



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R107:1986

Härdning av betongkonstruktioner med infraröd strålningsvärme

Ingvar Nilsson

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	Ret 24
Plac	Ser

Byggeforskningsrådet

R107:1986

**HÄRDNING AV BETONGKONSTRUKTIONER
MED INFRARÖD STRÅLNINGSVÄRME**

Ingvar Nilsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
821795-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till Armerad Betong Vägförbättringar AB, Malmö.

REFERAT

Rapporten visar hur man genom datorberäkningar kan bestämma erforderliga härdningsåtgärder för betongkonstruktioner för att uppnå avsedd hållfasthet inom given tid. I beräkningarna kan man studera effekten av t ex olika formtyp eller värmeisolering, tidpunkten för formrivning, påförande och borttagande av värmeisolering samt olika omfattning av uppvärmning. Med ledning härav är det möjligt att välja den kombination av åtgärder som uppfyller uppställda hållfasthetskrav vid given ålder och som ger lägsta kostnad för varje särskild gjutning.

Metoden är ett alternativ till att välja åtgärder "på känn" eller "av erfarenhet" eller med ledning av diagramsamlingar. Resultaten blir emellertid inte säkrare än valet av ingångsdata i beräkningen. Antagen utetemperatur och vindhastighet under härdningsperioden är exempel på osäkerhetsfaktorer.

För speciellt strålningsuppvärmning analyseras verkningsgraden för gasoleldade och eldrivna strålningsarmaturer och absorptionsförmågan för formmaterial och betong utreds.

Temperaturutvecklingen simuleras för betongbjälklag under olika klimat-, isolerings- och uppvärmningsförhållanden. Beräknad temperaturutveckling och betonghållfasthet jämförs med resultat från fältundersökningar vid vintergjutningar av betongbjälklag under normal produktion.

Hållfasthetsnedsättning genom värmehärdning och betongbjälklags nedböjningar vid tidig formrivning diskuteras och åtgärder föreslås.

I Byggnadsforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att råde tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R107:1986

ISBN 91-540-4643-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Liber Tryck AB Stockholm 1986 636449

INNEHÅLL

FÖRORD		5
SAMMANFATTNING OCH REKOMMENDATIONER		6
1.	INLEDNING	9
	1.1 Bakgrund	9
	1.2 Olika uppvärmningsmetoder	9
2.	INFRARÖD STRÅLNINGSUPPVÄRMNING	11
	2.1 Teoretisk bakgrund	13
	2.2 Absorbtion av strålningsvärme	15
3.	DATORBERÄKNINGAR	19
	3.1 Tillgängliga datorprogram	19
	3.2 Datorprogram för beräkning av härdnings- temperaturer och uppvärmningsbehov	20
	3.3 Planering och val av åtgärder	23
	3.4 Optimering av kostnader	24
	3.5 Erfarenheter	24
4.	HÄRDNING MED EL-INFRAVÄRME. FÖRSÖK PÅ HOTELLBYGGNAD I GÖTEBORG	25
	4.1 Beräkning av uppvärmningsbehov	25
	4.2 Försök på arbetsplats	29
	4.3 Betongens hållfasthetsutveckling	33
	4.4 Bjälklagsnedböjningar	35
	4.5 Kommentarer	37
5.	HÄRDNING MED GASOL-INFRAVÄRME. FÖRSÖK PÅ BOSTADSBJÄLKLAG I SKARPNÄCK	38
	5.1 Beräkning av härdningstemperaturer och uppvärmningsbehov	39
	5.2 Försök på arbetsplats	41
	5.3 Betongens hållfasthetsutveckling	46
	5.4 Bjälklagsnedböjningar	47
6.	HÄRDNING MED GASOLELDADE VARMLUFT- AGGREGAT OCH STRÅLNINGSVÄRMARE. FÖRSÖK PÅ TAKBJÄLKLAG I NORRKÖPING	50
	6.1 Värmehärdning av takbjälklag	50
	6.2 Mätning av härdningstemperaturer	53
	6.3 Beräkning av härdningstemperaturer	56
	6.4 Betongens hållfasthetsutveckling	60
	6.5 Bjälklagsnedböjningar	64

7.	HÅLLFASTHETSNEDSÄTTNING VID VÄRMEHÄRDNING	68
7.1	Förstudie	68
7.2	Orsaker till hållfasthetsförluster	69
7.3	Slutsatser	70
8.	BJÄLKLAGSNEDBÖJNINGAR VID TIDIG FORMRIVNING	71
8.1	Krav vid formrivning	71
8.2	Beräkning av nedböjningar	72
8.3	Uppmätta bjälklagsnedböjningar	73
8.4	Slutsatser	73
	REFERENSER	75

FÖRORD

Inom byggindustrin har det under de senare åren utförts flera utvecklingsarbeten inom vintergjutningsteknik. I olika undersökningar har arbetsmetoder utprovats, kostnader för olika alternativa vinterätgärder granskats och erforderlig betonghållfasthet vid formrivning av betongbjälklag studerats. I en nu pågående undersökning söker man utnyttja fördelarna och samtidigt bemästra problemen som uppstår när gjuttemperaturen ligger kring 50-60°C.

Under 1980-talet har det skett en utveckling av materialet betong med hjälp av olika tillsatsmedel och kunskaperna om betong i tidig ålder har ökat betydligt. Det har vidare skett en utveckling av de hjälpmedel som används för att påverka härdningshastigheten vid t ex vintergjutningar. Nya effektiva och lätthanterliga värmeisoleringsmaterial har kommit som alternativ till äldre typer av vintermattor. Även eluppvärmda vintertäckmattor finns.

Bland de olika metoderna att tillföra värme till betongkonstruktioner sker förbättringar efter hand. Billiga värmekablar för 220 volt som godkänns för ingjutning har kommit på marknaden. De är nu ett intressant alternativ till det konventionella värmetrådsystemet för högst 48 volt skyddsklenspänning.

Gasoleldad strålningsvärme har sedan flera år fått en omfattande användning vid värmehärdning av i första hand betongbjälklag. Metoden kan nog här anses vara huvudalternativet när uppvärmning behöver utnyttjas.

Under vårvintern 1984 utförde författaren uppföljningar av vintergjutningar med infravärme på tre olika arbetsplatser. Dessa var Hotell Gothia i Göteborg, flerbostadshus i Skarpnäck, Stockholm och Läns-sjukhuset i Norrköping. Inom varje objekt utvaldes slumpmässigt ett betongbjälklag för mätningar ur den pågående produktionen.

På varje arbetsplats visade arbetsledningen stort intresse och underlättade välvilligt undersökningens genomförande. Vid uppföljningen av vintergjutningen på arbetsplatsen för Hotell Gothia, där en prototyp till eldriven strålningsvärmare användes, hade författaren ett givande samarbete med utvecklingsavdelningen vid FRICO AB i Partille.

Projektet har möjliggjorts genom ett anslag från Statens råd för byggnadsforskning. Författaren riktar ett varmt tack till alla som på olika sätt har bidragit till att denna undersökning har kunnat genomföras.

Malmö i augusti 1986

Ingvar Nilsson

SAMMANFATTNING OCH REKOMMENDATIONER

Genom datorberäkningar kan man bestämma erforderliga härdningsåtgärder för betongkonstruktioner såsom uppvärmningsbehov vid vintergjutningar för att uppnå avsedd hållfasthet inom given tid. Metoden är ett alternativ till att välja åtgärder "på känn" eller "av erfarenhet" eller med ledning av diagramsamlingar. Resultaten blir emellertid inte säkrare än ingångsdatan i beräkningen. Val av utetemperatur och vind under härdningsperioden är osäkerhetsfaktorer.

Datorberäkningar av uppvärmningsbehov

Temperaturutvecklingen simuleras för betongbjälklag under olika klimat-, isolerings- och uppvärmningsförhållanden. För aktuell konstruktionsdel beräknas härdningstemperaturens utveckling och ur denna fås betongens mognadsgrad och hållfasthet. I beräkningarna kan man studera effekten av t ex olika formtyp eller värmeisolering, tidpunkten för formrivning, påförande och borttagande av värmeisolering samt olika omfattning av uppvärmning. Med ledning härav är det möjligt att välja den kombination av åtgärder som precis uppfyller uppställda hållfasthetskrav vid given ålder och som ger lägsta kostnad för varje särskild gjutning.

Beräknad temperaturutveckling och betonghållfasthet jämförs med resultat från fältundersökningar vid vintergjutningar av betongbjälklag under normal produktion.

Infraröd strålningssuppvärmning

Gasoleldade strålningsvärmare har fått en omfattande användning på byggarbetsplatser under de senare åren för värmehärdning av betong. I rapporten redovisas resultat från fältstudier med både gasolinfra och en el-driven prototyp till strålningsvärmare.

Strålningsvärme används huvudsakligen för värmehärdning av betongbjälklag. Strålningsvärmarna riktas härvid upp mot formen. Om bjälklagets ovansida inte är täckt uppstår en stor temperaturgradient över tvärsnittet som kan förorsaka sprickbildning.

De gasoleldade strålningsvärmarna har hög effekt. De el-drivna kräver mycket god strömförsörjning på byggarbetsplatsen, vilket kan vara ett problem. Försöken på arbetsplatsen visade att det var lätt och rent att arbeta med el-drivna infravärmare.

I rapporten analyseras verkningsgraden hos gasoleldade och el-drivna strålningsvärmare och absorptionsförmågan för formmaterial utreds. Till följd av armaturnas verkningsgrad och formmaterialens absorptionsförmåga behöver installerad effekt vara 2-3 gånger större än i betongen nyttiggjord effekt.

För värmehärdning med infravärme ges följande rekommendationer.

1. För att strålningsuppvärmningen av bjälklaget inte skall motverkas genom nedkyllning av vind skall fasadöppningar i utrymmet under bjälklaget täckas in med presenningar. Dessa skall vara väl fastbundna och sluta tätt mot formens överkant.
2. För att få tillräcklig hållfasthetsutveckling i bjälklagets randzoner vid anslutningar mot tidigare gjutna väggar och bjälklag måste betongen tillföras mera värme. Detta kan ske genom att en del av strålningseffekten riktas mot upplagen. Ett annat sätt är att gjuta in värmekabel längs kantzonerna. Grovt uttryckt är uppvärmningsbehovet minst dubbelt så stort invid gjutfogar mot kall betong som i bjälklagets mittområden.
3. Om betongens temperatur överstiger 30-40°C vid värmehärdning bör man kompensera för hållfasthetsförluster. Det sker genom att välja betong av vanligen en hållfasthetsklass högre än den erfordrade.
4. Vid all värmehärdning skall man förhindra uttorkning av betongen. Annars riskerar man att skada ytskiktet eftersom det förlorar en del av det vatten som är nödvändigt för hydratationsprocessen.
5. Bjälklagets ovanyta skall täckas med värmeisolering så fort det är möjligt efter gjutningen. Värmeisolering av betongen och intäckning av fasadöppningar hör till de effektivaste och billigaste åtgärderna vid vintergjutningar och minskar uppvärmningsbehovet.
6. Betongens hållfasthet vid formrivningstillfället bör kontrolleras på byggarbetsplatsen. Det kan ske genom att registrera betongens temperatur i olika punkter, särskilt i farliga tvärsnitt i konstruktionen. Mätningen sker lämpligen med hjälp av termoelement. Betongens hållfasthetstillväxt beräknas med hjälp av en mognadsfunktion och tendenskurvor.

Hållfasthetsnedsättning vid värmehärdning

När härdningstemperaturen överstiger 30-40°C sker en påtaglig reduktion av 28-dygnshållfastheten jämfört med betong som härddas vid 20°C. Samma tendens finns vid gjutning med het betong. För betong av hållfasthetsklass högst K40 som härddas vid högst 50°C under så lång tid som är brukligt under arbetsplatsförhållanden uppgår hållfasthetsförlusterna till storleksordningen en hållfasthetsklass (5 MPa). Detta kan kompenseras genom att välja betong av en klass högre än den nominella. Vid högre hållfasthetsklass eller högre härdningstemperatur kan förlusterna uppgå till 1½-2 hållfasthetsklasser.

Bjälklagsnedböjningar vid tidig formrivning

För att bjälklagen skall få små nedböjningar måste man sätta in stämp. Det förekommer emellanåt att man efter intensiv värmehärdning och tidig formrivning anser sig kunna avstå från detta. Vid stora spännvidder har man då fått missprydande nedböjningar som syns i taken.

Slutnedböjningen beror av uppnådd betonghållfasthet vid formrivningen och hur avformning och stämning utförs. Vid spännvidder över 4-5 m består bjälklagsformen ofta av två eller flera formbord bredvid varandra. Nedböjningen kan begränsas genom att riva ett formbord i taget och genast ersätta detta med stämp. Underdimensionera inte stämpan för även de deformeras. Låt stämpan stå så länge att de gör nytta, helst en månad eller längre. Härigenom begränsas nedböjningarna och erforderlig mängd flytspackel för golvavjämning blir mindre.

Om man av produktionstekniska skäl vill belasta bjälklagen vid tidig ålder med t ex upplag av byggnadsmaterial, skall stämpan dimensioneras inte bara för formsatt bjälklagsyta utan även för dessa yttre laster. Låt lasten föras ner i byggnaden genom stämp i flera våningsplan.

Vid spännvidder över storleksordningen 4 m bör formen överhöjas motsvarande betongbjälklagets elastiska nedböjning vid 28-dygns hållfastheten ökad med långtidsdeformationen vid 2-3 månaders ålder (då utläggning av flytspackel brukar ske).

Erforderlig formrivningshållfasthet beror av fri spännvidd vid formrivningen. Konstruktören bör fastställa lägsta godtagbara hållfasthet för aktuell konstruktion, spännvidd och avsett formrivningsätt.

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

Det är nödvändigt att kunna utföra betonggjutningar under hela året. Vårt nordiska klimat kräver särskilda åtgärder under den kalla delen av året vid platsgjutning av betongkonstruktioner så att betongen inte fryser och att den uppnår en avsedd hållfasthetstillväxt. Den viktigaste av vinteråtgärderna är att se till att betongen håller en lämplig härdningstemperatur. Vinteråtgärder sätts normalt in när utemotemperaturen understiger +5°C. Medeltemperaturen understiger detta värde under 5 till 8 månader per år i södra respektive norra Sverige.

När det gäller betongstommar till bostads- och kontorshus, där likadana gjutningar upprepas många gånger, är avformningstiden fastställd i tidplanen och anpassad till en viss arbetscykel.

Väggformar rivs ofta redan efter ett dygn. Bjälklag ägnas större uppmärksamhet beträffande avformningshållfasthet. Detta är främst för att undvika allt för stora nedböjningar. Av ekonomiska och produktionstekniska skäl används en snabb omsättning av formar under hela året.

Vid gjutning av bjälklag brukar man antingen använda en kort formrivningstid om ca 1½ dygn eller en längre om ca 4 dygn. I det förra fallet brukar formrivning utföras på morgonen 2:a dagen efter gjutning. Detta förutsätter att härdningstemperaturen hålls mellan 40 och 50°C under ca 12 timmar. I det senare fallet förutsätter man en arbetscykel om en vecka.

För att uppnå erforderlig avformningshastighet inom avsedd tid vidtas olika åtgärder. För att påskynda hållfasthetstillväxten på arbetsplatsen är det vanligt med intäckning, värmeisolering och uppvärmning av betongkonstruktionen. Vid gjutningen kan vidare användas varm betongmassa, accelererande tillsatsmedel, utbyte av standardcement (Std) mot snabbt härdnande cement (SH) eller höjning av hållfasthetsklassen med ett eller ibland två steg. Flera av dessa åtgärder används vanligen samtidigt.

1.2 Olika uppvärmningsmetoder

För att kunna hålla en tillräckligt hög härdningstemperatur i betongkonstruktionen är tillförsel av värme en av de viktigaste vinteråtgärderna. Uppvärmning kan ske med varmlufttaggregat, värmetråd eller värmekabel i betongen, elektriskt uppvärmda formar eller med infraröd strålningsvärme (infravärme). Uppvärmningsmetoderna har mycket varierande energiförbrukning vilket beror på betydande olikheter i metodernas effektivitet [1], [2]. Även energikostnaderna per kWh varierar för de olika energislagen. Uppvärmning med varmluft är den i särklass dyraste metoden.

Vid uppvärmning med elektrisk värmetråd monteras motståndstrådarna i formen före gjutning. Metoden har behandlats av författaren i tidskriften Byggmästaren nr 9, 1982 [3]. Metoden är särskilt lämplig för värmehärdning av grundplattor, pelare, balkar, stödmurar, elementfogar och kantzoner hos nygjuten betong. Elektriskt uppvärmda formar är ovanliga i Sverige.

Sedan några år tillbaks är användning av infravärme på väg att bli det dominerande sättet att värmehärda betongstommar till bostads- och kontorshus. Det har då nästan uteslutande varit fråga om gasoleldade strålningsvärmare. Tillverkarna av utrustningen har utarbetat instruktivt informationsmaterial [4], [5]. Försök har nu även utförts med el-drivna strålningsvärmare under arbetsplatsförhållanden.

2. INFRARÖD STRÅLNINGSUPPVÄRMNING

Idén till strålningsvärme utvecklades ursprungligen inom gasindustrin. De tidigaste typerna av elektriska infravärmare fanns att tillgå i USA i början av 1950-talet och de har använts inom betongelementindustrin sedan denna tid [6]. Från slutet av 1970-talet har användningen av gasol-driven strålningsvärme ökat betydligt i Sverige. Försök med gasolinfra av Wennmark m fl på byggarbetsplatser för värmehärdning av platsgjuten betong har bidragit till kännedom och intresse för denna värmehärdningsmetod [1], [2].

Gasol drivna strålningsvärmare

De strålningsarmaturer som idag används på byggarbetsplatser har brännare av stål. På den svenska marknaden säljs de vanligast förekommande fabrikaten av:

1. Combac, tidigare Bahco Komfort, Enköping
2. Primus Svenska AB, Skärholmen

Brännare av stål uppges ha en verkningsgrad av något över 50%. Vid strålning mot träform absorberas endast en del av värmen. Verkningsgraden för gasoleldade strålningsvärmare vid strålning mot träform utreds i avsnitt 5.1 i samband med en tillämpning på bostadsbjälklag i Skarpnäck. Det konstateras att endast 36% av förbrukad energi absorberas i betongen. Installerad effekt behöver då vara 2,8 gånger större än absorberad.

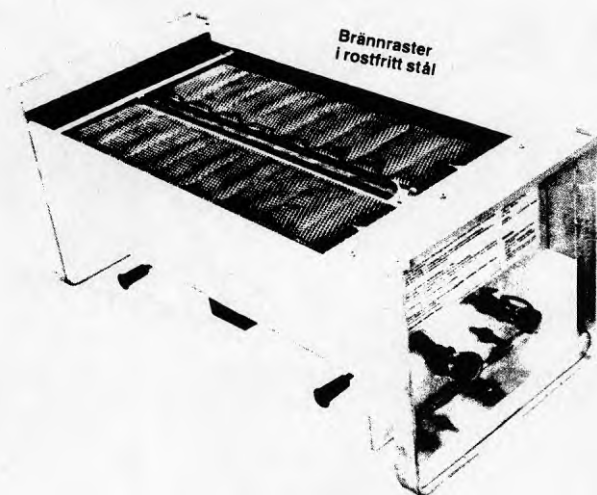


Fig 2.1 Gasol driven strålningsvärmare, Bahco 16 kW, [4].

El-drivna strålningsvärmare

El-drivna infravärmare användes tidigare i obetydlig omfattning för värmehärdning av betong på byggarbetsplatser.

Under vintern 1983-84 togs en prototyp till el-driven strålningsvärmare fram i samarbete med Frico AB. Man anpassade armaturer om 4,5 kW till arbetsplatsförhållanden. Dessa användes vid vintergjutningar av ett 19 våningar högt hotell för Svenska Mässan i Göteborg. En första redovisning av resultat från detta objekt gavs i tidskriften Byggmästaren nr 9, 1984 [7].

El-drivna strålningsvärmare har rörelement som strålningskälla och är försedda med en blankpolerad aluminiumreflektor. Reflektorn nedsmutsas avsevärt under betonggjutningarna. Damm och cementslam gör den nästan cementgrå efter några gjutningar. Armaturens verkningsgrad nedsätts härvid.

Verkningsgraden för el-drivna strålningsvärmare utreds i avsnitt 4.1 i samband med tillämpningen på hotellbygget i Göteborg. I det aktuella fallet avgav armaturen 62% av förbrukad energi i form av strålningsvärme. Beaktas träformens absorbtionstal för aktuell våglängd fås att 45% av förbrukad energi absorberas i betongen som värme. Installerad effekt behöver då vara 2,2 gånger större än absorberad effekt.

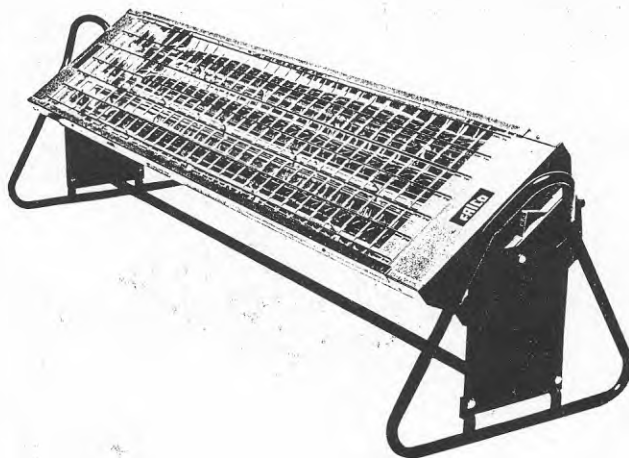


Fig 2.2 Eldriven strålningsvärmare, FRICO 4,5 kW.

Användning på byggarbetsplatser

Infravärme används på byggarbetsplatser mot gjutformar av såväl stål som trä. Infravärme är effektivast mot stålformar. Trä har sämre absorptionsförmåga och värmeledningsförmåga vilket ger en något lägre effektivitet. El-infravärmare har jämfört med gasoleddade fördelarna att de lämnar inga avgaser och behöver därför ingen ventilation.

På byggarbetsplatser är det ur energibesparingssynpunkt intressant att begränsa uppvärmningen. Under det tidiga byggskedet är det svårt att ordna en tät intäckning. Den ofrivilliga ventilationen i stombygget brukar vara stor. Därför vill man koncentrera uppvärmningen till just de konstruktionsdelar som har behov av värmetillskott. Strålningsarmaturerna är utformade så att de kan riktas mot en avsedd yta. Strålningen värmer endast de objekt som träffas av strålarna.

