

Portlandcementer

Emneord: Cement, beton generelt, fremstilling, egenskaber





2 Figur 1. Den første skaktovn for brænding til portlandklinker, anvendt af portlandcementens opfinder, Joseph Aspdin, i midten af forrige århundrede.

Hensigten med denne publikation er at udvide kendskabet til cement, således at cementens egenskaber kan udnyttes bedst muligt i praksis.

Cement er et finformet materiale, som ved tilsætning af en passende mængde vand danner en bindemiddelpasta, der er i stand til at hærde såvel under vand som i luften og til at sammenkitte kornformede materialer.

Portlandcement og modificeret portlandcement er cement fremstillet ved forma-

ling af portlandklinker, en lille mængde gips samt eventuelt en større eller mindre mængde uorganiske materialer, f.eks. kalkfiller.

Portlandklinker er et mellemprodukt, der i det væsentlige består af calciumsilikater, og som er fremstillet ved brænding til delvis smeltning af en i forvejen fastlagt homogen blanding af stoffer, der i hovedsagen indeholder kalk (CaO), kiselsyre (SiO_2) og mindre mængder aluminiumoxid (Al_2O_3) og jernoxid (Fe_2O_3).

Historie

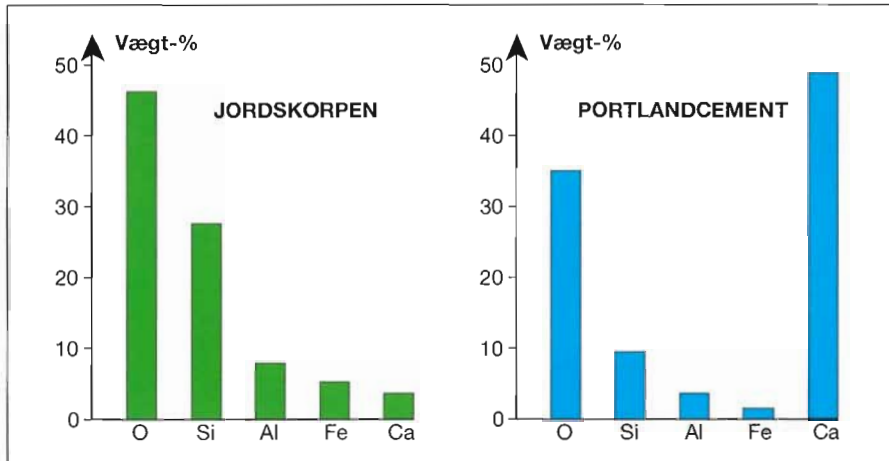
Portlandcement blev opfundet og patenteret i 1824 af englænderen Joseph Aspdin. Navnet Portland refererer til cementens farve, som minder om farven på bygningsstenen »Portland Stone« fra øen Portland ved Englands kyst. Ordet cement stammer fra det latinske ord »cementum«, der betyder hugget sten. Siden har ordet cement været anvendt som fællesbetegnelse for en række forskellige uorganiske bindemidler.

Allerede etruskerne brugte før Kristi fødsel læsket kalk som bindemiddel til betonfremstilling. Senere gik romerne over til at anvende brændt kalk og udviklede den såkaldte romancement, der er en forløber for portlandcement. Romancement er en blanding af brændt kalk og vulkansk aske.

I folkevandringstiden gik kendskabet til romancement tabt. Først i midten af det 18. århundrede dukker cementen af denne type atter op og sætter gang i en cementudvikling, som kulminerer med Aspdin's patentering af portlandcement. (Patentbrevet er afbildet på publikationens bagside).

I Danmark blev portlandcement første gang anvendt i 1852 i forbindelse med støbningen af betonfundamenter til Langebro i København. Syv år senere blev beton med portlandcement anvendt til bygning af Kassematterne på fortet Prøvestenen.

Portlandcement og cement på basis heraf er i dag det almindeligste bindemiddel. Den årlige verdensproduktion ligger således på omkring 1500 mio. tons.



Figur 2. Fordelingen af de fem vigtigste grundstoffer i jordskorpen og i portlandcement.



Fremstilling

Alle portlandcementtyper fremstilles på principielt samme måde, omend udgangsmaterialernes sammensætning kan variere på grund af de lokale forekomster eller den bliver varieret på grund af ønsker om specielle egenskaber hos cementen.

Fremstilling af portlandcement kan opdeles i to processer:

1. Fremstilling af portlandklinker, der normalt er på størrelse med småsten, jf. figur 6.
2. Formaling af portlandklinker til cement under tilsætning af gips og eventuelt andre uorganiske materialer, såsom specialfremstillet mikrofiller.

Portlandklinker kan fremstilles efter vådmetoden eller tørmetoden. Herudover findes også semi-vådmetoden.

- Ved vådmetoden blandes og formales råmaterialerne opslæmmet i vand, således at den færdige råblending foreligger som en slam.
- Ved tørmetoden foretages om nødvendigt først en udtørring, hvorefter råmaterialerne blandes og formales, så råblendingen foreligger som et tørt pulver.
- Ved semi-vådmetoden fremstilles en slam som ved vådmetoden. Herefter opvarmes slammen, og vandet fordampes, så råblendingen foreligger som et tørt pulver.

I Danmark anvendes semi-vådmetoden og vådmetoden, idet størstedelen af portlandklinkerne fremstilles efter semi-vådmetoden. Klinker til fremstilling af BASIS® cement, RAPID® cement og ABC cement fremstilles efter semi-vådmetoden.

Ved begge metoder fremstilles slammen i hovedtræk ved, at kridt slæmmes i slemmetrom-

ler. Kridtslammen blandes med en finformet sandslam og slemmet kisaske og pumpes som færdig ovnslam fra slambassiner til ovnanlægget, jf. figur 5.

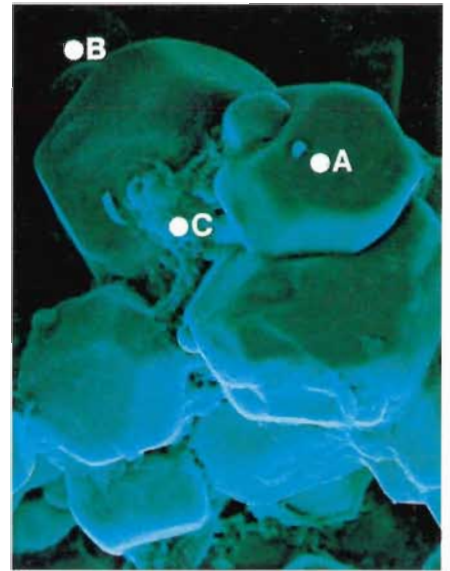
I 1988 igangsatte Aalborg Portland et stort ovnanlæg, der er baseret på en helt ny semi-vådmetode. Ovnanlægget ses på publikationens forside. Ovnanlægget er vist oversigtsmæssigt i figur 5.

Slammen indsprøjtes i to tørreknusere, hvor vandet i slammen fordampes. Fordampningen sker ved hjælp af varm røggas fra ovnens forvarmere. Herefter tilsættes tør flyveaske, og pulveret føres med luftstrømmen op i to såkaldte udskillecykloner. Toppen af disse er 80 m over jorden. I udskillecyklonerne skilles røggasser fra pulver. Røggasserne føres til elektrofilteret og afstøves, medens pulveret ledes til de såkaldte cyklonforvarmere. I cyklonforvarmerne opvarmes materialet til ca. 750°C.

Det opvarmede materiale kalcineres herefter i to såkaldte kalcinatorer, hvor temperaturen er ca. 900°C. Ved kalcineringen afgiver kridtet sin kuldiioxid. Dette er nødvendigt, før den endelige brænding til portlandklinker kan ske. Varm luft til forbrændingen i kalcinatorerne hentes fra klinkerkøleren, som omtales senere, gennem to lange rørledninger, der er anbragt langs ovnen. Herved genbruges en væsentlig del af varmen, som fjernes fra klinkerkøleren.

Herefter løber materialet til en roterovn. Roterovnen er et langt stålrør, der er forsynet med en ildfast foring. Roterovnen til ovnanlægget er ca. 74 m lang og har en diameter på ca. 4,7 m. Ovnrøret har en hældning på nogle få grader.

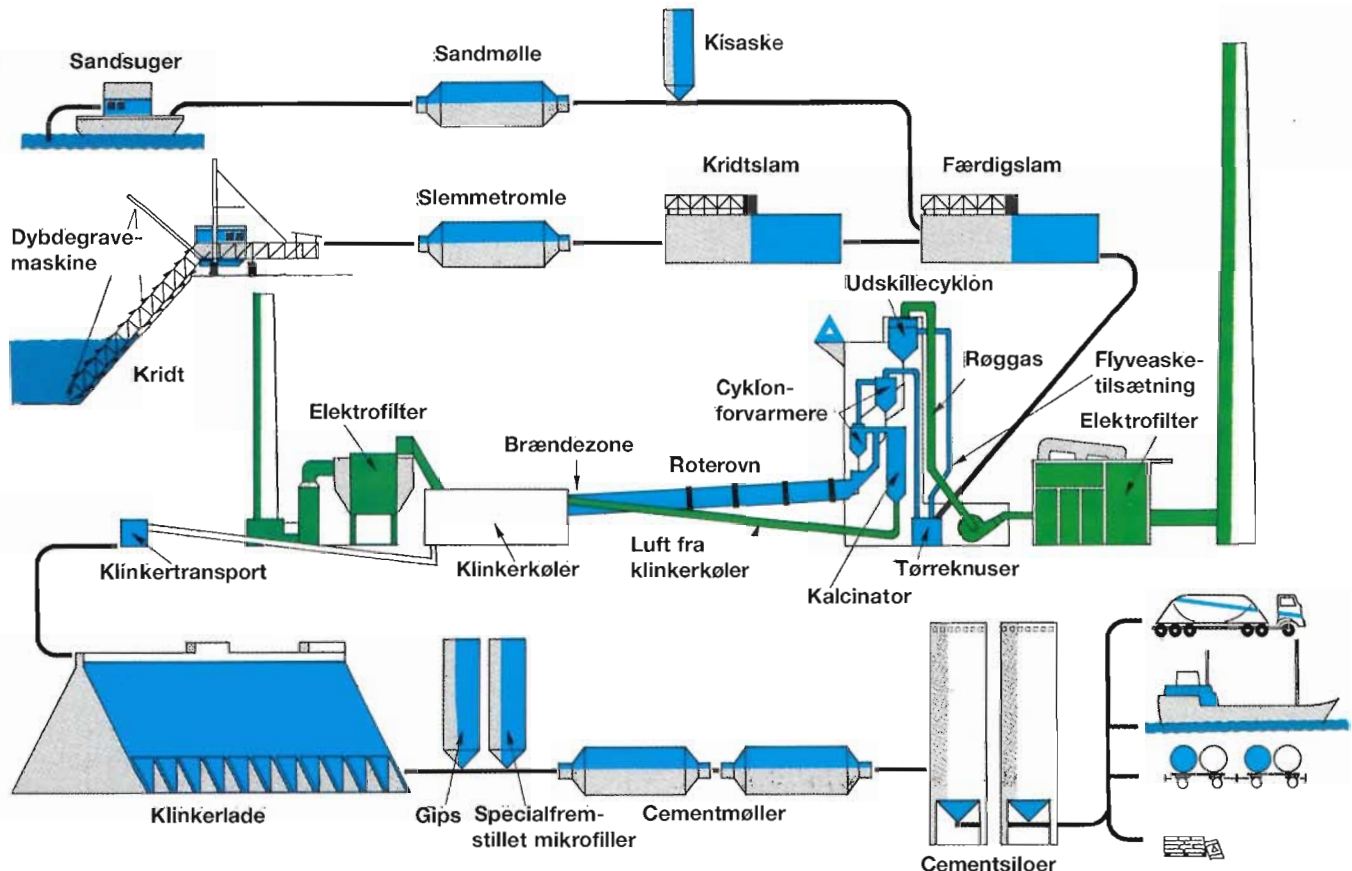
Det tørrede og kalcinerede materiale kom-



Figur 4. Brudflade i portlandcementklinker set i scanning elektron mikroskop (500xforstørrelse). Ved mikroanalyse er følgende klinkermineraller identificeret: A: C_3S , B: C_2S og C: $C_3A + C_4AF$.

mes ind i ovnens øverste ende. Brændslet, der er kulstøv eller olie blæses ind i ovnens nederste ende. Efterhånden som materialet, på grund af ovnens rotation, transporteres ned igennem ovnen, opvarmes det til 1400-1500°C, hvor den endelige brænding til portlandklinker sker.

