

3/09/1981

# Revner i beton

af Christian F. Justesen

• BETON-TEKNIK •



Revner i beton kan give anledning til æstetiske problemer, holdbarhedsmæssige problemer og problemer med at opnå vandtæthed. Revneårsagerne kan deles i to hovedgrupper: De konstruktionsmæssige (statiske) og de materialemæssige. Denne publikation giver en gennemgang af de materialemæssige årsager til revnedannelser. Der orienteres om hovedårsagen til deres opståen, typiske revnebilleder, eventuelle skadevirkninger og om hvorledes de kan imødegås og minimeres. Desuden orienteres om vurdering af de konstruktive revnedannelser. Endelig behandles begrebet kritisk revnevidde kort.

**Terminologi.** Inden for emnet revner i beton eksisterer en del forskellige betegnelser og en ikke helt entydig terminologi:

*Overfladerevner* er revner, der udelukkende løber i betonens overfladelag (op til 15–20 mm), og som ikke berører betonens indre.

*Gennemgående revner* er revner, der går gennem betontværsnittet, eller revner som når betonens indre.

*Mikrorevner* er meget fine revner med lille revnevidde, vanskeligt synlige med det blotte øje. Mikrorevner kan være overfladerevner i form af netrevner, gennemgående revner eller lokale revner i betonens struktur.

*Makrorevner* er grove revner, let synlige med det blotte øje. Grænsen mellem makrorevner og mikrorevner er normalt ikke entydig.

*Lokale revner* er revner lokaliseret til enkelte områder af betonen (f.eks. revner omkring frostspringere eller alkaliskselgel).

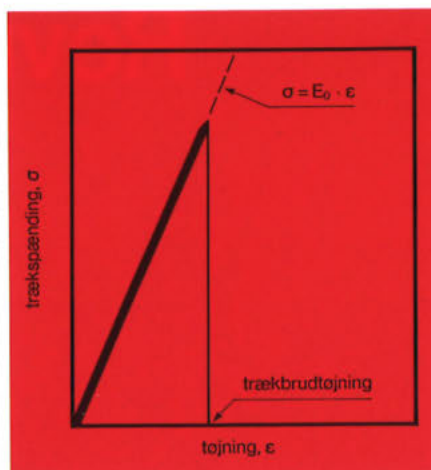
*Orienterede revner* er regelmæssigt forløbende revner, hvis forløb kan forudsiges eller forkæres (f.eks. revner følgende armering, revner i en betonbjælkes trækzone).

*Ikke orienterede revner* er uregelmæssigt forløbende revner, hvis forløb er tilfældigt.

*Netrevner* er et system af revner løbende på kryds og tværs i en plan, hvorved planen opdeles i små områder med største tværmål 5–50 mm.

*Krakeleringer* er fine netrevner i en betonoverflade.

De materialemæssige revnedannelser kan have en række årsager. Utilstrækkelig komprimering af en for stiv beton kan give områder, som ikke udfyldes med beton, de vil normalt fremtræde som uregelmæssige revner i betonen. Bevægelse af tunge partikler nedad og vand opad i en frisk beton kan give såkaldte sætningsrevner. Svind og temperaturforskelle kan sammentrække dele af betonen, som fastholdes af nabo-områder eller af armering. Derved er der mulighed for, at betonens trækbrudtøjning (se figur 1) overskrides, hvorved revner opstår. Ekspansioner fra vand, der fryser, eller



Figur 1. Betons trækarbejdslinie. Trækbrudtøjningen er normalt af størrelse 0,1–0,2‰. Begyndelseselasticitetskoefficienten er  $E_0 \cdot \sigma = E_0 \cdot \epsilon$  er op-tegnet (punkteret).

fra overfladen af tilslagskorn og armering, kan medføre så store trykspændinger i områder af betonen, at der opstår trykbrud med revnedannelser til følge.

I skema 1 findes en forenklet oversigt over revnetyperne. Står man overfor en revnedannelse, kan skemaet hjælpe med til bestemmelse af årsagen. I nogle tilfælde er det dog ikke umiddelbart muligt, idet flere revnetyper kan virke sammen. Eksempelvis vil en »tidlig« revnedannelse gøre betonen mere udsat for en »sen« revnedannelse, og det samlede revnebillede får da et udseende, som vanskeligt lader sig katalogisere.

De konstruktive revnedannelser kan give revner i de bærende konstruktionsdele, idet belastningen i visse snit giver spændinger, der overskrider betonens trækstyrke. I slapt armerede konstruktionsdele kommer hovedarmeringen først til at virke, når der er opstået en revnedannelse i dele af konstruktionens trækzone. Derfor er revner uundgåelige og tilsigtede her. I forspændte konstruktionsdele kan forspændingen sikre mod, at nogen del af betonen udsættes for trækpåvirkninger, der overskrider trækstyrken. Derfor behøver belastningen ikke at fremkalde revner her.

## Materialemæssige revnedannelser

Tidspunktet for en revnes opståen kan hyppigt give en del information om revneårsagen. Derfor behandles revnetyperne i det følgende i »kronologisk« rækkefølge fra revnedannelser i den friske beton via den hærdnende beton til den færdighærdnede beton.

### Komprimeringsfejl

Utilstrækkelig komprimering af en for stiv beton giver udover stenreder revnelignende adskillelser i betonen. Utilstrækkelig sammenvibrering af to betonlag i en lodret støbning kan give vandrette revner i støbshellene.

Den første revnetype imødegås ved enten at ændre betonens konsistens i retning af det mere letbearbejdelige eller ved at sikre en mere intensiv komprimering.

Den anden revnetype imødegås ved såvel en sikring af, at det underliggende lag ikke er begyndt at afbinde inden det overliggende udlægges, som en tilstrækkelig sammenvibrering af de to lag. Med stavvibrationer kan dette klares ved, at disse føres mindst 200 mm ned i det underliggende lag.

### Sætning i den friske beton

I den friske, våde beton vil tyngdekraften få de tunge tilslagspartikler til at synke ned (at sætte sig), mens vandet vil bevæge sig opad mod betonoverfladen og give vandudskillelse (bleeding). Denne vandudskillelse stopper, enten når de tunge partikler ligger som en bunke i bunden, eller når cementens afbinding hindrer yderligere sætninger. Ved vurdering af vandudskillelsen må sondres mellem vandudskillelshastigheden og vandudskillelseskapaaciteten. Sætningen hænger sammen med kapaciteten og aftager, når

- v/c reduceres
- sætmålet reduceres
- sandprocenten optimeres
- luftindblanding benyttes
- puzzolaner (flyveaske, silica) tilsættes.

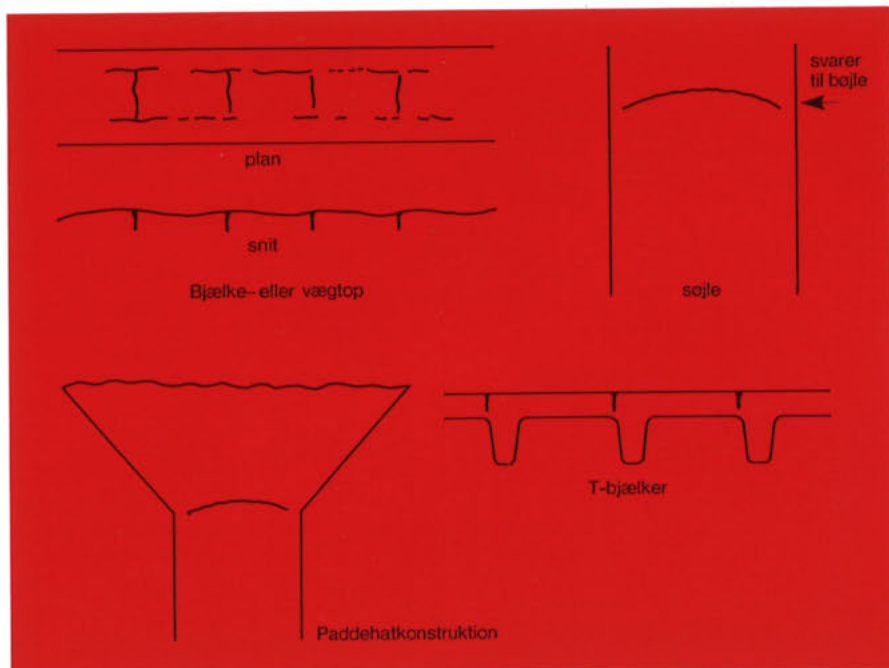
Vandudskillelseskapaaciteten øges normalt, når der anvendes retarderende sætningsstoffer eller når vindhastigheden over overfladen øges (pga. forøget kapillære kræfter, som udpresser vandet). Der er eksempler på sætninger op til 10 mm/m. Hvis sætningerne kan foregå frit, vil den hertil svarende reduktion af betonvolumenet ikke medføre revner. En række faktorer vil normalt øve modstand mod sætningen:

- Hovedarmering og bøjler i oversiden af en bjælke.
- Bøjler i en søjle.
- Friktion mellem beton og form.

Disse faktorer vil kunne give revner. Desuden medfører forskellige betonhøjder forskellige sætninger og dermed sætningsforskelle, når de forekommer i nabo-områder.