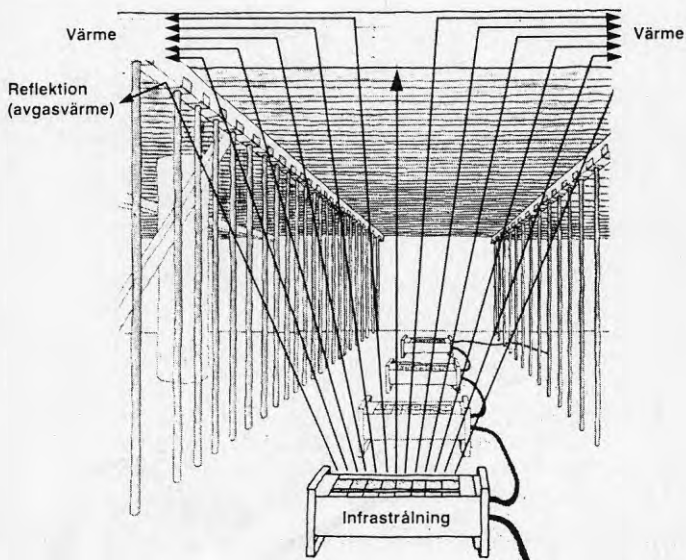


Fig 2.3 Strålningsvärmarna riktas upp mot bjälklagsformen vid värmehärdning av betongbjälklag, [4].

2.1 Teoretisk bakgrund

Värme kan överföras genom ledning, konvektion eller strålning. Värmeöverföring genom ledning eller konvektion kräver alltid ett medium. Värmestrålning överförs däremot helt utan förluster i vakuum och med försumbara förluster i luft.

Värmestrålning är en elektromagnetisk vågrörelse som strålaren utsänder. Alla kroppar avger energi i form av elektromagnetisk strålning. Ju högre kroppens temperatur är desto kraftigare strålar den. Sambandet mellan strålningsintensitet, våglängd och temperatur hos strålaren framgår av fig 2.4.

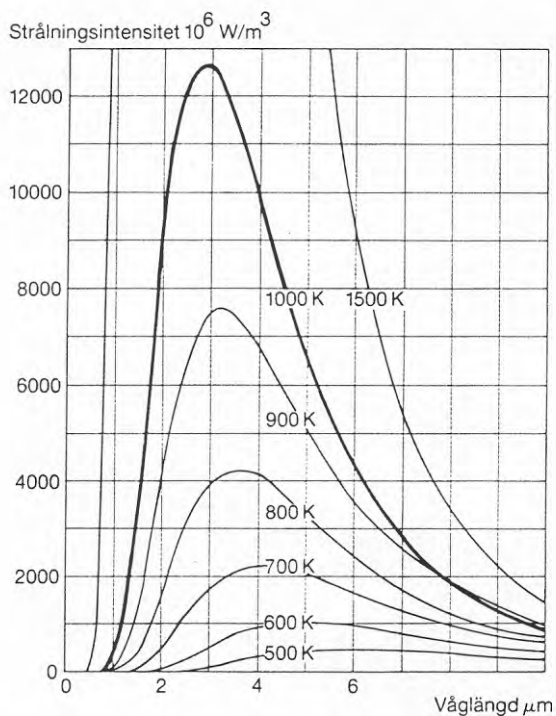


Fig 2.4 Spektrala energifördelningen vid temperaturstrålning enligt Plancks strålningslag. Elinfravärmare ca 1000°K, gasolinfravärmare ca 1175°K, [8].

Vid en höjning av strålarens temperatur blir således våglängden kortare samtidigt som strålningens intensitet ökar. Den våglängd vid vilken strålningen har sitt maximum bestäms av kroppens temperatur enligt Wiens förskjutningslag.

$$\lambda \cdot T = \text{konstant} = 2,898 \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{°K}]$$

där λ = våglängden för maximal emission [m]

T = strålarens temperatur [°K]

Fig 2.5 visar sambandet mellan temperatur och våglängd enligt Wiens förskjutningslag.

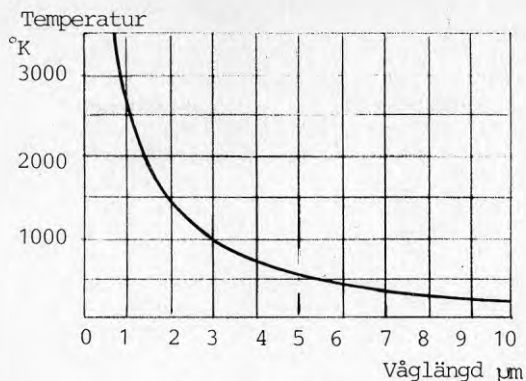


Fig 2.5 Samband mellan strålarens temperatur och våglängd enligt Wiens förskjutningslag.

Det synliga ljuset ligger inom våglängdsområdet $\lambda = 0,37 - 0,78 \mu\text{m}$. Värmestrålningen, den infraröda eller IR-strålningen, ligger mellan $0,78$ och ca $10 \mu\text{m}$.

Gasoleldade infravärmare har en yttemperatur av ca 1175°K (ca 900°C) varvid strålningens våglängd är ca $2,5 \mu\text{m}$. Elektriska infravärmare av rörelement har en yttemperatur av ca 1000°K (ca 750°C) vilket motsvarar en våglängd ca $3 \mu\text{m}$. [8].

2.2 Absorbtion av strålningsvärme

När infraröda värmestrålar träffar ytan av en kropp reflekteras en del och en del absorberas, fig 2.6. Den del som tränger in i kroppen blir värme. Mörka, täta föremål har hög absorbtion av värmestrålar. I betong absorberas upp till 95% vid våglängden ca $3 \mu\text{m}$.

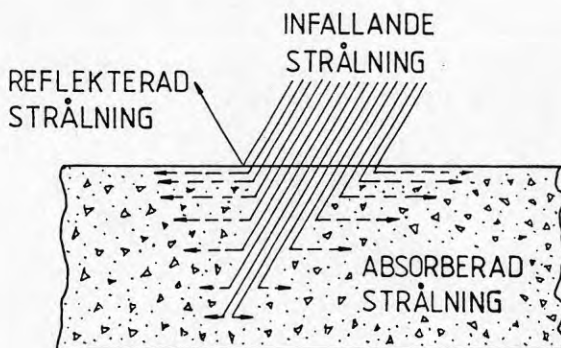


Fig 2.6 Infraröd strålning mot starkt absorberande material såsom betong eller trä.

Om man riktar värmestrålningen mot en oskyddad betongyta, t ex ovan-
ytan av ett betongbjälklag, medför strålningssuppvärmningen en uttork-
ning av ytskiktet till några cm djup i färsk betong. Uttorkningen kan mot-
verkas genom att täcka med en plastfolie som förhindrar avdunstning men
släpper igenom värmestrålarna [9]. Värmen under plastfolien blir intensiv.
Vid infraröd värmehärdning på byggarbetsplatser riktas strålningen endast
mot formar, vilka som regel utgör skydd mot uttorkning.

Den våglängdsberoende absorbtionen A_λ och reflektionen R_λ hos fasta
kroppar av olika material och hos vattenskikt har undersökts av Werner
Sieber [10]. I fig 2.7 visas absorbtionen hos ett tunt vattenskikt. Man ser
att vattenskikt av en hundradels mm har praktiskt taget 100% absorbtion
kring $\lambda = 3$ och $6 \mu\text{m}$. Därför får också fuktiga material en kraftig absorbtion
vid dessa våglängder. Figurerna 2.8 och 2.9 visar att även betong
och eloxerad aluminium har hög absorbtion (liten reflektion) vid våg-
längden $3 \mu\text{m}$. Vid strålning mot betong och formlidar av aluminium
är det därför gynnsamt om strålningsvärmarna arbetar vid en våglängd
av omkring $3 \mu\text{m}$.

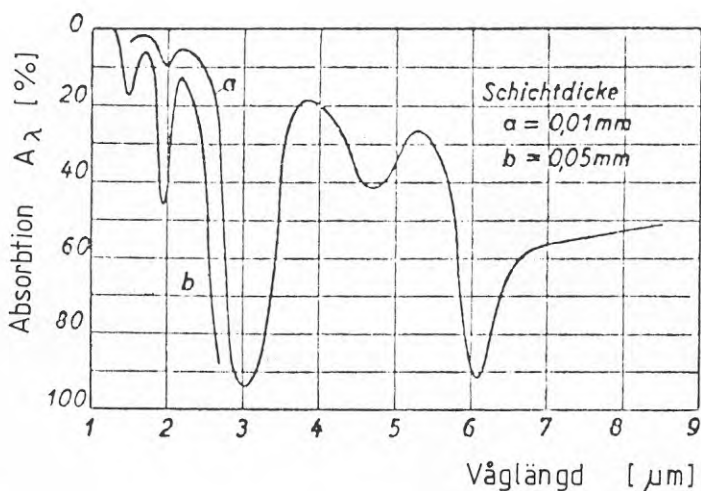


Fig 2.7 Absorptionskoefficienter A_λ för vatten med skiktjocklekarna
0,01 och 0,05 mm enligt Sieber [10].

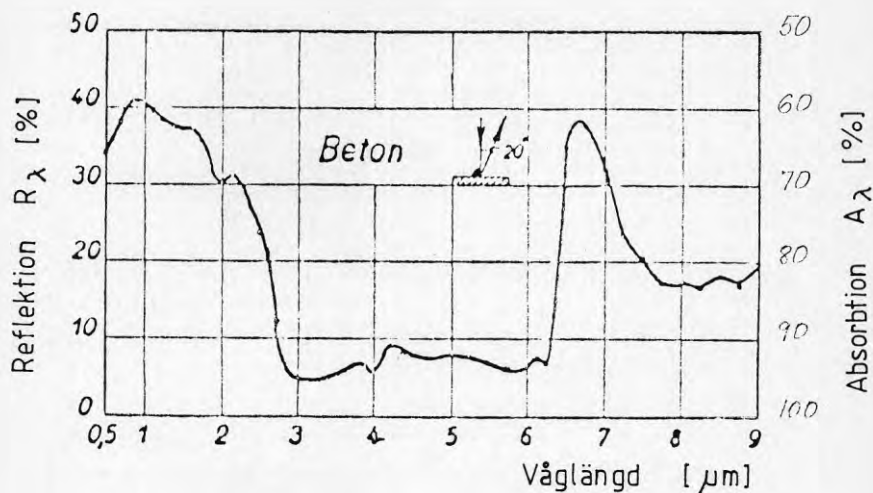


Fig 2.8 Reflektions- och absorptionskoefficienter vid monokromatisk strålning mot betongyta enligt Sieber [10].

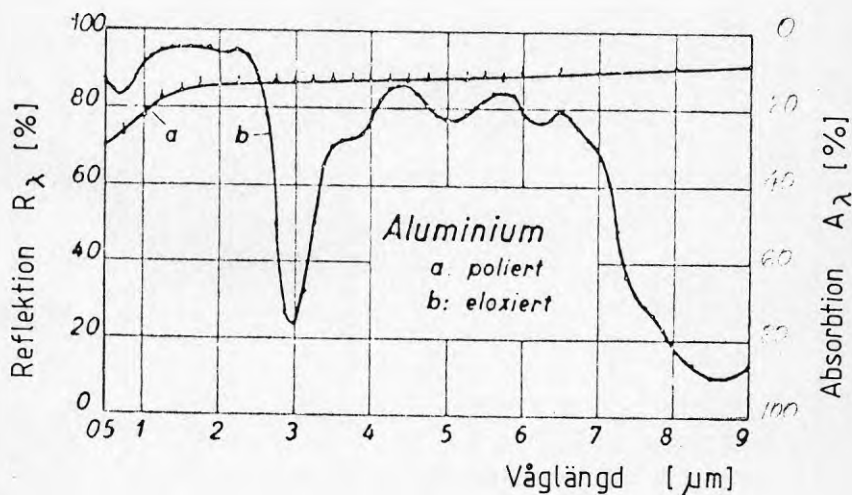


Fig 2.9 Reflektions- och absorptionskoefficienter vid monokromatisk strålning mot a. blankpolerad aluminium, b. eloxerad aluminium enligt Sieber [10].

För att uppnå bästa verkan av värmestrålning skall strålningskällans temperatur och därmed våglängd vara anpassad till absorptionsförmågan hos de material den skall värma. Gaseleddade strålningsvärmare har en strålningstemperatur av ca 1175°K (ca 900°C) varvid strålningens våglängd är ca 2,5 μm . El-drivna strålningsvärmare av rörelement har en yttemperatur av ca 1000°K (ca 750°C) vilket motsvarar en våglängd av 3 μm . Såväl gaseleddade som el-drivna strålningsvärmare ligger därför väl till för värmning av bl a betongytter och formdelar av aluminium.

Strålningsvärme används framför allt vid härdning av betongbjälklag där kraven är höga på snabb hållfasthetstillväxt. Armaturlagarna riktas underifrån upp mot bjälklagsformen. Formen består oftast av plywood.

För trä varierar absorptionsförmågan med strålningskällans temperatur enligt fig 2.10. Figuren ger:

1000°K: el-drivna strålningsvärmare, absorptionsstal 0,73

1175°K: gaseleddade strålningsvärmare, absorptionsstal 0,72

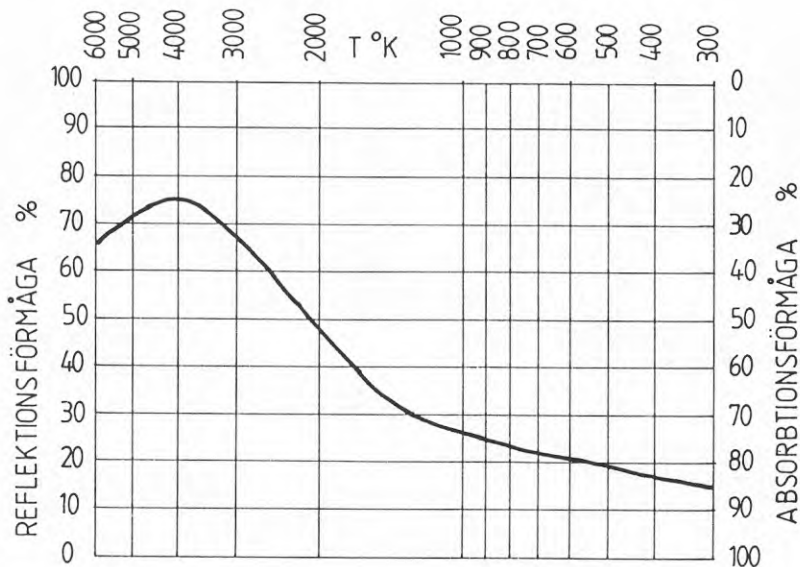


Fig 2.10 Reflektions- och absorptionsförmåga för trä vid olika temperatur hos strålningskällan. Enligt Sieber [10].

3. DATORBERÄKNINGAR

Vid alla betonggjutningar har man behov av att kunna förutsäga betongens hållfasthetsutveckling för att:

- undvika risk för skador, främst hållfasthetsnedsättning, vid tidig frysning.
- avgöra när tillräckligt hög hållfasthet har uppnåtts för att kunna riva formen.
- avgöra när uppspanning kan utföras i spännbetongkonstruktioner.
- avgöra när en konstruktion får belastas.

Temperaturen har en stor betydelse för betongens härdningshastighet. Reaktionshastigheten kan höjas genom högre utgångstemperatur (varm betong), acceleratorer, högre cementhalt, täckning och isolering för att minska avsvälningen eller genom uppvärmning. Härdningsprocessen kan således styras genom olika åtgärder som påverkar betongtemperaturen.

För att teoretiskt kunna jämföra effekten av olika åtgärder på betongens härdning behöver man en matematisk beskrivning av bl a cementets hydrationsvärme, värmeförluster till omgivningen och eventuell uppvärmning. Det finns idag datorprogram som beaktar detta. Med hjälp av dessa är det möjligt att simulera temperaturutvecklingen i varje konstruktionsdel med endimensionellt värmefflöde under godtyckliga klimat-, isolerings- och uppvärmningsförhållanden.

Vid modern produktion av betongkonstruktioner vill man gjuta etapperna efter en i förväg uppgjord tidplan. Problemet är då att på planeringsstadiet avgöra vilka åtgärder som måste sättas in för att man precis skall uppnå fordrad betonghållfasthet inom given tid.

Med ledning av härdningstemperaturens utveckling kan betongens hållfasthet beräknas med TT-faktor-metoden eller hellre med Arrhenius-funktionen.

3.1 Tillgängliga datorprogram

De datorprogram som förekommer idag förutsätter endimensionellt värmefflöde. Detta är fallet i plattor och väggar med undantag för randområden där kyleffekter inverkar från motgjutningar, upplag och ändytor. En stor del av betongkonstruktionerna består av plattor och väggar varför datorprogram för endimensionell värmeströmning i de flesta fall är tillräckliga för praktiskt bruk.

I datorprogrammen kan bl a isoleringsgrad och omgivande temperatur varieras godtyckligt i tid. Det möjliggör simulering av bl a betongtäckning eller uppvärmning.

För relativt tunna konstruktioner, såsom plattor och väggar för husbyggnader, kan man i många fall approximativt försumma temperaturgradienten över tvärsnittet. Då kan enkla datorprogram användas för beräkning av tvärsnittens medeltemperatur. ABV:s datorprogram PLATUR och datorprogrammet GENTEMP framtaget vid CBI av Jonasson är exempel på denna typ. I båda bygger beräkningsprincipen på ekvationer av Bergström 1962 [11].

Temperaturgradienten kan behöva beaktas i första hand i grova betongkonstruktioner. Även i betongbjälklag för husbyggnader uppstår en stor temperaturgradient vid härdning med strålningsvärme mot en sida. I de fall man önskar beräkna temperaturgradienten över tvärsnittet kan man använda sig av datorprogrammet PLATEMP, utvecklat vid CBI av Jonasson [14], [28]. Det ger samtidigt medeltemperaturens variation med tiden. Det är ett datorprogram för endimensionell värmeströmning och är baserat på metoden med indelning i finita element. Som exempel visar fig 6.8 och fig 6.9 beräknade temperaturgradienter i en betongplatta med strålningsuppvärmning.

3.2 Datorprogram för beräkning av härdningstemperaturer och uppvärmningsbehov

Vid ABV har tagits fram ett datorprogram för beräkning av härdningstemperaturer. Det beräknar tvärsnittets medeltemperatur och betongens mognadsgrad som funktion av tiden. Programmet är en bearbetning av ekvationer publicerade av Bergström 1962 [11].

Grundekvation:

$$N = e + N_c + t \cdot a - N_a$$

N — Betongens beräknade medeltemperatur vid godtycklig tidpunkt
 e — Begynnelsetemp = medelvärde av betong+Form+armering+ringjuttningssods
 N_c — Temperaturökning på grund av hydrationsvärmeutveckling i cement
 t · a — Temperaturökning av tillförd värme
 N_a — Temperatursänkning genom värmeförluster till omgivningen

Programmet beaktar cementets adiabatiska värmeutveckling för ett par vanliga svenska och utländska cement. Det är lätt att i programmet lägga in uppmätt adiabatisk värmeutveckling för varje annan cementsort.

Vid beräkning av en platta eller en vägg är det lämpligt att räkna på 1 m^2 av konstruktionen. Den har två begränsningsytor med olika värmeomgångstal k . Faktorer som beaktas i beräkningen framgår av följande förteckning.

Indata

N_b	[$^{\circ}\text{C}$]	betongmassans temperatur vid tiden $t = 0$
V	[m^3]	betongvolym
N_u	[$^{\circ}\text{C}$]	medeltemperatur för omgivningen
A	[kg/m^3]	armering + ingjutningsgods
P	[m^2]	plåtform, yta
Q	[kcal/tim]	tillförd värme
T_o		mognadsfaktor vid $t = 0$
Δt	[tim]	utskriftsintervall
t_{\max}	[tim]	sista utskrift
C	[kg/m^3]	cementhalt
F_n	[m^2]	begränsningsyta
k_n	[$\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$]	värmeomgångstal
		vanligen 2 ytor

Utdata

t	[timmar]	tid
T	[timmar]	mognadsfaktor, ekvivalent tid vid 20°C
N	[$^{\circ}\text{C}$]	medeltemperatur i betongen

Utskrift vid varje tid $t = m \cdot \Delta t$
 där $m = \text{antal utskriftsintervall}$
 Stopp för $t > t_{\max}$

Beräkning av k-värden för formmaterial, isoleringsskikt m m

Allmänt gäller
$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots$$

där k = värmegenomgångstal [kcal/m² h °C]

d = tjocklek [m]

λ = värmeledningstal [kcal/m h °C]

α = övergångstal [kcal/m² h °C]

Tabell 3.1 Ungefärliga värden på värmeledningstal λ för några material

Material	Värmelednings- tal [kcal/m h °C]
Fur, gran, ek, bok, plywood	0,12
Stål	50
Aluminium	175
Mineralull torr	0,035
" praktiskt tillämpbart	0,045
Expanderad polystyren t ex Frigolit	0,035
Expanderad polyethen t ex Ethafoam	0,037
Stillastående luft	0,02
Torr sand	0,35
Betong, praktiskt tillämpbart	1,5

Tabell 3.2 Övergångstal α , enligt [27]

Vindhastighet [m/sek]	Övergångstal [kcal/m ² h °C]
0	4,8
0,5	6,5
1	8,2
2,5	13,3
5	21,8
10	36,9
13	45,3
17	55,8

Omvandlingsfaktor till SI-enheter: 1 kcal/m h °C = 1,16 W/m°C

Tabell 3.3 Exempel på beräknade k-värden

Material	Vind [m/sek]	Värmeegenomgångstal k	
		[kcal/m ² h °C]	[W/m ² °C]
1" formbräddor	0	2,40	2,78
1" "	5	3,93	4,56
15 mm formplywood	0	3,00	3,48
13 mm "	0	3,16	3,66
10 mm Ethafoam	0	2,09	2,42
10 mm "	1	2,55	2,96
10 mm "	5	3,16	3,67
13 mm formplywood + 50 mm Frigolit	1	0,60	0,70

3.3 Planering och val av åtgärder

Vid varje särskild gjutning är det nödvändigt att göra en plan över de åtgärder som behöver vidtas för att beakta de aktuella förutsättningarna. Vid t ex vintergjutning av betongbjälklag är detta särskilt viktigt eftersom kraven är stora på att en bestämd hållfasthet har uppnåtts vid formrivningen efter en ofta kort och förut bestämd härdningstid. Ett hjälpmedel vid denna planering är beräkningar med hjälp av datorprogram. Bäst är att genomföra beräkningar för varje särskild situation. Annars kan man utnyttja resultat från typfall samlade i diagramform, se t ex [25].

Vid planering för en vintergjutning provar man att beräkna effekten av olika kombinationer av åtgärder såsom användning av varm betongmassa, accelererande tillsatsmedel, intäckning, värmeisolering och uppvärmning av konstruktionen. Man beräknar härvid för varje kombination konstruktionens temperaturförlopp under de första dygnet av härdningsprocessen. Temperaturkurvan ger betongens mognadsgrad och tendenskurvor ger uppnådd betonghållfasthet.