Ved denne brænding, der er en delvis smelt-



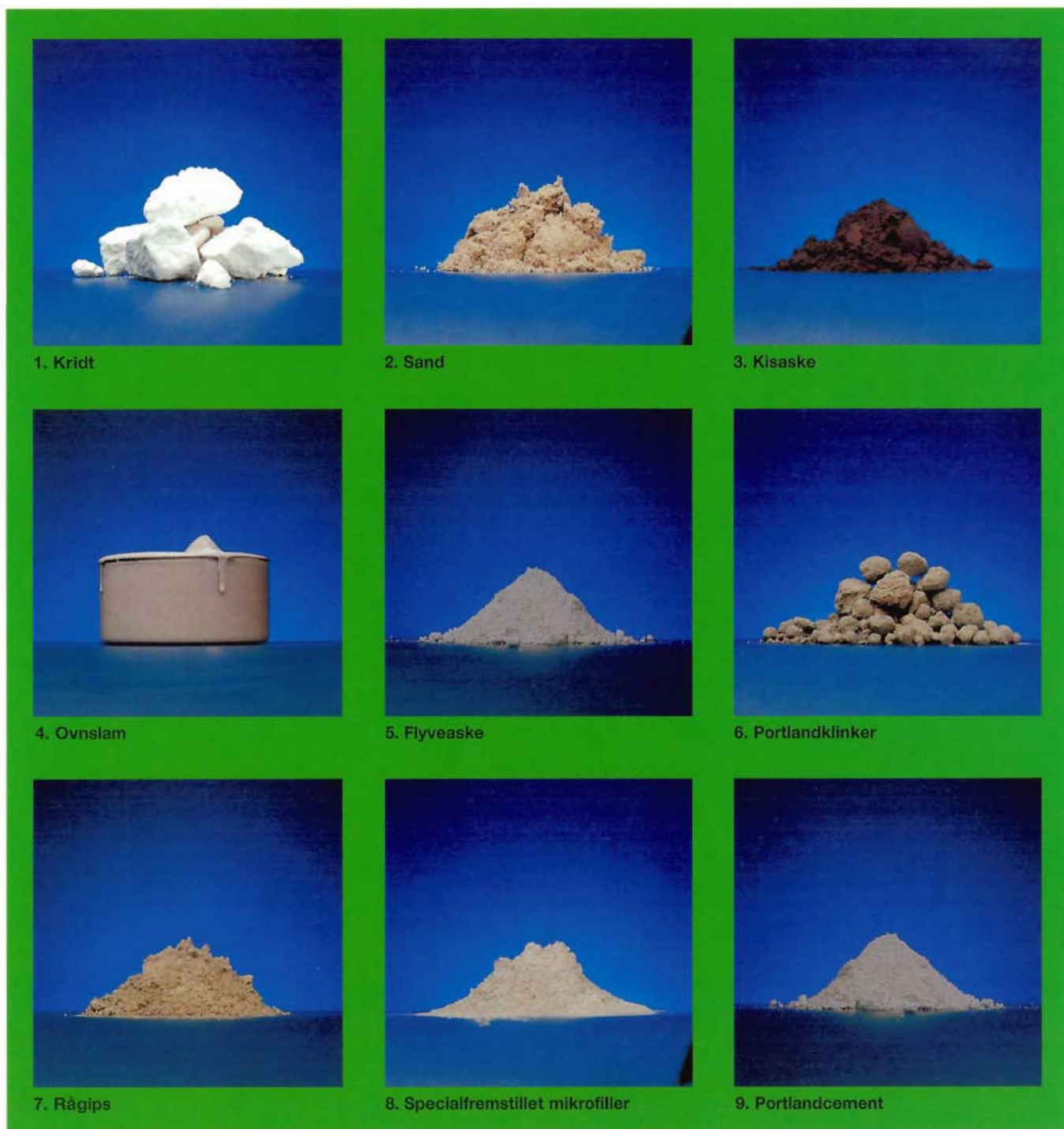
4 Figur 5. Produktion af portlandklinker efter semi-vådmetoden. Forenklet flowdiagram, der viser cementproduktionen.

ning, sintring, dannes de såkaldte klinkerminerale, hvoraf hovedparten er calciumsilikater. Den kemiske sammensætning af klinkerminerale ses i tabel 1. Efter brændingen i ovnen afkøles materialet, der nu kaldes portlandklinker, eller blot klinker, i særlige klinkerkølere. Klinkerne er på størrelse med småsten og ses i figur 6.

Ved vådmetoden pumpes slammen direkte fra slambassin til roterovnens øverste ende. Ved den gradvise opvarmning af slammen ned igennem roterovnen sker alle nødvendige processer: Fordampningen af vandet i slammen, kalcineringen og brændingen til portlandklinker. Den største roterovn, der her

i landet producerer efter vådmetoden, er ca. 150 m lang og har en diameter på ca. 4,8 m. Produktion af klinker efter semi-vådmetoden har en række fordele. Energimæssigt er der tale om en større grad af varmegenvinding og et mindre varmeforbrug til fordampning af vandet i slammen, da den tørre flyveaske udgør en større andel end ved den tidligere produktion efter vådmetoden. Ligeledes har anlægget en større kapacitet samt mindre ovndimension, og der er hermed mindre risiko for udfald af den ildfaste foring. Uanset hvilken produktionsmetode klinkerne er fremstillet efter, formales de til cement i cementmøller, under tilsætning af nogle få

procent gips samt eventuelt en vis mængde specialfremstillet mikrofiller. Den finhed, der tilstræbes ved formaling, reguleres under hensyntagen til de egenskaber, man ønsker hos cementen. Under alle omstændigheder er cementens finhed dog så stor, at pulveret nærmest er som mel at føle på.



Figur 6. De 9 fotos viser råmaterialer og mellemprodukter ved fremstilling af portlandcement.

Klassifikation af cementer

Ifølge den kommende europæiske cementstandard EN 197-1 »Cement - Sammensætning, krav til egenskaber og godkendelseskriterier - Del 1: Almindelige cementer«, udarbejdet af den europæiske normkomité CEN klassificeres disse på følgende måde:

Typeklassifikation

CEM I: Portlandcement. Fremstilles af portlandklinker og gips med tilsætning af op til 5% uorganisk materiale, eksempelvis kalkfiller og flyveaske.

CEM II: Portlandkompositcement. Fremstilles af portlandklinker og gips med tilsætning af fra 6% til 35% af én (eller for en enkelt undertype flere) af følgende mineralske tilsætninger: Granuleret højovns slagge, mikrosilica, naturligt og industrielt puzzolan, siliciumaluminiumholdig flyveaske, siliciumcalciumholdig flyveaske, brændt olieskifer og kalkfiller. Der er 2 undergrupper, A med fra 6% til 20% tilsætning og B med fra 21% til 35% tilsætning. Anvendes tilsætning af kalkfiller betegnes cementen eksempelvis portlandkalkstencement. Herudover må tilsættes op til 5% uorganisk materiale som er af anden type end den/de mineralske hovedtilsætninger, der indgår i cementen.

CEM III: Slaggecement. Fremstilles af portlandklinker og gips med tilsætning af fra 35% til 95% granuleret højovns slagge. Der er 3 undergrupper, A med fra 36% til 65%, B med fra 66% til 80% og C med fra 81% til 95% tilsætning. Herudover må tilsættes op til 5% uorganisk materiale, som ikke er granuleret højovns slagge.

CEM IV: Puzzolancement. Fremstilles af portlandklinker og gips med tilsætning af fra 11% til 55% af én eller flere af følgende mineralske tilsætninger: Mikrosilica, naturlig og industriel puzzolan og siliciumaluminiumholdig flyveaske. Der er 2 undergrupper, A med fra 11% til 35% og B med fra 36% til 55%. Herudover må tilsættes op til 5% uorganisk materiale, som er af anden type end de mineralske hovedtilsætninger, der indgår i cementen.

CEM V: Kompositcement. Fremstilles af portlandklinker og gips med tilsætning af granuleret højovns slagge samt én eller flere af følgende mineralske tilsætninger: Naturligt og industrielt puzzolan samt siliciumaluminiumholdig flyveaske. Der er 2 undergrupper, A med fra 18% til 30% granuleret højovns slagge og fra 18% til 36% af de andre nævnte mineralske tilsætninger. Undergruppe B har fra 31% til 50% granuleret højovns slagge, fra 31% til 50% af de andre nævnte mineralske tilsætninger samt et portlandklinkerindhold på mindst 20%. Herudover må tilsættes op til 5% uorganisk materiale af en anden type, end de mineralske hovedtilsætninger, der indgår i cementen.

Navn	Kemisk sammensætning	Cementkemisk betegnelse	Fasebetegnelse
Tricalciumsilikat Alit	3CaO-SiO ₂	C ₃ S	Silikatfase
Dicalciumsilikat Belit	2CaO-SiO ₂	C ₂ S	
Tricalciumaluminat Celit	3CaO-Al ₂ O ₃	C ₃ A	Aluminatfase
Tetracalciumaluminatferrit	4CaO-Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	Ferritfase

Tabel 1. Portlandcements indhold af forskellige mineraler afhænger af fremstillingsprocessen. Tabellen angiver de væsentligste klinkermineraler med deres navn, kemiske sammensætning og cementkemiske betegnelse.

Cementnavn	Bindetid min	Finhed m ² /kg	Bulkdensitet kg/m ³	Abs. densitet kg/m ³	Certificeringsmærkning
BASIS® cement	140	500	1100	3120	CEM II/A - L 52,5R (IS/LA/≤2)
ABC cement	150	350	1100	3100	CEM II/A - L 52,5 (IS/LA/≤2)
RAPID® cement	90	420	1250	3180	CEM I 52,5 (MS/LA/≤2)
LAVALKALI SULFAT-BESTANDIG cement	90	350	1300	3210	CEM I 42,5 (HS/EA/≤2)
HVID cement	100	400	1100	3160	CEM I 52,5 (HS/EA/≤2)

Tabel 2. Typiske værdier for cementernes bindetid, finhed (for BASIS® cement og ABC cement alene klinkerdelen), bulkdensitet og absolutte densitet. Desuden er angivet certificeringsmærkninger iht. DS427-2.

Cementnavn	C ₃ S %	C ₂ S %	C ₃ A %	C ₄ AF %	Na ₂ O ækv. %	CaSO ₄ %	Kalkfiller %
BASIS® cement og ABC cement	63	11	8	11	0,51	2 - 3	14
RAPID® cement	52	22	7	11	0,51	3 - 5	<5
LAVALKALI SULFAT-BESTANDIG cement	52	30	4	7	0,36	2 - 3	0
HVID cement	63	24	4	1	0,26	2 - 3	0

Tabel 3. Typisk indhold af klinkermineraler og alkali i cementklinker, samt typisk indhold af gips og kalkfiller i cementerne. I de grå cementer kan der desuden være spor af flyveaske fra transportsystemet. Cementens kemiske sammensætning angives sædvanligvis som dens beregnede indhold af klinkermineralerne tricalciumsilikat (C₃S), dicalciumsilikat (C₂S), tricalciumaluminat (C₃A) og tetracalciumaluminatferrit (C₄AF). Den kemiske sammensætning af klinkermineralerne ses i tabel 1. Som en orientering kan benyttes tabellens angivelser af omtrentlige sammensætninger af danske cementer.

Cementnavn	Cementtype	Cementstyrker - MPa ISO, EN			
		1 d.	2 d.	7 d.	28 d.
BASIS® cement	CEM II/A-L 52,5R	28	42	57	66
ABC cement	CEM II/A-L 52,5	21	34	51	60
RAPID® cement	CEM I 52,5	20	32	49	62
LAVALKALI SULFAT-BESTANDIG cement	CEM I 42,5	10	18	34	54
HVID cement	CEM I 52,5	20	33	53	71

Tabel 4. Typiske trykstyrker for cementerne. Styrkerne er bestemt på cementmørtelprismer efter DS/EN 196-1 og er angivet i MPa.

Styrkeklassifikation

32,5 betyder 7 døgns styrke på min. 16 MPa, 28 døgns styrke mellem 32,5 og 52,5 MPa.

32,5 R betyder 2 døgns styrke på min. 10 MPa, 28 døgns styrke mellem 32,5 og 52,5 MPa.

42,5 betyder 2 døgns styrke på min. 10 MPa, 28 døgns styrke mellem 42,5 og 62,5 MPa.

42,5 R betyder 2 døgns styrke på min. 20 MPa, 28 døgns styrke mellem 42,5 og 62,5 MPa.

52,5 betyder 2 døgns styrke på min. 20 MPa, 28 døgns styrke min. 52,5 MPa.

52,5 R betyder 2 døgns styrke på min. 30 MPa, 28 døgns styrke på min. 52,5 MPa.

Den danske cementstandard DS 427:1995

DS 427:1995 stiller samme krav til cementegenskaberne, som den ovenfor nævnte EN 197-1. Men den medtager kun de cementtyper, der er erfaringer med i Danmark, og for hvilke der er dokumenteret de nødvendige holdbarhedsmæssige egenskaber ved generel betonanvendelse i passiv, moderat og aggressiv miljøklasse.

DS 427:1995 omfatter dermed følgende cementtyper:

- CEM I Portlandcement
 - CEM II/A-V Portlandflyveaskecement med fra 6% til 20% siliciumaluminiumholdig flyveaske
 - CEM II/B-V Portlandflyveaskecement med fra 21% til 35% siliciumaluminiumholdig flyveaske
 - CEM II/A-L Portlandkalkstenscement med fra 6% til 20% kalkfiller.
- og følgende styrkeklasser:
42,5 - 42,5 R - 52,5 og 52,5 R

Certificeret cement

Cement kan i Danmark produktcertificeres efter DS 427-2:1996 »Vurdering af overensstemmelse«. En certificering efter denne indebærer bl.a. en overvågning af cementegenskaberne i DS 427:1995 af en 3. part, certificeringsorganet.

DS 427:1995 indeholder ikke krav eller klassificeringer af cementer mht. sulfatbestandighed, alkaliindhold, indhold af vandopløseligt chromat og høj 1 døgns styrke.

Men i DS 427-2:1996 indgår en klassificering af disse 4 egenskaber, som dermed også er omfattet af certificeringen. Klassifikationen er gengivet nedenfor for sulfatbestandighed, alkaliindhold og chromatbetegnelse. Vedrørende høj 1 døgns styrke benyttes bogstavet R fra styrkebetegnelsen, idet et R, udover hvad der gælder for 2 døgns styrken, desuden betyder, at 1 døgnsstyrken er min. 16 MPa.

Sulfatbestandighedsbetegnelse

HS Høj sulfatbestandighed. Benyttes for CEM I-cementer, hvis C_3A -indhold er $\leq 5\%$.

MS Moderat sulfatbestandighed. CEM I-cementer, hvis C_3A -indhold ligger



Figur 7. Aalborg Portlands fabrik i Aalborg.

under 8% og for CEM II-V-cementer, hvis indhold af flyveaske er $>15\%$.
IS Ikke sulfatbestandig cement. Cementer, der ikke opfylder ovennævnte krav.

Alkaliindholdsbetegnelse

- EA Ekstra lavt alkaliindhold. Benyttes for cementer, hvis indhold af syreopløseligt alkali er $\leq 0,4\%$.
- LA Lavt alkaliindhold. Cementer med alkaliindhold $\leq 0,6\%$.
- MA Moderat alkaliindhold. Cementer med alkaliindhold $\leq 0,8\%$.
- HA Højt alkaliindhold. Benyttes for cementer, der ikke opfylder ovennævnte krav.

Chromatbetegnelse

Indholdet af vandopløseligt chromat i mg/kg efter DS 1020. Mærkningen kan være ≤ 2 eller >2 . Bekendtgørelse Nr. 661, udstedt 28. november 1983 af Direktoratet for Arbejdstilsynet, angiver følgende: »Cement og ikke hærdede produkter, hvor der findes mere vandopløseligt chromat end svarende til 2 mg/kg tør cement må ikke anvendes.

Aalborg Portland har alle sine cementer på det danske marked certificeret hos Dansk Betoncertificering, DBC, og kopier af certifikaterne kan rekvireres hos Aalborg Portland.

Danske cementtyper

Aalborg Portlands cementer på det danske marked omfatter følgende cementtyper:

BASIS[®] cement, der betegnes CEM II/A-L 52,5 R (IS/LA/ ≤ 2), er en portlandkalkstenscement, tilsat ca. 14% specialfremstillet mikrofiller (kalkfiller), styrkeklasse 52,5 R, dvs. ekstra høj tidlig styrke og høj sen styrke, ikke sulfatbestandig og med lavt alkaliindhold. Cementen sælges kun løst i tankbiler.
ABC cement, der betegnes CEM II/A-L 52,5 (IS/LA/ ≤ 2), er en portlandkalkstenscement,

tilsat ca. 14% specialfremstillet mikrofiller (kalkfiller), styrkeklasse 52,5, dvs. høj tidlig og høj sen styrke, ikke sulfatbestandig og med lavt alkaliindhold. Cementen sælges både løst og pakket. På cementsækkene er navnet BASIS[®] AALBORG CEMENT[®].
RAPID[®] cement, der betegnes CEM I 52,5 (MS/LA/ ≤ 2), er en portlandcement tilsat ca. 4% specialfremstillet mikrofiller (kalkfiller), styrkeklasse 52,5, dvs. høj tidlig og høj sen styrke, moderat sulfatbestandig og lavt alkaliindhold. Cementen sælges både løst og pakket. På cementsækkene er navnet RAPID[®] AALBORG CEMENT[®].