Revnetype	Tidspunkt efter støbning - for fremkomst af revner	Hovedårsag	Form- og fremkomststed	Skadevirkning	Reparation	Imødegåelse
Komprimeringsfejl	Inden afbindingen er slut	For stiv beton; utilstrækkelig vibring	Gennemgående revner i støbeskel; i bunden af en støbning lokale revner	Manglende tæthed; angrebepunkt for nedbrydning; udseendemæssigt	Injicering med mørtel eller pasta; opugning og udfyldning	Mere letbearbejdelig beton; mere intensiv vibring
Sætning i den friske beton	Inden afbindingen er slut	For stor vandudskillelseskapa-citet; tilslagets bevægelse nedad; fugttab	Orienterede revner langs overside-armering og formkanter, normalt ikke dybtgående	Blotlægning af armering; angrebepunkter for nedbrydning	Cementpasta eller epoxyinjicering e.l. til forsegling. Problematisk om korrekt vedhæftning opnås. Genvibring 1/2-1 time efter betonens placering	Reduktion af v/c. Reduktion af sætmål. Optimering af sandprocent; luftindblanding. Puzzolan-tilsætning
Plastisk svind	1/2-2 timer efter at synligt overfladevand er fordampet	Trækspændinger fra kapillære kræfter pga. fordampning fra overfladen	Gennemgående revner. Ses såvel som orienterede revner som i form af netrevner	Manglende tæthed; blotlægning af armering. Angrebepunkt for nedbrydning	Cementpasta eller epoxyinjicering e.l. til forsegling. Evt. genvibring umiddelbart efter fremkomst	Sikring mod overfladefordampning umiddelbart efter støbning
Udtørringssvind	Dage, måneder	Sammentrækning pga. fugttab	Netrevner i overfladen i mindre konstruktionsdele. Gennemgående orienterede revner i langstrakte konstruktioner. Ikke orienterede revner	Udseendemæssig; manglende tæthed; angrebepunkt for nedbrydning	Overfladebehandling. Udfyldning med fugemasse eller cementmørtel/pasta	Reduktion af vandindhold. Forbedring af lagringsforhold. Etablering af kontraktionsfuger. Svindarmering
Overfladekrakeleringer	Dage, måneder	Ekstra svind i cementslam eller mørtel i betonoverfladen	Netrevner i overfladen især på glatte betonoverflader	Udseendemæssig	Afslibning, evt. overfladebehandling	Reduktion af v/c. Undgåelse af for fede blandinger og for stenrige betoner. Sikring mod overvibrering i overfladen. Forbedring af lagringsforhold
Termorevner	Dage, uger	Temperaturforskelle under afbinding og hærdning	Ydre fastholdelse; Gennemgående orienterede revner. Indre fastholdelse; Ikke orienterede overfladerevner	Angrebepunkt for nedbrydning; manglende tæthed	Overfladebehandling. Epoxyinjicering ved gennemgående revner	Reduktion af temperaturforskelle under hærdningen. Reduktion af betonens varmeudvidelseskoefficient
Temperaturtøjninger	Måneder, år	Temperatursvingninger	Som under udtørringssvind	Som under udtørringssvind	Overfladebehandling. Udfyldning med fugemasse eller cementmørtel/pasta	Reduktion af temperaturforskelle. Reduktion af varmeudvidelseskoefficient. Etablering af ekspansions- og kontraktionsfuger. Temperaturrevnearmering.
Armeringskorrosion	(Måneder), år	Blotlagt armering. Karbonatisering eller chlorider indtil armeringen. Ud-ludning	Orienterede revner langs armeringsjernene. Lokale revner ud fra steder med grubetæring	Udseendemæssigt. Reduktion af konstruktionens bæreevne. Nedbrydning af konstruktion	Afhugning af karbonatiseret, ud-lu-det eller chloridfyldt beton samt fyldning med lavt v/c-beton	Tæt beton (lavt v/c, god komprimering). Korrekt dæklag
Frostskader	(Måneder), år	Aktuel vandmætningsgrad overskrider kritisk vandmætningsgrad	Ikke orienterede revner af forskellig dybde. Lokale revner fra porøse korn. Orienterede revner langs belægningskanter	Nedbrydning af konstruktionen	Afhugning af ødelagt beton. Udfyldning med beton med lavt v/c	Anvendelse af frostsikker beton. Afledning af vand der kan mætte betonen. Luftindblanding
Alkalikiselreaktioner	(Måneder), år	Reaktion mellem reaktiv kisel fra tilslag, alkali fra betonens porevæske samt tilstedeværende vand	Ikke orienterede revner ofte gennemgående. Lokale revner omkring reaktive korn	Nedbrydning af konstruktionen	Normalt umuligt. Kan forsinkes ved overfladebehandling, der reducerer vands adgang	Anv. af tilslag med mindre end 2% reaktive korn. Anv. af lavalkali cement. Tæt beton (lavt v/c). Puzzolan-tilsætning
Sulfatangreb	År	Reaktion mellem sulfation og cementens C <sub>3</sub> A	Overfladeafskalninger	Nedbrydning af konstruktionen	Afhugning af skadet beton. Overfladebehandling	Tæt beton (lavt v/c). Anvendelse af sulfatbestandig cement
Konstruktive revnedannelser. Bøjning Forskydning Knusning Forankringssvigt Spaltning Rent træk	Dage, måneder, år	Træk- og forskydnings-spændinger. Deformationer	Orienterede gennemgående revner i træk- og forskydningszonerne af et konstruktions-element. Lokale revner	Angrebepunkt for nedbrydning; udseendemæssigt; manglende bæreevne	Overfladebehandling. Udfyldning. Borthugning	Forbedring af dimensionering og tilsyn

Skema 1. Revner i beton, oversigt over revnetyper, tidspunkt for revners opståen, hovedårsag, form og fremkomststed, skadevirkning, reparationsmetode samt imødegåelse. Revnedannelser vil i nogle tilfælde være mere komplekse end dette forenklede skema giver indtryk af, idet flere revnetyper kan overlejre hinanden. Ved udførelse af reparationer er det vigtigt for udførelsen at vide, om revnerne er i ro eller bevægelse, se [1].

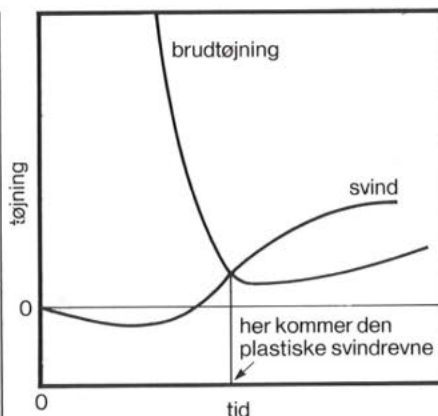


Figur 2. 4 eksempler på sætningsrevner.

Eksempler på sætningsrevner er vist på figur 2. Sætningsrevner kommer altid, før end cementens afbinding hindrer yderligere sætning. Hvis man ikke gennem de ovenfor nævnte forholdsregler kan hindre sætningsrevner, er det undertiden muligt at løse problemet ved genvibrering. Denne skal foretages når den første sætning har fundet sted, fra 1-2 timer efter betonens placering. Sætningsrevner er normalt ikke dybtgående og er skaden sket, kan problemet for det meste løses ved en forsegling af revnerne.

## Plastisk svind

Hvis den friske beton udsættes for kraftig udtørring optræder et svind, det såkaldte plastiske svind. Det skyldes antagelig hovedsagelig kapillære overfladetrækkkræfter, som opstår i betonens porer, når vand fordampes fra overfladen. Så længe der står bleedingvand på betonoverfladen, kan de kapillære kræfter ikke opbygges, men i det øjeblik overfladen bliver tør, vil de vokse til meget store værdier og søge at trække betonen sammen. Dvs. høje temperaturer og høje vindhastigheder øger risikoen for plastiske svindrevner. Omvendt kan risikoen reduceres eller fjernes ved hurtig tildækning af betonen, så fordampning hindres. Plastisk svind er normalt af størrelsesorden 10 gange så stort som det almindelige udtørringssvind hos hærdnet beton. Under danske klimaforhold støder man ikke så hyppigt på det. Mens betonen umiddelbart efter udstøbningen kan tåle en meget stor brudtøjning, falder denne til en relativ lav værdi, når afbin-

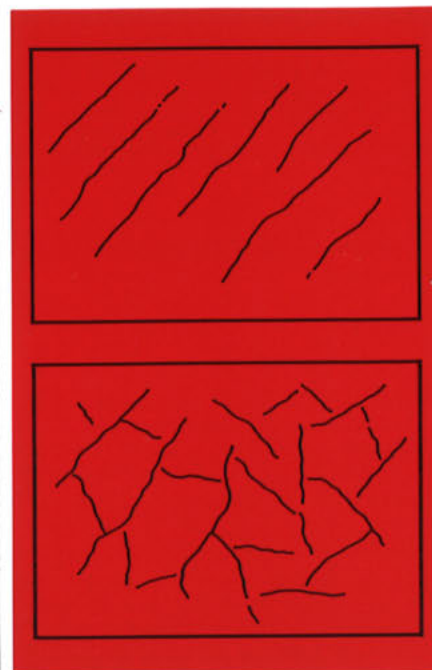


Figur 3. Brudtøjning og svind som funktion af tiden i de første timer efter udstøbning.

dingen begynder. Derefter vokser den langsomt op, efterhånden som hærdningen skrider frem. Målinger på den friske beton viser straks efter udstøbningen en svelning, men derefter starter svindet, se figur 3. Hvis et betonvolumen er fastholdt mod ydre bevægelser, vil svindrevner opstå, når svindtøjningen overskrider brudtøjningen. For så vidt der optræder plastisk svind af betydning vil skæringen komme omkring eller lige efter minimumspunktet på brudtøjningskurven.

