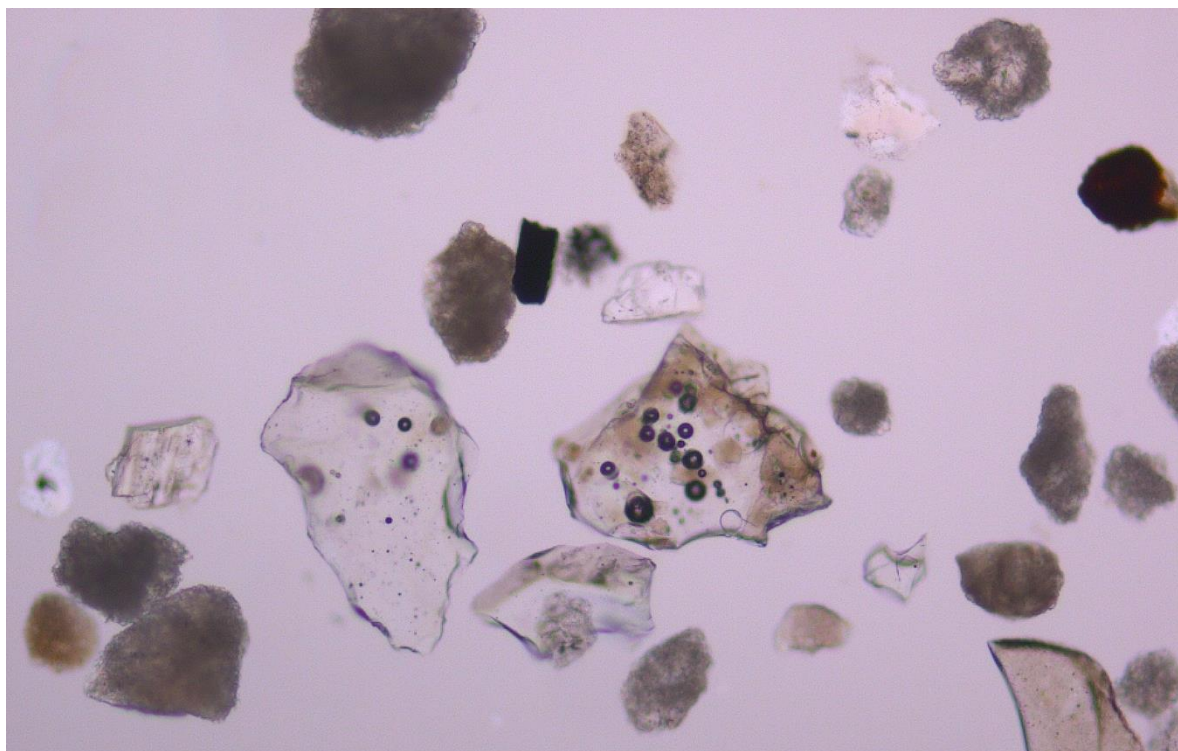


3.5.3 Slagge

Af Jesper Sand Damtoft, Aalborg Portland



Figur 1. Mikroskopbillede af granuleret højovns slagge. Udstrækningen af partiklen midt i billedet er ca. 200 μ m (en femte-del millimeter)

Granuleret højovns slagge - i daglig tale blot slagge - er et biprodukt fra fremstilling af råjern i højovne.

Slagge er et puzzolan, der anvendes som tilsætning i beton for at give stor tæthed. Slagge anvendes også som en bestanddel i slaggecement.

Slagge anvendes normalt ikke i Danmark - og fx ikke i 2012 - hverken som bestanddel af slaggecement eller som tilsætning.

3.5.3.1 Fremstilling af granuleret højovns slagge

Højovns slagge stammer fra produktion af råjern i højovne. I disse ovne behandles en blanding af jernmalm, koks og slaggedannere - som kalk eller dolomit - ved en reduktionsproces. Herved fremkommer råjern og højovns slagge.

