

Förbättring av puzzolan aktivitet hos träaska för cementersättning – del 2

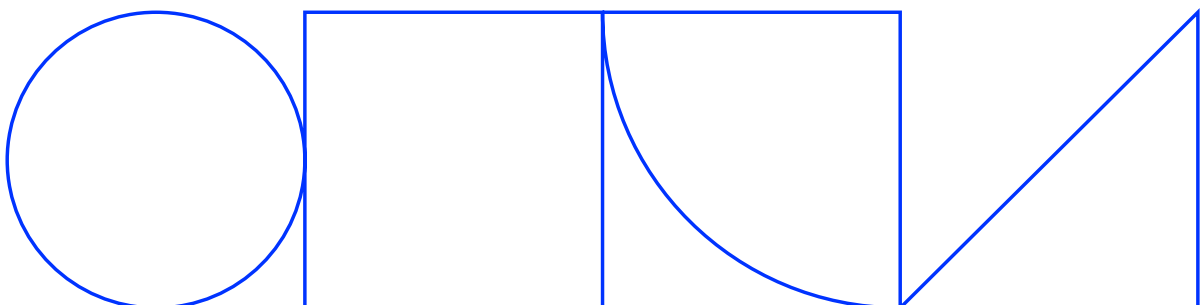
Utilization and Reactivity Enhancement of Wood Ash in Cement-Based and Alkali-Activated Materials

Ece Ezgi Teker Ercan, Karin Habermehl-Cwirzen, Hans Hedlund
Luleå Tekniska Universitet, Skanska

2026-01-12



SKANSKA



Förord

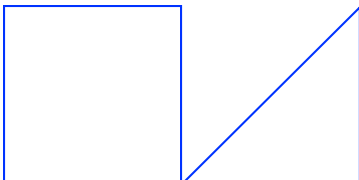
Denna rapport sammanfattar den andra delen av doktorandprojektet (SBUF 14269) med fokus på förbättrad puzzolan aktivitet hos träaska, som alternativt bindemedel i cement.

Författarna vill uttrycka sin uppriktiga tacksamhet till Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och Skanska Sverige AB för stöd och delaktighet i projektets genomförande. Det ekonomiska bidraget från SBUF har varit ovärderliga för genomförandet av detta arbete. Tack för ert förtroende och stöd.

Projektets arbetsgrupp vill även rikta ett stort tack till samtliga branschrepresentanter som deltagit i arbetet med både sin tid, energi, idéer, branschkunskap och erfarenhet, och ett specifikt tack till Stenvalls Trä AB och Holmen AB för sitt engagemang och bidrag med träaska till studien.

Ece et al,

Luleå, januari 2026



Sammanfattning och slutsatser

Sammanfattning

Projektet har undersökt möjligheten att använda träaska (WA) som ett alternativt bindemedel (SCM) i cementbaserade material. Syftet var att utvärdera hur mekanokemisk aktivering genom högenergimalning i en kulkvarn påverkar träaskans fysikaliska, kemiska och miljömässiga egenskaper samt att jämföra dess prestanda med konventionell flygaska (FA).

Resultaten visade att högenergimalning avsevärt ökade träaskans reaktivitet och förbättrade tryckhållfastheten hos både murbruk och betong. Vidare minskade den mekanokemiska aktiveringen rörligheten hos tungmetaller, vilket förbättrade materialets miljöprestanda.

Användning av betong baserad på mald träaska, som återvunnet ballastmaterial (RCA), förbättrade den mekaniska prestandan hos ny betong. Mikrostrukturell analys av övergångszonen (ITZ) bekräftade att mald träaska i den gamla matrisen främjade sekundära puzzolana reaktioner, vilket ledde till en tätare ITZ-struktur och högre tryckhållfasthet.

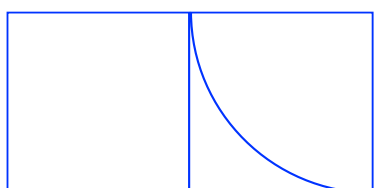
Slutsatser

Några viktiga slutsatser kan dras från resultaten i detta forskningsprojekt:

- Högenergimalning förbättrar signifikant träaskans finhet, specifika yta och reaktivitet. Icke-malda träaska uppvisar generellt begränsad reaktivitet och uppfyller inte standardkraven för kompletterande cementmaterial.
- Betong där cement ersatt med mindre mängd mald träaska ger jämförbar eller högre tryckhållfasthet som referensbetongen. Vid inblandning större mängd träaska reducerade hållfastheten.
- Lakningsbeteendet varierade beroende på typ av träaska och malningstid. Malning minskade de relativa lakningshastigheterna för flera tungmetaller från träaska genom inkapsling och kemisk bindning.
- Återvunnen betongballast från träaskebetong uppvisade god mekanisk prestanda i nya betongblandningar.
- Mikrostrukturell analys bekräftade en tätare övergångszon (ITZ) när mald träaska fanns i den ursprungliga matrisen, med lägre Ca/Si-förhållanden som indikerar högre C–S–H-polymerisering och förbättrad bindning.

Innehåll

1. Bakgrund	4
2. Syfte	5
3. Metodik	5
3.1. Material	5
3.2. Provningsmetoder	6
3.2.1. Återvunnen betongballast (Studie C)	8
4. Utförda undersökningar	9
4.1. Kemiska och fysikaliska egenskaper hos träaska	9
4.2. Bedömning av puzzolan aktivitet	11
4.3. Betongegenskaper	15
4.4. Återvunnen betongballast	18
5. Sammanfattning	21
6. Slutsatser	21
Litteraturförteckning	23



1. Bakgrund

Betong används i stor utsträckning tack vare sin hållfasthet, beständighet och låga kostnad (Monteiro et al., 2017; Teixeira et al., 2019). År 2020 producerades globalt cirka 14 miljarder m³ betong (Global Cement and Concrete Association, 2022). I Sverige produceras årligen mer än 6 miljarder m³ betong, varav cirka 4,6 miljarder m³ används inom byggnadssektorn och 1,6 miljarder m³ inom infrastruktur (Boverket, 2022; Svenska Betongföreningen, 2025). Den huvudsakliga komponenten i betong, Portlandcement, genererar betydande mängder koldioxid vid klinkerproduktionen (Bakhoum et al., 2023; Teixeira et al., 2016; Ukrainczyk et al., 2016). Cementproduktionen uppgick 2023 till 4,07 miljarder ton och gav upphov till 500–900 kg CO₂ per ton cement, med ett genomsnitt på cirka 600 kg CO₂/ton sedan 2018 (IEA, 2025; Tripathi et al., 2020). Cementindustrin står därmed för cirka 5–8 % av de globala koldioxidutsläppen, vilket understryker behovet av alternativa bindemedel (SCM) för att minska klimatpåverkan (Hills et al., 2020; Scrivener et al., 2018).

SCM minskar betongens miljöpåverkan genom att delvis ersätta Portlandcement, reducera klinkerhalten och samtidigt förbättra materialegenskaperna (Scrivener et al., 2018b). Flygaska från kolkraftverk har länge använts, men tillgången minskar i takt med nedläggning av kolkraft (Rumman & Alam, 2025), vilket skapar ett behov av hållbara alternativ såsom träaska (Gerges et al., 2021; Omran et al., 2018).

Årligen produceras 4600 miljarder ton biomassa från trä, mestadels för energi (60 %) och industri (20 %), medan resterande förloras under primärproduktion och bryts ner i fält (Tripathi et al., 2019). WA, restprodukten från träförbränning, deponeras i stor utsträckning, vilket medför kostnader, kapacitetsproblem och miljörisker såsom lakning av föroreningar och dammspridning (Bakhoum et al., 2023; Drljača et al., 2022; James et al., 2012). Att använda träaska i betong kan immobilisera föroreningar och minska klinkeranvändning, vilket ger en mer hållbar avfallsstrategi (Berra et al., 2019; Siddique, 2012).

Träaskans sammansättning varierar med träslag, ursprung, förbränningsmetod och lagring, vilket komplicerar kvalitetskontroll (Berra et al., 2015; Etiégni & Campbell, 1991; Ottosen et al., 2016; Ukrainczyk et al., 2016). Den uppfyller ofta inte standardkraven för flygaska (EN 450-1 och ASTM C618) på grund av oregelbundna partiklar, bred partikelstorleksfördelning och höga värden för förlust vid upphettning (*loss of ignition*), vilket kan påverka bearbetbarhet och tidig hållfasthet. Forskning visar dock att träaska kan användas i betong under rätt förhållanden (Abdullahi, 2006; Berra et al., 2015; Carević et al., 2019; Garcia & Sousa-Coutinho, 2013; Rajamma et al., 2009; Sigvardsen et al., 2019; Udoeyo et al., 2006).

I cementbaserade system kan träaska fungera som fyllmedel och, beroende på kemisk sammansättning och amorft innehåll, uppvisa puzzolan eller latent hydraulisk reaktivitet. Dess effekt beror på asktyp, finhet och ersättningsnivå (Carević et al., 2019; Demis et al., 2014; Rajamma et al., 2009; Wang et al., 2022). Förbehandlingsmetoder som mekanokemisk aktivering (MCA) kan förbättra träaskans prestanda genom att minska partikelstorlek, öka yta och öka reaktivitet, vilket gör metoden lovande för biomassabaserade askor (Amaral et al., 2022; Berra et al., 2015; Doudart de la Grée et al., 2016; Teker Ercan et al., 2023).

2. Syfte

Huvudsyftet med detta projekt var att utvärdera den potentiella användningen av träaska (WA) som ett kompletterande cementmaterial (SCM) i cementbaserade system. Studien syftade till att fastställa hur högenergi-malning, även benämnd mekanokemisk aktivering (MCA), påverkar de fysikaliska och kemiska egenskaperna samt miljöprestandan hos WA när den används som partiell ersättning för Portlandcement.

De specifika målen omfattade:

- Att bedöma effekten av MCA genom högenergi-malning på träaskans puzzolana aktivitet med hjälp av standardiserade provningsmetoder såsom Strength Activity Index (SAI), Frattini-testet och R3-testet.
- Att undersöka inverkan av MCA-behandlad och ej MCA-behandlad träaska på betongens färsk och hårdnade egenskaper, inklusive bearbetbarhet, hållfasthetsutveckling och mikrostruktur.
- Att analysera frostresistens hos betong med och utan lufttillsats vid cementersättning med MCA-behandlad och ej MCA-behandlad träaska.
- Att utvärdera lakningsbeteendet och den miljömässiga säkerheten hos träaska före och efter MCA.
- Att fastställa hur träaske-innehållande betong påverkar de mekaniska egenskaperna och övergångszonen (ITZ) hos återvunnen betongballast (RCA) som används i nya betong.

