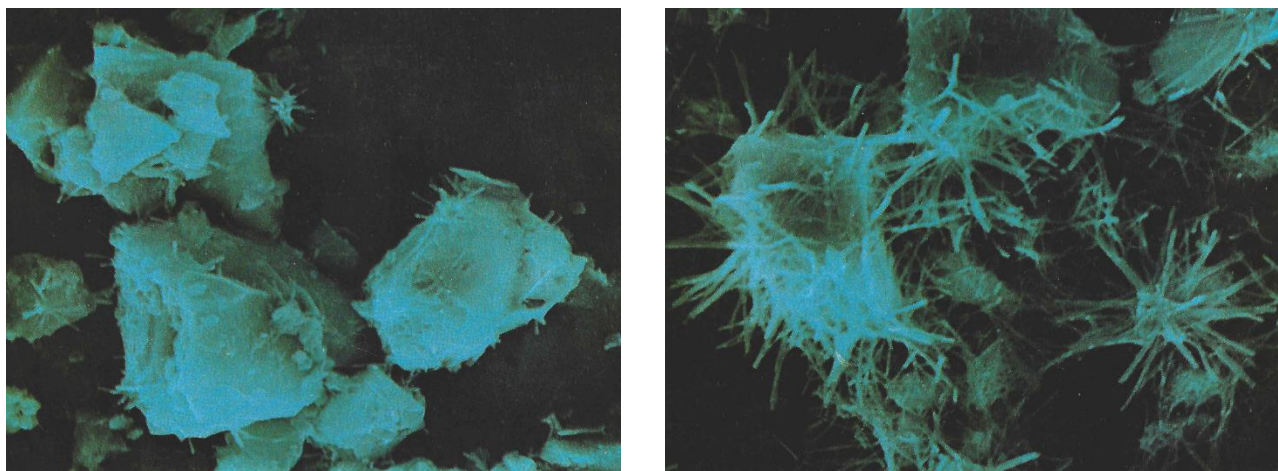


10.7 Volumenændringer forårsaget af hydratisering

Af Gitte Normann Munch-Petersen



Figur 1. Ved hydratiseringen reagerer cement med vand. Til venstre Rapid cement efter 5 minutters hydratisering og til højre efter 6 døgn. Der er dannet nåleformede calcium-silikathydrater. SEM i 3000x forstørrelse. Aalborg Portland, Beton-teknik, Portlandcementer.

For en forseglebeton vil hydratiseringsprocesserne medføre både en ydre volumenændring, som betegnes autogent svind, samt en dannelse af indre, tomme porer. Sidstnævnte indgår i begrebet kemisk svind. Udtrykket kemisk svind er dog problematisk, idet svind normalt opfattes som en reduktion af det ydre volumen, og det kemiske svind bidrager både til det autogene svind og til den indre poredannelse. Begrebet kemisk svind burde derfor udgå, men da det er dybt forankret som begreb inden for betontechnologi, både i Danmark og i udlandet, vil vi her fastholde det.

Begreberne plastisk svind, udtørringssvind og carbonatiseringssvind er behandlet i afsnit 10.4 Svind. I dette kapitel vil begreberne kemisk svind og autogent svind blive beskrevet.

10.7.1 Kemisk svind

Kemisk svind betegner de indre volumenændringer, der sker i forbindelse med den kemiske reaktion mellem cement og vand. "Kemisk svind" er således en følge af en kemisk proces, der primært medvirker til den indre strukturdannelse i betonen, men det er ikke en kemisk ændring i betonen, og "kemisk svind" falder derfor uden for svindbegrebet i henhold til ACIs definition – se afsnit 10.4 Svind.

Hydratiseringsprocessen starter, når vand tilsættes cement. Da hydratiseringsprodukterne har mindre volumen end volumen af tilsat cement (faststof) og vand, sker der en dannelse af indre, tomme porer i betonen (hvis betonen holdes forseglebet) eller betonen vil opsuge vand fra omgivelserne som fylder disse tomme porer. Det kemiske svind udgør de dannede, tomme porer, eller det opsugede vand. Det kemiske svind fortsætter så længe, der finder hydratisering sted.

Det kemiske svind skyldes:

- Kemisk binding af vandet i hydratiseringsprodukter
- Fysisk adsorption af vand på overfladen af de dannede reaktionsprodukter.

Begyndelsesvolumenet af cementpastaen, V_0 , er givet ved:

$$V_0 = V_{c,0} + V_{w,0}$$

Hvor

$V_{c,0}$ begyndelsesvolumen af cement

$V_{w,0}$ begyndelsesvolumen af vand

Under hydratisering formindskes volumenet løbende. Det aktuelle volumen af cementpastaen, V_t er givet ved:

$$V_t = V_{c,t} + V_{w,t} + V_{h,t}$$

Hvor

$V_{c,t}$ volumen af uhydratiseret cement til tiden t

$V_{w,t}$ volumen af frit vand til tiden t

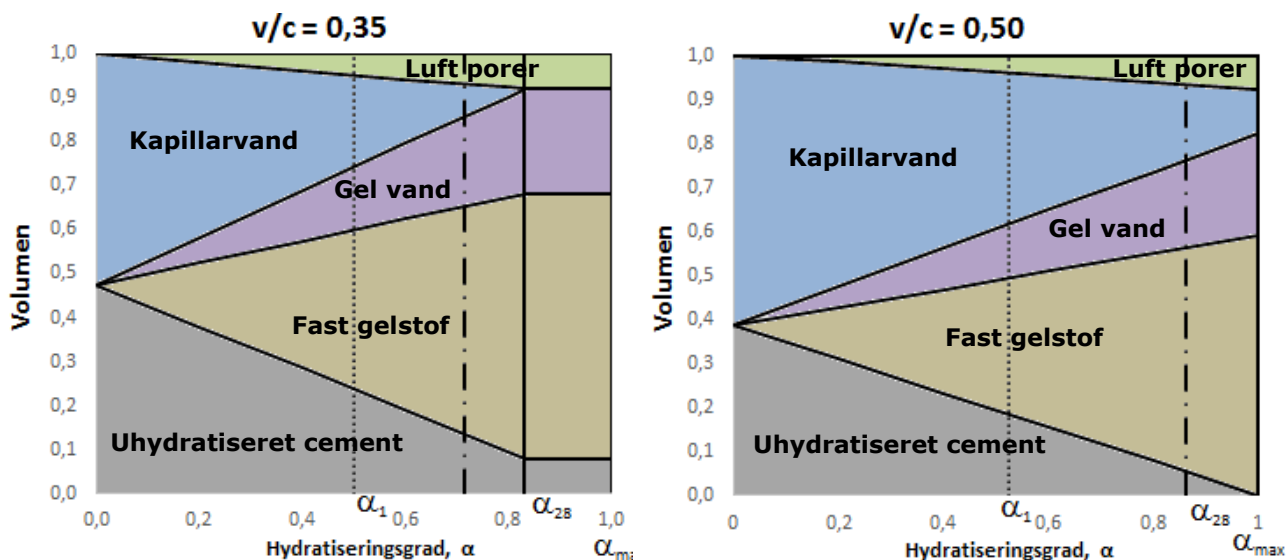
$V_{h,t}$ volumen af hydratiseringsprodukt til tiden t (fast gelstof + gelvand)