I industrilandene fremstilles 250 kg slagge pr. tons råjern, mens der fremkommer 500 kg slagge pr. tons råjern i teknologisk mindre avancerede anlæg [1].

Slaggen er en flydende smelte, når den kommer fra højovnen. Alt efter afkølingsmåden har højovns slagge forskellige anvendelsesområder [2].

Type	Anvendelse
Luftkølet	Tilslag, bygge/anlæg, råmateriale til klinkerproduktion
Ekspanderet	Letvægtstilslag
Pelletiseret	Letvægtstilslag, råmateriale til klinkerproduktion
Granuleret	Cement/klinkererstatning, jordforbedring, bygge/anlæg

Tabel 1. Typer af højevns slagge

Granulering af højevns slagge

Granuleringsprocessen består i, at den flydende slagge bratkøles med vand. Hermed størkner materialet til et glasagtigt materiale.

Formales den granulerede slagge, bliver den til et puzzolan.

En stor andel af højevns slaggen granuleres, da det er denne slaggetype, der er lettest at afsætte, og som kan indbringe den største betaling. Når alle højevne ikke er udstyret med et granuleringsanlæg skyldes det, at anlægsinvesteringen er af en betragtelig størrelse, og at der også er gode afsætningsmuligheder for luftkølet højevns slagge, om end til lavere priser.

På verdensbasis er det markant, at der er store forskelle på mængden af den del af slaggen, der granuleres. I Tyskland, Holland, Belgien og Kina granuleres over 80 % af al slagge, mens der i USA og Canada fx kun granuleres ca. 30 %.

Da granuleret slagge er et biprodukt fra fremstilling af råjern, er den producerede mængde fuldstændig afhængig af variationer i stålproduktionen. Der vil således være perioder med overskud på markedet, vekslende med mangelsituationer. I 2012 blev der på verdensplan fremstillet 337 mio. tons granuleret højevns slagge [3].

Komponent	Masse%, min	Masse% maks
CaO	30	50
SiO ₂	27	40
Al ₂ O ₃	5	15
CaO	1	10

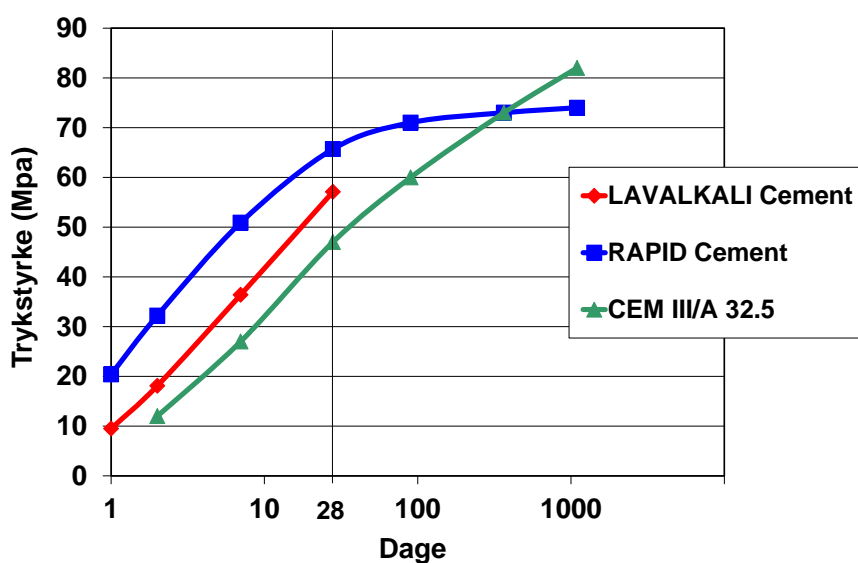
Tabel 2. Grænser for typisk kemisk sammensætning af slagge

3.5.3.2 Anvendelse af højvovnsslagge i cement og beton

Kvalitetskriterier for højvovnsslagge til anvendelse i cement og beton

Højvovnsslagges afgørende kvalitetsparametre er den kemiske sammensætning og glasindholdet. Det viser sig imidlertid i praksis, at disse parametre ikke alene giver et udtryk for reaktiviteten af højvovnsslaggen i beton. Fx er fordelingen af krystallisationskim og inhomogeniteter af glasfasen også af betydning [4].