3. Metodik

3.1. Material

Fyra typer av träaska (WA1, WA2, WA3 och WA4) användes; dessa var biprodukter från träavfall som genererades under träproduktion och därefter förbrändes för torkning av träprodukter. WA1, WA2 och WA3 insamlades från Stenvalls Trä AB i Piteå, och WA4 från Holmen AB i Skellefteå. Askorna skilde sig åt avseende bibränslesammansättning och förbränningstemperatur, vilken varierade mellan 800 och 1050 °C, vilket resulterar i varierande kemiska och fysikaliska egenskaper, se Tabell 1.

Ordinarie Portlandcement (CEM I 42,5 N) från Heidelberg Materials (Sverige) användes i samtliga blandningar. En flygaska av klass F från Thomas Cement (Tyskland) användes som referensmaterial.

Finsand från Baskarpsand AB samt naturliga ballastmaterial (0–4 och 4–8 mm) från Jehander Heidelberg Materials användes i bruk- och betongblandningar. Bearbetbarheten justerades med ett polykarboxylatbaserad flyttillsats (MasterGlenium ACE 30), och ett luftporbildande tillsatsmedel (MasterAir 105) användes vid provning av frostresistens.

Tabell 1. Kemisk sammansättning hos materialen

Kemisk sammansättning (%)	WA1	WA2	WA3	WA4	FA	CEM I
SiO ₂	31,7	6,63	22,4	0,75	60,20	21,20
Al ₂ O ₃	7,25	3,48	6,75	0,37	17,70	3,40
Fe ₂ O ₃	4,19	1,11	2,62	0,17	2,78	4,10
CaO	14,7	22	15,1	29	1,37	63,30
K ₂ O	5,14	9,10	8,25	1,20	1,61	0,56
MgO	2,08	3,43	2,69	2,52	0,43	2,20
MnO	0,61	1,22	0,80	1,80	0,05	-
P ₂ O ₅	1,39	2,63	2,81	2,11	0,07	-
TiO ₂	0,33	0,12	0,3	0,01	0,71	-
Na ₂ O	1,53	0,37	1,46	0,03	0,60	0,18
SO ₃	-	-	-	-	-	2,70
LOI (1000 °C)	34,5	43,7	29,7	56,7	1,80	2,50
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	43,14	11,22	31,77	1,29	80,68	28,70
CaO/SiO ₂	0,46	3,32	0,67	38,67	0,02	2,98

3.2. Provningsmetoder

Detta projekt omfattar tre delstudier. En översikt över studierna och de material som använts presenteras i Tabell 2. Material och metoder för Studie A respektive Studie B redovisas i Tabell 3 och Tabell 4. Detaljerade experimentella procedurer beskrivs i Teker Ercan et al. (2025a) och Teker Ercan et al. (2025b). Metoderna för Studie C beskrivs i avsnitt 3.2.1.

Tabell 2. Översikt över material och provningsmetoder i de genomförda studierna (Teker Ercan, 2025).

Studie	Material	Provningsmetoder
Studie A	WA1, WA2, WA3, WA4, FA, OPC	SAI, Frattini, R3, TGA, SEM/EDS, XRD
Studie B	WA3, WA4, FA, OPC	Sättningsmått (slump), tryckhållfasthet, hydrationsvärme, SEM/EDS, XRD, frost-tö, lakning
Studie C	Utvald gammal betong från Studie B	Lufthalt, tryckhållfasthet, SEM/EDS

Tabell 3. Sammanfattning av material och metoder för Studie A (Teker Ercan et al., 2025a).

Provning	Provtyp	Blandningsdesign	Beskrivning
SAI (ASTM C618-15)	Bruk	WA1, WA2, WA3, WA4, FA (0 vikt-%, 20 vikt-%) v/b ≈ 0,48 (0 vikt-%); 0,49 (20 vikt-%).	Tryckhållfasthet hos 50 mm kuber efter 7 och 28 dygn
Frattini Test (SS-EN 196-5)	Pasta	WA1, WA2, WA3, WA4, FA (0 vikt-%, 20 vikt-%)	OPC + SCM + destillerat vatten; 100 mL, förseglat vid 40 °C; filtrat titrerat efter 8, 15 och 28 dygn
R3 Test (ASTM C1897-20)	R3 Pasta	WA1, WA2, WA3, WA4, FA (100 vikt-%)	SCM + Ca(OH) ₂ + CaCO ₃ (1:3:0,5) i K ⁺ -lösning; L/S = 1,2; förseglade ampuller, 40 °C i 7 dygn
TGA	Pasta	WA1, WA2, WA3, WA4, FA (0 wt.%, 20 wt.%) v/b = 0,4	28 dygn gamla härdade pastor; lösningsmedelsutbytta och analyserade mellan 20 och 1000 °C under Ar
XRD	Pulver	WA1, WA2, WA3, WA4, FA, OPC	Råmaterial analyserade för identifiering av ursprungliga kristallina faser
	Pasta	WA1, WA2, WA3, WA4, FA (0 wt.%, 20 wt.%) v/b = 0,4	7- och 28 dygn gamla härdade pastor analyserade avseende hydrationsprodukter
SEM/EDS	Pulver	WA1, WA2, WA3, WA4	Träaskpulver på ledande tejp, analys av morfologi
	Pasta	WA1, WA2, WA3, WA4, FA (0 vikt-%, 20 vikt-%) v/b = 0,4	7- och 28 dygn gamla härdade pastor; BSE-avbildning och EDS-analys av C-S-H

Tabell 4. Sammanfattning av material och metoder för Studie B (Teker Ercan et al., 2025b).

Egenskap	Material	Ålder	Standard	Provdimension (cm)	Blandningar
Bearbetbarhet	Färsk betong	Omedelbart efter blandning	SS-EN 12350-2:2019	-	Samtliga
Lufthalt			SS-EN 12350-7:2019		Markerade med ^(a) i Tabell 5
Tryckhållfasthet	Härdad betong	7 och 28 dygn	SS-EN 12390-3:2019	10 x 10 x 10	Samtliga
Mikrostrukturell undersökning			-	~2 x 2 x 2	
Frostresistens		Efter 7, 14, 28, 42 och 56 cykler	CEN/TS 12390-9:2016	15 x 15 x 5	Markerade med ^(a) i Tabell 5
Lakning		9 och 64 dygn	SS-EN 16637-2:2023	10 x 10 x 10	Markerade med ^(b) i Tabell 5
Hydrationsvärme	Pasta	Under 7 dygn	SS-EN 196-11:2019	6 g i ampull	Samtliga

Tabell 5. Betongrecept i Studie B (Teker Ercan et al., 2025b).

Betongblandning ID	Malningstid för träaska (min)	Halt träaska eller flygaska	Delmaterial (kg/m ³)								
			Cement	Träaska eller flygaska	Sand B15	Ballast 0-4	Ballast 4-8	Vatten	SP	AEA	
CTRL ^{a,b}	-	0	400	-							
FA-10	-	10	360	40							
FA-20 ^{a,b}	-	20	320	80							
WA3-10	0	10	360	40							
WA3-20 ^{a,b}	0	20	320	80							
WA3-10m-10	10	10	360	40							
WA3-10m-20 ^{a,b}	10	20	320	80							
WA3-20m-10	20	10	360	40							
WA3-20m-20	20	20	320	80							
WA4-10	0	10	360	40	352	880	528	189	4		
WA4-20	0	20	320	80							
WA4-10m-10	10	10	360	40							
WA4-10m-20	10	20	320	80							
WA4-20m-10	20	10	360	40							
WA4-20m-20	20	20	320	80							
CTRL-AE ^a	-	0	400	-							
FA-20-AE ^a	-	20	320	80							0,4
WA3-20-AE ^a	0	20	320	80							
WA3-10m-20-AE ^a	10	20	320	80							

Betongblandningarnas ID anger asktyp (WA3, WA4, FA), malningstid när sådan anges (10m eller 20m) samt nivå av cementersättning (10 eller 20 vikt-%). Avsaknad av malningstid indikerar ickemalen aska. "-AE" betecknar luftporförande blandningar; ID utan detta är icke-luftporförande. CTRL betecknar referensbetong.

^a Prover för lufthalt och frost-töprovnings.

^b Prover för lakningstest.

3.2.1. Återvunnen betongballast (Studie C)

Fem återvunna grova ballastmaterial (RCA) framställdes från 18 månader gamla betongkuber från Studie B genom manuell krossning och siktning till fraktionen 4–8 mm. Vattenabsorption bestämdes med ugnstorr- och mättad yt-torr-metoden i enlighet med SS-EN 1097-6:2022. Ursprungsbetonger och vattenabsorption (%) för RCA redovisas i Tabell 6.

Tabell 6. Ursprungsbetonger och vattenabsorption (%) hos återvunnen betongballast.

Ursprungsbetong ID	Betong med RCA ID	Vattenabsorption (%)
CTRL	CTRL*	6,15
WA3-10	WA10	6,54
WA3-20	WA20	6,99
WA3-10m-10	GWA10	5,94
WA3-10m-20	GWA20	6,07

Samtliga blandningar ersatte 30 vikt-% av den grova ballasten i fraktionen 4–8 mm med RCA, vilket är den maximalt tillåtna ersättningsnivån för återvunnen ballast av typ A enligt SS-EN 206:2013+A2:2021. Vattenbindemedelstalet fixerades till 0,48 med justering av blandningsvattnet för RCA:s vattenabsorption. RCA användes i torrt tillstånd utan förmättnad. Betongrecept med RCA redovisas i Tabell 7.

Tabell 7. Betongrecept med RCA.

Betongblandning ID	Delmaterial (kg/m ³)						
	Cement	Sand B15	Ballast 0-4	Ballast 4-8	RCA	Water	SP
CTRL*						199,8	
WA10						200,5	
WA20	400	352	880	369.6	158.4	201,3	4
GWA10						199,5	
GWA20						199,7	

SEM-EDS-analys genomfördes på blandningarna CTRL*, WA10 och GWA10 för att undersöka mikrostrukturen i övergångszonen (ITZ). Provberedningen följde samma procedur som i Studie B. EDS-punktanalyser vid 1000× förstoring fokuserade på C-S-H-faser över tre ITZ-regioner: ballast-gammal matris (A-OM), gammal matris-ny matris (OM-NM) samt ballast-ny matris (A-NM).