For plastiske svindrevner på vandrette plader gælder normalt et eller flere af de følgende punkter:

1. Opstår fra 1/2-2 timer, efter at alt synligt vand er fordampet fra betonoverfladen.
2. Danner en vinkel på 45° med støberetning.



Figur 4. Eksempler på revnebilleder, når plastisk svind er revneårsager.

3. Længde: 50 mm-3 m.
4. Parallelle, afstand 200-2000 mm.
5. Revnevidde op til 3 mm, hyppigt gennemgående.

Risikoen for plastisk svind øges som nævnt ved høj temperatur og høj vindhastighed, men derudover ligeledes ved højt sætmål, lav relativ luftfugtighed, lav temperatur, retarderende tilsætningsstoffer, absorberende underlag og lang blandetid. Luftindblanding reducerer risikoen. Opdages de plastiske svindrevner umiddelbart efter deres fremkomst kan de lukkes igen ved genvibrering, dog kun med formvibratører.

Plastisk svind svarer til det udtørringssvind man kender hos ler. Se i øvrigt Beton-Teknik 3/05/1975 »Plastisk svind«.

## Udtørringssvind

Når vandmættet, hærdnet beton fritlægges, vil der afgå vand fra overfladen. Fordampningshastigheden afhænger primært af luftens relative fugtighed, temperatur, betonens vandindhold og konstruktionsdelens størrelse. Vandet der fordampes kommer frem til betonoverfladen gennem de kapillære porer. Derved opstår trækspændingen i porerne, hvorved betonen trykkes sammen, den svinder.

Udtørringen og dermed svindet breder sig ind gennem betonen indtil en ligevægtstilstand med den omgivende lufts relative luftfugtighed (RF) er indtrådt. Vokser RF, bliver vandbevægelsen modsat, betonen sveller. Hvis betonen vandmættes igen vil den dog ikke nå helt tilbage til sit oprindelige volumen. En indgående beskrivelse af svindprocessen findes i [1]. Svindet er normalt af

størrelsesorden 0-0,4‰, men der findes eksempler på svind op til 0,6‰. Brudtøjningen for beton er normalt af størrelsesorden 0,1-0,2‰. Derfor vil der for fastholdte betondele ofte opstå revnedannelser.

En række faktorer har indflydelse på udtørringssvindets størrelse:

**Vandindhold.** Cementpastaen er den svindende komponent. Dens mængde styres af cementindholdet. Porøsiteten styres af v/c. Den fælles virkning viser sig at svare til produktet, dvs. vandindholdet. Svindet vokser således stort set proportionalt med betonens vandindhold ved udstøbningen.

**Tilsætningsstoffer.** Anvendelse af calciumchlorid (som accelerator) kan øge svindet 10-50%.

**Relativ luftfugtighed.** Jo lavere RF jo større bliver svindet.

**Dimension.** Jo større den svindende betondel er, jo langsommere udvikler svindet sig med tiden.

Indflydelsen fra relativ luftfugtighed, dimension og tid afspejles på figur 5, som med tilnærmelse gælder for en beton med et oprindeligt vandindhold på 8% efter vægt.

I [1] findes en metode til beregning af svindets størrelse for en betondel. På figur 5 vises en simplificeret metode til skøn over udtørringssvind i en betonkonstruktionsdel.

**Eksempel.** Giv et skøn over samlet udtørringssvind i en betonbjælke 6 m lang 250x500 mm et halvt år efter udstøbningen. RF = 50%. Betonsammensætning svarer til et oprindeligt vandindhold på 6% efter vægt. Den effektive tykkelse er:

$$\frac{2 \times \text{volumen}}{\text{overfladeareal}} = \frac{2 \cdot 250 \cdot 500 \cdot 6000}{6000 \cdot (2 \cdot 500 + 2 \cdot 250)} = 167 \text{ mm}$$

Figur 5 giver ca.:

$$160 \cdot 10^{-6} = 0,16\text{‰}$$

ved 8% vandindhold.

Ved 6% vandindhold fås:

$$\frac{6}{8} \cdot 0,16 = 0,12\text{‰}$$

Efter 30 år giver figur 5 tilsvarende

$$400 \cdot 10^{-6} = 0,4\text{‰}$$

ved 8% vandindhold.

Ved 6% vandindhold fås:

$$\frac{6}{8} \cdot 0,4\text{‰} = 0,3\text{‰}$$

Som det fremgår af figur 5, vil der altid indtræde et vist udtørringssvind ved de relative luftfugtigheder, som forekommer i praksis. Da forskellige former for fastholdelser (omgivende konstruktionsdele, armering m.v.) forhindrer betonen i at trække sig frit sammen, vil svindtøjningen hyppigst overskride trækbrudtøjningen, hvorved revnedannelser vil opstå. Styringen af disse revnedannelser består af en reduktion af svindet til et minimum gennem en optimal betonsammensætning, samt indlægning af svindarmering eller indlægning af kontraktionsfuger.

**Reduktion af revnetendensen.** Revnetendensen afhænger ikke blot af svindets størrelse, men også af graden af fastholdelse, betonens stivhed (elasticitetskoefficient), trækbrudtøjning samt krybning. Nogle fak-

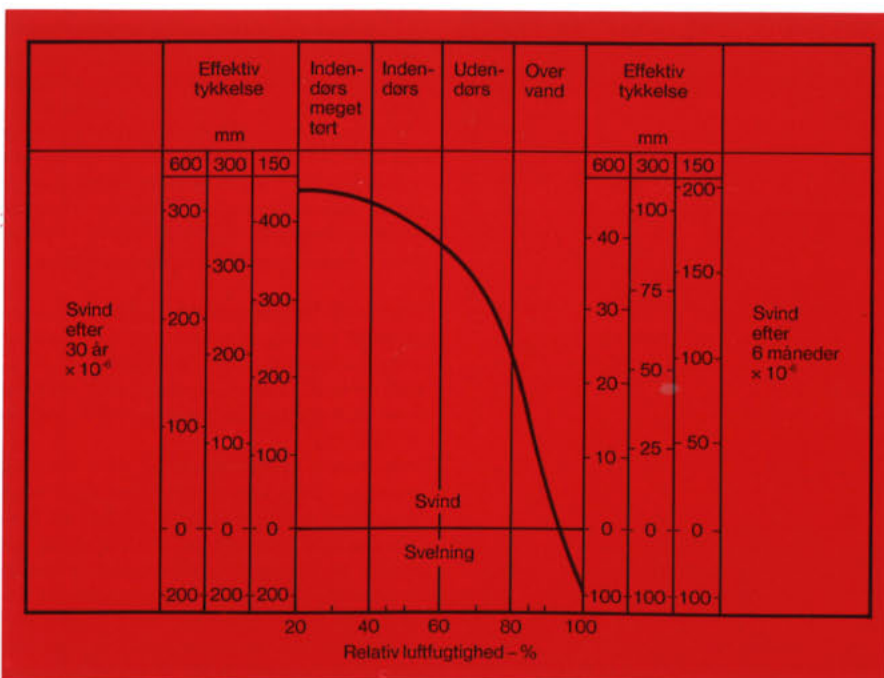
torer, som reducerer svindet, reducerer samtidig krybningen og øger stivheden. Slutresultatet bliver dermed ikke en reduktion af revnetendensen. De vigtigste midler, som bør tages i anvendelse for at reducere revnetendensen er:

1. Reduktion af vandbehov ved at benytte optimal kornkurve (herunder så lavt finstofindhold som muligt), så lavt sætmål som muligt og vandreducerende tilsætningsstoffer.
2. Så stor maksimal stenstørrelse som mulig.
3. Så lav temperatur som muligt.
4. Så langvarig beskyttelse af ovefladen mod fordampning som mulig.

Jo længere tid der går, inden svindet sætter ind, jo højere er betonens trækbrudstyrke nået op, og jo mindre bliver derfor revnetendensen. [4] nævner, at beton kan være i stand til at modstå 2-3 gange så meget langsomt påført svind, som hurtigt påført svind.

**Svindarmering.** Korrekt placeret armering i passende mængder vil ikke alene reducere revnedannelserne, men vil fordele svindtøjningerne langs armeringen, således at der dannes et stort antal ganske fine revner i stedet for nogle enkelte store (skadelige). En undersøgelse [5] viser, at normerne i en række lande giver anvisninger på omfanget af svind- (og temperatur-) armering baseret på tværnsnitsareal og stålets flydespænding, uanset hvilken form for fastholdelse og volumenændringer der forekommer. Undersøgelsen viser, at de projekterende i praksis anvender mere armering, end anvisningerne angiver til styring af revnedannelsen. Endelig foreslår [5] en mere rational bestemmelse af mængden af svindarmering, som dels sikrer mod flydning i armeringen, dels sikrer en bestemt maksimal revnevidde. Fremgangsmåden og et eksempel findes i skema 2.

**Fuger.** Den største sikkerhed mod skadelige svindrevner opnås ved indlæggelse af kontraktionsfuger, se f.eks. Beton-Teknik 6/07/1980 »Gulve og slidlag af beton«. Omvendt vil der, hvis fuger ikke er indlagt og konstruktionen er uarmeret, komme gennemgående svind- (og temperatur-) revner, som giver den inddeling i felter, som konstruktionen har behov for. Desværre går revnerne ikke altid der, hvor det i øvrigt er mest hensigtsmæssigt at dele konstruktionen, og de er desuden normalt uregelmæssige. Derfor bør konstruktøren altid selv foretage fugeindelingen eller indlægge revneanvisere (indsnævringen i tværsnittet), hvis andre forholdsregler ikke er truffet.