Det er derfor nødvendigt, at afprøve den givne højvovnsslagge sammen med de cementtyper, den skal anvendes sammen med.



Figur 2. Styrkeudvikling af en CEM III/A slaggecement (36-65 % slagge) [5], sammenlignet med RAPID Cement og LAVALKALI SULFATBESTANDIG Cement

Egenskaber af cement og beton med højvovnsslagge

Slaggecement har en langsommere styrkeudvikling end ren portlandcement. Derimod er slutstyrken efter fx 3 år højere for slaggecementen. Der fremstilles sjældent styrkeklasse 52,5 slaggecement, da det kræver en kraftig formaling for at nå den krævede 28-døgnstyrke.

Anvendelse af slagge i beton har følgende betydning for betonens egenskaber.

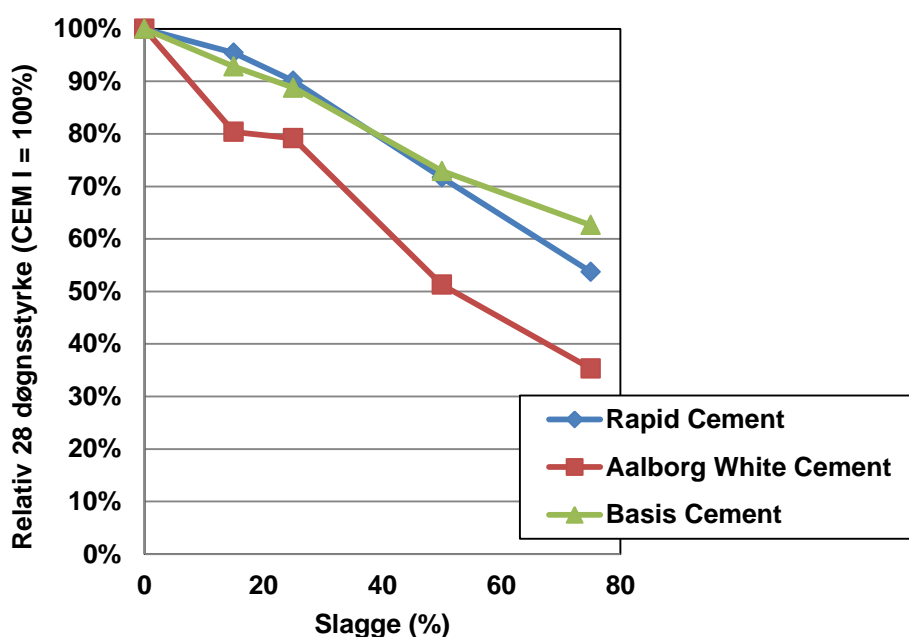
- Længere afbindingstid
- Større tendens til bleeding
- Langsommere styrkeudvikling, men højere slutstyrke (fx efter 1 år)
- Lavere varmeudvikling
- Bedre sulfatbestandighed ved højt slaggeindhold
- Større modstand mod chloridindtrængning
- Lavere tærskelværdi for chloridinitieret armeringskorrosion
- Ringere frostbestandighed
- Højere tendens til svind og krybning

- Højere karbonatiseringshastighed

Slagges egenskaber sammen med Aalborg Portlands cementer

Aalborg Portlands cementer er i flere omgange blevet afprøvet sammen med formalet højovns slagge. Undersøgelserne har bekræftet de kendte forhold vedr. slagge: længere afbindingstid, langsommere styrkeudvikling, reduceret hydratiseringsvarme og forringet frostbestandighed.