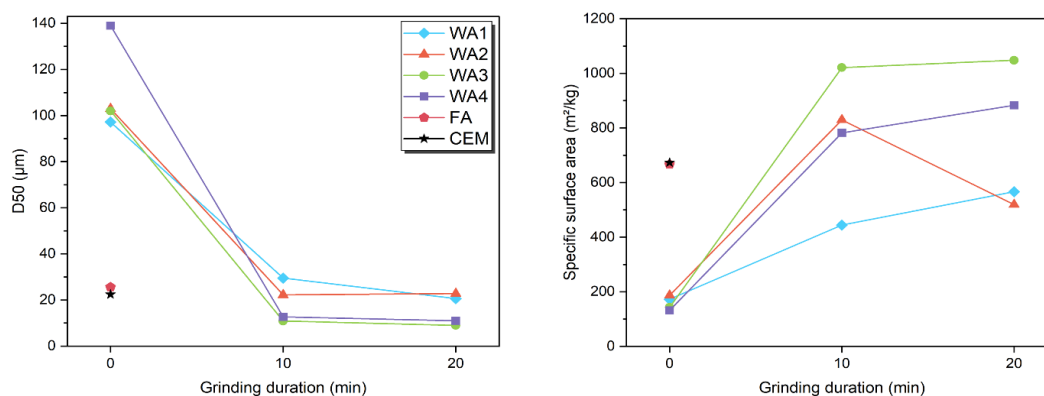
4. Utförda undersökningar

4.1. Kemiska och fysikaliska egenskaper hos träaska

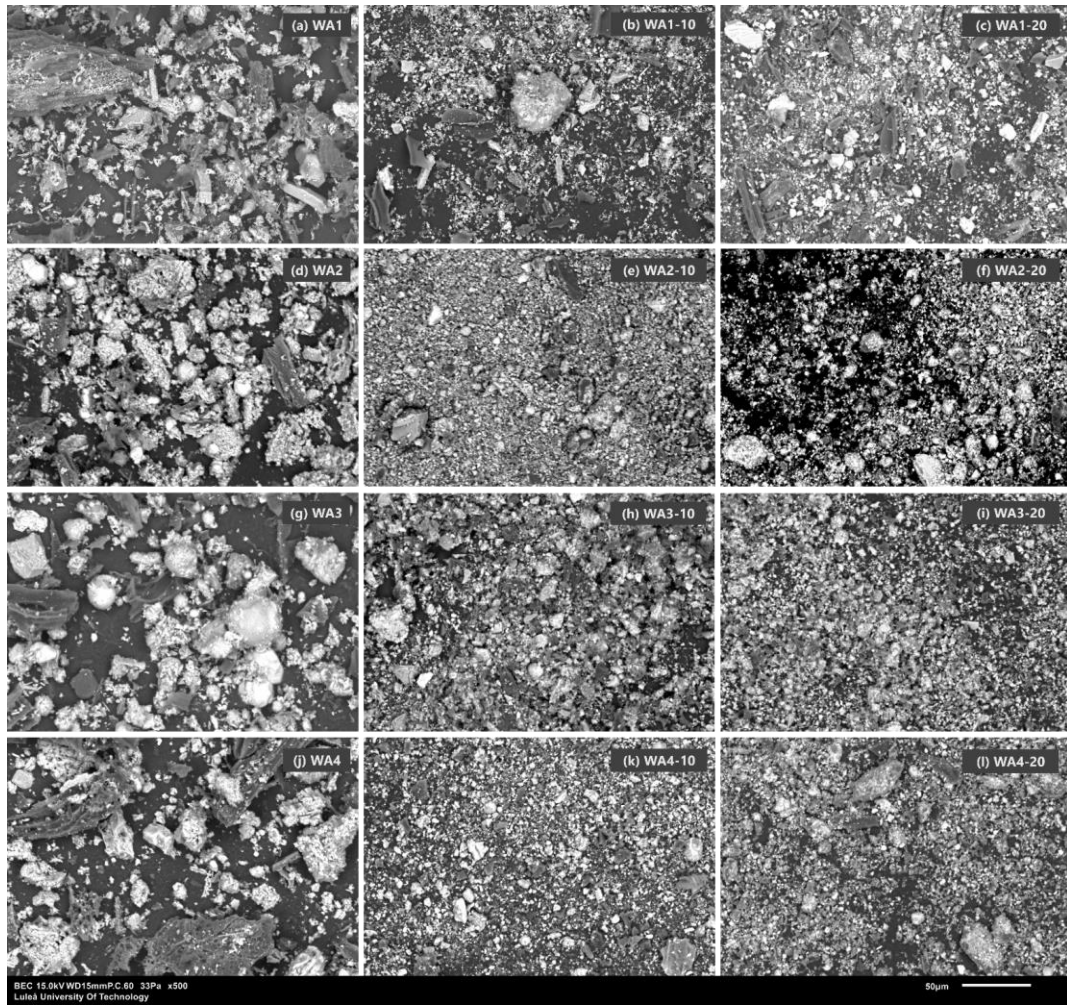
Träskorna (WA1, WA2, WA3, WA4) uppvisade betydande variationer i kemiska och fysikaliska egenskaper. Ingen av dem uppfyllde EN 450-1:s krav på puzzolana oxider ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$), och högt CaO-innehåll i vissa prover antydde hydrauliskt snarare än puzzolant beteende. Dessutom indikerade höga värden för förlust vid upphettning (LOI) att betydande mängder kol var oförbrända.

Som visas i Figur 1 minskade MCA medianpartikelstorleken (D50) effektivt och ökade den specifika ytan, och SEM-bilderna (Figur 2) bekräftade en förfinad morfologi med finare och slätare partiklar. En förlängd malningstid på 20 minuter ledde dock till partiell agglomeration av partiklar i WA2.

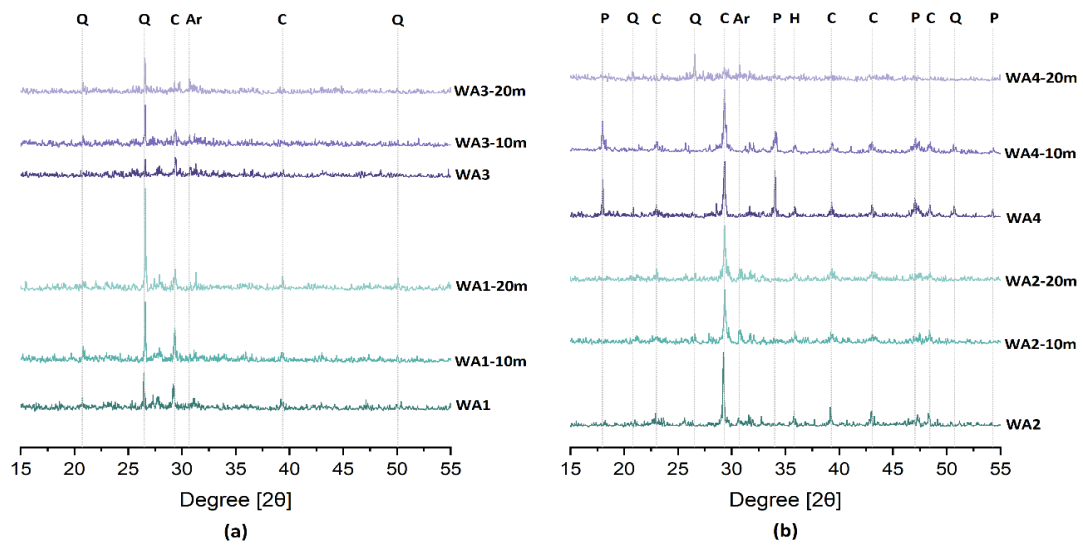
Kvarts och kalcit var de dominerande kristallina faserna. Generellt observerades en intensitetsminskning och amorfisering vid MCA (Figur 3).



Figur 1. (a) Medelpartikelstorlek (b) Specifik yta före och efter MCA (Teker Ercan et al., 2025a).



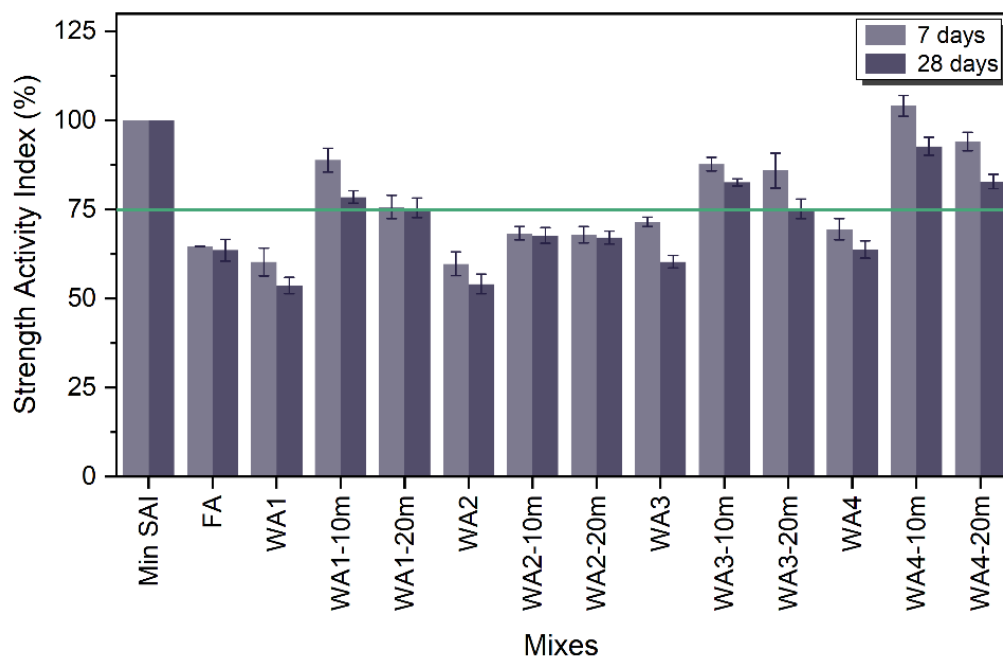
Figur 2. SEM-bilder av träaska före och efter malning i 10 respektive 20 minuter vid 500 \times förstoring (Teker Ercan et al., 2025a).



Figur 3. XRD-mönster för icke-malen och malen träaska: (a) WA1 och WA3; (b) WA2 och WA4 (P: Portlandit, C: Kalцит, Q: Kvarst, Ar: Arkanit, H: Hematit) (Teker Ercan et al., 2025a).

