

## 5.2 Luftindhold i frisk beton

Af Martin Kaasgaard, Lars Nyholm Thrane og Claus Pade



Figur 1. Pressuremeter til måling af luftindhold i frisk beton. Betonen kompakteres i beholderen, låget sættes på, og en detaljeret måleprocedure gennemføres. Herefter kan luftindholdet i betonen aflæses på måleuret.

Friskblandet beton indeholder altid 1-2 % "naturlig luft", som består af relativt store irregulære luftporer. Ved anvendelse af et luftindblandingsmiddel tilsat under blandeprocessen, kan der skabes "indblandet luft", som er små runde luftporer. Det totale luftindhold i en luftindblandet beton er typisk mellem 5 og 8 %. Formålet med at anvende luftindblanding i beton er primært at gøre betonen frostbestandig.

Den præcise mekanisme, der gør luftindblandet beton frostbestandig, er ikke endeligt afklaret, men det er sikkert, at luftindblanding virker mod frostangreb. Det formodes, at luftporerne aflaster det tryk, der skabes, når vandet fryser i betonen. Herigennem undgås frostsprængning og afskalning af betonen. Det er væsentligt, at den indblandede luft består af relativt små og velfordelte luftporer, og at dette luftporesystem ikke ødelægges under transport og udstøbning af betonen.

Se kapitel 19.4 Frostangreb, hvor teori og viden om frostangreb beskrives.

Udover at forbedre frostbestandigheden af den hærtnede beton har luftindblanding også indflydelse på den friske beton. Luftindblanding gør betonen lettere udstøbelig ved

at reducere viskositeten og kan i mange tilfælde give beton, der er mere robust over for separation og bleeding. Derfor vil man ofte også anvende luftindblanding i beton, der ikke nødvendigvis skal være frostbestandig – fx indendørs beton. Desuden kan betonproducenten spare penge på at indblende luft, fordi luft er billigere end både cementpasta og tilslag.

### 5.2.1 Måling og karakterisering af luft i frisk beton

Luftindhold i den friske beton måles typisk ved anvendelse af et pressuremeter. Et pressuremeter består af en beholder med kendt volumen (typisk 8 liter) til betonen, samt et låg med luftkammer og manometer (se Figur 1).

Ideen i et pressuremeter er at måle luftindholdet ved at måle betonens sammentrykkelighed. Hvis luftindholdet er nul, er betonen i praksis usammentrykkelig, mens hvis betonen indeholder en delmængde luft, er betonen lidt sammentrykkelig. I pressuremeteret måles betonens sammentrykkelighed og værdien herfor omsættes direkte til luftindhold på en særligt måleur. Prøvningsmetoden er standardiseret med betegnelsen DS/EN 12350-7.

Prøvningen gennemføres ved, at den friske beton fyldes i beholderen og komprimeres. Låget sættes på beholderen og der fyldes vand på for at fjerne luftvolumenet mellem låg og beton. Luftkammeret pumpes op til et bestemt overtryk, og der åbnes for en ventil. Derved vil betonen blive sammenpresset og manometeret viser luftindholdet baseret på trykfaldet.

Samtidig med bestemmelse af luftindhold, kan denne metode også anvendes til bestemmelse af densiteten af betonen. Da beholderen har et kendt volumen (og vægt) skal den fyldte beholder blot vejes, hvorefter densiteten kan beregnes. Luftindholdet kan i princippet også beregnes ud fra densiteten, hvis densitet og dosering af alle delmaterialer kendes. Det vil sige, at en lav densitet svarer til et højt luftindhold – alt andet lige.

Det er væsentligt for opnåelse af god frostbestandighed, at luftporerne er små og velfordelte i betonen. For at teste om dette er tilfældet, kan man lave en luftporeanalyse, hvor luftporesystemet karakteriseres ved bestemmelse af parametrene luftindhold, specifik overflade og afstandsfaktor.

Den specifikke overflade er et mål for luftporernes størrelse og beregnes som den samlede overflade af luftporerne i forhold til deres rumfang (enheden er  $\text{mm}^{-1}$ ). Typisk skal den specifikke overflade være større end  $25 \text{ mm}^{-1}$  for at frostbestandigheden er i orden.