Beräknad temperaturutveckling brukar visa en relativt god överensstämmelse med den uppmätta i konstruktionen. Vid avvikelser har beräkningsantaganden ej överensstämmt med verkligheten.

Variationer i betongmaterialet ger vid provning en viss spridning av tryckhållfastheten. Väljer man tendenskurvor som bygger på hållfasthetsklassens nedre 5-procentfraktil blir säkerheten hos beräknad betonghållfasthet tillfredsställande.

3.4 Optimering av kostnader

Datorberäkningar utgör underlag för ett ekonomiskt val av betongmaterial och utförandesätt. Det är som regel möjligt att uppfylla hållfasthetskraven på flera sätt genom val av olika kombinationer av åtgärder. Med hjälp av datorberäkningar kan man välja den kombination av åtgärder som totalt sett ger lägst kostnad.

I en nyutkommen rapport "Optimering av betongegenskaper med hänsyn till vintergjutning" av Gunnar Fredriksson och Paul Samuelsson [26] diskuteras ekonomi och effekt av olika åtgärder för att uppnå erforderlig formrivningshållfasthet och bra gjutresultat.

För väggar och bjälklag ges rekommendationer för lämpliga åtgärder för att uppnå önskad formrivningshållfasthet. Bland de billigaste åtgärderna är cementhaltshöjning (uppflyttning i högre hållfasthetsklass). Här fordras inga investeringar och åtgärden kan sättas in med kort varsel. Ett annat sätt är att höja gjuttemperaturen, eventuellt i kombination med höjd cementhalt.

Först när dessa metoder tillsammans med värmeisolering av konstruktionen är otillräckliga är det motiverat att utnyttja uppvärmning av konstruktionen, t ex med strålningsvärme.

3.5 Erfarenheter

Det är väsentligt att ingångsdata i beräkningen är realistiska och så väl valda som möjligt. Resultaten blir inte riktigare än valet är av de data på vilka beräkningen bygger.

Faktorer som är särskilt svåra att förutsäga är lufttemperatur och vindhastighet under gjutningen och dygnet närmast därefter. Vårt nordiska klimat har betydande växlingar under alla årstider. Det är emellertid lätt att utföra en känslighetsanalys. Beräkningen genomförs då för en högre och en lägre temperatur än den förväntade. På samma sätt kan vindhastigheten varieras i beräkningen.

Författaren har utfört beräkningar för ett stort antal betongkonstruktioner. Det har i första hand varit grova anläggningskonstruktioner i såväl Sverige som i fjärran länder. Problemet är då vanligen att begränsa värmeutvecklingen för att undvika sprickbildning. Beräkningar har även utförts för husbyggnadskonstruktioner såsom vintergjutningar av betongbjälklag med kort formrivningstid.

Det finns ett stort behov av och intresse för beräkningar under planeringen av uppläggning och utförande av betonggjutningar. Beräkningsresultaten utgör underlag för val av gjutningarnas utförande, formrivningstid, formbehov, kapacitetsbehov hos betongstation, transportmedel, maskiner och personalbehov. Även om beräkningen på planeringsstadiet bygger på något osäkra ingångsdata är det vida överlägset att arbeta så än att göra planeringen "på känn" eller "på erfarenhet".

4. HÄRDNING MED EL-INFRAVÄRME. FÖRSÖK PÅ HOTELL-BYGGNAD I GÖTEBORG

Effekten av el-infrauppvärmning vid härdning av betong studerades under vintern 1983-84 vid uppförandet av det 19 våningar höga Sara Hotel Gothia i Göteborg, se fig 4.1. Hotellet byggdes av konsortiet Mässbyggarna som bestod av ABV och SCG.

4.1 Beräkning av uppvärmningsbehov

Fig 4.2 visar beräknad temperaturutveckling som funktion av tiden för ett 25 cm tjockt bjälklag under några olika förutsättningar. Det antogs härvid att uteluftens dygnsmedeltemperatur var -2°C och att det blåste i medeltal 2,5 m/sek under de första dygna. Det förutsattes åtgå 307 kg std cement/ m^3 betong. Kravet på formrivningshållfasthet var 70% av K30, d v s 21 MPa. Formbotten förutsattes bestå av 15 mm plywood. Utrymmet under formen avsågs vara väl intäckt med presenningar så att luftens temperatur under formen höll ca 0°C och med tillkopplad strålningsvärme $+10^{\circ}\text{C}$.

För beräknad temperaturutveckling enligt kurvorna 1 och 2 förutsattes att betongens ovanyta var fri under hela perioden. Kurva 2 förutsätter att betongen tillsätts ett accelererande tillsatsmedel, i beräkningen antogs 1,5% CaCl_2 av cementvikten.

Kurva 3 förutsätter utöver samma mängd accelerator som i kurva 2 att betongytan täcks väl med 10 mm Ethafoam värmeisolering 7 timmar efter gjutningen och borttages efter 54 timmar.

När temperaturkurvan är känd kan betongens mognadsgrad beräknas för varje godtycklig tidpunkt. Tendensdiagram ger sedan uppnådd betonghållfasthet. Vid 3 dygns ålder är betongens beräknade tryckhållfasthet för kurva 1: 7 MPa, kurva 2: 12 MPa och för kurva 3: 18 MPa. Åtgärderna med accelerator och värmeisolering räcker således ej till för att uppnå erforderliga 21 MPa efter 3 dygn.

För kurva 4 var antagandena som för kurva 3 men dessutom förutsattes att värme tillfördes, i detta fall från el-drivna strålningsvärmare med en inkopplad effekt av 270 W/m^2 bjälklag. Eftersom reflektorerna nedsmutsades kraftigt och bjälklagsformen hade en absorptionskoefficient av 0,73 kunde man uppskatta att endast 120 W/m^2 utnyttjades som absorberad energi i betongbjälklaget.

Ur temperaturkurva 4 beräknas betongens mognadsgrad och med hjälp av tendenskurvor fås uppnådd tryckhållfasthet till 24 MPa vid 3 dygns ålder. Den valda kombinationen av vinteråtgärder och tillförd värme uppfyller således kravet på formrivningshållfasthet vid avsedd tidpunkt.



Fig 4.1 Nybyggnad av hotell för Svenska Mässan, Göteborg.
Bilden tagen vid gjutning av plan 14, februari 1984.

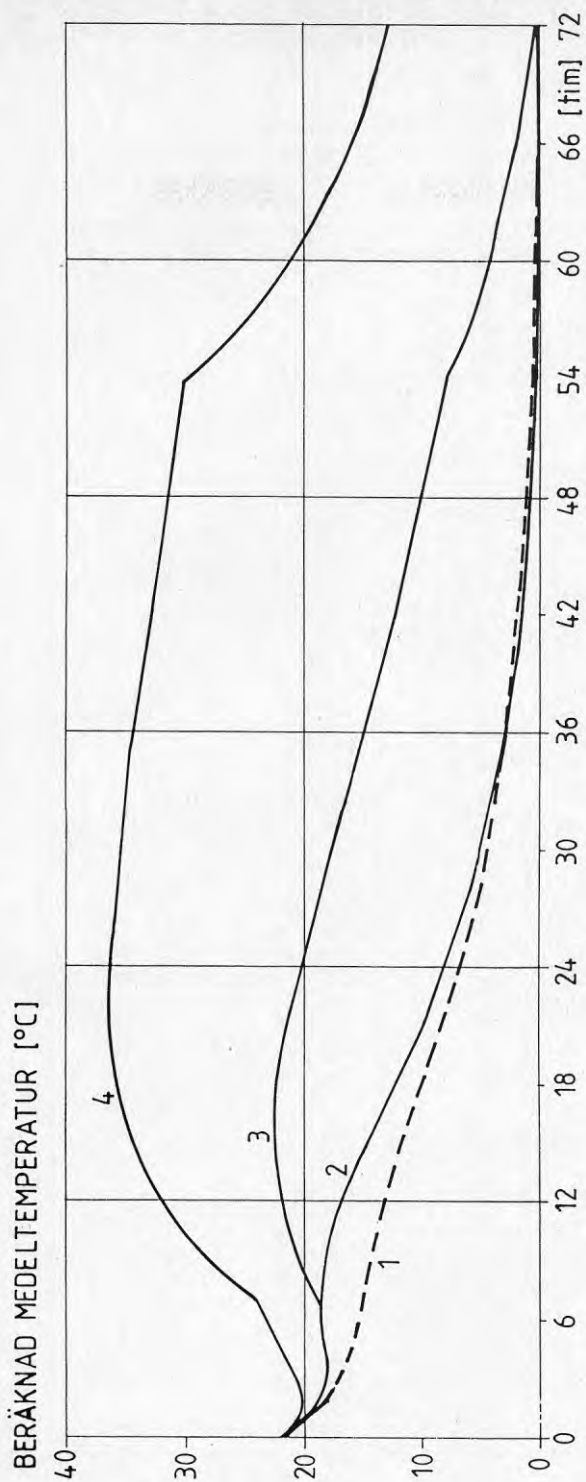


Fig 4.2 Beräknad härdningstemperatur i ett 25 cm tjockt betongbjälklag. Förutsättningar: 307 kg std cement/m³ betong, gjuttemperatur = 22°C, utluftens dygnsmedeltemperatur = -2°C, vindhastighet = 2,5 m/sek, formbotten av 15 mm plywood. Kurva 1: Bjälklagets ovanyta utan värmeisolering. Kurva 2: Inblandning av accelerator. Kurva 3: Accelerator, värmeisolering av ovanytan 7-54 tim. Kurva 4: Accelerator, värmeisolering av ovanytan 7-54 tim, elinfravärme 270 W/m² installerad effekt (120 W/m² absorberad effekt). Lufttemperatur under formen +10°C mellan 7 och 72 tim.

Nedsmutsningens inverkan på aluminiumreflektorernas reflektionsförmåga

De blankpolerade aluminiumreflektorerna nedsmutsades avsevärt på byggarbetsplatsen under betonggjutningarna. Dam och cementslam gjorde dem efter en tid till stor del nästan cementgrå. För att reducera nedsmutsningen byggdes apparaterna så att reflektorn kunde snedställas ett kvarts varv när de ej var i bruk.

Nedsmutsningen av reflektorn nedsätter armaturens verkningsgrad. Den del av strålningsenergin som avges via reflektorn är beroende av reflektorns reflektionstal. Enligt Sieber [10] har blankpolerad aluminiumplåt ett reflektionstal av 87% vid våglängden $3 \mu\text{m}$, se fig 2.9. Moderna aluminiumreflektorer uppges nå upp till omkring 97%. Enligt fig 2.8 reflekterar en betongyta endast 5% vid våglängden $3 \mu\text{m}$. Reflektionsförmågan nedsätts således avsevärt vid nedsmutsning med cementslam.

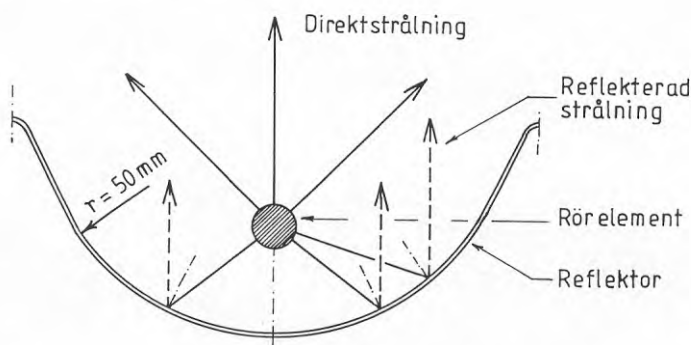


Fig 4.3 Sektion genom el-driven strålningsarmatur med rörelement.

Av strålningsenergin från ett rörelement avges 36% som direktstrålning inom en vinkel av $2 \times 65^\circ = 130^\circ$. Övrig strålning inom vinkeln 230° reflekteras av reflektorn, se fig 4.3. Antages att 60% av reflektorns yta är täckt med cementslam, vilket var fallet vid försöken nedan, blir avgiven strålningsenergi

genom direktstrålning inom vinkeln 130°	0,36
" reflektion: $(0,4 \cdot 0,97 + 0,6 \cdot 0,05) 230/360 =$	0,26
summa	0,62

Absorbtion av värmestrålning

Det är vanligt att bjälklagsformen består av plywood. Enligt Sieber [10] har trä ett absorbtionstal av 0,73 vid en våglängd av $3 \mu\text{m}$. Vid strålning mot formar av trä blir den i betongen tillförda delen av förbrukad energi

$$0,73 \cdot 0,62 = 0,45$$

Installerad effekt blir här 2,2 gånger större än absorberad effekt.

Med en installerad effekt av 270 W/m^2 , som var fallet för det studerade bjälklaget, och med antaganden om reflektorn enligt ovan, tillförs betongbjälklaget $0,45 \cdot 270 = 120 \text{ W/m}^2$.

Konvektiv värmeöverföring

Elinfraarmaturen avger med nedsmutsad reflektor enligt ovan 62% av förbrukad energi i form av strålningsvärme. Resterande 38% värmer upp armaturen. Denna avger värme till omgivande luft genom konvektion. Det är därför viktigt att skärma av utrymmet under bjälklaget med presenningar så att även den uppvärmda luften utnyttjas för värmehärdning av betongkonstruktionen. Vid försöken nedan uppmättes under bjälklagsformen en lufttemperatur som låg ca 10°C över uteluftens temperatur.

4.2 Försök på arbetsplats

Bjälklagen var 25 cm tjocka och göts på formar av 15 mm lackerad formplywood på aluminiumbalkar och värmehärdades med strålningsvärme. Fig 4.4 visar en av de el-infravärmare som användes. Varje bjälklag om 6,95 x 9,50 m härdades med 4 el-infravärmare om 4,5 kW vardera, se fig 4.5. Detta motsvarar 0,27 kW/m². Strålningsvärmarna var i drift under natten före gjutningen och sedan under 71 timmar efter gjutningen. Total drifttid var 88 timmar vilket ger en energiförbrukning av 23,8 kWh/m² bjälklag.

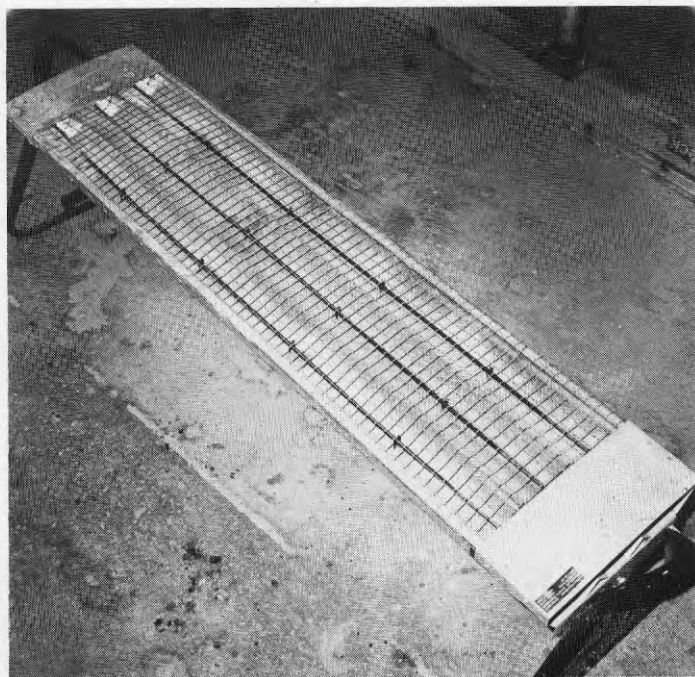


Fig 4.4 Prototyp till el-infravärmare om 4,5 kW som användes vid vintergjutning av betongbjälklag.

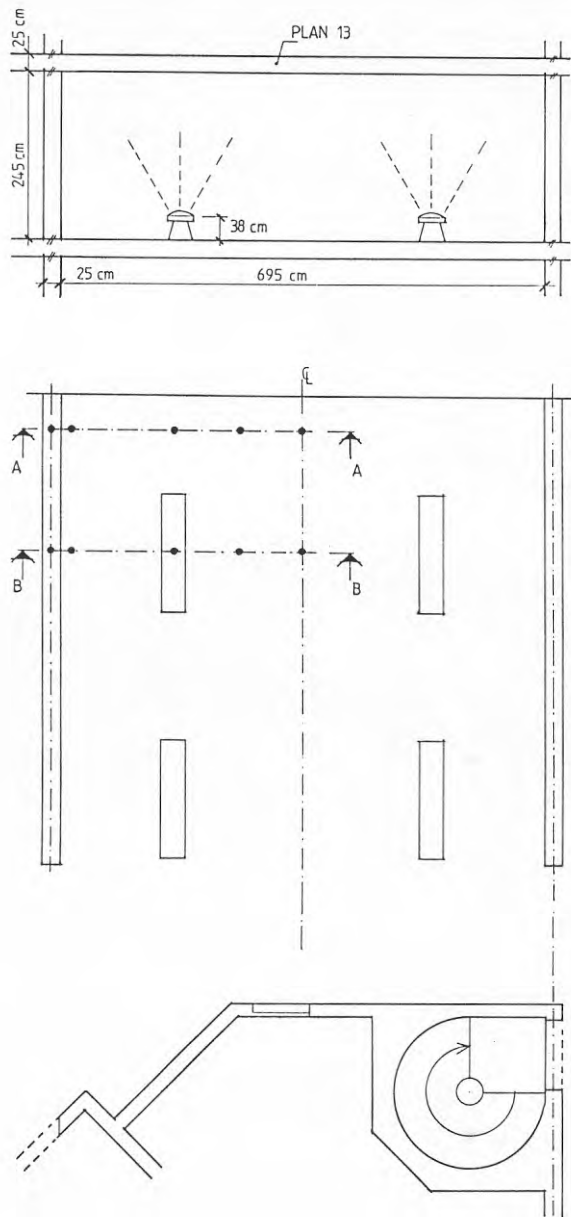


Fig 4.5 Sektion och plan över bjälklag, som visar placering av 4 el-infravärmare. Temperaturen mättes i punkter längs två linjer i bjälklagets övre vänstra hörn.

Temperaturen i betongbjälklaget mättes med 12 termoelement, vilka fästes vid underkants- och överkantsarmeringen. Mätpunkterna placerades längs två linjer enligt fig 4.6. Linje B-B ligger mitt över en el-infravärmare och linje A-A 0,5 m från bjälklagets ytterkant. Syftet med mätningen var att få en bild av temperaturfördelningen i bjälklaget i närheten av en infravärmare. Bjälklaget nedkyldes samtidigt mot kall betong genom en gjutfog samt genom bjälklagets ytterkant. Ett termoelement gav utluftens temperatur som i medeltal var -2°C .

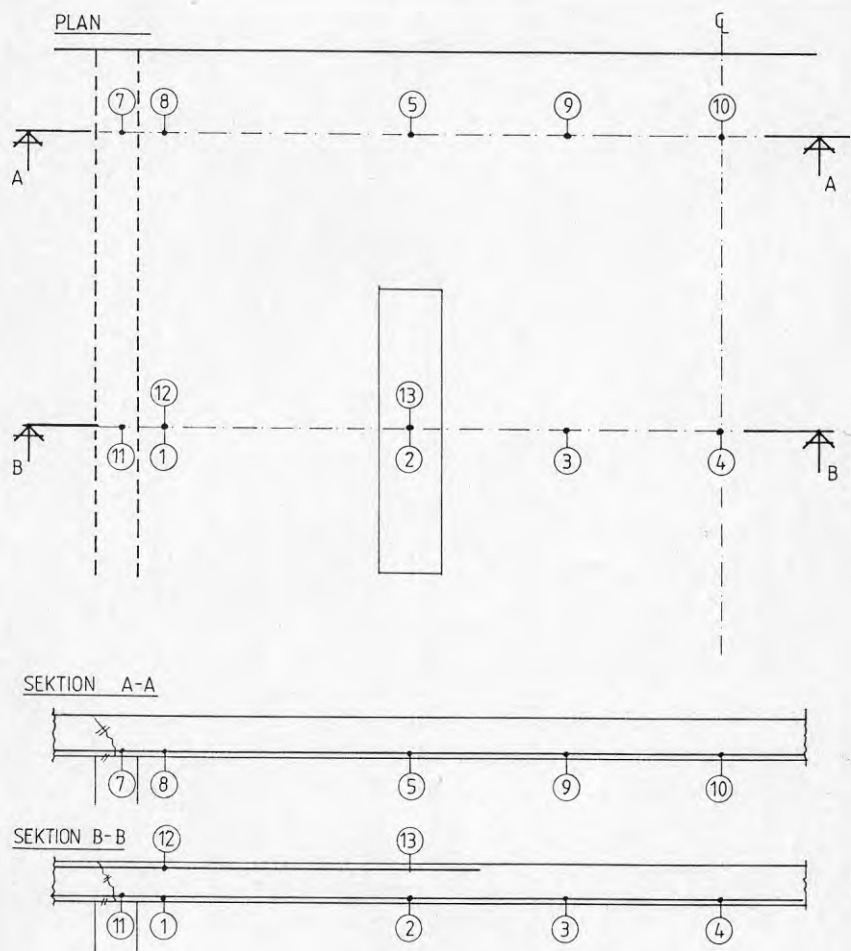


Fig 4.6 Temperaturmätpunkter i bjälklaget.

Uppmätta härdningstemperaturer i betongbjälklaget under de tre första dygnet framgår av fig 4.7. Betongmassan höll en temperatur av $+22^{\circ}\text{C}$ när den placerades i formen. Under de första timmarna föll betongens temperatur tills reaktionsvärmen och strålningsvärmen åter höjde temperaturen. En högsta temperatur av omkring 35°C uppmättes i plattan efter ca 20 timmar. Därefter föll temperaturen långsamt beroende på att värmetillskottet från betongens reaktionsvärme började avta.