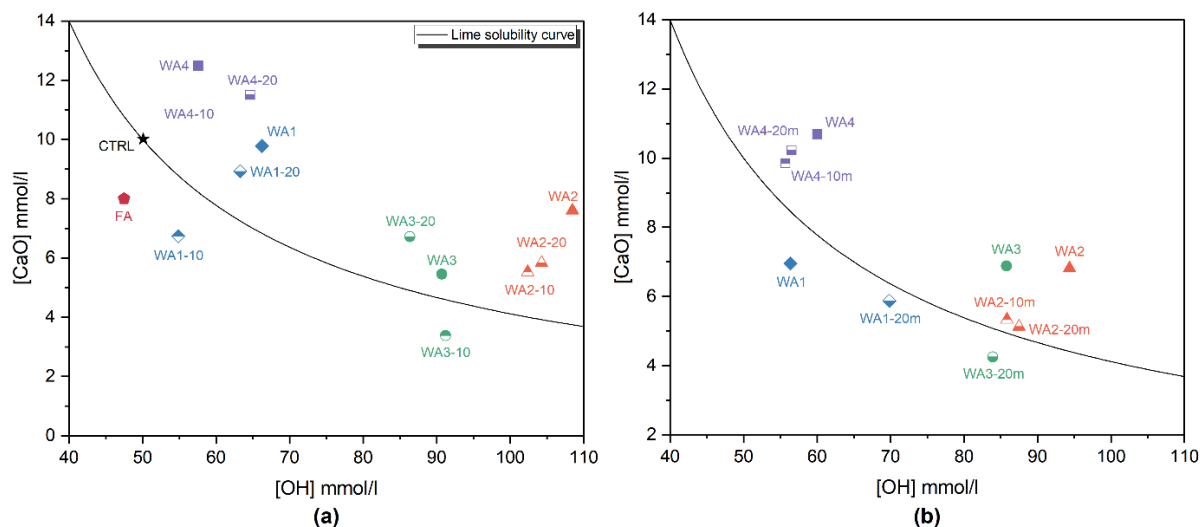
4.2. Bedömning av puzzolan aktivitet

Baserat på SAI-testerna (Figur 4) översteg mald WA1, WA3 och WA4 tröskelvärdet på 75 %, medan alla icke-malda askor och WA2 inte uppfyllde standardkriteriet. WA4-10m uppnådde högst SAI (104 % vid 7 dygn, 93 % vid 28 dygn), vilket överträffade kontrollen i tidig ålder; detta tillskrevs dock dess höga CaO/SiO₂-förhållande (38,7) och berodde på fyllnadseffekt och latent hydraulisk aktivitet snarare än puzzolan reaktivitet. För de flesta träaskor var 10 minuter den optimala malningstiden.



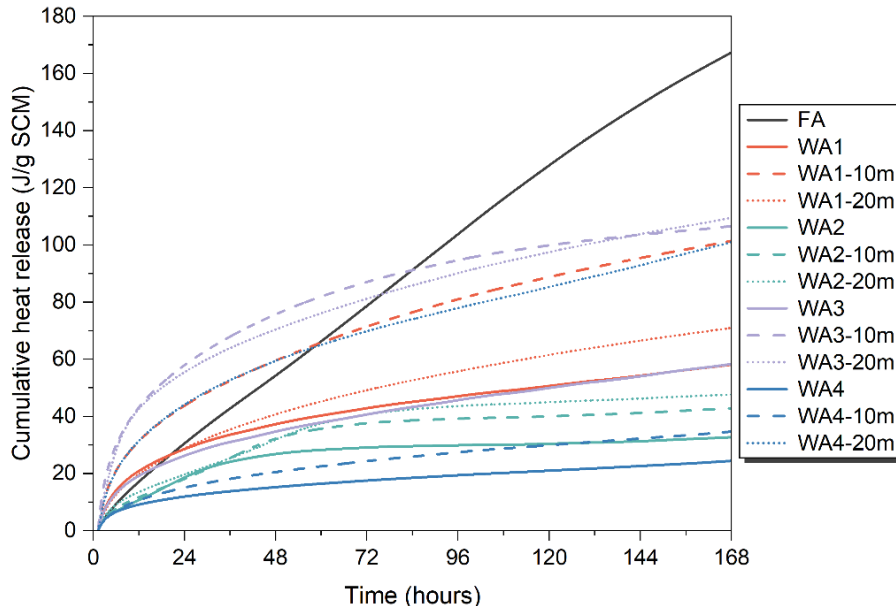
Figur 4. Strength Activity Index (SAI); ≥ 75 % indikerar puzzolan aktivitet (ASTM C618-15) (Teker Ercan et al., 2025a).

Enligt Frattini-testet (Figur 5) möjliggjorde MCA att WA1 och WA3 uppfyllde de puzzolana kriterierna över tid, vilket stöddes av höga CaO-reduktionsvärden som indikerar effektiv konsumtion av Ca²⁺-joner från lösningen.



Figur 5. Frattini-resultat (a) 8 dygn (b) 15 dygn; punkter under kalklöslighetskurvan indikerar positiv puzzolan aktivitet, medan punkter ovan visar icke-puzzolan beteende (EN 196-5) (Teker Ercan et al., 2025a).

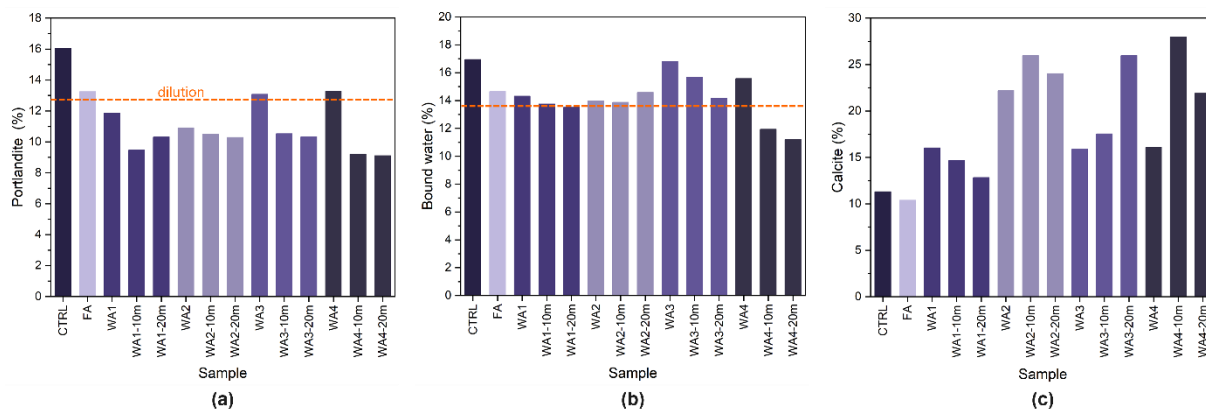
R3-testet utvärderar reaktiviteten hos SCM baserat på hydratationsvärme i en isoterm kalorimeter (Figur 6). Material med en kumulativ värmeavgivning över 100 J/g efter 168 timmar betraktades som puzzolana (Suraneni, 2021). FA, WA3-10m, WA3-20m, WA1-10m och WA4-20m översteg detta tröskelvärde. MCA ökade den kumulativa värmeavgivningen, där 10 minuters malning visade sig optimal för WA1 och WA3.



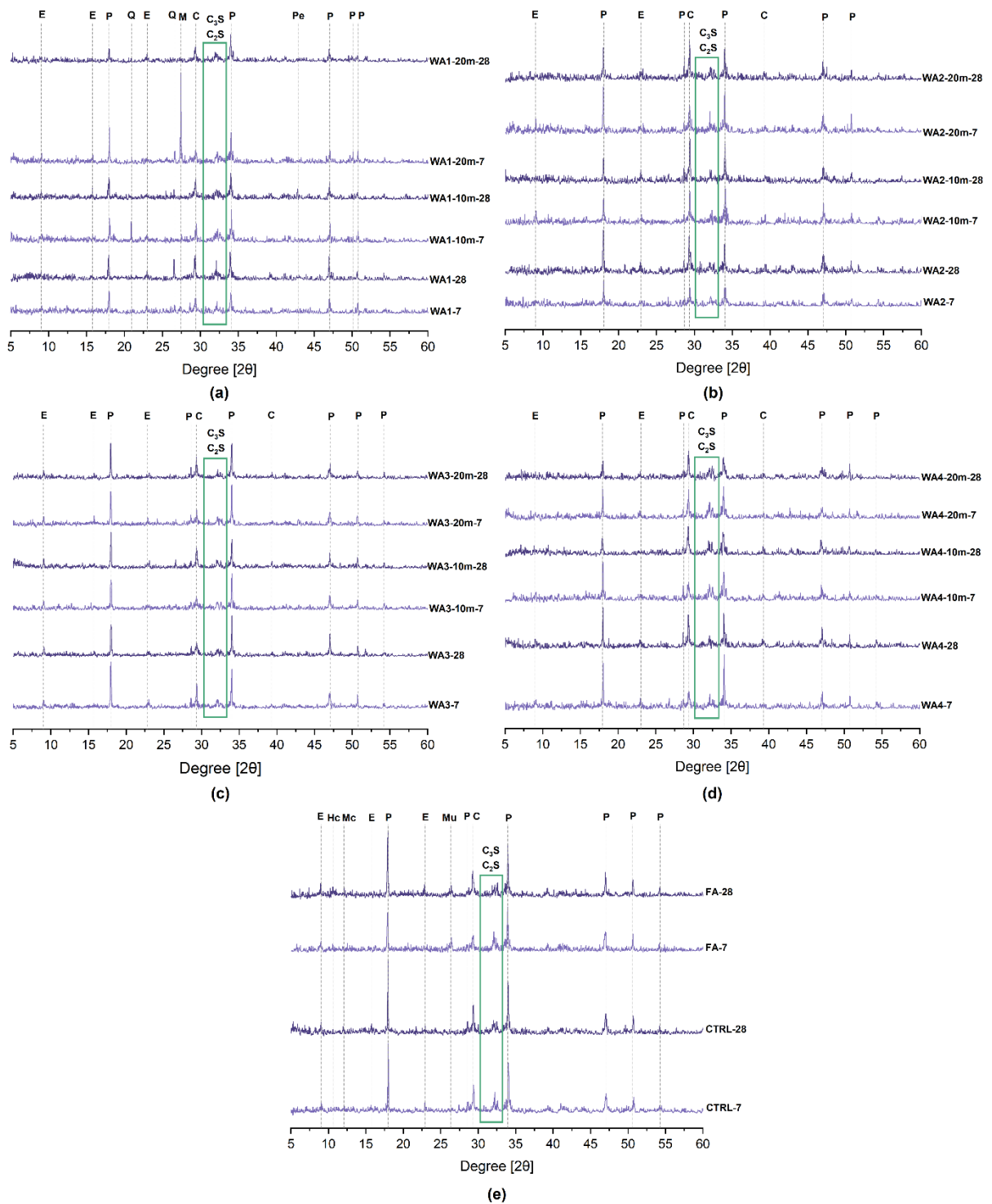
Figur 6. Kumulativ värmeavgivning för R3-pastor över 168 timmar vid $40 \pm 0,5$ °C (Teker Ercan et al., 2025a).

