

TEKNISK INFORMATION

Reviderad 2021-10-21/OE. Gällande version kan laddas ner från www.thomasconcretegroup.com

Slagg Bremen

Mald granulerad masugnsslagg för användning i betong och bruk enligt SS 137003.



 0402
Thomas Cement AB, Box 5162, SE-402 26 2014 0402-CPR-SC0324
SS-EN 15167-1:2006 Mald granulerad masugnsslagg för användning i betong, bruk och injekteringsbruk GGBS – Slagg Bremen
<small>Övriga specifikationer om produkten se aktuellt Produktdatablad (på www.thomasconcretegroup.com)</small>

Slagg Bremen är ett mineraliskt tillsatsmaterial (typ II) med latent hydrauliska egenskaper, för användning som bindemedel i betong och bruk enligt SS 137003. Enligt standarden SS-EN 15167-1 benämns slagg som GGBS, vilket står för "Ground Granulated Blast Furnace Slag" (mald granulerad masugnsslagg). Slagg Bremen kommer från järntillverkning i Tyskland och är ett kvalitetssäkrat och CE-märkt tillsatsmaterial som uppfyller kraven i SS-EN 15167-1 och -2. Användningen av Slagg Bremen som ett tillsatsmaterial/bindemedel erbjuder följande möjligheter:

- Minskad cementmängd (minskad CO₂ belastning)
- Förbättrad pump- och arbetbarhet samt minskat vattenbehov
- Minskad värmeutveckling och risk för temperatursprickor vid massiva konstruktioner
- Ökad beständighet (ökad sulfatbeständighet, ökat motstånd mot alkaliskelreaktioner, syra och kemiska angrepp, samt minskad inträngning och ökad bindning av klorider)
- Ljusare betong med högre ytfinish

Historik och ursprung

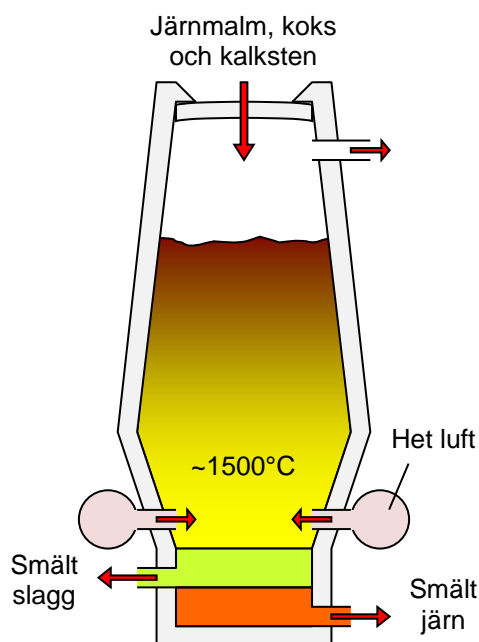
De latent hydrauliska egenskaperna hos mald och granulerad masugnsslagg (GGBS) upptäcktes 1862 i Tyskland av Emil Langen, som visade att om man snabbt kylde (granulera) slaggsmltan från järnmasugnen och sedan malde denna samt blandade den med bränd kalk, kunde hög hållfasthet uppnås. Denna utveckling ledde till den första kommersiella produktionen av slagg-kalk-cement i Tyskland 1865. I Frankrike användes slaggcement år 1889 för att bygga Paris tunnelbana. Godhard Prüssig kombinerade GGBS och Portlandcement, vilket ledde till den första produktionen av Portland-slaggcement i Tyskland år 1892. Sedan dess har användningen av GGBS varit omfattande, bl.a. i många europeiska länder, såsom Holland, Frankrike, Storbritannien och Tyskland, dels som råvara för tillverkning av cement, och dels som ett tillsatsmaterial i kombination med portlandcement, släckt kalk, naturlig gips, eller anhydrit. Det tillverkas idag årligen ca 100 miljoner ton GGBS i världen, men i Sverige är tillverkningen och användningen av GGBS begränsad.

Slagg Bremen tillverkas av Holcim AG i Bremen, Tyskland. Holcim är ett globalt företag med bas i Schweiz, med över 80 tusen anställda i drygt 70 länder. Holcim inledde produktion av cement år 1912 i Holderbank nära Zürich, och är idag den näst största cementtillverkaren i världen (efter Lafarge). Företaget levererar också fabriksbetong, ballast, asfalt och tillhörande byggtjänster. Slagg Bremen introducerades på den svenska marknaden av Thomas Cement AB under 2011, och distribueras från terminal i Landskrona, Oxelösund och Uddevalla.

Tillverkning

Masugnsslagg är en biprodukt vid tillverkning av råjärn i masugn. Järnmalm med järnoxid som huvudkomponent upphettas tillsammans med koks till över 1500°C, vilket gör att järnoxidens syre övergår till kolet i koksen under bildning av kolsyra, koldioxid och kolmonoxid. Järnet reduceras till metall, smälter och uppsamlas i flytande form i den nedre delen av masugnen. Men eftersom järnmalmen inte enbart består av järnoxid utan även av föroreningar s.k. gångart, gäller det att avskilja det metalliska järnet från denna. Gångarten, som huvudsakligen består av kiselsyra och aluminiumoxid, har en betydligt högre smältpunkt än järnet. Det skulle därför leda till stora svårigheter att avskilja järnet från gångarten så länge denna föreligger i fast form. Detta löses genom att man förutom järnmalm och koks även matar in så mycket kalk i masugnen att denna tillsammans med gångarten ger en förhållandevis lättsmält massa, så kallad masugnsslagg. Denna flyter på den tyngre jämsmältan och kan på samma sätt som järnet periodiskt tappas ut. Masugnsslagg är ett material som är nära släkt med portlandcementet. Dess huvudbeståndsdelar är kalk, kiselsyra och aluminiumoxid. Produktionen av järn och slagg sker kontinuerligt och oavbrutet under minst tre år, varför tillverkaren måste säkerställa ett lager av råmaterial av jämn kvalitet för en konstant matning. För varje ton producerat råjärn, genereras ca 300 kg slagg, och en masugn genererar upp till ca 1,0 miljoner ton slagg per år.

Men det är först efter att man genom snabb avkyllning sörgt för att kristallisationen är minimal och den granulerade masugnsslaggen blir amorf (glasartad) i sin struktur, vilket resulterar i det latent hydrauliska reaktiva materialet som eftersträvas. Efter att slaggen tappats av sker avkyllningen genom att spruta med stora mängder vatten (10-20 ggr slaggen), eller låta den smälta slaggen löpa ut i vatten, så den snabbt kommer ner i temperatur under 50°C. Den snabba avkyllningen gör att ett hårt sintrat enskornigt (ca 5 mm stor) granulat med karaktär av sand erhålls. Därefter läggs den på hög och avvattnas, varefter den siktas och torkas. Vattenkyld granulerad masugnsslagg (GBS) kallas även för slaggsand eller hyttsand (från tyskans Hüttesand). Detta skall inte förväxlas med hyttsten, som är den mer kristallina luftkylda slaggen. GBS användas som vägmateriell och markstabilisering, eller av cementindustrin där den sam- eller separatmalas för tillverkning av cement. GBS kan även separatmalas till ett fint pulver och man får tillsatsmaterialet "mald granulerad masugnsslagg", GGBS.