Kemisk svind er den relative volumenreduktion, ε_k . Den relative volumenreduktion til tiden t er givet ved:

$$\varepsilon_{k,t} = \frac{V_{c,t} + V_{w,t} + V_{h,t}}{V_{c,0} + V_{w,0}}$$

Normalt regnes kemisk svind i forhold til den oprindelige cementmængde, fx med enheden ml/100 g cement. Det kemiske svind medfører, at betonens totalvolumen og absolutte faststofvolumen formindskes. Ved afbindings start vil der primært ske en ændring af det ydre volumen, men i afbindingsperioden dannes luftfyldte porer i betonens mikrostruktur, hvorved betonens porøsitet stiger. Disse porer må ikke forveksles med de luftporer, der indblandes i betonen ved hjælp af et luftindblandingsmiddel for at sikre frostbestandigheden, se afsnit 19.4.

I Figur 2 ses det kemiske svind, angivet som mængden af luftporer i betonen. Det ses, at mængden af luftporer, og dermed det kemiske svind, er størst ved lave v/c-forhold. Til gengæld er der en større mængde kapillarvand i overskud, når v/c-forholdet er højt. Dette betyder, at der er større potentiale for, at der kan udvikles udtørringssvind.



Figur 2. Volumen af cement, vand samt hydratiseringsprodukter ved to forskellige v/c-forhold.

Hvis man ønsker at bestemme mængden af hydratiseringsprodukterne i forhold til hydratiseringsgraden, kan man anvende Power's model:

Kemisk svind (luftporer): $V_{cs} = 0,64 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_c (1-p) \alpha$

Kapillarvand: $V_{cw} = p - (0,19 + 0,23) \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) (1-p) \alpha$

Gelvand: $V_{gw} = 0,19 \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) (1-p) \alpha$

Fast gelstof: $V_{gs} = \left(1 - 6,4 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_c + 0,23 \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) \right) (1-p) \alpha$

Uhydratiseret cement: $V_{uc} = (1-p)(1-\alpha)$

Porøsitet ved $\alpha = 0$: $p = \frac{\left(\frac{w}{c} \right)}{\left(\frac{w}{c} \right) + \left(\frac{\rho_w}{\rho_c} \right)}$

Hydratiseringsgraden er forholdet mellem den hydratiserede cementmængde og den oprindelige cementmængde:

$$\alpha = \frac{m_{\text{hydratiseret cement}}}{m_{\text{oprindelig cement}}}$$

For $v/c < 0,42$ vil kapillarvandet være opbrugt før hele den oprindelige masse af cement er omsat. Dette betyder, at der vil være uhydratiseret cement i den hærdnede beton og at hydratiseringsgraden derfor vil være mindre end 1. Den maksimale hydratiseringsgrad vil være:

$$\alpha_{maks} = \frac{p}{(0,19 + 0,23) \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} \right) (1 - p)}$$

Powers model medtager kun cementreaktioner. Tilsætningsstoffer som flyveaske og mikrosilica vil også påvirke svindet, idet de reagerer med cementens reaktionsprodukter under hydratiseringen.

10.7.2 Bestemmelse af kemisk svind ved forsøg

Den kemiske reaktion mellem cement og vand medfører et svind i cementpastaen. Dette svind medfører, at cementpastaen kan optage vand fra omgivelserne hvis der er adgang til vand. Tidligt i hydratiseringsprocessen (hvor der er overskud af vand) er denne vandoptagelse direkte proportional med hydratiseringsgraden.

Det kemiske svind kan derfor måles ved at blande en cementpasta og lægge den i et lille glas i 5-10 mm højde, og derefter fyldes glasset helt med afluftet vand og lukkes med en korkprop med et målerør i midten, som tættes med paraffinolie, så det vand, der er i målerøret, ikke kan fordampe. Derefter aflæses væskens højde i målerøret løbende i løbet af det første døgn.

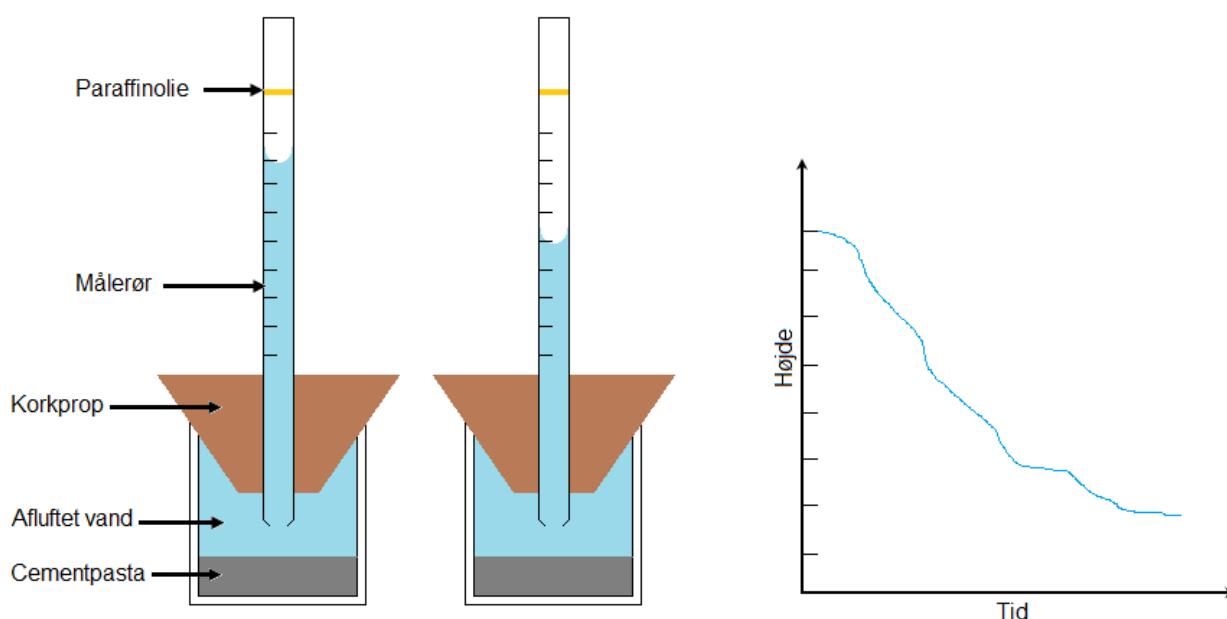
Det kemiske svind bestemmes som den målte mængde af absorberet vand pr. gram cement i cementpastaen:

$$CS_{(t)} = \frac{h_{(t)} - h_{(60 \text{ min})}}{M_{\text{cement}}}$$

Hvor:

$CS_{(t)}$ kemisk svind til tiden t [ml/g_{cement}]
 $H_{(t)}$ vandhøjden i målerøret til tiden t [ml]

Metoden er beskrevet i ASTM C 1608 [1], og vist på Figur 3.

