

Beton og Brand

af Thorkild H. Rasmussen og Elo Yde

Emneord: Beton, brand, cement, deformation, elasticitet, fugt, reparation, revner, stål, temperatur, tilslag, trykstyrke, varmeledningsevne.

BETON-TEKNIK



Beton anses nu som tidligere for at være et godt byggemateriale, set ud fra et brandteknisk synspunkt. Når denne opfattelse har kunnet brede sig, skyldes det ikke mindst den viden, der findes omkring betons opførsel ved høje temperaturer. Beton nærer ikke ilden og afgiver ikke brandbare gasser. Den har en stor varmekapacitet og en, i forhold til stål, lav varmeledningsevne. Betonkonstruktioner med store tværsnit vil således være meget længe om at blive opvarmet så meget, at bæreevnen bliver utilstrækkelig.

Denne publikations formål er at sammenfatte og oplyse om betonmaterialets opførsel ved høje temperaturer, således at der kan tages højde for også dette aspekt ved sammensætning og materialevalg til beton.

Beton er et ikke brandbart materiale sammensat af cementpasta og tilslag, hvor cementpastaen binder tilslaget sammen til en stærk og hård masse. Cementpastaen og tilslaget har imidlertid forskellige fysiske og kemiske egenskaber, og det sammensatte materiales egenskaber vil derfor være et samspil mellem delmaterialernes egenskaber. Visse materialeegenskaber kan beskrives ved hjælp af relativt enkle modeller, hvorimod der for andres vedkommende er tale om en ganske kompliceret vekselvirkning mellem delmaterialerne, som kun kvalitativt kan vurderes på forhånd. Ved temperaturpåvirkninger under normale klimaforhold, har man et forholdsvis godt kendskab til såvel delmaterialerne som til

den sammensatte betons egenskaber. De begrænsede temperaturvariationer giver ikke anledning til, at der optræder vekselvirkninger, som ændrer afgørende på betonens egenskaber.

I en brandsituation, hvor temperaturen pludselig varierer med en faktor 10-30 ud over den normale variation, vil man imidlertid ikke længere kunne se bort fra, at delmaterialernes fysiske og kemiske egenskaber rent faktisk er forskellige.

I det følgende gennemgås de væsentligste aspekter i forbindelse med delmaterialernes egenskaber og deres vekselvirkning ved høje temperaturer, samt hvorledes dette indvirker på det sammensatte materiale, betonen.

Delmaterialer

Cementpasta

Cementpasta er en blanding af cement og vand, som efter omhyggelig sammenblanding vil hærde op til en hård og stærk masse.

Under opvarmning af cementpastaen afgives gradvis vand som følge af dekomponering. Ved temperaturer over ca. 500°C omdannes calciumhydroxid til »brændt kalk«, som ved senere fugtpåvirkning kan ødelægge betonen.

Cementens fire klinkerminerale C_3S , C_2S , C_3A og C_4AF , se [1], reagerer kemisk med vandet og danner et kompliceret netværk af reaktionsprodukter, som giver blandingen styrke.

Klinkermineraleernes reaktionsprodukter, der er stabile ved temperaturer under 100°C, vil ved højere temperaturer gradvis dekomponere og fraspalte vand, som overgår til dampform. De enkelte klinkermineraleers reaktionsforløb er detaljeret beskrevet i [2].

C_3S . Forsøg viser, at hydratiseret C_3S gennemgår tre reaktioner i intervallerne hhv. 490-540°C, 770-810°C og 855-950°C. Herudover forsvinder der gradvis vand ved opvarmning op til ca. 450°C. Den første reaktion skyldes vandafgivelse fra calciumhydroxid dannet ved hydratiseringen. Den anden reaktion er endnu ikke klarlagt, mens den tredje reaktion tilskrives spaltning af calciumcarbonat dannet af calciumhydroxid under optagelse af CO_2 fra luften.

Trykstyrken øges ved opvarmning indenfor de første 200°C. Dette skyldes en efterhydratisering samt en varmeudvidelse, således at der kompenseres for det ved fordampning afgivne vand. Samtidig sker der en forstærket krystalvækst i calciumhydroxiden. Fra 300-480°C udvider de enkelte korn sig ikke, men restgelfractionen af C_2S (jf. senere) dehydrerer og aftager i volumen. Det giver anledning til indre spænding og dermed revnedannelse. I intervallet 490-540°C de-

hydrerer calciumhydroxiden og danner CaO og vanddamp. Foregår opvarmningen så hurtigt, at den dannede vanddamp ikke kan undslippe, opbygges et indre tryk, som kan forårsage afskaling eller sprængning af betonen. Ved påvirkning af fugtig luft efter afkøling fra temperaturniveau over ca. 500°C, sker der under ekspansion en delvis læskning af det nydannede CaO , hvilket giver anledning til kraftig revnedannelse.

C_2S . Forsøg med hydratiseret C_2S viser, at der, bortset fra vandafgivelse, ikke sker væsentlige reaktioner ved opvarmning fra 20 til 900°C. Vandafgivelsen sker jævnt over et bredt temperaturområde, og der dannes ingen fri CaO .

Trykstyrken øges næsten 100% ved opvarmning til 300°C, da vandafgivelsen medfører en tættere gel. Der foreligger en række laboratorieresultater om det videre styrkeforløb, som generelt viser en styrkereduktion i området 600-1000°C, hvorefter styrken forøges kraftigt.

C_3A . Ved opvarmning op til 190°C af renhydratiseret C_3A iagttages en ekspansion, hvorefter en afgivelse af krystallinsk bundet vand medfører svind. Ved temperaturer mellem 450-500°C nedbrydes C_3As krystalgitter under udskillelse af frit CaO . Ved 1200°C sammensintres materialet. Trykstyrken har et maksimum ved ca. 230°C, hvorefter der ved opvarmning indtræder et styrkefald. Trykstyrken øges igen ved temperaturer over 550-590°C.

C_4AF danner ved hydratisering C_3AH_6 og CFH_n . Komponenterne ekspanderer op til en temperatur på 80°C og svinder derefter i temperaturintervallet 180-300°C; derefter opstår der igen ekspansion. CFH_n følger en styrkeudvikling som C_2S , mens C_3AH_6 danner mere komplekse varianter. Fra 300 til 450°C indtræder et kraftigt svind, og trykstyrken tiltager. Ved 450-500°C udskilles CaO som ved C_3A .

Da cementpasta altid består af hydratiseringsprodukter fra flere klinkerminerale danner disses indbyrdes samspil grundlag for pastaens opførsel under opvarmning. Man kan ikke direkte forudsige en cementpastas egenskaber på grundlag af klinkersammensætningen, men det antages, at en cement med et højt C_2S -indhold er bedst egnet ved brandpåvirkning.

V/c-forholdet har afgørende betydning for den hærdnede pastas egenskaber. Jo lavere v/c, jo stærkere og tættere pasta. Også en række andre egenskaber, så som varmeledningsevne, hydratiseringsgrad, porøsitet etc. afhænger af v/c.

Udover den vandmængde, som bindes kemisk i reaktionsprodukterne, indeholder cementpastaen noget fordampeligt vand, hvoraf en del langsomt vil forsvinde ved udtørring til omgivelserne. Noget af det fordampelige vand er fysisk så kraftigt bundet i pastaen, at det først kan bringes på dampform ved opvarmning til over 100°C . Klinkermineraleernes reaktionsprodukter, som udgør hovedandelen af cementpastaen, dekomponerer som nævnt ved opvarmning ud over 100°C gradvis og fraspalter vand. En termogravimetrisk undersøgelse illustrerer denne proces, se figur 1. Denne udtørring/afvanding af cementpastaen medfører, at materialets naturlige varmeudvidelse overlejres af et betydeligt svind, som gør, at cementpastaens deformation under opvarmning forløber, som anført i figur 2.