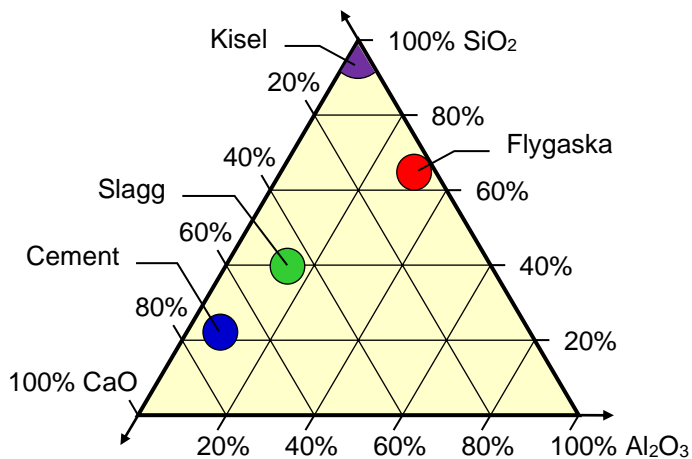


Kemisk sammansättning och reaktion/hydratation

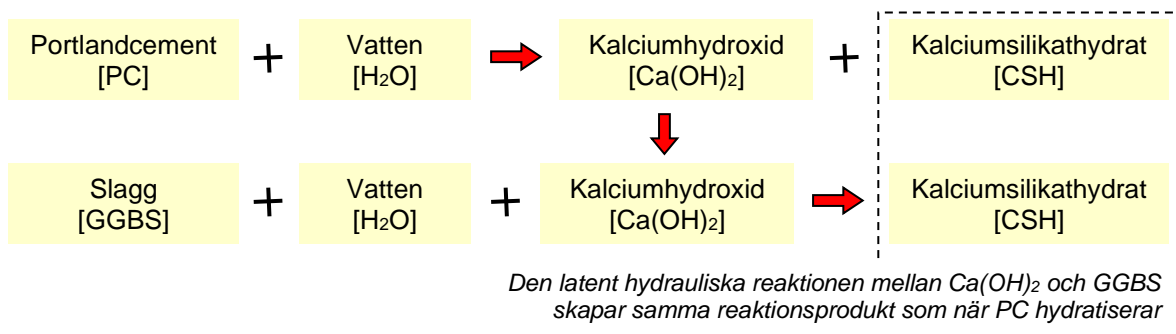
GGBS är i princip sammansatt av samma oxider som Portlandscement, d.v.s. basiska oxider av kalcium (CaO), magnesium (MgO), och sura oxider av kisel (SiO₂) och aluminium (Al₂O₃). Avkyllningen av den smälta slaggen är viktig för dess sammansättning. Sker denna långsamt genereras en samling av kristallina mineraler, men då den kyls snabbt skapas ett granulerat med ett glashaltigt (amortt) nätverk av de viktiga oxiderna (CaO, SiO₂, MgO och Al₂O₃) i oordnad kombination med syre. Mindre komponenter såsom natrium, kalium och titan förekommer också. Dessa alkaliska metalljoner förekommer som en integrerad del i den amorfa/glasiga strukturen, varför mängden vattenlösliga alkalier är låg hos GGBS. Glashalten skall vara minst 67% (SS-EN 15167-1), men bör vara över 90%. Utöver denna amorfa fas, beroende på slaggsammansättning och avkyllningen, kan det förekomma små mängder av kristallina faser (bl.a. dikalciumsilikat, gehlenit, anortit, åkermanit och merwinit).

Förutom den kemiska sammansättningen av slaggen, är ugnens temperatur, resultatet av avkyllningen och malningen viktiga egenskaper för att säkerställa en kvalitativ GGBS. Den kemiska sammansättningen kan variera något mellan olika järnverk, beroende på delmaterialens (malm, kalksten och koks) egenskaper och på masugnens funktion. Men från en och samma ugn är variationen generellt inte större än ±2% för CaO och SiO₂, samt ±1% för MgO och Al₂O₃.

Med enbart vatten reagerar GGBS så långsamt att den ej kan komma i betraktande som självständigt hydrauliskt bindemedel. För att hårdna/binda krävs det utöver vatten löslig kalkhydrat (kalciumhydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$), eller annan stark bas såsom natrium- eller kaliumhydroxid (NaOH och KOH), vilka fungerar som alkalisk aktivator. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bildas när portlandscement (PC) reagerar med vatten, och när väl reaktionerna satts igång finns det tillräckligt med CaO hos GGBS för att kalciumsilikathydrat (CSH) skall bildas. Dessa reaktioner är av samma art som de som sker under hårdnandet av PC, men sker i allmänhet något långsammare.

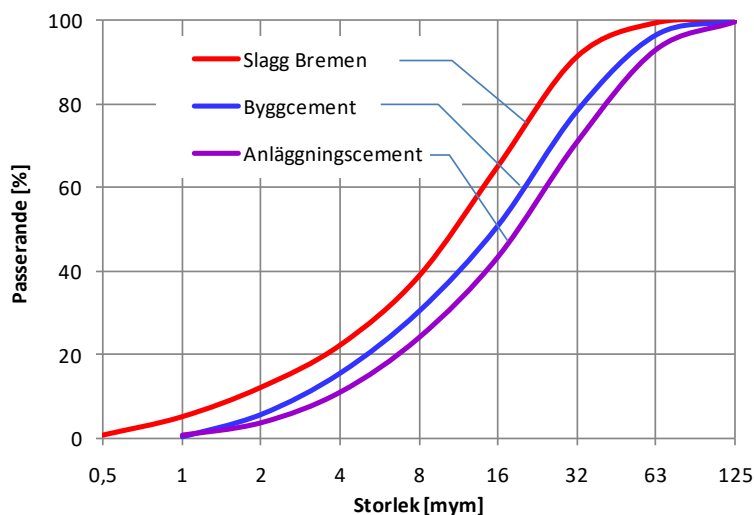


Man betecknar därför GGBS som ett "latent" hydrauliskt bindemedel, d.v.s. reaktionen med vatten är dold tills den framkallas av någon aktivator. Hos pozzolaner, exempelvis flygaska, är CaO -halten däremot otillräcklig. Reaktiviteten hos GGBS styrs främst av dess glashalt, finhet och andelen reaktiva oxider (CaO , SiO_2 och Al_2O_3). Den kemiska sammansättningen för Slagg Bremen redovisas i tabellen under "Kemisk data".



Finhet

Partikelstorleken och finheten styrs av malningen av den granulerade slaggen. Finheten (som specifik yta, uppmätt med Blaine) skall vara minst 275 m²/kg (SS-EN 15167-1), men är generellt betydligt högre och ofta likvärdig med cement. Finheten styr till stor del reaktiviteten hos GGBS, samt dess vattenbehov. Granulerad slagg är ett mycket hårt material, varför malningen är energikrävande. Slagg Bremen har en finhet (Blaine) på 400-440 m²/kg, vilket kan jämföras med Byggcementets ca 430 m²/kg, men storleksfördelning (siktcurva) är något finare än Byggcement (se diagram).