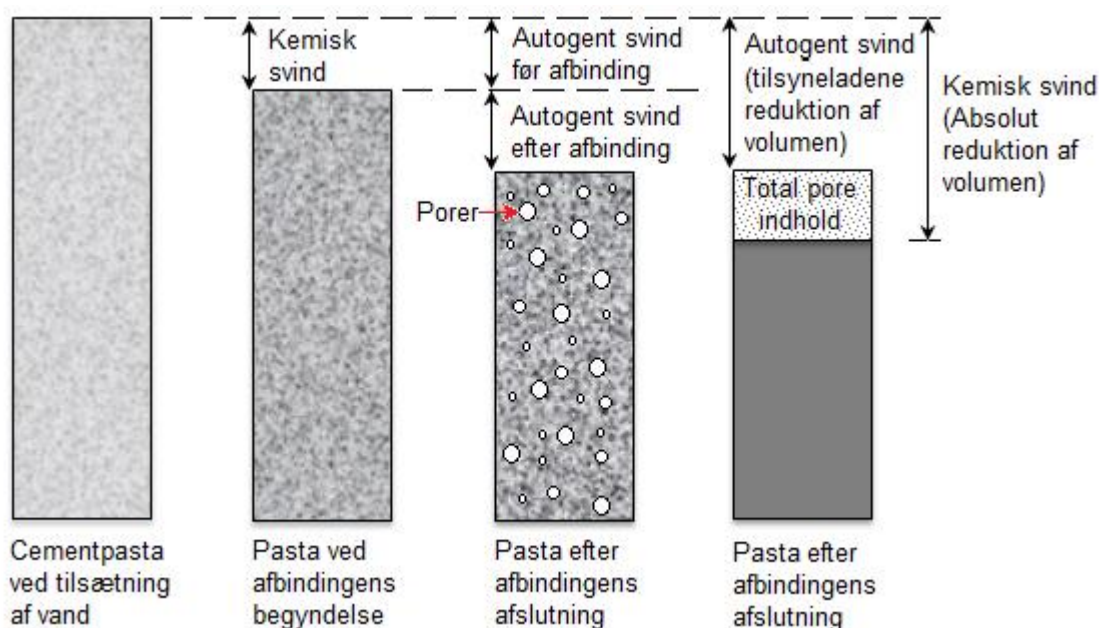


Figur 3. Måling af kemisk svind. Stighøjden i røret kan bruges til at beregne, hvor meget vand der absorberes i cementpastaen.

10.7.3 Autogent svind

Autogen betyder selvgenererende. Vi vil her definere et autogent system som et system, der ikke er påvirket af ydre kræfter, ikke kan udveksle stoffer med omgivelserne (lukket system), og som befinder sig ved en konstant temperatur (isotermt). Autogent svind er den ydre deformationsændring i et autogent system. Det er i princippet mere korrekt at anvende udtrykket autogen deformation, idet nogle autogene reaktioner medfører svind og andre svelning. Da autogent svind er et almindeligt anvendt begreb inden for betontechnologi, vil vi også her anvende dette begreb.

Autogent svind skyldes kemiske reaktioner i betonen. Det er kun en del af det kemiske svind, der bidrager til det autogene svind, dvs. at det medfører en ydre deformationsændring. Efter afbinding vil det kemiske svind i cementpastaen kun delvist omsættes til et autogent svind, og kun hvis betonen ikke frit opsuger vand under hydratiseringen; hvis der er fri vandadgang, vil det kemiske svind ikke give anledning til autogent svind. I Figur 4 ses opdelingen mellem kemisk svind og autogent svind.



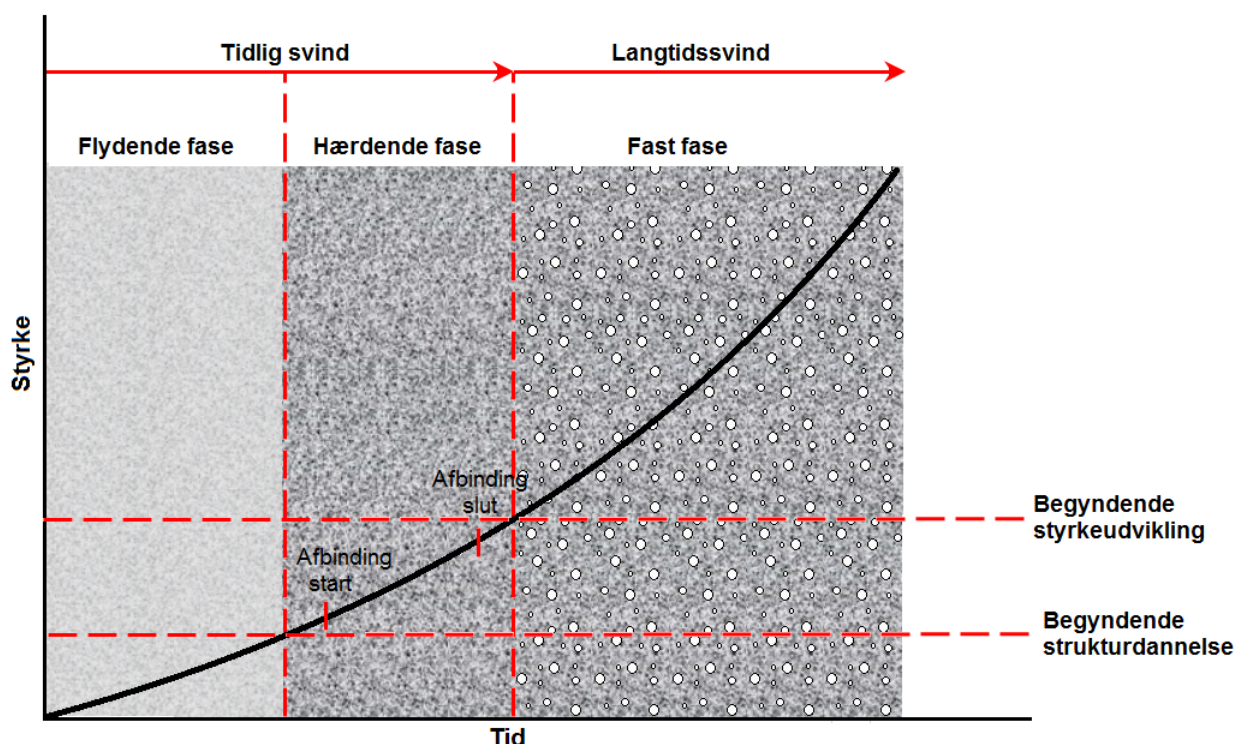
Figur 4. Volumenændringer forårsaget af kemisk svind og autogent svind (Ikke målfast).