Figur 2 må ikke opfattes som dækkende alle forhold, idet v/c-forhold hærtningsgrad m.m. influerer på forløbet. Kurverne viser dog det principielle, at der ved opvarmning af cementpasta er et temperaturområde, hvor der i modsætning til de fleste andre materialer, optræder et svind.

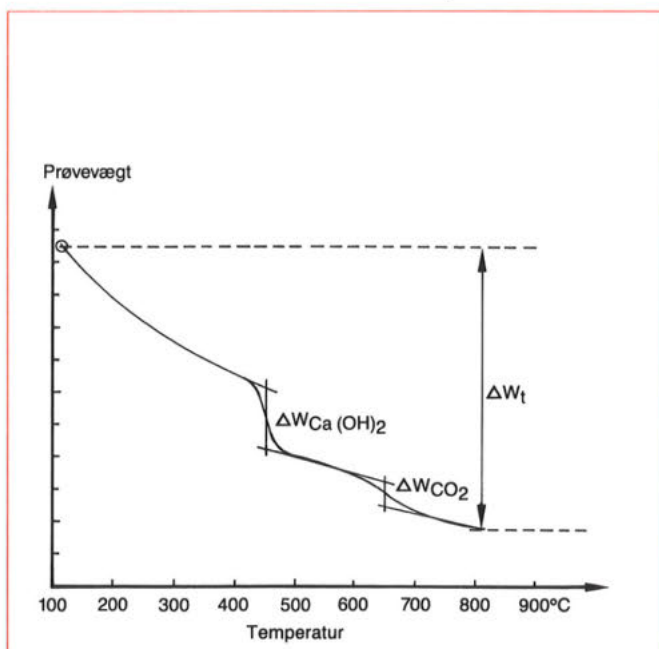
De ovenfor omtalte reaktionsprocesser er delvist irreversible ved senere afkøling, idet udtørringssvindets bidrag kun udlignes i den udstrækning pastaen er i stand til at optage fugt fra omgivelserne.

Den vandmængde, som reaktionsprodukterne fraspalter, optræder på dampform, og vil sammen med den øvrige fugt bidrage til et damptryk i pastaens poresystem. Alt afhængig af opvarmningshastighed, temperaturniveau, fugtmængde og diffusionsmodstand, optræder der således et indre tryk, som bevirker en deformation (ekspansion) af cementpastaen. Under ugunstige forhold kan damptrykket blive så stort, at der sker afskalning eller sprængning af pastaen.

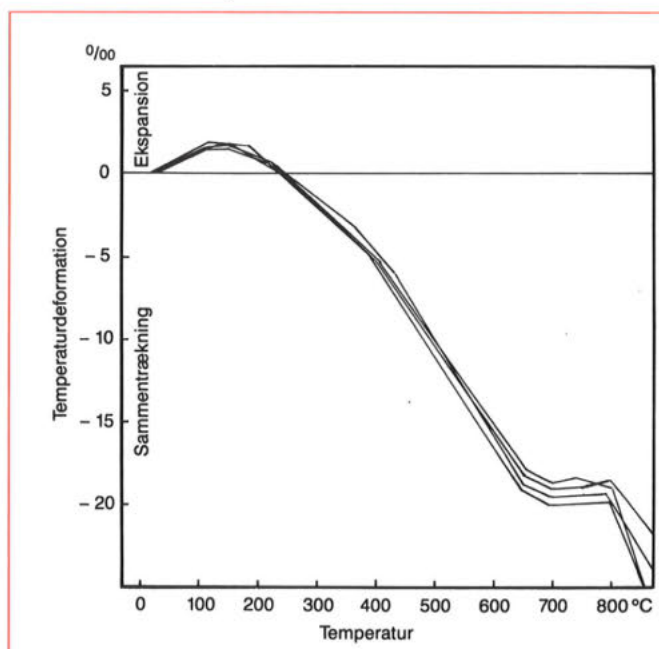
Pastatrykstyrken stiger ved temperaturer op til ca. 200°C , hvorefter den falder til stort set begyndelsesniveau før 500°C . Hvis cementpastaen efter en opvarmning til over ca. 500°C atter får mulighed for at optage vand, reagerer CaO («brændt kalk»), som er fremkommet ved afvanding af calciumhydroxid, med vand under ekspansion. Denne ekspansion kan være så voldsom, at pastaen ødelægges, og kan dermed bevirke et betydeligt styrkefald i perioden efter brandpåvirkningen.

For at undgå denne proces foreslår litteraturen [9, 10, 14] at iblande puzzolan (f.eks. flyveaske eller mikrosilica). Dette har effekt, hvis der opvarmes til over 700°C .

Varmeledningsevnen for cementpasta afhænger af v/c og fugtindhold, men er ved 20°C omkring $1 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$. Ved stigende temperatur aftager fugtindholdet, og varmeledningsevnen falder. Indflydelsen fra revnedannelse o.l. har ligeledes indflydelse på varmeledningsevnen størrelse.



Figur 1. Måling af kemisk bundet vand ved termogravimetri. Dekomponeringen optræder som vægttab ved stigende temperatur [3].



Figur 2. Temperaturdeformationer af fire cementmørtler med v/c = 0,4 [4].

Tilslagsmaterialer

Tilslagsmaterialerne udgør normalt omkring 70-80% af en betons volumen og har således en afgørende indvirkning på betonens opførsel, også ved udsættelse for høje temperaturer. Materialerne graves eller brydes i de fleste tilfælde i nærheden af betonblandingeanlægget, og materialerne vil derfor i reglen være lokalt bestemte. Danske tilslagsmaterialer er stort set ensartede og består hovedsageligt af flint- og granitlignende materialer indeholdende mineraler som feldspat og kvarts. Disse mineraler optræder også i danske sandmaterialer, hvor de ligeledes er dominerende. Herudover findes lokalt kalkkorn samt få andre mineraler og bjergarter. Desuden benyttes importerede materialer som basalt, diabas, pimpsten og kalksten i form af marmor o.l. samt kunstigt fremstillede materialer som f.eks. letklinker.

Ved temperaturpåvirkninger op til 100°C giver tilslagsmaterialerne ikke anledning til skadelige reaktioner som følge af varmeudvidelsen. Tilslaget og cementpastaens varmeudvidelseskoefficienter er i dette temperaturinterval nogenlunde ens, 4-12 x 10⁻⁶/°C [6].

Når tilslagsmaterialerne udsættes for højere temperaturer ændres denne situation, idet tilslagsmaterialerne reagerer forskelligt alt afhængig af deres mineralogiske sammensætning. Dette skyldes, at de forskellige mineraler har forskellige varmeudvidelseskoefficienter ved højere temperaturer. Varmeudvidelseskoefficienterne stiger som regel med stigende temperatur [8], se tabel 1.

Bjergarternes kornstørrelse har ligeledes indflydelse på temperaturreaktionerne, idet finkornede materialer generelt er mere holdbare end grovkornede. Deformation ved opvarmning er for grovkornede materialer ofte irreversibel efter afkøling.

