

SILIKATBYGNINGSMATERIALER

Anders Nielsen

**Laboratoriet for Bygningsmaterialer
Danmarks Tekniske Højskole
Lyngby**

Januar 1993

Anders Nielsen
Silikatbygningsmaterialer
3. gennemsete oplag
Januar 1993. AN:sl
LBM, DTH, TR 275/93
erstatte TR 173/87
ISSN 0907-7073
Copyright: Forfatteren
Forsidevignet: Tobermoritkrystaller
i overfladen af boble i gasbeton,
fabrikat Hvid Ytong. Billedets
højde 8 cm. AN, LTH, 1971
Tryk: **Dansk SystemTryk a.s**

Resumé

Notat beregnet som kompendium ved kurset Grundlæggende Bygningsmateriallære for civilingeniører. Inddeling og terminologi behandles. Uorganiske bindemidlers virkemåde og produktion og egenskaber for tegl, gasbeton, letklinkerbeton og kalksandsten beskrives.

FORORD

Det foreliggende notat om silikatbygningsmaterialer er skrevet i 1987 til brug ved kurset 6101, "Grundlæggende Bygningsmateriallære", ved DTH. Det er skrevet på basis af et notat fra DIA-B, "tegl, gasbeton og andre silikatbygningsmaterialer" udgivet 1977. DIA-B-notatet var baseret på kompendiemateriale udgivet ved Lunds Tekniska Högskola i 1965.

Den foreliggende 3. udgave er gennemset, og der er indført enkelte opdateringer. Tidligere udgaver af bogen kan stadig bruges i kurset.

Da der kun er tre forelæsninger til rådighed i 6101 til dette store stofområde, er den foreliggende fremstilling ret kortfattet. Den videbegærlige læser anbefales at fortsætte med de i litteraturlisten optagne bøger.

Anders Nielsen

INDHOLD

	Side
INDLEDNING	1
Normer og kontrolordninger	1
Inddeling og terminologi	3
TEGL	7
UORGANISKE BINDEMIDLER	22
LETBETON, OVERSIGT	32
GASBETON	33
LETKLINKERBETON	40
KALKSANDSTEN	43
MURVÆRK	45
LITTERATUR	46

INDLEDNING

Et igangsætningsafsnit, som omtaler nogle af de officielle papirer, som bygningsingeniører kommer i kontakt med ved tegnestuearbejdet, samt indfører en materialeinddeling, som er praktisk at kunne ved bedømmelse af silikatmaterialers potentielle egenskaber.

NORMER OG KONTROLORDNINGER

I Dansk Ingeniørforenings normer for bygningskonstruktioner er, på basis af praktiske erfaringer og ud fra arbejdet i forskningslaboratorierne, opstillet regler for, hvorledes bygværker skal konstrueres og udføres, for at man kan få en bestemt sikkerhed mod brud, og for at man kan få en rimelig sikkerhed for, at bygværket bliver stående i en rimelig lang tid i sit miljø.

Det her foreliggende forelæsningsnotat er skrevet med tanke på at give læseren en materialemæssig baggrund for at forstå de krav, der er opstillet i en del af DIF's bygningstekniske normer. I tabel 1 er givet en liste over bygningsrelevante normer og prøvemethoder. Skrifterne udgives af Dansk Standardiseringsråd med DS-nummer.

For at fremme en sikker anvendelse af de mange forskellige byggematerialer og produkter er der efterhånden på initiativ af fabrikanterne, forbrugerne eller Boligministeriet oprettet en række godkendelses- og kontrolordninger for byggevarer /19/.

En *godkendelsesordning* har til formål at sikre, at de materialer, der bliver godkendt, opfylder enten bygningsreglementerne, stærkstrømsreglementet eller lovene om installationer af gas, vand og afløb.

En *kontrolordning* har til formål at medvirke til, at produktionen i de tilsluttede virksomheder foregår under betryggende kontrol, og at produkterne er i overensstemmelse med danske normer og forskrifter.

En *DS-certificering* af et materiale udsiger, at et certificeret materiale er i overensstemmelse med DS, og at firmaet selv udøver en rimelig kontrol af kravene.

Tabel 1. Vigtige bygningsrelevante standarder

DS/R 400.2	Betonvarer. Generelle krav og prøvningsmetoder samt vurdering af kvalitet
DS/R 400.5.0	Betonvarer. Byggeblokke og betontagsten (prøvningsmetoder)
DS/R 400.5.2	Betonvarer. Byggeblokke af letklinkerbeton
DS 401	Sand-, grus- og stenmaterialer (norm)
DS 404	Sand-, grus- og stenmaterialer (nomenklatur)
DS 405	Sand-, grus- og stenmaterialer (prøvningsmetoder)
DS 406	Lette tilslagsmaterialer (norm)
DS 409	Sikkerhedsbestemmelser for konstruktioner (norm)
DS 410	Last på konstruktioner (norm)
DS 411	Betonkonstruktioner (norm)
DS 412	Stålkonstruktioner (norm)
DS 414	Murværkskonstruktioner (norm)
DS 415	Fundering (norm)
DS 420	Letbetonkonstruktioner af letbetonelementer (norm)
DS 423	Betonprøvning (prøvningsmetoder)
DS 424	Murcement (norm)
DS 427	Portlandcement og portlandflyveaskecement (norm)
DS 433	Letbeton uden tilslag (prøvningsmetoder)
DS 434	Letbeton med porøse tilslag (prøvningsmetoder)
DS 438	Blokke, mursten (prøvningsmetoder)
DS 1050	Anvendelse af tolerancer i byggeriet
DS 1051.1	Brandprøvning
DS 2082	Armeringsstål (prøvning af forankringsevne)
DS 10110	Metalprøvning, trækprøvning
DS 10111	Armeringsståls trækarbejdslinie
DS 13080	Armeringsstål til jernbeton
DS 13081	Armeringsstål til forspændte konstruktioner
DS 13082	Svejste armeringsnet til jernbeton
DS/ISO 1461	Varmforzinkning (norm)
NP-154-R	Dansk Ingeniørforenings anvisning for korrosionsbeskyttelse af stålkonstruktioner
SS 14 23 33	Rostfritt stål - SS-stål 23 33, 9. udgave 1981
SS 14 23 43	Rostfritt stål - SS-stål 23 43, 9. udgave 1981

De kontrolordninger, som vedrører de i denne lærebog behandlede materialer, er nævnt i nedenstående tabel.

Kontrolordning	Logo	Kontrolordning	Logo
Fabriksbetonkontrollen		Letbetonkontrollen	
Betonvarekontrollen		Dansk Murstenskontrol	
Betonelementkontrollen		Dansk Mørtelkontrol	

I disse år foregår der et arbejde med omlægning til certificeringsordninger for de forskellige produktområder. Disse ordninger skal i de nærmeste år afløse kontrolordningerne.

INDELING OG TERMINOLOGI

Bygningsmaterialer kan efter kemisk sammensætning og struktur deles i

- metalliske,
- organiske og
- silikatmaterialer.

Den sidstnævnte gruppe omfatter uorganiske, ikke-metalliske materialer. Den kaldes *silikatmaterialer*, fordi langt de fleste materialer i denne gruppe indeholder SiO_2 som væsentlig bestanddel. Kalk- og gipsprodukter, som ikke indeholder SiO_2 , behandles her under samme overskrift, fordi der findes store ligheder i struktur og anvendelse mellem disse materialer og de øvrige i gruppen. Silikatbygningsmaterialerne kan inddeles som vist i tabel 2.

Under indtryk af udviklingen i Amerika inden for de uorganiske, ikke-metalliske materialer, som på engelsk-amerikansk kaldes "ceramics", har det været foreslået at indføre betegnelsen "keramer" eller "keramiske materialer" for disse materialer også på dansk. Dette er imidlertid ikke godt på grund af, at keramik på dansk traditionelt dækker over produkterne porcelæn og tegl, som kun er en del af det amerikanske "traditional ceramics". Ved et foredrag på DTH i 1972 blev det foreslået at anvende betegnelsen "keramika" om det materialeområde, som det engelsk-amerikanske "ceramics" dækker over, men ideen er ikke slået an.

Der forekommer tre hovedgrupper, *naturligt forekommende, sammensmeltede og sammenkittede materialer.*

Tabel 2. Silikatbygningsmaterialer inddelt efter fremstillingsmetoder

<u>Naturligt forekommende</u> Bjergarter Tilhuggede sten Knuste sten: skærver, stenmel Sedimenter Sten Sand Silt Ler
<u>Sammensmeltede</u> Glas Massivglas Skumglas Glasfiber Flyveaske Mikrosilica Keramik Finkeramik: Sanitetsporcelæn Grovkeramik: Fliser, tegl, letklinker (Leca)
<u>Sammenkittede</u> Kalk Kalkmørtel Puds Murværk Cement (portland-, aluminat- m.fl.) Cementmørtel Cementpuds Kalkcementmørtel Murværk Beton Damphærdede silikatprodukter Gasbeton Kalksandsten Silikalcit (silikatbeton) Gips Stukgips Gipsmørtel Gipsplader

De *naturligt forekommende* materialer omfatter bjergarter og sedimenter. Bjergarter anvendes i tilhugget form som byggesten eller belægningssten, i knust form som skærver til vejbygning eller beton. Sedimenterne anvendes som råmaterialer til de sammensmeltede materialer (ler til keramik) og til de sammenkittede materialer (grus til beton). Desuden anvendes de naturligt forekommende silikatmaterialer, d.v.s. jord, til at fundere bygværker på. Deres egenskaber ud fra dette aspekt behandles i geoteknikken.

Betegnelsen *sammensmeltede* materialer omfatter glas, som er fuldstændigt smeltet, og keramik, som er sintret, d.v.s. sammensmeltet i de punkter, hvor lerpartiklerne rører hinanden. Gruppen keramik er underinddelt i fin- og grovkeramik. Skillelinien er svær at trække. Sanitetsporcelæn og finere fliser hører til finkeramik, mens tegl, grovere fliser og ekspanderet ler hører til grovkeramik. Flyveaske fra kraftværkerne viser sig ved betragtning i mikroskop at bestå af glaskugler. Mikrosilica er et restprodukt fra produktion af ferrosilicium. Mikrosilica består af siliciumoxid, SiO_2 , i kugler med diameter af størrelsesordenen 100 nm, d.v.s. som partiklerne i cigaretrøg. Det anvendes som cementtilsætning.

De *sammenkittede* materialer er langt den største gruppe både med hensyn til produktudvalg og mængde. Sammenkitningen består i, at et pulver, f.eks. cement, sammen med vand danner en finkrystallinsk masse, som kan kitte større sten sammen. Det helt dominerende materiale i denne gruppe er portlandcementbeton. Murværk bestående af mørtel og sten hører også med til denne gruppe.

De materialer, som kan kittes sammen, er dels naturligt forekommende, dels keramiske materialer (teglsten), men også metalliske og organiske materialer kan indblandes. Det er dog kitmassen, som i væsentlig grad bestemmer egenskaberne, hvorfor disse sammenkittede materialer behandles i samme gruppe.

Årsagen til, at man inddeler efter struktur og fremstillingsmetode som vist i tabel 2, er, at et materiales placering i et sådant system kan sige noget om dets egenskaber. For eksempel har materialerne i gruppen "keramik" det fællestræk, at de består af forholdsvis grove lerpartikler og amorf smeltet masse. Denne struktur gør, at materialerne ikke har særlig stor tilbøjelighed til at tage vand op fra luften (ringe hygroskopicitet) og, at de har ringe svind.

I modsætning hertil har de sammenkittede materialer en struktur med en stor indre overflade. Heraf følger, at materialerne er stærkt hygroskopiske og generelt udviser større svind end keramikken.

I naturen bliver silikatmaterialerne dannet ved smeltning, udkrystallisering, mekanisk eller kemisk nedbrydning, og sammenpresning eller sammenkrystallisering. Man kan se menneskenes fremstilling af bygningsmaterialer som en efterligning eller videreførelse af de naturlige processer. Bygningsmaterialerne indgår i de geologiske kredsløb. De lovmæssigheder, som gælder for materialer i naturen, gælder også for materialer i bygninger. Geologisk viden kan blandt andet derfor være nyttig ved studiet af silikatbygningsmaterialerne og deres egenskaber.

I det følgende behandles tegl og bindemidlerne cement, kalk og gips samt letbeton, kalksandsten og mørtel. I den tidligere udgave af denne lærebog /15/ findes en kortfattet gennemgang af silikatmaterialernes kemiske opbygning, af overfladefænomener på pulvermaterialer og af fremstilling og anvendelse af glas.

TEGL

Tegl hører til i gruppen keramik. Ordet keramik kommer af græsk κεραμος, som betyder ler.

Tegl fremstilles af ler og sand, som æltes, formes og tørres, hvorefter det brændes ved temperaturer op til ca. 1000° C. Materialet har været benyttet i flere tusinde år og blev indført i Norden for ca. 800 år siden. Det ældste teglbygværk i Danmark er fra omkring år 1160.

Teglprodukterne i dag er mursten og tagsten i mange forskellige former og størrelser, drænrør, fliser til gulve og vægge samt letklinker. Letklinker er ærte- eller nødestore kugler af opblæret tegl, som anvendes som isoleringsmaterialer eller som tilslag i beton.

FREMSTILLING

Gennemgangen nedenfor af detaljerne i tegls fremstilling tjener til at forklare teglmaterialernes anvendelsesegenskaber.

Råmaterialer

I Danmark findes leraflejringer fra adskillige geologiske perioder; til tegl anvendes forekomster dels fra tertiærtiden, dels fra kvartærtiden (glacialt ler = istidsler, moræneler). Tabel 3 giver eksempler på kemiske analyser af rene mineraler og af naturligt forekommende lerbjergarters indhold heraf /8/.