LAVALKALI SULFATBESTANDIG cement, der betegnes CEM I 42,5 (HS/EA/ ≤ 2), er en portlandcement, uden tilsætning, styrkeklasse 42,5 med specialegenskaberne høj sulfatbestandighed og ekstra lavt alkaliindhold. Cementen har desuden en lavere varmeudvikling end de før nævnte cementer. Cementen sælges både løst og pakket. På cementsækkene er navnet LAVALKALI AALBORG CEMENT[®].

HVID cement, der betegnes CEM I 52,5 (HS/EA/ ≤ 2), er en portlandcement, uden tilsætning, styrkeklasse 52,5, dvs. høj tidlig og høj sen styrke og med specialegenskaben, at cementen er hvid. Hvidheden måles ved refleksionen af hvidt lys fra en specielt sammenstampet overflade af cementpulver. HVID cement har en refleksion omkring 87%, mens de øvrige (grå) cementer reflekterer 30-35%. Cementen har en høj sulfatbestandighed og et ekstra lavt alkaliindhold. Den sælges både løst og pakket. På cementsækkene er navnet HVID AALBORG CEMENT[®].

MESTER[®] AALBORG CEMENT[®], der betegnes CEM I 42,5 (HS/LA/ ≤ 2), er en portlandcement til iblanding ved fremstilling af kalkcementmørtler og muremørtler til mure- og pudseopgaver. Cementen sælges kun pakket.

Cement

Cement blandet med vand, cementpasta, har bindemiddelegenskaber, der udnyttes bl.a. til fremstilling af beton. Bindemiddelegenskaberne er nøje knyttet til cementens kemiske sammensætning og finhed. Dette behandles i det følgende afsnit.

Kemisk sammensætning

Under fremstillingen styres cementens sammensætning ud fra nogle karakteristiske nøgleværdier, beregnet ud fra måling af indholdet af siliciumoxid $\text{SiO}_2(\text{S})$, calciumoxid $\text{CaO}(\text{C})$, aluminiumoxid, $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{A})$ og ferrioxid $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{F})$ i slammen.

I den færdige cement indgår disse oxider i visse karakteristiske forbindelser, de såkaldte klinkerminerale, jf. tabel 1.

Mineralsammensætningen af en portlandcement bestemmes sædvanligvis ud fra en

grundstofanalyse af cementen. Resultatet af analysen opgives som vægtprocent af CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 og herudfra beregnes mineralsammensætningen ved hjælp af Bogue's formler, der er baseret på en række forudsætninger, som ikke helt er opfyldt i praksis. Metoden kan ikke anvendes, såfremt cementen er tilsat flyveaske og kalkfiller. I så fald må klinkersammensætningen findes på basis af kemisk analyse af de anvendte klinker. Beregning af en portlandcements mineralsammensætning efter Bogue's formler er således ikke eksakt. Metoden giver imidlertid et godt grundlag for vurdering af cementens mineralsammensætning og dermed dens egenskaber, idet de enkelte klinkermineralers egenskaber er kendte. Bogue's formler ses i eksempel 2, og beregning herefter ses i eksempel 4. Mere direkte kan indholdet af mineraler bestemmes ved mikroskopi eller røntgendiffraktometri. Til rutinemæssige undersøgelser har disse mere direkte metoder endnu ikke fortrængt bestemmelsen af klinkerminerale efter Bogue's formler.

De vigtigste klinkerminerale er:

Tricalciumsilikat	.....	\text{C_3S
Dicalciumsilikat	.....	\text{C_2S
Tricalciumaluminat	.....	\text{C_3A
Tetracalciumaluminatferrit	.....	\text{C_4AF

Foruden disse klinkerminerale indeholder cementklinker en række sekundære komponenter i små mængder, der kan influere på cementens brugsegenskaber. Det gælder således indholdet af:

Fri kalk	.....	fri CaO
Magnesiumoxid	.....	\text{MgO
Alkalioxider	.....	\text{Na_2O og K_2O

Endelig tilsættes klinkerne rågips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) samt evt. flyveaske under formlingen til cement.

For dansk flyveaske til cementfremstilling er en typisk kemisk sammensætning:

SiO_2	.....	50%	MgO}	.....	1,5%
Al_2O_3	.....	30%	SO_3	.....	1%
Fe_2O_3	.....	6%	Na_2O -ækv	.....	1%
CaO}	.....	8%	Glødetab	.....	3%



C₃S

Kemisk betegnelse: Tricalciumsilikat
Kemisk formel: 3 CaO-SiO₂

Klinkermaterialet C₃S, der har den mineralogiske betegnelse Alit, er hovedkomponenten i portlandcement. I dansk portlandcement udgør indholdet af C₃S typisk 50-60%.

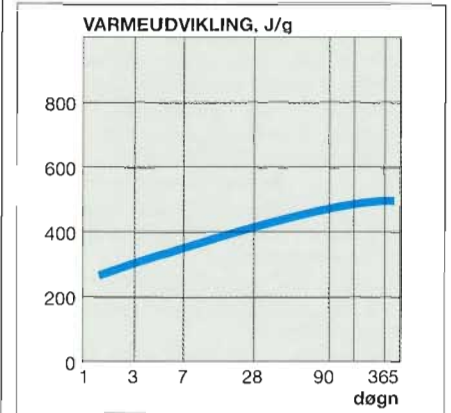
Ved tilsætning af vand reagerer C₃S under dannelse af calciumsilikathydrater (C-S-H) og calciumhydroxid. Denne reaktion, hvor et klinkermineral reagerer med vand og danner hydrater, benævnes hydratisering. De dannede C-S-H-geler er den vigtigste styrkegivende komponent i hærdnet cementpasta. C₃S er derfor af væsentlig betydning for cementpastaens styrkeudvikling specielt i den tidlige fase. Dette skyldes, at C₃S sammenlignet med C₂S reagerer hurtigt med vand. Hydratiseringsforløbet for C₃S er i nogen grad afhængig af tilstedeværelsen af cementens øvrige komponenter. Det viser sig således, at både C₂A og gips fremmer hydratiseringen af C₃S. Også de sekundære komponenter (f.eks. alkaliforbinder) kan påvirke hydratiseringsforløbet.

Reaktionen mellem C₃S og vand ledsages af en varmeudvikling på ca. 500 Joule pr. gram omsat C₃S, jf. figur 10. Denne varmemængde er, set i relation til de øvrige klinkermineralers hydratiseringsvarme, moderat til høj.

Ved hydratiseringsprocessen forbruges af det tilsatte vand. For C₃S gælder det ved fuld hydratisering, at ca. 25 vægtprocent vand bindes kemisk i de dannede hydrater, og ca. 15 vægtprocent vand bindes fysisk som adsorberet vand (»gelvand«) på overfladen af de dannede hydrater. De dannede hydratiseringsprodukter er bestandige over for sulfater.

Resumé:

- Hurtig styrkeudvikling.
- Høj slutstyrke.
- Moderat til høj varmeudvikling, ca. 500 J/g ved fuldstændig hydratisering.
- Moderat til lavt vandforbrug ved hydratisering: Ca. 25 vægtprocent kemisk bundet vand og ca. 15 vægtprocent fysisk adsorberet gelvand.
- Bestandig over for sulfatangreb.



Figur 10. Typisk forløb af varmeudvikling for klinkermineralet C₃S (efter Bogue).

C₂S

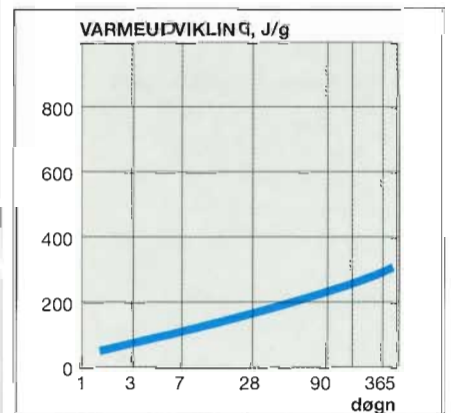
Kemisk betegnelse: Dicalciumsilikat
Kemisk formel: 2 CaO-SiO₂

Klinkermaterialet C₂S, der har den mineralogiske betegnelse Belit, indgår typisk i mængder på omkring 20% i dansk portlandcement. Ligesom C₃S danner det calciumsilikathydrater og calciumhydroxid ved hydratiseringen, men i et andet indbyrdes mængdeforhold. C₂S reagerer betydeligt langsommere end C₃S, hvorfor C₂S først får betydning for de senere styrker. Ved fuldstændig hydratisering af C₂S udvikles der en varmemængde på ca. 260 J/g. Karakteristisk for klinkermineralet C₂S er således en langsom reaktion og en lav varmeudvikling som vist i figur 11.

Vandforbruget ved hydratisering af C₂S er af samme størrelsesorden som for C₃S, idet der til fuld hydratisering medgår ca. 21 vægtprocent kemisk bundet vand og ca. 15 vægtprocent fysisk adsorberet vand (»gelvand«). De dannede hydratiseringsprodukter er bestandige over for sulfater.

Resumé:

- Langsom styrkeudvikling.
- Høj slutstyrke.
- Lav og langsom varmeudvikling: Ved fuldstændig hydratisering af C₂S udvikles der ca. 260 J/g.
- Moderat til lavt vandforbrug under hydratisering: ca. 21 vægtprocent kemisk bundet vand og ca. 15 vægtprocent fysisk adsorberet gelvand.
- Bestandig over for sulfatangreb.



Figur 11. Typisk forløb af varmeudvikling for klinkermineralet C₂S (efter Bogue).

Figur 8. Geografisk fordeling af Aalborg Portland's cementfabrik, siloanlæg, cementpakkerier og serviceafdelinger.

1. Aalborg, hovedkontor, cementfabrik, cementpakkeri og CtO.
2. Århus, siloanlæg.
3. Kolding, siloanlæg.
4. Aabenraa, siloanlæg.
5. Odense, siloanlæg.
6. Vordingborg, siloanlæg.
7. Redhavnen, siloanlæg.
8. Sluseholmen, siloanlæg og cementpakkeri.
9. Rønne, siloanlæg.



Figur 9. Løs cement leveres til forbrugernes siloer med tankbiler.

De største af bilerne leverer 30-34 tons pr. læs.

C₃A

Kemisk betegnelse: Tricalciumaluminat

Kemisk formel: 3 CaO-Al₂O₃

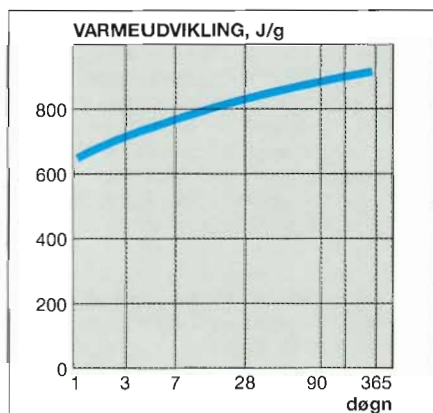
Klinkermaterialet C₃A, udgør sædvanligvis ca. 5-10% af dansk portlandcement. I visse specialcementer, bl.a. cementer med høj sulfatbestandighed er mængden af C₃A dog kun 0-5%. C₃A reagerer foruden med vand også med gips. Hvis der ikke er tilsat gips, vil C₃A reagere meget hurtigt med vand, og blandingen vil størkne i løbet af få minutter. Dette er omtalt i afsnittet »Gips«.

C₃A bidrager til hurtig styrkeudvikling, men kun i begrænset omfang til cementens senere styrkeudvikling.

Varmeudviklingen ved hydratisering af C₃A er betydelig, ca. 900 J/g ved fuldstændig hydratisering, jf. figur 12.

C₃A's reaktionsprodukter har et højt indhold af hydratvand. Ved hydratiseringen af C₃A bindes således ca. 40-210 vægtprocent vand afhængigt af, hvilke reaktionsprodukter, der dannes. Vandforbruget ved C₃A's hydratisering er altså væsentligt højere end for C₃S og C₂S.

Hvis beton udsættes for sulfater, kan der ske ekspansive reaktioner mellem disse og C₃A eller dets metastabile reaktionsprodukter. Indholdet af C₃A har derfor afgørende betydning for cementpastaens bestandighed over for sulfatangreb.



Figur 12. Typisk forløb af varmeudvikling for klinkermineralet C₃A (efter Bogue).

Resumé:

- Hurtig og høj varmeudvikling: Ved fuldstændig hydratisering udvikles der 900 J/g.
- Stort vandforbrug under hydratisering, specielt for de metastabile hydrater og ettringit. Ca. 40-210 vægtprocent kemisk bundet vand i hydrater.
- Ubestandig over for sulfatangreb.

C₄AF

Kemisk betegnelse: Tetracalciumaluminatferrit

Kemisk formel: 4 CaO-Al₂O₃-Fe₂O₃

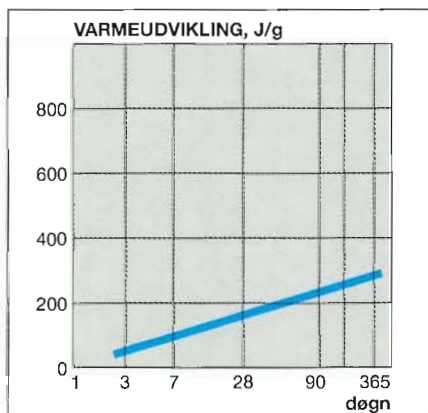
Klinkermaterialet C₄AF udgør sædvanligvis op til ca. 10% af dansk portlandcement. Sammenholdt med de tidligere beskrevne klinkerminerale C₃S, C₂S og C₃A, bidrager C₄AF kun i begrænset omfang til cementpastaens styrkeudvikling.

Ved de tidlige reaktioner med vand danner C₄AF ligesom C₃A en række metastabile hydrater, der ved efterfølgende reaktioner i et vist omfang omdannes til et stabilt slutprodukt. C₄AF reagerer dog betydeligt langsommere end C₃A og hydratiseringsvarmen er moderat til lav, ca. 300 J/g, jf. figur 13.

