Li, X. G., Lv, Y., Ma, B. G., Chen, Q. B., Yin, X. B., & Jian, S. W. (2012). Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement. *Journal of Cleaner Production*, 32, 96-100.
- Lin, J., Yong, C. L., Zhang, F., Tan, T. H., Metselaar, H. S. C., El Hassan, H., & Mo, K. H. (2024). Sorted municipal solid waste ash as cement substitute: A study on paper ash and food waste ash. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03329.
- Liu, Q., Wang, X., Gao, M., Guan, Y., Wu, C., Wang, Q., ... & Liu, S. (2022). Heavy metal leaching behaviour and long-term environmental risk assessment of cement-solidified municipal solid waste incineration fly ash in sanitary landfill. *Chemosphere*, 300, 134571.

- Liu, Y., Zhao, X., Shen, Z. L., & Deng, J. (2023). Effects of pre-curing temperatures on the mechanical properties and microstructural development of impregnated municipal solid waste incineration bottom ash mortar. *Construction and Building Materials*, 369, 130600.
- Liu, Z., Liu, S., Takasu, K., Zhang, Y., Wang, Y., & Suyama, H. (2024). Development of sustainable self-compacting concrete: Replacement of sand with municipal solid waste incineration ash molten slag and recycled fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 450, 138674.
- Lu, J., Yang, X., Lai, Y., Wan, X., Gao, J., Wang, Y., ... & Deng, F. (2024). Utilization of municipal solid waste incinerator bottom ash (MSWIBA) in concrete as partial replacement of fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 414, 134918.
- Lu, J., Yang, X., Lai, Y., Gao, J., Wang, Y., Deng, F., & Zhang, Z. (2024). Mechanical and microscopic properties of concretes made with municipal solid waste incinerator bottom ash (MSWIBA) exposed to freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 452, 138864.
- Lynn, C. J., Obe, R. K. D., & Ghataora, G. S. (2016). Municipal incinerated bottom ash characteristics and potential for use as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 504-517.
- Lynn, C. J., Dhir, R. K., & Ghataora, G. S. (2017). Municipal incinerated bottom ash use as a cement component in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 69(10), 512-525.
- Lynn, C. J., Dhir, R. K., & Ghataora, G. S. (2019). Use of incinerated ash as a cement component in concrete: compressive strength modelling. *Magazine of Concrete Research*, 71(12), 624-636.
- Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2022). Municipal solid waste incineration bottom ash recycling in concrete: Preliminary approach with Oporto wastes. *Construction and Building Materials*, 323, 126548.
- Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. (2016). Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074029.
- Pera, J., Coutaz, L., Ambroise, J., & Chababbet, M. (1997). Use of incinerator bottom ash in concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(1), 1-5.
- Siddique, R. (2010). Utilization of municipal solid waste (MSW) ash in cement and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1037-1047.
- Song, Y. S., Yun, J. M., & Kim, T. H. (2010). Compression strength properties of the hardened cement mortar mixed with municipal incineration fine bottom ashes. *Environmental Earth Sciences*, 61, 1703-1711.
- Sorlini, S., Abbà, A., & Collivignarelli, C. (2011). Recovery of MSWI and soil washing residues as concrete aggregates. *Waste Management*, 31(2), 289-297.
- SS EN 12350-2:2019, Testing fresh concrete Slump test

- SS-EN 12390-3:2019, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of specimens
- SS-EN ISO 17294-2:2023, Determination of selected elements including uranium isotopes
- SS-EN ISO 17852:2008, Water quality - Determination of mercury - Method using atomic fluorescence spectrometry
- Tang, P., Florea, M. V. A., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2015). Characteristics and application potential of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ashes from two waste-to-energy plants. *Construction and Building Materials*, 83, 77-94.
- Tang, P., Florea, M. V. A., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2016). Application of thermally activated municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash fines as binder substitute. *Cement and Concrete Composites*, 70, 194-205.
- Wang, P., Qiao, G., Zhang, Y., Hou, D., Zhang, J., Wang, M., ... & Hu, X. (2020). Molecular dynamics simulation study on interfacial shear strength between calcium-silicate-hydrate and polymer fibers. *Construction and Building Materials*, 257, 119557.
- Xuan, D., & Poon, C. S. (2018). Removal of metallic Al and Al/Zn alloys in MSWI bottom ash by alkaline treatment. *Journal of hazardous materials*, 344, 73-80.
- Yang, Z., Ji, R., Liu, L., Wang, X., & Zhang, Z. (2018). Recycling of municipal solid waste incineration by-product for cement composites preparation. *Construction and Building Materials*, 162, 794-801.
- Zhang, X., Zhang, H., Gao, H., He, Y., & Jiang, M. (2019). Effect of bubble feature parameters on rheological properties of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 196, 245-255.
- Zhao, Y., Liu, J., Pang, B., Liu, R., & Zhang, Z. (2025). Pretreatments Behavior of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash Using Different Alkaline Reagents. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(1), 1-17.

BOTTENASKA SOM ERSÄTTARE TILL CEMENT I KLIMATFÖRBÄTTRAD BETONG

Denna studie undersöker potentialen hos bottenaska från förbränning av kommunalt avfall (municipal solid waste incineration bottom ash, MSWIBA) som delvis ersättning för cement i betong – ett innovativt steg mot en mer hållbar byggindustri. Eftersom cementproduktion bidrar till resursförbrukning och utsläpp av växthusgaser spelar alternativa bindemedel som MSWIBA en avgörande roll i utvecklingen av klimatneutral betong.

MSWIBA-prover från fem olika förbränningsanläggningar samlades in och studerades. Betongblandningar med 10% och 20% rå och aktiverad MSWIBA testades med avseende på bearbetbarhet, densitet och tryckhållfasthet över 7, 28 och 56 dagar. Resultaten visade att betong med 10% rå MSWIBA behöll 77% av kontrollprovets tryckhållfasthet efter 56 dagar samtidigt som materialets densitet minskade, vilket indikerar potentialen för lättare konstruktioner. Trots en minskning av tryckhållfastheten vid högre ersättningsnivåer visar MSWIBA stor potential att förbättra hållbarheten genom att återanvända avfall och minska cementförbrukningen, vilket banar väg för klimatvänliga betonglösningar.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