Det viser sig ved sortering efter partikelstørrelse, at naturligt ler fortrinsvis indeholder mineraler efter følgende inddeling

Grove partikler	(> 20 µm): kvarts, glimmer, feldspat
Mellemfine partikler	(20-1.25 µm): kvarts, glimmer, feldspat, kalk, jernspat (= FeCO ₃)
Fine partikler	(< 1.25 µm): lermineraler og eventuelt jernhydroxyd

Komponent	Kemisk formel	Rene lermineraler			Naturligt forekommende ler				
		Feldspat (mikrolin)	Kaolinit	Glimmer (muskovit)	Bornholmsk kaolin	Klinker- ler	Blåler (mergeller)	Rødler	Glacial ler
Siliciumdioxid	SiO ₂	65	47	41	47	65	48	61	61
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃	18	39	41	38	22	12	19	15
Ferrioxid	Fe ₂ O ₃				1	2	5	7	6
Ferrooxid	FeO								1
Titanoxid	TiO ₂								1
Calciumoxid	CaO					1	15	1	2
Magnesiumoxid	MgO					1	2	1	1
Alkalier	Na ₂ O, K ₂ O	17		13	1	3	3	3	2
Svovltrioxid	SO ₃								1
Glødetab	org. stof,								
	H ₂ O CO ₂		14	5	13	5	5 10	8	12

Tabel 3. Eksempler på kemiske analyser af lermineraller og lerbjergarter.

Disse mineraler har højst forskellige smeltepunkter, spændende fra kalken på næsten 2600°C over kaolinit og kvarts mellem 1700 og 1800°C , jernhydroxyd omkring 1550°C , jernspat og glimmer ca. 1400°C til feldspat på knap 1300°C .

Vi vil først gøre os færdige med tre specielle lertyper og deraf fremstillede produkter.

Ildfast ler er særlig rigt på kaolin (højt Al_2O_3 indhold) og fattigt på kalk og på alkali- og jernforbindelser. Det forekommer på Bornholm og brændes bl.a. til chamottesten, der bruges til at udføre ovne og industriskorstene med.

Moler findes ved Limfjorden. Det består af mikroskopiske diatomé-skeletter (amorf kisel) og mindre mængder af bl.a. montmorillonit og kaolinit. Materialet brændes til lette og varmesolerende molersten. Knuste molersten kan bruges som kattegrus. Pulveriseret molersten kan anvendes i beton som "puzolan", der bl.a. modvirker skadelige alkalikiselreaktioner.

Plastisk ler forekommer bl.a. ved Lillebælt, på Røsnæs og i en formation ved Hinge nær Randers. Dets hovedbestanddel er montmorillonit, og det er meget finkornet og vandbindende. Det svinder stærkt ved udtørring. Dette materiale bruges til opblærede *letklinker*. Det æltede og peletterede ler brændes i en roterovn ved 1200 - 1400°C . Opblæringen sker i kraft af, at der udvikles luftarter i den smeltede, sejtflydende masse. Under rotationen trilles leret til nøddestore kugler, som indvendigt er fulde af indbyrdes adskilte luftblærer, men udvendigt omgivet af en ret tæt teglskorpe. Denne skorpe vil ved materialets anvendelse i nogen grad forhindre vandindtrængning. Efter afkøling og sortering anvendes klinkerne som tilslag til letbeton og som isoleringsmateriale, eksempelvis under terrændæk (gulve på jord). Der markedsføres to produkter i Danmark, Fibo- og Leca-klinker. Sidstnævnte er forkortelse for Light Expanded Clay Aggregate.

Hovedparten af dansk teglproduktion har almindelig moræneler som råstof. Dette istidsprodukt består hovedsagelig af kaolinit, men indeholder tillige noget illit. Det ældre, tertiære ler har mere montmorillonit i sig, men når det blandes med illit- og kaolinitholdige materialer, er også det velegnet til tegl.

Moræneleret er usorteret med grove og fine korn imellem hinanden, ofte med 15-30% under 2 μm . Hvis istidsmaterialet er aflejret som smeltevandsler, stiger procenten til omkring 50, hvilket også er brugbart til tegl. Man skelner mellem fedt ler med stor andel af fine partikler og magert ler, som er grovere.

Imellem disse yderpunkter findes et bredt brugbarhedsinterval, som man måske kan nå ved at tilsætte magringsmidler i form af sand eller knust teglmasse - eller man gør massen federe ved at blande renere ler deri.

I selve lergraven vil man ofte bemærke, at det øverste lerlag - lige under den afrømmede muldjord - er brunt, medens der herunder findes et lag gråblåt eller grønligt ler, det såkaldte blåler. I tidens løb er denne lagdeling opstået ved, at nedbøren har udvasket det øverste lag for opløselige bestanddele, fortrinsvis kalk (CaCO_3), som sidenhen er udfældet i det nederste lag. Til porerne i det øverste lag har luftens ilt fået adgang og har omdannet en del af jernforbindelserne deri til de rustfarvede jernilte (Fe_2O_3), som giver laget den kendte farve.

I almindelighed brændes det brune ler til røde teglsten og blåleret til gule teglsten. Blandingsfarver kan forekomme. Dersom masseforholdet (CaCO_3): (Fe_2O_3) er større end 3, er leret gulbrændende under almindelige forhold, ellers fortrinsvis rødbrændende.

Hvis man vil have gule mursten af rødbrændende ler, kan man tilsætte kalkpulver til råleret; det er imidlertid vanskeligt at få blandingen tilstrækkelig ensartet. I øvrigt iblander man undertiden farvestoffer såsom manganilte, der giver mokkafarvede mursten.

I råleret findes undertiden vandopløselige salte, som kan give grimme "udblomstringer" på det færdige murværk. Det er fortrinsvis sulfater af natrium og kalium, men også af kalcium og magnesium.

Leret kan indeholde planterester, som forkuller under brændingen. Tidligere blandede man undertiden savsmuld i leret; herved fik man et mere porøst og let materiale.

Bearbejdning

Leret transporteres til sumphuset, en stor lagerhal, hvor det aflæsses i vandrette lag. Sand iblandes lagvis. En lodret arbejdende spandkædemaskine afskræller det lagrede ler til et transportbånd. Proceduren skal tjene til at udjævne variationer i lerets sammensætning. Transportbåndet fører leret til bearbejdningsmaskiner. Her æltes og vales det og passerer en stenudskiller og et dampanlæg. Valsningen tjener bl.a. til at knuse eventuelle kalkkorn, som ellers kunne give "kalkspringere" i det brændte teglmateriale, når den brændte kalk, CaO , læsker sig med fugt fra omgivelserne og derunder udvider sig 20% efter rumfang. Damptilsætning øger formbarheden, og den højere temperatur fremmer til sin tid tørringen af det formede materiale.

Med passende vandindhold er lermassen så plastisk, at den kan bibringes en ønsket form, og stabil nok til at modstå udflydningstilbøjeligheden fra massens egen vægt.

Formning

Fra bearbejdningsmaskinerne fortsætter leret til formningen. Her kommer *strengpresningen* ind som den mest effektive metode til at fremstille masse gods såsom mursten: Leret presses af en snegl gennem et mundstykke, hvis format svarer til den færdige murstens tværsnit, med tillæg for svind under tørring og brænding. Mundstykket kan udskiftes til andre formater og til mangehulsten og hulblokke til etagedæk samt til vingetagsten. Lerstrengen afskæres med en ståltråd (osteskærerprincippet) til enkelte sten på et afskærebord. De endnu våde sten afsættes automatisk på hylder eller rammer, som siden køres ind i tørreanlægget.

Strengpressede produkter må nødvendigvis have en form, der kan beskrives af rette frembringere. Hullerne i hulblokke eller mangehulsten frembringes af dorne i mundstykket. Strengpressede mursten er meget glatte. For at bryde det kedelige udseende kan stenene præges eller oprives med koste umiddelbart efter udpresningen.

Håndstrøgne mursten fremstilles stadig på gammeldags måde ved at klaske det bløde ler ned i træforme. Stenene anvendes til restaureringsarbejder. Stenene får et meget facetteret udseende, fordi udpresningen foregår i flere retninger, luftbobler indespærres, og der afsættes karakteristiske mærker, når formen fjernes.

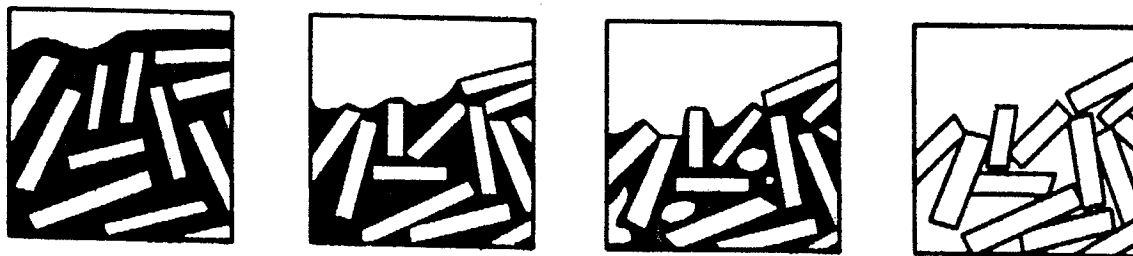
Den gammeldags teknik søges efterlignet maskinelt ved *blødstrygning*, hvor stenene formes ved, at leret sprøjtes ud i en form med løs bund. Efter komprimering stødes stenene ned på transportbåndet. Blødstrøgne sten er mere nuancerede i udseendet end strengpressede.

Noget mere tør kan lermassen være, når den *formpresses*. I en revolverpresse tildannes den rå lerkump mellem to formhalvdele; herved kan produceres produkter med mere indviklede former såsom falstagsten.

Ved at *tørpresse* halvtørt ler under stort tryk kan man lave eksempelvis Hasl gulvklinter, som har meget små måltolerancer. Man undgår nemlig herved de store dimensionsusikkerheder, der følger med det kraftige udtørningssvind, som ellers gør sig gældende i teglfremstillingen.

Tørring

Det formede ler skal tørres, så vandtørstofforholdet kommer ned på 5% eller mindre. Dette sker i løbet af 3-4 døgn i automatiske tørreanlæg, som udnytter spildvarme fra ovnanlægget. Automatikken sørger for at tilpasse den cirkulerende lufts temperatur og fugtighed sådan, at fugt til enhver tid fjernes fra leremnernes overflader med den største hastighed, som netop tillader vandet i lermassens indre at følge med. Automatikken tager hensyn til, at diffusionshastigheden vil ændre sig under udtørringen. Hvis nogle lerpartier tørrer for hurtigt ud i forhold til nabodelene, opstår der store svindforskelle med revnedannelse og kastning til følge.



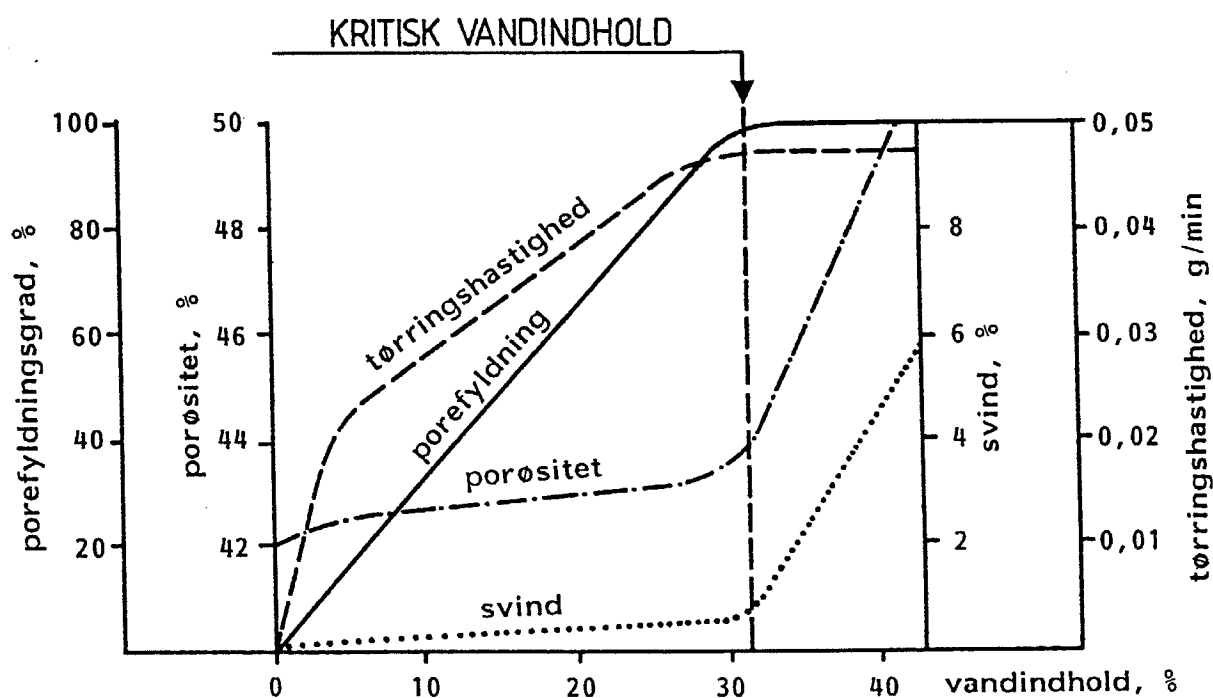
Figur 1. Tørring af ler med volumenformindskelse /8/.

Tørringssvindet kommer af, at vandfilmen omkring lerpartiklerne efterhånden som vandet forsvinder, trækker smådelene til indbyrdes berøring, således som skematisk antydnet på figur 1.

Når partiklerne nærmer sig hinanden, bliver de tiltrækkende kræfter (Van der Waals kræfter) mellem flagerne kraftigere, hvorved kohæsion og styrke øges.