Figur 5. Simplificeret vurdering af udtørringssvind som funktion af relativ luftfugtighed, tid og effektiv tykkelse (= 2 gange volumen divideret med overfladearealet). Den fundne værdi gælder for beton med et oprindeligt vandindhold på 8% efter vægt. Da svindet er proportionalt med vandindholdet, korrigeres let, hvor procenten er anderledes. Efter [3].

## Armering til styring af svind- og temperaturrevner

1. Der skal altid indlægges armering i begge retninger i plader og vægge.
2. Armeringen skal ligge så tæt ved overfladen som muligt, således at krav til dæklagstykkelsen kun lige overholdes.
3. Armeringsgraden skal vælges som den største af  $\varphi_1$  og  $\varphi_2$  bestemt ud fra formlerne:

$$\varphi_1 = K \cdot \frac{f_{tk}}{f_{yk}}$$

$$\varphi_2 = \frac{d \cdot (\epsilon_s + \epsilon_T)}{2 \cdot w} \cdot \frac{f_{tk}}{f_b}$$

hvor

$\varphi_1$  = Minimumsarmeringsgrad, som kræves for at fordele revnerne.

K = Materialefaktor (normalt 1,2).

$f_{tk}$  = Trækstyrken af den hærdnede beton. Her kan benyttes 3 døgnstyrken (evt. udtrykt som  $0,25 \cdot \sqrt{f_{ck}}$  (MN/m<sup>2</sup>), hvor  $f_{ck}$  er opnået karakteristisk styrke).

$f_{yk}$  = Stålets karakteristiske trækflydespænding eller 0,2-spænding.

$\varphi_2$  = Minimumsarmeringsgrad for fuldt fastholdt betonkonstruktionsdel for opnåelse af en passende stor sandsynlighed for revnevidde mindre end w.

d = Armeringsdiameter.

$\frac{f_{tk}}{f_b}$  = Forhold mellem trækstyrke for hærdnede beton og vedhæftningsstyrke mellem beton og armering (normalt 1,0 for glat stål og 0,5 for forkammet stål).

w = Maksimal revnevidde.

$\epsilon_s$  = Svindtøjning

$\epsilon_T$  = Temperaturtøjning udregnet af formlen  $\epsilon_T = \frac{\alpha}{2} (\tau_1 + \tau_2)$

hvor:

$\alpha$  = Betonens varmeudvidelseskoefficient (se side 8).

$\tau_1$  = Forskellen mellem maksimal temperatur under afbindings- og hærdningsforløbet og omgivelsernes temperatur.

$\tau_2$  = Forskellen mellem omgivelsernes temperatur på støbetidspunktet og koldeste tidspunkt af året.

2 = Faktor svarende til bidrag fra krybning i den hærdnede beton samt reduktion af  $f_{ck}/f_b$  i den hærdnede beton.  $f_{ck}$  er krævet karakteristisk trykstyrke.

### Eksempel

For en betonavæg gælder følgende værdier af de indgående størrelser:

$$f_{ck} = 30 \text{ MN/m}^2, f_{tk} = 0,25 \cdot \sqrt{30} = 1,4 \text{ MN/m}^2.$$

$$f_{yk} = 550 \text{ MN/m}^2 \text{ (tentorstål, diameter } d=10 \text{ mm)}.$$

$$\frac{f_{tk}}{f_b} = 0,5.$$

$$w = 0,2 \text{ mm}.$$

$$\epsilon_s = 0,3\%.$$

$$\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}.$$

$$\tau_1 = 20^\circ.$$

$$\tau_2 = 15^\circ.$$

Dette giver:

$$\epsilon_T = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 10^{-6} (20+15) = 0,175\%.$$

$$\varphi_1 = K \cdot \frac{f_{tk}}{f_{yk}} = 1,2 \cdot \frac{1,4}{550} = 0,003$$

$$\varphi_2 = \frac{10 \cdot (0,3 + 0,175) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,2} \cdot 0,5 = 0,004$$

Dvs. der skal benyttes en armeringsgrad på 0,004 (dvs. armeringsprocent på 0,4%).

## Overfladekrakeleringer

Overfladekrakeleringer i form af netrevnedannelser opstår hyppigt i betonoverflader, som pga. udtørring og/eller afkøling trækker sig sammen i forhold til de underliggende varme og endnu vandmættede lag. Specielt hvis cementslam eller mørtel med højt v/c er trukket ud i overfladen, vil trækbrudtøjningen let blive overskredet som følge af svind- og temperaturtøjningen. Dette medfører revnedannelsen. På figur 6 er vist et eksempel på krakeleringer.

Revnerne vil normalt have en dybde fra brøkdelen af mm op til et par mm ind i betonen. I de fleste tilfælde er det kun et æstetisk problem. Såfremt revnerne blot er i et slamlag på overfladen, kan de fjernes ved slibning, højtryksspuling eller sandblæsning. Risikoen for overfladekrakeleringer reduceres ved:

1. Undgåelse af for fede blandinger.
2. Anvendelse af lavest muligt v/c.
3. Undgåelse af for stenrige blandinger.
4. Sikring mod overvibrering og for kraftig bearbejdning, der trækker slam op i overfladen.
5. Forholdsregler generelt mod slamlag i overfladen.
6. Forbedring af lagringsforhold.

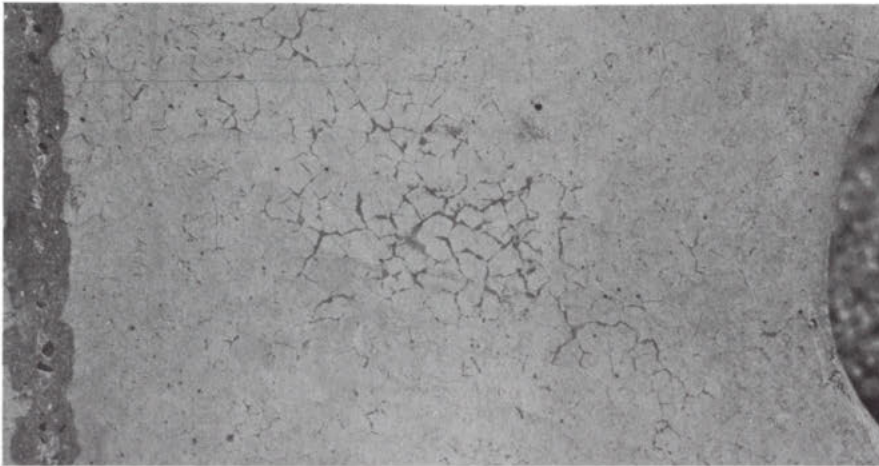
I øvrigt kan henvises til Beton-Teknik 10/05/1977.

## Termorevner

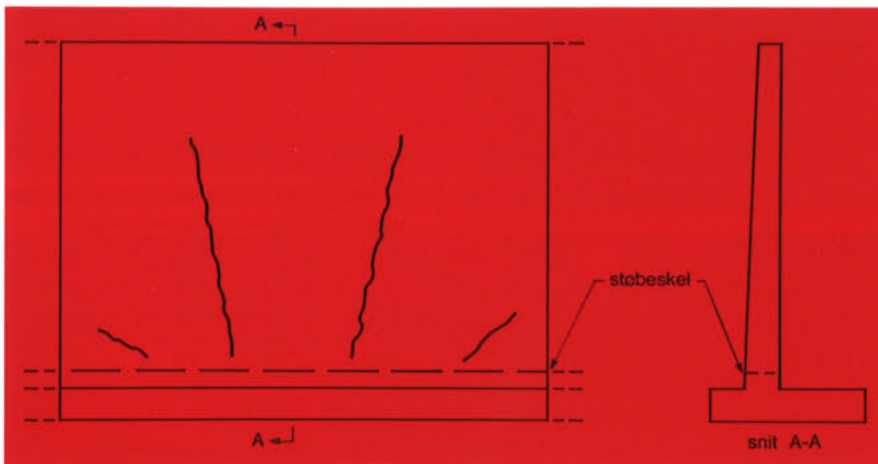
Under betons hærdning dannes varme ved den kemiske reaktion mellem cement og vand. Dette forårsager en tøjning svarende til betonens varmeudvidelseskoefficient (se nærmere herom nedenfor) multipliceret med temperaturstigningen. Hvis betonen ikke er fastholdt, vil tøjningen ikke forårsage spændinger. Normalt vil betonen være helt eller delvis fastholdt. Revnedannelsen opstår da, når betonens varmetøjning overskrider betonens trækbrudtøjning. Fastholdelsen af betonen kan henføres til to kategorier, nemlig ydre og indre fastholdelse.

**Ydre fastholdelse** opstår, hvis en konstruktionsdel støbes sammen med en hærdnet konstruktionsdel, f.eks. en væg støbt sammen med sit fundament, se figur 7. På figur 8 er vist, hvorledes tøjningerne i væggen udvikler sig.