Densitet

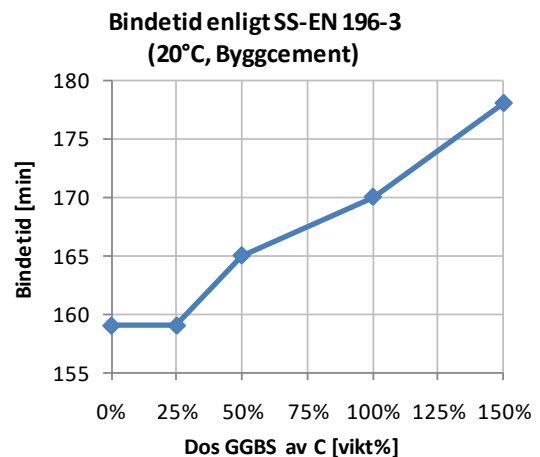
Slagg Bremen har en kompaktdensitet på 2900 kg/m³, vilket kan jämföras med cement som har ca 3100 kg/m³, och skrymdensitet ca 1150 kg/m³ (cement ca 1250 kg/m³).

Exempel: För en betong med 400 kg cement och 160 liter vatten där 25% av cementmängden ersätts med lika vikt ($k=1,0$) GGBS ökar pastavolymen från $V_p = C/\rho_c + GGBS/\rho_{GGBS} + V/\rho_v = 400/3,2 + 160/1,0 = 285$ liter till $300/3,2 + 100/2,9 + 160/1,0 = 288$ liter

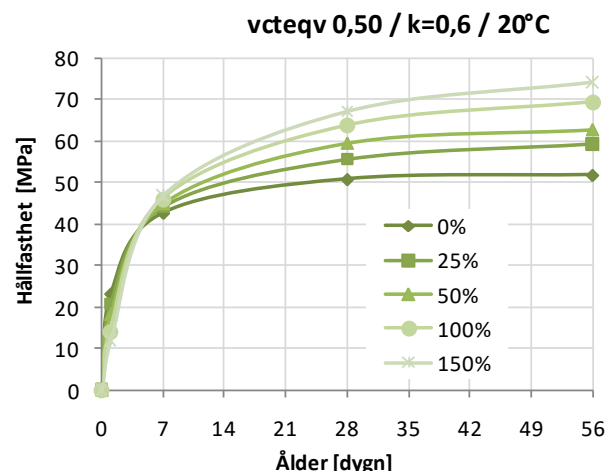
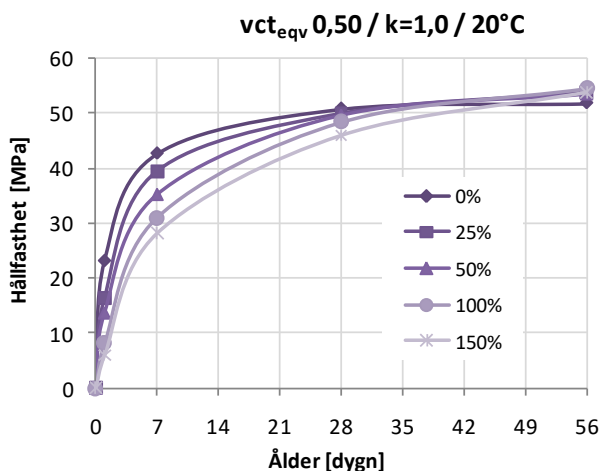
Hårdnande och hållfasthetsutveckling

Hållfasthetsutvecklingen upp till ca 7 dygn går som regel långsammare när GGBS används som ersättning för en del av portlandcement i betong. Efter 7 dygn är utvecklingen den omvända, och vid 28 dygn är hållfastheten som regel likvärdig eller högre med GGBS, för att sedan fortsatt öka i högre utsträckning än vad som sker hos portlandcement. I vilken grad hållfastheten utvecklas är främst beroende på beroende på andel GGBS som ersätter cementen, men även på den initiala betongtemperaturen, vatten-cement-talet (vct), samt egenskaperna hos cement och GGBS. Även vilken effektivitetsfaktor (k) som ansätts har inverkan, där $k=1,0$ ger ett långsammare hårdnande än med $k=0,6$.

Med GGBS förlängs tidpunkten för betongens initiala tillstyvnande och vid höga doseringar kan den förlängas med upp till en timme vid 20°C, men liten eller ingen förändring sker vid temperaturer över 30°C. Vid låga temperaturer kan retardationen bli stor, varför extra isolering, tillskotsvärme eller acceleratorer kan behövas för att minimera denna effekt. Eftersom mängden av portlandcement i en blandning vanligtvis bestämmer tillstyvnandet, kan det vara aktuellt att minska doseringen GGBS i kallt väder, exempelvis max 25% (20% av bindemedel). Ett annat alternativt är att sänka effektivitetsfaktorn (k), om 1,0 ner till exempelvis 0,6. Vid högre temperaturer, exempelvis sommartid, eller tjockare konstruktioner, är en långsammare tillstyvnad däremot ofta önskvärd. Betong med höga doseringar GGBS är då ofta fördelaktigt.

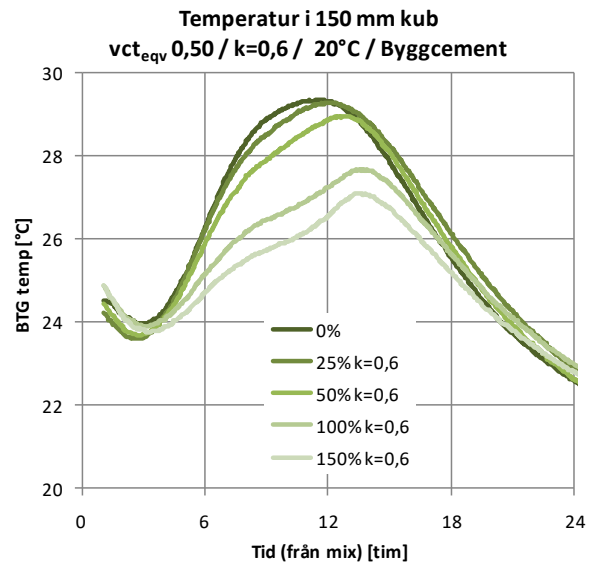
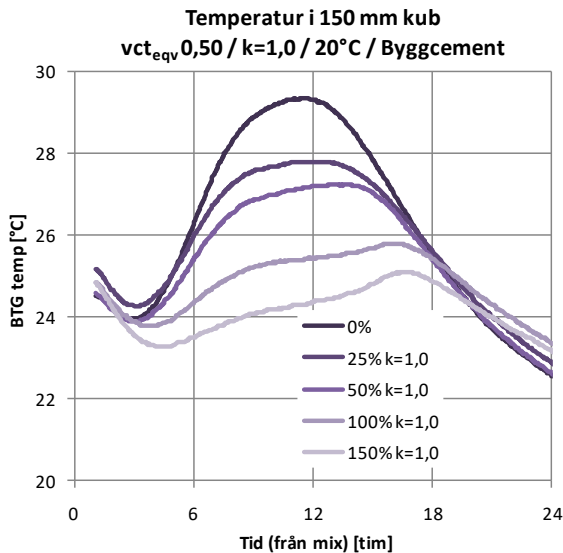


Eftersom hållfasthetsutvecklingen för betong med GGBS fortsätter i större utsträckning, kan en högre ålder än 28 dygn kan vara lämpligt som dimensionerande värde (exempelvis 56 eller 91 dygn).