Det er dog den afledte værdi, afstandsfaktoren, der normalt stilles krav til. Afstandsfaktoren er en fiktiv parameter og defineres som den største afstand fra et punkt i pastaen til den nærmeste luftporeoverflade. Jo større specifik overflade og/eller jo højere luftindhold, jo mindre afstandsfaktor. Kravet i henhold til DS/EN 206 DK NA

er, at afstandsfaktoren skal være mindre end eller lig med 0,20 mm for betoner, der udsættes for frost.

Luftporeanalyse kan udføres både på frisk beton og hærdnet beton.

Luftporeanalyse på hærdnet beton sker ved analyse af et planslib i henhold til en standardiseret metode (DS/EN 480-11).

For den friske beton anvendes en såkaldt Air Void Analyzer (AVA), beskrevet i kapitel 3.4.4.3. Denne metode er dog ikke standardiseret og anvendes mest i forbindelse med udvikling/optimering af mix design, hvor man har brug for hurtige resultater for at foretage en relativ sammenligning.

Der er gennemført forskellige sammenlignende undersøgelser af målinger på frisk og hærdnet beton, bl.a. på Teknologisk Institut, i forbindelse med Femern forundersøgelser, og Aalborg Portland [1]. Ingen af disse undersøgelser viser en lineær korrelation mellem de to metoder, men begge undersøgelser viser samme overordnede tendens, nemlig at den specifikke overflade oftest er lavere og afstandsfaktoren højere for AVA målingerne. Generelt set må en AVA måling derfor siges at være konservativ i forhold til vurdering af kvaliteten af luftporestrukturen sammenlignet med måling på den hærdnede beton.

### 5.2.2 Krav til luftindhold

I Danmark stilles der i henhold til DS/EN 206 DK NA, Anneks F som udgangspunkt krav til luftindhold for betoner, der udsættes for frost/tø. Kravene er opsummeret i Tabel 1.

Miljøpåvirkning	Moderat	Aggressiv	Aggressiv	Ekstra Aggressiv
Eksponeringsklasse	XF1	XF2	XF3	XF4
Min luftindhold i frisk beton	4,5 %	4,5 %	4,5 %	4,5 %
Min luftindhold i hærdnet beton		3,5 %	3,5 %	3,5 %
Max afstandsfaktor		0,20 mm	0,20 mm	0,20 mm

Tabel 1. Krav til luftindhold og luftporestruktur jf. DS/EN 206 DK NA. Anneks F.

Luftindholdet i betoner i XF-eksponeringsklasserne SKAL etableres ved anvendelse af et luftindblandingsmiddel. Dette gælder dog ikke jordfugtig beton.

Det skal bemærkes, at beton i henhold til DS/EN 206 DK NA også kan opfylde krav til frostbestandighed – uden at luftindholdet opfylder de ovenstående krav. Det kræver, at der udføres en frostprøvning, og afskalningen vises at være mindre end en specificeret værdi.

Men også hvis denne fremgangsmåde anvendes, skal der anvendes et luftindblandingsmiddel ved fremstilling af betonen. På denne måde sikres det, at der er en vis – om end lille – mængde små luftporer i betonen. Herved skabes også den mulighed,

at en beton, hvor luftindholdet og/eller luftporestrukturen ikke opfylder de stillede krav, kan eftervises at være frostbestandig ved en frostprøvning.

### 5.2.3 Luftindblandet betons bearbejdelighed

Når luft blandes i beton ændres bearbejdeligheden. Effekten af luft er dog kompleks, hvilket kan gøre det svært at forudsige effekten af luft på betons bearbejdelighed.

Grundlæggende kan betons bearbejdelighed beskrives ved de såkaldte rheologiske parametre; flydespænding og plastisk viskositet. Disse er nærmere beskrevet i afsnit 5.1. Flydespændingen er direkte relateret til sætmålet/flydemålet dvs. høj flydespænding giver et lavt sætmål/flydemål og omvendt. Den plastiske viskositet er et udtryk for betonens bearbejdelighed, når den flyder. En beton med lav viskositet flyder let og hurtigt.

Når tilslag, fx sand, blandes i en cementpasta falder bearbejdeligheden dvs. sætmålet/flydemålet falder og viskositeten stiger. Desto mere tilslag, der blandes i en cementpasta, desto mere falder bearbejdeligheden.