Det autogene svind opdeles typisk i tidligt svind og langtidssvind. For beton med normal styrke (< 40 MPa) vil størstedelen af det autogene svind ske i den friske beton og inden betonen har dannet en fast struktur. Det autogene langtidssvind er normalt ikke særligt stort i normalstyrkebeton. For højstyrke beton (> 40 MPa) vil det autogene svind fortsætte, efter at betonen har fået en fast struktur, og det autogene langtidssvind er for disse betontyper en egenskab, som er vigtig at forholde sig til. Grænsen mellem autogent korttidssvind og langtidssvind ligger for normal styrke beton på ca. 24 timer, mens det for højstyrkebeton ligger på ca. 12 timer.

Korttidssvindet sker i den flydende og hærdende fase, mens langtidssvindet sker i den faste fase, hvor betonen begynder at udvikle styrke. Der er naturligvis stor forskel på, hvordan svindet påvirker betonen, før og efter at den har opnået styrke. I Figur 5 er sammenhængen mellem betonens faser og tidlig- og langtidssvind vist.

I den flydende fase er der endnu ikke dannet en sammenhængende struktur, og derfor vil enhver tilført spænding medføre at komponenterne vil flytte sig i forhold til hinanden. I den hærdende fase vil strukturdannelsen begynde, men betonen vil stadig ikke have opnået nogen trækstyrke af betydning. Når vandet reagerer med cementpastaen, vil det give interne kapillarspændinger, som vil medføre en udvendig volumenændring. Dette betyder, at i den tidlige fase vil det autogene svind og det kemiske svind stort set være lige store.

I den hærdnende fase begynder der at dannes en fast struktur i cementpastaen. I starten af perioden bidrager det kemiske svind kun til det ydre svind, men sidst i fasen vil en stadig større andel af svindet bidrage til det indre svind – altså strukturdannelsen.



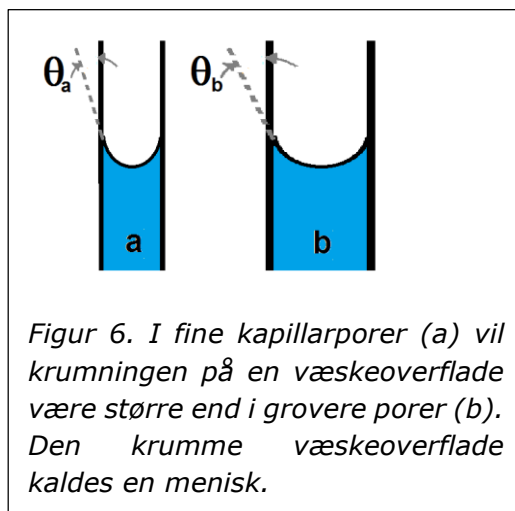
Figur 5. Faser i tidlig svind og langtidssvind (ikke målfast).

I den faste fase vil der stadigvæk ske et svind i cementpastaen, men da betonen nu er ved at udvikle en fast struktur og styrke, vil størstedelen af svindet medføre en udvikling af den indvendige porestruktur, og det kemiske svind vil udgøre en mindre og mindre del af det autogene svind.

Det kemiske svind kan i denne fase også give sig til kende som selvudtørring. Selvudtørring skyldes lokal udtørring pga. fald i den relative fugtighed i cementpastaen. Udtørringen skyldes, at cementen reagerer med vandet under hydratiseringen. Denne selvudtørring sker først og fremmest ved lave v/c -forhold ($< 0,42$), hvor der ikke er tilstrækkelig frit vand til stede til, at der kan ske fuld hydratisering. Samtidig er porestrukturen finere i cementpasta med lavt v/c -forhold, hvilket giver mindre kapillarporer og dermed større krumning af overfladen, end der ses ved højt v/c -forhold. Kapillarsugningskræfterne er en funktion af radius og krumningen af menisken, og sammenhængen kan ses i Young-Laplace ligningen:

$$s = \frac{2\sigma}{r}$$

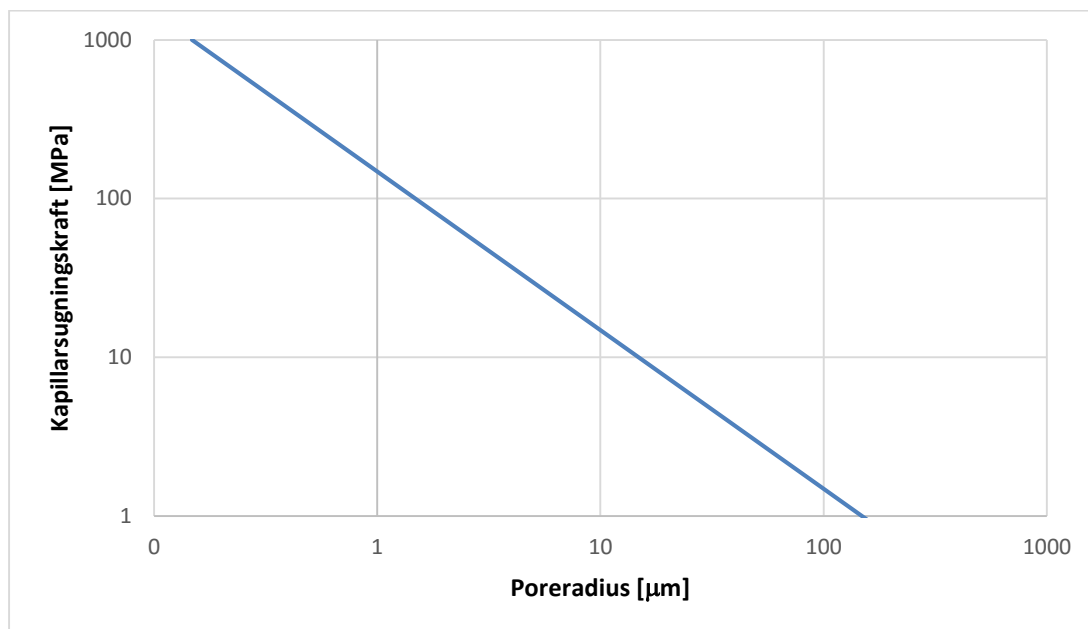
Hvor:



Figur 6. I fine kapillarporer (a) vil krumningen på en væskeoverflade være større end i grovere porer (b). Den krumme væskeoverflade kaldes en menisk.

