

REVNER I BETONVÆGGE

Fra tid til anden kan der konstateres revnedannelse i forbindelse med støbning af betonvægge. Der kan være forskellige årsager til revnedannelsen, herunder betonens udtørnings-svind, men ofte er der tale om termiske svindrevner forårsaget af utilsigtede temperaturforhold under hærdeprocessen.

Kan svindet ske nogenlunde frit, vil man undgå revnedannelse. Dette opnås enten ved etablering af passende dilatationsfuger og mulighed for, at betonen kan trække sig sammen uhindret, eller ved at reducere svindet til et niveau, hvor betonen kan optage dette uden at revne.

Er betonkonstruktionen fastholdt, som en væg oftest vil være mod en eksisterende betonkonstruktion nedadtil, er der en vis risiko for, at svindet viser sig som en revnedannelse i væggen alt efter konstruktionens geometri og armering, se fx [1].

Udtørningssvindet vil alt andet lige afhænge af betonsammensætningen, og primært være styret af betonens vandindhold, [2]. Typisk vil slutsvindet herfra være i størrelsesorden 0,4 – 0,5 ‰ over tid, måneder, mens det helt tidlige svind måske er i størrelsesorden 0,1 ‰.

I modsætning til udtørningssvindet vil det temperaturbettingede svind, også kaldet det termiske svind, opstå i forbindelse med betonens tidlige hærdeproces, hvor der udvikles varme, og betontemperaturen stiger. Når betonen efterfølgende køler af, opstår der et svind, som på en eller anden måde skal optages i konstruktionen.

Det termiske svind udvikles i løbet af relativt kort tid efter temperaturen har toppet, timer/dage, og især hvis dette maksimum er sammenfaldende med afformningstidspunktet. Betonens mulighed for at relaxere det termiske svind er derfor mindre, end det er tilfældet for udtørningssvindet, der foregår over flere måneder.

Dette er også årsagen til, at det termiske svind vil være en væsentlig faktor, og ofte hovedårsagen til, at der opstår revner i lange betonvægge.

Temperaturforløbet er et kompliceret samspil mellem betonens udstøbningstemperatur, varmeudvikling under hærdeprocessen og varmetab til omgivelserne, og kan med fordel estimeres ved anvendelse af temperatursimuleringsprogrammet AP TempSim, [3]. Herved kan forskellige tiltag til reducere af risikoen for revnedannelse vurderes og fastlægges før udstøbning af betonen.

I denne artikel ses nærmere på temperaturudvikling i beton, hvorledes termisk svind kan forårsage revnedannel-

se i en betonvæg, og hvilke overvejelser man bør gøre sig, før man påbegynder støbearbejdet. Med udgangspunkt i et tænkt eksempel drøftes effekten af forskellige simple tiltag i forbindelse med udførelsen af en lang betonvæg støbt på et eksisterende betonfundament.

HVOR VARMT BLIVER DER I EN HÆRDENDE BETON?

Når cement reagerer med vand, udvikles der varme. Varmeudviklingen er afhængig af cementens kemiske sammensætning, herunder fordelingen af de væsentligste klinkermineraller: C3S, C2S, C3A og C4AF. Nærmere herom kan ses i [4].

Rapid cement fra Aalborg Portland har fx en varmeudvikling på ca. 350 kJ/kg cement.

En god stærk beton baseret på Rapid cement med 360 kg/m³ vil dermed have en varmeudvikling på ca. 360 kg x 350 kJ/kg = 126000 kJ. Dette svarer i runde tal til energiindholdet i 3 liter benzin!

Med kendskab til betonens densitet, ρ , varmfylde, c , og varmeudvikling, Q , kan temperaturstigningen i én m³ af denne beton, θ , hidrørende fra cementens varmeudvikling estimeres til:

$$\theta = Q/V \cdot \rho \cdot c = 126000 / (1 \cdot 2320 \cdot 1,1) \approx 49 \text{ }^\circ\text{C}$$

Hvor:

- V er 1 m³
- $\rho = 2320$ kg/m³
- $c = 1,1$ kJ/kg · °C

Betonens begyndelsestemperatur skal lægges til, så hvis betonen fx er 20 °C lige efter blanding på betonværk, kan temperaturen i løbet af hydratiseringen derfor stige til ca. 69 °C i de tilfælde, hvor der ikke er væsentlig tab af varme til omgivelserne.

HVORNÅR REVNER BETONEN?