Vandforbruget ved hydratisering er større end C₃S og C₂S's, men mindre end C₃A's. Det ligger på ca. 37-70 vægtprocent afhængigt af, hvilke reaktionsprodukter, der dannes.

Resumé:

- Kun ringe bidrag til cementens styrkeudvikling.
- Moderat til lav varmeudvikling. Ved fuldstændig hydratisering udvikles der ca. 300 J/g.
- Moderat vandforbrug under hydratisering, ca. 37-70 vægtprocent vand, afhængigt af, hvilket reaktionsprodukt, der dannes.



Figur 13. Typisk forløb af varmeudvikling for klinkermineralet C₄AF (efter Bogue).

Gips

Kemisk betegnelse: Calciumsulfatdihydrat

Kemisk formel: CaSO₄·2H₂O

Ved formaling af cementklinker tilsættes 2,5-5% gips. Gipsen har især betydning som regulator af cementens afbindingsreaktioner, specielt den hurtige reaktion mellem C₃A og vand.

Gipsens retarderende virkning på C₃A's hydratisering skyldes formodentlig dannelsen af ettringit (et calcium-sulfoaluminathydrat) - på C₃A-kornenes overflader. Det antages, at den udfældede ettringit virker hæmmende på C₃A's videre hydratisering, hvorved tidspunktet for afbindingens begyndelse udskydes. Temperaturstigningen under formalingsprocessen kan medføre, at den tilsatte gips i større eller mindre omfang afvandes til halvhydrat (CaSO₄·1/2H₂O). Afvanding af gipsen har i praksis næppe indflydelse på den afbindingsregulerende effekt.

Afvanding af gipsen kan dog forårsage en hurtig afbinding, kaldet »falsk afbinding«, der skyldes, at halvhydrater reagerer med vand under udfældning af nåleformet gips. Den falske afbinding er ledsaget af en meget svag varmeudvikling, og den opståede stivhed kan ophæves ved genblanding.

Udover den bindetidsregulerende effekt har gips en gunstig virkning på den tidlige styrkeudvikling samt den dannede cementpastaens volumenændringer ved varierende fugtpåvirkninger.

Resumé:

- Gips er en integreret del af portlandcement.
- Gips tilsættes under formalingen til cement.
- Gips retarderer C₃A's reaktion med vand, så cementen får en passende afbindingstid.
- Gips har ved passende dosering en gunstig indflydelse på den tidlige styrkeudvikling.
- Gips reducerer cementpastaens volumenændringer ved varierende fugtpåvirkning.

Eksempel 1: Cements varmeudvikling

Ud fra varmeudviklingen for hver af de 4 klinkerminerale, som angivet i figur 10-13, og cementernes procentvise indhold af de 4 klinkerminerale, jf. tabel 3, beregnes cementernes varmeudvikling, som anført nedenfor.

RAPID® cement:

$$500 \cdot 0,52 + 260 \cdot 0,22 + 900 \cdot 0,07 + 300 \cdot 0,11 = \text{ca. } 405 \text{ J/g}$$

LAVALKALI SULFATBESTANDIG cement:

$$500 \cdot 0,52 + 260 \cdot 0,30 + 900 \cdot 0,04 + 300 \cdot 0,07 = \text{ca. } 395 \text{ J/g}$$

HVID cement:

$$500 \cdot 0,63 + 260 \cdot 0,24 + 900 \cdot 0,04 + 300 \cdot 0,01 = \text{ca. } 420 \text{ J/g}$$

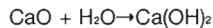
Fri kalk

Kemisk betegnelse: Calciumoxid

Kemisk formel: CaO

Ved kalcineringen af kridt omdannes dette til calciumoxid (CaO). Hovedparten heraf bindes af de sure oxider SiO_2 , Al_2O_3 og Fe_2O_3 i klinkerminerallerne. Den del, der ikke bindes, benævnes med »fri kalk«, eller fri CaO.

Den frie CaO reagerer med vand under dannelse af calciumhydroxid:



Reaktionen kan give anledning til ekspansion under cementens hydratisering. Erfaringerne viser dog, at indholdet af fri CaO skal være højt og kornene forholdsvis store, før ekspansionen kan få skadelige virkninger.

I danske cementer ligger indholdet af fri CaO på 0,5-2%, og indebærer derfor ikke risiko for ekspansion.

Resumé:

- CaO reagerer med vand under dannelse af $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ved for højt indhold af fri kalk kan reaktionen give anledning til ekspansion.
- I danske cementer er indholdet af fri CaO 0,5-2 vægtprocent.

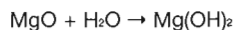
Magnesiumoxid

Kemisk betegnelse: Magnesiumoxid

Kemisk formel: MgO

Selv om MgO kemisk set er nært beslægtet med CaO, bindes det dog ved klinkerdannelsen ikke i nært samme omfang som dette af de sure oxider. Kun op til 1% bindes i klinkerminerallerne. Overskydende MgO vil efter brændingen hovedsagelig findes som krystallinsk MgO.

MgO reagerer langsomt med vand under dannelse af $\text{Mg}(\text{OH})_2$:



Ligesom reaktionen mellem CaO og vand kan reaktionen mellem MgO og vand give anledning til ekspansion. Indeholder cement større mængder MgO (> 5 vægtprocent) kan ekspansionen give anledning til revnedannelser i betonen, og da reaktionshastigheden som nævnt er meget lav, kan der gå flere år før sådanne evt. skader indtræffer. Volumenekspansioner som følge af MgO's hydratisering

registreres på grund af reaktionens træghed normalt ikke ved de sædvanlige volumenstabilitetsprøvninger. Man fastsætter derfor i cementnormerne maksimalgrænser for cements indhold af MgO. I EN 197-1 og DS 427: 1995 er grænsen 5% MgO i cementklinkerne.

Normalt er indholdet i danske cementer under en femtedel heraf.

Resumé:

- Op til 1% MgO bindes i klinkerminerallerne.
- MgO reagerer langsomt med vand under dannelse af $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Ved for højt indhold af MgO kan reaktionen give anledning til ekspansion.
- I Danmark tillader normen op til 5% i klinkerne. Danske cementer indeholder under 1%.

Alkaliforbindelser

Kemiske betegnelser: Natriumoxid og kaliumoxid

Kemiske formler: Na_2O og K_2O

Cementens alkaliforbindelser findes dels indbygget i klinkerminerallerne, hvor de erstatter (substituerer) CaO, dels som letopløselige alkali-sulfater. En cements alkaliindhold opgives ofte som Na_2O -ækvivalenter, dvs. K_2O -indholdet omregnes til den ækvivalente mængde Na_2O og adderes til Na_2O -mængden. Beregningsformlen er:

$$\begin{aligned} \% \text{Na}_2\text{O-ækv.} &= \\ \% \text{Na}_2\text{O} &+ 0,658 \% \text{K}_2\text{O}. \end{aligned}$$

Selv om alkaliforbindelserne kun findes i små mængder, synes de at have indflydelse på hydratiseringsforløbet. Et øget alkaliindhold i cement vil give acceleration af den tidlige styrkeudvikling, men et lavere slutstyrkeniveau. Forholdene omkring alkaliforbindelsernes indflydelse på styrkeudviklingen er dog endnu ikke fuldt ud klarlagte.

Fremstilles en beton med tilslag indeholdende amorf kisel (porøs flint, opal etc.) vil dette kunne reagere med cementens alkaliforbindelser under dannelse af alkalisilikagel. I fugtigt miljø vil denne gel kunne ekspandere og eventuelt give anledning til revnedannelser (»alkaliskelreaktioner«). Alkaliskelreaktioner

kan modvirkes ved at undgå reaktivt tilslag i betonen eller ved anvendelse af cement med lavt alkaliindhold, som f.eks. LAVALKALI SULFATBESTANDIG cement eller HVID cement.

Resumé:

- Alkaliforbindelser findes i små mængder (højest 0,6% Na_2O -ækv. i danske cementer).
- Alkaliforbindelser påvirker hydratiseringsforløbet i form af en acceleration af den tidlige styrkeudvikling, og en sænkning af slutstyrkeniveauet.
- Alkaliforbindelser kan reagere med reaktivt kisel i tilslagsmaterialerne under dannelse af skadelige alkaliskelreaktioner.

Eksempel 2: Bogue's formler

Resultatet af en kemisk analyse af cement angives som regel ved det procentvise indhold (efter vægt) af de vigtigste grundstofoxider. På grundlag heraf kan klinkermineralsammensætningen beregnes ved hjælp af nedenstående formler (Bogue's formler). Denne metode til bestemmelse af klinkermineralsammensætningen giver i reglen et andet resultat end de mere direkte metoder (mikroskopi og røntgen-diffraktometri), men i praksis er det den mest anvendte. Anvendelse af formlerne er illustreret i eksempel 4.

$$\begin{aligned} \text{Tricalciumsilikat: } 3\text{CaO-SiO}_2 \text{ (C}_3\text{S)} &= \\ 4,07 \cdot \text{CaO} &- (7,60 \cdot \text{SiO}_2 + 6,72 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \\ &+ 1,43 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2,85 \cdot \text{SO}_3 + 4,07 \cdot \text{fri CaO}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dicalciumsilikat: } 2\text{CaO-SiO}_2 \text{ (C}_2\text{S)} &= \\ 2,87 \cdot \text{SiO}_2 &- 0,754 \cdot (3\text{CaO-SiO}_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tricalciumaluminat: } 3\text{CaO-Al}_2\text{O}_3 \text{ (C}_3\text{A)} &= \\ 2,65 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 &- 1,69 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tetracalciumaluminatferrit:} & \\ 4\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3 \text{ (C}_4\text{AF)} &= \\ 3,04 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gips CaSO}_4 &= \\ 1,70 \cdot \text{SO}_3 & \end{aligned}$$

Finhed

Cement er et hydraulisk bindemiddel, hvilket vil sige, at det hærdner ved reaktion med vand, den såkaldte hydratiseringsproces. Hydratiseringen sker på overfladen af cementpartiklerne og forløber derfor hurtigere, jo finere cementen er formålet. Ved at formale til forskellig finhed kan man således ud fra klinker af ens sammensætning fremstille cementer med forskellige styrkeudviklingsforløb.

Bestemmelse af finhed. En cements finhed kan angives på flere måder. Et hyppigt anvendt finhedsmål er cementens *specifikke overflade*, dvs. overfladeareal pr. vægtenhed. I praksis bestemmes den specifikke overflade ofte ved en metode udviklet af R. L. Blaine, hvorfra benævnelserne »Blaine-overflade« stammer. Se tabel 5.

Metoden er baseret på måling af luftgennemstrømningshastigheden gennem en cementprøve.

Metoden benyttes normalt kun for CEM I-cement.

En mere detaljeret beskrivelse af finheden fås ved at bestemme cementens kornstørrelsesfordeling.

Fordelingen af de grovere korn kan bestemmes ved sigteanalyse, mens de finere korns

fordeling f.eks. bestemmes ved sedimentationsanalyse. Se figur 14.

Oftentimes ser man et cementpulvers finhed karakteriseret blot ved et enkelt punkt fra kornkurven. Man angiver således mængden af cementkorn, der er større end en forudvalgt kornstørrelse som f.eks. luftslemmerest og sigterest.

Indflydelse på tæthed. Finheden har betydning allerede for det tørre cementpulvers egenskaber. Mellem de enkelte cementpartikler virker der elektrostatiske overfladekræfter, der hæmmer en fri pakning af partiklerne. Denne effekt får større betydning jo finere cementen er formålet. En cement med stor finhed vil derfor have en løsere lejring, og dermed en lavere bulkdensitet, end en grovere cement. Til illustration af dette forhold kan nævnes, at RAPID® cement har en bulkdensitet, der er ca. 5% mindre end LAVALKALI SULFATBESTANDIG cement. Se tabel 2.

I en blanding af cement og vand, cementpasta, har overfladekræfterne mellem cementpartiklerne ligeledes indflydelse på partiklernes indbyrdes bevægelighed. Også i dette tilfælde vil effekten få større betydning, jo finere cementen er formålet. Vandbehovet for

opnåelse af samme konsistens øges derfor med finheden i rene cement-vand-systemer.

Indflydelse på kemiske reaktioner. Udover de fysiske effekter af en øget cementfinhed, der er omtalt ovenfor, har finheden afgørende indflydelse på cementens kemiske reaktivitet. Hydratiseringen og dermed styrkeudviklingen vil forløbe hurtigere, jo finere cementen er formålet. Forskellen i styrkeniveau som følge af finheden vil dog mindskes med hydratiseringstiden.

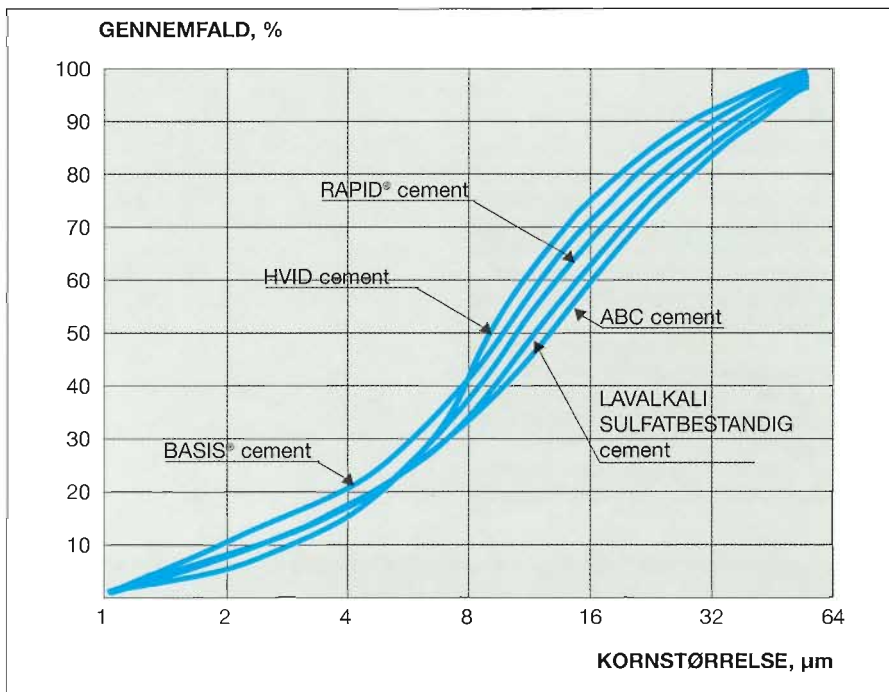
Ved cementens reaktion med vand udvikles der varme. En øget reaktionshastighed som følge af øget cementfinhed vil derfor samtidig medføre en hurtigere varmeudvikling.

Cement, der kun adskiller sig ved deres finhed, danner de samme reaktionsprodukter under hydratiseringen. Den hærdnede cementpasta kemiske resistens er derfor stort set uafhængig af cementfinheden.