- s kapillarsugningskraft [Pa]
 σ overfladespænding over grænsefladen mellem luft og vand ($\sim 0,074$ N/m)
 r meniskenradius [m]

Sammenhængen er optegnet i Figur 7.



Figur 7. Sammenhæng mellem kapillarsugningskraft og poreradius i kapillarporer, givet ved Young-Laplace ligningen.

Et lavere v/c-forhold giver en finere porestruktur, og dermed øgede kapillarsugningskræfter.

Den relative fugtighed i kapillarporerne har også indflydelse på kapillarsugningskræfterne. Væsken i kapillarporerne vil være i ligevægt med den relative fugtighed i poren. Hvis den relative fugtighed falder, vil der fordampe vand fra overfladen, indtil der igen er opnået ligevægt. Omvendt vil der kondensere vand på overfladen, hvis RH stiger. Kapillarsugningskræfterne medfører, at den omgivende matrix af hydratiseringsprodukter komprimeres, hvilket medfører autogent svind, som kan forekomme både som tidligt og sent svind. Sammenhængen mellem porediameter og den relative fugtighed er givet ved Kelvins ligning:

$$\ln \phi = -\frac{2\sigma M}{rRT\rho}$$

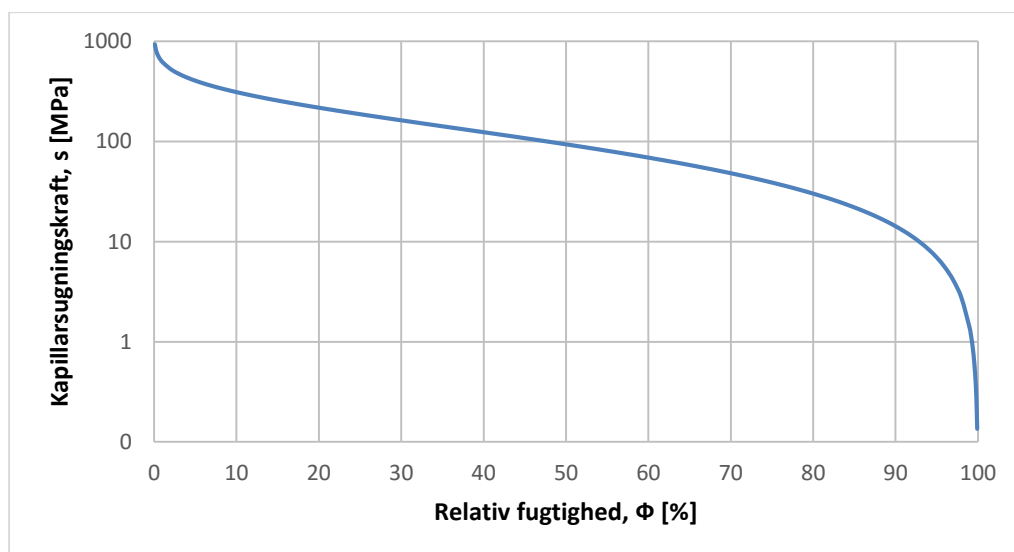
Hvor:

- Φ relativ fugtighed [-]
 M molær vægt af vand (18 g/mol)
 ρ densitet af vand (998 kg/m³, v. 20 °C)
 R gaskonstant (8,314 J/mol·K)
 T temperatur (293,15 K = 20 °C)

Hvis Young–Laplace ligningen indsættes i Kelvins ligning, fås sammenhængen mellem kapillarsugningskræfter og den relative fugtighed:

$$\ln \phi = \frac{sM}{RT\rho}$$

Sammenhængen er optegnet i Figur 8. På figuren ses, det at der sker en kraftig stigning af kapillarsugningskræfterne, når betonen tørrer ud.



Figur 8. Relation mellem relativ fugtighed og kapillarsugningskraften, givet ved Young–Laplace ligningen og Kelvins ligning.

10.7.4 Bestemmelse af autogent svind

Autogent svind kan bestemmes efter en metode fra Teknologisk Institut, der hedder TI-B 102 "Tøjninger fra krybning og svind i tidlig alder" [2].

Efter metoden udstøbes 3 emner i plastrør cirka 130 x 700 mm. Plastrørene sikrer, at der ikke kan udveksles fugt med omgivelserne, således at det er det autogene svind, der måles.

Tre emner udsættes for svind og tre emner udsættes for svind og krybning (se afsnit 8.5). Over de midterste 500 mm måles deformationer fra tidspunktet for betonens afbinding.

Svindet måles ved at måle sammenhørende værdier af tid, deformationer og temperaturer i prøveemnerne. Svindtøjningen i hvert emne beregnes som:

$$\varepsilon_{s,n}(M) = \varepsilon_{m,s,n}(M) + \alpha_c (\theta_c(M) - \theta_c(M_0))$$

Hvor:

$\varepsilon_{s,n}(M)$	svindtøjning i emne nr. n til modenheten M, positiv som kontraktion [m/m]
$\varepsilon_{m,s,n}(M)$	betontøjning i svindemne nr. n til modenheten, positiv som kontraktion [m/m]
α_c	betonens temperaturudvidelseskoefficient [K^{-1}]
$\theta_c(M)$	betontemperatur til modenheten M [K]
$\theta_c(M_0)$	betontemperatur til modenheten M_0 [K]

Herefter kan svindtøjningen, $\varepsilon_s(M)$ bestemmes som middel af svindtøjningerne på de enkelte emner.



Figur 9. Opstilling til måling af autogent svind og krybning efter TI-B 102. Der måles autogent svind på tre emner og krybning på tre emner. Der måles fra betonens afbindingstidspunkt. Betonen udstøbes i plastrør, som sikrer, at der ikke kan udveksles vand med omgivelserne.

10.7.5 Faktorer der har indflydelse på det kemiske og autogene svind

Cementtype

Det kemiske svinds størrelse afhænger af cementens sammensætning og kan beregnes støkiometrisk. Svindets størrelse vil variere for forskellige cementtyper, idet klinkersammensætningen er forskellig.

De fire primære klinkemineraler reagerer og svinder iht. Tabel 1. Det samlede kemiske svind ligger typisk omkring 7,4 %, men denne værdi varierer for forskellige cementtyper, idet disse har forskellig sammensætning af klinkemineralerne.

Tabel 1. Klinkeminerallernes bidrag til kemisk svind.