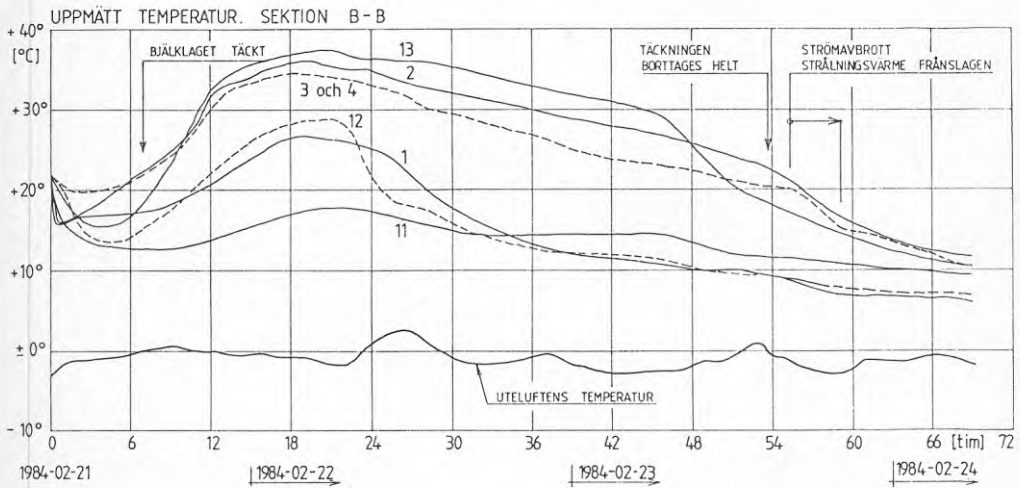
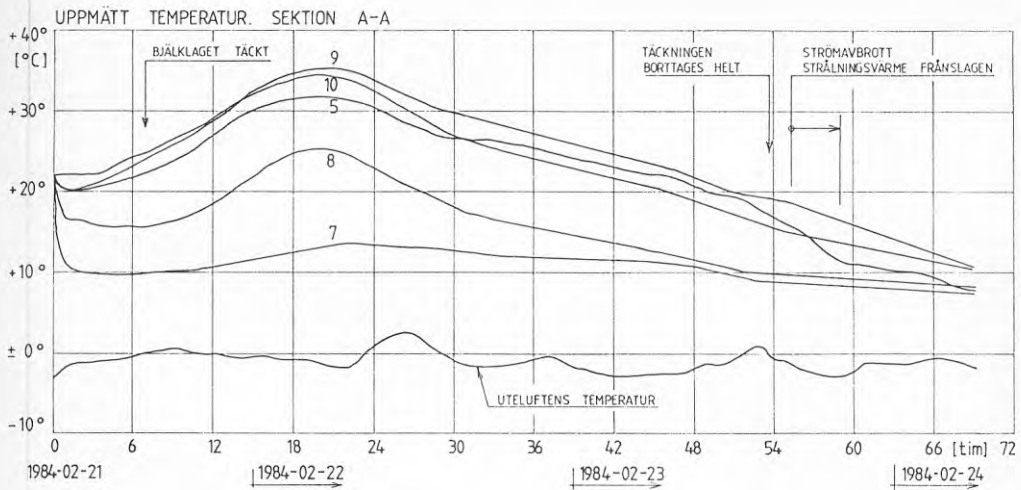


Fig 4.7 Uppmätta temperaturer i ett 25 cm tjockt betongbjälklag under värmehärdning med el-infravärme. Värmen var tillkopplad under hela mätperioden så när som under ett strömbavbrott.

Bjälklaget täcktes med 10 mm Ethafoam värmeisolering efter 7 timmar. Bjälklagets rand frilades efter 22 timmar för att ge plats för väggformar och isoleringen borttogs helt efter 54 timmar. Utrymmet under bjälklaget var intäckt med nedhängande presenningar framför öppningarna i ytterväggarna.

Av fig 4.8 framgår tydligt hur kalla partier av angränsande vägg och bjälklag kyler ner det nygjutna bjälklaget. En slutsats av mätningarna är att strålningsvärmarna behöver även riktas mot vägghörnen, vilket skulle kräva ytterligare 2 infravärmare för det aktuella bjälklaget.

4.3 Betongens hållfasthetsutveckling

Vid gjutningen användes fabriksblandad betong K35, som innehöll 307 kg importerad standardcement/m³. Tillsatsmedlet Pozzolith 122-HE användes, 3% av cementvikten. Det har bl a en accelererande verkan.

Betongens hållfasthet var vid rivning av formen efter 3 dygn 21 MPa (medelvärde av 3 objektlagrade 15 cm kuber). Hållfastheten var vid 29 dygns ålder 32,4 MPa (mv av 2 objektlagrade kuber). Normenligt lagrade kuber gav vid 28 dygns ålder 37 MPa.

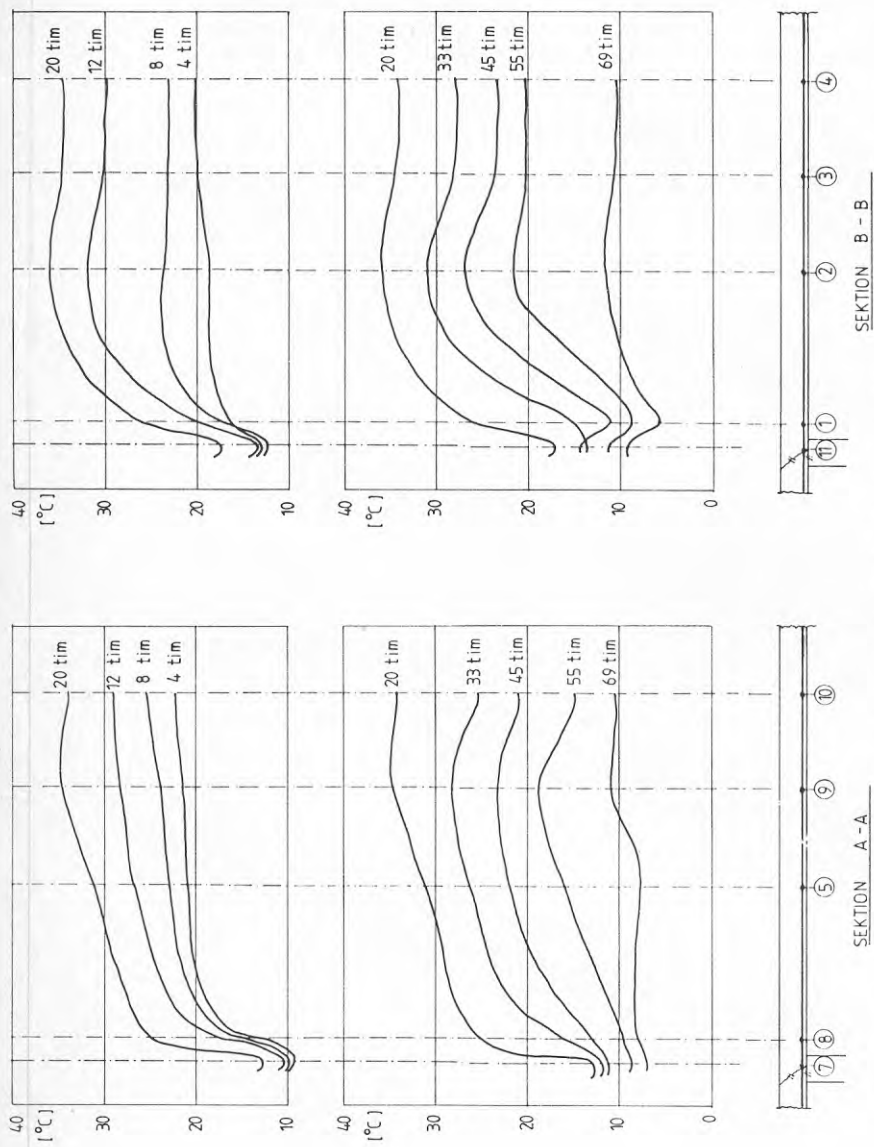


Fig 4.8 Temperaturfördelning i underkant betongbjälklag längs sektion A-A, 0,5 m från bjälklagets ytterkant, och sektion B-B, mitt över en el-infravärmare. De två övre diagrammen visar temperaturfördelningen 4-20 timmar efter gjutning (stigande temperatur) och de undre diagrammen temperaturfördelningen 20-69 timmar efter gjutning (fallande temperatur).

4.4 Bjälklagsnedböjningar

Bjälklagsformen bestod av två formbord bredvid varandra som täckte spännvidden 6,95 m. Vid rivning av formen borttogs ett formbord i taget och ersattes genast med ett antal rörstämp.

Bjälklagets nedböjningar bestämdes genom avvägningar med ett precisionsavvägningsinstrument och en mm-graderad skalstång. Nedböjningarna mättes i 30 punkter som utträtades på betongytan, se fig 4.9.

Avvägningar utfördes:

1. Före formrivning.
2. Efter formrivning och stämning, 3 dygn efter gjutning.
3. Vid 40 dygns ålder. Rörstämpan borttogs vid 30 dygns ålder.

Uppmätta nedböjningar hos det 25 cm tjocka betongbjälklaget framgår av fig 4.9. De maximalt uppmätta nedböjningarna var 2 mm vid 3 dygns ålder och 5 mm vid 40 dygns ålder.

Nedböjningarna vid 40 dygns ålder består först och främst av en elastisk nedböjning av plattans egenvikt, stämplaster från ovanför liggande bjälklag samt laster på bjälklaget från upplagd byggnadsmateriel. Härtill kommer ett bidrag från en tidsberoende nedböjning orsakad av betongens krypning.

En erfarenhet av dessa mätningar är att de blir något osäkra när avvägningstången ställs direkt på betongytan. Om stången inte hamnar på exakt samma punkt från gång till gång påverkas mätningarna av lokala ojämnheter. Mätnoggrannheten kan också störas av t ex ett sandkorn. Vid mätningar på de bjälklag som redovisas i kapitel 5 och 6 ställdes avvägningstången i varje mätpunkt på ett nedslaget stålspik eller en nedborrad expanderbult. Noggrannheten blev då betydligt bättre.

Beräkning av bjälklagets elastiska nedböjning

Förutsättningar:

Fast inspänning längs tre sidor,
en sida fri.

Jämnt fördelad last av egen-
vikt, $t = 0,25$ m.

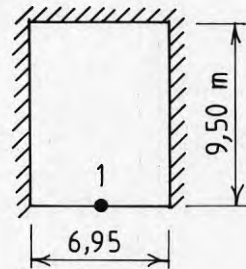
Antagen E-modul = 25.000 MPa
= 250.000 kp/cm²

Osprucken betongplatta förutsätts.

Inga sprickor syntes heller.

Beräknad böjdragpåkänning i betongbjälklaget var mindre än betongens verkliga böjdraghållfasthet varför plattan inte skulle spricka.

Beräknad nedböjning i punkt 1 av endast plattans egenvikt = 1,3 mm. Jämför med uppmätta nedböjningar enligt fig 4.9, vilka var större. Skillnaden beror på att bjälklaget förutom egenvikt även belastades med stämplaster från ovanför liggande bjälklag, laster på bjälklaget av byggnadsmateriel, bl a en hög gipsskivor avsedda för innerväggar. Dessutom tillkommer ett bidrag orsakat av betongbjälklagets krypning under tiden mellan 30 och 40 dygns ålder.



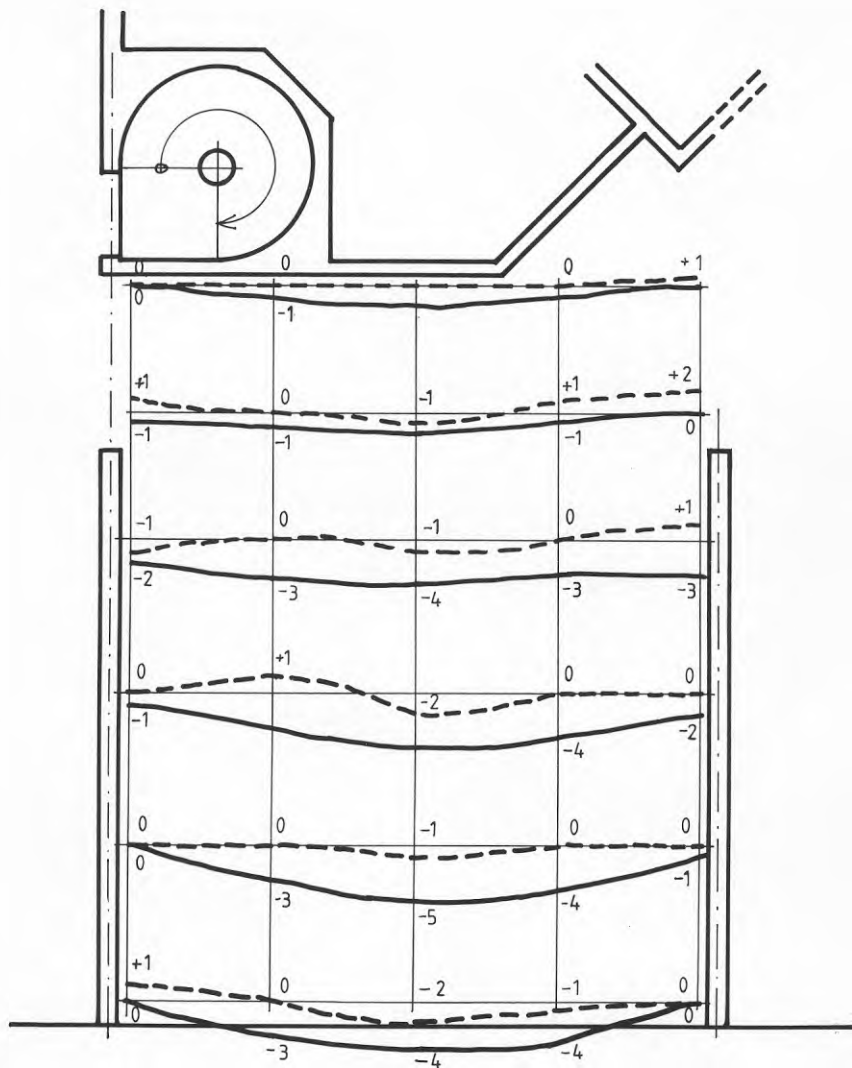


Fig 4.9 Plan över ett 25 cm tjockt betongbjälklag med ytan 6,95 x 9,50 m visande uppmätta nedböjningar i mm. Streckad linje: efter formrivning och stämning, 3 dygn efter gjutning. Heldragen linje: vid 40 dygns ålder. Stämnen revs 30 dygn efter gjutning.

4.5 Kommentarer

För det studerade betongbjälklaget var en total installerad effekt av $4 \times 4,5 = 18$ kW över ytan 66 m^2 i minsta laget. Ytterligare ett par strålningsvärmare borde ha kopplats in och riktats mot bjälklagets upplag där härdningstemperaturen var klart lägre än i plattans mitt.

Vid normala våningshöjder är det lämpligt att ställa el-infravärmarna på golvet under det bjälklag som skall värmehärdas. I det aktuella fallet var avståndet mellan värmare och formbord 2,05 m.

Det uppmättes en maximal härdningstemperatur i bjälklaget av ca 35°C . Den använda effekten höjde betongtemperaturen med $10\text{--}12^\circ\text{C}$ jämfört med bjälklag som inte tillfördes värme [15]. Formrivningen utfördes efter 3-4 dagar vid en betonghållfasthet av ca 21 MPa. Vid krav på kortare formrivningstid erfordras större effekt per ytenhet.

5. HÄRDNING MED GASOL-INFRAVÄRME. FÖRSÖK PÅ BOSTADSBJÄLKLAG I SKARPNÄCK

Gasoleddad strålningsvärme användes under vintern 1984 för värmehärdning av betongstommarna till ett flertal flerfamiljshus vid utbyggnaden av Skarpnäcksfältet i Stockholms södra utkant. ABV var totalentreprenör med HSB i Stockholm som beställare. Fig 5.1 visar en av byggnaderna under uppförande. Mätningar utfördes på det understa bjälklaget i byggnad H3:9.

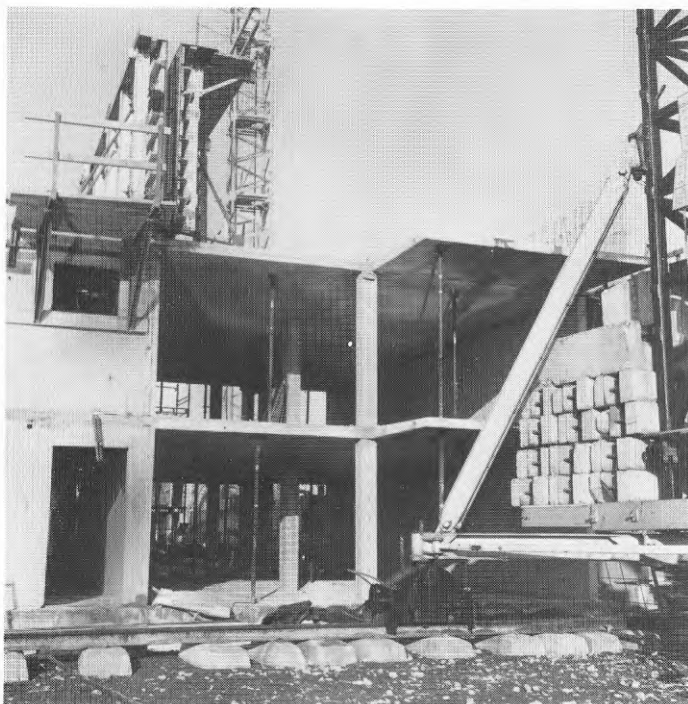


Fig 5.1 Betongstomme för bostadshus i Skarpnäck. Mätningar utfördes på det undre av bjälklagen på bilden.

5.1 Beräkning av härdningstemperaturer och uppvärmningsbehov

Nedan redovisas beräknade temperaturutvecklingar i ett betongbjälklag under några olika antagna förutsättningar samt beräknat uppvärmningsbehov för att uppfylla formrivningskravet vid 3 dygn.

Bjälklaget var 18 cm tjockt. Det antogs att uteluftens dygnsmedeltemperatur var -4°C och att det blåste i medeltal 1 m/sek under de första dygnen efter gjutningen. Det förutsattes åtgå 215 kg standard portlandcement/ m^3 betong för att uppnå hållfasthetsklass K25. Kravet på formrivningshållfasthet var 70% av K25 d v s 17,5 MPa. Bjälklagsformen förutsattes bestå av 13 mm formplywood. Utrymmet under bjälklaget avsågs vara väl intäckt med presenningar.

Figur 5.2 visar beräknad temperaturutveckling som funktion av tiden. Kurvorna 1 och 2 förutsätter att betongbjälklagets ovanyta är utan täckning under den studerade tidsperioden. I beräkningen för kurva 2 görs endast det tillägget att betongen tillsätts ett accelererande tillsatsmedel, i beräkningen antogs CaCl_2 , 1,5% av cementvikten.

Kurva 3 förutsätter utöver samma mängd accelerator som i kurva 2 att betongen täcks med värmeisolering genast vid gjutningen och att den borttages 23 timmar efter gjutningen. Värmeisoleringens värmegenomgångskoefficient ansattes till $5,145 \text{ W/m}^2\text{C}$ ($4,44 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$).

Med känd temperaturkurva kan betongens mognadsgrad beräknas för varje godtycklig tidpunkt. Tendensdiagram ger sedan uppnådd betonghållfasthet. Vid 3 dygns ålder är betongens beräknade tryckhållfasthet för kurva 1: 4,5 MPa, kurva 2: 7 MPa och för kurva 3: 7,5 MPa. Åtgärderna med accelerator och värmeisolering räcker således ej till för att uppnå erforderliga 17,5 MPa efter 3 dygn.

För kurva 4 var antagandena som för kurva 3 men dessutom förutsattes att värme tillfördes, i detta fall från gasoleldade strålningsvärmare med en installerad effekt av 990 W/m^2 bjälklag. Strålningsvärmarna antogs vara tända till 20 timmar efter gjutningen och avge 50% av energin i form av strålning mot bjälklagsformen som hade en absorptionskoefficient av 0,72. Härav följer att endast 356 W/m^2 utnyttjades som absorberad värme i bjälklaget. Utrymmet under bjälklaget avsågs vara väl intäckt med presenningar så att luftens temperatur under formen höll i genomsnitt ca 10°C över uteluftens temperatur under och tiden närmast efter användningen av gasolinfra.

Ur temperaturkurva 4 beräknas betongens mognadsgrad och härur uppnådd tryckhållfasthet till 17,5 MPa vid 3 dygns ålder. Den valda kombinationen av vinteråtgärder och nivån på tillförd värme uppfyller således precis kravet på formrivningshållfasthet vid avsedd tidpunkt.

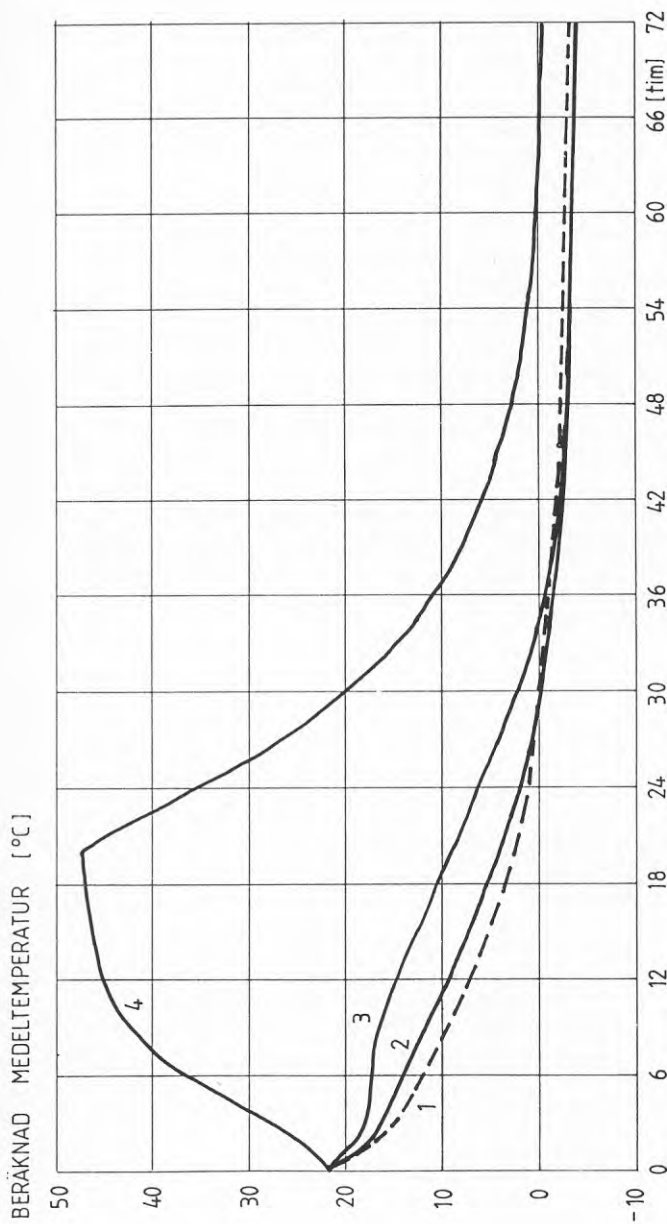


Fig 5.2 Beräknad härdningstemperatur i ett 18 cm tjockt betongbjälklag. Förutsättningar: 215 kg std cement/m³ betong, gjuttemperatur = 22°C, utluftens dygnsmedeltemperatur = -4°C, vindhastighet = 1 m/sek, formbotten av 13 mm plywood. Kurva 1: Bjälklagets ovanyta utan värmeisolering. Kurva 2: Inblandning av accelerator. Kurva 3: Accelerator, värmeisolering av ovanytan under 23 tim. Kurva 4: Accelerator, värmeisolering av ovanytan 23 tim, gasolinfravärme under 20 timmar med 990 W/m² installerad effekt (356 W/m² absorberad effekt). Lufttemperatur under formen +6°C.