Resumé:

Virkningen af øget finhed er:

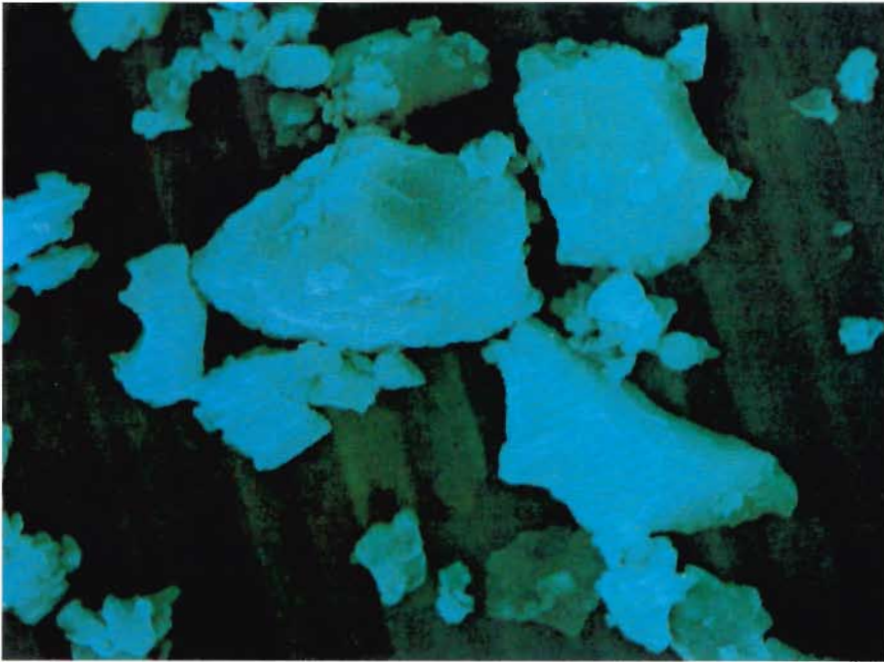
- Mindre bulkdensitet af cementpulveret.
- Større vandbehov for opnåelse af en given konsistens.
- Kortere afbindingstid.
- Hurtigere styrkeudvikling.
- Hurtigere varmeudvikling.



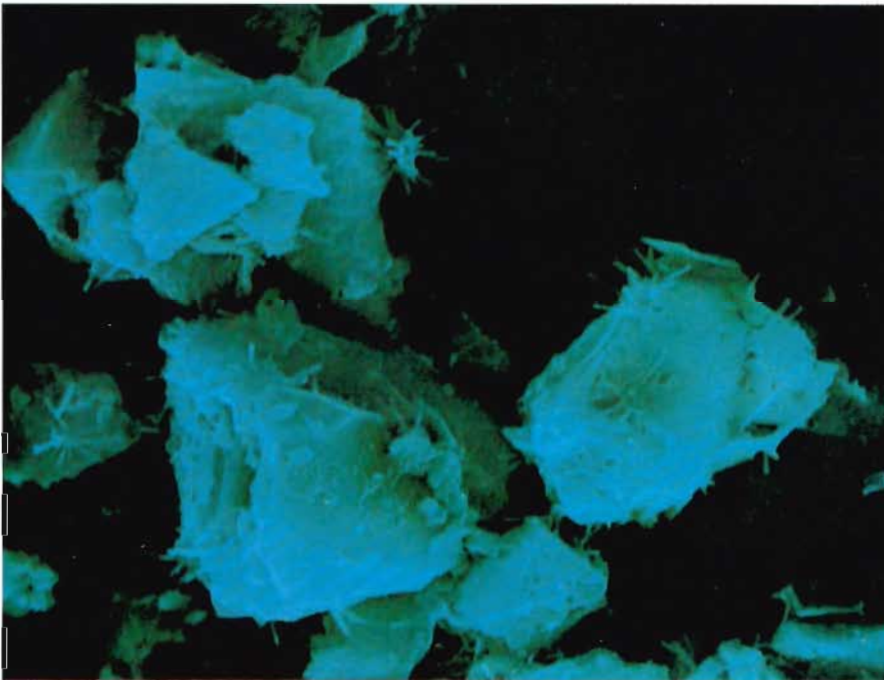
Figur 14. Eksempel på kornstørrelsesfordelingen for BASIS® cement, RAPID® cement, HVID cement, LAVALKALI SULFATBESTANDIG cement samt ABC cement. Kornstørrelsesfordelingen er bestemt ved sedimentationsanalyse.

Cementnavn	Finhed, Blaine [m ² /kg]	Mediankornstørrelse på basis af kornkurve [µm]
BASIS® cement	-	11
RAPID® cement	420	12
HVID® cement	400	10
LAVALKALI SULFATBESTANDIG cement	350	13
ABC cement	-	14

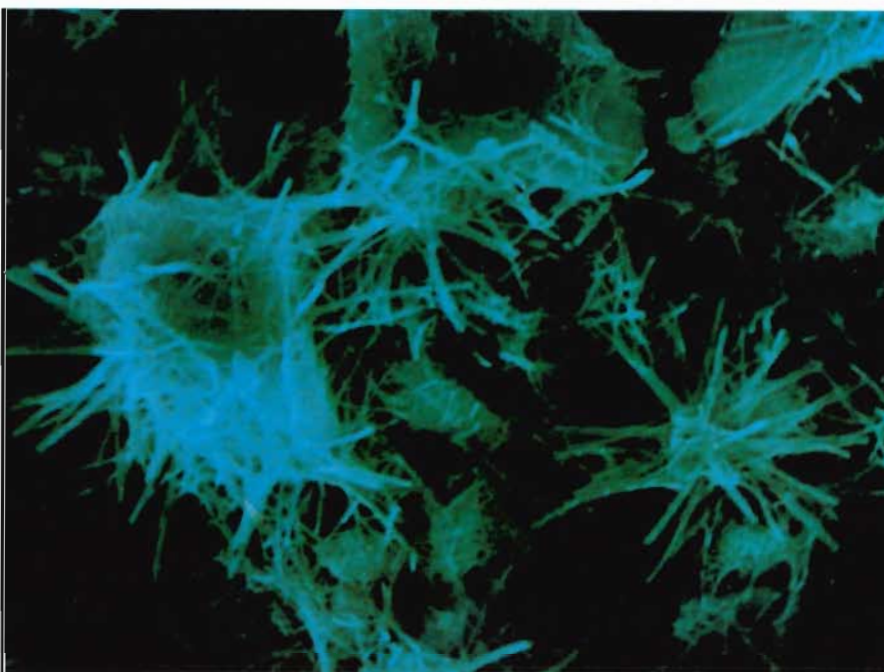
Tabel 5. Typiske tal for den specifikke overflade (Blaine) og mediankorndiameteren (50%-værdien fra kornkurven). De angivne værdier er eksempler på størrelsesordenen.



Figur 15. RAPID® cement, der ikke er hydratiseret.



Figur 16. RAPID® cement, der er hydratiseret i 5 min. Tydelige dannelser af nåleformet ettringit fremkommet ved reaktion mellem C_3A og gips.



Figur 17. RAPID® cement, der er hydratiseret i 6 døgn. Nåleformede calciumsilikathydrater fremkommet ved calciumsilikaternes reaktion med vand.

Billederne er optaget på scanning elektronmikroskop (SEM). Forstørrelse: 3000 gange.

Beton

Beton og andre cementbundne materialer har en række brugsegenskaber, som primært er afledt af cementens egenskaber. De vigtigste af disse brugsegenskaber er afbinding, styrkeudvikling, varmeudvikling og volumenændringer. Disse egenskaber hænger alle nøje sammen med cementens hydratisering og de dannede hydratiseringsprodukters struktur, jf. figur 15, 16 og 17.

Cementens hydratisering er karakteriseret ved, at faste stoffer reagerer med vand og danner nye faste stoffer, reaktionsprodukterne, der indeholder kemisk bundet vand. Under hydratiseringen dannes der omkring hvert cementkorn et overladelag af reaktionsprodukter, hvis dimensioner overvejende er i det kolloide område. Det herved dannede netværk giver en stiv faststofstruktur, der kaldes en gel. Den indre overflade af cementgelen er 100-200 m²/gram. Det er dannelsen af denne cementgel, der giver cementens bindemiddelegenskaber.

I en blanding af cement og vand vil der, så længe en af komponenterne ikke er opbrugt, til stadighed ske en hydratisering og dermed en strukturdannelse. I en hvileperiode på 1½-2 timer efter vandtilsætning forløber hydratiseringen langsomt, og der sker ingen egentlig binding mellem de enkelte cementpartikler. I denne periode er blandingen en suspension af cementpartikler i vand og har derfor væskekaraktér. Afhængigt af partikelkoncentrationen kan der i denne periode ske en sedimentation af cementpartiklerne, hvilket registreres som en vandudskillelse (bleeding).

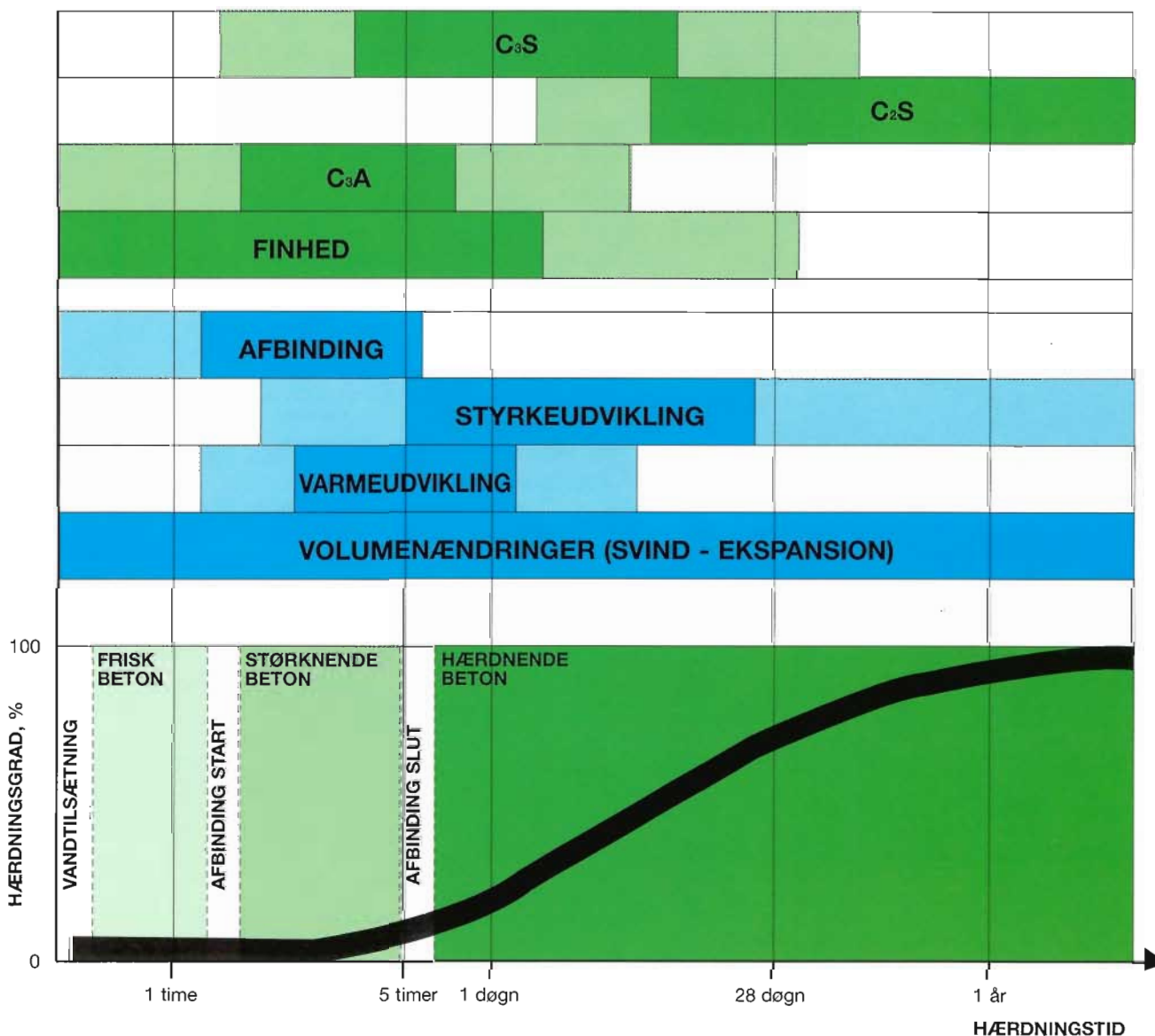
Efter hvileperioden øges hydratiseringshastigheden, og den derved dannede cementgel bevirker, at blandingen mister sin væskekaraktér, den størkner (binder af) og bliver formstabil. Se figur 18.

Hydratiseringen og dermed styrkeudviklingen vil fortsætte, men efterhånden med aftagende hastighed. En fuldstændig standsning

af styrketilvæksten sker dog først, når enten vandet eller cementen er opbrugt ved hydratiseringsprocessen.

Cementen kan i alt binde ca. 40% vand. Af disse vil ca. 25% være bundet kemisk i reaktionsprodukterne, mens resten, ca. 15%, vil findes adsorberet på cementgelens overflade. Tilsættes mere end 40% vand til cementen, vil det overskydende vand findes efterladt i kapillarporer i gelen. Mens det kemisk bundne og det adsorberede vand er en integreret del af cementgelen, kan kapillarvandet opfattes som overskudsvand, der er efterladt i porer i gelstrukturen.

Det vil senere blive omtalt, hvorledes kapillarvandet spiller en afgørende rolle for en betons fugtbetingede volumenændringer, som svind og svelning, samt for styrken af det færdighærdnede materiale.



Figur 18. Nederst er vist en skematisk fremstilling af betons hærtningsgrad som funktion af tiden. I stavene ovenover er vist, dels hvornår de enkelte klinkerminerale og cementfinheden væsentligst bidrager ved cementens hydratisering og hærtning, dels hvornår afbinding, varmeudvikling, styrkeudvikling og volumenændringer finder sted under hydratisering og hærtning.

Afbinding

Cementens indhold af gips bevirker, at C_3A 's hydratisering retarderes. Hvis denne reaktion ikke blev retarderet, ville cementpastaen størkne efter få minutter (lynafbinding). Gipsen bevirker, at afbinding under normale omstændigheder (20°C og normalkonsistens) indtræffer efter et par timers forløb.

Cementens afbindingstid måles med et Vicatapparat som beskrevet i DS/EN 196-3. Ved denne målemetode tilstræbes en bestemt temperatur og konsistens af pastaen. Variationer i afbindingstid vil da fortrinsvis afhænge af:

- Cementens kemiske sammensætning.
- Cementens finhed.
- Cementens lagringsforhold.