Klinkeminerale	Ligevægtsligning	Svind [ml/g]
C ₃ S	$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$	~5,2
C ₂ S	$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$	~3,7
C ₃ A	$C_3A + \bar{C}SH_2 + 10H \rightarrow C_3A \cdot 3\bar{C}S \cdot H_{12}$	~13
C ₃ A	$C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6$	~18
C ₄ AF	$C_4AF + 2CH + 10H \rightarrow C_3AH_6 + C_3FH_6$	~17

Det skal bemærkes, at det faktisk målte kemiske svind kan afvige lidt fra de beregnede værdier. Dette skyldes dels, at det ikke er alle reaktioner, der forløber til fuldstændig ligevægt, dels at der forløber flere reaktioner end ovenfor medtaget.

Det ses, at C₃A og C₄AF bidrager mest til det kemiske svind. Selvom disse to klinkemineraler kun udgør ca. 15 % af klinkesammensætningen, vil det kemiske svind stadig være målbart mindre i beton med lavt aluminatindhold.

Betonsammensætning

Da det er cementpastaen, der svinder, vil en beton med højt pastaindhold svinde mere end en beton med lavt pastaindhold. Ønsker man at minimere kemisk og autogent svind, må man vælge en beton med et lavt pastaindhold og med et højt indhold af velgraderet tilslag. Da der skal anvendes et højere pastaindhold i SCC-beton end i sætmålsbeton, vil dette betyde, at en SCC-beton svinder mere end en tilsvarende sætmålsbeton.

Det kemiske svind påvirkes af puzzolaner som flyveaske og mikrosilica. Puzzolaner reagerer med calciumhydroxid, dannet ved hydratisering mellem vand og cement, og puzzolanreaktionerne er derfor forsinkede i forhold til reaktionen af cementklinker. Det kemiske svind fra puzzolanreaktionerne vil derfor ske i den hærdnende fase, og vil derfor primært bidrage til den indre strukturdannelse, men ikke til det autogene svind. Den indre strukturdannelse vil dels påvirkes af puzzolanreaktionen, som bidrager til svindet, og dels af, at nogle puzzolaner (mikrosilica og højovns slagge) er finere end cementen, og derfor vil give en tættere struktur. Den fine porestruktur betyder, at tilsætninger af puzzolaner bidrager ekstra til selvudtørringssvindet, og dermed også bidrager til det sene autogene svind. Tilsætninger uden puzzolaneffekt vil ligeledes bidrage til en finere porestruktur, og vil dermed også kunne medføre selvudtørringssvind.

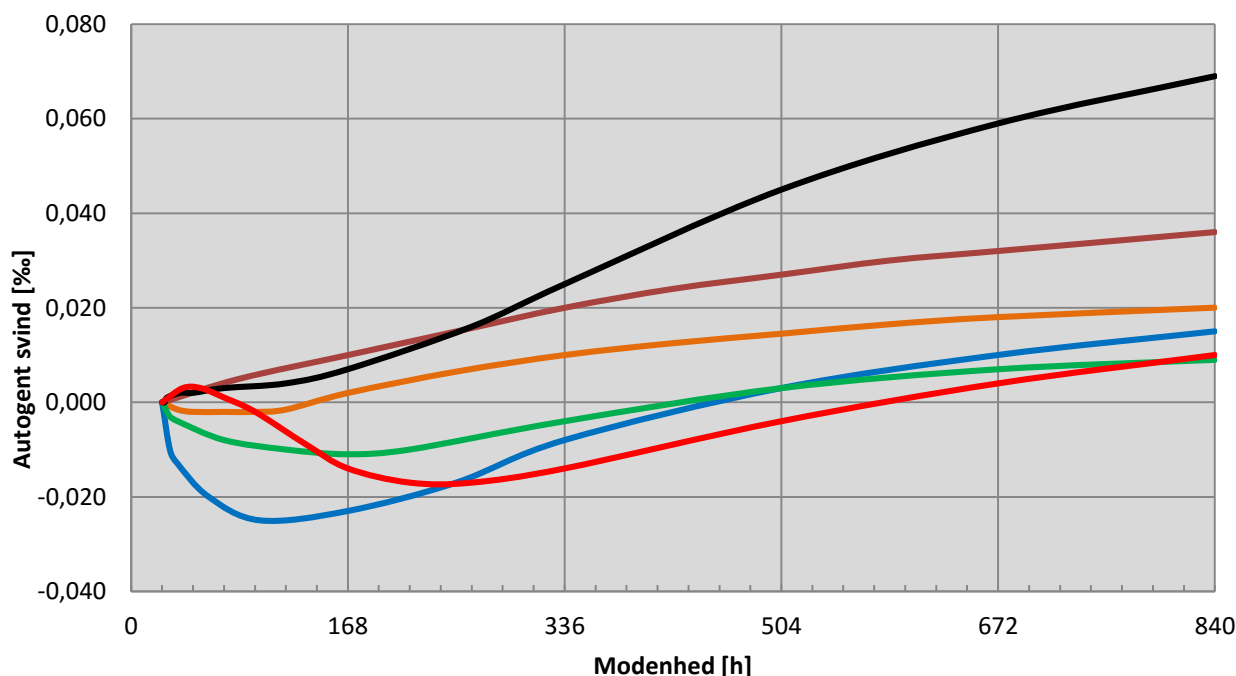
I normalstyrkebeton har v/c-forholdet stort set ingen indflydelse på det kemiske svind. For højstyrkebeton med lavt v/c-forhold (< ca. 0,42) vil der ikke være nok vand til stede til, at alt cementen kan hydratisere. Der dannes derfor mindre cementpasta, hvilket medfører, at det kemiske svind falder. Omvendt forholder det sig med autogent svind. Ved lave v/c-forhold vil det autogene svind stige, da porestrukturen bliver finere, jo

lavere v/c-forholdet bliver. Den fine porestruktur giver højere selvudtørringssvind. Ved høje v/c-forhold vil det autogene svind falde kraftigt i rene cementbetoner.

I højstyrkebeton kan der stort set ikke trænge vand ind i betonen udefra pga. den lave porøsitet. Dette betyder, at betonens fugtindhold vil være lige stort i hele tværsnittet, og dermed vil der ikke være variation på størrelsen af selvudtørringssvindet – og dermed det autogene svind. Bemærk, at det forholder sig omvendt med udtørringssvind, hvor der afgives fugt til omgivelserne, idet svindet vil være størst ved betonoverfladen

Hydratiseringsgraden har stor indflydelse på svindets størrelse. Da de forskellige klinkermineraller reagerer på forskellige tidspunkter, vil størrelsen af det kemiske svind afhænge af cementens sammensætning. Højstyrkebeton med lavt v/c-forhold vil ikke hydratisere fuldt ud, da der ikke er vand nok tilstede. Selvudtørring vil derfor starte ved en lavere hydratiseringsgrad, jo lavere v/c-forholdet er.