Gasoleldade strålningsvärmare

Gasoleldade strålningsvärmare arbetar vid en temperatur av ca 1175^oK (ca 900^oC) varvid strålningens våglängd är ca 2,5 μm. De armaturer som idag används på byggarbetsplatser är av stål. Enligt uppgift från en av landets ledande tillverkare har brännare av stål en verkningsgrad av något över 50%. Brännare av keramik har en verkningsgrad av upp emot 70%. Detta material är emellertid ömtåligt och går lätt sönder vid användning på byggarbetsplatser. De är idag ovanliga inom detta område.

Absorbtion av värmestrålning

Det är vanligt att bjälklagsformen består av mörk, lackerad formplywood. Enligt Sieber [10] har trä ett absorbtionstal av 0,72 vid en våglängd av 2,5 μm. Den i betongen som strålningsenergi absorberade delen av förbrukad effekt i gasol-infraarmaturerna blir därför:

$$0,72 \cdot 0,5 = 0,36$$

$$\text{eller } 0,36 \cdot 990 = 356 \text{ W/m}^2 \text{ bjälklag}$$

Konvektiv värmeöverföring

Gasolbrännaren avger ca 50% av förbrukad energi som strålningsvärme och en stor del av resten som konvektionsvärme. Det är därför viktigt att skärma av utrymmet under bjälklaget med presenningar så att även den uppvärmda luften utnyttjas för värmehärdning av betongkonstruktionen. Vid försöken nedan uppskattades att lufttemperaturen under bjälklagsformen som medelvärde låg ca 10^oC över uteluftens temperatur.

5.2 Försök på arbetsplats

Bjälklagets dimensioner framgår av fig 5.2. Det 81 m² stora bjälklaget värmehärdades med gasoleldad strålningsvärme, 6 brännare à 8 kW och 2 dubbelbrännare à 16 kW. Installerad effekt var 0,99 kW/m² bjälklag. Brännarna om 8 kW, se fig 5.3, monterades på formställningen 1,2 m över golvet. Dubbelbrännarna om 16 kW ställdes på golvet, fig 5.4.

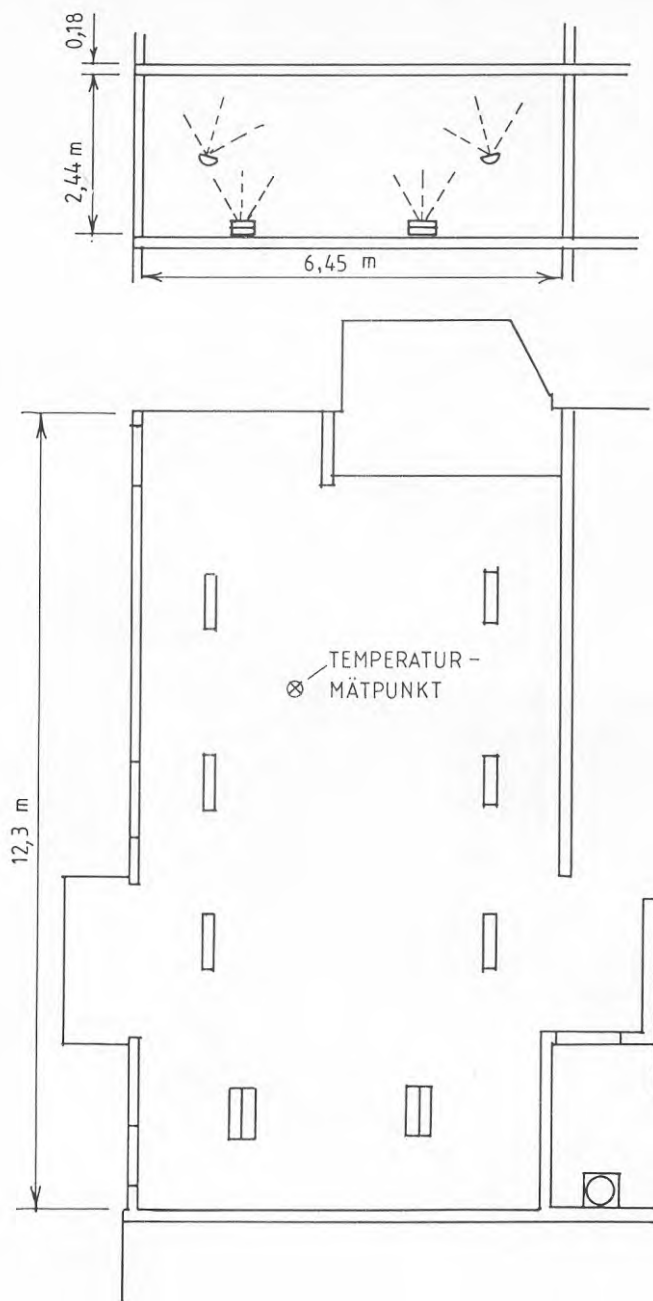


Fig 5.2 Sektion och plan över bostadsbjälklag med placering av 6 brännare à 8 kW och 2 dubbelbrännare à 16 kW för värmevärmning med gasolinfra. Temperaturen mättes i en punkt.

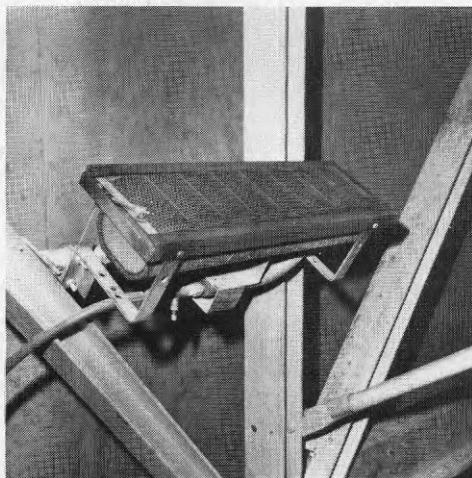


Fig 5.3 Gaseleddad Bahco strålningsvärmare om 8 kW monterad på formställningen.

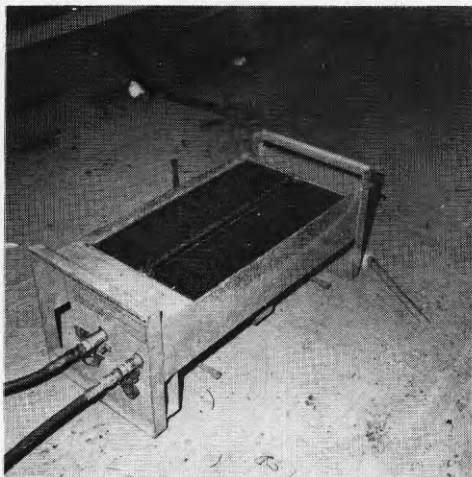


Fig 5.4 Gaseleddad Bahco strålningsvärmare i dubbelmontage, 16 kW.

Det 18 cm tjocka bjälklaget göts på 13 mm lackerad mörkbrun formplywood vilande på aluminiumbalkar. Fig 5.5 visar en bild av formsystemet med påmonterade strålningsvärmare. Utrymmet under bjälklaget hölls väl intäckt under värmehärdningen. Alla fönsteröppningar och fasadöppningar täcktes för med presenningar. Infravärmen var påkopplad under natten före gjutningen för att hålla form och armering fria från is och snö.

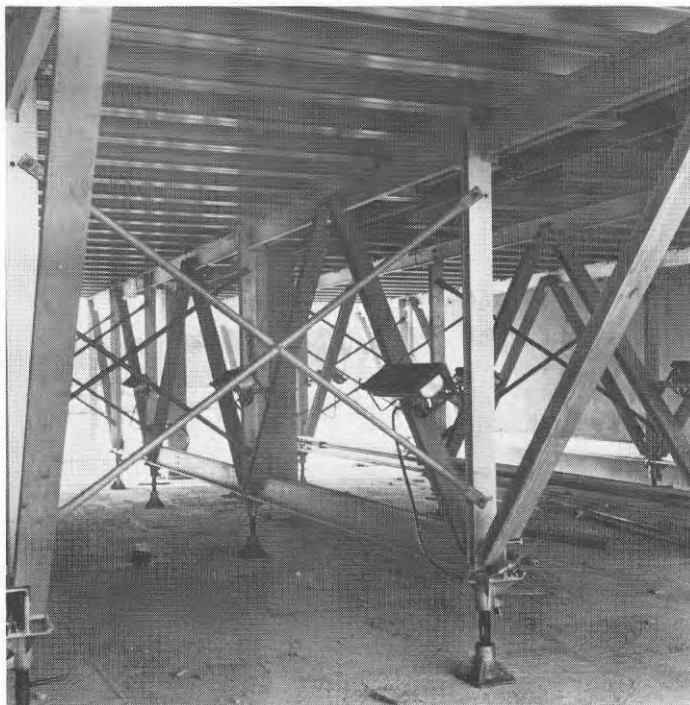


Fig 5.5 Formsystem för gjutning av bjälklag med påmonterade strålningsvärmare.

Gjutningen utfördes på konventionellt sätt med kran och bask. Betongytan avjämnades med sloda. Det blåste ca 1 m/sek. Uteluftens temperatur var ca -2°C . Under natten sjönk temperaturen till -7°C . Dygnsmedeltemperaturen var ca -4°C under de första dygnen efter gjutningen.

Under gjutningen täcktes betongytan efter hand med värmeisolerande mattor. Det användes Örbomattan av formatet 1x2 m. Mattan bestod av 25 mm polyeter i en sluten plastpåse. Plasten var emellertid sönderriven på många mattor så att värmeisoleringen sög upp vatten. Mattorna var därför tunga av vatten och isklumpar vilket gjorde hanteringen besvärlig.

Täckningen av betongytan blev ej perfekt. Vid utläggningen uppstod stora springor mellan mattorna. Omkring 20% av totala betongytan var exponerad för vind.

Av stor betydelse var att värmeisoleringsförmågan försämrades starkt när mattorna sög upp vatten. Torr polyeter uppges ha ett värmeledningstal $\lambda = 0,0383 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ($0,033 \text{ kcal/m h}^\circ\text{C}$). Vattengenomdränkt polyeter kan som sämst ha värmeledningstalet $\lambda = 0,59 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ($0,51 \text{ kcal/m h}^\circ\text{C}$), vilket gäller för vatten. Ungefär hälften av mattorna hade våt värmeisoleringsmattor. Med antaganden om att hälften av värmeisoleringsmattorna var torra och hälften var genomvåta samt att 80% av betongytan var täckt med mattor och 20% var exponerad för vind fås som medelvärde för hela betongbjälklaget en värmegenomgångskoefficient $k = 5,145 \text{ W/m}^2\text{C}$ ($4,44 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$).

Temperaturen mättes i bjälklagets mitt, fig 5.2, och registrerades med en skrivare. Uppmätt temperatur under de tre första dygnet framgår av fig 5.6. Vid gjutningen användes varm betong som i formen höll $+22^\circ\text{C}$. Strålningsvärmarna var tillslagna till 20 timmar efter gjutningen. Som mest uppmättes $+52^\circ\text{C}$ i betongen. Värmeisoleringsmattorna borttogs 23 timmar efter gjutning för att möjliggöra arbete på bjälklaget. Temperaturen i bjälklaget började då att falla.

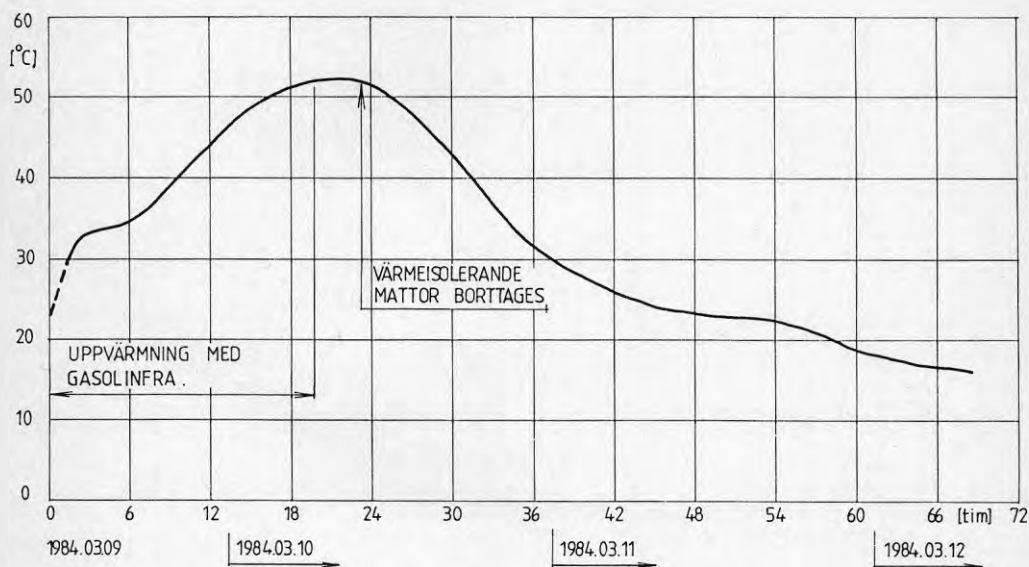


Fig 5.6 Uppmätt temperatur i plattmitt av ett 18 cm tjockt betongbjälklag under värmehärdning. Gasolinfravärme till 20 timmar efter gjutning. Värmeisolerande mattor täckte betongytan från gjutningen till 23 timmar efter gjutning.

5.3 Betongens hållfasthetsutveckling

Till gjutningen användes fabriksblandad betong K25 från AB Betong-industri, Sicklafabriken, Stockholm. Data enligt följesedel:

215 kg std cement/m³ betong, (Slite)
 20 kg SiO₂/m³ betong, (Ljungasil)
 Kalciumklorid 1% av cementvikten, (accelerator)
 Sikament FF, 0,8% av cementvikten, (melaminbaserad flyt-tillsats)
 Trögflytande konsistens, sättmått 100 mm
 Stenmax 38 mm

Betongens hållfasthet bestämdes vid 3 och 28 dygns ålder på objekt-lagrade kuber. Kuberna ställdes på bjälklaget och täcktes över med värmeisoleringsmattor på samma sätt och samtidigt med bjälklaget. Erhållna tryckhållfastheter och objektlagrade kuber framgår av tabell 5.1.

Tabell 5.1 Kubhållfastheter, objektlagrade kuber

Kub nr	Provn ålder dygn	Tryckhållfasthet MPa	Medel-värde MPa
1 2 3	3	26,5 30,8 30,2	29,2
4 5 6	28	35,7 37,6 34,6	36,0

Uppställda krav på betongen var hållfasthetsklass K25 i utförandeklass II. Normenligt lagrade kuber vid 20°C höll vid 28 dygns ålder inte mindre än 52 MPa enligt protokoll från Statens provningsanstalt.

Betongens betydande överhållfasthet förklarar betongfabriken med 1. tillsats av kiselstoff, 20 kg/m³ betong och 2. utnyttjande av flyttillsats som vattenreducerare varvid man får ett sänkt vattencementtal och en förhöjd hållfasthet.

Tillsats av kalciumklorid inverkar som en accelerator och bidrar tillsammans med värmehårdning till en hög hållfasthet redan vid 3 dygns ålder.

5.4 Bjälklagsnedböjningar

Bjälklagen enligt fig 5.2 med ytan 6,45 x 12,30 m var de största som förekom bland 900 lägenheter som ABV uppförde på Skarpnäcksfältet. Redan från byggprojektets igångsättning mätte man bjälklagsnedböjningarna. Slutmätningen för varje bjälklag utfördes 3-6 månader efter gjutningen.

Inledningsvis underskattade man betydelsen av att sätta in stämp vid formrivningen. När man sedan började med detta sattes det in för få. Stämpan blev då hårt utnyttjad och deformerades i viss mån. Resultaten från de inledande mätningarna kan sammanfattas:

- Hos bjälklag som uppfördes helt utan stämpling upp-mättes mittnedböjningar av 20-30 mm.
- Bjälklag som överhöjdes erhöll lika stor nedböjning men mätt från en högre nivå.
- Bjälklag med 10 mm överhöjning och stämpling erhöll mittnedböjningar av 3-6 mm under en linje mellan upp-lagen eller en total nedböjning av 13-16 mm.

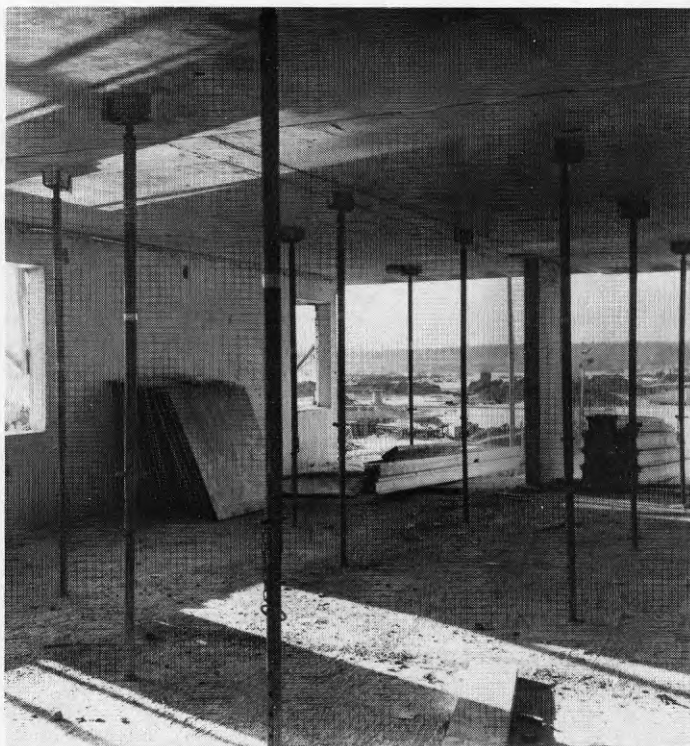


Fig 5.7 Det studerade bostadsbjälklaget uppstämplat efter formrivning.

Under vintern-våren 1984 genomfördes noggranna uppmätningar av nedböjningar med ett precisionsavvägningsinstrument på bjälklaget som behandlats tidigare i detta kapitel. Nedböjningarna mättes i 40 punkter. I varje mätpunkt nedslogs ett stålspik på vilket en mm-graderad skaistång ställdes och hölls vertikalt med hjälp av ett dosvattenpass fäst på stången.

Avvägningar utfördes:

1. Före formrivning.
2. Efter formrivning när bjälklaget var stämplat, se fig 5.7. Bjälklagsformen bestod av två formbord som tillsammans täckte spännvidden 6,45 m, se fig 5.5. Ett av formborden revs åt gången och ersattes genast med stämp. Det utfördes 3 dygn efter gjutning.
3. 19 dygn efter gjutning. Stämpan var då rivna men laster från ovanför liggande bjälklag fördes ner på bjälklaget via rörstämp.
4. 109 dygn efter gjutning, 90 dygn efter rivning av stämpan under bjälklaget.

Uppmätta nedböjningar hos det 18 cm tjocka bjälklaget framgår av fig 5.8. Streckad linje visar nedböjningen som uppstod vid formrivningen. Den blev endast 1 mm.

Streck-prickad linje visar nedböjningen efter rivning av stämpan. Det är en elastisk nedböjning och uppgår till max 5 mm. Nedböjningen härrör från inverkan av plattans egenvikt och yttre laster på bjälklaget, huvudsakligen laster från rörstämp från ovanliggande bjälklag. Den uppmätta nedböjningen om 5 mm kan jämföras med beräknad elastisk nedböjning av endast egenvikt om 2,3 mm.

Heldragen linje visar nedböjning efter ytterligare 3 månader. Då uppmättes maximalt 10 mm nedböjning. Här har tillkommit en tidsberoende deformation som härrör från betongens krypning. Med tiden avtar ökningen i nedböjning. När det är tid att avjämna golvet med flytspackel har en stor del av den tidsberoende deformationen inträffat.

För detta bjälklag uppmättes en största nedböjning av 1/645 av spännvidden, vilket nästan anses vara ett bra resultat.

Beräkning av bjälklagets elastiska nedböjning

Förutsättningar:

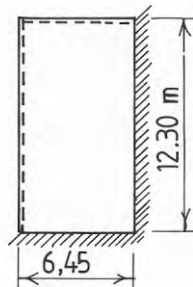
Fast inspänning längs två sidor,
två sidor fritt upplagda

Jämnt fördelad last av
egenvikt, $t = 0,18$ m

Antagen E-modul = 30.000 MPa
= 300.000 kp/cm²

Osprucken betongplatta.

Beräknad nedböjning i plattmitt = 2,3 mm.



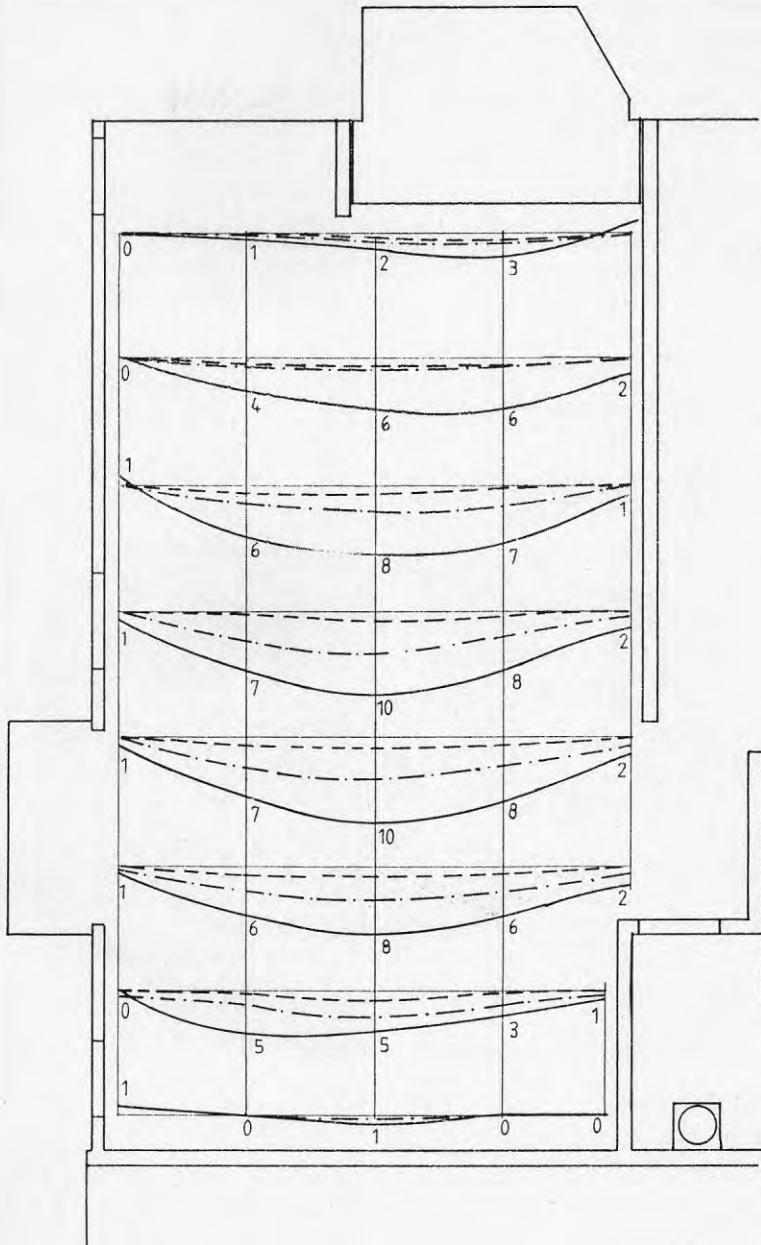


Fig 5.8 Plan över ett 18 cm tjockt bostadsbjälklag med ytan 6,45 x 12,3 m visande uppmätta nedböjningar i mm. Streckad linje: efter formrivning och stämning, 3 dygn efter gjutning. Streck-prickad linje: efter rivning av stämp, 19 dygn efter gjutning. Heldragen linje: 90 dygn efter rivning av stämp, 109 dygn efter gjutning.