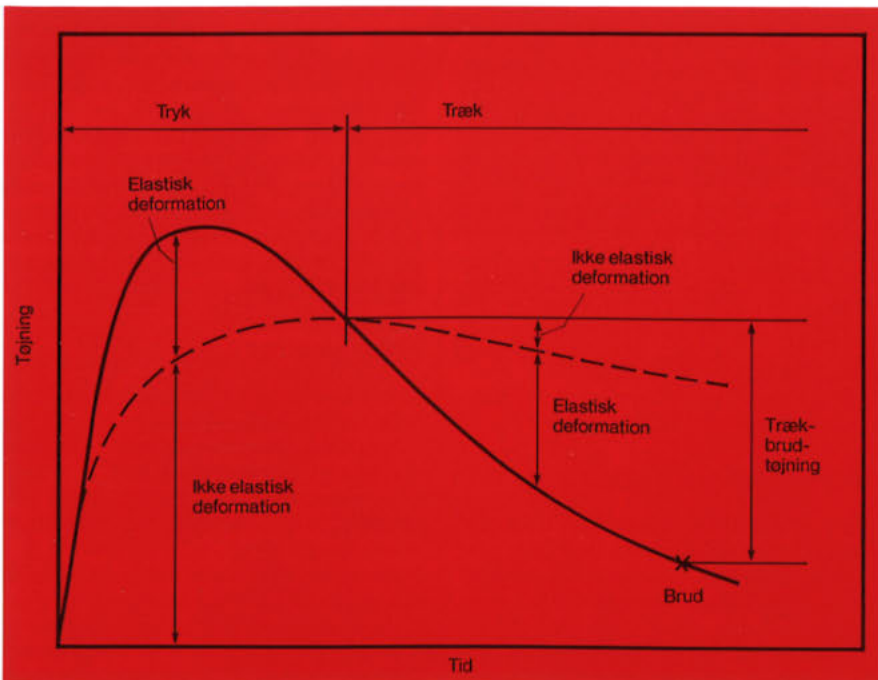
Hvis beton havde været et rent elastisk materiale, ville temperaturstigningen have forårsaget trykspændinger. Da der imidlertid i den allertidligste opvarmningsfase optræder en betragtelig ikke elastisk tøjning (krybning), vil betonen i afkølingsfasen bevæge sig fra en trykpåvirkning til en trækpåvirkning. På dette tidspunkt er krybningen langt mindre. Derfor er det muligt, som vist på figur 8, at træktøjningen overskrider trækbrudtøjningen med en revnedannelse til følge. Denne form for revnedannelse vil hyppigt være gennemgående.



Figur 6. Overfladekrakeleringer på midten af betonvæg.



Figur 7. Termorevner fremkommet få dage efter støbning af væggen.



Figur 8. Tøjninger i de første døgn efter udstøbning af væggen fra figur 6. Den fuldt optrukne linie angiver tøjningen, hvis væggen ikke var fastholdt. Den punkterede linie angiver krybningens bidrag til reduktion af tøjningen i den »varme« fase, hvor der er tryk i væggen. Brud indtræder når trækbrudtøjningen overskrides. [6].

**Indre fastholdelse** opstår når et område af en konstruktionsdel deformeres anderledes end et naboområde, f.eks. pga. temperaturforskelle. Et eksempel er angivet på figur 9, der viser temperaturfordelingen i en ikke fastholdt væg under hærdeningen. I tiden umiddelbart efter udstøbningen ( $0-\tau_2$ ) stiger temperaturen, da cementen ved sin reaktion med vand udvikler mere varme, end der kan afgives til omgivelserne. I denne fase vokser temperaturforskellen mellem midte og overflade. Derved udvikles spændinger, som vist med skravering på figur 9, tryk i midten og træk ved overfladen. Selvom krybningen har en afbødende virkning, er der risiko for revnedannelse på dette tidspunkt.

Ved afformningstidspunktet vokser temperaturforskellene hastigt (mellem  $\tau_3$  og  $\tau_4$ ). På dette tidspunkt kan krybningen ikke bidrage nær så meget, derfor har man her den største risiko for revnedannelser. Revner, som er synlige umiddelbart efter afformningen vil normalt blive usynlige i den efterfølgende afkølingsperiode, men de er stadig, og kan på et senere tidspunkt åbne sig pga. udtørringssvind. Denne type revner vil aldrig være gennemgående.

Sikring mod termorevner må ske ved reduktion af temperaturforskelle, ved reduktion af varmeudvidelseskoefficienten, ved reduktion af fastholdelsen eller ved forøgelse af trækbrudtøjningen. Med hensyn til styring af temperaturforskellene henvises til [7], [11].

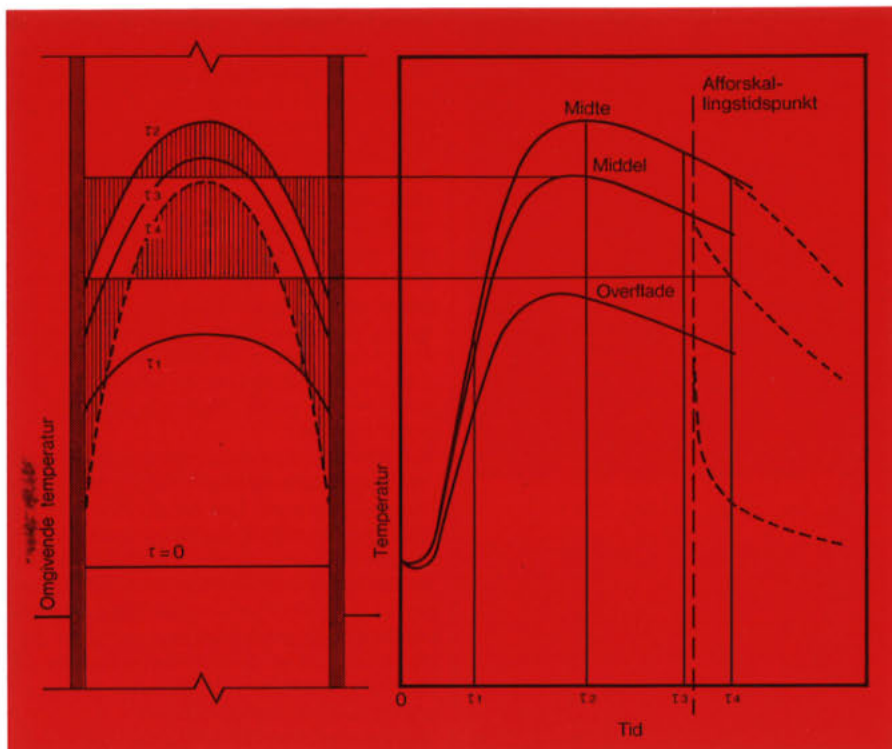
På den sikre side kan det antages, at termorevnedannelser kan undgås, såfremt de af temperaturforskellene fremkaldte tøjninger holdes under  $0,13\%$ .

For en væg med samme temperatur på begge sider indebærer dette, at forskellen mellem væggen midtemperatur og overfladetemperatur højst må udgøre  $13^\circ\text{C}$ . Det svarer normalt til en temperaturforskel mellem midte og overflade på ca.  $20^\circ\text{C}$ . Hvis væggen sammenstøbes med et tidligere udstøbt stift fundament, skal det yderligere sikres, at forskellen mellem væggen og fundamentets midtemperatur på intet tidspunkt overstiger  $13^\circ\text{C}$ .

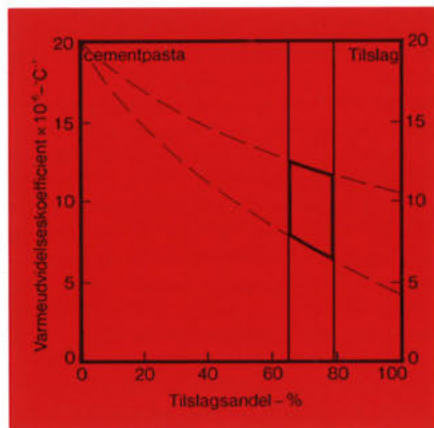
## Temperaturtøjninger

Revnedannelser fra temperaturtøjninger omfatter også termorevnerne, men pga. disses specielle karakter er de behandlet for sig selv i afsnittet ovenfor.

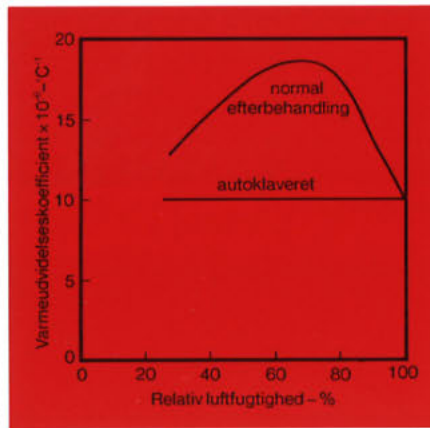
Opvarmning og afkøling af beton fremkalder tøjninger i betonen. Tøjninger er som nævnt tidligere produktet af varmeudvidelseskoefficienten og temperaturændringen. Varmeudvidelseskoefficienten for beton er omkring  $10 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ , men afhænger dog noget af cementpastaens fugtindhold og af det anvendte tilslag. Figur 10 angiver princippet for bestemmelse af en betons varmeudvidelseskoefficient ud fra varmeudvidelseskoefficienterne for cementpasta (se figur 11) og tilslag. For tilslaget vil værdien normalt ligge fra  $5 \cdot 10^{-6}$  til  $12 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ . En



Figur 9. Temperaturforhold i væg fra udstøbningstidspunktet til efter afforskallingstidspunktet. [6].



Figur 10. Varmeudvidelseskoefficienten for beton som funktion af tilslagsandelen, og tilslags varmeudvidelseskoefficient, når cementpastaens varmeudvidelseskoefficient er sat til  $20 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Efter [8].