I Figur 10 er vist eksempler på autogent svind målt på betoner til store anlægskonstruktioner. Det ses, at der er meget stor forskel på det autogene svind for de forskellige betoner, selv om de stort set opfylder de samme krav. Dette betyder, at det autogene svind ved valg af den rette beton kan minimeres. Det er i dag ikke muligt at forudsige det autogene svind ud fra betonrecepten. Det vil derfor være nødvendigt at undersøge det autogene svind for betoner, anvendt til konstruktioner, hvor det er vigtigt at minimere revner, fx i forbindelse med krav til vandtæthed.



Figur 10. Eksempler på autogen svind i forskellige betoner. De viste svindforløb er fra 24 timer efter udstøbning og frem. Det ses, at der kan være meget stor forskel på svindforløbet, selvom alle de viste betoner er anvendt i forbindelse med store anlægskonstruktioner med ret enslydende krav til betonen.

10.7.6 Tilsætningsstoffer til forebyggelse af kemisk og autogent svind

Der findes forskellige tilsætningsstoffer, der kan anvendes til at nedsætte kemisk og autogent svind. Tilsætningsstofferne kan inddeles i to grupper, nemlig tilsætningsstoffer som nedbringer svindet, og tilsætningsstoffer som kompenserer for svindet, ved at danne ekspansive reaktioner i betonen, der modsvarer svindet. Inden man anvender et svindreducerende tilsætningsstof, er det vigtigt, at man ved hvilken type svind, man vil reducere.

Man kan fx nedsætte udtørringssvindet ved at anvende plastificerende tilsætningsstoffer, så man kan anvende mindre vand, og derved opnå et lavere v/c-forhold. Her skal man dog være opmærksom på, at v/c-forholde under 0,42, vil medføre risiko for selvudtørringssvind. Er der behov for luftindblanding for at opnå frostsikkerhed, skal man desuden være opmærksom på, at svindreducerende tilsætningsstoffer nedsætter virkningen af luftindblandingsmidler.

Superabsorberende polymerer, SAP, kan anvendes til at nedbringe selvudtørringssvindet i beton med lavt v/c-forhold (0,20-0,35). Polymererne kan opsuge mange gange deres eget volumen, og er også kendt for deres anvendelse i fx bleer. I beton vil det absorberede vand frigives i forbindelse med selvudtørring, og forhindrer at selvudtørringen medfører svind. Polymererne medfører en højere porøsitet. Hvis polymererne fx øger v/c-forholdet med 0,05, så må en beton med v/c = 0,30 uden polymerer efter tilsætning af polymerer få et v/c-forhold på $0,30 + 0,05 = 0,35$. Betonstrukturen rundt om makroporer, der er dannet af SAP, er væsentligt tættere end for en beton på 0,35, og derfor påvirker tilsætning af SAP (sandsynligvis) ikke betonens tæthed og dermed holdbarhed.

10.7.7 Praktisk anvendelse

I nogle konstruktioner kan det have uheldige konsekvenser, hvis der opstår revner i betonen, eller hvis det ydre tværsnit svinder ind. Fx vil man ikke acceptere revnedannelse i en vandtæt konstruktion. Æstetisk er revnede konstruktioner naturligvis normalt uønskede, og synlige revner kan derfor sjældent accepteres på synlige overflader.

I forbindelse med store anlægskonstruktioner som fx Storebæltsbroen, Øresundsbroen, Malmø City Tunnel og Metroen i København, er der stillet krav om, at der skal udføres hærdeberegninger af spændinger og temperaturer som led i planlægningen af støbeprocessen. I sådanne beregninger indgår autogent svind og krybning for de aktuelle betoner. Udtørringssvind er af mindre betydning her, fordi konstruktionerne er så massive, at overfladen er meget lille i forhold til det samlede volumen.

En meget relevant konstruktion i denne sammenhæng, er tykke (omkring 80-100 cm) vægge udstøbt på fundament. Her kan det autogene svind sammen med temperaturspændinger være årsag til, at der opstår revner. Fundamentet er ofte støbt flere uger før væggene støbes. Det betyder, at en væg efter sammenstøbningen med fundamentet svinder væsentlig mere end fundamentet, da en altovervejende del af det

autogene svind i fundamentet er indtrådt ved støbning af væggen. Forskellen i autogen svind for væg og fundament giver (samtidigt med temperaturdifferenser) anledning til, at der opstår trækspændinger i væggen med deraf følgende risiko for revnedannelser.