Ønskes et overblik over afbindingsforløbet under brugsforhold, der afviger fra standardbetingelserne, vil yderligere følgende parametre kunne påvirke afbindingsforløbet:

- Temperaturen.
- V/c -forholdet.
- Tilsætningsstoffer.

Disse 6 faktorer har også indflydelse på styrkeudviklingen og omtales i afsnittet herom.

Førnævnte 6 faktorerers indflydelse på afbindingsforløbet kan registreres ved Vicat-proceduren.

Resultater fra afbindingsforsøg kan ikke direkte benyttes til bedømmelse af, hvor længe en beton vil være bearbejdelig. Både betonsammensætningen og de mekaniske påvirkninger, betonen udsættes for, er af betydning for, hvor længe betonen er bearbejdelig. Specielt ved brug af tilsætningsstoffer bør man være særlig omhyggelig med at kontrollere afbindingsforløbet. Men afbindingstider målt ved Vicat-proceduren kan fortælle, om der kan forventes normale afbindingsforhold hvad angår de kemiske reaktioner mellem cement og vand.

Alle danske cementtyper har afbindingstider på 2 til 3 timer.

Temperaturafhængigheden kan vurderes ud fra figur 19, der angiver de relative afbindingstider, som funktion af temperaturen. Af figuren ses f.eks., at en beton ved 10°C vil være ca. dobbelt så lang tid om at nå samme

reaktionsgrad som den samme beton vil ved 20°C. I visse tilfælde kan man komme ud for, at pastaen stivner få minutter efter vandtilsætningen. Denne unormale opførsel kan skyldes »falsk afbinding« eller »lynafbinding«.

Falsk afbinding kan indtræffe, såfremt cementens gips er afvandet til halvhydrat. Gipsen kan afvandes under formalingen. Ved længere tids lagring i silo med høj temperatur og lav fugtighed kan afvanding også forekomme. Ved tilsætning af vand i cementen vil halvhydrat hurtigt gå i opløsning og udfældes som det tungere opløselige gips, hvorved pastaen vil blive stiv. Denne stivhed kan ophæves ved at afbryde blandingen, lade den stå 1 minut og blande igen. Falsk afbinding er ikke forbundet med nogen varmeudvikling af betydning, og den har ingen skadelige virkninger på de efterfølgende reaktioner.

Lynafbinding skyldes som nævnt, at C_3A hydratiserer hurtigt, hvis cementen fejlagtigt ikke indeholder gips. Den herved størknede cementpasta kan ikke igen gøres bearbejdelig. Lynafbinding er forbundet med en kraftig varmeudvikling, og vil ofte virke ødelæggende på styrkeudviklingen.

Styrkeudvikling

Cementpasta opnår styrke ved cementminerallerne reaktion med vand og ved eventuelt tilsat flyveaske og mikrosilicas reaktion med porevæskens calciumhydroxid, som dannes når cement og vand reagerer. C_3S og C_2S danner gelstrukturer med en meget stor overflade. Disse reaktionsprodukter er den egentlige styrkegivende komponent i systemet. C_3A og C_4AF 's reaktionsprodukter giver ikke væsentlige bidrag til slutstyrken. Meget tyder dog på, at de ved deres tilstedeværelse påvirker omsætningen af silikaterne i en gunstig retning.

Cementens sammensætning spiller en afgørende rolle for betonens styrkeudviklingsforløb.

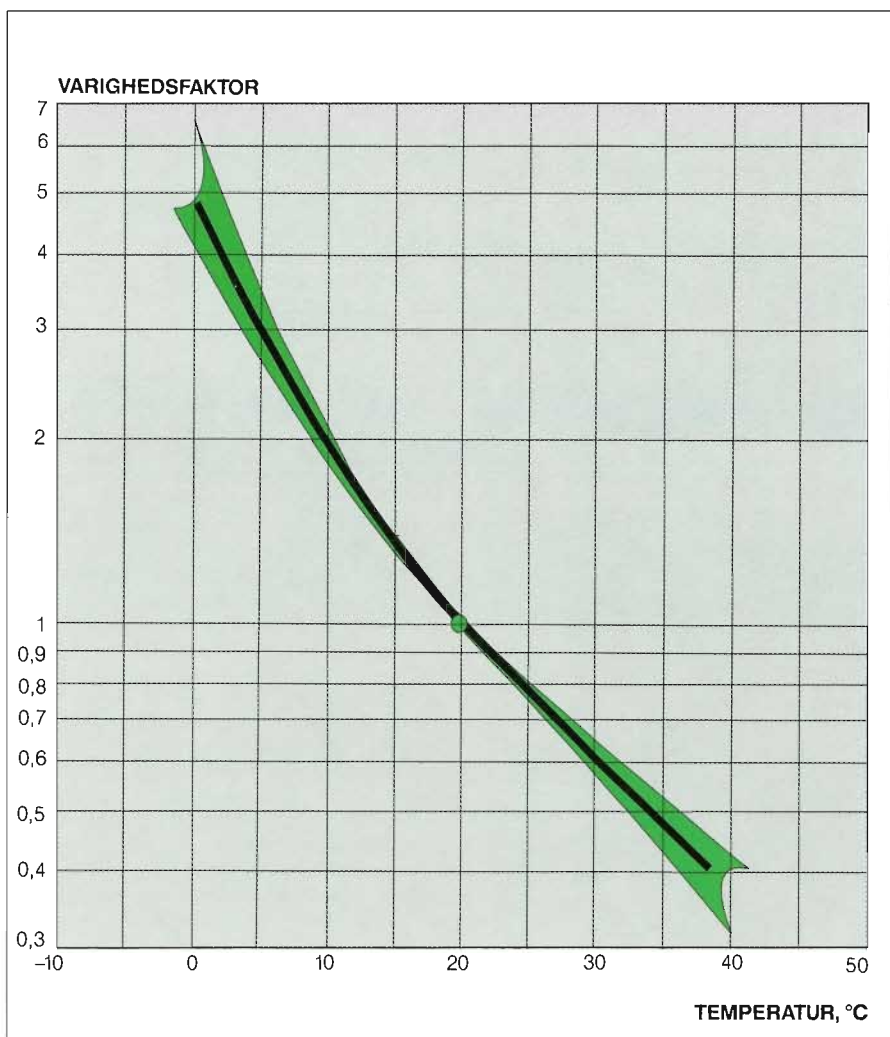
Man har søgt at opstille empiriske udtryk for styrken som funktion af den mineralogiske sammensætning af cementen, men uden succes. Her skal derfor blot nævnes nogle karakteristiske kvalitative sammenhænge:

Stort C_3S -indhold giver både høje tidlige og høje sene styrker. Stort C_3A (op til ca. 14%) synes at accelerere styrkeudviklingen, i hvert fald op til 28 døgn. Alkaliforbindelser accelerer den tidlige styrkeudvikling, men giver lavere slutstyrker. Et eventuelt flyveaskeindhold giver høje slutstyrker, sædvanligvis fra 28 døgn og fremefter. Øget finhed giver højere tidlige styrker, mens slutstyrkerne kun øges forholdsvis lidt.

Lagringsforholdene, som cementen udsættes for, inden den tages i brug, kan få betydning for cementens egenskaber. Ved længere tids påvirkning af en vand- og kuldioxidholdig luft, vil der kunne ske overfladehydratisering og -karbonatisering.

Disse ændringer kan give anledning til unormale afbindingsforhold og langsommere styrkeudvikling.

Uhensigtsmæssige lagringsforhold kan forårsage en afvanding af gipsen med falsk afbinding til følge.



Figur 19. Grafisk afbildning af den relative varighed for opnåelse af en bestemt hærtningsgrad eller modenhed ved en given temperatur. Basis 20°C.

Afbildningen kan bruges til vurdering af afbindingens, styrkeudviklingens og modenhedens forløb under den aktuelle temperatur.

Eksempel: En mørtels slutafbindingstid er ved 20°C målt til 4 timer. Er mørtelens temperatur i stedet 10°C, kan slutafbindingstiden beregnes til $4 \cdot 1,9 = 7,6$ timer. Ved 30°C beregnes slutafbindingstiden til $4 \cdot 0,6 = 2,4$ timer.

Temperaturen har en væsentlig indflydelse på omsætnings hastigheden mellem cement og vand. Man kan groft regne med, at en forøgelse af blandingens temperatur på 10°C vil give en fordobling af reaktionshastigheden. En noget nøjagtigere vurdering af temperaturens indflydelse fås ved brug af figur 19.

V/c-forholdet, dvs. vægtforholdet vand/cement, spiller en afgørende rolle for et cementbundet produkts styrkeudvikling og slutstyrkeniveau.

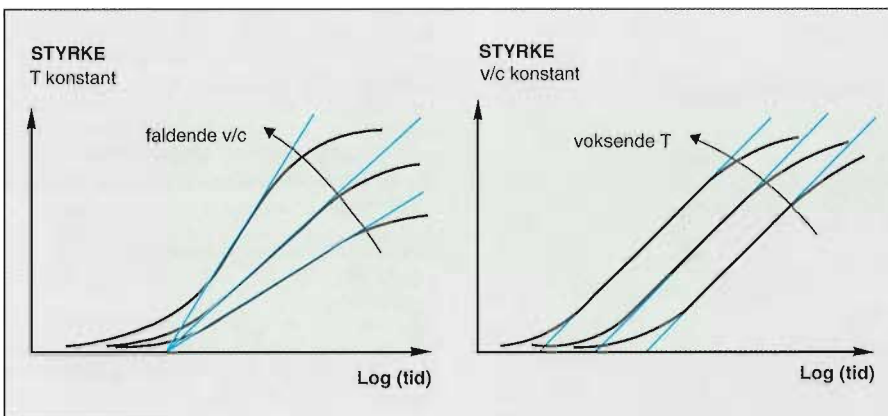
Figur 20 viser det kvalitative forløb af styrkeudviklingen for cementpasta i afhængighed af v/c-forholdet. For konstant temperatur vil hældningen af styrkeudviklingskurven øges med aftagende v/c-forhold.

Cement er under normale forhold i stand til at binde en vandmængde svarende til ca. 40% af cementvægten til en fast struktur. Vandmængder ud over denne, der svarer til v/c = 0,4, vil derfor uvægerligt betyde øget porøsitet i pastaen og en dermed forbundet styrkereduktion. Det vil således i styrkemæssig henseende være en fordel at holde v/c-forholdet så lavt som muligt.

Tilsætningsstoffer kan inddeles i to hovedgrupper: 1) de kemisk virkende, der fortrinsvis påvirker de kemiske omsætninger mellem cement og vand, og 2) de fysisk virkende, der fortrinsvis påvirker betonens fysiske egenskaber. De fysisk virkende anvendes til at etablere blivende ændringer i systemet (re-

duktion af v/c-forholdet eller indblanding af luft) og herigennem påvirke de opnåelige slutstyrkeniveauer. De kemisk virkende anvendes til accelerering eller retardering af omsætningen mellem cement og vand og vil derfor på afgørende vis ændre styrkeudviklingsforløbet i dets tidlige fase, hvorimod de sene styrkeniveauer kun påvirkes i mindre grad. Afvigelser herfra kan dog forekomme.

Betonstyrker. Tabel 6 viser typiske trykstyrker for beton fremstillet med danske cements. Da betonsammensætningen er holdt konstant, vil de forskelle, der registreres i tabellen, være en konsekvens af forskelle i cementernes kemiske sammensætning og finhed. Hvor der er krav om nøjagtigt kendskab til styrken, er det nødvendigt selv at udføre forsøg med de materialer, man har til rådighed og under de betingelser, man skal arbejde.



Figur 20. Karakteristisk forløb af styrkeudvikling. Til venstre: Varieret v/c-forhold. Til højre: Varieret temperatur T.

Cementnavn	Omtrentlige betonstyrker [MN/m ²] v/c = 0,45 Cylindriske prøvelegemer med højde: diameter-forhold 1:2. Vandlagret ved 20°C.			
	1 døgn	2 døgn	7 døgn	28 døgn
BASIS® cement	22	30	41	50
RAPID® cement	17	27	41	50
HVID cement	17	24	38	50
LAVALKALI SULFATBESTANDIG cement	7	12	25	40
ABC cement	17	27	43	55

Tabel 6. De i tabellen anførte betontrykstyrker må kun betragtes som vejledende. Styrketallene er ikke minimumsværdier, men typiske omtrentlige værdier, hvorfor udsving i både op- og nedadgående retning kan forventes afhængig af betonsammensætninger, materialetyper, materialevariationer, arbejds- og prøvningsudførelse mv.

Varmeudvikling

Reaktionerne mellem cementens komponenter og vand er alle ledsaget af varmeudvikling. Denne varmeudvikling kan være en fordel eller ulempe ved betonfremstilling alt efter omstændighederne. Fordelene er alle afledt af, at en øget temperatur af betonen som følge af varmeudviklingen vil give anledning til en større reaktionshastighed for hydratiseringsprocesserne. Denne selvforstærkende effekt er gunstig ved støbning ved lav temperatur og i øvrigt, hvor tidsfaktoren spiller en væsentlig rolle, f.eks. ved industriel betonfremstilling. Hydratiseringsvarmen kan dog også give anledning til problemer f.eks. ved massive betonkonstruktioner, hvor den udviklede varme har vanskeligt ved at slippe bort.

Temperaturforskelle mellem de ydre og indre dele af betonen kan under disse forhold medføre revnedannelser som følge af de spændinger, som temperaturdeformationer giver. Praktiske forhold vedrørende varmeudvikling er beskrevet i f.eks. [8].

Temperaturforskelle vil desuden forårsage tilsvarende forskelle i vanddamptryk. Konsekvensen heraf vil være en diffusion af vanddamp fra de indre, varmere dele til de ydre, koldere dele af betonkonstruktionen. Især ved lave v/c-forhold kan dette betyde en væsentlig reduktion af slutstyrken, idet de indre dele af konstruktionen mister det vand, der skulle medgå til hydratiseringsprocesserne. Varmeudviklingsforløbet vil bl.a. være afhængig af følgende faktorer:

- Cementens kemiske sammensætning.
- Cementens finhed.
- Cementens lagringsforhold.
- Temperaturen.
- V/c-forholdet.
- Tilsætningsstoffer.

Cementens kemiske sammensætning har væsentlig indflydelse på varmeudviklingsforløbet. Specielt C₃A's hydratisering giver anledning til en hurtig varmeudvikling, mens C₃S giver anledning til en betydelig, men knap så hurtig varmeudvikling. For C₂S's og C₄AF's vedkommende er varmeudviklingen betydelig lavere.