Til at begynde med aftager emnets ydre rumfang lige så meget, som det fjernede vand fylder, men når de faste bestanddele efterhånden rører ved hinanden, danner de et fast skelet, som nu stort set beholder det ydre rumfang, selv om der fremdeles forsvinder fugt fra mellemrum imellem smådelene. Nu erstattes denne fugt med luft; det er omkring et "kritisk fugtindhold" på ca. 30%, at tørringssvindet holder op med at afhænge ret meget af emnets fugtindhold, se figur 2, som viser det lineære svind, porøsiteten og porefyldningsgraden i afhængighed af leremnets vandindhold.

Hos fedt ler kan tørringssvindet godt andrage 10-15% imod mindre end 7% hos magert ler. Når hertil kommer et vist brændingssvind, kan det være vanskeligt at fremstille teglprodukter med snæver måltolerance. De fleste værker kan

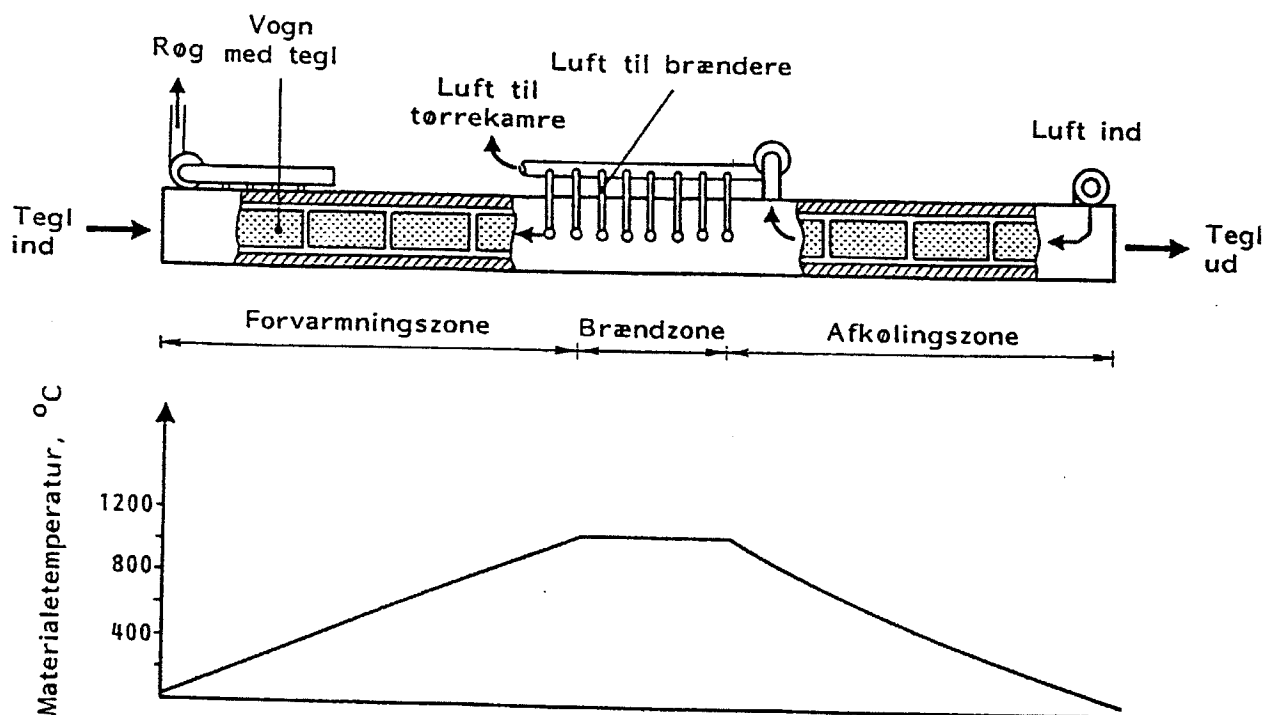


Figur 2. Sammenhæng mellem lerets vandindhold og porøsitet, porefyldningsgrad og lineært svind, efter /2/.

dog klare tolerancekravet til mursten af *normalformatet* 228x108x55 mm, idet det tillades at afvige herfra med ca. $\pm 4\%$, jvf. DS 414, afsnit 3.1.3.

Brænding

Stenene brændes i en *tunnelovn*. Leremnerne er stablet op på vogne, som i løbet af 2-3 døgn bevæger sig fra opstblingsstedet gennem forvarmnings-, brændings- og afkølingszoner til aflæsningsstedet - en strækning på 60-150 m.



Figur 3. Øverst: Tunnelovn set ovenfra. Nederst: Temperaturfordeling.

Medens altså tunnelovnens ildzone forbliver på samme sted, medens godset bevæger sig, har det sig omvendt med de ældre *ringovne*. I disse stables de tørrede emner op i et afsnit i den ringformede ovn. Brændstoffet (kulsmuld eller olie) tilføres fra huller i loftet. Gennem en cyklus på 7-10 døgn skifter man denne tilførsel således, at ildzonen bevæger sig rundt og efterhånden passerer ethvert af afsnittene, hvis teglemner først forvarmes af forbrændingsluften, medens friskluften afkøler de færdigbrændte teglsten. Ringovnen er meget arbejdskrævende og er nu afløst af de meget økonomiske tunnelovne. Det er vanskeligere at få en jævn temperaturfordeling i en ringovn end i en tunnelovn. Det betyder, at farvespillet i ringovnsbrændte sten vil være rigere end i tunnelovnsbrændte sten.

Man kan betragte følgende temperaturområder med karakteristiske processer under brændingen.

150-600° C. Krystalvand fraspaltes fra lerminerale, glimmer, jernilte og gips. Leret mister de plastiske egenskaber, men har endnu kun ringe mekanisk styrke.

300-900° C. Organiske stoffer forkuller og bliver til CO_2 . Ilt trænger ind i lerets porer og ilter ferrooxid til ferrioxid. Endvidere iltes svovlkis, FeS_2 , idet SO_2 forsvinder. Jernspat og kalk fraspalter CO_2 og bliver til FeO og CaO . Ved 573°C omdannes α -kvarts til β -kvarts under 0.6% lineær udvidelse; hvis denne temperatur passeres for hurtigt, kan den pludselige rumfangsændring medføre revnedannelse.

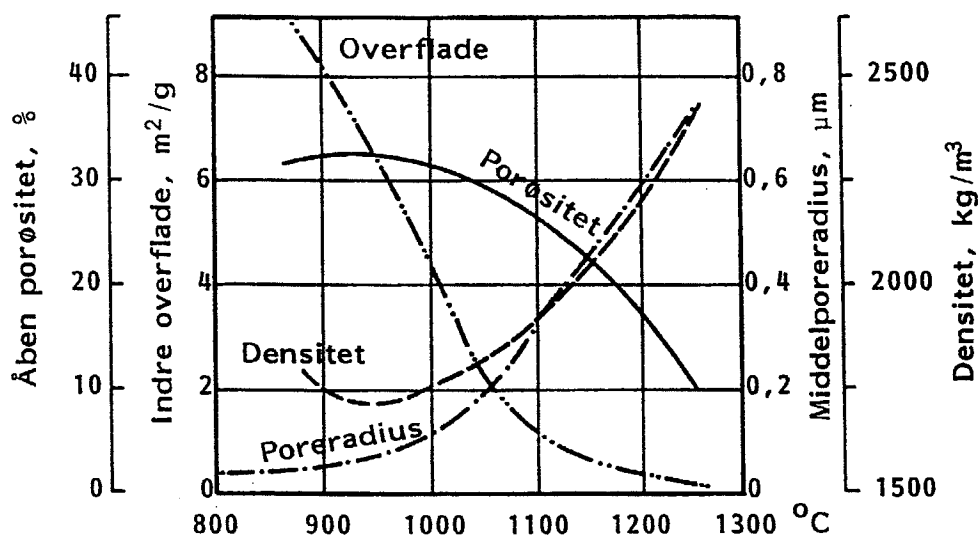
Over 800° C, sintringsområdet. Temperaturen er nu så høj, at der kan foregå kemiske faststofreaktioner i berøringspunkterne mellem de enkelte partikler. Atomere fra én partikel kan diffundere over i en anden, hvorved der kan opstå kontakt mellem partiklerne. Der dannes en sammenholdende glasfase i partiklernes berøringspunkter.

Røntgenundersøgelser viser, at kvarts og feldspat, som udgør ca. 2/3 af råmaterialet, først begynder at nedbrydes ved de højeste temperaturer, over 1050° C, medens lerminerale stort set vil være omdannet ved 750° C til glasmasse, af hvilken der så ved højere temperaturer delvis kan dannes krystallinske faser, når jernindholdet eller kalkindholdet reagerer med ilt, henholdsvis med SiO_2 /15/.

Almindeligvis brændes tegl under rigelig lufttilførsel, og så er det, at de nævnte brændingsfarver fremkommer. Kalkrig ler har imidlertid et meget snævert sintringsinterval, måske blot 25° C, og hvis man for at få den gule farve frem skal helt op på normal brændingstemperatur, kan denne være kritisk at styre; derfor vælger man undertiden at afslutte brændingen ved underskud af friskluft, hvorved der opstår en gul eller gulgrøn farve ved lavere temperatur.

Når der sker smeltning i berøringspunkterne, indtræder *rumfangsformindskelse*, brændingssvind, som vokser med brændingsvarigheden og med højeste temperatur. Små partikler smelter først, og da det fortrinsvis er imellem disse, at

de mindste porer findes, vil tiltagende sintring først fjerne de mindste porer. Højere brændingstemperatur vil derfor føre til et produkt, der har større porer, men formindsket ydre rumfang, idet det totale porevolumen er mindsket, jvf. figur 4.

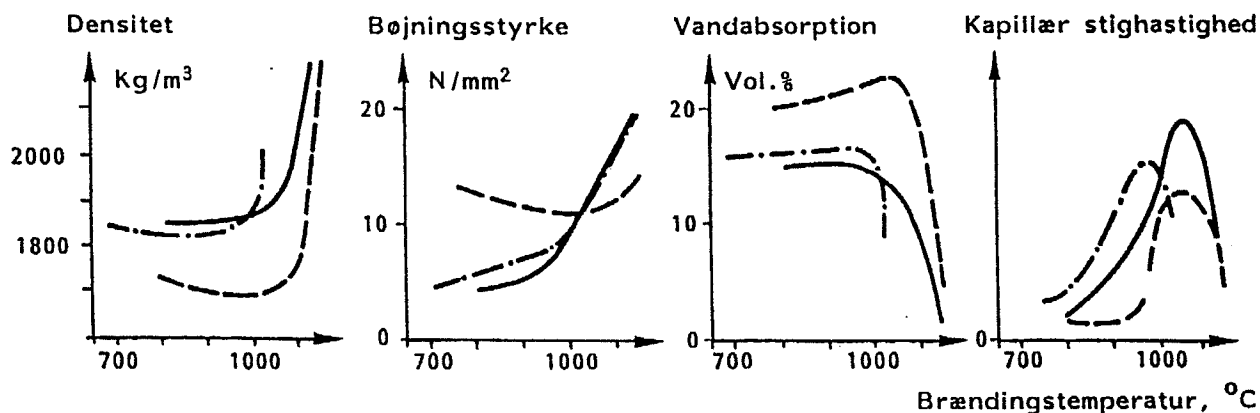


Figur 4. Forandringer i densitet og poreegenskaber med stigende brændingstemperatur /21/.

De brændte teglsten sorteres efter brændingsgrad i halvbrændte, fuldbrændte (ca. 1000°C), hårdt brændte (ca. 1150°C) og klinkbrændte (ca. 1200°C) sten samt vragssten. Herunder iagttages klang, farve og form som kendetegn. (Tallene i parentes angiver omtrentlig brændingstemperatur.)

EGENSKABER

Egenskaberne for tegl er gennemgået nedenfor i samme orden og med samme nomenklatur og definitioner som i /16/. På figur 5 illustreres brændingstemperaturens indflydelse på nogle egenskaber.



Figur 5. Indvirkning af brændingstemperaturen på visse teglegenskaber for tre forskellige lerarter /21/.

Densitet, porøsitet, struktur

Vi skelner mellem *grovstruktur* og *finstruktur*.

Grovstrukturen beror på formnings- og tørringsforhold. For eksempel opstår lagdeling (laminering) under strengpresning, når de yderste dele af lerstregen bremses så stærkt af mundstykket, at der opstår for store hastighedsforskelle mellem disse partier og strengens midterdele. Desuden kan der opstå tørringsrevner.

Til finstrukturen regnes poresystemet med sine åbne og lukkede porer. I almindelig tegl udgøres størstedelen af porerumfanget af åbne porer, som luft eller vand kan få adgang til udefra, fordi de danner et sammenhængende net af forbundne kanaler.

Den åbne porøsitet, p_a , kan man konstatere tilnærmet ved at lade et givet ydre rumfang, $V \text{ m}^3$, helt udtørret tegl opsuge vand under vakuum; masseforøgelsen kan da omregnes til rumfanget, v , af de åbne porer, og den søgte porøsitet er

$$p_a = \frac{v}{V}$$

For at finde den totale porøsitet, p , må man først bestemme den tilsyneladende densitet, ρ_d , og derefter efter pulverisering faststoffdensiteten, ρ_f . Da er (jvf. /16/, formel (4))

$$p = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_f}$$

Det viser sig, at ρ_f med god tilnærmelse kan sættes til 2700 kg/m^3 for teglmaterierne.