Figur 11. Cementpastaens varmeudvidelseskoefficient som funktion af dens relative fugtighed. Efter [8].

temperaturforskul på  $40^\circ\text{C}$  vil med varmeudvidelseskoefficienten  $10 \cdot 10^{-6}$  give en tøjning på 0,4%, der langt overskrider normal betons trækbrudtøjning. Dvs. hvis betonen er fastholdt, vil der opstå revnedannelser.

Vedrørende reduktion af revnetendenser på grund af temperaturtøjninger gælder de samme bemærkninger som ovenfor under termorevner.

Med hensyn til temperaturrevnearmering henvises til afsnittet om svindarmering og til skema 2, som indeholder bidrag fra temperaturtøjninger. Ved fugekonstruktioner kan konstruktionsdelenes fastgørelse reduceres væsentligt, hvorved også tøjning-

gerne i betonen kan holdes under trækbrudtøjningen. Fuger gives derfor den største sikkerhed mod temperaturrevner.

### Armeringskorrosion

I sund, tæt beton er armeringen beskyttet mod korrosion af betonens indhold af calciumhydroxid. Pga. luftens kuldioxid som i større eller mindre mængder (mindre, jo tættere betonen er) trænger ind, vil calciumhydroxiden efterhånden karbonatiseres til calciumcarbonat, se [1]. Når denne karbonatisering er trængt frem til armeringen, vil denne ikke længere være beskyttet mod korrosion. Denne sætter ind i hele det

ubeskyttede område. Da den dannede rust fylder mere end det oprindelige jern, revner betonen efterhånden langs jernet.

Korrosionen kan også komme i gang, hvis calciumhydroxiden udludes af betonen. Udludning kendetegnes ved kalktapeter og drypsten på undersiden eller under konstruktionsdelen. Endelig vil høj koncentration af chloridion (f.eks. fra natriumchlorid eller calciumchlorid) omkring armeringen sætte korrosion igang, hyppigt i form af grubetæring, der kan give afsprængninger. Korrosionsrevnedannelser er normalt ledsaget af rustudfældninger. De vil normalt først komme flere år efter støbningen. Armeringskorrosion og de deraf følgende revnedannelser forebygges på følgende måde:

#### 1. Vedr. karbonatisering

Anvend så tæt beton som muligt, dvs. lavt  $v/c$ , evt. anvendelse af flyveasketilsætning.

Anvend så stort dæklag som økonomisk set muligt.

#### 2. Vedr. udludning

Anvend så tæt beton som muligt (se ovenfor).

Foretag sikring mod vandgennemsvivning ved afledning af vandansamlinger.

#### 3. Vedr. tilstedeværelse af chlorider

Undgå chlorider i tilslag og støbevand.

Foretag evt. overfladebehandling.

Anvend så tæt beton som muligt.

Korrosion kræver tilgang af ilt, så også i den sammenhæng er en tæt beton korrosionshæmmende.

Hvis et konstruktionselement udviser armeringskorrosion, kan man kun gøre sig håb om en heldig gennemført reparation, hvis årsagen alene er karbonatisering eller udefra indtrængende chlorider. I dette tilfælde må al karboniseret eller chloridfyldt beton borthugges, armeringen renses og ny beton støbes på.

Er årsagen derimod højt chloridindhold overalt i betonen, er der normalt ikke meget andet at gøre, end evt. at give en tætnende overfladebehandling for derved at reducere iltens adgangsmuligheder. Derved forsinkes den videre korrosion. Standses helt kan den dog ikke.

### Frostskader

Revnedannelser pga. frost opstår, når betonens vandmætningsgrad er nået op over den kritiske vandmætningsgrad, og betonen derefter udsættes for frost.

Hvis revnedannelserne opstår, vil det normalt ske fra ét til mange år efter konstruktionsens ibrugtagning.

Frostrevner kan være videreudvikling af revner opstået af andre årsager.

Frostspringere er afsprængninger over og omkring porøse sten, som er vandmættede og derefter fryser. Afsprængningerne er normalt kegleformede.

D-cracking er betegnelsen for fine, tætliggende, frostfremkaldte (eller fremkaldte af

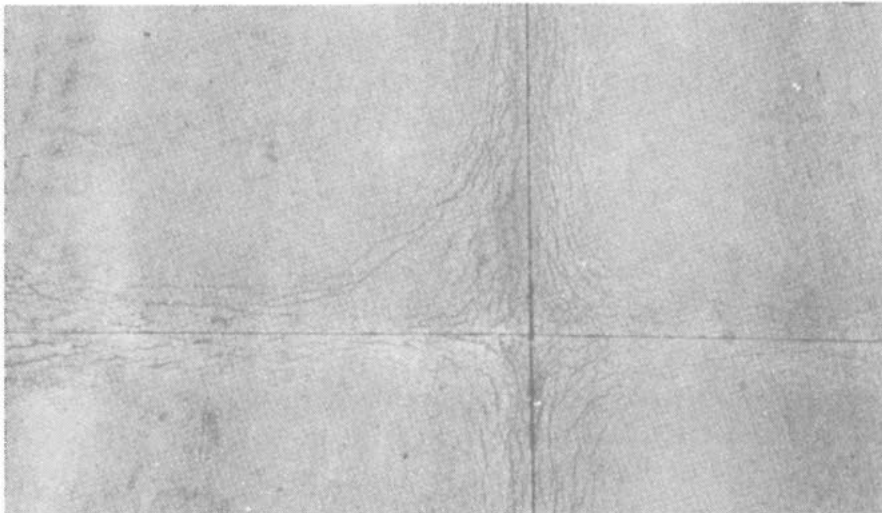


alkaliskisreaktioner, se nedenfor) revner parallelt med længde- og tværfuger i betonbelægningen, se figur 12.

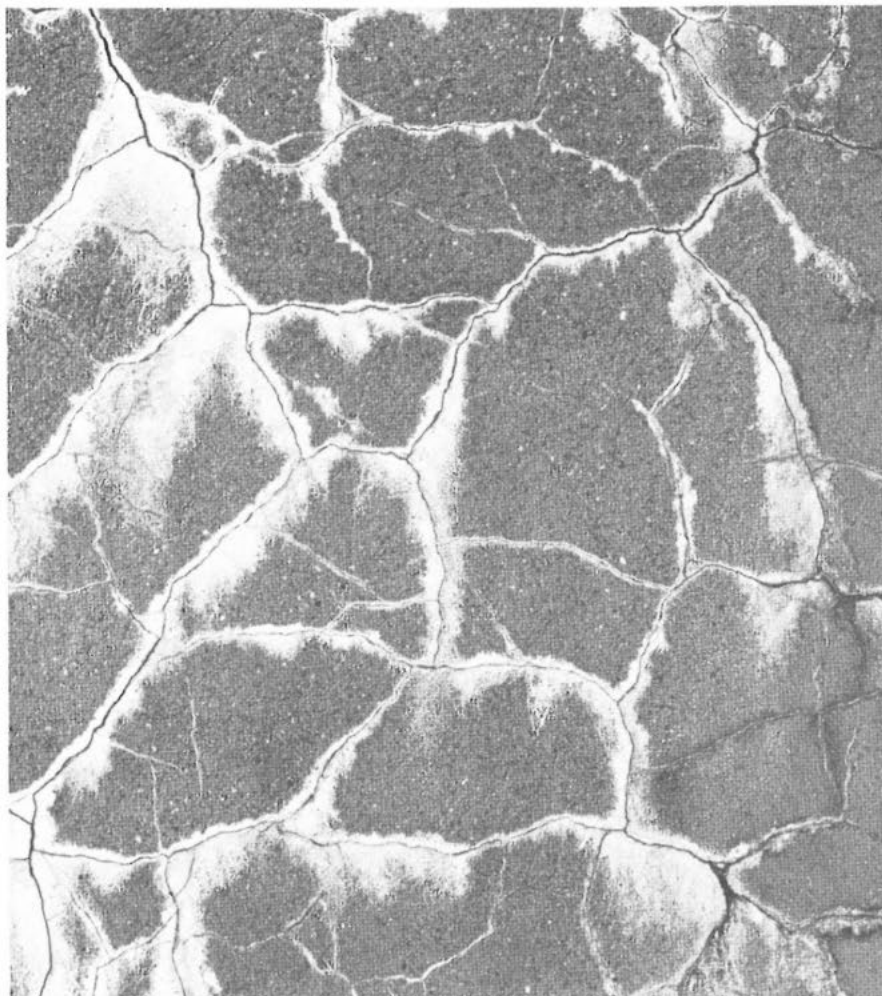
Revnedannelser pga. frost forebygges dels ved at gøre betonens kritiske vandmætningsgrad så høj som mulig, dels ved at

holde den aktuelle vandmætningsgrad så lav som muligt.

Det sidste sikres gennem korrekte konstruktive detaljer, der sikrer afløb for tilkommende vand fra alle områder, så risikoen for vandmætning reduceres.



Figur 12. D-cracking langs tvær- og længdefuger på en 9 år gammel vejbelægning. [9].



Figur 13. Netrevner – forårsaget af alkalireaktioner og frost i overfladen af et betonfundament. Beton-Teknik 3/02/1973.