En luftboble kan opfattes som en blød deformerbar (tilslags)partikel. Luftbobler påvirker derfor cementpastas sætmål/flydemål (flydespænding) og viskositet [2].

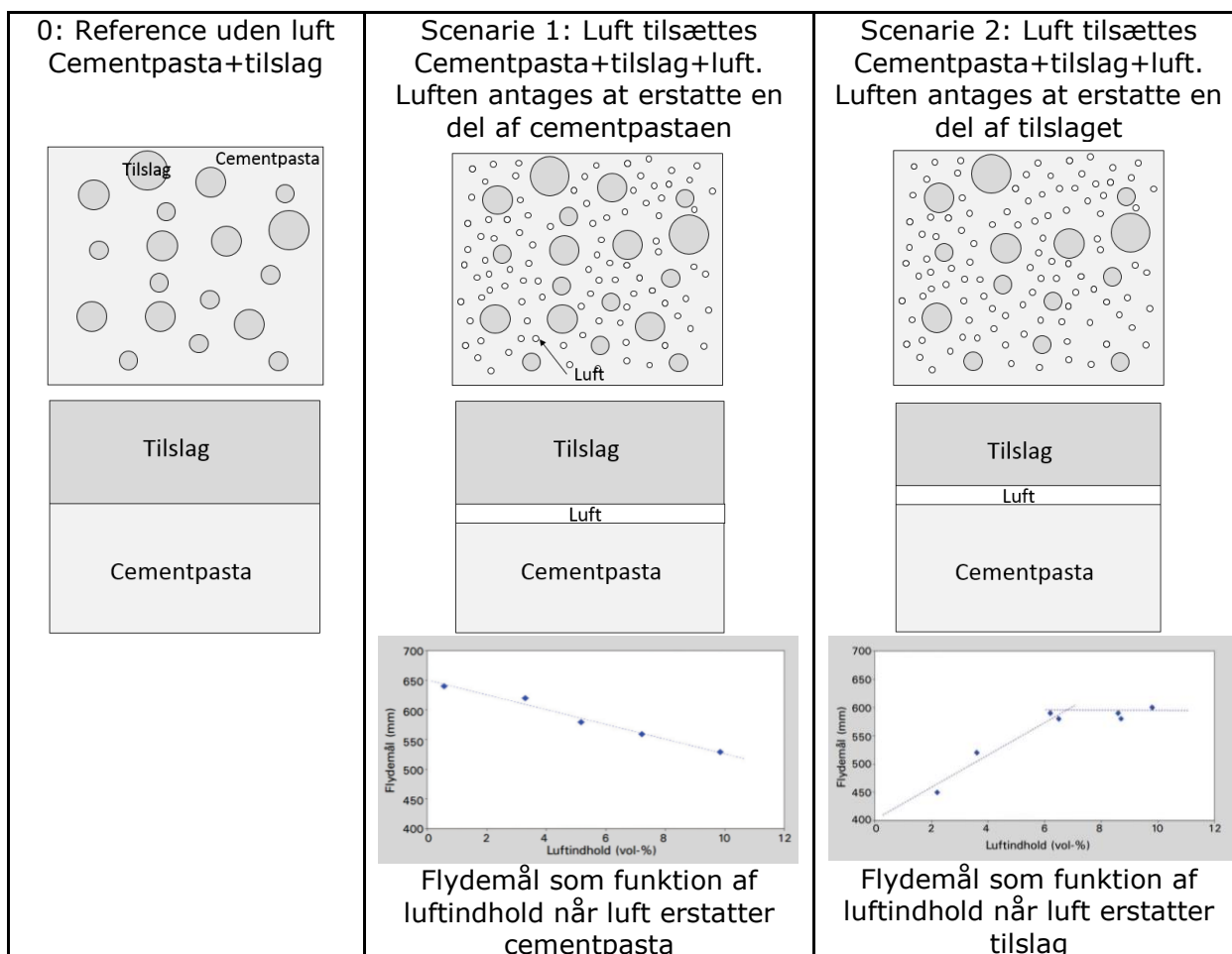
Undersøgelser har vist, at tilsætning af luft øger flydespændingen, hvorimod viskositeten falder. En hypotese bag disse observationer går på, at luftbobler i cementpasta virker forskelligt afhængig af, hvor hurtigt betonen flyder [2][3].