Beräknade innehåll av portlandit, bundet vatten och kalcit baserat på TGA (Figur 7) och XRD-mönster (Figur 8) visade att WA3-10m uppnådde högst puzzolan aktivitet, vilket framgår av betydande portlanditreduktion och ökat bundet vatten. WA1 uppvisade också måttlig aktivering efter 10 minuters malning. Däremot visade WA2 och WA4 högt kalcit-innehåll med begränsad CH-förbrukning, vilket indikerar att karbonatisering och latent hydraulisk aktivitet

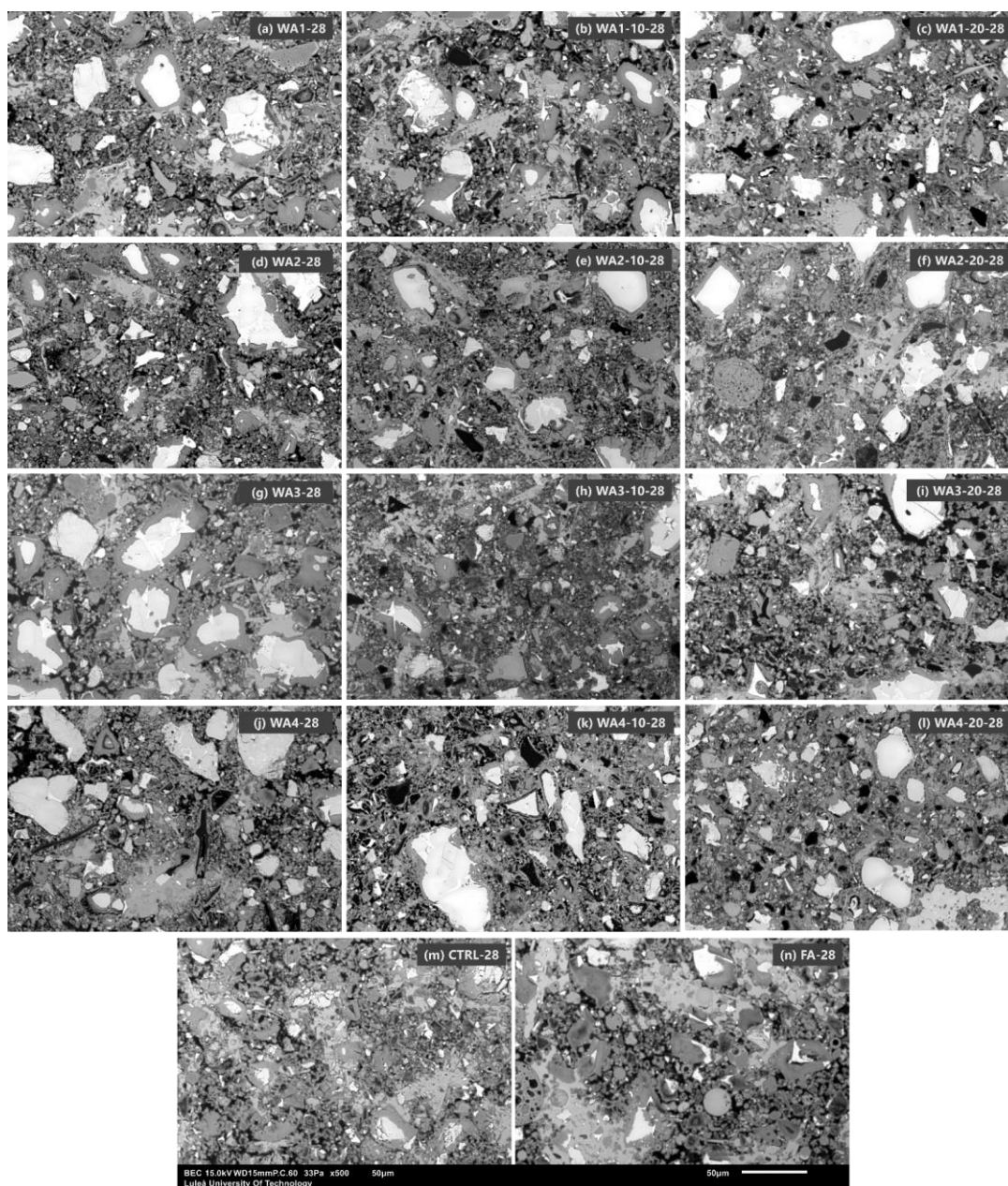
dominerade snarare än puzzolan reaktivitet. SEM-analys visade att mald träaska producerade tätare och mer homogena matriser, medan icke-malda prover förblev mer porösa och heterogena (Figur 9).



Figur 7. Beräknat innehåll av (a) Portlandit, (b) Bundet vatten, (c) Kalcit baserat på TGA (Teker Ercan et al., 2025a).



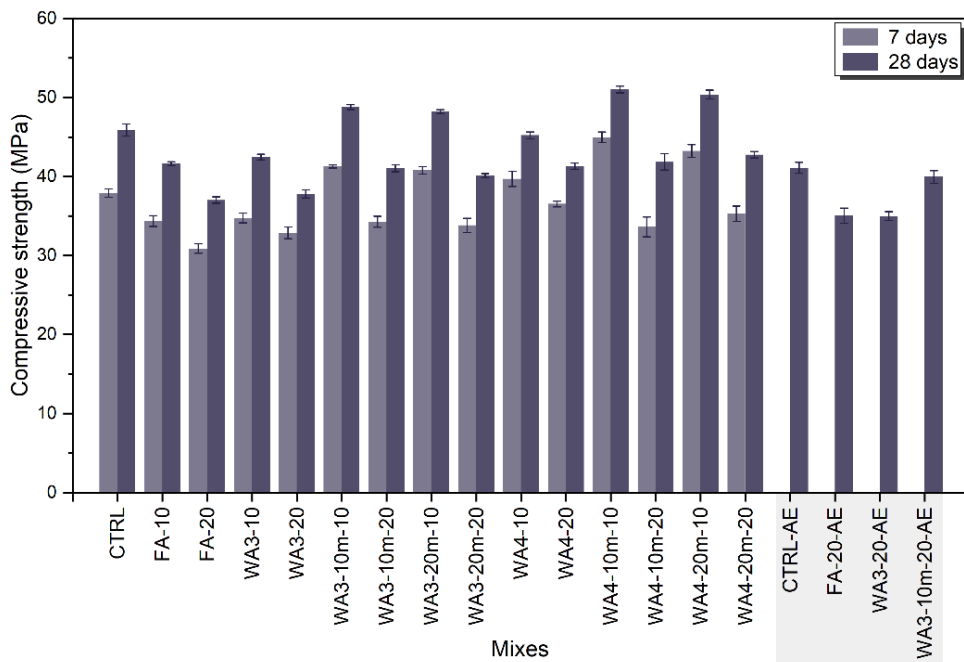
Figur 8. XRD-mönster för 7- och 28 dygn gamla pastor innehållande: (a) WA1, WA1-10m, WA1-20m; (b) WA2, WA2-10m, WA2-20m; (c) WA3, WA3-10m, WA3-20m; (d) WA4, WA4-10m, WA4-20m; och (e) CTRL- och FA-innehållande pastor. (P: Portlandit, C: Kalcit, Q: Kvarts, E: Ettringit, Pe: Periklas, M: Mikrolin, Mu: Mullit, C3S: Alit, C2S: Belit, Hc: Hemikarbonat, Mc: Monokarbonat) (Tekar Ercan et al., 2025a).



Figur 9. SEM-bilder av 28 dygn gamla pastaprover innehållande 100 vikt-% cement, 20 vikt-% flygaska samt icke-mald och mald träaska vid 500 \times förstoring (Teker Ercan et al., 2025a).

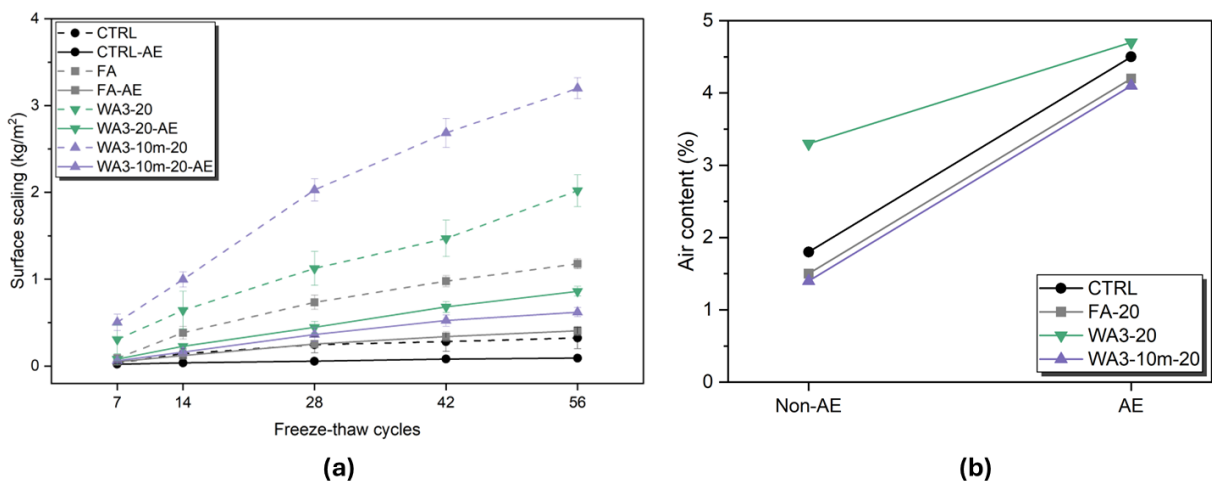
4.3. Betongegenskaper

MCA av träaska förbättrade signifikant tryckhållfastheten vid både 7 och 28 dygn jämfört med blandningar med icke-mald träaska, där 10 minuter framstod som den optimala malningstiden. Högst hållfasthet uppnåddes vid 10 vikt-% ersättning, särskilt för blandningarna WA4-10m-10 och WA3-10m-10. Ökning av ersättningsnivån till 20 vikt-% minskade däremot hållfastheten i alla system på grund av spädning av klinker.