Med følgende fire eksempelvis teglmaterialer findes da omtrent

Stentype	Tørdensitet ρ_d , kg/m^3	Porøsitet p , %
Klinkbrændte mursten	2100	22
Fuldbrændte mursten	1800	33
Halvbrændte mursten	1400	48
Savsmuldsten	1200	56

Murstens *normalformat* og de tilladte afvigelser er bestemt i DS 414, §3.1.3. Normalformatet er 228x108x55 mm. Den største side af en mursten kaldes *liggefladen*, den mellemste *løbersiden* og den mindste *kopenden*.

Fugt og fugttransport

Tegls grove porestruktur med lille indre overflade i forhold til f.eks. cementbundne materialer bevirker, at tegls hygroskopiske vandbinding er lav, af størrelsesordenen under 1% i vandtørstofforhold (jvf. sorptionskurverne i /17/, figur 8a, kurve 5 og 6).

Derimod er den kapillære sugeevne kraftig. Til brug ved bedømmelse af teglets egenskaber under murerarbejdet måles den såkaldte *minutsugning*, som er den mængde vand (kg/m^2), som en tør sten opsuger i ét minut. (Prøvemethoden er beskrevet i /10/.) Tallene varierer fra 6 kg/m^2 for letbrændte til 1 kg/m^2 for klinkbrændte sten. Hvis tallet er stort, suges mørtelen for hurtigt "død", så mureren ikke kan banke stenen på plads, uden at der opstår revner. Hvis tallet er for lille, risikerer man, at murværket "sejler" og skrider ud.

Vanddamppermeabilitetskoefficienten, δ , ligger på $15-60 \cdot 10^{-12} \text{ kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$ /10/.

Væskepermeabilitetskoefficienten, K , ligger på $3.000-40.000 \cdot 10^{-12} \text{ kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$. I /10/ beskrives en vandgennemtrængelighedsprøvningsmetode, hvis resultat kan omregnes til K -værdi.

Varmeegenskaber

Varmeledningstallet, λ , er for tørt materiale af størrelsesordenen 0,2 til 0,6 $\text{J/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{K}$) stigende med densiteten, jvf. /16/, figur 3. Varmedledningstallet stiger med stigende vandindhold efter samme regler som andre porøse materialer, se også /16/.

Tegls varmefylde er $960 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}$.

Deformation og styrke

Tegl udmærker sig blandt byggematerialerne i deformationsmæssig henseende ved ikke at opvise nævneværdig *krybning* (deformation under langtidslast).

Det betyder, at arbejdslinien er retlinet til brud. Hædningskoefficienten, *elasticitetsmodulen*, varierer mellem 1 og 30 GPa fra den laveste til den højeste densitet.

Murstens *trykstyrke* måles på et prøvelegeme, som fremstilles af en sten ved at skære denne over på midten og mure de to halvdele sammen med cementmørtel. Trykstyrken varierer mellem 10 og 80 MPa fra de laveste til de højeste densiteter. DS 414 inddeler stenene i klasser, hvor klassebetegnelsen er afledt af stenenes trykstyrke i MPa. Normen omfatter otte stenklasser: 4, 7, 10, 15, 22, 30, 37 og 45. Stenklassen for et parti mursten bestemmes i henhold til DS 438.11.

Bøjningstrækstyrken kan sættes til 1/10 à 1/5 af trykstyrken.

Volumenbestandighed

Tegl har den laveste *længdeudvidelseskoefficient* blandt de gængse byggematerialer. Variationsområdet er $2-9 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Almindeligvis regnes med $5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Tegls *svind og svelning* er i de fleste tilfælde ubetydelig. Ved udtørring fra våd tilstand til ligevægt ved 50% RF er svindtøjningen 0,005-0,01 o/oo. Dette er ca. 1% af værdierne for f.eks. cementmørtel. Dette skyldes forskellene i porestrukturen.

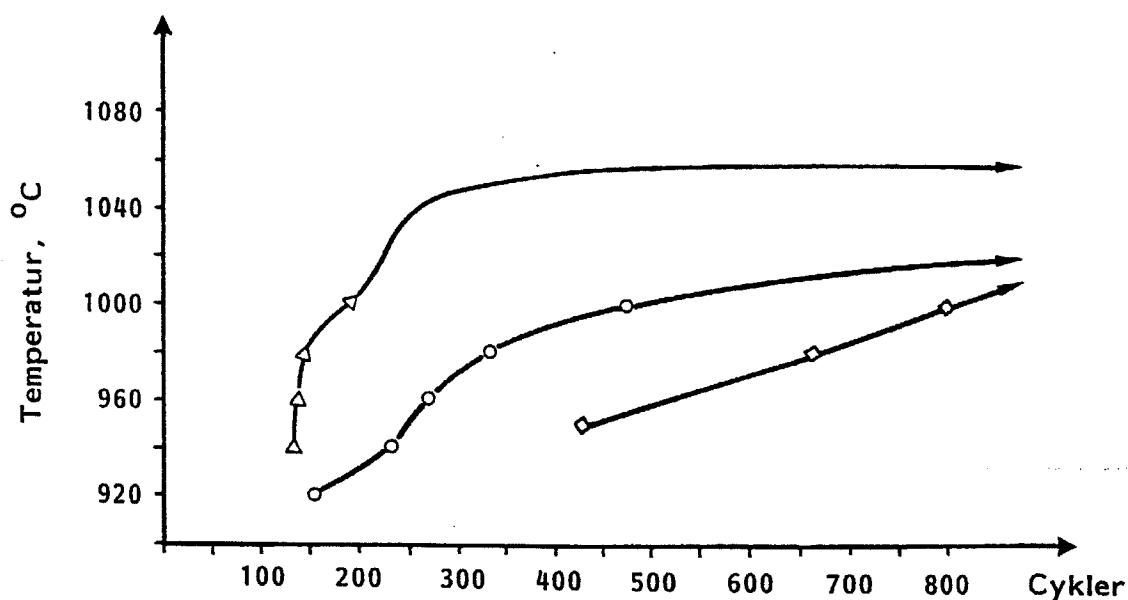
Holdbarhed

Teglmaterialet er *frostbestandigt*, så længe den faktiske vandmætningsgrad, S_{akt} , er mindre end en vis kritisk vandmætningsgrad, S_{krit} , som er karakteristisk for materialet, og som kan findes eksperimentelt.

Når vand fryser til is, udvider det sig ca. 9% og kan derfor sprænge et porøst materiale, såfremt alle porer er helt fyldte og det endnu ikke frosne vand forhindres i at strømme bort. Tænker man sig det teoretiske tilfælde, at hver enkelt af samtlige porer netop indeholdt 91,7% vand, regnet af porens rumfang, da ville alle porer netop fyldes helt ud, når vandet bliver til is, men der ville ikke opstå overtryk noget steds. Hvis denne *porefyldningsgrad* i gennemsnit var netop 91,7%, men ikke var ens for alle porer, ville måske

halvdelen af disse være mindre fyldte og forblive uskadede; men resten af porerne ville være mere fyldte, og isen i dem ville udøve et overtryk. I så fald er det ikke nok at ansætte den *kritiske vandmætningsgrad* til den teoretisk største på 91,7% - man vil ved forsøg finde en lavere gennemsnitlig porefyldningsgrad som tilladelig. Denne S_{krit} kan f.eks. måske være 85%.

S_{krit} afhænger af poresystemet, som igen afhænger af brændingstemperaturen, jvf. figur 6. Her har man undersøgt tegl af tre lersorter, som er brændt ved forskellige brændingstemperaturer. Skadepåvirkningen er opnået ved at sætte prøvelegemerne i fryseskab, afvekslende med optøning i vand. Antallet af sådanne frysings- og optøningsomgange er afsat som abscisse. Det er tydeligt, at alt andet lige medfører højere brændingstemperatur forøget frostbestandighed, og det skyldes ikke mindst, at porestrukturen herunder ændres på gunstig måde.



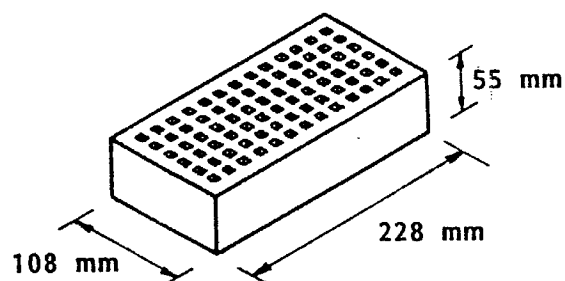
Figur 6. Sammenhæng mellem brændingstemperatur og frostbestandighed hos tegl af tre forskellige lerarter /3/.

Kemisk modstandsdygtighed. Almindeligvis er teglmaterialet meget holdbart over for kemisk angreb, men stærke syrer kan forvolde skade.

En anden slags ulempe er "*saltudblomstring*" som følge af, at tegl og mørtel indeholder vandopløselige salte. Når vandet fordamper fra ydersiden af teglet, afsætter det udkrystalliserede salt sig som hvide skjolder. Det er fortrinsvis sulfater af natrium og kalium, men også gips og andre salte kan optræde således. Særligt giver anvendelse af portlandcement i mørtlen anledning til saltudblomstring.

Særlig ubehageligt er det saltskadefænomen, der kaldes *afmeling*. Her dannes saltene således, at stenen, når den udsættes for klimasvingninger, omdannes til pulver. Det er særlig dårligt brændte sten, som er udsat for denne nedbrydningsmekanisme. Tøsalt (NaCl), som suges op i murværk, kan give afmeling.

Saltskader er behandlet i /23/.



UORGANISKE BINDEMIDLER

Hensigten med det foreliggende kapitel er at give et overblik over de uorganiske bindemidler, som anvendes i byggeriet, kalk, cementer og gips. Fremstillingen er baseret på den kemiske sammensætning og de reaktioner, som betinger bindemidlernes anvendelse. Hovedvægten er lagt på kalk og cementer, mens gips kun er nævnt kort.

Bindemidlerne og deres anvendelse

De bindemidler, som skal behandles her, anvendes til betonstøbning, muring, pudsning og til specialprodukter som vist i nedenstående tabel.

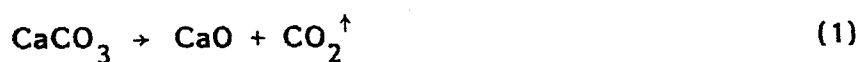
Skematisk oversigt over bindemidler på det danske marked 1987	
Anvendelse	Bindemiddel
Betonstøbning	Portland-flyveaske-cement ("Standardcement") Hurtighærdnende portlandcement ("Rapid-cement") Lavalkali-sulfatbestandig cement Hvid og farvet portlandcement
Muring Pudsning	Kalk Hydraulisk kalk Cementer, jvf. ovenfor Kalkcement Murcement
Fabriksfremstillede plader. Puds. Gulvspartelmasse	Gips

Bygningsingeniørens motivering til at interessere sig for bindemidlerne og deres egenskaber kommer af, at han ofte selv fremstiller eller skal kontrollere beton, mørtel og spartelmasse og derfor må kende mulighederne hos de indgående delmaterialer, af hvilke bindemidlet er det vigtigste.

KALK

Princippet i anvendelsen af kalk som bindemiddel er, at man udgår fra bjergarten kalk, som består af calciumkarbonat, CaCO_3 , omdanner den til et bearbejdeligt produkt og får gendannet CaCO_3 , når man har anbragt bindemidlet på ønsket plads.

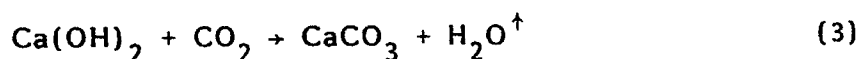
Når kalk opvarmes til ca. 900°C , afgår kuldioxid, og tilbage får man *brændt kalk*, CaO .



Den brændte kalk blandes med vand til hydratkalk. Denne proces (2) kaldes *kalklæskning*. Den sker under stor varmeudvikling:



Når hydratkalken kommer i forbindelse med atmosfærisk luft, gendannes det stabile calciumkarbonat ved optagelse af CO_2 fra luften under samtidig afgivelse af vand.