Generelt har naturlige tilslag en lav varmeledningsevne (1-10 W/m°C) som falder ved stigende temperaturer.

Kvarts forekommer i langt de fleste tilslagsmaterialer (granit, sandsten, søsand, bakkesand etc.) og har en af de højeste varmeudvidelseskoefficienter. Opvarmning af kvarts til 500°C vil resultere i en volumenekspansion på ca. 2,8%, men ved 573°C opstår der en mere signifikant ændring, idet α -kvarts omdannes til β -kvarts med en deraf følgende yderligere volumenekspansion på ca. 2,4%. Man vil således for kvartsholdige tilslagsmaterialer observere en øget ekspansion på dette temperaturniveau, se figur 3. Processen er reversibel.

Feldspat udviser ikke denne såkaldte fase transformation, men fortsætter med lav ekspansion til høje temperaturer. Generelt er feldspatter stabile ved høje temperaturer og ifølge [8] er feldspatten anorthite særlig stabil og kan tåle opvarmning

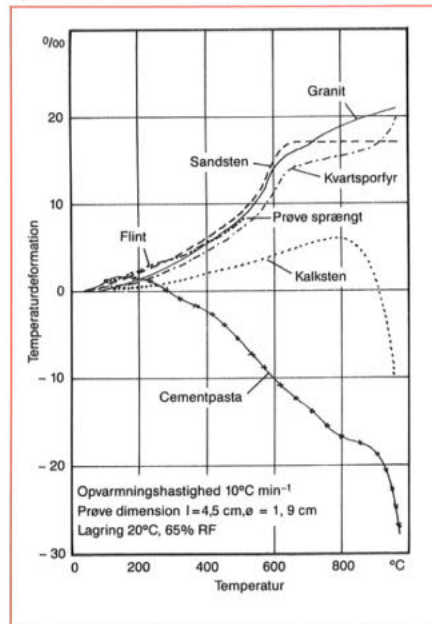
op til 1000°C uden nævneværdig skade, se også tabel 1.

Kalksten udviser ikke samme forløb og har i øvrigt lavere varmeudvidelseskoefficient end hovedparten af det øvrige naturlige tilslag. Ved temperaturer på 650-700°C, sker der en omdannelse (kalcinerings) af calciumkarbonaten til calciumoxid og kuldioxid, hvorved der sker en volumenformindskelse af materialet, se figur 3. Når kalcineringen har fundet sted, vil materialet forekomme som »brændt kalk«, som efter afkøling vil kunne reagere med vand under volumenforøgelse, analogt med forholdene i cementpasta.

Flint optræder i naturen i forskellige varianter med forskellige porøsiteter. Den vandmængde, som måtte findes i porerne, overgår ved temperaturstigning til over 100°C til dampform. Da flint sædvanligvis er meget tæt, kan dette medføre så store indre damptryk, at stenen sprænges, se figur 3.

Tilsvarende kan forekomme for andre tætte tilslagsmaterialer, som indeholder vand, f.eks. sandsten, eller, som tidligere nævnt, for cementpasta.

Vulkanske materialer. Materialer som basalt, diabas og pimpsten udviser en forholdsvis lav varmeudvidelseskoefficient og er derfor brugbare til betons udsat for høje temperaturer [9]. Dog nævner [8], at basalt opvarmet til over 600°C udviser stigende



varmeudvidelseskoefficient og, at der ved temperaturer over 900°C kan ske kraftig ekspansion som følge af gasudvikling. Pimpsten må anses som mere velegnet til ildfast beton som følge af dens lave varmeudvidelseskoefficient og den meget porøse struktur, som både nedsætter varmeledningsevnen og forhindrer opbygning af damptryk. Herudover kan nævnes, at bestemte typer tuf og porfyre kan være velegnede.

Det kan endvidere nævnes, at der kan anvendes moler (en blanding af kisel, ler og vulkansk aske) kalcineret diatom jord (næsten rent kisel) eller andre puzzolaner til ildfast beton [9].

Kunstigt tilslag. Letklinker er det altdominerende kunstige tilslag i Danmark. Klinkerne er ved fremstillingen brændt ved 1000-1100°C og nedbrydes derfor ikke ved brand. Desuden har de en mindre varmeudvidelseskoefficient end naturlige sten og en mindre varmeledningsevne. Derudover bevirker den åbne porøse struktur, at der ikke opstår damptryk i materialet. Endvidere kan højovns slagge, alt efter sammensætningen, tåle høje temperaturpåvirkninger.

Ildfaste materialer. Til brug ved fremstilling af ildfast beton benyttes i øvrigt materialer som chamotte, bauxit, korund samt magnesium- og chromoxider [9], [10].

Figur 3. Temperaturdeformation for forskellige tilslag og cementpasta [7].

Tabel 1. Eksempler på varmeudvidelseskoefficienters ændring ved forskellige temperaturintervaller for forskellige bjergarter [8].

Temperatur-interval	Varmeudvidelseskoefficient, $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$			
	Sandsten	Kalksten	Anorthosit (feldspat bja.)	Granit
20 til 100°C	10,0	3,0	4,0	4,0
100 til 300°C	15,0	9,0	8,5	13,5
300 til 500°C	21,5	17,0	10,0	26,0
500 til 700°C	25,0	33,0	12,5	47,5

Armeringsstål

Temperaturens indflydelse på armeringsståls mekaniske egenskaber er i høj grad afhængig af, hvilken ståltype, der er tale om.

For almindeligt varmvalset stål (blødt stål) vil der optræde en gradvis styrkereduktion, som ved 600°C udgør ca. 50% af den oprindelige trækstyrke. Efter afkøling vil denne ståltype stort set genvinde styrken 100%, hvilket kan være af stor betydning for konstruktionens fortsatte anvendelse. Kamstål, som er et legeret stål, udviser en lidt større styrkereduktion, idet trækstyrken halveres ved ca. 500°C. Legerede stål genvinder ved afkøling størstedelen af den oprindelige trækstyrke, dog kan der for visse typer legerede stål optræde en blivende reduktion, hvis temperaturen har været over ca. 500°C. Legerede stål, som kan svejdes, udviser den bedste opførsel under en brandpåvirkning.

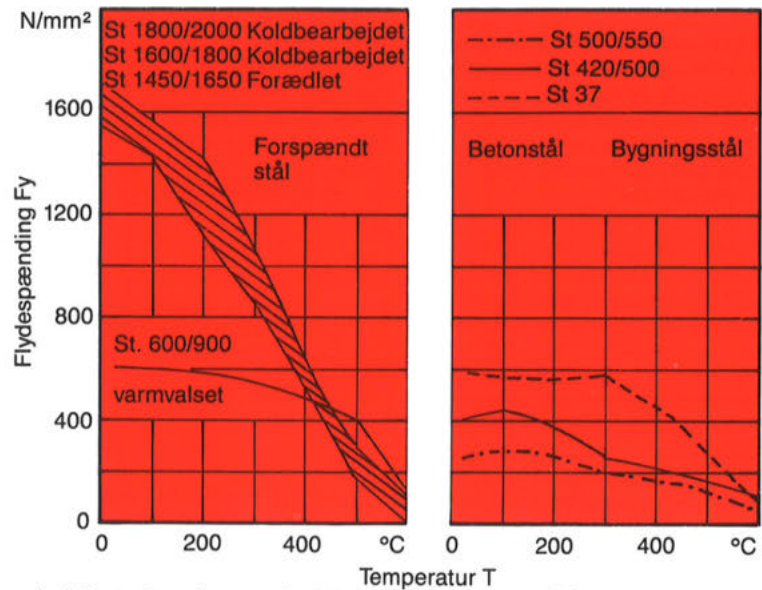
For kolddeformerede ståltyper, som f.eks. tentonstål, bevirker en opvarmning, at effekten af hærdningen gradvis forsvinder, og der er for disse ståltyper tale om en blivende styrkereduktion.