Temperaturutveckling

Vid betongtemperatur under 30°C blir temperaturutvecklingen både långsammare och lägre när en del av cement ersätts med GGBS (se diagram). Effekten ökar med ökad dos GGBS samt med minskad betongtemperatur. Även vilket värde på effektivitetsfaktorn (k) man ansätter påverkar temperaturutvecklingen, på samma sätt som den har på hållfasthetsutvecklingen (se diagram). Vid tillfällen då betongtemperaturen behöver begränsas, exempelvis under sommartid eller vid tjockare konstruktioner (exempelvis fundament), kan därför höga doser av GGBS vara gynnsamt.



Dosering

Doseringen av slagg (GGBS) i betongen brukar anges som vikt% av cementmängden alternativt av bindemedelsmängden. I senaste utgåvan av SS 137003 anges doseringen som vikt% på bindemedlet, medans i tidigare utgåvor var det på cementmängden. Exempelvis motsvarar 100% slagg av cementmängden 50% av bindemedelsmängden. På samma sett motsvara 25% slagg av cement 20% av bindemedel. För att räkna om vikt% dosering slagg av cementmängden (XC_{GGBS}) till dosering av ballastmängden (XB_{GGBS}), och omvänt, görs det enligt:

$$XB_{GGBS} = \frac{XC_{GGBS}}{100\% + XC_{GGBS}} \quad XC_{GGBS} = \frac{XB_{GGBS}}{100\% - XB_{GGBS}} \quad [\%]$$

Se också under "k-faktor", "Maximal dosering" och "Konsistens".

k-faktor

Effektivitetsfaktorn (k) gör det möjligt att tillgodoräkna sig slagg (och andra tillsatsmaterial av typ II), med hänsyn till betongens 28-dygnshållfasthet och beständighet. I stället för vct beräknas det ekvivalenta vatten-cement talet (vct_{eqv}) enligt:

$$vct_{eqv} = \frac{V}{C + k \cdot GGBS} \quad [-]$$

Alternativt kan cementmängden (C) för en given vattenmängd (V), dos slagg (av cementvikten, XC_{GGBS}) och vct_{eqv} beräknas enligt:

$$C = \frac{V}{vct_{eqv} \cdot (1 + k \cdot XC_{GGBS})} \quad [kg]$$

Vid beräkning vct_{eqv} med slagg som bindemedel gäller effektivitetsfaktorn $k=0,6$ enligt SS 137003, men en högre faktor ($k=0,8$) kan tillämpas med aktuellt cement om detta med slaggen har ett aktivitetsindex över 80% efter 28 dygn (provning och utvärdering enligt SS-EN 15167-1 och -2). Maximalt 100 vikt% av Cem I mängden (eller 100%·1,05 av klinker) får tillgodoräknas med k-värde, enligt SS 137003. Vill man tillgodoräkna sig högre slagginblandning, och samtidigt inte använda k-faktor, kan man tillämpa konceptet EPCC (Equal Performance Cement Combinations). Detta innebär att man själv sätter samman en bindemedelskombination (BK) av cement och slagg, motsvarande ett CEM II/A-S, II/B-S, III, eller kompositcement. Mer information om EPCC ges i SS 137003 (bilaga P).

Slagg Bremen är godkänd för k-faktor 0,8 med följande cement:

- Bygg CEM II/A-LL 42,5 R (Cementa, Skövde)
- Bas CEM II/A-LL 42,5 R (Cementa, Slite)
- Bas CEM II/A-V 52,5 N (Cementa, Slite)
- Komposit CEM II/A-M(S-LL) 52,5 N (Schwenk, Rüdersdorf, Tyskland)

I kombination med andra cement (exempelvis Anläggning eller SH-cement) gäller $k=0,6$.

Godkännandebevis från RISE för utökad k-faktor finns att hämtas på Thomas Cements hemsida (under www.thomasconcretegroup.com).

Slagg Bremen har även provats enligt EPCC konceptet med följande bindemedelskombinationer:

- BK II/A-S 42,5 N MH/LA/NSR med 16% GGBS och 84% Anläggning Slite eller Anläggning Brevik
- BK II/B-S 42,5 N med 32% GGBS och 68% Anläggning Slite eller Anläggning Brevik
- BK III/A 32,5 L med 63% GGBS och 37% Anläggning Slite och Anläggning Brevik

För mer information om EPCC och BK, kontakta Thomas Cement.

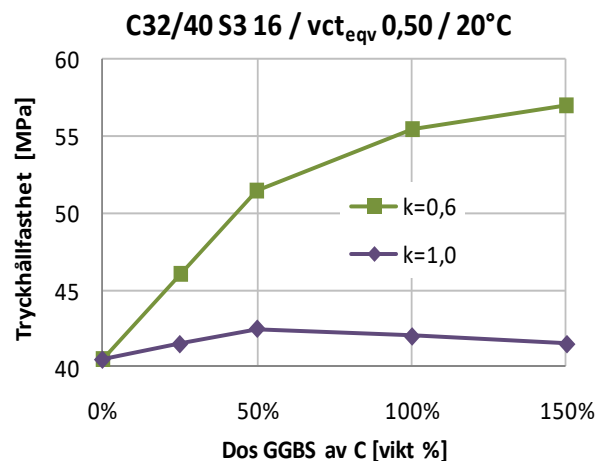
<i>Exempel:</i>	Med 160 liter vatten, 300 kg cement och 20% slagg* av C med $k=0,8$ blir $vct_{eqv} = 160 / (300 + 0,8 \cdot 20\% \cdot 300) = 0,46$
<i>Exempel:</i>	Med ett vattenbehov på 170 liter, ett krav på $vct_{eqv}=0,50$ och 20% slagg* med $k=0,6$ blir cementmängden $C = 170 / [0,50 \cdot (1 + 0,8 \cdot 20\%)] = 293$ kg, och slaggmängden GGBS = $293 \cdot 20\% = 59$ kg

* 20% av cementmängd motsvarar 25% av bindemedelsmängd, se under "Dosering".

Aktivitetsindex (28 dygn) med Slagg Bremen ligger på ca 90%-100%, beroende på vilket cement som används. Detta möjliggör den högre effektivitetsfaktorn $k=0,8$ såvida detta har provats och utvärderats med aktuellt cement enligt standard. Dosering slagg upp till ca 100% (av C, eller 50% av B) har ingen större effekt på aktivitetsindex. vct

Användes den lägre effektivitetsfaktorn $k=0,6$ leder detta som regel till en överhållfasthet vid 28 dygn. För att reducera hållfastheten kan exempelvis luft tillsättas. För varje % luft sjunker betongens hållfasthet med ca 2,0-2,5 MPa (eller ca 5% av hållfastheten). Dessutom har luften en smörjande effekt, varför pastavolymen kan reduceras något (ca 0,5-0,7 liter vatten för varje % luft, eller 1,0-1,5 kg cement+slagg). Med ökad lufthalt ökar dock risken för delaminering vid glättade golv.

Hållfasthetsutvecklingen för betong med slagg fortsätter i större utsträckning (motsvarande $k \approx 1,2$ efter 91 dygn), se "Hårdnande och hållfasthetsutveckling".