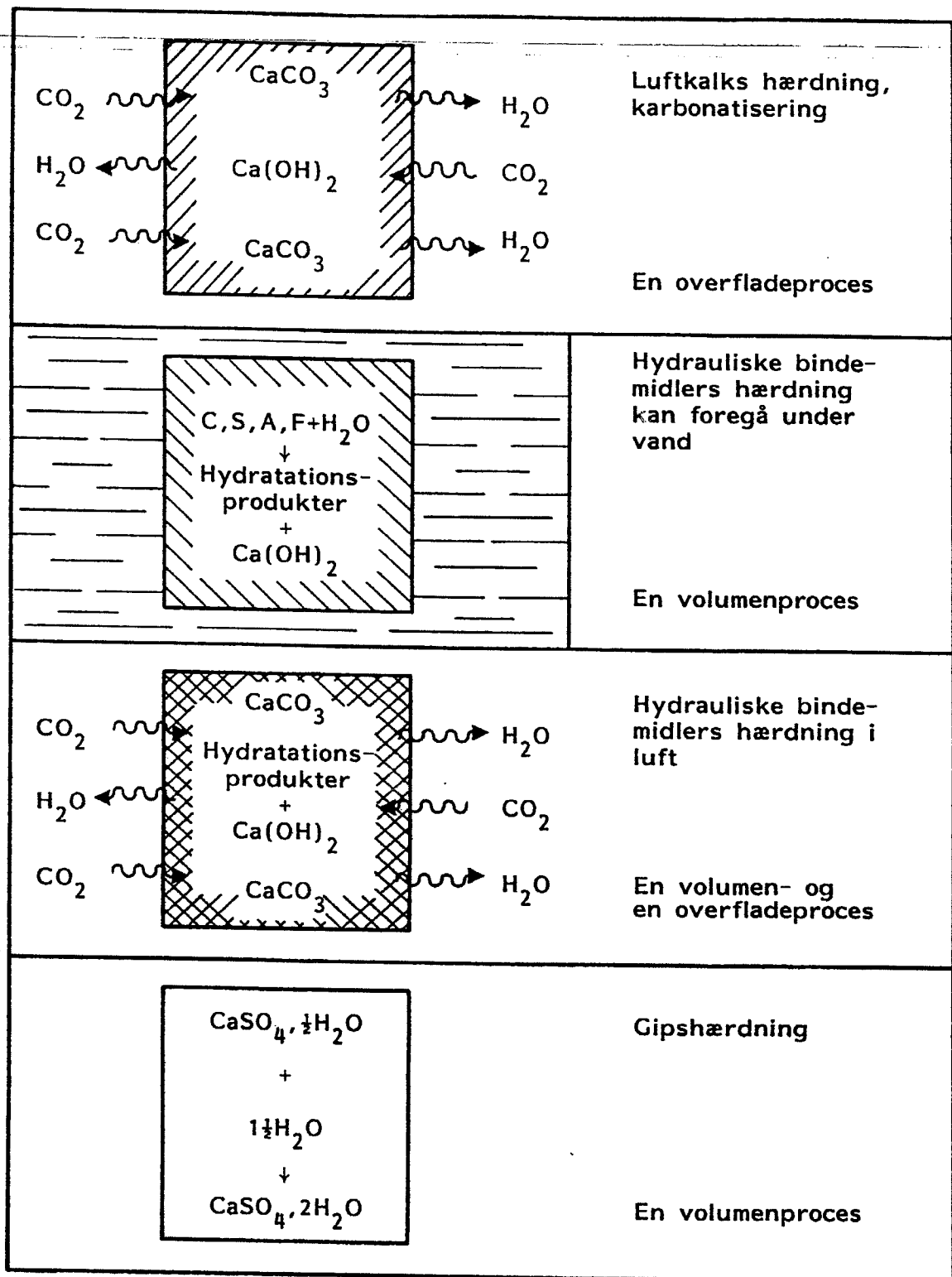
Denne proces kan kun foregå i luften, hvorfor de forskellige former for brændt kalk har fået fællesbetegnelsen *luftkalk*. Reaktion (3) kaldes også for *karbonatisering*.

Da processen kun kan foregå ved kontakten med atmosfærisk luft, sker den fra overfladen af bygningsdelen og indefter. Den kan betegnes som en overfladeprocess, jvf. figur 7A. Den er betinget af, at vandet kan diffundere ud og kuldioxiden ind, hvorfor reaktionshastigheden aftager, jo længere man kommer væk fra overfladen. Som illustration af dette skal nævnes, at man ved undersøgelser af middelalderlige bygninger, kirker og borge opmuret i kalkmørtel har fundet frisk ukarbonatiseret mørtel i de metertykke mure [1].

Stykkalk er store stykker af CaO fra kalkovnen.

Pulverkalk er finmalet brændt kalk, CaO .

Tørlæsket kalk eller *hydratkalk* er brændt kalk, som er tilsat en vandmængde, som kun er lidt større end den, der bindes kemisk. Ved denne læskning fås et finkornet pulver bestående af Ca(OH)_2 -krystaller. Krystalstørrelsen er $0,1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$.



Figur 7. Uorganiske bindemidlers hærkning.

Vådlæsket kalk, kulekalk eller hvidtekalk er brændt kalk, som er læsket med overskud af vand. Den fremstilles ved, at stykkalk eller pulverkalk blandes med vand til en slam, som ledes til åbne siloer eller, tidligere, til huller i jorden (kuler). Her bundfældes urenheder, og overskudsvand bortledes. Vådlæsket kalk er en stiv pasta.

HYDRAULISKE BINDEMIDLER

Bindemidler fremstillet af oxyder af Ca, Si, Al og Fe i passende forhold kan ved blanding med vand stivne til en stenhård masse. Processen kan foregå under vand uden tilstedeværelse af luft, og reaktionsprodukterne er stabile i vand. Disse stoffer kaldes derfor *hydrauliske bindemidler* (græsk: hydor = vand).

Princippet for hydrauliske bindemidlers hærdning er vist på figur 7B. I figuren er brugt de fra cementkemien gængse forkortelser

C = CaO

S = SiO₂

A = Al₂O₃

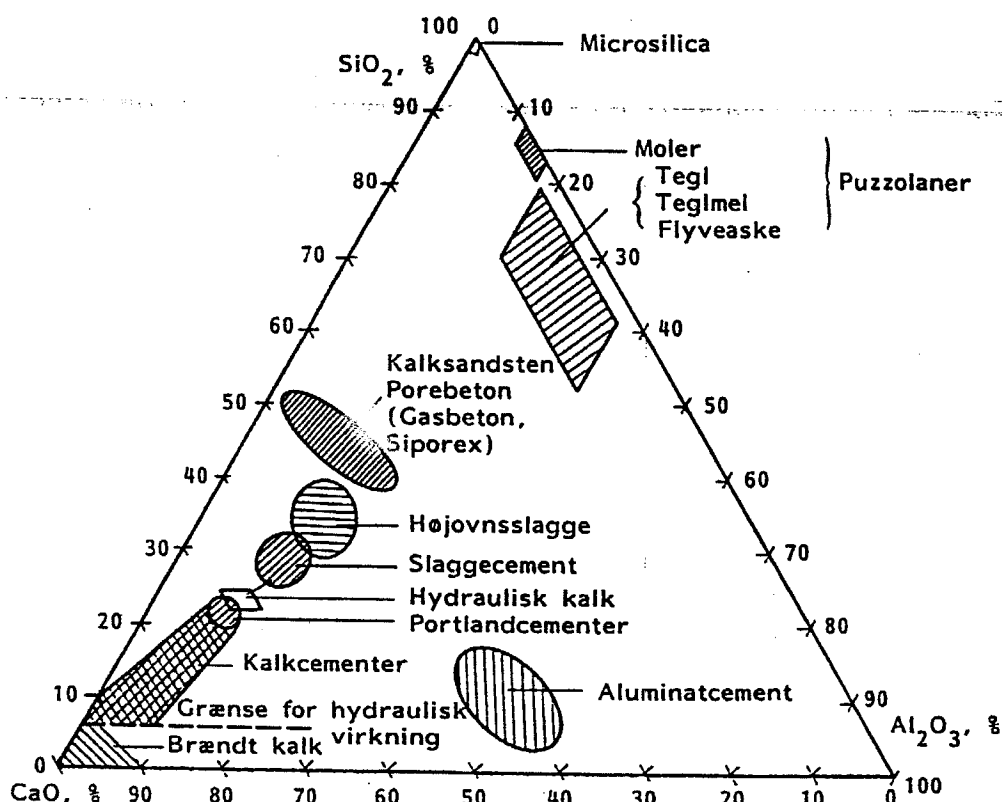
F = Fe₂O₃

Den vigtigste proces finder sted mellem C, S og vand. Man får dannet de såkaldte *hydratiserede kalciumsilikater* (CSH) og i de fleste tilfælde en del Ca(OH)₂.

Et hydraulisk bindemiddel, som hærder i luft, vil hærde ved en volumenproces med det tilstedeværende vand, men yderligere vil overfladen af legemet karbonatiseres, jvf. figur 7C.

Råprodukterne til fremstilling af hydrauliske bindemidler er bjergarter, kridt, dolomit og ler, som indeholder de ønskede oxider.

Man kan danne sig et overblik over de forskellige typer af hydrauliske bindemidler og kalk ved at rubricere dem efter deres indhold af de tre hovedoxider C, S og A. Dette kan gøres i et trekantdiagram som figur 8.



Figur 8. De uorganiske bindemidlers placering efter kemisk sammensætning.

Brændt kalk findes naturligvis i diagrammets CaO-hjørne. Kalken kan indeholde lidt af de andre oxider, men ikke mere end 6% SiO_2 . Her går grænsen for den hydrauliske virkning. Blandinger, som ligger over denne linie, kan hærde under vand.

Hydraulisk kalk fås ved brænding af kalk, som indeholder ler, d.v.s. S, A og F som urenheder. Dens placering efter S, C og A er vist på figur 8. Den hærder under dannelse af hydratiserede kalciumpulikater. Der fremstilles ikke hydraulisk kalk i Danmark mere, men den importeres bl.a. til restaureringsarbejder.

Det var bindemidler af typen hydraulisk kalk, som romerne brugte til deres betonbygværker såsom akvadukter, amfiteatre og havneanlæg. Deres viden gik tabt med romerrigets fald, og først i 1700-tallet begyndte man igen at kunne fremstille hydrauliske bindemidler. I /5/ er beskrevet denne historiske udvikling frem til opfindelsen af de såkaldte *portlandcementer*, som er vore vigtigste hydrauliske bindemidler i dag. Portlandcement er bredt behandlet i /5,6,11/.

Portlandcement

Navnet portlandcement stammer fra englænderen Aspdins patentskrift fra 1824. Det blev anvendt på grund af det færdige produkts lighed med en naturlig sten fra halvøen Portland.

Portlandcement er en fællesbetegnelse for cementer, som er fremstillet af kalk og ler, der blandes, brændes og males. Ved brændingen dannes kugler, "klinker", som indeholder de såkaldte *klinkerminerale* C_3S , C_2S , C_3A og C_4AF . Disse kugler er ikke reaktive med vand. De kan til og med opbevares udendørs udsat for regn. Først efter formaling fås det velkendte grå pulver, som kan bringes til at hærde ved blanding med vand.

På figur 8 ligger portlandcementerne i et ret lille område omkring 22% S, 68% C og 10% A. Det er omtrent den samme sammensætning, som gælder for hydraulisk kalk. Hydraulisk kalk opviser trykstyrker omkring 5 N/mm^2 , mens portlandcements trykstyrker ligger på $30\text{--}50 \text{ N/mm}^2$. Det kan forekomme mærkeligt, at to produkter med samme sammensætning har så vidt forskellige egenskaber.

Forklaringen herpå er, at oxiderne findes arrangeret som forskellige mineraler på grund af de forskellige brændinger. Hydraulisk kalk er brændt ved ca. 1100°C og indeholder noget C_2S , men intet C_3S . Disse to for styrkeudviklingen meget vigtige mineraler findes imidlertid i rigelig mængde i portlandcement, som er brændt ved $1400\text{--}1600^\circ \text{C}$. Dette er i overensstemmelse med den erfaring, at man ikke kan bedømme egenskaberne hos et krystallinsk materiale ved kun at se på den kemiske sammensætning.

Mængden af klinkerminerale er bestemmende for cementens styrke og holdbarhedsegenskaber. C_3S giver høj, tidlig styrke. C_2S giver høj styrke, men langsommere. C_3A må begrænses i cementer, der skal være sulfatbestandige.

Danske cementers sammensætning er reguleret i DS 427. Internationalt er det ASTM (American Society of Testing Materials), som er normdannende. I /18/ findes en gennemgang af kravene til klinkersammensætningen efter ASTM. /18/, tabel 3.18, viser sammensætningen af de cementer, der er på det danske marked i dag.

Foruden klinkersammensætningen er også formalingsgraden af betydning for cementernes reaktionshastighed. Den gamle danske portlandcement var fremstillet af samme klinker som rapidcementen. Forskellen i reaktionshastighed lå i formalingen. I 1984 blev den gamle "Portlandcement" afløst af "Standardcement", som indeholder op til 25% flyveaske (jvf. afsnittet om puzzolaner nedenfor). "Rapid" og "Standard" har omtrent samme formalingsgrad. "Standard" reagerer langsommere på grund af flyveasketilsætningen.

Puzzolaner

Den Ca(OH)_2 , som dannes ved portlandcements reaktion, kan også bringes til at danne bindemiddel, hvis man indblender et *puzzolan* i cementen. Puzzolaner er glasagtige eller finkrystallinske pulvere bestående hovedsagelig af SiO_2 og Al_2O_3 i mængdeforhold som vist på figur 8. Puzzolanernes S og A reagerer med C og danner sammenbindende krystaller.

Eksempler på puzzolaner er moler, trass, pulveriseret tegl, flyveaske og sand fra Puzzuoli, en by i Italien, som har givet produkterne navn. Romerne anvendte puzzolan sammen med kalk for at få hydraulisk virkning. Man ser af diagrammet, figur 8, at puzzolanernes sammensætning er sådan, at man ved passende blanding med C kommer ind over portlandcementområdet og området for hydraulisk kalk.

Fordelene ved anvendelse af puzzolan i beton kan resumeres således:

- Forbedret bearbejdelighed ved tilsætning af det finkornede materiale
- Mindsket vandudskillelse fra frisk beton
- Øget kemisk modstandsdygtighed på grund af øget tæthed

Puzzolanet flyveaske anvendes som nævnt i den såkaldte "Standard-cement" fra Aalborg Portland.

Mikrosilica fremkommer som et biprodukt ved produktionen af siliciummetal og ferrosilicium i elektriske smelteovne. Det er et ekstremt finkornet pulver bestående af kuglerunde partikler af amorf kisel med en maksimal kornstørrelse på omkring 1 μm . Kemisk sammensætning er vist i figur 8.

Mikrosilica har udprægede puzzolanegenskaber, hvortil ved tilsætning til beton kommer en såkaldt mikrofillereffekt, der består i, at mikrosilicapartiklerne

- på grund af deres ringe størrelse i forhold til cementkornene - virker tætnende på cementpastabindemidlets struktur.

Mikrosilica har en særdeles positiv virkning på nogle af betonens egenskaber. Ved tilsætning af nogle få procent mikrosilica (f.eks. 8-10% i forhold til cementindholdet) kan man således opnå en kraftig forøgelse af betonens trykstyrke (40-50%), en kraftig forøgelse af vandtætheden og dermed også af frostbestandigheden samt en væsentlig nedsættelse af risikoen for alkalikiselreaktioner.