Eksempelvis viser det sig, at slaggecementerne med HVID Cement efter 28 og 56 døgn har væsentligt lavere styrke end de øvrige cementer (fig. 4). Dette tilskrives det lave alkaliindhold i HVID Cement. Derimod er der ingen væsentlig forskel mellem RAPID Cement og Basis Cement



Figur 3. Relativ styrkeudvikling målt på mørtler efter 28 døgn af blandinger af formalet slagge med forskellige cementer fra Aalborg Portland. %-angivelser er af samlet pulvermængde

Anvendelse af højovns slagge som slaggecement eller direkte tilsætning til beton

Højovns slaggen kan enten iblandes cement og det sammenblandede produkt kan sælges som slaggecement, eller slaggen kan formales og leveres separat til betonproducenten som et puzzolan (ligesom fx flyveaske).

Tendensen i Europa er, at cementproducenterne indgår aftaler med stålværkerne, der leverer slagge til cementproduktionen og dermed får garanti for afsætning af slaggen. Dette er fx tilfældet i Tyskland, Holland, Belgien, Italien og Frankrig. Dette er logisk, idet disse lande har krav om minimum cementindhold og anvender cement med forholdsvis lav styrke (32,5 og 42,5). Der kan derfor uden problemer fremstilles slaggecement med egenskaber, der ligner de portlandcementer, der sælges i de pågældende lande.

Der findes endvidere producenter, der opkøber granuleret slagge og formaler dette til salg i løs vægt som tilsætning i beton. Dette sker fx i England.

3.5.3.3 Slagge og miljø

Fremstilling af jern i højovne er en meget energikrævende proces, der er forbundet med en betragtelig udledning af CO₂. Det er derfor afgørende i beregningen af miljøpåvirkninger i betonens livscyklus, hvorledes "slaggens" CO₂ allokeres.

3.5.3.4 Normer og standarder

Slaggecement

Cement med indhold af slagge er omfattet af den europæiske cementstandard EN 197-1. Der er i EN 197-1 i alt 9 forskellige cementtyper, der indeholder højovnsslagge. Standarden stiller flg. krav til slagge:

- Indholdet af glaslignende slagge skal være mindst 2/3
- Slaggen skal have hydrauliske egenskaber, når den bliver passende aktiveret (af portlandcement)
- Summen af CaO+MgO+SiO₂ skal udgøre mindst 2/3 af massen
- Resten skal udgøres af Al₂O₃ og mindre mængder af andre forbindelser
- Masseforholdet ((CaO+MgO)/SiO₂) skal være større end 1,0

DS 2426, der angiver regler for anvendelse af den europæiske betonstandard EN 206 i Danmark, tillader ikke uden videre brug af slaggecement.

Hvis cementer med slagge iht. EN 197-1 skal anvendes i Danmark, skal cementens egnethed iht. DS 2426: "Dokumenteres ud fra en teknisk vurdering enten af den aktuelle betonsammensætning og den aktuelle miljøklasse, eller af den aktuelle cementtypes egnethed til en aktuel eksponerings eller miljøklasse. Vurderingen skal baseres på både laboratorieprøvninger og feltforsøg eller dokumentation af længerevarig tilfredsstillende anvendelse eller kombination af disse."

Hoved-type	Navn	Betegnel-se	Slagge	Mikrosilica, puzzolan, flyveaske, brændt skifer	Kalksten	Andre bestand-dele
CEM II	Portlandslagge-cement	CEM II/A-S	6-20			0-5
		CEM II/B-S	21-35			0-5
	Portlandkompo-sitcement	CEM II/A-M	6-20*			0-5
		CEM II/B-M	21-35*			0-5
CEM III	Slaggecement	CEM III/A	36-65			0-5
		CEM III/B	66-80			0-5
		CEM III/C	81-95			0-5
CEM V	Kompositcement	CEM V/A	18-30	18-30**		0-5
		CEM V/B	31-50	31-50**		0-5