Stål til spændarmering er ofte legerede stål, som samtidig er kolddeformerede, og disse ståltyper er derfor ofte særlig følsomme overfor høje temperaturer. Det forhold, at spændarmeringen som regel er belastet mere end slap armering bevirker, at krybning og spændingsrelaksation af såvel beton som armering er mere udtalt i forspændte konstruktioner.

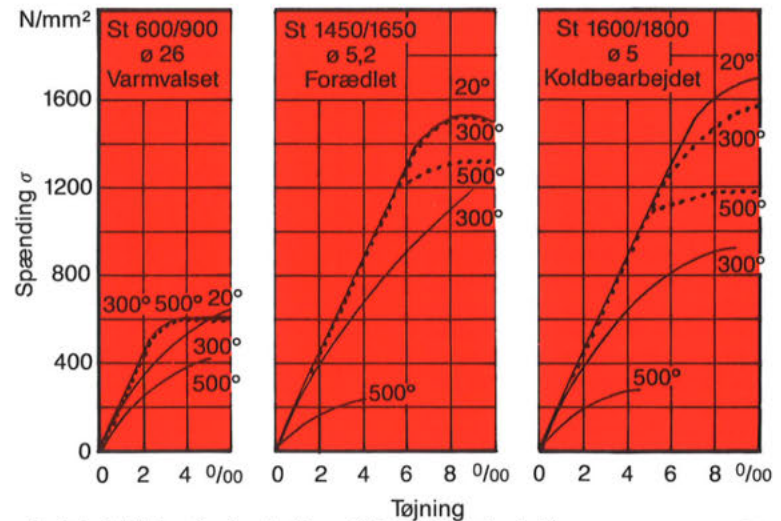
Figur 4 og 5 viser eksempler på forskellige ståltypers opførsel ved høje temperaturer.

Ståls elasticitetsmodul aftager med stigende temperatur, og det er igen den kolddeformerede armering, som udviser den største reduktion, se figur 6.

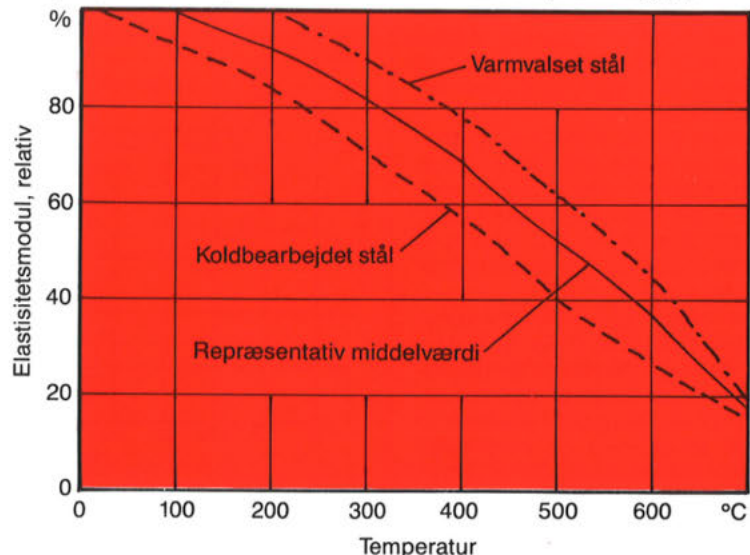
Varmeudvidelseskoefficienten er 1,0-1,3 x 10⁻⁵ W/°C op til ca. 800°C, hvorefter der optræder en mindre kontraktion inden udvidelsen fortsætter. Varmeledningsevnen ligger i området fra 20-70 W/m°C afhængig af ståltypen.



Figur 4. Ståls trækstyrke som funktion af temperaturen [7].



Figur 5. Arbejdslinier for forskellige ståltyper ved forskellige temperaturer. Stiplede kurver antyder, at stålet er prøvet ved 20°C efter 1 times opvarmning [7].



Figur 6. Elasticitetsmodul for forskellige ståltyper som funktion af temperatur [7].

Beton

For et sammensat materiale som beton genfinder man naturligt de egenskaber, som kan konstateres for delmaterialerne. Herudover kan der imidlertid forekomme en vekselvirkning (undertiden med negativt resultat), som bevirker, at der herudover opstår forhold, som ikke kan henføres til et enkelt delmateriale.

De egenskaber, der har betydning for betonens opførsel ved høje temperaturer er som nævnt, kemiske forandringer med volumenændringer eller gasafgivelse til følge samt forandringer af de fysiske parametre som varmeudvidelseskoefficient og varmeledningsevne. Derudover har betonsammensætningen, fugtindhold og temperaturforløbet også afgørende betydning på betonens opførsel.

For beton er der således uoverensstemmelse mellem cementpastaen og tilslagsmaterialerne samt armering med hensyn til deres udvidelse under opvarmningen. Cementpastaen undergår et svind som følge af udtørring og dekomponering af reaktionsprodukterne, hvorimod de øvrige materialer alle udviser en ren temperaturudvidelse, se figur 3.

Tilslaget udgør som nævnt ovenfor 70-80% af betonens volumen, og da tilslaget tilmed har højere elasticitetsmodul end cementpastaen, vil det være tilslagets varmeudvidelse, som dominerer betonens termiske deformation. Figur 7 viser forholdene for forskellige tilslagsmaterialer, medens figur 8 viser, hvorledes koncentrationen af tilslag influerer på betonens udvidelse.

Betons varmeledningsevne er af stor betydning, idet den lave varmeledningsevne forhindrer en hurtig gennemopvarmning af de enkelte betonemner.

Varmeledningsevnen afhænger bl.a. af betonens fugtindhold, idet den aftager med voksende udtørringsgrad. Af figur 9 fremgår det, at der er et brat fald i temperaturområdet over 100°C, hvorefter der ved 200°C og herover er et mere jævnt forløb. Derudover har betonen en stor varmekapacitet, og betonkonstruktioner med store tværsnitsdimensioner er derfor længe om at blive opvarmet så meget, at bæreevnen bliver utilstrækkelig.

Spinkle konstruktioner, som f.eks. spændbetonbjælker og slanke søjler af højstyrkebeton kan imidlertid lettere gennemvarmes i hele tværsnittet (ved typiske brandforløb i løbet af en times tid), således at betonen bliver ødelagt. Dette forhold er illustreret i figur 10.

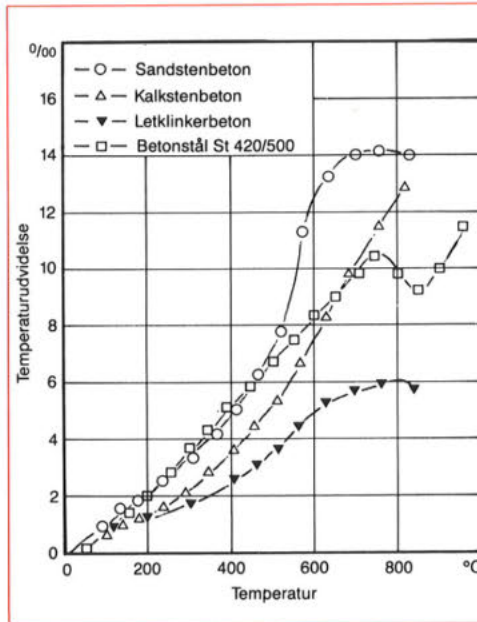
Foruden at influere på varmeledningsevnen har fugtindholdet også stor betydning for betonens begyndende deformationsforhold under brandforløbet, idet et fugttab under normale betingelser resulterer i et svind. Ved opvarmning af vandmættet beton afgives det frie vand i form af damp. En total udtørring som følge af opvarmning kan resultere i et svind på over 2 vol.-% af cementpastaen. Et velgraderet tilslag be-

grænser dog svindet til omkring 1/10 heraf [12].