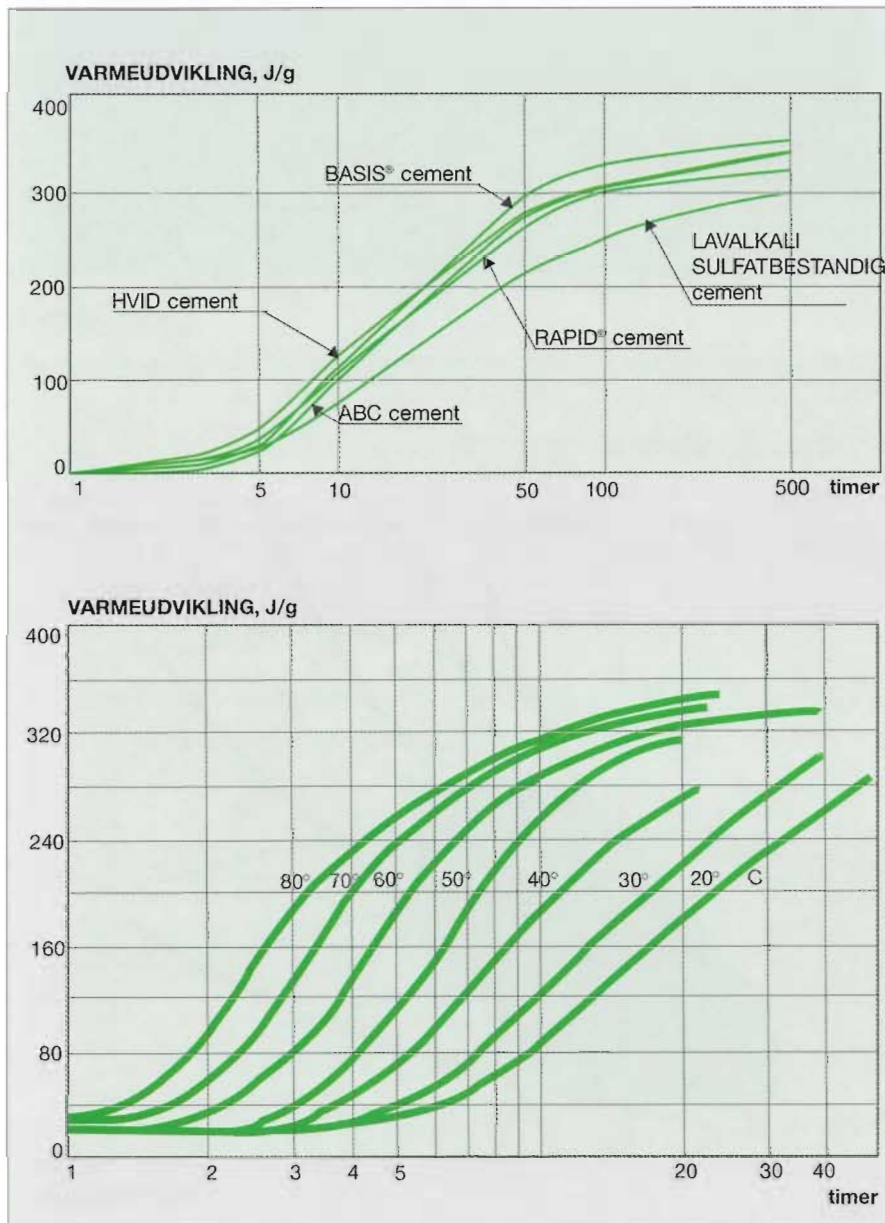
Ved fremstilling af de såkaldte lavvarmecementer sørger man derfor for at holde indholdet af C₃A og C₃S lavt, således at indholdet af C₂S og C₄AF bliver tilsvarende højt. Derved fås en cementtype med såvel langsommere varmeudvikling som lavere totalvarme. Cementernes totale varmeudvikling kan overslagsmæssigt beregnes som anført i eksempel 1. I eksempel 3 er vist hvordan temperaturstigningen i en stor, massiv betonkonstruktion overslagsmæssigt kan beregnes. Forhold vedrørende hærdningstemperaturer er beskrevet mere udførligt i f.eks. [8].

Øget finhed af cementen vil øge reaktionshastigheden for hydratiseringsprocesserne og dermed varmeudviklingshastigheden. Figur 21 viser karakteristiske adiabatisk varmeudviklingsforløb for nogle danske cementtyper med forskellig finhed og kemisk sammensætning. Cementernes aktuelle varmeudviklingsforløb kan fremover findes på Aalborg Portlands hjemmeside.

De betingelser, cementen udsættes for under formaling og lagring, kan som tidligere nævnt være indirekte årsag til unormale afbindingsforløb. Den varmeudvikling, der er forbundet

med falsk afbinding og lynafbinding, vil derfor også kunne afspejle, at der sker en unormal reaktion. Se afsnittet »Afbinding«.

Tilsætningsstoffer vil normalt kun have indflydelse på varmeudviklingen i det omfang, de griber ind i de kemiske reaktioner mellem cement og vand. Acceleratorer vil altså fremskynde, og retardere vil forsinke varmeudviklingen. Effekten af plastificeringsstoffer vil, såfremt de virker retarderende, kunne udledes af det ovenstående. Udnyttes de til reduktion af v/c-forholdet, vil en evt. effekt heraf på varmeudviklingen afhænge af v/c-forholdet.



Figur 21. Varmeudviklingen i Joule pr. gram cement. Øverst: Danske cementers adiabatiske varmeudvikling, der er typiske forløb. Nederst: Temperaturen indflydelse på RAPID[®] cements isoterme varmeudvikling (cementpasta med v/c = 0,4).

Volumenændringer

Volumenændringer, der kan registreres i cementpasta og dermed i beton, skyldes kemiske eller fysisk-kemiske reaktioner i cementpastaen. Dette er omtalt mere udførligt i f.eks. [9]. Volumenændringerne kan hovedsagelig føres tilbage til følgende grundtyper:

Ekspansion

- Ettringitekspansion
- Kalkekspansion
- Magnesiumekspansion
- Alkalikiselekspansion

Svind

- Kemisk svind
- Udtørringssvind
- Karbonatiseringssvind

Ekspansion

De reaktionsprodukter, hvis dannelse eventuelt kan forårsage ekspansioner i cementpasta, er ettringit, calciumhydroxid, magnesiumhydroxid og alkalikiselgel. Generelt for de ekspansionsgivende processer er, at de kun er skadelige, hvis de sker i den hærdnede pasta, idet de i så fald kan give anledning til revnedannelse.

Ettringitdannelsen vil som nævnt ske i den tidligste fase, hvor pastaen er i stand til at ekspandere. Den vil ophøre, når sulfationer fra den tilsatte gips er brugt op. For at undgå, at ettringitdannelsen skal fortsætte for længe efter, at afbindingen er indtrådt, tilsætter man ikke mere gips end nødvendigt for styring af afbindingsforløbet. DS 427:1995 sætter det maksimale indhold af SO₃ til 3,5% for cementstyrkeklasse 42,5 og til 4,0% for styrkeklasserne 42,5R 52,5 og 52,5R. Normalt er ettringitdannelse kun skadelig, når der kan blive tale om optagelse af sulfationer fra omgivelserne, dvs. specielt ved betonkonstruktioner, der har kontakt med havvand, eller andet sulfatholdigt vand.

Her vil ettringitdannelse kunne forårsage revnedannelser i betonen. I konstruktioner, hvor sulfatangreb ikke kan udelukkes, kan man anvende LAVALKALI SULFATBESTANDIG cement, hvis meget lave C₃A-indhold giver en større sulfatbestandighed end de almindelige cementer.

Fri kalk (CaO) vil normalt reagere med vand, mens pastaen endnu er plastisk. For at hindre ekspansioner på grund af fri kalk er der i DS 427 medtaget et krav til volumenstabiliteten, der bedømmes ved le Chatelier's prøvningsmetode.

Magnesiumoxid (MgO) reagerer meget langsomt under dannelse af ekspanderende magnesiumhydroxid (Mg(OH)₂). De ydre tegn, revnedannelserne, opstår derfor først efter adskillige måneder. For at undgå skader af denne art, er der i DS 427:1995 for cementklinker sat en øvre grænse på 5% for indholdet af MgO.

Reaktivt kisel (f.eks. opal, porøs flint og andet amorf SiO₂) i beton eller mørtel kan give ekspansion. Kisel af denne art vil kunne reagere med alkaliforbindelser fra cementen eller alkaliforbindelser tilført udefra under dannelse af alkaliskilicagel, som ved fugtoptagelse vil kunne forårsage sprængninger i betonen (»alkalikiselreaktioner«). Hvis man har reaktivt kisel i tilslaget, og man ønsker at sikre sig mod alkalikiselreaktioner, er det tilrådeligt at anvende cement med et lavt alkaliindhold.

Svind

Kemiske svind er en direkte følge af hydratiseringen. Fuld hydratisering af 100 g cement medfører en rumfangskontraktion på 6 cm³ eller ca. 8,5% af udgangsrumfanget. Denne rumfangskontraktion resulterer i dannelsen af en porøs struktur, hvorimod der ikke sker nogen væsentlig reduktion af de ydre dimensioner.

Porøsitetsforholdene for fuldstændig hydratiseret cementpasta ved v/c-forhold op til 1,5 kan aflæses i figur 22. Det fremgår heraf, at porøsiteten (kapillarvand + luftporer) stiger kraftigt med stigende v/c-forhold, specielt når v/c-forholdet 0,4 er passeret. Ved v/c-forhold større end 0,4 vil poresystemet bestå af kapillarporer indeholdende det uforbrugte vand, samt luftporer dannet ved faststofkontraktionen, der er en følge af hydratiseringen.

Ved v/c-forhold under 0,4 vil reaktionerne standse, når vandet er brugt op (selvudtørring), og der vil altså være uhydratiseret cement tilbage i systemet. Såfremt de porer, der dannes ved kontraktion, fyldes med vand, kan en del af den tilbageværende uhydratiserede cement hydratisere. Under disse betingelser vil grænse v/c-forholdet for total hydratisering af cementer derfor være lidt lavere end 0,4 (ca. 0,36). I praksis kan man kun opnå efterfyldning af porer i meget små emner.

Udtørringssvind. Denne type volumenændring er den mest kendte, fordi den ved sædvanlig betonpraksis ofte volder problemer. Der er tale om dimensionsændringer, som cementpastaen i praksis altid vil undergå, og som man derfor bør tage hensyn til ved konstruktionsudformning og dimensionering. Udtørringssvindet skyldes afgivelse af kapillar- og gelvand til omgivelserne, hvorved cementpastaen trækker sig sammen (svinder). Det er derfor klart, at svindets størrelse primært må afhænge af mængden af gel- og kapillarvand, og det vil i realiteten sige cementmængde, puzolanindhold, v/c-forhold og hydratiseringsgrad. Transporthastigheden af vand til omgivelserne vil ligeledes være af betydning, og den afhænger bl.a. af luftens relative fugtighed, vindhastigheden, samt konstruktionens størrelse og overfladeareal. Størrelsesordenen af udtørringssvindet i beton og mørtel i afhængighed af cementindhold og v/c-forhold kan aflæses af figur 23. Svindmålingerne er foretaget på prismer (100 x 100 x 400 mm) vandlagret i 7 døgn og derefter udtørret ved 50% relativ luftfugtighed. Cementegenskaber såsom kemisk sammensætning og formalingsgrad har kun sekundær indflydelse på udtørringssvindet. Tilsætningsstoffer kan få indflydelse på svindets størrelse, dels direkte, dels indirekte. Direkte ved at ændre strukturen af den dannede gel. Indirekte ved at skabe mulighed for ændring af betonsammensætningen, dvs. ændring af vandindhold eller cementindhold. F.eks. vil acceleratoren calciumchlorid (CaCl₂) kunne øge svindet 10-15% på doseringer ved 1,5-2%. Forhold vedrørende udtørringssvind er omtalt i f.eks. [10]

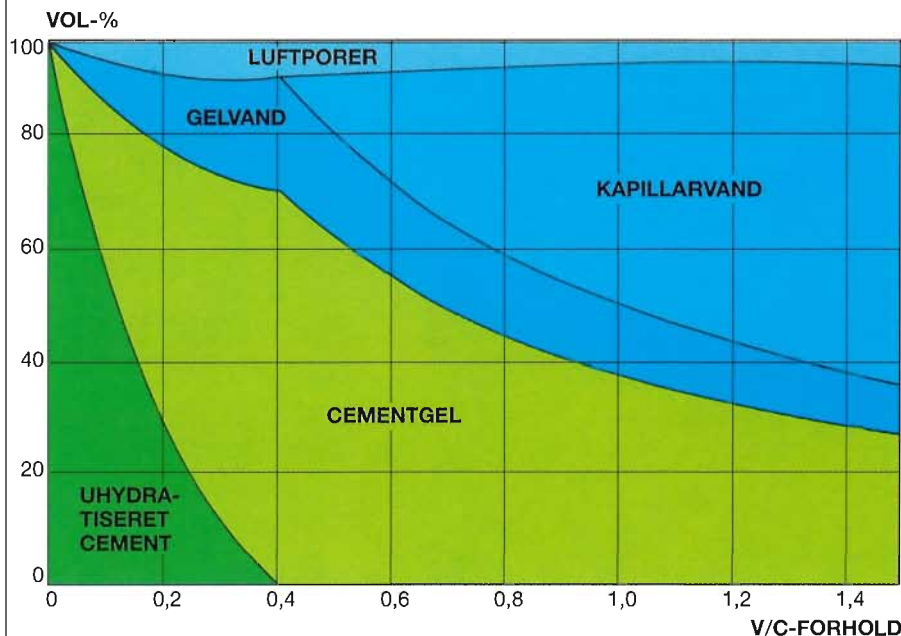
Karbonatiseringssvind forekommer i cementpasta eller beton under eller efter en udtørringsperiode. Det er en følge af kemiske reaktioner mellem cements hydratiseringsprodukter og luftens kuldioxid. Det samlede svind vil derfor kunne være væsentligt større ved lagring i kuldioxidholdig luft end ved lag-

ring i en kuldioxidfri luft med samme relative luftfugtighed.