För betonger utan vct -krav, och slagg dos upp till 100%, kan en högre och mer realistisk faktor tillämpas, förslagsvis $k=0,9-1,0$ för Slagg Bremen (d.v.s. cement ersätts med ca lika vikt slagg). Dock kan högre doser (över ca 25%) slagg retardera betongen då cementmängden minskas, varför om tidig hållfasthet är ett krav kan en lägre faktor behöva tillämpas (alternativt accelerator, värme eller extra isolering). Med $k=0,6$ fås en likvärdig hållfasthet, som utan slagg, efter 4-6 dygn vid 20°C. Vid kallare klimat tenderar retardationen bli större med slagg, men vid högre temperaturer (över 30°C) är hållfasthetsutvecklingen minst likvärdig för slagg som cement.

Exempel: En betong med vct_{eqv} 0,50 och 50% Slagg Bremen (av C, eller 33% av B) där $k=0,6$ är sammansatt av 277 kg cement, 180 liter vatten och 138 kg slagg.

En antagen överhållfasthet på 10 MPa reduceras genom att tillsätta luftporbildare så lufthalten blir $L = \Delta f/2,0 = 10/2,0 = 5\%$ luft.

Luftens smörjande effekt gör att vattenmängden kan reduceras med $0,6 \cdot L = 0,6 \cdot 5 = 3$ liter.

Sammansättningen blir i stället $180-3=177$ liter vatten, cementmängden $C = V/[vct_{eqv} \cdot (1+k \cdot XC_{GGBS})] = 177/[0,50 \cdot (1+0,6 \cdot 50\%)] = 272$ kg och mängden slagg $GGBS = C \cdot XC_{GGBS} = 272 \cdot 50\% = 136$ kg.

Maximal dosering

Hur mycket slagg som kan tillsättas kan begränsas av 1) hur mycket som får tillgodoräknas till vct_{ekv} och 2) hur mycket som maximalt får tillsättas i respektive exponeringsklass.

För att tillgodoräkna sig effektivitetsfaktorn (k) i beräkningen av vct_{eqv} gäller maximalt 100 vikt% av Cem I mängden (eller $100\% \cdot 1,05$ av klinkerhalt), enligt SS 137003. För exempelvis en betong med vct -krav och Byggcement (klinkerhalt 80%) är denna gräns då $100\% \cdot 1,05 \cdot 80\% = 84\%$ (eller $50\% \cdot 1,05 \cdot 80\% = 46\%$ av bindemedel). Och har man ett cement som redan innehåller slagg skall även denna mängd räknas in, exempelvis med Komposit antaget innehållande 14% slagg (och 6% kalk) blir gränsen 70% av cement (eller 41% av bindemedel).

Största totala mängd slagg som får tillsättas i respektive exponeringsklass ges i SS-137003 (tabell 8b), och anges som % andel (vikt) av bindemedel.

Har man ett CEM II kan innehålla alternativa bindemedel (slagg, flygaska, kisel), vilka enligt SS 137003 skall medräknas in i den maximala mängden tillsatsmaterial som får tillsättas. Men eftersom man också skall förutsätta att cementet har lägsta klinkerhalt (ges i SS-EN 197-1) blir det minsta andel klinker för respektive exponeringsklass som gäller (i tabell 8, SS 137003). Det spelar således ingen roll vilken typ av tillsatsmaterial eller hur mycket som cementtillverkaren har tillsatt. Har man ett CEM II/A (Bygg, Bas, Komposit, mm) skall man anta att det innehåller 80% klinker och ett CEM I 95% klinker. Exempelvis för klass XC 1 gäller minsta andel klinker 35%, vilket ger maximal mängd slagg $100-35/0,95=63\%$ för ANL (antaget 95% klinker) och $100-35/0,80=56\%$ för Bygg (antaget 80% klinker).

Enligt tabell 8 (SS 137003) blir maximal andel slagg:

Exponeringsklass	av CEM I + GGBS	(av CEM I)	av CEM II/A + GGBS	(av CEM II/A)
X 0	68%*	(233%)*	63%*	(167%)*
XC 1-2, XS 1-2, XD 1-2, XA 1	63%*	(186%)*	56%*	(129%)*
XC 3-4, XS 3, XD 3, XF 1-3, XA 2	32%	(54%)	19%	(23%)
XF 4	16%	(25%)	-	-

* Maximal inblandning är högre än den som får tillgodoräknas vct_{ekv} med k -faktor. Detta kan vara av mindre betydelse när man inte har vct -krav (ex. ofta i X 0 och XC 1) eller använder en betong med lägre vct än kravet för exponeringsklassen.

Exempel: För Byggcement (CEM II/A-LL), och exponeringsklass XS 1, är den maximala mängden slagg som får tillsättas 129% (eller 56% av bindemedel). Av detta får enbart $100\% \cdot 1,05 \cdot 0,8 = 84\%$ av cementmängden tillgodoräknas till vct_{ekv} . Har man då vct 0,45 och 250 kg cement får $250 \cdot 1,29 = 322$ kg slagg tillsättas men enbart $250 \cdot 0,84 = 210$ kg tillgodoräknas. Med $k=0,8$ för slaggen ger det vattenmängden $0,45 \cdot (250 + 0,8 \cdot 210) = 188$ kg. Överskridande mängd $322 - 210 = 112$ kg slagg räknas enbart som fyller.

Exempel: Med Komposit (CEM II/A-M S-LL) i ovan exempel blir den maximala mängden som får tillsättas densamma (129% eller 322 kg) eftersom det är klinkermängden som styr. Däremot minskar mängden slagg som får tillgodoräknas vct_{ekv} eftersom de 14% slagg som Komposit innehåller skall medräknas. Med 250 kg Komposit får $250 \cdot (0,84 - 0,14) = 175$ kg av slaggen tillgodoräknas, och vattenmängden blir då $0,45 \cdot (250 + 0,8 \cdot 175) = 175,5$ kg.

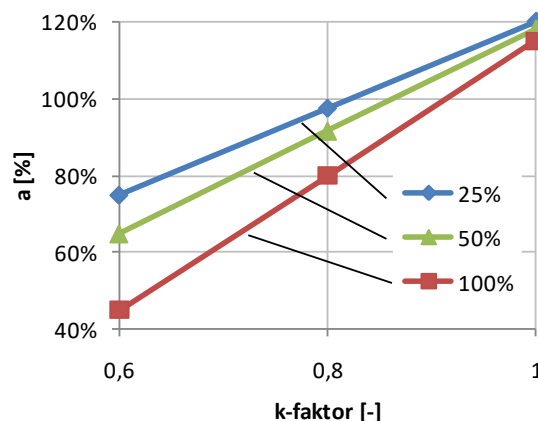
Konsistens

GGBS har slätare och tätare partikelyta än cement, vilket minskar betongens vattenbehov. Dessutom ökar pastavolymen då cement har en något högre densitet än GGBS. Den glasaktiga partikelytan har även en gynnsam effekt på konsistensförlusten.