I det tilfælde at væggen er fastholdt mod en tilstødende betonkonstruktion, vil betonen revne i trækzonen når betonens trækbrudtøjning overskrides:

$$\epsilon_{\text{trækbrud}} \geq \Delta\theta \cdot \beta$$

Hvor:

- $\epsilon_{\text{trækbrud}}$ er betonens trækbrudtøjning, ca. $1,3 \times 10^{-4}$
- β er betonens temperaturudvidelseskoefficient, ca. $1,0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- $\Delta\theta$ er temperaturforskellen mellem betonens middeltemperatur og den tilstødende betonkonstruktions temperatur.

Dvs., at den tilladelige temperaturforskel, $\Delta\theta$, mellem den hærdnende betons middeltemperatur og den tidligere udstøbte betondel kan bestemmes til ca.:

$$\approx 1,3 \times 10^{-4} / 1,0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \approx 13^\circ$$

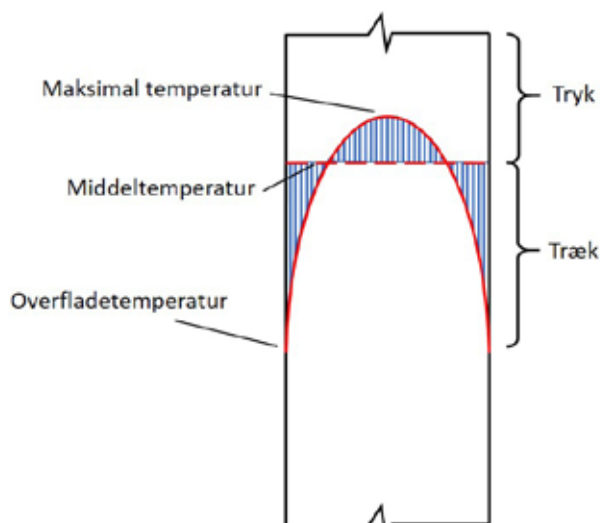
I praksis sættes kravet ofte til at være 15°C i diverse specifikationer; fx i Vejdirektoratets SAB for betonbroer og i det norske Statens Vegvesen's standardbeskrivelse for betonbroer - R762.

I tilfældet med en væg, der i de fleste tilfælde, som hærdningen skrider frem, ikke kan bevæge sig frit i forhold til underlaget, kan man stille yderligere krav til den tilladelige temperaturforskel i relation til betonens trækstyrke. I det følgende antages det dog, at kravet ligger på 15°C .

Ovenstående betragtninger er formentligt også baggrunden for de krav, der er stillet i det danske tillæg til udførelsesstandard, DS 2427, hvor den største tilladelige temperaturforskel under betonens hærdning er sat til 15°C mellem en hærdnende betonkonstruktionens middeltemperatur og overfladetemperatur.

Hertil er der i DS 2427 tilladt en temperaturforskel på 20°C mellem betonens maksimale temperatur og overfladetemperaturen, hvis temperaturfordelingen kan antages at være parabolisk over tværsnittet. Overfladetemperaturen skal måles i en dybde på 10 mm!

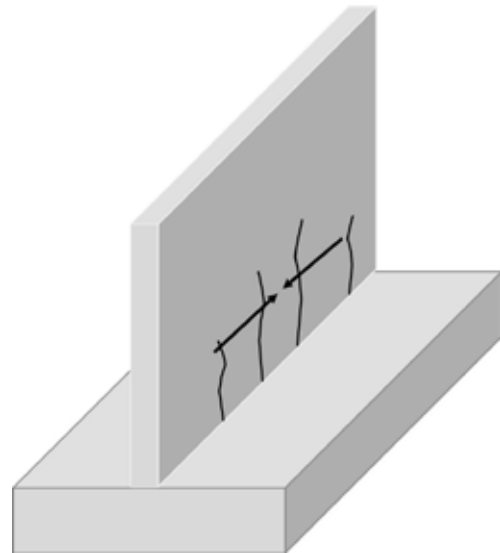
I figur 1 er illustreret temperaturforløbet over et betontværsnit, fx en væg, og hvorledes spændingerne optræder.



Figur 1 – Temperaturfordeling over et hærdnende betontværsnit.

EKSEMPEL PÅ REVNER FORÅRSAGET AF TEMPERATURFORSKELLE

I et tænkt eksempel betragtes en betonvæg, hvor der kort efter afformningstidspunktet blev observeret revner med en indbyrdes afstand ned til 1 meter, som illustreret i figur 2.



Figur 2 – Skitse af væg støbt ud på et eksisterende betonfundament.

Betonvæggen er 20 m lang, 2,0 m høj og har en tykkelse på 0,15 m. Der er anvendt 2 stk. $150 \times 150 \text{ mm } \varnothing 8 \text{ mm}$ armeringsnet, svarende til en armeringsprocent på ca. 0,45%.