Autoklaverede bindemidler

Råmaterialer med passende sammensætning efter figur 8 behøver ikke at brændes til cement for at reagere til et bindemiddel. Det er muligt at blande de pulveriserede råmaterialer og få dem til at danne bindemiddel.

Råmaterialerne ved fremstilling af *gasbeton* og *kalksandsten* er brændt kalk, knust kvartssand, flyveaske og eventuelt portlandcement. Recepterne varierer fra fabrikat til fabrikat, men forholdet mellem hovedoxyderne kan placeres ind i et område som vist på figur 8. Produkterne bringes til at reagere ved autoklaving (opvarmning i damp til ca. 180° C). Herved afsluttes processerne hurtigere (ca. 1 døgn), i modsætning til den langsommere reaktion i portlandcement ved normal temperatur.

Specielle cementer

Ved fremstilling af råjern fås en *højovnsslagge* bestående af S, C og A i mængdeforhold som vist på figur 8. Slaggen forekommer i glasform. Den har ikke i sig selv bindemidelegenskaber, men hvis den pulveriseres og blandes med portlandcement, kan oxyderne aktiveres i hydratiseringen. Man kalder blandingen for *slaggecement*. Den forhandles ikke i Danmark, men anvendes i Tyskland og Sverige. Dens egenskaber er som portlandcementens, dog reagerer den lidt langsommere.

Et andet specialprodukt er *aluminatcement*, der hovedsagelig består af C og A som vist på figur 8. På grund af en del indtrufne uheld må aluminatcement ikke anvendes til bygningsbrug i Danmark og Sverige. Den kan anvendes til specialformål, hvor man kan udnytte, at den hærder meget hurtigt. Man får fuld styrke, sammenlignelig med portlandcementernes efter 1 døgn. Styrken holder imidlertid ikke, idet de dannede kalciumaluminathydrater under ugunstige omstændigheder er ustabile. Man har eksempler på nedgang til 5 N/mm² efter 30 år.

Mørtelbindemidler

En vigtig egenskab ved et bindemiddel, som skal anvendes til mørtel og puds, er, at det foruden at give styrke også skal give den friske mørtel god bearbejdelighed.

Det fra et bearbejdelighedssynspunkt bedste bindemiddel er *vådlæsket kalk*. Ved læskningen opløses krystallerne til meget små bestanddele, og man får ved passende vandtilsætning en blød dej, som er god at mure med, når den blandes med sand.

Kalkmørtels styrke er imidlertid ringe ($1-5 \text{ N/mm}^2$). Bedre styrke opnås ved anvendelse af cement. Portlandcementpasta er imidlertid for tung, "strid", at arbejde med, fordi cementen består af kantede, skærveformede partikler, der er grovere end kalkens. Selv om de ikke er store ($25-50 \mu\text{m}$), påvirker de bearbejdeligheden.

En nærliggende løsning på dette problem er at blande kalk og cement til kalk-cement, jvf. sammensætningen i figur 8. Der skal kun en ringe mængde cement til for at give hydraulisk virkning. Anvendes tørlæsket kalk (Ca(OH)_2) sammen med cement, har man basis for en industriel produktion af færdigblandede mørtler.

En anden god kombination af bearbejdelighed og styrkeegenskaber er opnået i *murcement* (dansk handelsnavn: "Murcem"). Det er portlandcement, som er hovedbestanddelen i denne cementtype, og som giver styrken. Bearbejdeligheden er opnået ved regulering af formalingsgraden, ved tilsætning af finformalet inaktivt filler (i Danmark slemmekridt) og ved tilsætning af luftporedannende stof.

Der findes i DS 414 standardiserede regler for angivelse af bindemidlers og mørtlers blandingsforhold.

Gips /7/

Gips findes som bjergart udbredt i mange lande, hvor man langt tilbage i tiden har brugt brændt gips, som man her i landet anvender kalk. I Danmark findes ingen naturlige gipsforekomster, men som biprodukt inden for den kemiske industri fremstilles store mængder gips. Desuden kan man få

gips som restprodukt ved afsvovling af kraftværksrøg. Derfor anvendes brændt gips i byggeriet i stigende mængder, ikke direkte i stedet for kalkmørtel til opmuring, men til præfabrikerede plader til loft- eller vægbeklædning. Desuden anvendes en del til spartelmasse.

Naturligt forekommende gips har formlen $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ved opvarmning afgives krystalvand, og der dannes hemihydrat $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ eller forskellige former for CaSO_4 , afhængigt af brændingen.

Disse produkter vil reagere med vand og hærde, idet der gendannes $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (jvf. figur 7D). $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ reagerer momentant, og det blandes derfor med en retarder. CaSO_4 's reaktionshastighed afhænger af, hvilken temperatur brændingen er foregået ved.

Selv om gips kan reagere uden tilgang af luft, regnes den dog ikke som hydraulisk, idet den ikke er bestandig i vand.

Nedenstående tabel viser forskellige typer brændt gips, deres fremstillingsmåde og afbindingstid. Der findes ingen danske normer eller kontrolordninger for gipsprodukter.

Gipstyper, efter /7/			
Navn	Fremstillingsmetode	Bestanddele	Hærdningshastighed
Almindeligt brændt gips	Opvarmning til ca. 150° C i åbne kar	Hovedsagelig $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, noget $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ og noget γCaSO_4	Meget hurtig
Retarderet hemihydrat	Alm. gips + retarder (0.1% keratin)	Som ovenfor	Moderat
	Autoklavering af alm. gips	Hemihydrat	Moderat
Anhydrit	Opvarmning til 190-200° C	Anhydrit, CaSO_4	Moderat
"Keene's cement"	Opvarmning til ca. 600° C. Tilsætning af acceleratore	Anhydrit	Moderat
Estrich gips	Opvarmning til 1100-1200° C	Anhydrit + CaO	Meget langsom

LETBETON

Ordet *letbeton* betegner en hel gruppe indbyrdes ret forskellige byggematerialer, der dog har det fælles, at deres densitet er betydeligt lavere end normal betons, og at de ligesom almindelig beton er sammensat af bindemiddel (som regel cement eller kalk) blandet med vand og tilslag af forskellige kornstørrelser, densitet og oprindelse. Materialetyperne afviger fra hinanden ved fremstillingsmåden.

Gasbeton er et finkornet porøst autoklaveret materiale. Det synlige poresystem frembringes gennem gasudvikling (gæring) under fremstillingsprocessen, som altid sker på fabrik. I officielle papirer ser man ofte betegnelsen porebeton anvendt for gasbeton.

Cellebeton ligner gasbeton, men fremstilles på arbejdspladsen ved indpiskning af skum i bindemiddelmassen. Det bruges mest til isolering.

Let-tilslags-beton kan karakteriseres som almindelig beton, hvori en større eller mindre del af tilslaget er erstattet med materiale med lavere densitet end almindeligt stenmateriale. I *letklinkerbeton*, som er den største gruppe, udgøres det lettere tilslagsmateriale af ekspanderet, brændt ler. De lette tilslagsmaterialer kan også være af mange andre slags, f.eks. ekspanderet skifer, ekspanderet perlit, slagge, nedknust gasbeton, pimpsten, bark eller skumplast, men sådanne varianter er mindre sædvanlige her i landet.

Endnu en speciel type letbeton fremstilles med underskud af finmateriale, hvorved mellemrummene mellem de grovere tilslagskorn ikke bliver helt fyldt, men der opstår et groft poresystem. Tilslag med underskud af finmateriale kaldes *undergraderet tilslag* og tilsvarende beton undergraderet beton. Hvis tilslagsmaterialet er helt uden finmateriale, kaldes betonen med et engelsk ord "no-fines concrete", som er forsøgt oversat til *sandfri beton* eller *hulrumsbeton*.

Konstruktioner af letbetonelementer er normeret i DS 420.

I det følgende behandles *gasbeton* og *letklinkerbeton*.

GASBETON

I Sverige, hvor gasbetonen er opfundet, fremstilles materialet under firma-betegnelserne Siporex og Ytong. I Danmark produceres H+H Gasbeton.

Uarmeret gasbeton leveres som *blokke* i forskellige dimensioner og med forskellige måltolerancer alt efter anvendelsesområde og fugeteknik. Armeret gasbeton leveres i form af *elementer* til forskellige formål, f.eks. tagplader og vægelementer samt bjælker over vinduesåbninger.

Grundmassen i gasbeton er cement eller kalk blandet med finmalet kiselsyreholdigt materiale og vand. De kiselsyreholdige materiale kan være kvarts-sand, brændt alunskifer, granuleret basisk højovnsslæge, flyveaske eller tilsvarende. I denne grundmasse iblandes aluminiumpulver, som danner bobler af brint, når det reagerer med den kalciumhydroxyd ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), som dannes i den friske masse. Brintboblerne indfanges i massen og får den til at hæve. Processen (gæringen) foregår, efter at massen er fyldt i forme. Ved passende stivhed hos den gærede masse skæres den i ønskede stykker. I Danmark anvendes stålstrenger med små kugler, som giver et karakteristisk Z-mønster på den skårne flade. Formene anbringes derefter i autoklave, hvor massen damphærdes under højt tryk (8-10 atm) og høj temperatur (ca. 180°C). Under denne hærdning reagerer kalken eller cementen med kiselsyren, og slutproduktet bliver næsten det samme som bindemidlet i beton, dog med den forskel, at kalciumhydroxyden for en stor del er bundet af kiselsyren.

Processen tager 15-20 timer, og derefter er materialet brugsfærdigt. Dog er dets vandindhold ret stort, vandstørstofforholdet er ca. 30%, efter produktionen.

Det princip at fremstille et kalciumsilikatbundet byggemateriale uden cement kan også anvendes til at fremstille tættere materialer end gasbeton, således *kalksandsten*. I Østeuropa har man en højt udviklet teknik til fremstilling af store byggelementer. Et sådant materiale betegnes silikatbeton eller *silikalcit*.

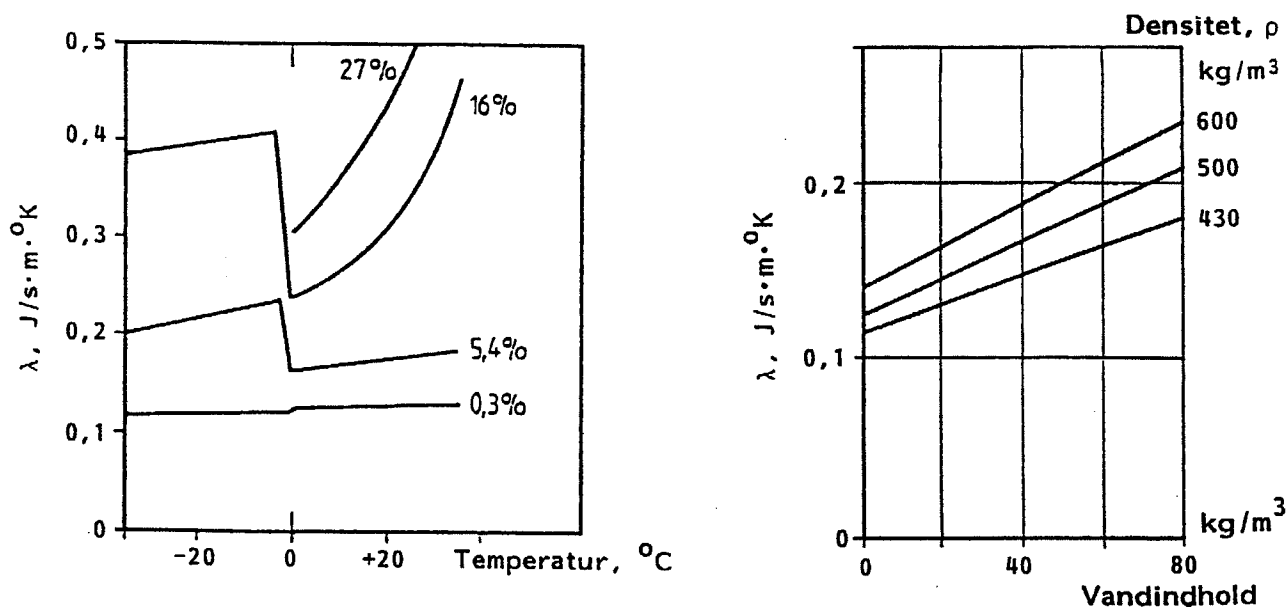
Egenskaber

Densitet og porøsitet. De kugleformede bobler i gasbeton har diametre af størrelsesordenen 0,1–1 mm. Faststofskelettet, som består af kvartssand og hydratiserede kalciumpulver (jvf. afsnittet om uorganiske bindemidler) er også porøst med porestørrelser på 1 nm à 1 µm. Dette er grovere end i almindelig cementpasta, hvilket skyldes damphærdningen. Totalporøsiteten er for dansk gasbeton af størrelsesordenen 75%. H+H Gasbeton deklarerer en øvre 75% fraktil for tordensiteten på 650 kg/m³. Svenske kvaliteter kan leveres med densiteter på 400, 500 og 600 kg/m³. Densiteten bestemmes primært af tilsætningen af aluminiumpulver.

Fugtbinding og fugttransport. Gasbetons små porer kan binde en hel del vand hygroskopisk. Den hygroskopiske fugtbinding ligger mellem 0 og 20 masse %, jvf. sorptionskurven i /17/, figur 8a, kurve 1. Fugtindholdet ved levering ligger på omkring 30 masse %.

Vanddamppermeabilitetskoefficienten δ ligger på $40\text{--}100 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Varmeledning. Boblerne i materialet tjener til at mindske densiteten og dermed varmeledningen. Varmeledningstallet er meget afhængigt af vandindholdet, jvf. figur 9. Læg mærke til, at varmeledningstallet i det hygroskopiske fugtområde varierer lineært med vandindholdet.