* Højovns slagge + mikrosilica + puzzolan + flyveaske + brændt skifer + kalksten

** Højovns slagge + mikrosilica + puzzolan + flyveaske + brændt skifer

Tabel 3. Cementtyper med slagge i EN197-1 (masse %)

Løs slagge som mineralsk tilsætning til beton

EN 15167-1 er den europæiske standard for slagge til anvendelse i beton, mørtel og puds. Standarden sætter krav til sammensætning og aktivitet af slaggen. Sammensætningen er i overensstemmelse med ordlyden i cementstandardEN 197-1. Herunder er der yderlige krav til sammensætningen.

Egenskab	Krav (masse %)
MgO	≤ 18 %
Sulfid	≤ 2,0 %
Sulfat	≤ 2,5 %
Glødetab, korrigeret for oxidation af sulfid	≤ 3,0 %
Chlorid*	≤ 0,10 %
Fugt	≤ 1,0 %
Finhed (Blaine)	≤ 275 m ² /kg
*Højovns slagge kan have et højere kloridindhold. Dette skal i givet fald deklareres som en maksimumsværdi, der ikke må overskrides.	

Tabel 4. Krav til højovns slagge jf. EN 15167-1

Ud over dette er der krav til slaggen prøvet med en testcement i forholdet 50 masse % cement og 50 masse % slagge. Med denne sammensætning må afbindingstiden maksimalt være dobbelt så lang som for den rene cement og aktivitetsindekset (målt ved styrke) skal være ikke mindre end 45 % efter 7 dage og 70 % efter 28 dage.

Der er ikke etableret generel egnethed som type II-tilsætning for højovnsslagge i henhold til DS 2426, der angiver regler for anvendelse af den europæiske betonstandard EN 206-1 i Danmark. Slagge kan derfor kun anvendes som type I-tilsætning (næsten inaktive tilsætninger).

Da DS 2426 er obligatorisk i henhold til Bygningsreglementet, kan slagge ikke uden videre anvendes som type II-tilsætning i bygninger. Anlægsbygherrerne kan derimod tillade såvel slaggecement som slagge som type II-tilsætning.

3.5.3.5 Prøvning

Prøvning af slaggecement og slagge foregår i henhold til EN 196-1, -2, -3, -5, -6, -7 og -21. For slagge måles fugt i henhold til Annex A i EN 15167-1.

3.5.3.6 Mere information

Mere information kan fx indhentes hos den Europæiske brancheorganisation for slaggeproducenter, Euroslag, Aalborg Portland eller producenter af slaggecement.

3.5.3.7 Fremstilling

Tidligere blev slaggecement fremstillet ved at samformale højovnsslagge med klinker. Dette er imidlertid ikke hensigtsmæssigt, da slaggen er sværere formalelig end klinker. Klinkerdelen vil derfor blive mere finkornet end slaggen. Da dette ikke giver den bedste styrkeudvikling, foretrækkes det ofte i moderne anlæg at formale slagge og klinker separat. Dette kræver dog investering i et bekosteligt formalings- og blandingsanlæg.

3.5.3.8 Status for slagge i Danmark

Højovnsslagge har kun været anvendt i begrænset omfang i Danmark. Mest nævneværdig er det nederste af bropillerne i Vejlefjord-broen.

Både på Storebælt og Øresund var slagge et accepteret alternativ, men blev fravalgt af de udførende entreprenører efter omfattende undersøgelser. Årsagen hertil er aldrig offentliggjort, men den lidt langsommere tidlige styrkeudvikling har givet været en medvirkende årsag til fravalget.