6. HÄRDNING MED GASOLELDADE VARMLUFTAGGREGAT OCH STRÅLNINGSVÄRMARE. FÖRSÖK PÅ TAKBJÄLKLAG I NORRKÖPING

Värmehärdning av betongbjälklag under arbetsplatsförhållanden studerades under vintern 1984 vid uppförandet av en betongstomme till Länssjukhuset i Norrköping. Det uppfördes av konsortiet LiN-bygget med ABV, BPA och Skanska som konsortiemedlemmar.

Mätningar utfördes på takbjälklaget till byggnad 35:3. Fig 6.1 visar byggnaden under uppförande med det studerade takbjälklaget längst till vänster i bild. Bjälklagets dimensioner framgår av fig 6.2. Det ägnades särskild uppmärksamhet åt temperatur- och hållfasthetsutveckling i betongbjälklaget samt dess nedböjningar efter formrivningen.



Fig 6.1 Nybyggnad av betongstomme för länssjukhuset i Norrköping. Bilden tagen 1 mars 1984.

6.1 Värmehärdning av takbjälklag

Takbjälklaget var 30 cm tjockt och göts på formar av 13 mm lackerad mörkbrun formplywood som vilade på aluminiumbalkar. Gjutningen utfördes som en konventionell gjutning med kran och bask. Betongen planades av med sloda till rätt nivå som bestämdes med s k laser. Fig 6.3 visar en bild av formsystemet. Utrymmet under bjälklaget var väl intäckt. Alla väggöppningar var omsorgsfullt tätade med vävpast som spikats på träramar. Utrymmet avskärmades med presenningar mot tidigare gjutna delar av takbjälklaget. Den aktuella gjutetappen omfattade 299 m^2 bjälklag som motsvarade 90 m^3 betong.

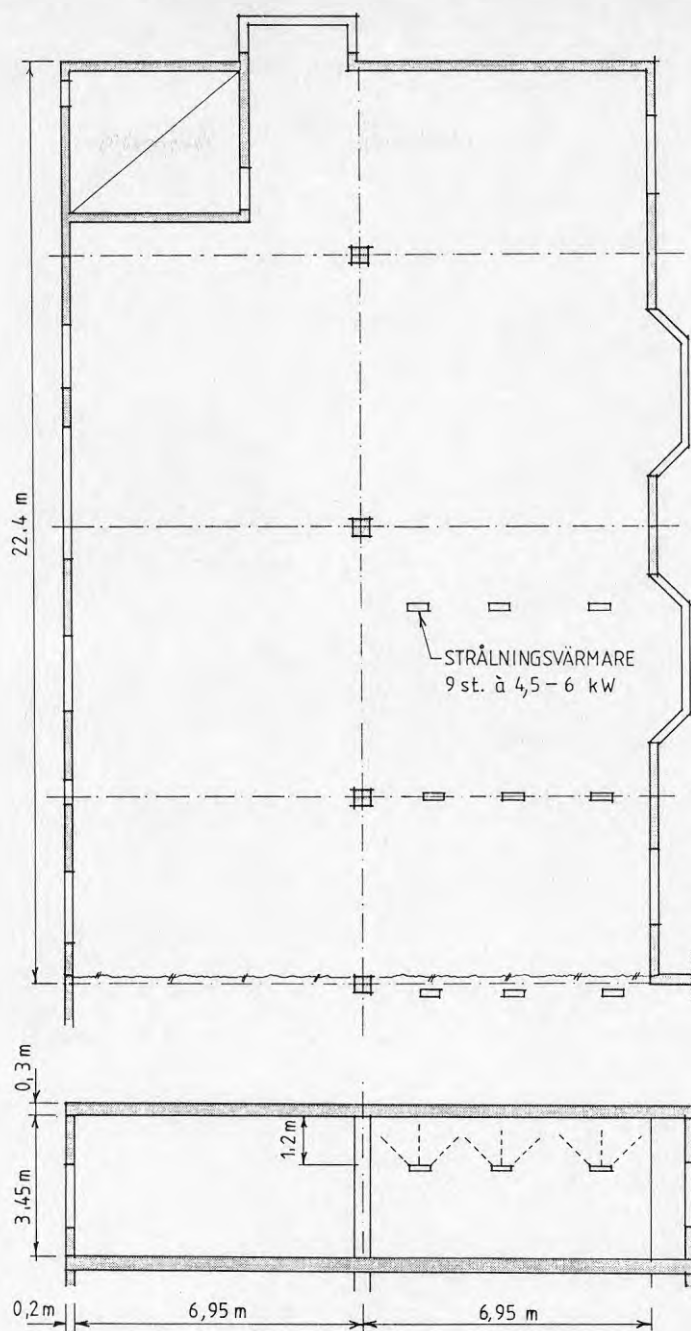


Fig 6.2 Plan och sektion över takbjälklag. Utrymmet under bjälklaget uppvärmdes med 2 st Bahco gasoeldade luftvärmare om vardera 38 kW. En del av bjälklaget, figurens nedre högra kvadrant, uppvärmdes dessutom med 9 gasoeldade strålningsvärmare med en total effekt av ca 50 kW.



Fig 6.3 Formsystem för gjutning av takbjälklag

Värmehärdningen av takbjälklaget ombesörjdes i första hand genom grundvärme från 2 st Bahco luftvärmare ALG 40 om vardera 38 kW. Detta motsvarar $0,25 \text{ kW/m}^2$ fördelat över hela takytan. Luftvärmarna som blåste ut varm luft åstadkom god luftcirkulation och jämn temperaturfördelning i det avgränsade utrymmet. Detta framgick av mätningar av lufttemperaturen på olika ställen i det uppvärmda utrymmet. Under det första dygnet varierade lufttemperaturen 1 m över golv mellan 19 och 29°C .

Under en del av bjälklaget enligt fig 6.2 kompletterades grundvärmen med 9 st strålningsvärmare Primus GM 12 SR om vardera 4,5–6 kW. Ca 50 kW tillfördes en bjälklagsyta om 79 m^2 eller $0,63 \text{ kW/m}^2$. Fig 6.4 visar en av strålningsvärmarna.



Fig 6.4 Gaseleddad Primus strålningsvärmare, reglerbar 4,5-6 kW.

6.2 Mätning av härdningstemperaturer

Temperaturen i bjälklaget mättes med 3 termoelement och registrerades kontinuerligt med en skrivare. Termoelementens placering framgår av fig 6.5. Temperaturen i bjälklaget mättes dels över strålningsvärmarna och dels i det område som värmdes endast med varmluft. Givare 1 och 4 monterades i nivå med underkantsarmeringen medan givare 3 monterades mitt i plattan. Temperaturmätningarna ger bl a information om strålningsvärmarnas inverkan på härdningstemperaturen.

Två termoelement mätte kontinuerligt luftens temperatur. En givare gav inneluftens temperatur över strålningsvärmarna ca 0,1 m under bjälklagsformen. En annan givare gav uteluftens temperatur som varierade mellan 0 och +5°C.

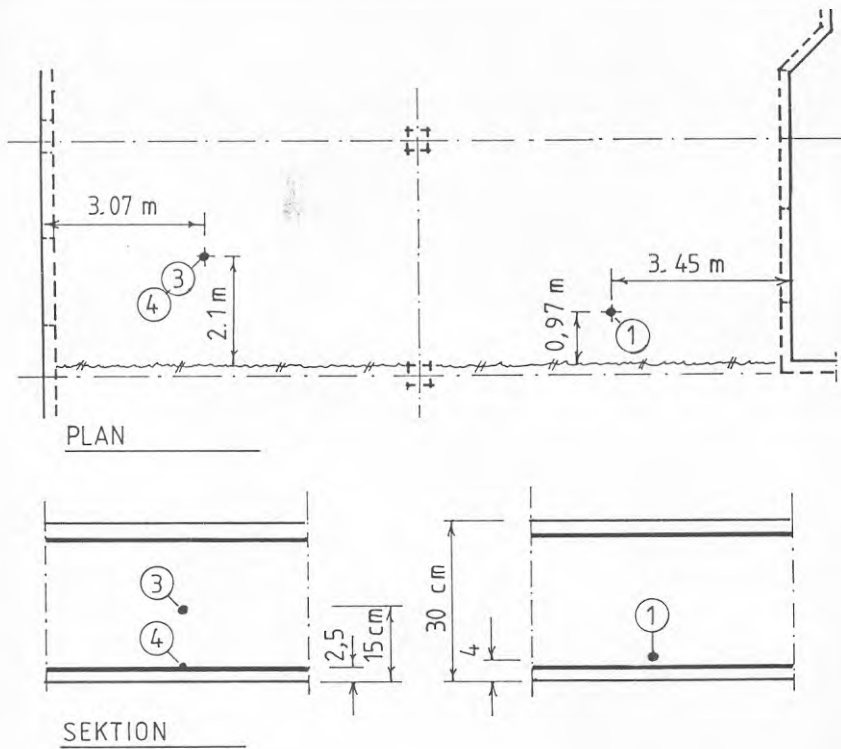


Fig 6.5 Temperaturmätpunkter i bjälklaget

Uppmätta temperaturer i betongbjälklaget under den 6 dygn långa mätperioden framgår av fig 6.6. Betongmassan höll en temperatur av 18-19°C när den placerades i formen. De gasoeldade luftvärmarna startades redan innan gjutningen påbörjades och strålningsvärmarna 1 timme efter gjutningen. Detta förklarar att härdningstemperaturerna i betongen steg förhållandevis snabbt. Strålningsvärmarna var tända under 25 timmar. En högsta betongtemperatur om 55°C i strålningsuppvärmd betong och 37°C i betong med endast varmluftsuppvärmning uppmättes 14 respektive 17 timmar efter gjutningen.

Bjälklagets ovansida täcktes med 10 mm Ethafoam värmeisoleringsmattor 22 timmar efter gjutningen och borttogs helt 119 timmar efter gjutningen. Av kurva 1 i fig 6.6 kan man dra slutsatsen att 68 timmar efter gjutningen har värmeisoleringen över den strålningsuppvärmda bjälklagsdelen avlägsnats, kanske genom vindens inverkan.

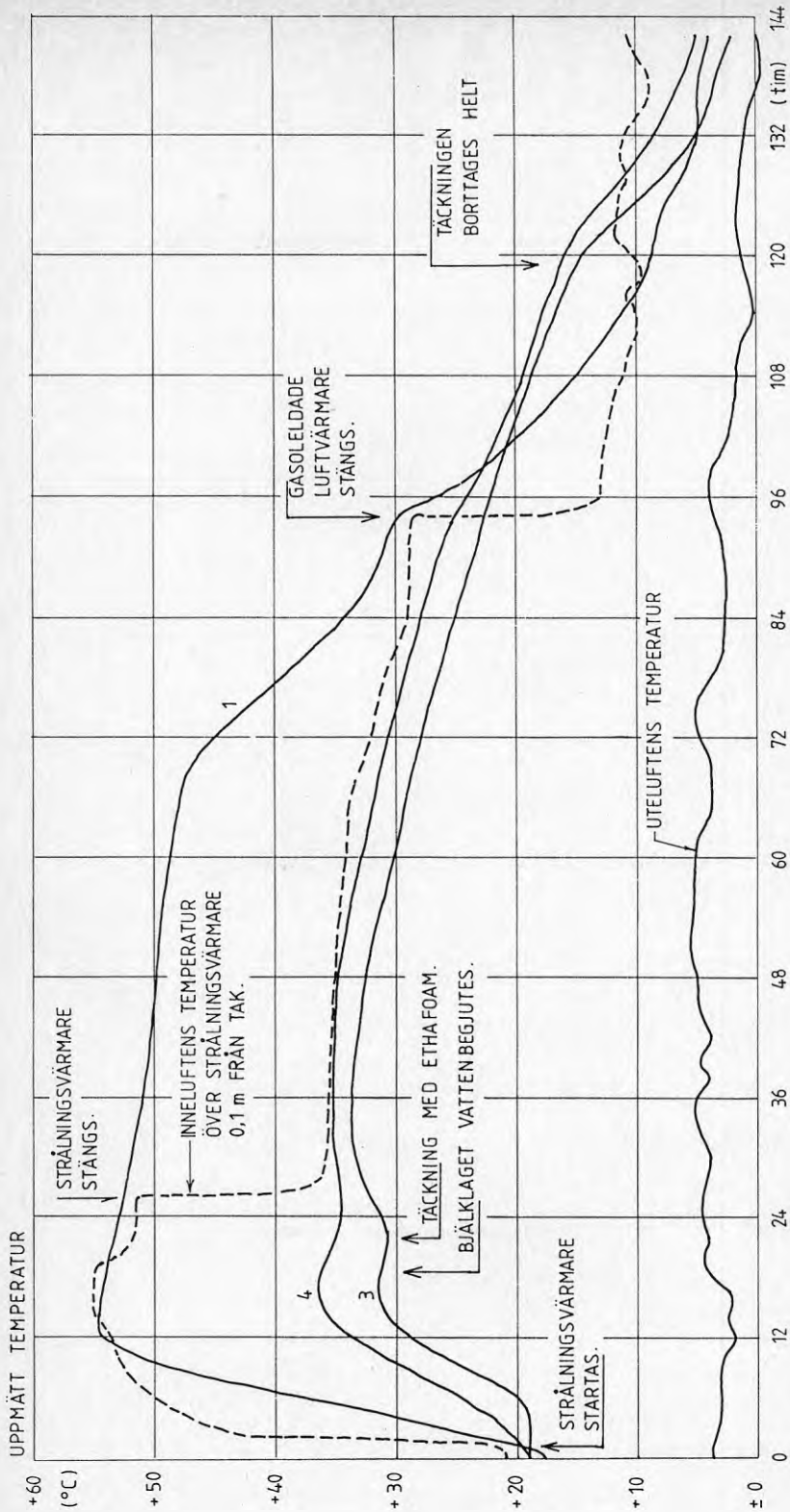


Fig 6.6 Uppmätta temperaturer i ett 30 cm tjockt betongbjälklag under värmehärdning. Gasoleldade luftvärmare från gjutning till 94 timmar. Dessutom strålningsuppvärmning under en del av bjälklaget mellan 1 och 26 timmar efter gjutning.

6.3 Beräkning av härdningstemperaturer

Nedan redovisas beräknad temperaturutveckling i det 30 cm tjocka betongbjälklaget, dels vid värmehärdning under bjälklagsformen med endast varmluft och dels med både varmluft och strålningsvärme.

Bjälklaget göts i betong K35 innehållande 310 kg standard portlandcement/m³ betong. Inblandning av accelererande tillsatsmedel, 1,5% av cementvikten. Uteluftens dygnsmedeltemperatur antogs vara +3°C.

Bjälklagsform av 13 mm formplywood har en värmegenomgångskoefficient $k = 3,66 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ($3,16 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$). Formen satt kvar under hela mätperioden.

Bjälklagets ovanyta får utan täckning vid vindhastigheten 1 m/sek ett övergångstal av $9,51 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$ ($8,2 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$).

Betongytan täcktes med 10 mm Ethafoam värmeisolering efter 22 timmar och borttogs 119 timmar efter gjutningen. Vid vindhastigheten 1 m/sek blir värmegenomgångskoefficienten $k = 2,96 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$ ($2,55 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$).

Bjälklagsdel värmehärdad med varmluft

Gjuttemperatur 19°C.

Antagen lufttemperatur under formen

0 - 94 tim	32°C
94 - 144 "	12°C

Beräknad härdningstemperatur, se kurva 1 i fig 6.7.

Bjälklagsdel härdad med varmluft + gasoleldad strålningsvärme

Gjuttemperatur 18°C.

Gasoleldad strålningsvärme under 1-26 tim efter gjutning.

Installerad strålningseffekt = 630 W/m^2

Absorberad värme = $0,72 \cdot 0,5 \cdot 630 = 227 \text{ W/m}^2$, jämför avsnitt 5.1.

Antagen lufttemperatur under formen

0 - 26 tim	52 °C
26 - 94 "	35 °C
94 -144 "	10 °C

Beräknad härdningstemperatur, se kurva 2 i fig 6.7.

Beräknad temperaturgradient i bjälklaget

Beräknad temperaturgradient i det 0,3 m tjocka betongbjälklaget åskådliggörs i fig 6.8 och fig 6.9 vid olika tidpunkter efter gjutningen. Beräkningarna har utförts med datorprogrammet PLATEMP [14].

Fig 6.8 gäller för bjälklagsdelen som härdades med endast varmluft mot bjälklagsformen. Det uppstod då en maximal temperaturskillnad över tvärsnittet om 13°C.

Fig 6.9 gäller för den bjälklagsdel som härdades med både varmluft och strålningsvärme mot bjälklagsformen. Här uppstod en kraftig temperaturskillnad mellan överkant och underkant bjälklag, i detta fall max 31°C. Ovanytan var då fri och exponerad för vind. När betongytan täcktes med värmeisolering 22 timmar efter gjutningen steg yttemperaturen i ovankant och temperaturskillnaden minskade fort till ca 5°C.

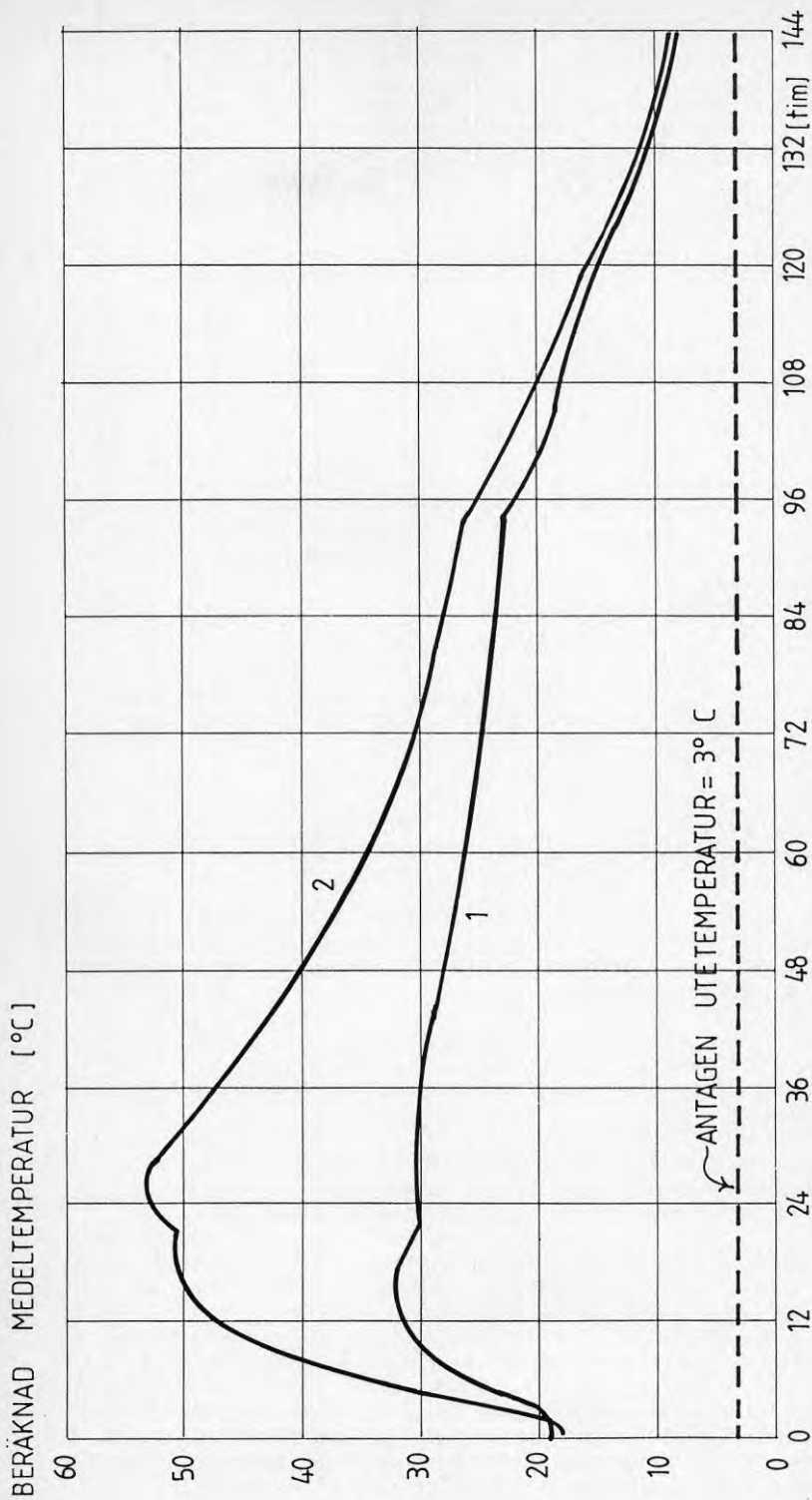


Fig 6.7 Beräknad härdningstemperatur i ett 30 cm tjockt betongbjälklag. Förutsättningar: 310 kg std cement/m³ betong. Uteluftens dygnsmedeltemperatur = +3°C. Vindhastighet = 1 m/sek. Formbotten av 13 mm plywood. Täckning med 10 mm Ethafoam värmeisolering 22-119 timmar efter gjutning. Kurva 1: Värmehärdning under form med varmluft. Kurva 2: Värmeluft + gasoleldad strålningsvärme.