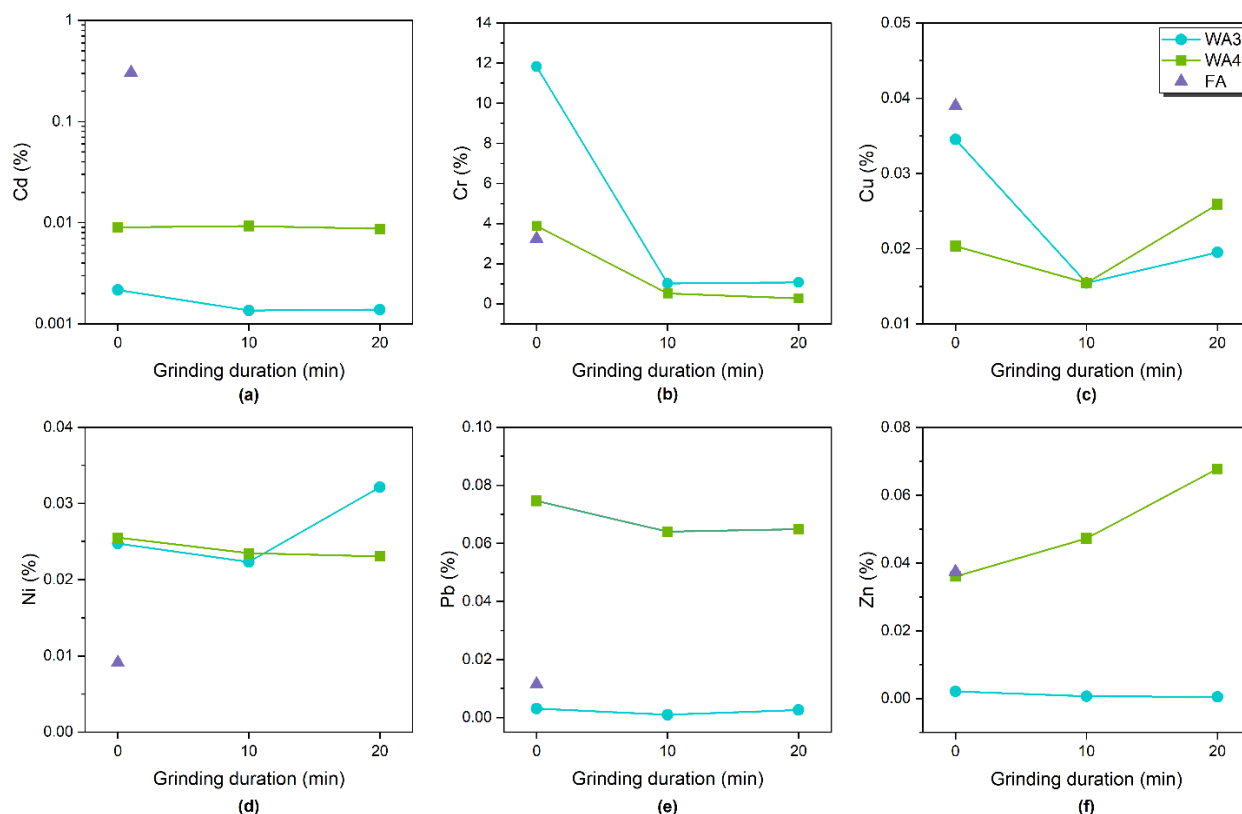
Figur 10. Tryckhållfasthet hos träaska- och flygaskabetong vid 7 och 28 dygn (Teker Ercan et al., 2025b).

Frostresistens för betong innehållande träaska bedömdes utifrån kumulativ ytskalning över 56 cykler (Figur 11a). Utan luftporförande medel ökade införandet av WA skalningen, där blandningen med mald träaska (WA3-10m-20) uppvisade störst skalning. Tillsats av luftporbildande medel (AEA) förbättrade däremot prestandan avsevärt genom att öka lufthalten (Figur 11b). För prover med lufttillsats presterade WA3-10m-20-AE bättre än WA3-20-AE, vilket antyder att MCA kan bidra till att stabilisera och jämnt fördela luftporstrukturen (Rissanen et al., 2020; Wang et al., 2008).



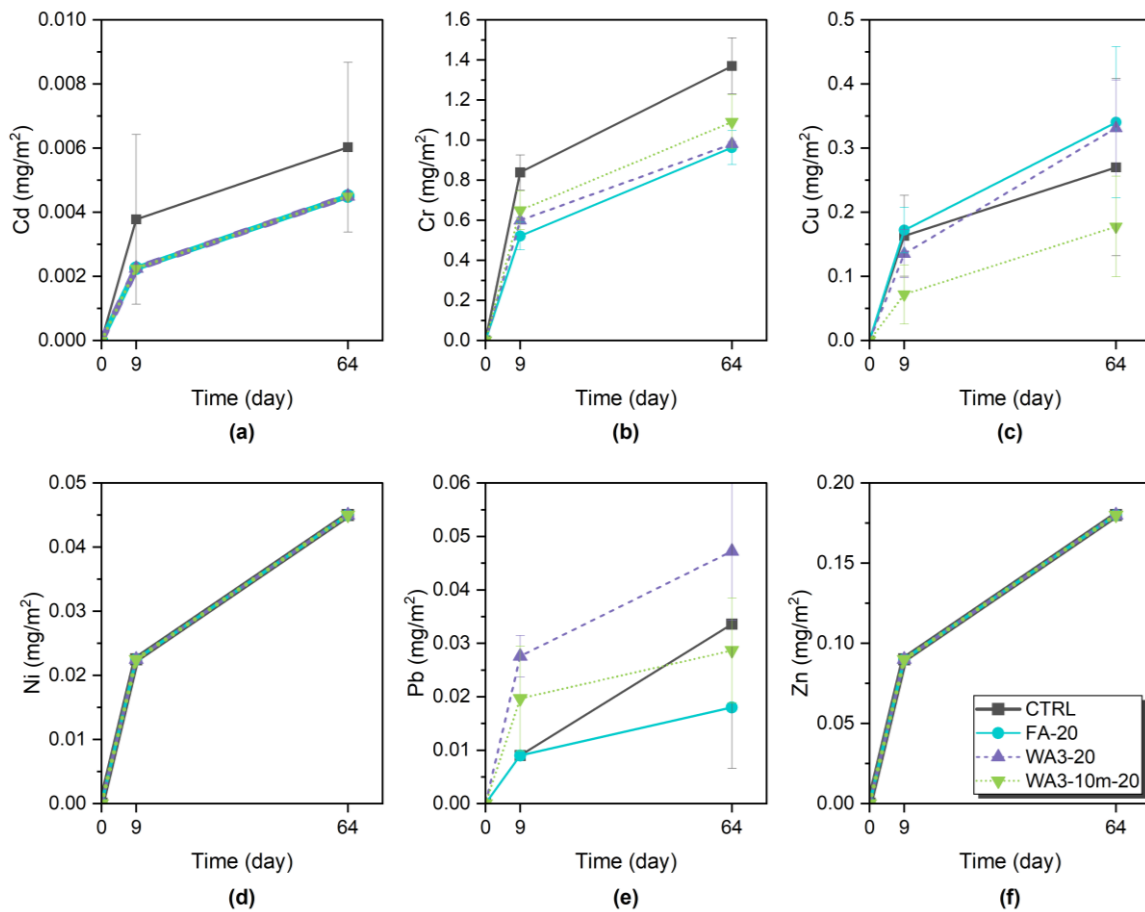
Figur 11. (a) Ytskalning under frost-tö-cykler och (b) total lufthalt hos betong med respektive utan lufttillsats (Teker Ercan et al., 2025b).

Den relativa lakningshastigheten (*RLR*) beräknades som förhållandet mellan den lakade koncentrationen av en tungmetall och dess totala innehåll i askan, vilket representerar den lakade andelen av metallen (Figur 12). MCA av träaska minskade signifikant *RLR* för tungmetaller, särskilt Cr, som minskade tydligt i WA3- och WA4-serierna. Detta tyder på att MCA främjar immobilisering av metaller genom mekanismer som inkapsling eller inneslutning i nya agglomerat (Montinaro et al., 2008; Nomura et al., 2010). Lakning av Pb och Cu minskade signifikant i WA3, medan Zn-lakning ökade i WA4, vilket visar att metallmobilitet är starkt beroende av askans specifika mineralogi och ytegenskaper (Wang et al., 2020).



Figur 12. Relativ lakning (*RLR*, %) av (a) Cd, (b) Cr, (c) Cu, (d) Pb, (e) Ni och (f) Zn från träaska (WA3, WA4) och flygaska (FA) som funktion av malningstid (0, 10 och 20 min) (Teker Ercan, 2025).

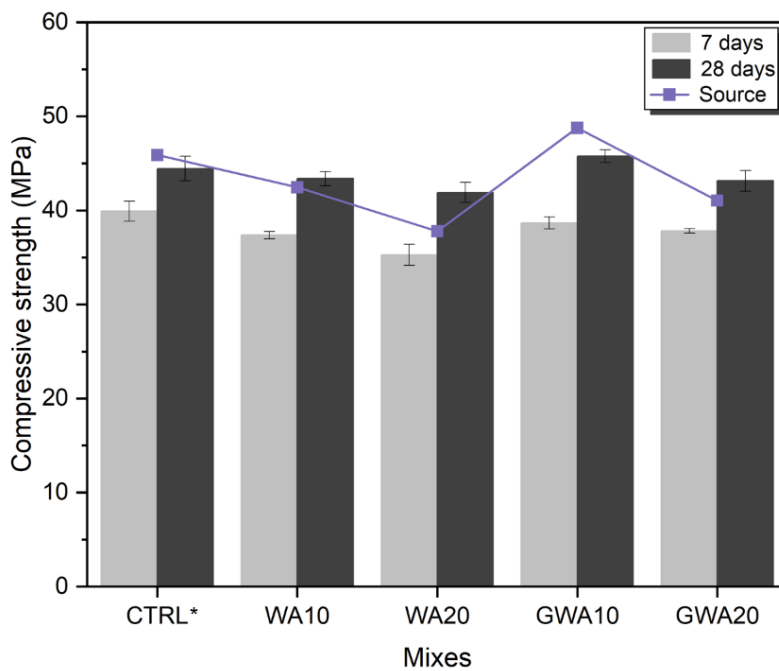
Kumulativ lakning från monolitiska betongprover (Figur 13) visar att Cd-, Ni- och Zn-koncentrationer förblev låga och huvudsakligen frigjordes under initialfasen. Cr-lakning minskade i alla askinnehållande blandningar jämfört med kontrollen, enligt en tvåstegsprocess med ytvaskning följt av långsammare diffusion (Carević et al., 2020). Däremot förbättrades Cu-immobilisering i träaskebetong, särskilt WA3-10m-20, på grund av tätare matris som främjar Cu-bindning i hydreringsprodukter. Pb-lakning minskade generellt, men mald träaska (WA3-10m-20) accelererade Pb-frisättning under de första 9 dagarna innan den avmattades, vilket stöder en fasstyrd mekanism där tidig upplösning följs av diffusionstyrd frisättning (Berra et al., 2019).