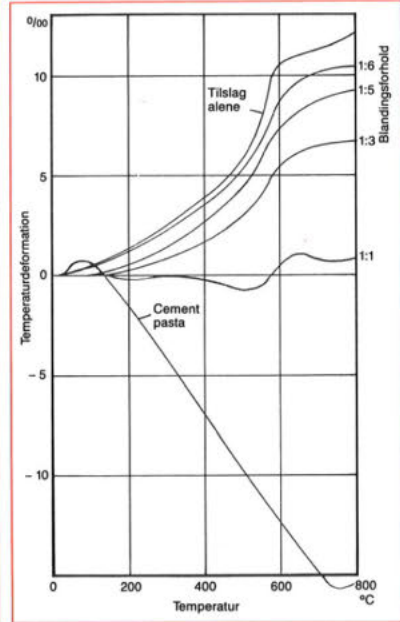
Udover fugtindholdet influerer typen af tilslag på varmeledningsevnen, men så længe der er tale om sædvanlige naturlige tilslagsmaterialer, er indflydelsen herfra begrænset.

Når beton udsættes for brandpåvirkning i

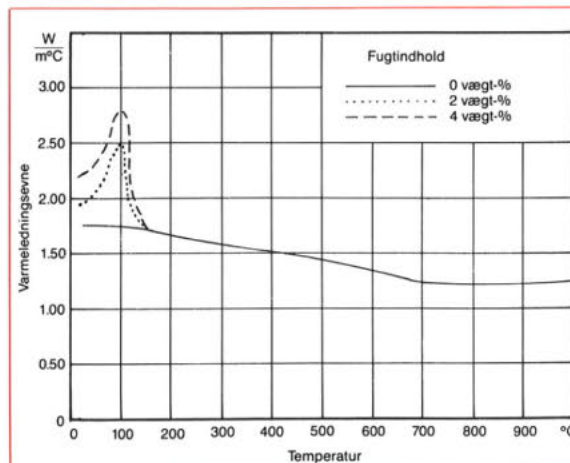
længere tid, sker der ofte det, at de yderste lag af betonen sprænges af som følge af varmeudvidelsen i forhold til de indre lag og trykket fra indespærret vanddamp. Dette er mest udpræget ved hjørner af bjælker og søjler. Fugtig beton er mere udsat for sådanne afsprængninger end tør beton.



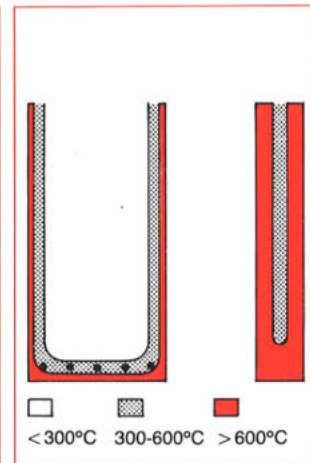
Figur 7. Betons temperaturudvidelse som funktion af tilslagstypen og betonstål [7].



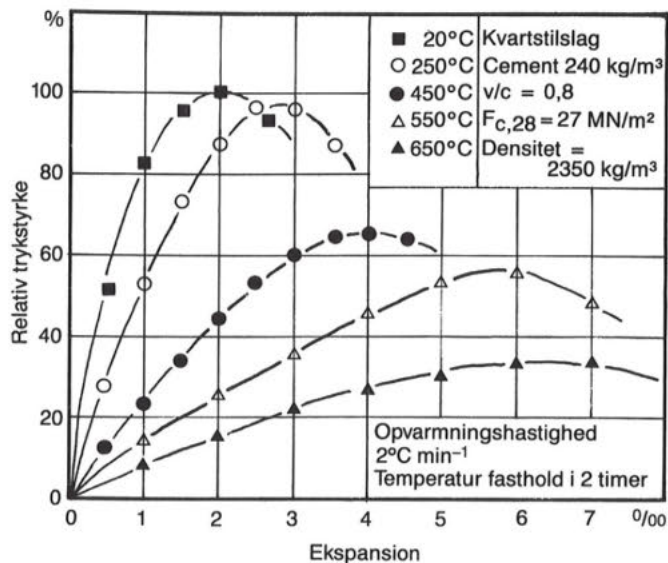
Figur 8. Betons temperaturudvidelse som funktion af tilslagsmængden [5].



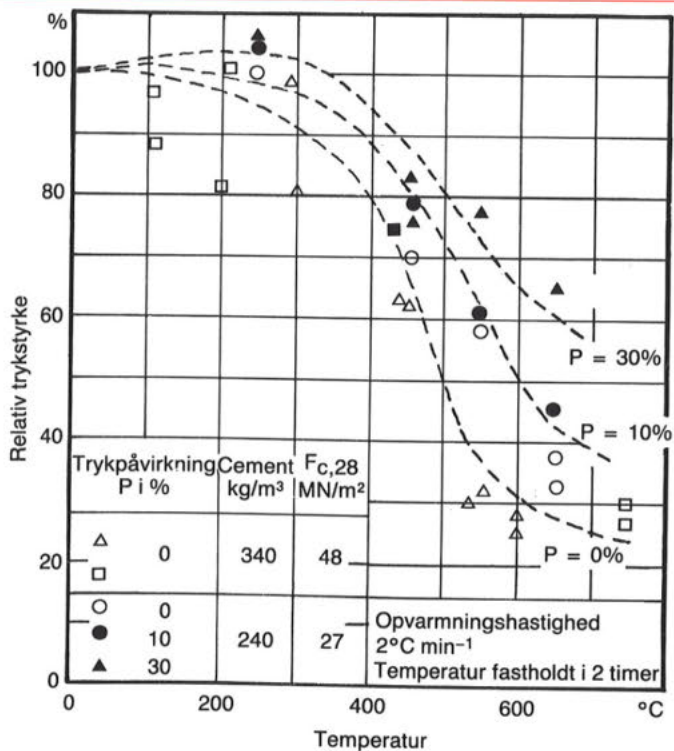
Figur 9. Betons varmeledningsevne som funktion af temperaturen [7].



Figur 10. Temperaturprofiler i en kraftig og en spinkel betonkonstruktion efter en times standardbrandpåvirkning [15].



Figur 11. Arbejdslinier for beton ved forskellige temperaturer [7].



Figur 12. Trykstyrke som funktion af temperaturniveau [7].

Højstyrkebeton (150-200 MN/m²), hvor porøsiteten er stærkt formindsket, f.eks. ved anvendelse af mikrosilica, har større risiko for at afsprænge dæklag og muligvis udvise ligefrem eksplosionsagtig pulverisering. Fænomenet er beskrevet i [13], som konkluderer, at problemet ikke er særligt stort for silicabeton med styrke op til 70 MN/m².