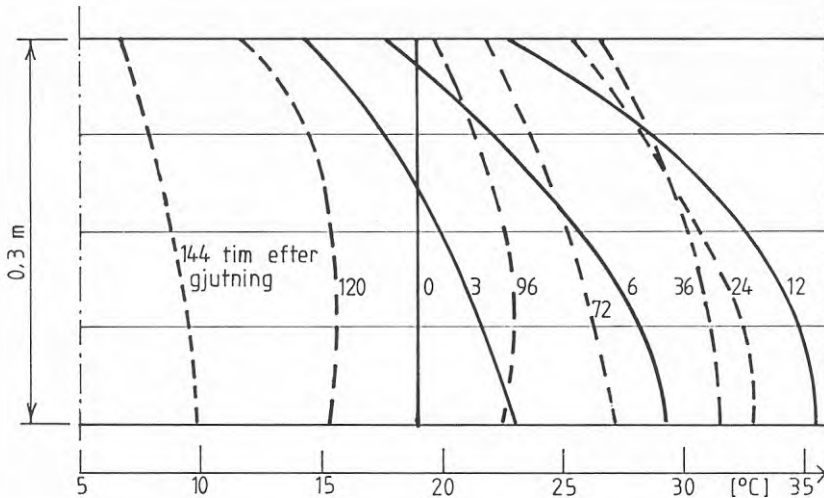


Fig 6.8 Beräknade temperaturprofiler i ett 0,3 m tjockt betongbjälklag efter 3, 6, 12 timmar (stigande temperatur - hel-dragen linje) och efter 24, 36, 72, 96, 120 och 144 timmar (fallande temperatur - streckad linje). Gjuttemperaturen var 19°C. Bjälklagsdelen härdades med endast varmluft.

Strålningsvärme används huvudsakligen för härdning av betongbjälklag. Det uppstår en mycket stor temperaturgradient vid ensidig uppvärmning när motsatt sida saknar värmeisolering.

Under värmehärdningen längdändrar sig betongen. Det uppstår först tryck-påkänningar i underkant (uk) platta och dragpåkänningar i överkant (ök) platta till följd av temperaturgradienten vid uppvärmning. Det finns nu risk för ytsprickor i ök platta.

Under avsvälningen växlar påkänningarna tecken. Uk platta kommer att svalna och sammandra sig mera än ök platta. Då blir ök platta tryckt och eventuella ytsprickor går samman. Uk platta blir nu dragen och här finns nu risk för ytsprickor.

Ytsprickor kan nedsätta konstruktionens beständighet och livslängd. Sprickorna öppnar betongkonstruktionen för aggressiva angrepp och påskyndar betongens karbonatisering och rostsprängning av täcksikt.

I inomhus konstruktioner, s k obetydligt aggressiv miljö, är beständighetsfrågan vanligen inte något problem. Om bjälklaget ingår i en utomhus konstruktion eller utsätts för en aggressiv miljö har ytsprickorna större betydelse för beständigheten. Därför skall ytsprickor undvikas vilket sker genom att begränsa temperaturgradienten.

Strålningsuppvärmning skall användas tillsammans med väl utförd värmeisolering av bjälklagets motsatta yta för att begränsa temperaturgradienten över tvärsnittet.

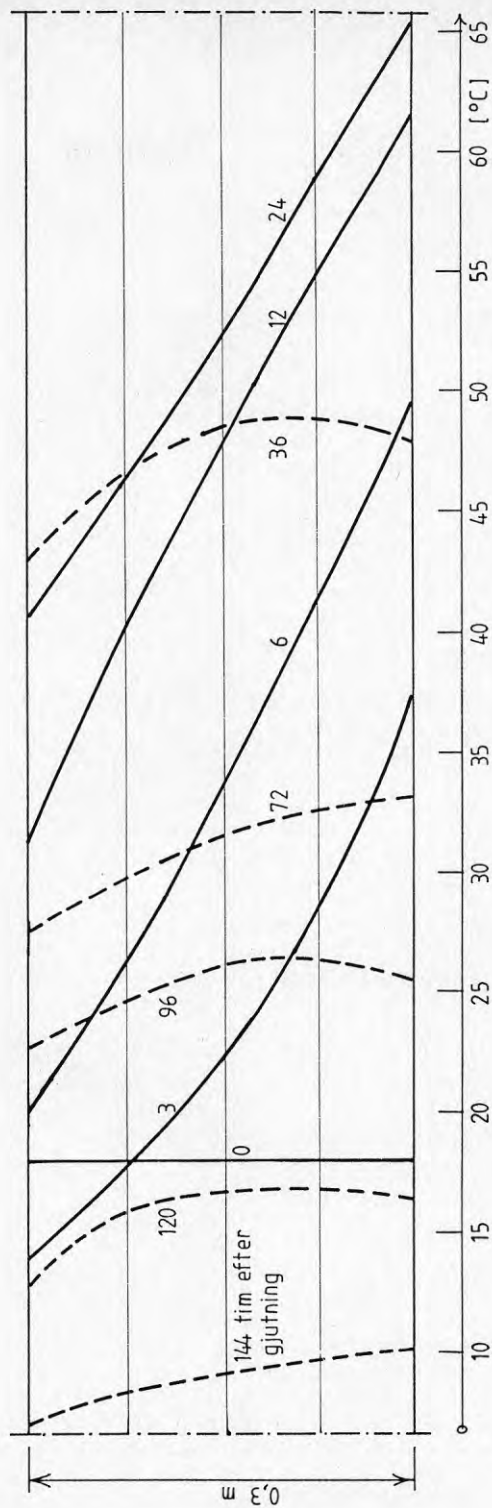


Fig 6.9 Beräknade temperaturprofiler i ett 0,3 m tjockt betongbjälklag efter 3, 6, 12, 24 timmar (stigande temperatur - heldragen linje) och efter 36, 72, 96, 120 och 144 timmar (fallande temperatur - streckad linje). Gjuttemperaturen var 18°C. Bjälklagsdelen härdades med både varmluft och strålningsvärme.

6.4 Betongens hållfasthetsutveckling

Vid gjutningen användes fabriksblandad betong K35 från AB Fabriksbetong, Norrköping. Data:

310 kg std portlandcement/m³ betong, (Slite)
 Vattencementtal = 0,60
 Pozzolith 122-HE tillsatsmedel, 1,5% av cementvikten
 Trögflytande konsistens, sättmått 100 mm
 Stenmax 32 mm

Betongens hållfasthet bestämdes med objektlagrade kuber, brytprov (TNS-prov) och utborrade cylindrar ur färdig konstruktion.

Ur den sista betongleveransen till takbjälklaget göts 9 kuber. Kub 1-3 placerades på den bjälklagsdel som värmehärdades med endast varmluft och kub 4-9 på den del som dessutom härdades med gasolinfravärme. Kuberna täcktes över på samma sätt och samtidigt med att bjälklaget täcktes. Uppmätta tryckhållfastheter framgår av tabell 6.1.

Tabell 6.1 Kubhållfastheter, objektlagrade kuber

Kub nr	Provn ålder dygn	Tryckhåll- fasthet MPa	Medel- värde MPa
1 2 3	7	38,3 35,3 37,4	37,0
4 5 6	7	33,1 34,9 33,8	33,9
7 8 9	28	35,1 37,4 38,1	36,9

Vid gjutningen av bjälklaget nedsattes 20 hylsor i betongen för bestämning av betongens hållfasthet med brytprov (TNS-prov). Hylsornas placering framgår av fig 6.10. Tre prov skadades under byggtiden och tre prov misslyckades vid provningen. Utvärderade tryckhållfastheter med TNS-provet framgår av tabell 6.2.

Tabell 6.2 Betonghållfasthet bestämd med brytprov (TNS-prov) vid 7 och 28 dygns ålder. Provens placering i bjälklaget framgår av fig 6.10.

Prov nr	Provn ålder dygn	Kub-hållf MPa	Medel-värde MPa	Prov nr	Provn ålder dygn	Kub-hållf MPa	Medel-värde MPa
1	7	24,0	26,6	11	7	28,5	25,5
2		37,5		12		25,0	
3		21,5		13		23,0	
4		-		14		-	
5		23,5		15		-	
6	28	25,0	27,0	16	28	31,9	27,0
7		-		17		27,5	
8		-		18		23,0	
9		29,0		19		26,0	
10		-		20		26,7	

I färdig konstruktion utborrades 6 cylindrar varav 3 togs i bjälklaget rakt ovanför en av strålningsvärmarna, se fig 6.10. Beräknad objekt-hållfasthet framgår av tabell 6.3. Härvid beaktades omräkningsfaktorer avseende provcylindrarnas dimensioner enligt svensk standard SS 13 72 07.

Tabell 6.3 Tryckhållfasthet hos utborrade cylindrar.

Prov nr	Diam mm	Höjd mm	Brott-last kN	Objekt hållf MPa	Medel-värde MPa
K2	92	100	190	29,5	31,5
K3		100	200	31,0	
K3 B		101	220	34,1	
V1	92	95	180	27,4	29,2
V2		100	200	31,0	
V3		98	190	29,2	

Tabell 6.4 visar en sammanställning över betonghållfastheter som bestämts med olika metoder på bjälklag som härdats vid 35^o resp 50^oC under ca 3 dygn. Vid 30 dygns ålder hade betong som värmehärdats vid 50^oC 7% lägre hållfasthet än betong som härdats vid 35^oC. Normenligt lagrade kuber (20^oC) från en likvärdig betongsats samma tillverkningsdag höll vid 28 dygns ålder 48,9 MPa. Baserat härpå uppnådde betongbjälklag som härdats vid 35^oC 65% och vid 50^oC 60% av normprovernas 28-dygns hållfasthet. Eftersom kuberna för normprover ej kommer från samma betongsats som övriga prov skall dessa värden betraktas som något osäkra.

Tabell 6.4 Sammanställning över betonghållfasthet bestämd med olika metoder på bjälklag härdat vid 35^o resp 50^oC.

Härdnings-temp °C	Provn ålder dygn	Provningssätt	Tryckhållf kubhållf MPa
ca 35	7	Objektlagrade kuber 1-3	37
	7	TNS-prov 1-5	26,6
	28	TNS-prov 6-10	27
	30	Kärnborrprov K2-K3	31,5
ca 50	7	Objektlagrade kuber 4-6	33,9
	7	TNS-prov 11-15	25,5
	28	Objektlagrade kuber 7-9	36,9
	28	TNS-prov 16-20	27
	30	Kärnborrprov V1-V3	29,2

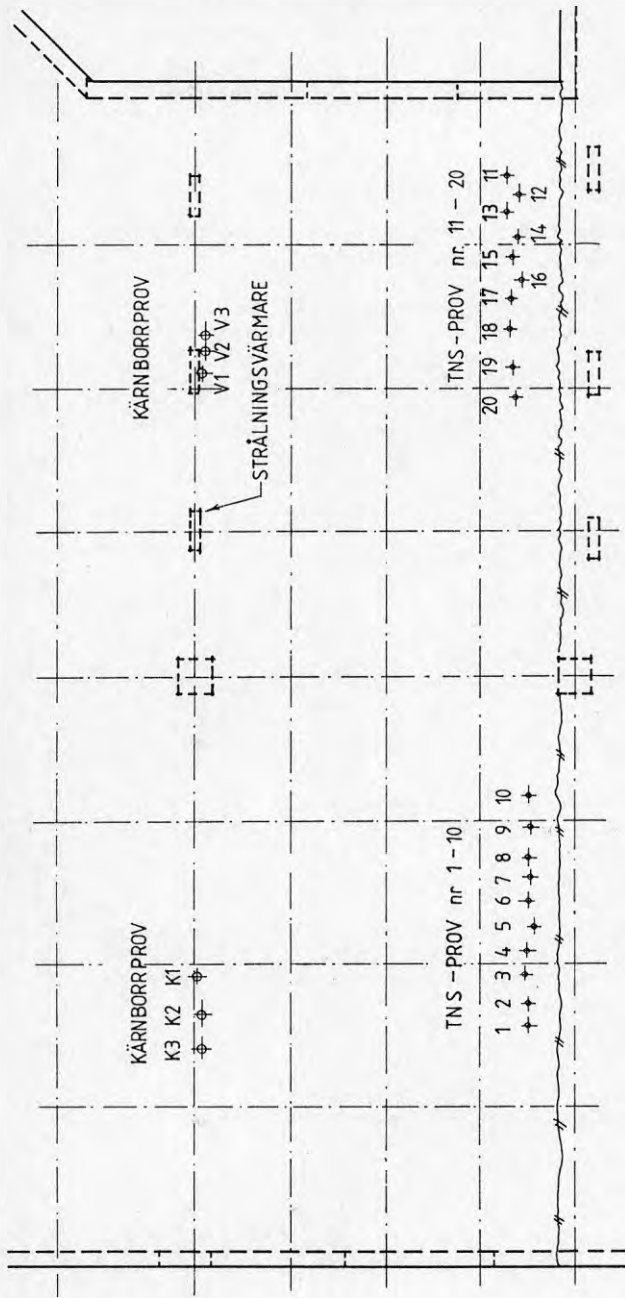


Fig 6.10 Läge för TNS-prov och utborrade cylindrar i bjälklag. Bjälklaget i figurens vänstra hälft härdades vid ca 35°C och dess högra hälft vid ca 50°C.

6.5 Bjälklagsnedböjningar

Takbjälklagets nedböjningar uppmättes genom avvägningar med ett precisionsavvägningsinstrument. Nedböjningarna mättes i 90 punkter över en takyta om 13,8 x 12,75 m. I varje mätpunkt nedborrades en expanderbult på vilken en mm-graderad avvägningsstång ställdes vid varje avvägning och riktades in vertikalt med ett dosvattenpass.

Avvägningar utfördes:

1. Före formrivning.
2. Genast efter formrivning varvid bjälklaget ej var stämpat. Formrivning utfördes 6 dygn efter gjutning.
3. 25 dygn efter gjutning. Bjälklaget var understött med ett fåtal rörstämp under tiden 1-3 veckor efter gjutning.

Uppmätta nedböjningar hos det 30 cm tjocka betongbjälklaget framgår av fig 6.12 och 6.13. De momentana nedböjningarna som uppmättes genast efter formrivningen uppgick som mest till 2-3 mm. Till följd av betongens krypning ökade nedböjningarna och var vid 25 dygns ålder 3-5 mm. Detta motsvarar som mest 1/1380 av spännvidden, vilket är ett mycket bra värde.

Beräkning av bjälklagets elastiska nedböjning

Takbjälklagets elastiska nedböjning av endast egenvikt beräknades med ett FEM-program vid Lunds Datacentral. Beräkning utfördes för bjälklagets ena hälft. Bjälklagsytan 6,9 x 17,7 m indelades i 4 x 12 rektangulära element vars noder sammanföll med mätpunkterna som användes vid avvägningen.

Förutsättningar:

Fri uppläggning längs tre sidor, en symmetrisida.
 Jämnt fördelad last, $egentyngd = 0,3 \cdot 23,5 = 7,05 \text{ kN/m}^2$.
 Antagen E-modul = 30.000 MPa = 300.000 kp/cm².
 $\nu = 0,15$.

Beräknade nedböjningar framgår av fig 6.11. Största nedböjning är 1,8 mm vilket skall jämföras med uppmätt 2-3 mm, se fig 6.12. Skillnaden kan förklaras med att bjälklaget belastades med byggnadsmaterial redan före formrivningen.

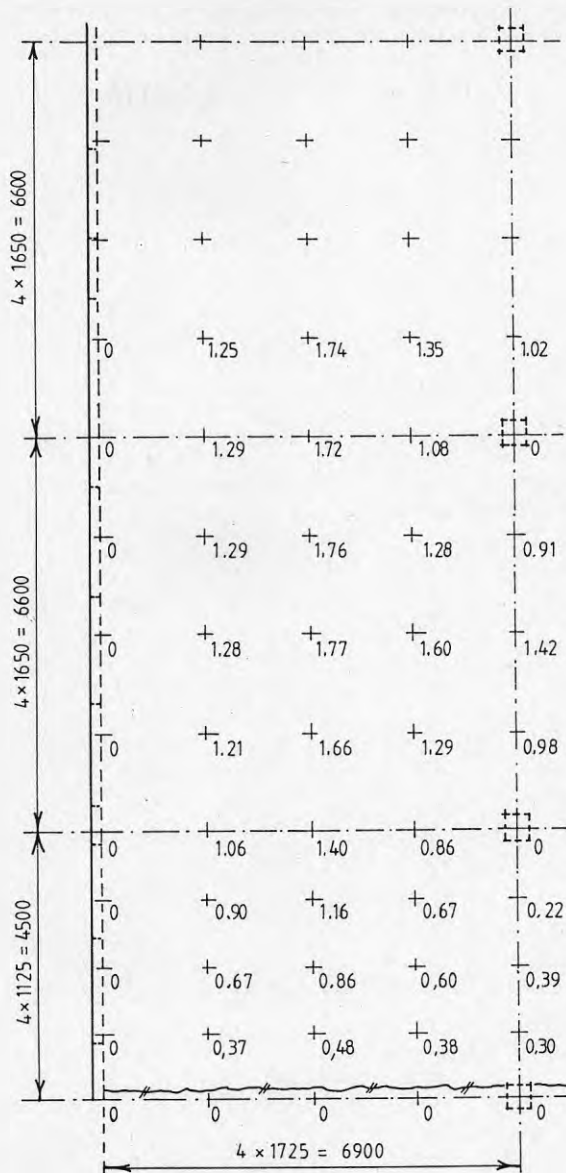


Fig 6.11 Elastisk nedböjning för del av takbjälklag beräknad med hjälp av ett FEM-program. Siffrorna anger nedböjningen i mm.

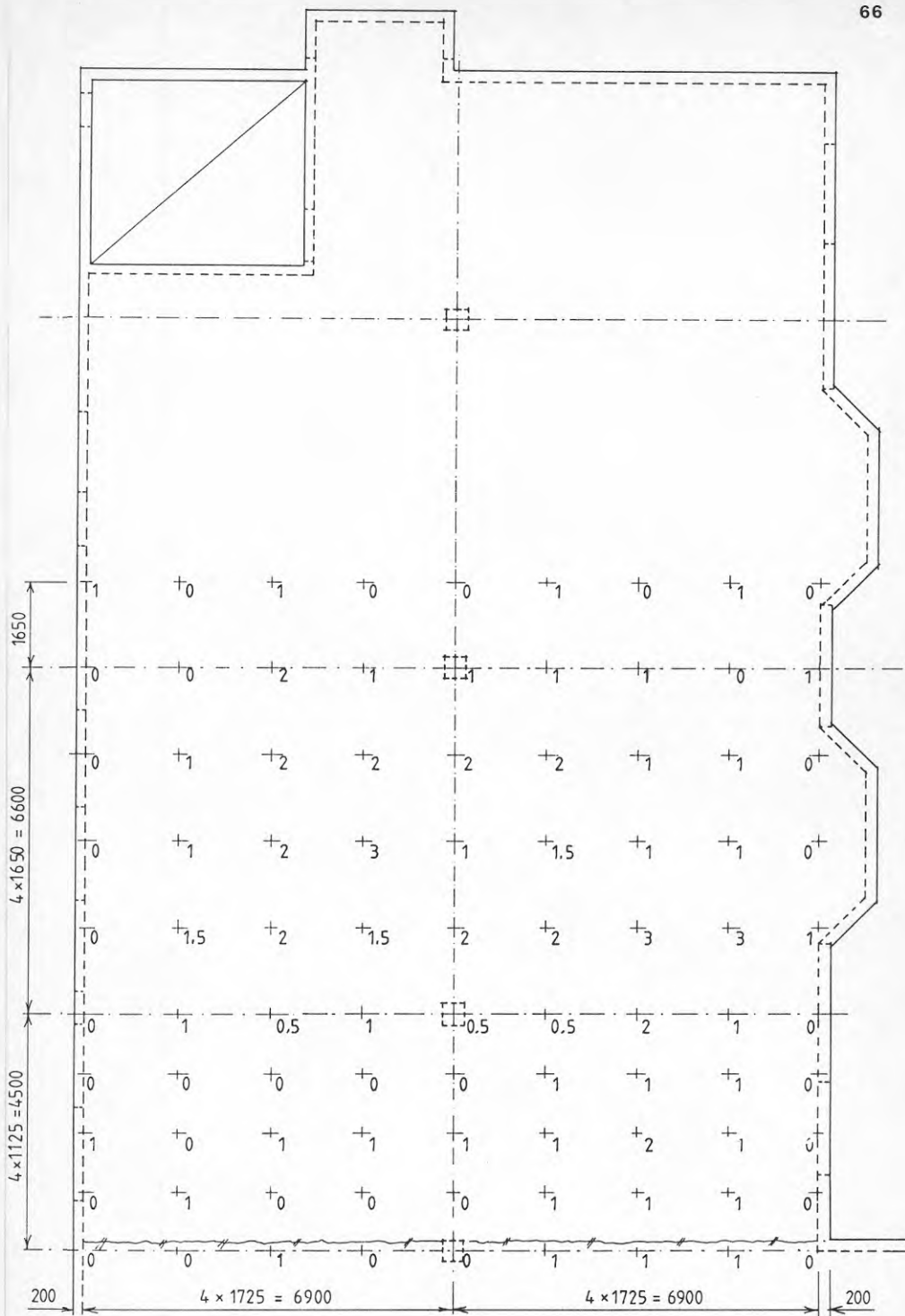


Fig 6.12 Uppmätta momentana nedböjningar i takbjälklaget efter rivning av bjälklagsformen. Siffrorna anger nedböjningen i mm.