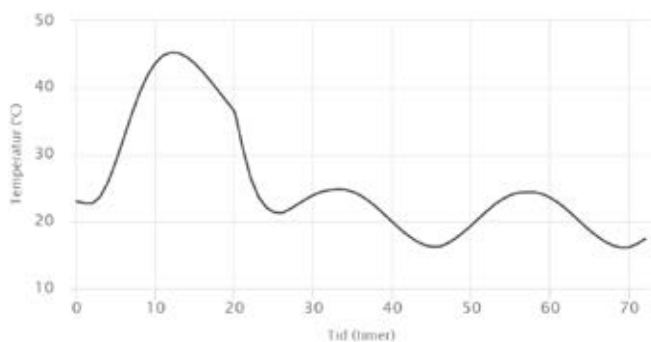
Væggen er støbt direkte på et betonfundament med et tværsnit på $1,0 \text{ m} \times 0,60 \text{ m}$.

Der er anvendt en normal beton til aggressiv miljøpåvirkning med 370 kg Rapid cement per m^3 og et v/c-forhold på 0,43. Udstøbningstemperaturen var 23°C .

Formmaterialet bestod af 22 mm træforskalling og en let tildækning med plast for oven et par timer efter udstøbning og frem til afformning, der i dette tænkte tilfælde allerede foregik efter ca. 20 timer.

Støbearbejdet er foregået i en sommerperiode med dagstemperaturer op til 25°C og nattemperaturer ned til 15°C . Fundamentets temperatur antages at være ca. 15°C .

I figur 3 er vist en simpel temperatursimulering af middeitemperaturen i væggen foretaget i programmet AP Temp-Sim, [3]. Der kan ses en temperaturstigning til ca. 45° i det pågældende tværsnit, og en afkøling til ca. 16°C i løbet af det efterfølgende døgn.



Figur 3 – Forløbet af middeltemperaturen i betonvæg i eksempel.

Temperaturforskellen mellem den forholdsvis tynde betonvæg og fundamentet er således op til ca. 30 °C, hvilket bevirker temperaturforskelle væsentligt over den normalt anbefalede grænse på 15 °C.

Afkølingen på 25-30 °C har bidraget til deformationer på op til 3 gange det udtørringssvind som kan forventes udviklet i samme tidsrum. Det vurderes derfor, at det er det temperaturløbet, som var skyld i de observerede revner.

Væggens længde indikerer, at der måske skulle være etableret dilatationsfuger for at optage svindet. Dog ligger armeringsprocenten noget over det, der fx anbefales for betongulve, [5].

HVAD KAN MAN GØRE?

I ovenstående eksempel er der argumenteret for, at revner kan opstå i selv relativt tynde betontværsnit og under almindeligt forekommende temperaturer, som man vil forvente i Danmark.

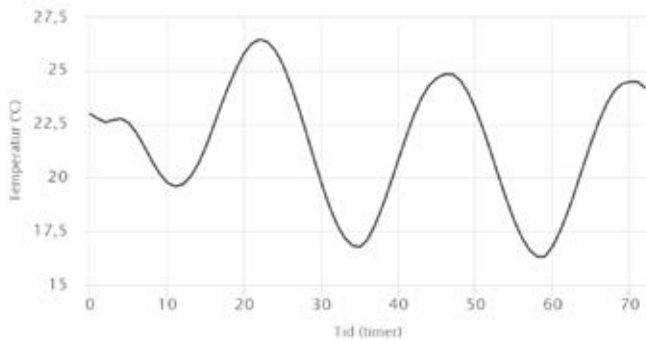
For at undgå, eller for at minimere, risikoen for revnedannelse, kan man enten reducere de temperatur- og udtørringsmæssige påvirkninger, eller øge konstruktionens modstandsevne mod revnedannelse. Alternativt kan man sætte ind på begge områder.