Det første sikres gennem:

1. Anvendelse af frostfaste tilslagskorn
2. Indblanding af 4–6% luft
3. I øvrigt opfyldelse af kravene til vandtæt beton, se Beton-Teknik 3/04/1974
4. Udsættes betonen for tørsalte, gælder yderligere følgende krav:  
for  $d_{\max} = 16 \text{ mm}$   
Indhold af cement  $\geq 400 \text{ kg/m}^3$   
Indhold af cement + filler  $\leq 450 \text{ kg/m}^3$   
for  $d_{\max} = 32 \text{ mm}$   
Indhold af cement  $\geq 350 \text{ kg/m}^3$   
Indhold af cement + filler  $\leq 400 \text{ kg/m}^3$

## Alkaliskisreaktioner

Alkaliskisreaktioner er lokale ekspansioner i betonens indre som følge af kemiske reaktioner mellem visse kiselholdige sand- og sten- og den alkaliholdige væske, som normalt befinder sig i betonens porer.

Ved reaktionen dannes en gel, som ved vandoptagelse fylder mere end det oprindelige rumfang. Derved opstår sprængninger i betonen, i overfladen, ofte i form af springere og den farveløse gel trænger ud og bliver hvid, se figur 13. Se i øvrigt en mere omfattende beskrivelse i [1] eller i Beton-Teknik 3/02/1973.

Reaktionerne kræver tilstedeværelse af reaktivt kisel, alkali og vand. Risikoen for deres opståen kan derfor reduceres ved:

1. Anvendelse af tilslag med mindre end 2% reaktive korn i såvel sten- som sandfraktion.
2. Anvendelse af cement med lavt alkaliindhold, evt. suppleret med flyveaske. Flyveasketilsætning på 30% eller derover medvirker aktivt til reduktion af porevæskens alkaliindhold.
3. Lavt v/c, der giver en tæt beton med dårlige indtrængningsmuligheder for vand.

Revnedannelserne vil hyppigt være omfattende. Det vil normalt være umuligt at reparere, idet en total reparation vil kræve al betonen fjernet. Ved en overfladebehandling kan vandets adgang til reaktionsstederne sinkes.

## Sulfatangreb

Sulfater findes i havvand, mosevand og undertiden i grundvandet. Når sulfationer kommer i kontakt med de aluminatholdige dele af cementpastaen, dannes forbindelsen ettringit, der fylder mere end det oprindelige materiale. Derved opstår expansioner i cementpastaen, som får det yderste lag af betonen til at revne og falde af. Revnedannelserne vil som regel komme mange år efter støbningen.

Sulfatangreb kan imødegås dels ved anvendelse af en tæt beton (lavt v/c), dels ved anvendelse af sulfatbestandig cement.

# Konstruktive revnedannelser

I slapt armerede bærende konstruktions-elementer, såsom bjælker og plader kræver en rimelig økonomisk udnyttelse af armeringen i trækzonen, at betonen revner her. Under belastningen kan de første revner fremkomme allerede når armeringsspændingen har nået værdier omkring  $30 \text{ MN/m}^2$ . Såfremt armeringen er korrekt udført, vil der fremkomme en lang række meget fint fordelt tætliggende revner, hvis hovedretning er vinkelret på hovedtrækspændingens retning. På figur 14 er vist et eksempel på et sådant revnebillede i foden af en T-bjælke. I de sidste 50 år har der været gennemført en række forskningsprojekter for at finde frem til et formelapparat til beregning af revnedannelsens omfang. Resultaterne har ikke været entydige, og der findes en lang række revneformler, som søger at tage hensyn til flere eller færre af de indgående parametre. I skema 3 findes formlen fra DS 411, »Norm for betonkonstruktioner«. I [10] findes et formelsæt, der medtager yderligere en række faktorer. Det svarer til formlerne i CEB/FIP »Model Code for Concrete Structures« 1978.

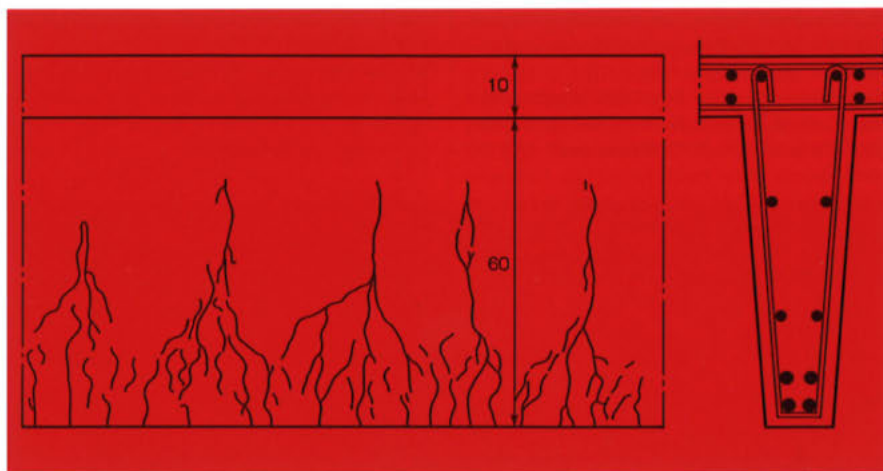
De fleste revneformler bestemmer *maksimal revnevidde*. Hermed menes normalt den revnevidde under hvilken 90% af de fremkomne revner vil befinde sig. Undersøgelser viser, at revner dobbelt så brede som den beregnede maksimale revnevidde undertiden forekommer, selv om variationskoefficienten for revnevidden normalt er omkring 40%. Almindeligvis vil man under udformningen af armeringen tage disse revnedannelser i regning og sikre sig, at de begrænses, så de ikke giver anledning til æstetiske eller holdbarhedsmæssige problemer (se herom neden for i afsnittet »Kritisk revnevidde«).

Skadelige konstruktive revnedannelser kan opstå, såfremt der ikke er indlagt tilstrækkelig med armering i de snit af konstruktions-elementet, hvor der forekommer træk- og forskydningsspændinger. Dette kan ske på tegnebrættet som en dimensioneringsfejl. Det kan også ske på byggepladsen ved fejlplacering eller unkladet placering af den foreskrevne armering.

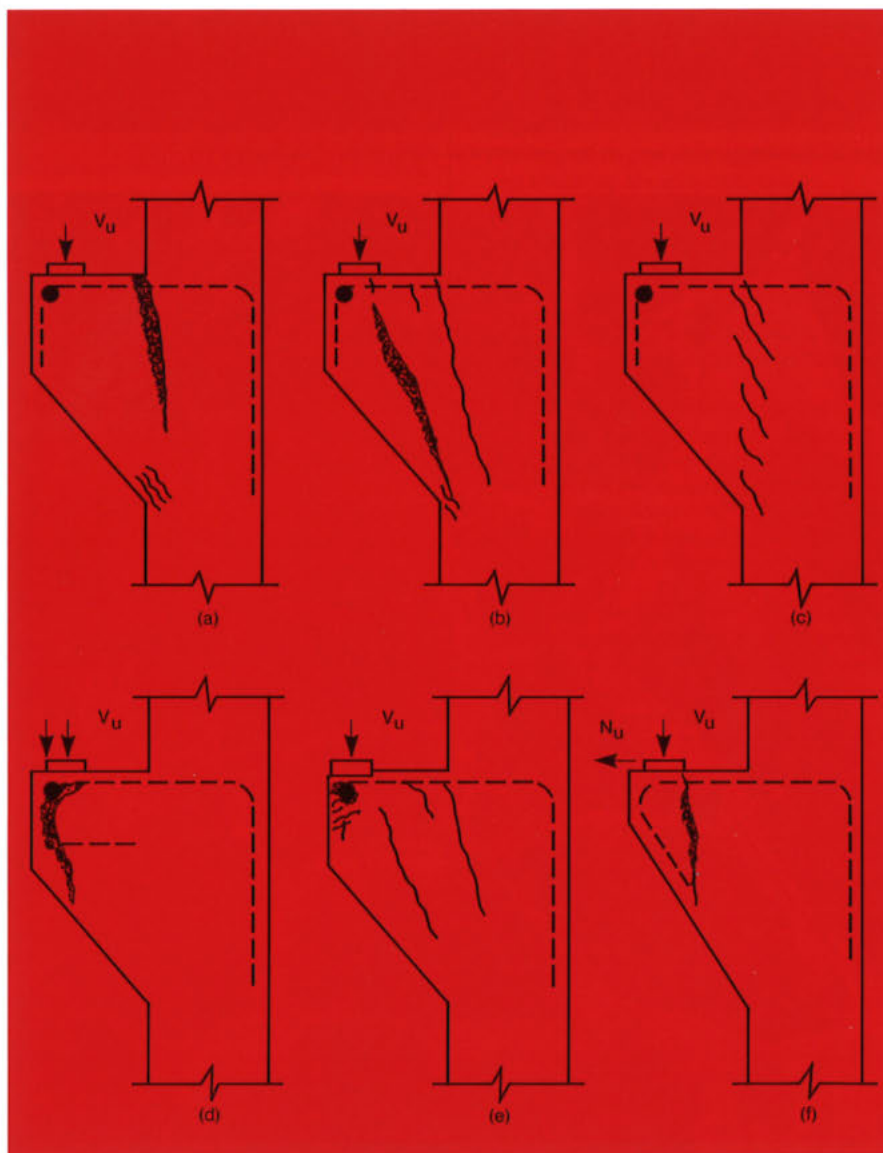
Eksempler på revnedannelser forårsaget af, at der ikke er overensstemmelse mellem den indlagte armeringsudformning og de kræfter, der virker på konstruktionen, ses på figur 15. Her ses revnedannelser pga. bøjningstrækspændinger, spaltetrækspændinger, forskydningsspændinger, forankringsbrud, tryk (knusning pga. for lille vederlag) og rent træk.