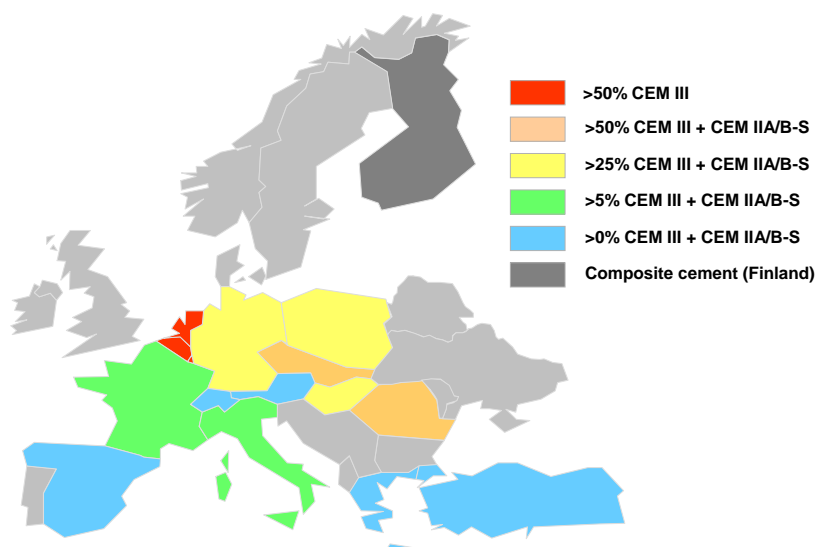
Slaggecement er tilladt i specifikationerne til Metrocityringen i København. Beton med slaggecement og løs højovnsslagge er undersøgt i forbindelse med eksponeringspladsen, der bliver udført som forberedelse til Femern-forbindelse [6].

3.5.3.9 Status for slagge i udlandet

Langt det meste højovnsslagge i Europa granuleres og kan derfor anvendes i cement og beton. Ca. 15 % af den producerede cement i Europa indeholder slagge. Hertil kommer den mængde, der sælges i løs vægt. Der er således stort set fuld udnyttelse af den europæiske højovnsslagge.

Derimod er der meget stor forskel på, hvor stor andel slaggeholdige cementer udgør i de enkelte lande. Fx udgør CEM III 65 % af cementproduktionen i Holland (fig. 5).

Anvendelsen af slagge følger nøje produktionen af slagge, således at de områder, der har højovne, også har en stor anvendelse af slagge i cement og beton. Man har sågar tidligere anlagt cementfabrikker i forbindelse med højovne for at udnytte slaggen. Dette er fx tilfældet i Italien, hvor Aalborg Portlands søsterselskab, Cementir Holding, blev etableret på denne måde. Cementir Italia er stadig den største producent af slaggecement i Italien.



Figur 4. Anslået andel af slaggeholdig cement i en række europæiske lande. Lande markeret med lyst gråt – som Danmark – anvender ikke slaggeholdig cement. Den finske composite cement ligger uden for grænserne i EN 197. Endvidere anvendes en del slagge som løs tilsætning til beton, navnlig i UK

3.5.3.10 Litteratur

- [1] Härdtl, R. (2001): "Utilization of granulated blast furnace slag - A contribution to sustainable development in the construction industry". Proc. Concrete and Environment, Berlin, October 2001.
- [2] <http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/bfs1.htm>
- [3] Palm, S. & Severins, K. (2012): "Cement grades with a low clinker content for "green" concrete." ECRA Seminar S12-02 "Trends in Concrete Technology and their Influence on Concrete Constituents"
- [4] "Properties of blastfurnace slag" Activity Report 1996-99, VDZ, Düsseldorf, pp. 60-63
- [5] Rendchen, K (2000): "Hochofenzement - Charakteristische Merkmale und Eigenschaften im Beton." Beton 6/2000, pp. 312-317

[6]]<http://www.concreteexpertcentre.dk/30663>

Palm, S. & Severins, K. (2012): "Cement grades with a low clinker content for "green" concrete." ECRA Seminar S12-02 "Trends in Concrete Technology and their Influence on Concrete Constituents"