Med Slagg Bremen och $k=1,0$ är andelen slagg som kan ersätta cement ca 115%, med likvärdig konsistens. Denna konsistensfaktor (a) varierar med k -faktor, slaggdosering (av cementvikten, XC_{GGBS}) och till viss del cement typ samt vct_{ekv} . Mängden cement i betong med slagg (C_1) relativt utan (C_2) kan beräknas enligt:

$$C_2 = \frac{C_1}{1 + a \cdot XC_{GGBS}} \quad [\text{kg}]$$

För $k=0,6$ är konsistensfaktorn (a) mer beroende av dosering (XC_{GGBS}) än vid $k=1,0$, se diagram. Överslagsmässigt kan man vid $k=0,6$ använda samma vattenmängd (V) med som utan Slagg Bremen.



Exempel: En betong utan vct -krav med 360 kg cement (C_1) och 180 liter vatten (vct 0,50) har en given konsistens. Med $k=1,0$, $a=115\%$ och 25% Slagg Bremen av C blir den nya cementmängden $C_2 = 360 / (1 + 115\% \cdot 25\%) = 280$ kg och mängden slagg $GGBS = 280 \cdot 25\% = 70$ kg.

Den nya vattenmängden blir $V_2 = vct_{ekv} \cdot (C_2 + k \cdot GGBS) = 0,50 \cdot (280 + 1,0 \cdot 70) = 175$ liter

Exempel: Samma betong, fast vct -krav, med $k=0,6$ och en överslagsmässigt lika vattenmängd på 180 liter ($V_1 = V_2$).

$vct_{ekv} = V_1 / C_1 = V_2 / (C_2 + k \cdot GGBS) = V_2 / [C_2 \cdot (1 + k \cdot XC_{GGBS})]$, vilket ger den nya cementmängden $C_2 = C_1 / (1 + XC_{GGBS} \cdot k) = 360 / (1 + 25\% \cdot 0,6) = 313$ kg, och slaggmängden $GGBS = 313 \cdot 25\% = 78$ kg

SKB

Att göra självkompakterande betong (SKB) med GGBS skiljer sig inte från SKB utan. Proportionering och dosering m.a.p. hållfasthet, exponeringsklass, vct, tillsatsmedel, vattenbehov, konsistens, mm., är densamma som för vanlig betong (se tidigare avsnitt).

I vissa fall möjliggör SKB med GGBS att man kan minska fillern (ex. kalkfiller) något, då GGBS har lägre densitet än cement och genererar därför något större pastavolym. Och tillämpar man effektivitetsfaktorn $k=0,8$ (eller $0,6$) kommer mängden finmaterial öka, varför fillermängden kan reduceras ytterligare.

För att illustrera hur en C30/37 vct 0,55 SKB kan vara sammansatt och hur receptet justeras med GGBS dos och olika k -faktor ($k=0,95$ för betong utan vct-krav), exempel enligt:

Id k	Ref -	25% GGBS (av C)			50% GGBS (av C)			100% GGBS (av C)		
		0,6	0,8	0,95	0,6	0,8	0,95	0,6	0,8	0,95
Cement	320	275	260	245	245	220	205	200	170	155
Kalkfiller	180	150	155	165	120	135	150	90	115	140
GGBS	0	69	65	61	123	110	103	200	170	155
Vatten	176	174	172	167	175	169	166	176	168	166

Här hålls ballastfördelning, mängden (liter eller kg) flytmedel och luftporbildare oförändrad.

I de fall man inte har tillgång till kalkfiller (eller stensmjöl, osv) är proportionering av SKB med GGBS lite mer komplicerad. En SKB behöver en viss pastavolym (eller pastaöverskott) för att få rörlighet, en volym är större än för vanlig betong. Vidare behövs ett visst volymförhållande mellan vatten och pulver (finmaterial $<0,125\text{mm}$), för att skapa sammanhållning och robusthet så att betongen inte separerar. Detta volymförhållande bör ligga på $vpt=1,0-1,1$. Skulle man exempelvis skapa pastavolym genom att öka cement och vatten (konstant vct) kommer vpt bli för högt och betongen separationsbenägen. Ökar man däremot bara mängden cement blir betongen dyr och hållfastheten för hög, och genom att tillsätta GGBS som en ren filler effekten bli densamma.

För betong med lågt vct ($<0,45$) finns det som regel relativt mycket pasta och finmaterial, vilket gör det möjligt att göra en SKB utan filler. En viss justering i ballastsammansättningen kan behövas (ökad andel grus och sand). Använder man slaggt med $k=0,8$ (eller $0,6$) blir mängden finmaterial och pastavolym högre, och därför enklare att få till. Med 50% GGBS (eller 33% av bindemedel) eller mer, och $k=0,8$ eller $0,6$ kan man utan större problem göra en SKB utan filler med vct upp till ca $0,50$.

Vid vct över $0,50$ behöver en betong relativt mycket finmaterial för att inte separera, att helt bort exempelvis 150 kg kalstensfiller kan vara problematiskt. Detta kan man lösa genom att gå ner i vct (och öka pastavolymen) i kombination med luftporbildare för att kompensera för hållfasthetsökningen (se avsnitt "k-faktor" för hur hållfastheten reduceras med luft). Ett annat alternativ är att använda sig av stabilisator för att skapa sammanhållning.

Frostresistens

När betong med höga halter GGBS karbonatiserar kan detta på sikt ge en mer porös struktur, vilket resulterar i en minskad frostresistens. Det har visat sig att upp till cirka 25-30% slaggt av cementvikten är inte frostresistensen försämrade, men vid högre doseringar kan frostavskalningen öka. Vid krav för frostresistens rekommenderas därför en maximal dosering slaggt på 25%, och att förprovning genomförs.

Beständighet

Betong som innehåller GGBS har generellt en tätare porstruktur (mindre genomsläpplig). Detta ökar dess motståndskraft mot inträngande ämnen (sulfat- och kloridjoner, samt alkalier) som kan orsaka skadliga angrepp, såsom:

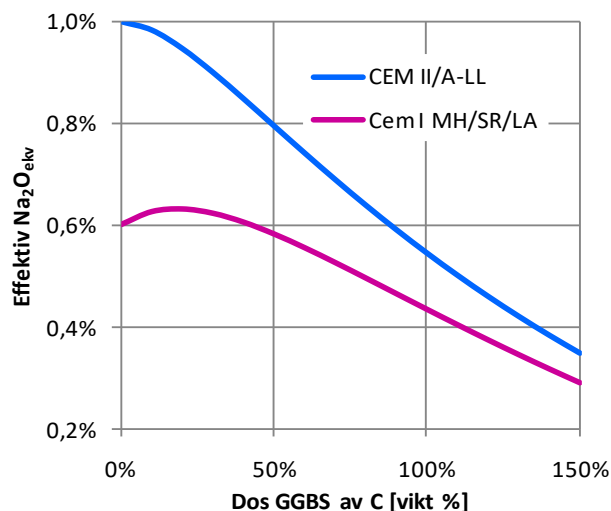
- Sönderfall på grund av sulfatangrepp
- Sprickor orsakade av alkali ballastreaktion
- Kloridrelaterade korrosion av armering

Sulfatbeständigheten förbättras även av att GGBS reagerar med kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) som därför inte kan ingå i sulfatreaktioner senare, samt av att när cement ersätts med GGBS minskar mängden av klinkermineralet trikalcialuminat (C_3A), vilket är den primära källan till reaktivt aluminium vid skadliga sulfatreaktioner. När sulfatjonerna (SO_4^{2-}) reagerar med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i betongens porvatten bildar svårslöslig

gips (CaSO_4^{2-}), som i sin tur reagerar med C_3A . Detta bildar det expansiva mineralet ettringit som kan spränga sönder betongen. Innehåller betongen kalciumkarbonat (CO_3 , t ex kalkfiller) kan denna på liknande sätt reagera med sulfatjonerna och bilda det expansiva mineralet thaumasit.