Som beskrevet før, kan der ikke gøres så meget ved udtørringssvindet, der mest af alt er dikteret af betonens vandindhold. Det er derfor især en sænkning af temperaturniveauet og temperaturforskellene i betontværsnittet i forhold til det underliggende fundament, der skal fokuseres på:

- **Cement med lavere varmeudvikling:**
Anvendelse af en cement med lavere varmeudvikling, fx Lavalkali Sulfatbestandig cement fra Aalborg Portland, i stedet for Rapid cement, ville reducere varmeudviklingen, men også den hastighed hvormed varmen udvikles.
I det ovenfor viste eksempel vil middeltemperaturen kunne sænkes til ca. 36 °C, og dermed begrænse temperaturforskellen mellem væg og fundament til ca. 21 °C. Dette er dog formodentligt ikke nok til helt at undgå revnedannelse, men færre revner end i udgangspunktet kan forventes.
- **Støbning sidst på dagen:**
Hvis støbetidspunktet skubbes til et tidspunkt på døgnet, hvor temperaturerne er mere fordelagtige, kan temperaturstigningen reduceres med op til 5 °C. Dette som følge af et større varmetab til omgivelserne om natten i det tidsrum hvor betonen udvikler mest varme.
- **Mindre isolerende støbeform:**
Der kan vælges en støbeform, der er mindre isolerende, fx af stål, hvorved temperaturstigningen i dette eksempel kunne være sænket med helt op til 14 °C. Dog vælges formmaterialer som oftest af andre årsager, fx tilgængelighed, økonomi eller betonoverfladens udseende. I koldere perioder af året kan en stålform i sig selv være en medvirkende årsag til store temperaturforskelle over betontværsnittet, hvilket skal tages i regning.

I figur 4 er det forventede temperaturforløb vist for en kombination af Lavalkali Sulfatbestandig cement, støbning om aftenen (fx kl. 18.00), samt ved anvendelse af stålform i stedet for træform.

Herved er temperaturforløbet sænket fra de oprindelige ca. 45°C til ca. 26 °C, og temperaturforskellen til betongulvet er reduceret fra ca. 30 °C til omkring 11 °C. Herved er temperaturforskellen mellem ny og eksisterende beton på et niveau, hvor risikoen for termiske svindrevner er reduceret væsentligt.



Figur 4 – Forløbet af middeltemperaturen i betonvæg med anvendelse af Lavalkali Sulfatbestandig cement, ”aftenstøbning” og stålform.

Hvis ovenfor viste tiltag ikke er tilstrækkelige, kan det overvejes at anvende mere ”aktive” tiltag for at styre betontemperaturen:

- **Sænkning af betonens udstøbningstemperatur:**
Hvis muligt vil en sænkning af betonens udstøbningstemperatur indvirke effektivt på temperaturstigningen. Dog er det ofte en svær øvelse i Danmark, hvor den mest effektive måde at køle betonen på er at vande tilslaget, og lade fordampningsvarmen køle disse ned. På grund af vands store varmekapacitet har det også nogen effekt at bruge koldt vand. Ofte vil postevand være koldere end procesvand, og det kan derfor have en effekt at undlade brug af procesvand i visse tilfælde. Anvendelse af is eller flydende kvælstof er muligt, men ses sjældent anvendt på ”almindelige” betonprojekter i Danmark.
- **Aktiv køling eller opvarmning af betontværsnittet:**
Indstøbning af kølerør i betontværsnittet kan sænke maksimaltemperaturen til et acceptabelt niveau. Varmetråde placeret i støbeskellet mod randfundament kan modvirke den store temperaturforskel mellem betonvæg og fundament indtil betontværgens temperatur er nede i et område, hvor forskellen ikke medfører termiske svindrevner.

OPSAMLING

Eksemplet i denne artikel viser, at det ikke kun er i forbindelse med massive betontværsnit, at temperaturforskelle kan forvolde problemer i form af revnedannelse. Under normalt forekommende temperaturer i Danmark, kan der i visse tilfælde være risiko for, at der opstår gennemgående revner ifm. vægstøbninger selv i det der må betegnes som værende mindre dimensioner.

Med lidt omtanke og fokus på de udstøbningsmæssige detaljer, kan risikoen for revnedannelse sænkes markant, og i de fleste tilfælde helt undgås.

REFERENCER

- [1] Christian F. Justesen, *Revner i beton*, Beton-Teknik 3-09-1981, Aalborg Portland A/S. Publikationen kan downloades fra www.aalborgportland.dk.
- [2] Herholdt et. al., *Beton-Bogen*, 2. udgave 1985. Aalborg Portland A/S. Kan ses på www.aalborgportland.dk.
- [3] Jacob Thrysoe, *AP TempSim*, Dansk Beton nr. 2 2018, s. 44-47. Kan downloades fra www.danskbeton.dk.
- [4] Per Freiesleben Hansen, *Hærdeteknologi I - Portlandcement*, BKF-Centralen og Aalborg Portland A/S, 1978.
- [5] Tommy B. Jacobsen et. al., *Gulvkonstruktioner af beton*, Beton-Teknik 6-17-1994, Aalborg Portland A/S. Kan downloades fra www.aalborgportland.dk.