Under slukningsarbejdet kan afsprængninger også forekomme på grund af de store temperaturspændinger, der opstår, når koldt vand sprøjtes på den ophedede beton.

Den temperatur, ved hvilken revnerne fremkommer, afhænger bl.a. af tilslagstype og korngradering. Men erfaringer tyder på, at der ved 300-400°C optræder en begyndende revnedannelse, som udvikles ved højere temperaturer.

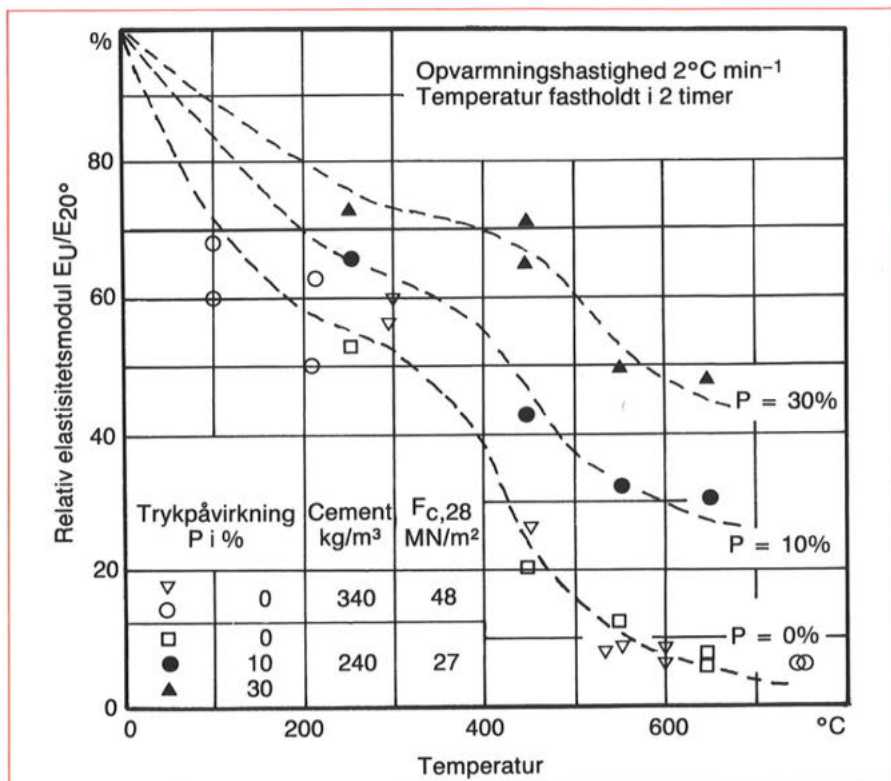
Når temperaturen passerer området 490-540°C, begynder cementpastaens calciumhydroxid som nævnt ovenfor at afvande og omdannes til CaO («brændt kalk»). Afhængig af betonens tæthed, der sandsynligvis er reduceret på dette tidspunkt som følge af revnedannelse kan der optræde så høje damptryk, at betonen sprænges.

Beton, som har fået afvandet calciumhydroxiden, kan ved genfugtning ødelægges af den indre ekspansion som fremkommer, når det »brændte kalk« reagerer med vand.

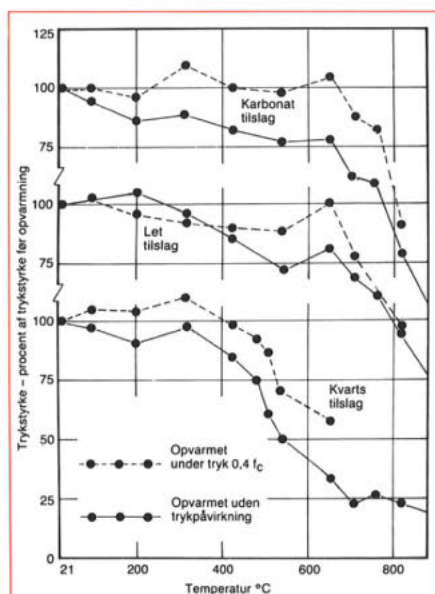
Revnedannelsen giver anledning til reduktion af betonens styrke og stivhed. I figur 11 er der vist en række arbejdslinier for kvartstilslagbeton ved forskellige temperaturniveauer.

Det fremgår heraf, at trykstyrken og ikke mindst elasticitetsmodulet falder med stigende temperatur. Figur 12 og 13 viser trykstyrke hhv. elasticitetsmodul som funktion af temperaturniveauet.

På figurerne ses også, at en vis forlast (p%) mindsker reduktionen, hvilket forklares ved, at en forbelastning (tryk) af pastaen bibringer denne en trykdeformation, som skal overvindes af tilslagets varmeudvidelse, inden der begynder at optræde trækspændinger i pastaen [2].

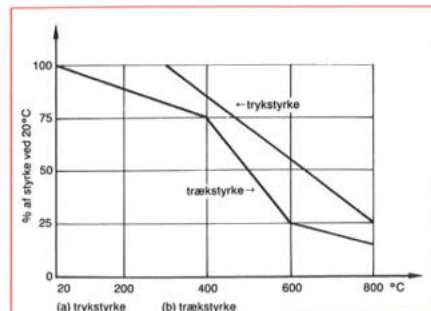


Figur 13. Elasticitetsmodul som funktion af temperaturniveau [7].

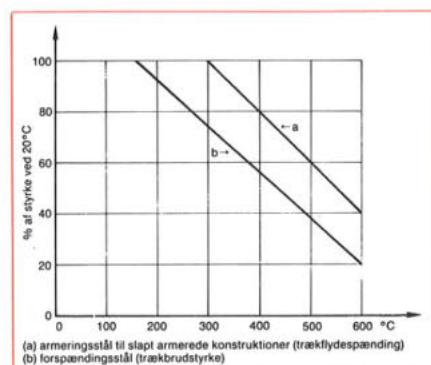


Figur 14. Trykstyrke som funktion af temperaturniveau [5].

Samme effekt ses på figur 14 omend den synes mindre. Figur 14 illustrerer endvidere, at anvendelse af ikke kvartsholdige tilslagsmaterialer giver væsentlig forbedrede styrker ved temperaturer over kvarts transformationspunkt ved 573°C. Ved temperaturer over 600-700°C er betonens reststyrke yderst ringe (10-20% af udgangsstyrken), og der forekommer et udbredt netværk af revner i materialet. Svækkelsen af materialet vil som tidligere nævnt fortsætte efter afkøling, hvis den »brændte kalk« får mulighed for at reagere med vand, og generelt kan siges, at genanvendelse af beton, som har været opvarmet til 500°C eller derover kan være betænkeligt på grund af tilstedeværelsen af »brændt kalk«.



Figur 15. Betons tryk- og trækstyrke i varm tilstand som funktion af temperaturen [19].



Figur 16. Armeringsståls trækstyrke i varm tilstand som funktion af temperaturen.
a: Armeringsstål til slapt armerede konstruktioner (trækflydespænding).
b: Forspændingsstål (trækbrudsstyrke).

For armeret beton er der ikke samme konflikt mellem betonens og stålets termiske udvidelse, idet de tilnærmelsesvis følges ad, jf. figur 7. For cementpastaen, som omslutter armeringsjernet, er forholdene dog stort set som for tilslag.