De hidtil nævnte revnedannelser vil normalt fremkomme på det tidspunkt konstruktionsdelen tages i brug. Er skaden sket, er det vigtigt for konstruktionens sikkerhed at bestemme, hvorledes armeringen rent faktisk ligger, og hvilke belastninger den så kan bære. Denne registrering kan gennemføres ved anvendelse af covermeter eller evt. gammarradiografi (se [1]).

Skadelige konstruktive revnedannelser kan også opstå, fordi der ikke er overensstemmelse mellem de belastningsformer,



Figur 14. Revnedannelser i en 70 cm høj T-bjælke, der udsættes for bøjningspåvirkninger. [5].



Figur 15. Revnedannelser i konsol pga. manglende overensstemmelse mellem påvirkning og armering. (a) bøjningstrækbrud, (b) spaltetrækbrud, (c) forskydningsbrud, (d) forankringsbrud, (e) knusningsbrud, (f) vandret trækbrud. [5].

der indgår i beregningsforudsætningerne, og de der rent faktisk forekommer. Som eksempler kan nævnes

at konstruktionen anvendes til andet formål end den er beregnet for,

at der sker sætninger af dele af fundamentet, eller

at der optræder deformationer, som giver anledning til omfordeling af lasten.

## Kritisk revnevidde

Fastsættelse af grænser for tilladelige revnevidder i beton må tage hensyn til såvel æstetiske som holdbarhedsmæssige aspekter.

**Æstetiske aspekter.** Spørgsmålet om hvor lille en revne skal være, for at den er acceptabel udfra et æstetisk synspunkt, afhænger af:

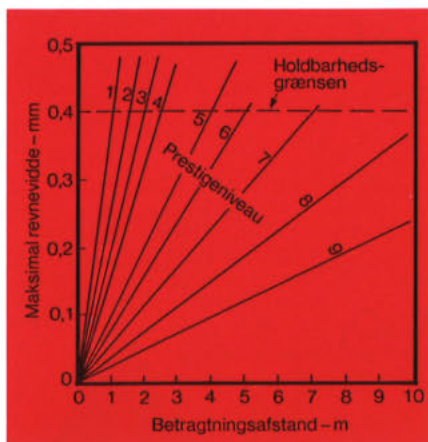
1. Den afstand den betragtes fra
2. Bygværkets prestigeniveau
3. Overfladekarakteren

Den acceptable revnevidde må afhænge af det menneskelige øjes opløsningsevne, som angives at være omkring et bueminut, hvilket på 1 meters afstand svarer til 0,3 mm. Hvis en 0,3 mm revne ikke er understreget ved farveforskelle, kan den næppe ses på 1 meters afstand.

I [5] indføres en såkaldt prestigeskala for bygværker, gående fra 1 til 9, omtrentligt fastlagt ved følgende:

- Niveau 1 Lagerbygninger, der sjældent bruges
- Niveau 2 Parkeringshuse, garager
- Niveau 3 Fabrikker, kontorbygninger og butikker
- Niveau 5 Boligbyggeri
- Niveau 8 Banker og forsikringsdomiciler, offentlige kontorer
- Niveau 9 Monumentale bygninger.

Herudfra bestemmer figur 16 kritisk revnevidde som funktion af den afstand, hvorfra revnen ses, samt prestigeniveau.



Figur 16. Fastsættelse af kritisk revnevidde som funktion af betragtningsafstand og bygværkets prestigeniveau. [5].

**Holdbarhedsmæssige aspekter.** Konklusionen fra den lange række af eksisterende undersøgelser af sammenhæng mellem revnevidde og holdbarhed (især vedrørende korrosionsproblemer) er ikke til stor hjælp for den projekterende. Den siger, at det er meget usandsynligt, at revnedannelser pga. bøjningstrækspændinger fremkalder korrosion, hvis maksimal revnevidde er under 0,15 mm.

Næsten alle forsøg har omhandlet bøjningstrækrevner. Forsøgsteknisk er det meget vanskeligt at styre de materialemæssige revnedannelser, herunder svindrevner og temperaturrevner.

De fleste standarder og dimensioneringsanvisninger angiver værdier for kritiske revnevidder. Men i henhold til det ovenfor nævnte, er det vanskeligt at sige, om de er på den sikre eller usikre side, for så vidt angår de materialemæssige revnedannelser.

Afslutningsvis skal anføres 3 eksempler på rekommandationer for maksimal revnevidder.

DS 411: 0,3 mm i miljøklasse B } i armeret  
0,2 mm i miljøklasse A } beton  
0,1–0,2 mm mindre i forspændt beton.

[10]: Der skelnes mellem anvendelse af korrosionsfølsom armering eller ikke korrosionsfølsom armering. Ved det førstnævnte forstås armering med enten diameter mindre end 4 mm eller koldbearbejdet armering, der permanent påvirkes til mere end 400 MN/m<sup>2</sup>:  
0,2 mm hhv. 0,4 mm i mådeligt aggressivt miljø.  
0,1 mm hhv. 0,2 mm i meget aggressivt miljø.

[4]: 0,40 mm i tør luft eller såfremt der anvendes en tæt overfladebeskyttelse.

0,30 mm i fugtig luft og i jord.

0,20 mm i forbindelse med optøningsmidler.

0,15 mm i havvand; hvor der forekommer sprøjt af havvand; ved gentagne opfugtninger og udtørringer.

0,10 mm i vandbeholdere.

[4] nævner som kommentar til disse angivelser, at det er vigtigt at bemærke, at værdierne ikke altid er pålidelige indikatorer for den korrosion og nedbrydning, der må forventes. Et stort dæklag må i visse omgivelser foretrækkes som korrosionsbeskyttelse, selv om det fører til større revnevidde i overfladen end et lille dæklag.

## Maksimal revnevidde w (efter DS 411).

$$w = 5 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_s \cdot \sqrt{a_w}$$

hvor w er maksimal revnevidde i mm.

$\sigma_s$  er spændingstilvæksten i MN/m<sup>2</sup>.

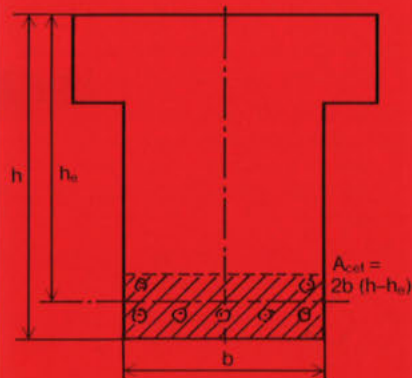
$a_w$  er revneparameter i mm beregnet efter formlen:

$$a_w = \frac{A_{cef}}{\Sigma d_w}$$

hvor  $A_{cef}$  er det aktive trækpåvirkede betontværsnit.

$\Sigma d_w$  er summen af armeringsstængernes revnebestemmende diameter  $d_w$  i trækzonen.

For et bøjningspåvirket tværsnit er  $A_{cef}$  det største betontværsnit, hvis tyngdepunkt falder sammen med trækarmringens tyngdepunkt, se hosstående figur.



## Eksempel

Beregn maksimal revnevidde for en simpel understøttet bjælke med følgende data:

Bredde  $b = 280$  mm

Totalhøjde  $h = 500$  mm

armering 6 stk. K20 med 4 i nederste lag og 2 i øverste.

Effektiv højde  $h_e = 443$  mm

Spændingstilvækst  $\sigma_s = 187$  MN/m<sup>2</sup>.

Herudfra beregnes:

$$A_{cef} = 2b(h-h_e) = 2 \cdot 280 \cdot 57 = 31920 \text{ mm}^2$$

$$\Sigma d_w = 6 \cdot 20 = 120 \text{ mm}$$

$$a_w = \frac{A_{cef}}{\Sigma d_w} = \frac{31920}{120} = 266 \text{ mm}$$

$$w = 5 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_s \cdot \sqrt{a_w} =$$

$$5 \cdot 10^{-5} \cdot 187 \cdot \sqrt{266} = 0,15 \text{ mm}$$

Skema 3. Maksimal revnevidde w beregnet efter formlen fra DS 411, 1973.

## Litteratur

- [1] »Beton-Bogen«, CtO 1979.
- [2] »Opståen af, og forholdsregler mod skadelige krakeleringer i betonelementers overflade«, Betonelement-Foreningen, maj 1973.
- [3] Parrot, L. J.: »Simplified methods of predicting the deformation of structural concrete«, C & CA development report 3, oktober 1979.
- [4] »Control of Cracking in Concrete Structures«, ACI Committee 224, Concrete International, oktober 1980.
- [5] Campbell-Allen, D.: »The reduction of cracking in concrete«, University of Sydney and C & CA of Australia, maj 1979.
- [6] Sørensen, E. V.: »Thermal Cracking« fra »Concrete at Early Ages« under publicering i Materials and Constructions.
- [7] Hansen, P. Freiesleben: »Hærdeteknologi 1-2«, Aalborg Portland 1978.
- [8] Browne, R. D.: »Thermal movement of concrete«, Concrete, november 1972.
- [9] Stark, D.: »Characteristics and Utilization of Coarse Aggregates Associated with D-cracking«. PCA, research and development bulletin RD 047.01P, 1976.
- [10] Nordisk Betonkomité: »Riktlinier för betongbestemmelser«, 1978.
- [11] »Temperaturdifferencer, overslagsformler«, Bkf-centralen, A4 ark, 1978.
- [12] »Cracking and deformation«, CEB Bulletin d'information No. 143, 1981.