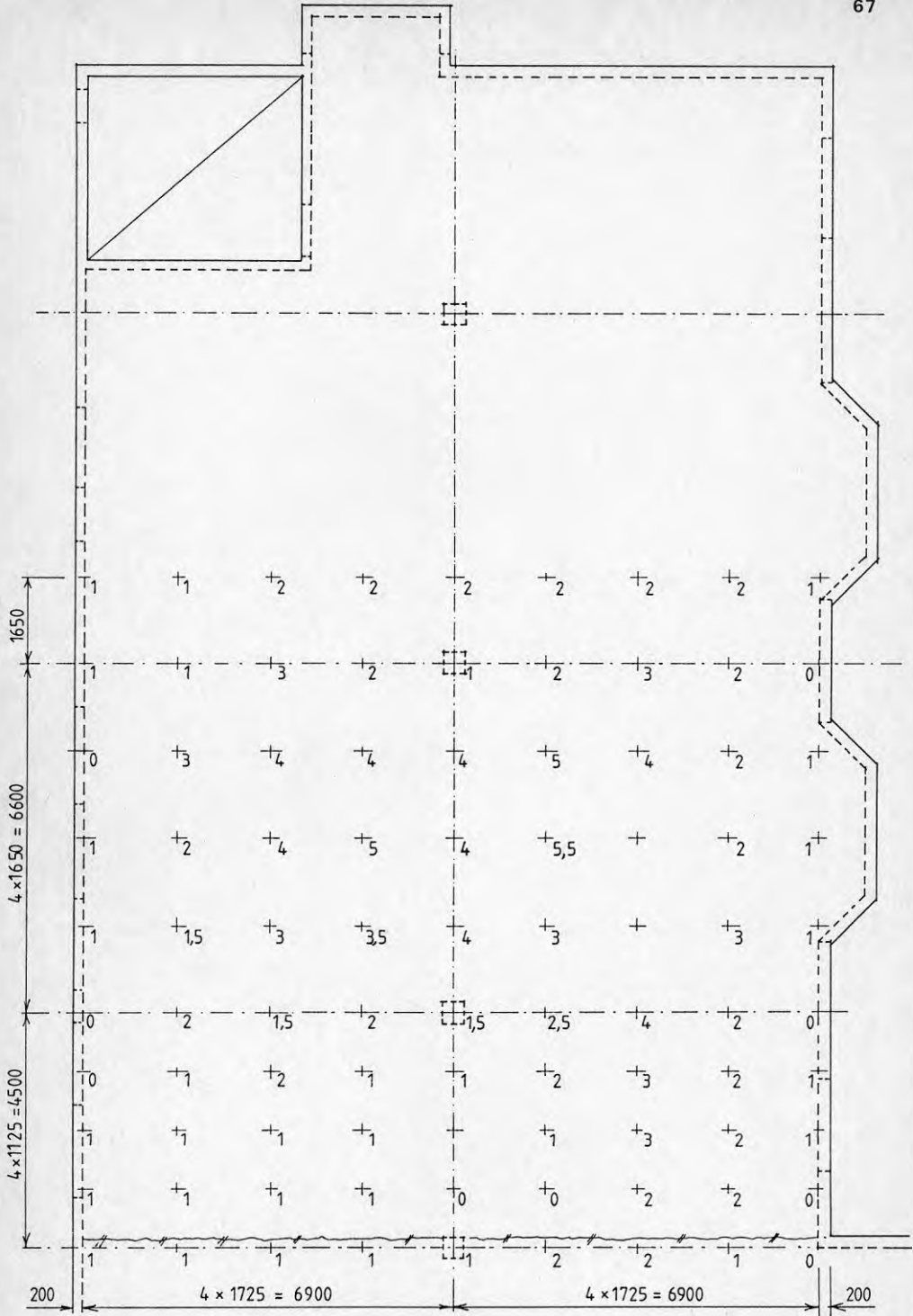


Fig 6.13 Uppmätta nedböjningar i takbjälklaget 25 dygn efter gjutningen. Siffrorna anger nedböjningen i mm.

7. HÅLLFASTHETSNEDSÄTTNING VID VÄRMEHÄRDNING

Det är allmänt känt att förhöjd härdningstemperatur påskyndar betongens hållfasthetstillväxt i tidig ålder vilket ger kortare tid till t ex formrivning eller uppspänning. Men samtidigt förorsakar förhöjd härdningstemperatur eller gjutning med s k het betong en lägre 28-dygnshållfasthet än samma betong som härddas vid 20°C. Detta vet man från åtskilliga undersökningar, se t ex Verbeck, Helmuth 1968 [16], Byfors 1980 [17] och Jonasson 1985 [18].

7.1 Förstudie

I samband med uppförandet av det stora bostadsprojektet Flemingsberg i Stockholm under början av 1970-talet uppdrog dåvarande AB Armerad Betong, nuvarande ABV, åt uppdragsfunktionen vid Cement och Betong Institutet i Stockholm att göra en betongteknisk utredning [19]. Man avsåg att använda tunnelform, ett formsystem av stål som då var nytt, och att värmehärdas med gasoleldad strålningsvärme. Kraven på betongens hållfasthet var 12 MPa efter 28 timmar och minst 25 MPa efter 28 dygn.

Laboratorieförsök utfördes med 15 cm kuber som värmehärdades under kontrollerade former i värmeskåp vid 30, 50 eller 70°C. Syftet var att bestämma erforderlig härdningstemperatur för att uppfylla kravet på formrivningshållfasthet samt att fastställa hållfasthetsförlusternas storlek. Några av resultaten sammanställs i Tabell 7.1.

Tabell 7.1 Tryckprovningresultat, från [19]

Värme- härddn temp °C	Härddn i värmeskåp t o m åldern tim	Lagring efter värmehärdning	Provn ålder	Tryck- hållf kp/cm ²	Hållf i proc av normenl härddade prov
30	27,5	-	28 tim	110	37
50	27,5	-		144	48
70	27,5	-		152	51
30	28	20°C, 50% RH	28 dygn	251	84
50	28			235	79
70	28			216	72
30	28	Avsvalning i luft ca 1 tim sedan vatten- lagring vid 20°C t o m 5 dygns ålder. Därefter 20°C 50% RH.	28 dygn	300	100
50	28			244	82
70	28			228	76
-	Normenlig härdning		28 dygn	299	100

Av tabellen framgår att en höjning av härdningstemperaturen medför en ökning av betongens hållfasthet i tidig ålder. Vid 28 dygns ålder minskar däremot sluthållfastheten med förhöjd härdningstemperatur. För den i försöken använda hållfasthetsklassen (ca K30) blev hållfasthetsförlusten 18-21% vid 50°C och 24-28% vid 70°C härdningstemperatur. Detta motsvarar hållfasthetsförluster av storleksordningen en respektive nästan två hållfasthetsklasser.

Resultaten av försöken sammanfattades i följande rekommendation. För att uppnå 12 MPa efter 28 timmar och 25 MPa efter 28 dygn var i det aktuella fallet erforderlig

-	hållfasthetsklass	K30
-	temperatur under isotermisk period	ca 40°C
-	längd av " "	minst 10 tim
-	fukthärdningstid (skydd mot uttorkning)	ca 2 dygn

I en senare undersökning av Byfors 1980 [17] redovisas liknande hållfasthetsförluster. För t ex hållfasthetsklass K35 uppmättes 20-25% hållfasthetsnedsättning (8-9 MPa) för betong som härdades vid 30-40°C jämfört med 20°C.

7.2 Orsaker till hållfasthetsförluster

Orsakerna till att 28-dygnshållfastheten sänks vid värmehärdning av betong är både av fysikalisk och kemisk natur. Vid gjutning med het betong, d v s betong som vid gjutningen håller minst 40°C, ofta 50-60°C, varvid värmehärdning ej behövs, är hållfasthetsförlusterna av kemisk natur.

Alexanderson [20] redovisar 1972 ett omfattande studium av orsakerna till hållfasthetsförluster hos värmehärdad betong och ger anvisningar till hur sådana förluster kan undvikas.

Fysikaliska orsaker till hållfasthetsförluster är enligt Alexanderson här mera väsentliga än kemiska. Vid uppvärmning av betong vill den fuktiga luften i porerna expandera men hindras av den omgivande betongen. Om betongens draghållfasthet inte är tillräcklig för att motstå portrycket uppstår sprickbildning. Denna tillsammans med den på grund av expansionen ökade porositeten utgör fysikaliska orsaker till hållfasthetsförluster vid värmehärdning.

Vid gjutning med het betong är orsaken till hållfasthetsnedsättningen av kemisk natur. Verbeck och Helmuth [16] framförde 1968 hypotesen att vid hög härdningstemperatur och därmed hög reaktionshastighet bildas snabbt ett tätt skikt av hydrationsprodukter runt om och närmast cementkornen. Skiktet försvårar ytterligare reaktioner på djupet. Detta leder till en fördröjd härdning och en ojämn fördelning av cementgelen och därmed svagare zoner i betongen med nedsatt hållfasthet som följd. Detta är en kemisk förklaring till hållfasthetsförluster.

Efter 28 dygns ålder sker någon återhämtning av hållfastheten men ännu efter 6 månaders ålder finns fortfarande en klart signifikant avvikelse. Detta framgår av en pågående undersökning vid Cement och Betong Institutet.

7.3 Slutsatser

För att undvika de fysikaliskt orsakade hållfasthetsförlusterna bör man efter avslutad gjutning först låta betongen vila ett par timmar vid konstant temperatur och sedan långsamt öka temperaturen innan värmehärdning sätts in med full effekt. Betongen hinner då tillväxa så mycket i hållfasthet att den kan motstå inre dragspänningar av förhöjt portryck.

För att påskynda hållfasthetstillväxten kan man gjuta med uppvärmd betongmassa. Varm betong och i synnerhet sk het betong kan dock enligt tidigare ge hållfasthetsförluster.

Enligt BBK79 [21] får temperaturen hos betongmassan normalt inte överstiga 30°C, i vissa fall 40°C. Försök med het betong pågår och en första rapport [22] sammanställdes nyligen vid Cement och Betong Institutet.

När härdningstemperaturen överstiger 30-40°C sker en påtaglig reduktion av 28-dygnshållfastheten jämfört med betong som härdas vid 20°C. Samma tendens finns vid gjutning med het betongmassa. För betong av hållfasthetsklass högst K40 som härdas vid högst 50°C under så lång tid som är brukligt under arbetsplatsförhållanden uppgår hållfasthetsförlusterna till storleksordningen en hållfasthetsklass (5 MPa). Detta kan kompenseras genom att välja betong av en klass högre än den nominella. Vid högre hållfasthetsklass eller högre härdningstemperatur kan förlusterna uppgå till 1 ½-2 hållfasthetsklasser.

8. BJÄLKLAGSNEDBÖJNINGAR VID TIDIG FORMRIVNING

Vid modern produktion av betongstommar för husbyggnader finns stort intresse av att riva bjälklagsformen tidigt. Fördelar är minskad formpark och kortare byggtid. Vid t ex flerbostadshus, där man har upprepade likadana gjutningar, hålls avformningstiden kort. Den är normalt fastställd på förhand och anpassad till en viss arbetscykel. Formparken vill man utnyttja så effektivt som möjligt, speciellt vid hyrda påkostade formsystem. Tidplanen måste därför hållas. Vid vintergjutningar används ofta värmehärdning. Vanligen värmehärdas intensivt under 15-20 timmar med gasoleldad strålningsvärme. Endast vid exceptionella förhållanden såsom sträng kyla tillåts avformningen fördröjas.

Alltför låg hållfasthet vid avformningen medför icke önskvärd deformation av bjälklaget. I värsta fall rasar konstruktionsdelen med risk för liv och lem. Onödigt hög hållfasthet innebär å andra sidan fördröjd avformning, som i sin tur ger högre formkostnad och förlängd byggtid.

Betongbjälklag böjer ner efter avformning. Tendensen att idag bygga med spännvidder upp mot 7-8 m ökar behovet av att beakta denna fundamentala egenskap.

8.1 Krav vid formrivning

Bjälklag ägnas större uppmärksamhet beträffande avformningshållfasthet än övriga konstruktionsdelar. För att undvika alltför stora nedböjningar i bjälklag krävs så stor avformningshållfasthet att riskerna för ras och frysskador normalt är undanröjda.

Konstruktören har förutsättningar för att bedöma erforderlig formrivningshållfasthet för aktuell konstruktion. I Bestämmelser för betongkonstruktioner, B5, 1973 krävs att erforderlig betonghållfasthet vid formrivning skall anges på konstruktionsritningarna.

I BBK 79 [21] föreskrivs att formrivning skall utföras så att konstruktionen inte skadligt deformeras. Ansvarig arbetsledare skall före formrivning förvissa sig om att betongen uppnått erforderlig hållfasthet. Anges ej formrivningshållfastheten bör den normalt vara 70% av fordrad sluthållfasthet vid rivning av bjälklagsformar.

Erforderlig formrivningshållfasthet beror av fri spännvidd vid formrivningen. Vid 4 m spännvidd kan 15 MPa godtas enligt en undersökning [23]. Konstruktören bör fastställa lägsta godtagbara hållfasthet för aktuell konstruktion, spännvidd och avsett formrivningssätt.

8.2 Beräkning av nedböjningar

Att beräkna de momentana nedböjningarna hos en osprucken betongplatta erbjuder inga större svårigheter. Elasticitetsteorin kan med god noggrannhet tillämpas. Många handböcker, t ex BYGG, ger beräkningsanvisningar för vanliga fall. Nedböjningen kan även beräknas för varje godtycklig platta med hjälp av en finit elementmetod.

Nedböjningen beror av plattans uppläggnings sätt, belastning, dimensioner och tjocklek. Dessutom inverkar elasticitetsmodulen för den använda betongtypen. Den brukar uttryckas som en funktion av uppnådd kubhållfasthet vid formrivningstillfället, se t ex Byfors 1980 [17].

Det är betydligt svårare att beräkna nedböjningen om plattan är sprucken. Hur plattan är armerad har här stor betydelse. Enkla beräkningsmodeller avspeglar ej helt den verkliga konstruktionen. Faktorer som stödsänkningar, sektionsförändringar och håltagningar har ofta en avgörande betydelse på sprickrisk och nedböjning [24].

Betongplattans deformationstillväxt med tiden på grund av betongens krypning och krympning är också av stor betydelse.

Betongens krypdeformation orsakar en långsam ökning av nedböjningen, störst i början men avtar med tiden. Dess storlek beror av påkänningsnivån och betongens kryptal. Faktorer som påverkar kryptalet är relativ luftfuktighet, betongens sammansättning och behandling, konstruktionsdelens dimensioner, betongens ålder vid pålastning samt tiden från pålastning till aktuellt tillfälle. BBK 79 ger värden på kryptalet för olika miljö och uppnådd tryckhållfasthet.

Betongens krympning är orsak till en specifik förkortning som är oberoende av uppträdande påkänning. Ojämn krympning i ovankant och underkant av betongplattan kan påverka långtidsnedböjningen.

Det är svårt att ge en allmän regel för vilka nedböjningar som är acceptabla. En bedömning måste göras. Funktionskrav på golvet är att det är plant och horisontellt så att inredningen inte lutar. Ojämheter och nedböjningar brukar man jämna ut före mattläggning med ett flytspackel. Av estetiska skäl måste bjälklagens nedböjning begränsas. Ögat är känsligt för nedböjningar hos tak. Enligt författarens mening är en mittnedböjning om $1/400$ av spännvidden gränsen för vad man kan godta.

8.3 Uppmätta bjälklagsnedböjningar

Bjälklagsnedböjningar har uppmätts i tre olika byggnadsobjekt för hotell, bostäder och sjukhus. Uppmätta nedböjningar blev större än beräknade nedböjningar av egenvikt. Detta beror på:

1. Bjälklagen börjar regelmässigt belastas med byggnadsmaterial redan dagen efter gjutningen. Efter hand lyfts vägghöjningar, armering, maskiner och apparater upp på bjälklaget.
2. Senare tillkommer stämplaster från ovanför liggande bjälklag.
3. På sikt tillkommer nedböjningar från betongens krypdeformation.

I flervånings betongstommar stämpas bjälklagen flera våningar i höjd. Stämpan rivs sedan efter hand nerifrån. Så utfördes bjälklagen i avsnitt 4.4 och 5.4. Det skulle krävas en omfattande analys av varje enskilt bjälklag för att beräkna stämplasterna efterhand som fler bjälklag gjuts och stämp successivt rivs. Det föreligger därför svårigheter att utöver egenvikten rätt beakta yttre lasters inverkan på nedböjningen.

Takbjälklaget över sjukhusbyggnaden i avsnitt 6.5 deformerades inte av stämplaster men väl av upplagd byggnadsmaterial.

Bidraget i nedböjning till följd av betongens krypning är efter lång tid vanligen större än bjälklagets korttidsnedböjning.

Det var för de tre studerade bjälklagen inte möjligt att vänta längre med sista avvägning än till 40, 109 resp 25 dygns ålder för att inte stoppa upp produktionen. Uppmätta nedböjningar för bostadsbjälklaget, fig 5.8, visar att redan vid 109 dygns ålder var bidraget från långtidsdeformationen större än korttidsdeformationen var efter rivning av form och stämp.

8.4 Slutsatser

För att bjälklagen skall få små nedböjningar måste man sätta in stämp. Detta är välkänt hos erfarna husbyggare. Det förekommer emellanåt att man efter intensiv värmehärdning och tidig formrivning tror sig kunna avstå från detta. Vid stora spännvidder har man då fått misslyckande nedböjningar som syns i taken.

Slutnedböjningen beror av uppnådd betonghållfasthet vid formrivningen och hur avformning och stämning utförs. Vid spännvidder över 4-5 m består bjälklagsformen ofta av två eller flera formbord bredvid varandra. Nedböjningen kan begränsas genom att riva ett formbord i taget och genast ersätta detta med stämp. Underdimensionera inte stämpan för även de deformerar. Låt stämpan stå så länge att de gör nytta, helst en månad eller längre. Härigenom begränsas nedböjningarna och erforderlig mängd flytspackel för golvavjämning blir mindre.

Om man av produktionstekniska skäl vill belasta bjälklagen vid tidig ålder med t ex upplag av byggnadsmaterial, skall stämpan dimensioneras även för dessa yttre laster. Låt lasten föras ner i byggnaden genom stämp i flera våningsplan.

Vid spännvidder över storleksordningen 4 m bör formen överhöjas motsvarande betongbjälklagets elastiska nedböjning vid 28-dygns hållfastheten ökad med långtidsdeformationen vid 2-3 månaders ålder (då utläggning av flytspackel brukar ske).

Erforderlig formrivningshållfasthet beror av fri spännvidd vid formrivningen och hur stämningen utförs. Vid 4 m spännvidd kan 15 MPa godtas enligt en undersökning [23]. Konstruktören bör fastställa lägsta godtagbara hållfasthet för aktuell konstruktion, spännvidd och avsett formrivningssätt.

REFERENSER

- [1] Jacobsson, Magnusson, Wennmark: "Energibesparande metoder vid betonggjutning". Byggforskningsrådet, rapport R16:1981, 148 sid.
- [2] "Effektivitet i betongbyggandet". Sammandrag av [1] utgivet av Byggförbundet, Stockholm 1981. 19 sid.
- [3] Ingvar Nilsson: "Härdning av betong med elektrisk värmetråd". Byggmästaren nr 9, 1982, sid 17-20.
- [4] Infrahandboken 1982. Allmänna anvisningar för byggarbetsplatser gällande betonghärdning och gasolförsörjning. Broschyr från AB Bahco Komfort (numera Combac) Enköping juni 1982, 33 sid.
- [5] Betonguppvärmning med gasol-infravärme. Broschyrmaterial från Primus Svenska AB, Skärholmen.
- [6] Vesa Penttala: "Infrarödoppvärmning av betongkonstruktioner under arbetsplatsförhållanden". Nordisk Betong 5-1977, sid 21-26.
- [7] Ingvar Nilsson: "El-drivna strålningsvärmare för härdning av betong". Byggmästaren nr 9, 1984, sid 26-29.
- [8] FRICO katalog och handbok. FRICO AB, Partille 1984. 147 sid.
- [9] Neumann-Venevere: "Accelererad härdning av färsk betong i väggelement medelst strålningsvärmare". Cement och Betong 1971:1 sid 67-75 och 1971:2 sid 239-250.
- [10] Werner Sieber: "Zusammensetzung der von Werk- und Baustoffen zurückgeworfenen Wärmestrahlung". Zeitschrift für Technische Physik, Leipzig 1941, sid 130-135. (Sammandrag av W Sieber, Diss. Technische Hochschule Hannover 1939).
- [11] Sven G Bergström: "Skydd mot tidig frysning". CBI Utredningar nr 5, Stockholm 1962, sid 84-108.
- [12] Bellander, Gregorsson, Jonasson: "Varm betong för gjutning i kall väderlek och snabb formrivning". CBI rapporter 2-81. Stockholm 1981, 70 sid.
- [13] Jan-Erik Jonasson: "Slipform construction - calculations for assessing protection against early freezing". CBI forskning 4-84. Stockholm 1984, 70 sid.
- [14] Jan-Erik Jonasson: "Kortfattad handledning för beräkning med datorprogrammet PLATEMP". Cement och Betong Institutet, Stockholm. Arbetshandling, juni 1984, 27 sid.

- [15] Henryk Pawlowski: "Accelererad härdning av betong medelst infraröd bestrålning i prefabricerade volymentelement och platsbyggnadsmaterial, Göteborg 1984, 24 sid.
- [16] Verbeck, Helmut: Principal paper. Structures and physical properties of cement paste. Chemistry of Cement, the Fifth International Symposium, Tokyo 1968, Part II, pp 1-32.
- [17] Jan Byfors: "Plain concrete at early ages". Cement och Betong Institutet, Fo 3:80, Stockholm 1980.
- [18] Jan-Erik Jonasson: "Early strength growth in concrete - preliminary test results concerning hardening at elevated temperatures". Third International RILEM Symposium on Winter Concreting. Espoo, Finland, 25-27 nov 1985, 6 pp.
- [19] Åke Lönnberg: "Erforderlig betongkvalitet och härdning vid gjutning med tunnelform". Cement och Betong Institutet, Uppdragsfunktionen. Rapport nr 7257, 1972.
- [20] Johan Alexanderson: "Strength losses in heat cured concrete". Svenska forskningsinstitutet för cement och betong vid Kungl Tekniska högskolan i Stockholm, Handlingar Nr 43, Stockholm 1972, 135 sid.
- [21] Bestämmelser för betongkonstruktioner, BBK 79. Statens betongkommitté 1979.
- [22] Nordfeldt-Nyman-Persson: "Het betong - försök med en metod för gjutning vintertid". Cement och Betong Institutet, Rapport nr 8540, Stockholm.
- [23] Paul Samuelsson: "Byggplatsens behov av korttidshållfasthet hos betong". Bygghörsningsrådet, Rapport R101:1983. Sammanfattas i tidskriften Cementa nr 4, 1983.
- [24] Mogens Lorentsen: "Korttidsdeformationer hos slakarmerade betongbalkar". Byggmästaren nr 11, 1968.
- [25] Jan-Erik Jonasson: "Vinterbetong". CBI Informerar nr 3.85. Stockholm 1985, 15 sid.
- [26] Gunnar Fredriksson - Paul Samuelsson: "Optimering av betongegenskaper med hänsyn till vintergjutning". Bygghörsningsrådet, rapport R17:1986, 117 sid.
- [27] W Mandry: "Über das Kühlen von Beton", Springer Verlag, Berlin 1961, 146 sid.
- [28] Jan-Erik Jonasson: "Beräkning av betongs mognadsutveckling vid vintergjutning". Nordisk Betong nr 6, 1983, sid 15-20.

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 821795-1
från Statens råd för byggnadsforskning till Armerad
Betong Vägförbättringar AB, Malmö.

R107: 1986

ISBN 91-540-4643-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6706107

Abonnemangsgrupp:
S. Byggplatsens verksamhet
V. Anläggningsteknik
Z. Konstruktioner och material

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirkapris: 35 kr exkl moms