Figur 9. Varmeledningstallets afhængighed af temperatur og vandindhold. Til venstre gasbeton med densiteten 540 kg/m³. Til højre resultater for tre svenske kvaliteter /15/.

Deformation. Elasticitetsmodulen er ligesom for mange andre materialer afhængig af densiteten. Normale middelværdier for forskellige kvaliteter er ifølge svenske erfaringer:

Kvalitet (kg/m ³)	Elasticitetsmodul GPa
400	1,0
500	1,7
600	2,5

En empirisk sammenhæng mellem E , ρ_d og f_c er foreslået af Hillerborg /15/.

$$E = 1,75 \cdot \rho_d \cdot \sqrt{f_c}$$

hvor

E = elasticitetsmodul (MPa)

ρ_d = densitet i tør tilstand (kg/m³)

f_c = trykstyrken ved det aktuelle vandindhold (MPa)

Formlen giver resultater, som med god tilnærmelse svarer til ovennævnte værdier.

H+H Gasbeton deklarerer følgende E-moduler

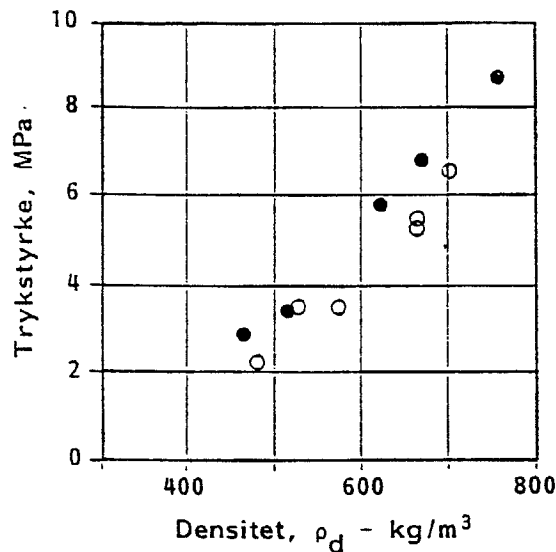
Øvre værdi (90% fraktil) 1,8 GPa

Nedre værdi (10% fraktil) 1,2 GPa

Krybningen er ikke ubetydelig. Krybetallet, $\phi(t)$, kan beskrives med den såkaldte Clouser's formel

$$\phi(t) = \phi_{1\text{år}} \cdot t^b$$

hvor $\phi_{1\text{år}}$ er krybetallet efter 1 år, d.v.s. det antal gange, som deformationen er blevet større end momentandeformationen efter 1 år. For gasbeton er $0,2 < \phi_{1\text{år}} < 1,3$. Værdien er afhængig af klimavariationer, således at varierende klima giver de største værdier. t er tiden i år. b er en materialeparameter af størrelsen 0,2-0,3 /22/.



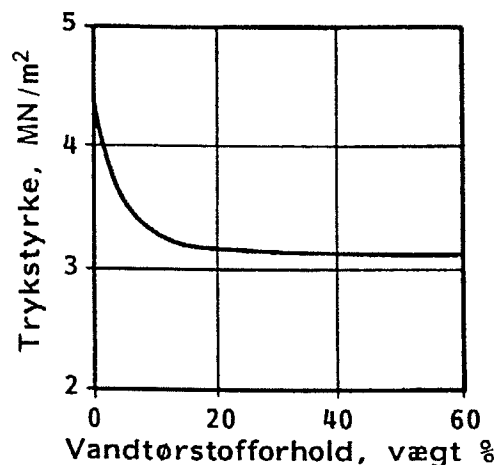
Figur 10. Trykstyrken af gasbeton som funktion af densiteten. To svenske fabrikater. Måling på udsavede 150 mm terninger /15/.

Styrke. Trykstyrken bestemmes i henhold til DS 433.3 på terninger med 150 mm kantlængde.

H+H deklarerer for deres produkter en karakteristisk trykstyrke på 3,0 MPa.

Figur 10 viser densitetens indflydelse på styrken. Vandindholdet influerer også på styrken, jvf. figur 11. Der er derfor foreskrevet ret nøjagtige prøvningsprocedurer i DS 433. Vandindholdet skal ligge mellem 7 og 12% ved prøvning.

Bøjningstrækstyrken bestemmes i henhold til DS 433.4 på 40x40x160 mm prismen. Værdierne ligger ofte på ca. 1/3 af trykstyrken. H+H deklarerer en bøjningstrækstyrke på 1,2 MPa.

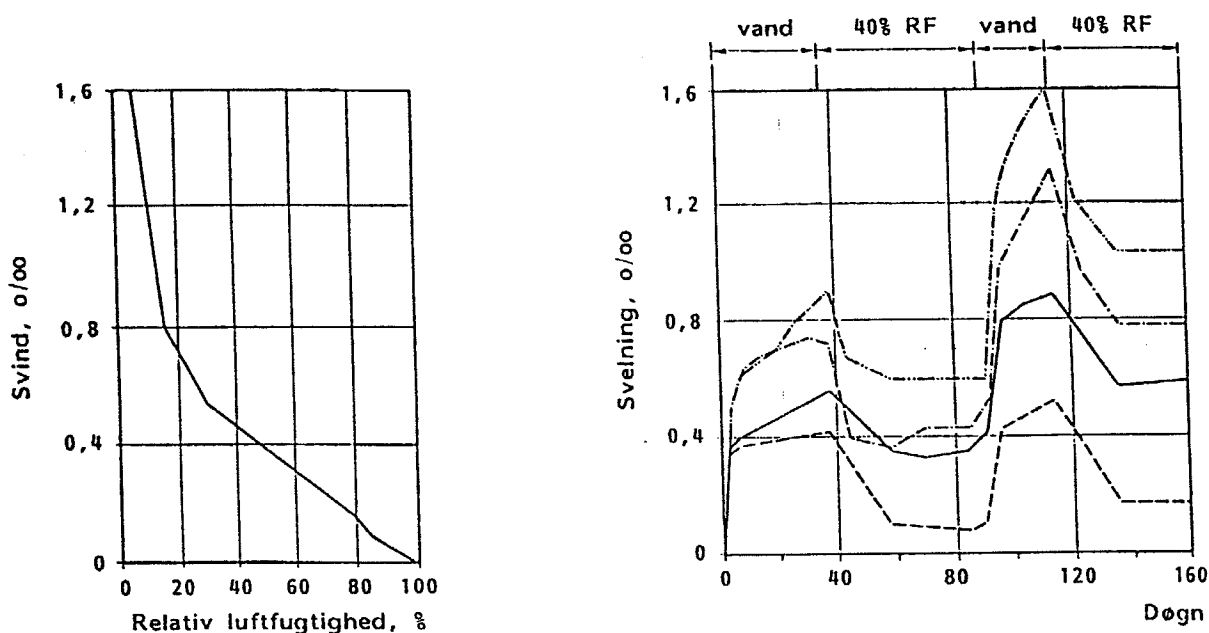


Figur 11. Vandindholdets betydning for trykstyrken af et svensk gasbeton-produkt /15/.

Længdeudvidelseskoefficienten er $7-8 \cdot 10^{-6} \cdot C^{-1}$.

Fugtbetingede bevægelser. Figur 12 viser et eksempel på svindets afhængighed af den relative luftfugtighed, RF. Man finder en næsten lineær sammenhæng mellem svindet og RF i området $100\% > RF > 30\%$. Under 30% tiltager svindet meget stærkt.

De fugtbetingede bevægelser er næsten uafhængige af densiteten.



Figur 12. Svind og svelning i gasbeton. Svenske erfaringer, som synes at stemme med danske iagttagelser. Til venstre svind fra våd tilstand til ligevægt med den pågældende relative luftfugtighed. Til højre svind og svelning ved vekselfugtbelastning /21/.

Bevægelserne er sædvanligvis reversible, men man har i nogle tilfælde målt en successivt forøget svelning ved gentagne fugtnings- og udtørningsforløb. Figur 12 viser et eksempel herpå. Man har ikke klarlagt årsagen til fænomenet.

Svindet har betydning for skillevægs- og etagebjælkekonstruktioner, hvor materialet på alle sider er i forbindelse med luft af temmelig lav fugtighed. Under fyringssæsonen kan den indendørs lufts relative fugtighed synke til 30% eller derunder, og man kan da vente ret så store svindbevægelser hos materialet.

Holdbarhed. Hvad angår kemisk bestandighed, burde den principielle sammenhæng være som for beton; materialet hører jo til gruppen cementbundne materialer. I kraft af højtryksdamphærdningen er kalciumhydroxyden imidlertid i vid udstrækning bundet af de kiselsyreholdige materialer, hvilket kan forventes at forøge den kemiske bestandighed mere end betonens for selve materialet, d.v.s. cellevæggene. På den anden side er materialet meget porøst, af hvilken grund angrebet ikke kan begrænses til overfladen. Fabrikanten anbefaler derfor, at materialet beskyttes med diffusionstætte lag, når det skal bruges i aggressivt miljø, f.eks. i luft med syredampe eller højt indhold af svovldioxyd eller kultveilde. Det bør da bemærkes, at materialet skal have lejlighed til at afgive den fugt, som findes i overskud efter fabrikationen; materiale med stort fugtindhold ved leveringen må ikke lukkes inde imellem diffusionstætte lag.

Den kritiske vandmætningsgrad for *frostbestandighed* svarer ved almindelig gasbeton til et vandtørstofforhold på 60-70%. Ved leveringen er værdien ca. 30%, og f.eks. kan gasbetonen derfor opsuge 120-170 liter vand/m³ ved densiteten 500 kg/m³, før der er risiko for frostskafer. Når materialet suger fra en fri vandoverflade, kan disse fugtmængder let opnås. Under ugunstige omstændigheder kan der endogså opstå tilstrækkelig høj fugtbrøk for frostskafer som følge af kraftig regn. Byggefejl såsom utætte nedløbsrør kan også føre til frostskafer.

Eftersom materialet er meget porøst, og da pH-værdien i porevæsken ligger på 7-8, har det kun ringe evne til at beskytte armering eller andet indstøbt gods mod *korrosion*. Det er derfor et uafviseligt krav, at den eventuelle armering skal forsynes med en korrosionsbeskyttende behandling før indstøbningen. Dette sker ved, at man under fabrikationen lægger et korrosionsbeskyttende lag uden på armeringen.

Korrosionsbeskyttelsen er måske ikke tilstrækkelig, hvis materialets vandindhold er højt gennem lang tid. Også af denne grund må man undgå fugtsamling og undgå at indelukke det leveringsfugtige materiale mellem tætte lag.

Diverse forhold. Om materialets udseende kan nævnes, at nogle fabrikater har gråhvid andre gråblå farve, nogle produkter fås med fabriksfærdig facadebeklædning. I øvrigt afviger nogle af fabrikaterne fra hinanden netop ved overfladekarakteren.

Gasbeton er let at bearbejde på arbejdspladsen. Det kan saves, hugges, bores og sømmes, og det er også let at udfræse ledningsspor deri.

Det er sprødt, og der opstår derfor let hjørne- eller kantskader under transport og håndtering på arbejdspladsen. Fabrikanterne anbefaler en speciel mørtelblanding til at reparere sådanne skader.

Armeringen i gasbetonelementer forankres ved hjælp af påsvejste tværstænger i nærheden af enderne. Det er derfor i princippet forbudt at afkorte elementer, fordi forankringen dermed kan ødelægges.

LETKLINKERBETON

Nedenstående fremstilling angår kun beton med tilslagsmaterialer af ekspanderet, brændt ler helt omsluttet af cementmørtel. Oplysningerne kan dog i vid udstrækning også anvendes på beton med andre lette tilslag såsom ekspanderet, brændt skifer, pimpsten eller ekspanderet perlit.

Man begyndte at anvende letklinker i 1920'erne. I Danmark har materialet vid udbredelse under betegnelserne Leca-klinker og Fibo-klinker.

Fremstillingen af letklinkerne er beskrevet i afsnittet om teglprodukter. Materialet sorteres i fraktioner. Det kan fremstilles med korndensiteten liggende mellem 400 og 1000 kg/m³. Kornhobsdensiteten, d.v.s. densiteten af løst eller fast lejrede kugler kan variere mellem 250 og 500 kg/m³.

Letklinkerne kan bruges i stedet for en vis del af tilslaget i sædvanlig beton. Man får da et materiale, som er lettere end denne beton, men som har den sædvanlige betons udseende og tæthed. Man kan også fremstille undergraderet beton eller sandfri beton af poretilslagsmateriale, hvor således de porøse tilslagskorn kun er sammenlimede i berøringspunkterne. Begge disse materialetyper har bedre varmeisolerende varmeegenskaber, end når tilslagsmaterialet består af de sædvanlige bjergarter; til gengæld bliver styrken ofte lavere, selv om bindemidlet er lige så stærkt.

Proportionering og fremstilling

Letklinkerbeton fremstilles, støbes og hærdes på omtrent samme måde som almindelig beton. Letklinkernes særlige egenskaber bevirker dog følgende forskelle.

1. Letklinkerne opsuger en del vand, som derfor unddrages cementpastaen. Når man beregner betonblandingsens egenskaber, skal man derfor fraregne denne vandmængde og kun regne med effektiv vandmængde.
2. I kornfordelingskurverne må man anvende *rumfangsandele* i stedet for vægtandele af de forskellige fraktioner, eftersom korndensiteterne almindeligvis er højere hos de finkornede fraktioner. Ofte bruger man almindeligt sand som finmateriale.

3. Letklinkerkornene er svagere end kornene i sædvanligt tilslag, hvorfor man ved proportioneringen må tage hensyn til klinkerstyrken.
4. Letklinkerkornene vil flyde op og derved fremme afblanding. Dette modvirker man ved at vælge passende konsistens, korngradering og bearbejdningsmetode.