Figur 13. Kumulativ lakning från monolitiska prover vid dag 9 och 64 för (a) Cd, (b) Cr, (c) Cu, (d) Pb, (e) Ni och (f) Zn (Teker Ercan, 2025).

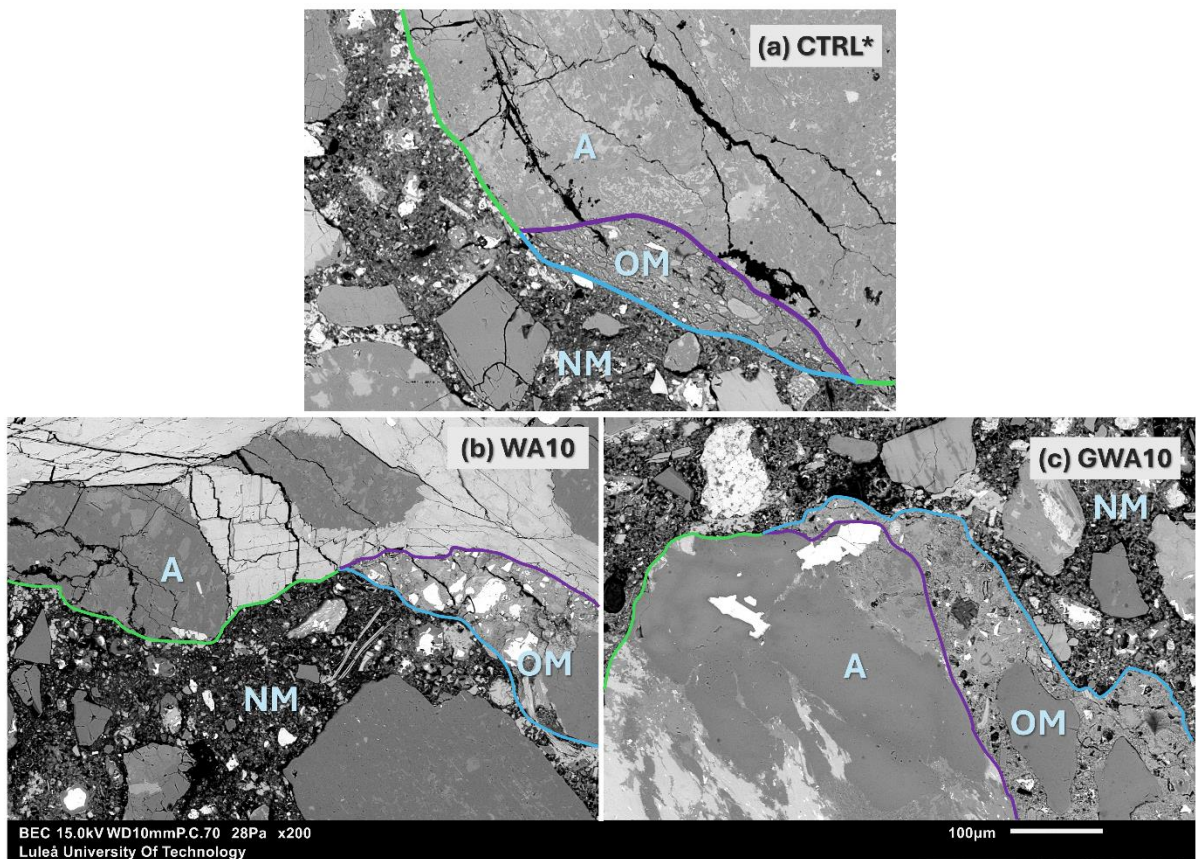
4.4. Återvunnen betongballast

Tryckhållfasthetstesterna (Figur 14) visar tydligt att kvaliteten på ursprungsbetongen från vilken den återvunna betongballasten (RCA) framställdes är en avgörande faktor. Blandningen GWA10, som använde RCA från betong innehållande mald träaska (GWA), uppnådde högst 28-dygns hållfasthet. Denna högre långtidsprestanda tillskrivs GWA:s förbättrade puzzolana aktivitet, vilket stärker den ursprungliga gamla matrisen (OM) genom fortsatt hydrattation. Å andra sidan uppvisade WA10-blandningen, baserad på betong med icke-mald träaska, något lägre 28-dygns hållfasthet men visade ändå förbättring jämfört med förväntad prestanda hos konventionell RCA.

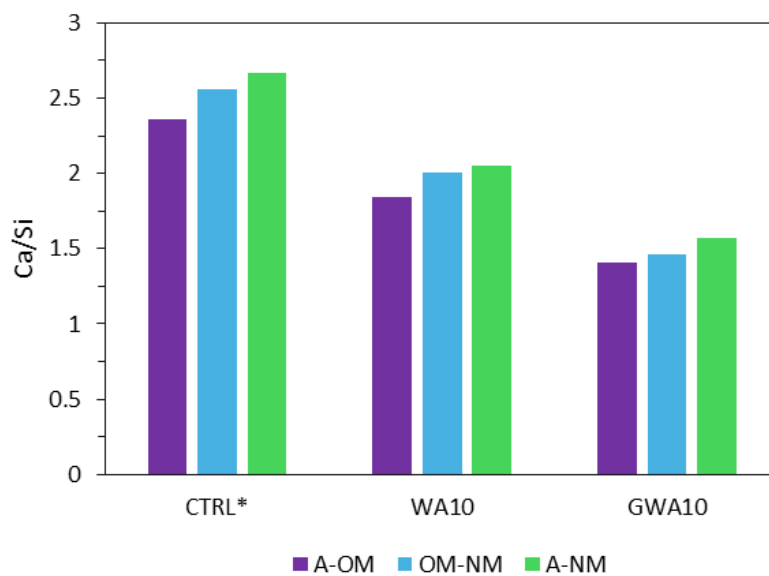


Figur 14. Tryckhållfasthet hos betongblandningar med RCA.

Mikrostrukturanalys av övergångszonen (ITZ) (Figur 15 och 16) stöder resultaten från tryckhållfasthetstesterna. GWA10 uppvisade de lägsta Ca/Si-förhållandena över samtliga tre ITZ-regioner: A-OM, OM-NM och A-NM. Lägre Ca/Si-förhållanden indikerar normalt en högre grad av polymerisering i C-S-H-gelen, vilket leder till en tätare matris. De låga förhållandena i GWA10 beror på att mald träaska i den gamla matrisen främjar sekundära puzzolana reaktioner vid kontakt med den nya cementpastan. Denna mekanism förfinar ITZ-strukturen, vilket syns i den tätare strukturen i Figur 14c, och förklarar den högre mekaniska prestandan hos GWA10-betongen.



Figur 15. SEM-bilder av övergångszonen (ITZ) för utvalda RCA-blandningar: (a) CTRL*, (b) WA10 och (c) GWA10. A (Ballast), OM (Gammal matris) och NM (Ny matris). Linjerna anger ITZ-regioner: A-OM (Lila), OM-NM (Blå) och A-NM (Grön).



Figur 16. Genomsnittliga Ca/Si-förhållanden i ITZ (A: Ballast, OM: Gammal matris, NM: Ny matris).

5. Sammanfattning

Projektet har undersökt möjligheten att använda träaska (WA) som ett kompletterande binde-medel (SCM) i cementbaserade material. Syftet var att utvärdera hur mekanisk aktivering genom högenergimalning i en kulkvarn påverkar träaskans fysikaliska, kemiska och miljömässiga egenskaper samt att jämföra dess prestanda med konventionell flygaska (FA).

Fyra typer av träaska (WA1–WA4) samlades in från träindustrier i norra Sverige. Varje aska maldes i 10 respektive 20 minuter i en planetkvarn och karakteriserades med avseende på kemisk sammansättning, kornstorleksfördelning, morfologi och puzzolan aktivitet. Utvärderingen omfattade standardiserade provningsmetoder såsom Strength Activity Index (SAI), Frattini-test, R3-test, röntgendiffraktion (XRD), termogravimetrisk analys (TGA/DTG) samt svepelektronmikroskopi (SEM/EDS). I den andra fasen användes utvalda askor (WA3 och WA4) i betong med 10 % och 20 % cementersättning, och effekterna på bearbetbarhet, tryckhållfasthet, frostbeständighet samt urlakning av tungmetaller analyserades.

Resultaten visade att högenergi-malning avsevärt ökade träaskans reaktivitet och förbättrade tryckhållfastheten hos både murbruk och betong. En malningstid på 10 minuter gav den bästa helhetsbalansen genom ökad reaktivitet och hållfasthet samtidigt som partikelagglomeration begränsades. I betong ökade den malda träaskan den kumulativa värmeutvecklingen under hydratiseringen och bidrog till en tätare mikrostruktur, vilket förbättrade de mekaniska egenskaperna. Luftporbildande tillsatsmedel var avgörande för att förbättra frostbeständigheten och reducerade ytavskalning avsevärt. Vidare minskade den mekaniska aktiveringen rörligheten hos tungmetaller, vilket förbättrade materialets miljöprestanda.

Användning av betong baserad på malda träaska som återvunnet ballastmaterial (RCA) förbättrade den mekaniska prestandan hos ny betong. Mikrostrukturell analys av den interfaciala övergångszonen (ITZ) bekräftade att malda träaska i den gamla matrisen främjade sekundära puzzolana reaktioner, vilket ledde till en tätare ITZ-struktur och högre tryckhållfasthet.

6. Slutsatser

Följande slutsatser kan dras från resultaten i detta forskningsprojekt:

- Högenergimalning förbättrar signifikant träaskans finhet, specifika yta och reaktivitet.
- Icke-malda träaska uppvisar generellt begränsad reaktivitet och uppfyller inte standardkraven för kompletterande cementmaterial.
- En malningstid på 10 minuter identifierades som optimal för de flesta träaskor och ger bäst balans mellan reaktivitet och praktisk effektivitet.
- Betong med 10 vikt-% cement ersatt med malda träaska uppnådde tryckhållfastheter som var jämförbara med eller högre än referensbetongen.
- Ökad ersättning till 20 vikt-% reducerade hållfastheten i alla system, främst på grund av spädning av klinker.
- Mald träaska ökade den kumulativa värmeavgivningen under hydratation och gav en tätare mikrostruktur jämfört med icke-malda aska.
- Betong innehållande träaska uppvisade försämrade frostbeständighet utan tillsats av luftporbildande medel, med högre ytavskalning som följd.