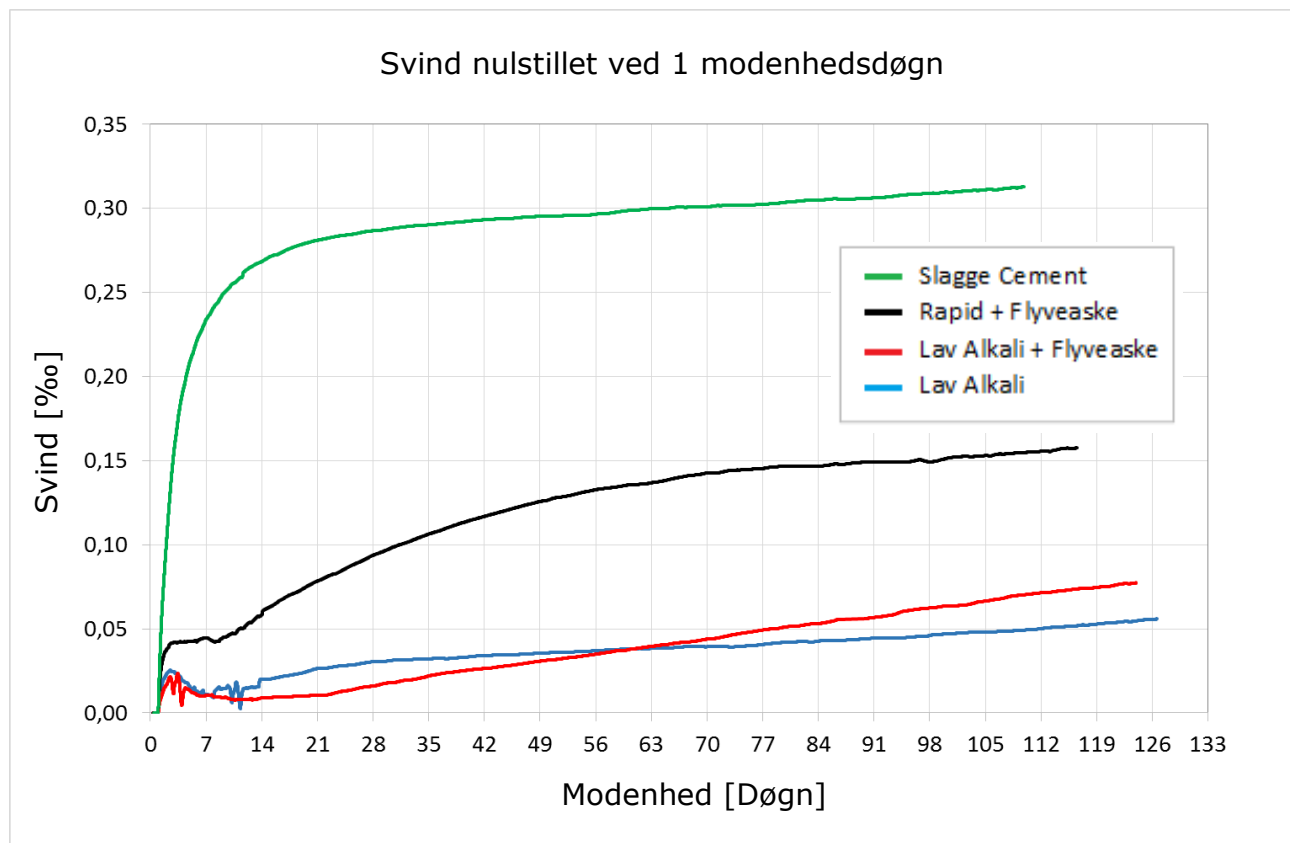
Eksempel på måling af sen svind

Autogent svind målt for fire betontyper med $v/c = 0,40$ og et pastaindhold på 27 %:

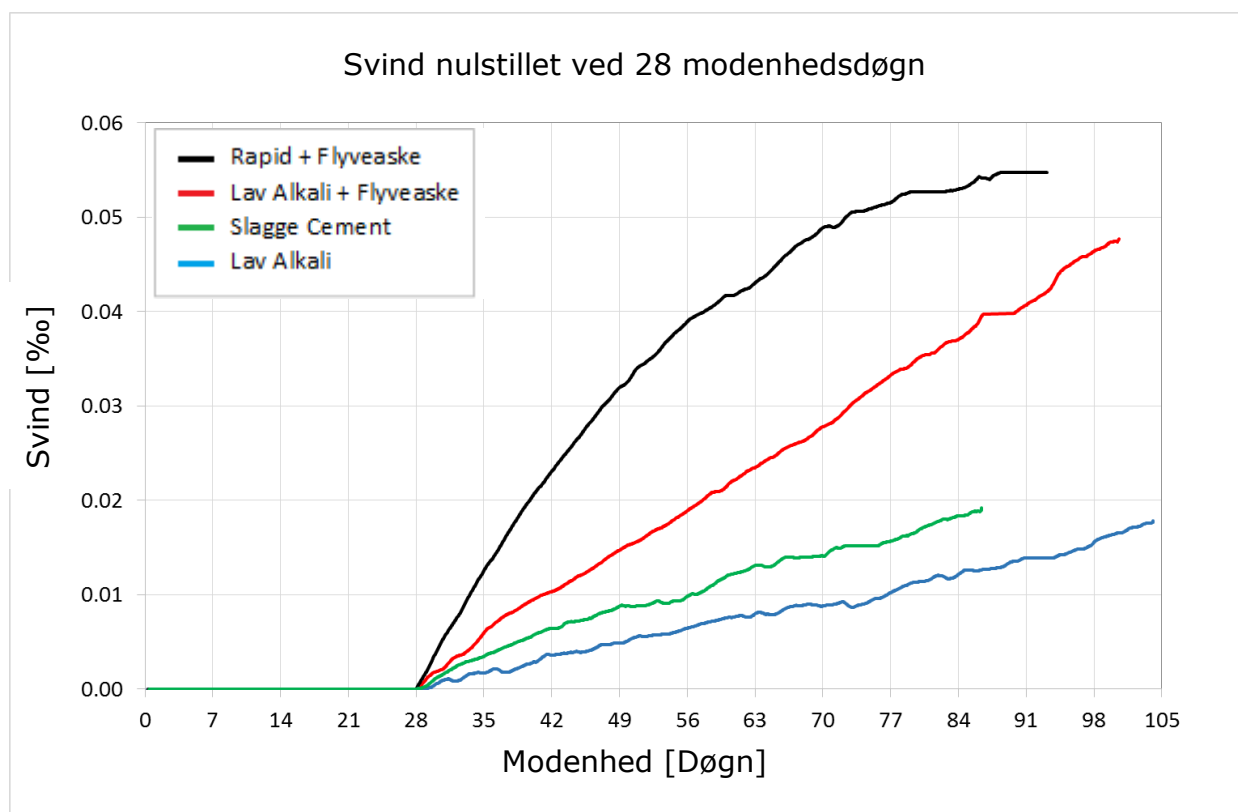
- A Lavalkali (100 % lavalkali cement (CEM I 42,5 N))
- B Lavalkali+FA (75 % lavalkali cement (CEM I 42,5 N) + 25 % flyveaske)
- D Rapid+FA (75 % RAPID cement (CEM I 52,5 N) + 25 % flyveaske)
- E Slagge (100 % slaggecement)

Resultaterne er vist på Figur 11 og 12. Det ses, at der er stor forskel på det sene autogene svind for beton med forskellig cementtype og flyveaskeindhold. På Figur 11 er det autogene svind målt fra 24 timer. Generelt giver lavalkalicementen det laveste svind, mens slaggecementen giver et meget højere svind. Af Figur 12 ses det, at flyveaskens bidrag til det autogene svind først bliver tydeligt efter 28 døgn, hvilket skyldes den forsinkede puzzolanreaktion. Det er derfor vigtigt at måle det autogene svind i en længere periode, hvis man vil kunne lave en fornuftig sammenligning af det samlede svind.

Hvis betonen er fastholdt, således at svindet ikke kan forløbe frit, kan svindet medføre en indre spænding i betonen, som kan give revner, hvis betonens trækstyrke overskrides. De indre spændinger fra svindet, kan bidrage til at trækstyrken overskrides (med deraf følgende revnedannelse), hvis der tilføres yderligere spændinger, fx fra termiske bevægelser eller fra ydre belastning.



Figur 11. Autogent svind, målt fra 24 timer.



Figur 12. Autogent svind, målt fra 28 døgn.

10.7.8 Referencer

- [1] *C 1608 Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste*, ASTM International.
- [2] *TI-B 102 Prøvningsmetode. Beton. Tøjninger fra krybning og svind i tidlig alder*, Teknologisk Institut.