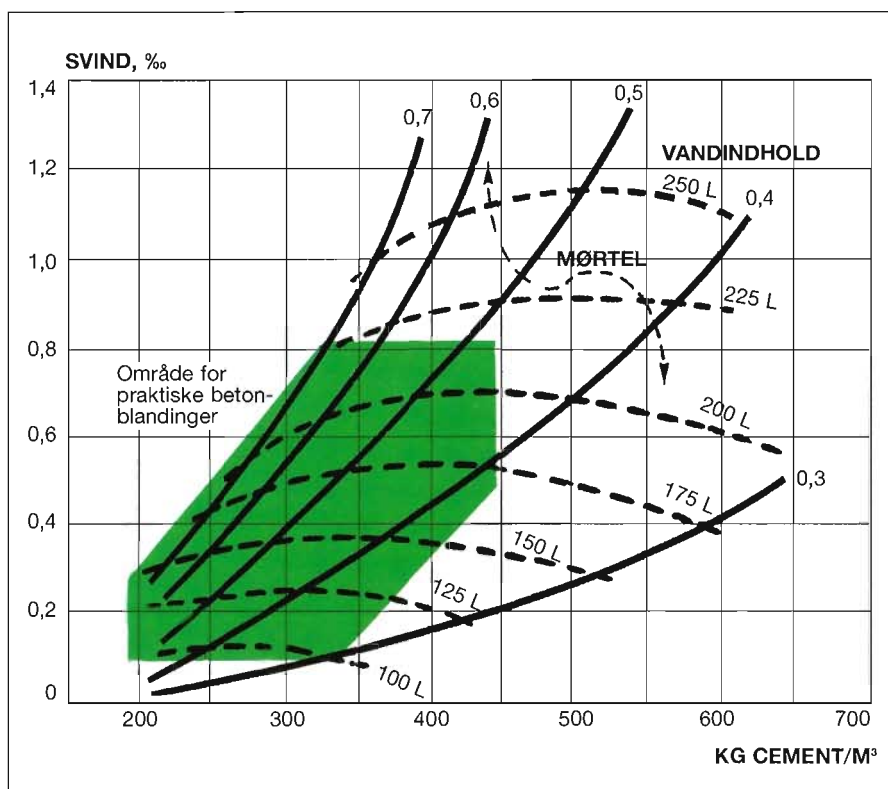
Almindelig beton er normalt så tæt, at kun et tyndt overfladelag bliver karbonatiseret, hvorfor karbonatiseringssvindet under disse forhold er uden praktisk betydning. I letklinkerbeton, hvor atmosfærens luft har let adgang til hele tværsnittet, finder en gen-

nemkarbonatisering relativt hurtigt sted. Karbonatiseringssvindet er her af samme størrelsesorden som udtørringssvindet.

Med kendskab til en cements kemiske sammensætning kan en betons egenskaber overordnet vurderes mht. styrke- og varmeudvikling samt holdbarhedsegenskaber, jf. eksempel 4.



Figur 22. Sammensætningen af fuldstændigt hydratiseret cementpasta som funktion af v/c-forholdet.



Figur 23. Totalt svind af mørtel og beton som funktion af cementindhold pr. m³ beton og v/c-forhold. Svindmålingerne er foretaget på prismer 100 · 100 · 400 mm, der er vandlagret i 7 døgn og derefter udtørret ved 50% relativ fugtighed. Det grønne felt er området for praktiske betonblandinger.

Eksempel 3: Betonens varmeudvikling

Der skal udføres en betonkonstruktion med dimensionerne $b \cdot l \cdot h = 2,0 \cdot 2,5 \cdot 5,0$ m.

Der er stillet nedenstående krav til betonkonstruktionen.

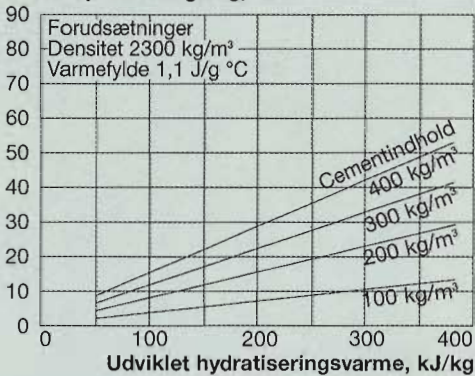
Holdbarhed: Revnefri overflade, holdbar over for saltsprøjt fra vejbane og over for frost-tøpåvirkninger.

Pga. tørsaltingen og frost-tøpåvirkningen henregnes betonen til aggressiv miljøklasse i henhold til DS 481. Dette indebærer, at der er en lang række krav til bl.a. betonens delmaterialer, betonsammensætningen og betonarbejdets udførelse, hvilket skal sikre betonen tilfredsstillende holdbarhed. Fra betonleverandøren er det bl.a. oplyst at betonen, som ønskes anvendt har et cementindhold på 400 kg/m^3 . På grund af konstruktionens dimensioner vil varmeudviklingen ved cementens hydratisering kunne føre til høje temperaturer.

En vurdering af temperaturstigningen kan fås af nedenstående figur til venstre, hvis man som indgang vælger 80% af den totale varmeudvikling for 2 cementser med varmeudviklinger på hhv. ca. 320 J/g og ca. 336 J/g .

Man ser, at temperaturstigningen bliver henholdsvis 45°C og 48°C , når man forudsætter adiabatisk forhold. Disse temperaturer i konstruktionens indre er ikke skadelige. Bliver overfladerne derimod relativt meget afkølede i forhold til konstruktionens indre, kan der opstå store temperaturforskelle, som kan give revner i overfladen. For at undgå dette skal overfladerne isoleres passende, jf. [8]. Man ser af figuren til højre, at temperaturstigningen øges væsentligt, når man anvender let konstruktionsbeton. Se også Beton-Teknik 6/15/1989, Hærdeteknologi.

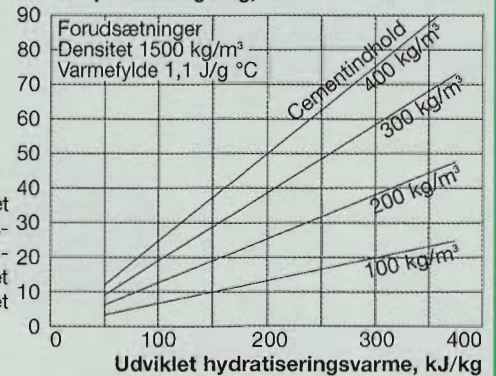
Temperaturstigning, $^\circ\text{C}$



Temperaturstigning betinget af cementens hydratiseringsvarme ved adiabatisk hærdning (uden varmetab) af normalbeton.

Temperaturstigning betinget af cementens hydratiseringsvarme ved adiabatisk hærdning (uden varmetab) af let konstruktionsbeton densitet 1500 kg/m^3 .

Temperaturstigning, $^\circ\text{C}$



Eksempel 4: Beregning og vurdering af cementsammensætning

Til et betonarbejde skal man anvende cement, hvis egenskaber man ikke har kendskab til fra tidligere praksis. Der foreligger oplysning om, at cementen ikke er tilsat flyveaske, slagge eller lignende.

En måling af finheden og kemisk analyse af cementen giver følgende resultat:

Blaine: $330 \text{ m}^2/\text{kg}$

$\text{SiO}_2 = 24,8\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,70\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2,57\%$, $\text{CaO} = 65,3\%$, $\text{MgO} = 0,93\%$, $\text{SO}_3 = 1,89\%$, fri $\text{CaO} = 0,51\%$, $\text{K}_2\text{O} = 0,32\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 0,27\%$.

Omtrentlige mineralogiske sammensætning

Ved anvendelse af Bogue's formler, som er anført i eksempel 2, får man følgende mineralsammensætning:

$$\text{C}_3\text{S} = 4,07 \cdot 65,3 - (7,60 \cdot 24,8 + 6,72 \cdot 2,70 + 1,43 \cdot 2,57 + 2,85 \cdot 1,89 + 4,07 \cdot 0,51)\% = 48,0\%$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2,87 \cdot 24,8 - 0,754 \cdot 48,0\% = 35,0\%$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2,65 \cdot 2,70 - 1,69 \cdot 2,57\% = 2,8\%$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3,04 \cdot 2,57\% = 7,8\%$$

$$\text{Gips} = 1,70 \cdot 1,89\% = 3,2\%$$

$$\text{Na}_2\text{O-ækv.} = 0,27 + 0,658 \cdot 0,32\% = 0,48\%$$

$$\text{Fri CaO} = 0,5\%$$

$$\text{MgO} = 0,9\%$$

Alkaliindholdet ($\text{Na}_2\text{O-ækv.}$) er beregnet efter formlen i afsnittet »Alkaliforbindelser«.

Styrkeegenskaber

Hvis man sammenligner med mineralsammensætningen, der er anført i tabel 3, ser man at:

C_3S -indholdet er lavt C_2S -indholdet er højt C_3A -indholdet er lavt

Da C_3S - og C_3A -indholdet er lavt vil cementen give lave tidlige styrker, mens det høje C_2S -indhold vil give høje sene styrker.

Varmeudvikling

Da indholdet af C_3S og specielt indholdet af C_3A er lavt, vil den tidlige varmeudvikling være lav. Da finheden er relativt lav, giver den ikke anledning til væsentlig øget reaktionshastighed.

Varmeudviklingen ved fuldstændig hydratisering er: $500 \cdot 0,48 + 260 \cdot 0,35 + 900 \cdot 0,028 + 300 \cdot 0,078 \text{ J/g} = 380 \text{ J/g}$.

Varmeudviklingsstallene for klinkerminerallerne er fra figur 10-13.

Holdbarhedsegenskaber

Da C_3A -indholdet er lavt, er cementen mere bestandig over for sulfatangreb end almindelig portlandcement.

Da indholdet af alkaliforbindelser beregnet som $\text{Na}_2\text{O-ækvivalent}$ er lavt, er risikoen for skadelige alkaliske reaktioner ringe.

Da indholdet af henholdsvis gips, fri kalk og magnesium er lavt, vil der kun være ringe risiko for reaktioner, der kan føre til skadelige ekspansioner.

Cements indhold af disse stoffer er omtalt i afsnittet: »Kemisk sammensætning«.



Litteratur

- [1] Czerning, Wolfgang: »Zementchemie für Bauingenieure«, Wiesbaden, Bauverlag GmbH, 1964, 2. rev. udg.

Engelsk udgave af samme bog:
»Cement chemistry and physics for civil engineers«. London, Crosby Lockwood & Son Ltd., 1962.

Svensk udgave:
»Cementkemi för Byggare«. Oversat af Per S. Hakanson, Malmö, Svenska Cementföreningen, 1969.
- [2] Lea, F M. og Desch, C H.: »The chemistry of cement and concrete«, London, Edward Arnold Ltd, 1970, 3. rev. udg.
- [3] Bogue, Robert Herman: »The chemistry of portland cement«, New York, Reinhold Publishing Corp., 1955.
- [4] Taylor, H. F W: »The chemistry of cements«, London and New York, Academic Press, 1965. Vol. I & II.
- [5] Brøndum-Nielsen, Troels: »Betonkonstruktioner«. I København, Polyteknisk Forlag, 1969.
- [6] Brunauer, S. og Copeland, L. E.: »The chemistry of concrete«, Scientific American, (1969), April.
- [7] Skalny, J. og Daugherty, K. E.: »Everything you always wanted to know about portland cement - but did not ask«. Chemtech., (1972): Januar
- [8] Beton-Teknik »Hærdeteknologi«, 6/15/1989.
- [9] Beton-Bogen, CtO, 2. udgave 1985.
- [10] Beton-Teknik »Efterbehandling af beton«, 6/14/1988.

A.D. 1824 NO 5022.

Artificial Stone.

ASPDIN'S SPECIFICATION.

TO ALL TO WHOM THESE PRESENTS SHALL COME, I, Joseph Aspdin, of Leeds, in the County of York, Bricklayer, send greeting. WHEREAS His present most Excellent Majesty King George the Fourth, by His Letters Patent under the Great Seal of Great Britain, bearing date at Westminster the Twenty-first day of October, in the fifth year of His reign, did, for Himself, His heirs and successors, give and grant unto me the said Joseph Aspdin, His especial licence, that I, the said Joseph Aspdin, my exors, admors, and assigns, should at any time agree with, and no others, from time to time and at all times during the term of years therein expressed, should and lawfully might make, use, exercise, and vend within England, Wales, and the Town of Berwick-upon-Tweed, my Invention of "AN IMPROVEMENT IN THE MODES OF PRODUCING AN ARTIFICIAL STONE;" in which said Letters Patent there is contained a proviso obliging me, the said Joseph Aspdin, by an instrument in writing under my hand and seal, particularly to describe and ascertain the nature of my said Invention, and in what manner the same is to be performed, and to cause the same to be performed, and to cause the same to be inrolled in His Majesty's High Court of Chancery within two calendar months next and immediately after the date of the said in part recited Letters Patent (as in and by the same), reference being thereunto had, will more fully and at large appear.

NOW KNOW YE, that in compliance with the said proviso, I, the said Joseph Aspdin, do hereby declare the nature of my said Invention, and the manner in which the same is to be performed, are particularly described and ascertained in the following description thereof (that is to say):-

Aspdin's Improvements in the Modes of Producing an Artificial Stone.

My method of making a cement or artificial stone for stuccoing buildings, waterworks, cisterns, or any other purpose to which it may be applicable (and which I call Portland

cement) is as follows:- I take a specific quantity of limestone, such as that generally used for making or repairing roads, and I take it from the roads after it is reduced to a puddle or powder; but if I cannot procure a sufficient quantity of the above from the roads, I obtain the limestone itself, and I cause the puddle or powder, or the limestone, as the case may be, to be calcined. I then take a specific quantity of argillaceous earth or clay, and mix them with water to a state approaching impalpability, either by manual labour or machinery. After this proceeding I put the above mixture into a slip pan for evaporation, either by the heat of the sun or by submitting it to the action of fire or steam conveyed in flues or pipes under or near the pan till the water is entirely evaporated. Then I break the said mixture into suitable lumps, and calcine them in a furnace similar to a lime kiln till the carbonic acid is entirely expelled. The mixture so calcined is to be ground, beat, or rolled to a fine powder, and is then in a fit state for making cement or artificial stone. This powder is to be mixed with a sufficient quantity of water to bring it into the consistency of mortar, and thus applied to the purposes wanted.

In witness whereof, I, the said Joseph Aspdin, have hereunto set my hand and seal, this Fifteenth day of December, in the year of our Lord One thousand eight hundred and twenty-four.

JOSEPH (L.S.) ASPDIN.

AND BE IT REMEMBERED, that on the Fifteenth day of December, in the year of our Lord 1824, the aforesaid Joseph Aspdin came before our said Lord the King in His Chancery, and acknowledged the Specification aforesaid, and all and every thing therein contained and specified, in form above written. And also the Specification aforesaid was stamped according to the tenor of the Statute made for that purpose. Inrolled the Eighteenth day of December, in the year of our Lord One thousand eight hundred and twenty-four.

DUNNING, EXTRA.

© Løssalgspris kr 50,- inkl. moms.

CtO Cementfabrikkernes
tekniske Oplysningskontor
Rørdalsvej 44
Postboks 165
9100 Aalborg
Telf. 98 16 77 77

**AALBORG
PORTLAND**