Enligt SS 137003 kan man genom att tillsätta 150-400% GGBS till ett icke sulfatresistent cement uppnå ett sulfatresistent bindemedel. Sulfater kan finnas i cement och ballast, men tillförs oftast utifrån (från mark, grund-/havs-/avloppsvatten, mm). Sulfathalten för Slagg Bremen är ca 0,01%, vilket kan jämföras med Byggcementets ca 3,5%.

Trots att alkaliteten ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$) för Slagg Bremen är likvärdigt med Byggcement (ca 0,9-1,0%), har det visat sig att den effektiva alkaliteten blir lägre för betong GGBS. Med exempelvis 100% GGBS och Byggcement sjunker den effektiva alkaliteten från ca 1,0 till 0,5% (se diagram). För Anläggningscement är motsvarande effekt mindre (från ca 0,6 till 0,4%). Genom att reducera alkaliteten minskar risken för skadlig expansionen från alkali ballastreaktioner (alkalikiselsyra, alkalisilikat och alkalikarbonat). Potentiellt reaktiv ballast kan vara flinta och opalhaltig ballast (ex Skåne), kryptokristallin och deformerad kvarts (ex Stockholm), samt porfyrhaltig ballast (ex Dalarna).



I Storbritannien finns riktlinjerna vid beräkning av alkaliteten (BRE Digest 330, 2004). Om mängden GGBS är $\geq 100\%$ (av C) så behöver bidraget från GGBS ej medräknas, vid $< 25\%$ så medräknas hela bidraget, och däremellan medräknas 50% av alkalibidraget från GGBS.

Den minskade effektiva alkaliteten har generellt ingen inverkan på armeringens korrosionsskydd. Det är först vid doser över ca 400% GGBS av cementvikten, som det alkaliska skyddet påverkas.

Inträngningen av kloridjoner (från tössalter, havsvatten, mm) minskar med den ökade tätheten GGBS ger betongen (minskad permeabilitet), på samma sätt som för sulfater och alkalier. Kloridinträngningen minskas även av att betong med GGBS har en ökad kloridbindning, p.g.a. ökad mängd fri aluminiumoxid samt av den lägre sulfathalten. Kloriderna har i sig ingen negativ inverkan på betongen, men för armerade konstruktioner kan de vara kritiska. Dessutom ger en ökad tätheten en ökad resistivitet, vilket i sin tur minskar förutsättningarna för armeringskorrosion. Utomlands är mycket höga doser av GGBS vanligt i exempelvis marina konstruktioner (kajer, fundament, mm).

Däremot kan frostbeständigheten försämrats vid höga doser GGBS, på samma sätt som andra alternativa bindemedel (flygaska, silika/kisel), se under "Frostresistens".

Betongens syramotstånd ökar med ökad inblandning av GGBS. Detta förklaras av den ökade tätheten samt betongens minskade mängd fri kalk (GGBS reagerar med kalciumhydroxiden och bildar CSH). Syran löser upp $\text{Ca}(\text{OH})_2$, som sedan lakas ur betongen. I andra länder rekommenderas normalt inblandning av GGBS vid konstruktioner exponerade för syror och sur miljö. Sura angrepp kan vara t ex kol-, svavel-, ättik- eller mjölksyra, där de organiska syrorna har visat sig vara mer aggressiva än de oorganiska. I miljöer som jordbruk och avloppshantering är därför höga doser av GGBS att rekommendera.

Lukt

GGBS innehåller generellt små mängder sulfider, främst kalciumsulfid, vilka oxiderar i luft och bildar vätesulfid vilket gör att den färsk betongen kan få en svag lukt av svavel vilket försvinner efter några dagar. Sulfiderna härstammar huvudsakligen från svavlet i koksen och järnverken eftersträvar att detta tas upp av slaggen istället för av järnet. Sulfiderna i GGBS har ingen negativ inverkan på betongen, och är begränsas till max 2% (SS-EN 15167-1).

Färg

GGBS är vit i färgen, vilket resulterar i att betongen blir ljusare. Skall betongen pigmenteras ger den ljusare tonen en bättre infärgning med klarare och djupare färg. Dessutom fås en mer homogen yta, då GGBS dispergeras bättre än cement och kalkutfällningen minskar. För betong med GGBS kan dosen pigment reduceras med ca 20% med bibehållen färg mätt med spektrofotometer.

Förutom en svag lukt av svavel kan sulfiderna i GGBS ge betongen en grönaktig nyans. Denna försvinner (oxiderar) ganska omgående för att sedan ge betongen dess karakteristiska ljusa yta.



Krympning

Det långsammare hårdnandet, när GGBS används som ersättning för cement, gör betongen mer känslig för tidiga sättsprickor och plastiska krympsprickor. Extra åtgärder kan behöva vidtas för att förhindra tidig vattenavgång och avkylning, förslagsvis genom tidig täckning med plast eller presenning.

Uttorkning

Betong med GGBS får en mer finporös struktur, vilket är gynnsamt för självuttorkningen. Men den ökade tätheten gör det också svårare för vatten att transporteras ur betongen, eller att omfördelas (ex. med vattenbaserat mattlim). Uttorkningen för betong med GGBS och $k=1,0$ (likvärdig hållfasthet) har visat sig vara motsvarande som betong utan GGBS. Och med lägre k -värde än detta går uttorkningen snabbare. Den ökade tätheten gör också att givaren vid fuktmätning kan behöva sitta längre än rekommenderad tid för att komma i jämvikt. Hur GGBS och andra alternativa bindemedel (flygaska och silika) påverkar mätmetoder och betongens uttorkning är ett område som kan behövas undersökas vidare.

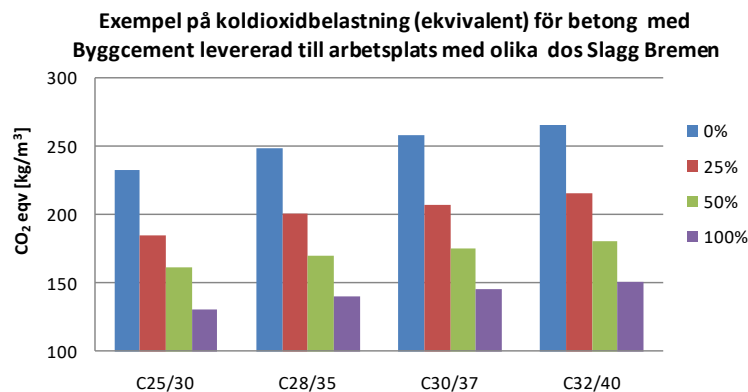
Tillsatsmedel

Kompabiliteten och effekten av tillsatsmedel är densamma för betong med GGBS som utan. Eventuellt kan mängden luftporbildare behöva ökas något för given lufthalt. Om cementet ersätts med lika mängd slagg kommer vattenbehovet att minska, varför flytmedelsdosen generellt blir något lägre.