Bæreevnen af temperaturpåvirkede, armerede konstruktioner vil med sædvanlige beregningsregler kunne beregnes, når materialeegenskaberne afhængighed af temperaturen er kendte. For en bjælke, som opvarmes fra undersiden, vil temperaturen af armeringen være afgørende for bjælkens bæreevne. En væsentlig del af analysen består i at fastlægge et forventet temperaturforløb i konstruktionen, hvilket med rimelig nøjagtighed kan gøres med kendskab til brandlasten og betonens termiske parametre.

Bæreevnen af et konstruktionselement i armeret beton kan eftervises som anført i DS 411 af 1984. Der er heri anført, hvilke sammenhænge, der kan antages mellem materialeegenskaber og temperaturniveau, jf. figur 15 og 16 samt, hvorledes temperaturforholdene vil udvikle sig under en standardbrand.

Temperaturforholdene kan fastlægges på flere måder. I tilfælde, hvor der er mulighed for at benytte EDB, vil man fordel kunne anvende numeriske metoder til løsning af varmeledning ligningen.

DS 411 anfører en tilnærmelsesformel, som på den sikre side kan benyttes til fastlæggelse af temperaturen,

$$T(x,t) = T(0,0) \left(1 - \frac{x}{3,4 \sqrt{at}} \right)^2 \quad (1)$$

x er afstanden i meter fra den eksponerede overflade, og t er tiden i sekunder.

Ved anvendelse af standardbrandkurven kan T(0,0) sættes lig værdien i tabel 2.

a er temperaturledningstallet og kan sættes til $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Temperaturfordelingsfunktionen i DS 411 er en tilnærmelse, som er på den sikre side, dvs. giver for høje værdier, og man kan ved anvendelse af mere detaljerede (og dermed tidskrævende) varmeledningsberegninger opnå bedre overensstemmelse med de faktiske forhold.

En hurtig opvarmning forværrer forholdene, og damptrykket opbygges i et kompliceret samspil mellem betonens fugtindhold, permeabilitet, dimension m.m. Det er vanskeligt at forudberegne dets tidsmæssige forløb. Ved sædvanlige dæklagstykkelser, betonkvaliteter og brandforløb er problemet dog næppe stort.

Ovennævnte analyse kan alternativt foretages ved en brandprøvning, men de forholdsvis store omkostninger, som er forbundet herved, bevirker at dette kun er aktuelt ved masseproduktion.

Brandtid minutter	T(0,0) °C
30	600
60	750
90	850
120	900

Tabel 2. T(0,0) til anvendelse i formel (1).

Eksempel

Et 20 cm betondæk påvirkes fra undersiden af en standardbrand. Dækket er armeret med rundjern 12 i undersiden, og der er benyttet et dæklag på 20 mm.

Hvor meget vil armeringens trækflydespænding være efter en 60 minutters standardbrand?

x = 0,026 m (center af armeringsjern)

t = 3600 sek.

T(0,0) = 750°C (tabel 2)

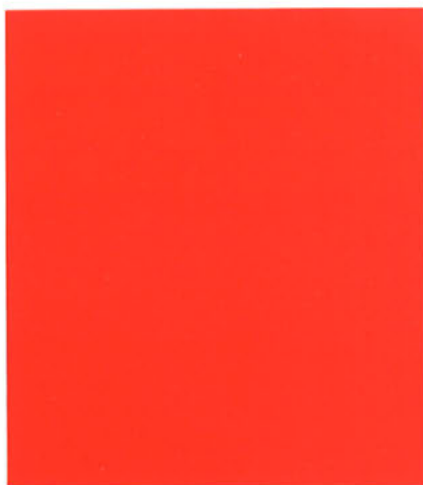
$$T(0,026, 3600) = 750^\circ\text{C} \left(1 - \frac{0,026}{3,4 \times \sqrt{0,5 \times 10^{-6} \times 3600}} \right)^2$$

$$T(0,026, 3600) = 750^\circ\text{C} \times 0,67 = 504^\circ\text{C}.$$

Temperaturen i armeringen vil være steget til godt 500°C, hvilket, jf. figur 16, er ensbetydende med at trækflydespændingen vil være reduceret til 60% af dens oprindelige værdi.

Ved at analysere formeludtrykket finder man, at varmepåvirkningen vil trænge ca. 14 cm ind i betonen, og betonen i trykzonen vil derfor ikke påvirkes af branden.

Med de ændrede materialeparametre kan bæreevnen nu beregnes.



Håndreparation af brandskadedet betonsøjle. Den skadede beton borthugges, og overfladen fremstår med sund beton. Armeringsjernet behandles med korrosionsbeskyttende materiale. Overfladen indkastes med svummemørtel, og søjlen pudses op. Derefter afdækkes reparationsområdet mod udtørring, og betonsøjlen er færdigrepareret.

Reparation efter brand

Når en betonkonstruktion har været udsat for et brandforløb er man i reparationsøjemed udsat for et af de tre tilfælde:

1. Betonen er uskadt
2. Betonen er delvis skadet
3. Betonen er totalskadet

I tilfældene 1 og 3 vil der kunne foretages en forholdsvis hurtig vurdering, og konstruktionen kan enten genanvendes eller nedrives.

I tilfælde 2 skal der i første omgang vurderes, om de forventede omkostninger ved en analyse og efterfølgende reparation af konstruktionsdelen er mindre end ved en udskiftning af konstruktionsdelen. Denne vurdering afhænger af en lang række forhold, som vanskeligt lader sig generalisere.

Hvis det besluttet at reparere konstruktionen, må man foretage en tilbundsående analyse af skadesomfanget, hvortil en række kvalitative og kvantitative metoder er til rådighed.

Under brandpåvirkningen vil mange betontyper ændre farve som vist i tabel 2. Farveændringerne skyldes, at jernforbindelserne i tilslaget oxideres. Ændringerens omfang afhænger derfor af tilslagets art. Således vil dansk beton med bakke materiale i reglen ændre farve, medens beton med sømaterialer i reglen ikke ændrer farve. Farveskiftet kan anvendes til vurdering af omfanget af ødelæggelse af en betonkonstruktion. Al farvet beton bør hugges væk inden en reparation. Da farveskiftet ikke altid forekommer, bør en brandhærget, ufarvet betons kvalitet dog også kontrolleres på anden vis, f.eks. med capotest, ultralyd og rekyhammer, udborede kerner eller ved en simpel vurdering af betonemnets klang ved slag med en hammer, se tabel 3. Disse målinger kan med fordel relateres til målinger på ikke-brandpåvirket beton i samme konstruktion.

Udover den materialemæssige undersøgelse er der en række konstruktive forhold, som bør vurderes. Eksempler herpå er deformationer i form af udbøjninger, nedbøjninger o.l., forholdene omkring understøtninger, lejer, underlag m.m. samt i hvilket omfang tilstødende konstruktionsdele kan være påvirket af branden uden direkte at have været udsat for høje temperaturer.

Faren for nedstyrning af en betonkonstruktion er størst på det tidspunkt, hvor armeringen er svagest eller på det tidspunkt, hvor betonen er svagest.

Armeringens flydespænding aftager, efterhånden som temperaturen i armeringen stiger. Det tidspunkt, hvor den er svagest, optræder et stykke tid efter, at brandens maksimumstemperatur er nået.

Betonens trykstyrke aftager som ovenfor nævnt også efter, at branden er slukket. Det tidspunkt, hvor konstruktionen er svagest, kan optræde en til to uger efter, at branden er slukket. På det tidspunkt har stålet genvundet sin styrke, hvorfor man kan komme

ud for, at betonbjælker bryder sammen ved uvarslet trykbrud i betonen, såfremt der er dannet »brændt kalk«, jf. tidligere. Disse forhold gør, at efterslukning og oprydning i betonkonstruktioner kan frembyde særlige faremomenter, som ikke kendes fra træ- og stålkonstruktioner.