H.H. Bache et al. /20/ har udviklet en proportioneringsmetode for letklinkerbeton. Metoden er sammenfattet i /11/.

Ved letklinkerbeton er det endnu vigtigere end ved almindelig beton, at den teoretiske proportionering kontrolleres og tilpasses efter foregående prøvestøbning.

Egenskaber

Egenskaberne for letklinkerbeton adskiller sig kun fra egenskaberne hos almindelig tung beton i det omfang, som tilslagets densitet, styrke og stivhed influerer på egenskaberne.

Porøsitet og densitet. Porerne i letklinkerne er millimeterstore bobler. Porerne i mørtelen uden om er cementpastaporestruktur, d.v.s. at porestørrelsen ligger fra 1 nm til 100 nm. Der kan indblandes luft i mørtelen som i almindelig beton. De forekommende densiteter på markedet varierer betydeligt mere end for gasbetonen. Der deklarerer værdier fra 600 kg/m^3 til 1200 kg/m^3 .

Fugtforhold. Letklinkerne er i sig selv svagt hygroskopiske, jvf. /17/, figur 8a, kurve 6. (Max. hygroskopisk vandindhold på 0,6 masse %.) Letklinkerbetonens samlede sorptionskurveforløb bestemmes efter de regler, som gælder for beton /11/. Letklinkerbetons leveringsfugtighed er af størrelsesordenen 15-25 masse %. Fugttransportkoefficienterne er hovedsagelig bestemt af det anvendte vand-cementtal (v/c). Værdier kan vurderes ud fra /11/.

Varmeledningstallet følger densiteten, jvf. /16/, figur 3. Det praktiske varmeledningstal varierer mellem 0,4 og $0,8 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{K}$.

Stivhed. Elasticitetsmodulet er lavere end for almindelig beton på grund af, at letklinkerne har mindre stivhed end massive sten. I /11/ angives følgende empiriske formel for E

$$E = 0,05 \sqrt{\rho_d^3 \cdot f_c}$$

hvor ρ_d er tørdensiteten (kg/m^3), og f_c er trykstyrken (MPa).

Krybningen er også større end for almindelig beton, men momentandeformation og krybedeformation følges ad, således at krybetallet kan regnes til at være af samme størrelse som for almindelig beton, d.v.s. at det kan variere mellem 0,5 og 2,5 efter et år. Se videre i /11/.

Styrken følger densiteten. Danske fabrikanter deklarerer trykstyrker mellem 3,5 og 12 MPa og bøjningstrækstyrker mellem 0,6 og 1 MPa.

Varmeudvidelseskoefficienten for letklinkerbeton er på $8-10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, d.v.s. en anelse mindre end for almindelig beton på grund af klinkernes mindre varmeudvidelseskoefficient.

Svind og svelning er lidt større end for almindelig beton på grund af klinkernes mindre stivhed. Fabrikanterne deklarerer svind målt i henhold til DS 434.6 på $100 \times 100 \times 400$ mm prismen på 0,8 ‰.

Holdbarheden er jævnbyrdig med almindelig betons, idet jo cementpastaen, som er den vigtigste holdbarhedsfaktor, nemlig det svageste led i kæden, er det samme i begge tilfælde. Man kan endog hævde, at ved samme styrke er letklinkerbetonens holdbarhed bedre end den almindelige betons, fordi v/c-forholdet er væsentligt lavere.

I modsætning til forholdene hos gasbeton foreligger der ingen alvorlige korrosionsproblemer, når man anvender letklinkerbeton. Vilklarene ved denne betontype må være som ved almindelig beton. Indstøbt stål beskyttes af en cementpasta, som ikke er særlig porøs, og porøsiteten ligger i tilslagspartiklerne. Dæklagene foreskrives i DS 420 til 30, 20 og 10 mm for henholdsvis aggressiv, moderat og passiv miljøklasse, dog aldrig mindre end største kornstørrelse + 5 mm.

Konstruktioner med letklinker er mere brandmodstandsdygtige end almindelige betonkonstruktioner /11/.

KALKSANDSTEN

Bindemidlet i kalksandsten er meget nært det samme som i gasbetonmaterialet. *Udgangsstofferne* er sand, brændt kalk og vand i en jordfugtig blanding, som presses til murstenseмner for siden at damphærdes under tryk i autoklave gennem ca. 8 timer. Herunder dannes sammenbindende kalciumsilikater.

Arbejdet med renere teknologi og genbrug i byggebranchen har ført til en metode, hvor man anvender nedbrudt murværk som råmateriale for produktion af kalksandsten. Mørtlens indhold af kalk gøres aktivt som Ca(OH)_2 ved, at man brænder murværket ved 600–800 °C. Efter knusning og opblanding med vand kan pulveret formes til sten.

Egenskaber

Med almindeligt kvartssand fås lysegrå kalksandsten, der bruges til murværk både i facader og i skillevægge. Med knust synopal eller andre hvide stenedaterialer fremstilles kalksandsten, som er blændende hvide og tidligere havde nogen popularitet til facader. Også pigmenter kan tilsættes, så farvevalget bliver meget righoldigt. Overfladebeskaffenheden varierer man også ved at kløve stenene, så der fremkommer ru synsflader på murværket.

Kalksandsten har tørdensitet på 1700–1800 kg/m³ og bruges lige som teglmursten; men det er mere finporøst end tegl, så det optager og afgiver fugt langsommere end dette. I det hele taget er det et *sammenkittet* materiale med de herfor typiske træk, bl.a. udviser det betragteligt *svind* og *krybning*. Svindet er 0,2–0,5 ‰ ved udtørring til 50 %RF fra våd tilstand.

Trykstyrken angives mellem 15 og 25 MPa, og *elasticitetskoefficienten* til 4 á 10 GPa. *Krybetallet* efter 1 år er 1 á 2.

Minutstugningen kan være 1–2 kg/m², hvilket er omtrent det halve af tallet for teglmursten med densitet 1800 kg/m³ – dette forhold må tages i betragtning ved murerarbejdet.

MØRTLER

En mørtel er en blanding af bindemiddel og sand. Bindemidlet kan være kalk, cement eller murcement. Mørtler med blanding af kalk og cement kaldes kalkcementmørtler. Blandingsforholdene kan variere i det uendelige, men den danske murværksnorm DS 414 (1991) opererer med de i nedenstående tabel viste referencemørtler.

Normmørtler med
blandingsforhold
bestemt efter masse.

Tallene angiver mas-
seforholdene mellem
bindemiddel og sand.

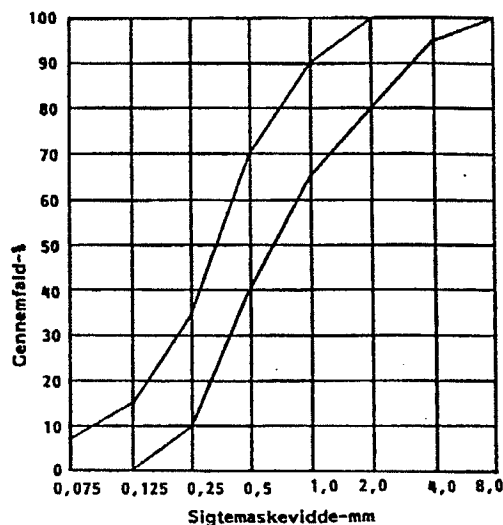
Kalkmørtel Kalkcementmørtler Cementmørtel	
K	100/1200
KC	60/40/850
KC	50/50/700
KC	35/65/650
KC	20/80/550
C	100/400

I det sydlige udland anvendes en del gipsmørtel.

Uanset, hvilken mørteltype der er tale om, skal sandet til en normmørtel være fraktioneret, således at kornkurven ligger mellem grænsekurverne i figur 13. Hvis sandet indeholder for meget materiale med kornstørrelse mindre end 0,25 mm, bliver mørtelen tung og død at arbejde med. Hvis sandet er for groft, giver det mørtelen dårligere vandholdende egenskaber. Hvis sandet er for enskornet, får det unødvendigt stort vandbehov, og mørtelens tilbøjelighed til at udskille vand øges.

Figur 13.

Sand til normmørtel skal ifølge DS 414 være fraktioneret således, at kornkurven bestemt ifølge DS 405.9 ligger imellem de grænsekurver, som er vist i figuren.



I såkaldt tørtørtel foreligger kalken tørlæsket til Ca(OH)_2 . Disse mørtler kan leveres fra fabrik i korrekte blandingsforhold, hvorefter der kun skal tilsættes vand på byggepladsen.

Ved fremstilling af mørtler skal der anvendes en såkaldt tvangsblender. Sand og bindemiddel tilsættes først, herefter vand, til en passende konsistens er opnået. Blandetiden skal være fire minutter, efter at alle materialer er tilsat. Dette gælder ikke mindst ved anvendelse af såkaldt tørtørtel. Nyere undersøgelser peger på, at blandetiden skal være endnu længere.

Anvendes våd kalkmørtel, må man fremstille kalkcementmørtel på byggepladsen ved at tilsætte cement i passende mængde, jvf. /11/.

Mørtels egenskaber er beskrevet i /4/ og i /24/.

MURVÆRK

Ved murværk er sten holdt sammen med mørtel.

Stenene kan være tegl, gasbeton, kalksandsten, betonblokke eller natursten.

Murværk bliver oftest udført i forbandt, dvs. at de lodrette fuger i stenlagene er forskudt i forhold til hinanden.

For området gælder DS 414, "Norm for murværkskonstruktioner".

Murværks egenskaber og beregning af murværk er indgående beskrevet i /4/ og i /24/, /25/ og /26/.

LITTERATUR

En del af de nedenfor nævnte referencer er medtaget af hensyn til dokumentation for de i notatet givne oplysninger. Mange af dem er af ældre dato og kan ikke let fremskaffes. De referencer, som er enkelt tilgængelige, og som egner sig til videre studium, er mærket med *.

- /1/ E. Suenson: "Byggematerialer". Lærebog, København, 1911.
- /2/ E. Suenson: "Byggematerialer, 3. Natursten". Gjellerup, København, 1942.
- /3/ S.G. Bergström, m.fl.: "Bygningsmaterialer, grundlæggende egenskaber". DIA-B, Lyngby, 1974.
- * /4/ Dürrhop, Saretok, Sneek, Svendsen: "Mørtel, muring og pudsning". SBI Anvisning 64, 2. udgave, Hørsholm, 1981.
- /5/ G.M. Idorn: "Grundtræk af betontechnologien I, Cement". PF, København, 1958.
- * /6/ F.M. Lea: "The Chemistry of Cement and Concrete". 3. udgave. Edv. Arnold, Glasgow, 1970.
- * /7/ E. Hagemann: "Gips", PF, Lyngby, 1977.
- /8/ Jørn Jessing: "Tegl og mørtel". Danmarks Ingeniørakademi, Bygningsafdelingen, 1967.
- /9/ R. Houwink: "Elasticität, Plastizität und Struktur der Materie (Kap. 13, Ton)". Verlag Theodor Steinkopff, Leipzig, 1958.
- * /10/ C. Falk: "Tegl, mørtel, murværk - egenskaber". Tegl 10, Murerfagets Oplysningsråd, København, 1980.
- * /11/ Herholdt, Justesen, Nepper-Christensen, Nielsen: "Beton-Bogen", 2. udgave, Aalborg Portland, 1985.
- * /12/ E. Hagemann: "Byggematerialer, Grundbog". 3. udgave. Polyteknisk Forlag, 1981.
- /13/ K. Persson, N.E. Willen: "Hållfasthetsegenskaper hos ånghärdad lättbetong".
- /14/ H. Weibull: "Mätning av värmeledningstallet för byggnadsmaterial". Statens Provningsanstalt, Stockholm. Medd. 117, 1965.
- /15/ Anders Nielsen, Erik Trudsø: "Tegl, gasbeton og andre silikatbygningmaterialer", Polyteknisk Forlag, 1978.
- * /16/ Anders Nielsen, Lene Rathkjen: "Bygningsmaterialers egenskaber", Afsnit 1 i Kompendium 7 i B-Retningens Grundkursus, DTH, 4. udgave, 1986.
- * /17/ Anders Nielsen: "Fugt i bygningmaterialer". Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH, Teknisk Rapport 172/87, Lyngby, 1987.
- * /18/ T.C. Hansen: "Beton i henhold til DS 411-84". Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH, Teknisk Rapport 146/86, 2. udgave, Lyngby, 1986.

- * /19/ H.H. Knutsson: "Godkendelses- og kontrolordninger for byggevarer", SBI-Anvisning 122, 2. udgave, Hørsholm, 1986.
- * /20/ H.H. Bache, A. Mikkelsen, E.J. Pedersen: "Proportionering af let konstruktionsbeton". Beton-Teknik 1/06/1976, CtO, Aalborg Portland, 1976.
- /21/ S.G. Bergström, A. Nielsen, L. Ahlgren, G. Fagerlund: "Byggnadsmateriallära. Kompendium, Tekniska Högskolan i Lund, 1970.
- /22/ A. Nielsen: "Rheology of Building Materials". Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm D6:1972.
- * /23/ C.B. Nielsen: "Salts in Porous Building Materials". Laboratoriet for Bygningmaterialer. DTH, TR 243/91. Lyngby, 1991.
- * /24/ H.H. Knutsson: "Murværk. Materiale og egenskaber". SBI-rapport 223, Hørsholm 1992.
- * /25/ H.E. Jensen: "Murværk". Afdelingen for Bærende Konstruktioner. DTH. Serie F, no 132.
- * /26/ Murerfagets Oplysningsråd: "Murværk", beregningsmetoder. Rambøll og Hannemann, Rådgivende Ingeniører A/S. København 1987.