Miljöbelastning

GGBS är en biprodukt från tillverkning av järn. Utsläppen av växthusgaser för GGBS kommer främst vid malning och transport. Miljöbelastningen för Slagg Bremen, räknat som ekvivalent CO_2 , är 62 kg/ton (45 kg/ton efter malning och torkning i Bremen samt 17 kg/ton för sjötransporten till Sverige). Detta kan jämföras med exempelvis Byggcement som har 759 kg/ton.

70-80% av betongens miljöbelastning kommer från cementtillverkningen. Genom att ersätta cement med GGBS kan belastningen minskas. Dessutom ger den förbättrade arbetbarheten av GGBS möjlighet till en reducerad pastavolym. Exempelvis med 100% Slagg Bremen (eller 50% av bindemedel) kan utsläppen för betongen reduceras med nästan 50% (se diagram).



Standarder

De standarder som gäller för användningen av GGBS i betong som tillsatsmaterial är:

- SS-137003 som styr hur mycket slagg som får tillsättas (med effektivitetsfaktor och totalt), samt vilken effektivitetsfaktor (k) som gäller för beräkning av $v_{ct,ekv}$. Slaggen skall uppfylla kraven i SS-EN 15167-1 för att få användas som tillsatsmaterial typ II.
- SS-EN 15167-1 redovisar de krav på slaggens egenskaper som gäller, såsom aktivitetsindex, specifik yta, glashalt, alkalihalt, och kemisk sammansättning.
- SS-EN 15167-2 specificerar systemet för utvärdering av överensstämmelse, såsom regler för tillverkningskontroll, stickprov, åtgärder vid avvikelse, certifiering av och krav för distributionscentraler.
- SS-EN 206 tar inte upp användningen av slagg.

Slagg Bremen är ett mineraliskt tillsatsmaterial (typ II) med latent hydrauliska egenskaper, för användning som bindemedel i betong och bruk enligt SS 137003, och är kvalitetssäkrat och CE-märkt enligt kraven i SS-EN 15167-1 och -2.

Hantering

GGBS motsvarar cements egenskaper varför transport och förvaring bör ske på motsvarande sätt. Trots att GGBS är ett latent bindemedel, hårdnar den efter en tid i kontakt med fukt/vatten, varför lagringen skall ske i torrt klimat. GGBS kan vid kontakt verka irriterande på hud, andningsorgan och ögon, och kan vara skadligt att förtära. För fullständig information rörande hantering se separat Säkerhetsdatablad.

Fysikalisk data

Egenskap	Riktvärde	Variation	Enhet	Krav enligt SS-EN 15167-1	Standard
Specifik yta (Blaine)	420	±20	m ² /kg	≥ 275	SS-EN 196-6
Kompaktdensitet	2900	±50	kg/m ³	-	SS-EN 196-6
Skrymdensitet	1150	±200	kg/m ³	-	
Aktivitetsindex* 7/28/91d	≥ 55/75/100		%	≥ 45/70/-	SS-EN 15167-1
Bindetid*	≤ 1,3		-	≤ 2,0	SS-EN 196-3

* Standard bruk med 50% OPC (Cem I 42,5 eller 52,5) och 50% GGBS, relativt 100% OPC.

Kemisk data

Egenskap	Riktvärde	Variation	Enhet	Krav	Standard
Kalcium (CaO)	40	±5	vikt-%	-	
Kisel (SiO ₂)	35	±5	vikt-%	-	
Aluminium (Al ₂ O ₃)	12	±3	vikt-%	-	
Magnesium (MgO)	7	±3	vikt-%	≤ 18,0	SS-EN 196-2
Titan (TiO ₂)	≤ 1,2		vikt-%		
Mangan (Mn ₂ O ₃)	≤ 0,6		vikt-%		
Sulfat (SO ₃)	≤ 0,2		vikt-%	≤ 2,5	SS-EN 196-2
Klorid (Cl ⁻)	≤ 0,02		vikt-%	≤ 0,10	SS-EN 196-2
Alkalitet (Na ₂ O _{eq})	≤ 1,2		vikt-%	-	SS-EN 196-2
Glödförlust	≤ 2,0		vikt-%	≤ 3,0	SS-EN 196-2
Glashalt	≥ 90		%	≥ 67	

Vid enstaka tillfällen kan värdena avvika från angivna gränser och spann. Om så sker utfärdas larm till berörda.

I nedanstående tabell redovisas tungmetallhalter för Slagg Bremen och typvärden för portlandcement redovisas också som jämförelse. Halterna kan variera något med ingående material och är inte exakta. Gränsvärde gäller Naturvårdsverkets generella riktvärden för förorenad mark med grundvattenskydd.

Metall	Slagg Bremen	Cement	Gränsvärde	Enhet
Arsenik (As)	< 5	5	15	mg/kg
Bly (Pb)	< 5	20	80	mg/kg
Kadmium (Cd)	< 1	0,2	0,4	mg/kg
Kobolt (Co)	< 5	15	30	mg/kg
Koppar (Cu)	< 5	20	100	mg/kg
Krom (Cr)	55	50	120	mg/kg
Krom VI (Cr ⁶⁺)	<0,2	2	5	mg/kg
Kvicksilver (Hg)	< 0,005	< 0,05	1	mg/kg
Nickel (Ni)	< 5	50	35	mg/kg
Vanadin (V)	105	60	120	mg/kg
Zink (Zn)	5	300	350	mg/kg

I GGBS förekommer endast små mängder tungmetaller, och då som en integrerad del i den glasiga strukturen. I betong blir de hårt bundna och undersökningar visar att endast en liten del kan lakas ur (mindre än 1%).

Litteratur

- ACI Committee 233 (2000): GGBS as a cementitious constituent i concrete, Report ACI 233R-95.
- BRE Digest 330 (2004): Alkali-silica reaction in concrete.
- Chen W (2006): Hydration of slag cement - Theory, modeling and application.
- Chen W, Brouwers H (2011): A method for predicting the alkali concentrations in pore solution of hydrated slag cement paste.
- Concrete Society (1991): The use of GGBS and PFA in concrete, Technical report No. 40.
- Hewlett P C (2003): Lea's Chemistry of Cement and Concrete.
- Irfan M (2011): Carbon footprint of ready mix concrete and the role of environmental classification.
- Locher F W (2006): Cement principles of production and use.
- Luo R, et al (2003): Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete.
- Marion A M, et al (2005): Study of the leaching behaviour of paving concretes.
- Naturvårdsverket (1997a): Generella riktvärden för förorenad mark, Rapport 4638.
- Newman J (2003): Advanced concrete technology – Constituent materials.
- Parrott (1991): Factors influencing relative humidity in concrete
- Pavia S, Condren E (2008): Study of the durability of OPC versus GGBS concrete.
- Svensk Byggtjänst (1997): Betonghandbok – Material.
- SS 137003 (2008): Betong - Användning av EN 206-1 i Sverige.
- SS-EN 15167-1 (2006): Mald granulerad masugnsslagg - Definitioner, specifikationer och kriterier för överensstämmelse.
- SS-EN 15167-2 (2006): Mald granulerad masugnsslagg - Utvärdering av överensstämmelse.
- Taylor H F W (1997): Cement chemistry.