Efter der er foretaget en brandteknisk vurdering af skadesomfanget, kan man påbegynde den egentlige reparation, som i princippet ikke adskiller sig fra reparation af andre skadestyper.

Der bør ved borthugningen af den skadede beton udvises den største forsigtighed, således at man ikke skader den tilbageblevne beton, men samtidig får fjernet alt ødelagt beton. En håndhammer (max. 1 kg) bør foretrækkes, men en let (5 kg) tryklufthammer kan benyttes.

Når alt løst og ødelagt beton er blevet fjernet, foretages en sandblæsning, hvorefter den rene og ru overflade er klar til reparation.

Reparationen kan foretages ved håndreparation, formreparation eller reparation med sprøjtebeton [17].

Håndreparation. Denne reparationsmåde er forbeholdt situationer, hvor brandødelæggelserne er begrænset til et relativt lille område. Reparationen har begrænset styrke og begrænser sig til reparation af dæklag eller til mere »kosmetiske« forbedringer.

Før reparationen påføres et galvaniseret trådnet, som bindes til armeringen eller fastnagles.

Formreparation kan foretages, hvor det er muligt at placere forme, f.eks. rundt om en søjle, og hvor man samtidig har plads til at placere og komprimere betonen i formen. Metoden er billig og effektiv, og man kan armere betonen.

Sprøjtebeton forener transport, placering samt komprimering af betonen. Metoden kan benyttes til meget tynde emner og emner med varierende former uden at benytte formmateriale, se endvidere [18]. Før man påbegynder arbejdet, må man, som før nævnt, have foretaget den nødvendige afrensning samt udfyldt eventuelle revner.

For at minimere vandtab fra reparationsbetonen skal den gamle beton normalt forvandes. Forvandingen skal foretages på et så tidligt tidspunkt, at betonoverfladen er delvis udtørret og stadig indeholder fugt, når reparationen iværksættes.

Det er endvidere væsentligt, at reparationsbetonen sikres hensigtsmæssige hærbetingelser, f.eks. ved anvendelse af hærdemembran, isolering eller anden afdekning, ligesom man skal sikre konstruktionsdelen mod dynamisk last de første hærdedøgn.

I forbindelse med reparationen kan det være aktuelt at benytte hjælpemidler så som »betonklæber«, korrosionsbeskyttelsesmaterialer, eller eventuelt anvende specielle reparationsmørtler. Vedrørende anvendelse af sådanne produkter henvises til disses leverandører.

Farveskift for beton med tilslag med jernforbindelser, f.eks. bakke materiale		Klang	
Omslagstemperatur	Farve	Temperatur, °C	Klangbillede
300°C	Normal, grå	100	Klinker
		200	Porcelæn
600°C	Rosa, rødlig	300	Krystal
		400	Glas
950°C	Grå, grøn	500	Stentøj
		600	Revnet tegl
1200°C	Brun	700	Træ
		800	Papmaché
		900	–
	Gul, brune pletter	1000	–

Tabel 3. Farveskift og klang for brandpåvirket beton [14].

Konklusion

Betonmaterialer kan anses for et brandteknisk godt materiale, som ikke nærer ilden eller afgiver farlige gasser ved opvarmning.

Ved kortvarige temperaturbelastninger op til ca. 300°C vil betonen sædvanligvis ikke beskadiges i nævneværdig grad. Der kan dog optræde lokale revnedannelser i overfladen som følge af pludselige temperaturændringer opstået i forbindelse med slukningsarbejdet.

Ved temperaturpåvirkninger i området 300-500°C optræder der sædvanligvis nogen revnedannelse i cementpastaen, uden at dette dog behøver at være ødelæggende for betonen. Hvis temperaturen i betonen overstiger ca. 500°C, omdannes calciumhydroxiden til »brændt kalk«, hvilket medfører en øget revnedannelse, og på længere sigt kan give anledning til en ødelæggende ekspansion, især skal man passe på de første uger efter opvarmningen til temperaturer på dette niveau.

Armeringen påvirkes af temperaturen, men typen af stål spiller en stor rolle for, hvor meget armeringsstyrken reduceres, og hvorvidt der er tale om en blivende reduktion.

Med kendskab til materialeegenskaberne temperaturmæssige afhængighed kan en konstruktionsdels bæreevne i en brand-situation eftervises. Tidens udvikling i retning af slankere konstruktioner har medført, at brandlaster i højere grad end tidligere kan indgå i det dimensionsgivende belastningstilfælde. En mere temperaturbestandig beton opnås ved at vælge temperaturbestandige tilslag, samt tilsætte puzzolaner.

Litteraturreferencer

- [1] »Portlandcementer« Beton-Teknik 1/01/1983.
- [2] Hertz, K.: »Betonkonstruktioners brandtekniske egenskaber«. Institut for Husbygning, rapport nr. 140, 1980.
- [3] Rasmussen, T. H.: »Styrkeudvikling og hydratiseringsforløb ved forhøjet hærde-temperatur«. CBL intern rapport nr. 23, 1980.
- [4] Cruz, C.R. and Gillen M.: »Thermal Expansion of Portland Cement Paste, Mortar, and Concrete at High Temperatures«, Fire and Materials 4(1980) 2.
- [5] Dougill, J.W.: »Materials Dominated Aspects of Design for Structural Fire Resistance of Concrete Structures«. ACI publication SP-80, 1983.
- [6] Sydney P. Clark: »Handbook of Physical Constants«. The Geological Society of America. Memoir 97, 1966.
- [7] Kordina og Meyer-Ottens: »Beton Brandschutz Handbuch«. Beton-Verlag, 1981.
- [8] Zoldners, N. G.: »Thermal Properties of Concrete under Sustained Elevated Temperatures«. ACI, publication SP-25, 1968.
- [9] Petzold, A. og Röhrs M.: »Beton für hohe Temperaturen«, Beton-Verlag GmbH, 1964.
- [10] Nekkassow, D.: »Hitzebeständiger Beton«. Bauverlag GmbH, 1961.
- [11] Andersen, Niels: »Betonkonstruktioner«. Brandværn nr. 4, 1986.
- [12] Lankard, D. R., et al.: »Effects of Moisture Content on the Structural Properties of Portland Cement Concrete exposed to Temperature up to 500 F«. ACI Publication SP-25.
- [13] »Fra CtO's arbejdsmark« 10/24/1986.
- [14] »Beton-Bogen« 2. udgave 1985, CtO, Aalborg Portland.
- [15] Hertz, K.: »Brandpåvirkede Betonkonstruktioner«. Publikation 11:1981, Dansk Betonforening
- [16] »Concrete for Fire-resistant Construction«, Cembureau Report 1979.
- [17] »Sprøjtebeton«, Beton-Teknik 6/03/1975.
- [18] Pettersson, O. og Kai Ödeen: »Brandteknisk dimensionering«, Liber Förlag, Stockholm, 1978.
- [19] DIF norm for betonkonstruktioner, 3. udgave 1984, DS 411, Teknisk Forlag.

CtO Cementfabrikkernes
tekniske Oplysningskontor
Rørdalsvej 44
Postboks 165
9100 Aalborg
Telf. 08 16 77 77

**AALBORG
PORTLAND**