- Tillsats av luftporbildande medel förbättrade frostresistensen signifikant i samtliga blandningar.
- Lakningsbeteendet varierade beroende på typ av träaska och malningstid.
- Malning minskade de relativa lakningshastigheterna för flera tungmetaller från träaska.
- När mald träaska blandas in i betong minskar tungmetалldynamiken ytterligare, vilket indikerar effektiv bindning i cementmatrisen genom inkapsling och kemisk bindning.
- Återvunnen betongballast från träaskebetong uppvisade god mekanisk prestanda i nya betongblandningar.
- Blandningen GWA10, med återvunnen ballast från betong innehållande 10 vikt-% mald träaska, uppnådde högst 28-dygns tryckhållfasthet bland alla blandningar med återvunnen ballast.
- Mikrostrukturell analys bekräftade en tätare övergångszon (ITZ) när mald träaska fanns i den ursprungliga matrisen, med lägre Ca/Si-förhållanden som indikerar högre C-S-H-polymerisering och förbättrad bindning.

Litteraturförteckning

- Abdullahi, M. (2006). Characteristics of Wood ASH/OPC Concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 8, 9–16. <http://lejpt.academicdirect.org>
- Amaral, R. C., Rohden, A. B., Garcez, M. R., & Andrade, J. J. de O. (2022). Reuse of wood ash from biomass combustion in non-structural concrete: mechanical properties, durability, and eco-efficiency. *Journal of Material Cycles and Waste Management Volume*, 24, 2439–2454.
- ASTM C1897-20. (2020). Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements. *ASTM International, West Conshohocken, PA, 04*(August), 7–11. <https://doi.org/10.1520/C1897-20.2>
- ASTM C618-15. (2015). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. www.astm.org
- Bakhoun, E. S., Amir, A., Osama, F., & Adel, M. (2023). Prediction model for the compressive strength of green concrete using cement kiln dust and fly ash. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28868-7>
- Berra, M., Ippolito, N. M., Mangialardi, T., Paolini, A. E., & Piga, L. (2019). Leaching test procedure for assessing the compliance of the chemical and environmental requirements of hardened woody biomass fly ash cement mixtures. *Waste Management*, 90, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.038>
- Berra, M., Mangialardi, T., & Paolini, A. E. (2015). Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 76, 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.052>
- Boverket. (2022). *Efterfrågan på cement och möjliga klimateffekter av ökad import*.
- Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N., & Ukrainczyk, N. (2019). Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1045–1064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.321>
- Carević, I., Štirmer, N., Trkmić, M., & Jurić, K. K. (2020). Leaching characteristics of wood biomass fly ash cement composites. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(23), 1–17. <https://doi.org/10.3390/app10238704>
- CEN/TS 12390-9:2016. (2018). *Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts – Scaling*.
- Demis, S., Tapali, J. G., & Papadakis, V. G. (2014). An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*, 68, 291–300. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.06.071>
- Doudart de la Grée, G. C. H., Florea, M. V. A., Keulen, A., & Brouwers, H. J. H. (2016). Contaminated biomass fly ashes - Characterization and treatment optimization for reuse as building materials. *Waste Management*, 49, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.023>

- Drljača, D. M., Vukić, L. M., Dragić, D. M., Borković, A. P., Botić, T. T., Dugić, P. T., Papuga, S. V., Šolić, M. D., Maletić, S. P., Gvero, P. M., & Savković, J. R. (2022). Leaching of heavy metals from wood biomass ash, before and after binding in cement composite. *Journal of the Serbian Chemical Society*, *87*(9), 1091–1108. <https://doi.org/10.2298/JSC220217054D>
- Etiégni, L., & Campbell, A. G. (1991). Physical and Chemical Characteristics of Wood Ash*. *Bioresource Technology*, *37*, 173–178.
- Garcia, M. D. L., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. *Construction and Building Materials*, *41*, 897–910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.081>
- Gerges, N., Issa, C. A., Antoun, M., Sleiman, E., Hallal, F., Shamoun, P., & Hayek, J. (2021). Eco-friendly mortar: Optimum combination of wood ash, crumb rubber, and fine crushed glass. *Case Studies in Construction Materials*, *15*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00588>
- Global Cement and Concrete Association. (n.d.). <https://gccassociation.org>. 2022.
- Hills, C. D., Tripathi, N., Singh, R. S., Carey, P. J., & Lowry, F. (2020). Valorisation of agricultural biomass-ash with CO₂. *Scientific Reports*, *10*(1), 13801. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70504-1>
- IEA. (2025). *Cement*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/energy-system/industry/cement>
- James, A. K., Thring, R. W., Helle, S., & Ghuman, H. S. (2012). Ash management review-applications of biomass bottom ash. *Energies*, *5*(10), 3856–3873. <https://doi.org/10.3390/en5103856>
- Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., & Horvarth, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, *16*, 698–699. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>
- Montinaro, S., Concas, A., Pisu, M., & Cao, G. (2008). Immobilization of heavy metals in contaminated soils through ball milling with and without additives. *Chemical Engineering Journal*, *142*(3), 271–284. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.12.003>
- Nomura, Y., Fujiwara, K., Terada, A., Nakai, S., & Hosomi, M. (2010). Prevention of lead leaching from fly ashes by mechanochemical treatment. *Waste Management*, *30*(7), 1290–1295. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.025>
- Omran, A., Soliman, N., Xie, A., Davidenko, T., & Tagnit-Hamou, A. (2018). Field trials with concrete incorporating biomass-fly ash. *Construction and Building Materials*, *186*, 660–669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.084>
- Ottosen, L. M., Hansen, E. Ø., Jensen, P. E., Kirkelund, G. M., & Golterman, P. (2016). Wood ash used as partly sand and/or cement replacement in mortar. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, *11*(5), 781–791. <https://doi.org/10.2495/SDP-V11-N5-781-791>
- Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A. C., Allen, G. C., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2009). Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials*, *172*(2–3), 1049–1060. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>

- Rissanen, J., Ohenoja, K., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2020). *Peat-Wood Fly Ash as Cold-Region Supplementary Cementitious Material: Air Content and Freeze-Thaw Resistance of Air-Entrained Mortars*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943)
- Rumman, R., & Alam, M. S. (2025). Does wood fly ash (WFA) have pozzolanic property? A study on low- and high-temperature partially burnt WFA compared to classes C and F coal fly ash (CFA). *Construction and Building Materials*, 471(November 2024), 140700. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140700>
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114(June), 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Siddique, R. (2012). Utilization of wood ash in concrete manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.07.004>
- Sigvardsen, N. M., Kirkelund, G. M., Jensen, P. E., Geiker, M. R., & Ottosen, L. M. (2019). Impact of production parameters on physiochemical characteristics of wood ash for possible utilisation in cement-based materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.034>
- SS-EN 1097-6:2022. (2022). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption*.
- SS-EN 12350-2:2019. (2019). *Testing Fresh Concrete—Part 2: Slump Test*.
- SS-EN 12350-7:2019. (2019). *Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods*.
- SS-EN 12390-3:2019. (2019). *Testing Hardened Concrete Part 3: Compressive Strength of Test Specimens*.
- SS-EN 16637-2:2023. (2023). *Construction products: Assessment of release of dangerous substances – Part 2: Horizontal dynamic surface leaching test*.
- SS-EN 196-11:2019. (2019). *Methods of testing cement – Part 11: Heat of hydration – Isothermal Conduction Calorimetry method*.
- SS-EN 196-5. (2011). *Methods of testing cement - Part 5 - Pozzolanicity test for pozzolanic cement*.
- SS-EN 206:2013+A2:2021. (2021). *Concrete – Specification, performance, production and conformity*.
- SS-EN 450-1. (2012). *Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria*.
- Suraneni, P. (2021). Recent developments in reactivity testing of supplementary cementitious materials. *RILEM Technical Letters*, 6, 131–139. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.150>
- Svenska Betongföreningen. (2025). *No Title*. <https://www.svenskbetong.se/om-betong/branschen>
- Teixeira, E. R., Mateus, R., Camões, A. F., Bragança, L., & Branco, F. G. (2016).

- Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2221–2230. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.09.124>
- Teixeira, E. R. R., Camões, A., & Branco, F. G. G. (2019). Valorisation of wood fly ash on concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 145(February), 292–310. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.028>
- Teker Ercan, E. E. (2025). *Utilization and Reactivity Enhancement of Wood Ash in Cement-Based and Alkali-Activated Materials*. Luleå University of Technology.
- Teker Ercan, E. E., Andreas, L., Cwirzen, A., & Habermehl-Cwirzen, K. (2023). Wood Ash as Sustainable Alternative Raw Material for the Production of Concrete—A Review. *Materials*, 16(7), 2557. <https://doi.org/10.3390/ma16072557>
- Teker Ercan, E. E., Andreas, L., Cwirzen, A., & Habermehl-Cwirzen, K. (2025). Ground wood ash as a supplementary cementitious material: Effects on strength, durability and environmental performance of concrete. *Construction and Building Materials*, 503, 144520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144520>
- Teker Ercan, E. E., Panek, R., Szeląg, M., Cwirzen, A., & Habermehl-Cwirzen, K. (2025). The Impact of the High-Energy Grinding of Wood Ash on Its Pozzolanic Activity. *Materials*, 18(13).
- Tripathi, N., Hills, C. D., Singh, R. S., & Atkinson, C. J. (2019). Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5>
- Tripathi, N., Hills, C. D., Singh, R. S., & Singh, J. S. (2020). Offsetting anthropogenic carbon emissions from biomass waste and mineralised carbon dioxide. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57801-5>
- Udoeyo, F. F., Inyang, H., David, Y. T., & Oparadu, E. E. (2006). Potential of Wood Waste Ash as an Additive in Concrete. *Journal of Materials In Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200618:4605>
- Ukrainczyk, N., Vrbos, N., & Koenders, E. A. B. (2016). Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 30(2), 137–148. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2231>
- Wang, N., Sun, X., Zhao, Q., Yang, Y., & Wang, P. (2020). Leachability and adverse effects of coal fly ash: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 396(April). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122725>
- Wang, S., Llamazos, E., Baxter, L., & Fonseca, F. (2008). Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests. *Fuel*, 87(3), 359–364. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.027>
- Wang, Y., Ramanathan, S., Burriss, L., Hooton, R. D., Shearer, C. R., & Suraneni, P. (2022). Reactivity of Unconventional Fly Ashes, SCMs, and Fillers: Effects of Sulfates, Carbonates, and Temperature. *Advances in Civil Engineering Materials*, 11(2), 639–657. <https://doi.org/10.1520/ACEM20220003>