Når betonen flyder langsomt, vil luftbobler fastholde deres naturlige kugleform, og de vil i princippet fungere som en slags tilslag, der får flydespændingen til at stige, dog ikke lige så meget som rigtige tilslag. Derimod, når betonen flyder hurtigt, så deformerer luftboblerne og kan ikke længere betragtes som almindelige tilslag. At viskositeten falder, er således et udtryk for at luft deformerer lettere end den cementpasta, som den erstatter.

Ovenstående betragtninger er foretaget på systemer bestående af to faser, enten cementpasta og tilslag eller cementpasta og luft. Når cementpasta, tilslag og luft blandes sammen, opnås et tre-fase system, hvor det også er vigtigt at tage højde for, hvordan lufts volumenandel tages i regning.

Figur 2 viser en referencebeton bestående af cementpasta og tilslag, hvortil der tilsættes luft. I scenarie 1 antages det, at luft erstatter cementpasta. I scenarie 2 antages det, at luft erstatter tilslag. I scenarie 1 vil betonens ændring i bearbejdelighed svare til cementpastaens ændring dvs. som beskrevet ovenfor. I scenarie 2 er det ikke kun ændringen i cementpastaens bearbejdelighed, der har betydning for betonens ændring i bearbejdelighed. Her reduceres mængden af tilslag, hvilket vil reducere flydespænding og viskositet.

De nederste grafer i Figur 2 viser resultater fra forsøg med selvkomprimerende beton, hvor det bekræftes, at flydespændingen stiger i scenarie 1, når luft erstatter cementpasta (flydemålet falder), hvorimod flydespænding falder, når luft erstatter tilslag i scenarie 2 (flydemålet stiger). I scenarie 2 er det altså den øgede pastamængde, der er den dominerende faktor. Forsøgene viser at flydemålet øges op til et luftindhold på 6 %.



Figur 2. Scenarier ved tilsætning af luft til beton.

### 5.2.4 Luftindhold i praksis

En ulempe ved luftindblandet beton er, at det kan være vanskeligt at styre luftindholdet og luftporestrukturen i en betonproduktion, da de påvirkes af en lang række parametre. Selve blandedprocessen, herunder blandertype, blandetid, hvornår i processen luftindblandingsmidlet tilsættes samt konsistens af betonen, vil også påvirke luftindblandingen.

Det kan være vanskeligere at indblende luft i en beton med højt vand/cement forhold sammenlignet med en beton med et lavt vand/cement-forhold pga. den forholdsvis lave viskositet. Variation i delmaterialer vil også påvirke luftindblandingen. Specielt er det velkendt, at flyveaske kan være en udfordring, da molekylerne i luftindblandingsmidlet vil adsorbere til restkul i flyveasken og blive uvirksomme. Indholdet af restkul i

flyveaske varierer fra leverance til leverance, og den nødvendige dosering af luftindblandingsmiddel i betonen skal korrigeres tilsvarende.

Derudover er det væsentligt, at luftindblandingsmidlet er kompatibelt med det anvendte middel til plastificering og/eller superplastificering. Midler til plastificering og superplastificering kan også i sig selv være luftindblandende, hvilket ikke er ønskeligt, da disse midler typisk giver en dårlig luftporestruktur. Det kan derfor være nødvendigt at anvende skumdæmpende plastificerings-/superplastificeringsmidler.

Endelig vil transporttid og støbeprocess, herunder evt. pumpning og vibrering, påvirke luftindholdet og luftporestrukturen. Typisk vil vibrering af betonen reducere luftindholdet, og man skal være forsigtig med at overvibrere betonen, da det kan føre til utilfredsstillende frostbestandighed. En undersøgelse [4] har da også vist, at luftindholdet reduceres med længere vibreringstid og jo tættere vibratorstaven er på målepunktet (se Tabel 2).

Vibreringstid (sek)	Luftindhold (%)	
	100 mm afstand	200 mm afstand
0		5,1
5	4,1	4,3
15	2,7	3,5
30	1,6	3,5
45	1,5	3,1
50	1,2	4,1

Tabel 2. Påvirkning af stavvibrering på luftindhold [4].

For selvkompakterende beton og vibrerede betoner med højt sætmål skal det nævnes, at der for lodrette støbninger kan være en tendens til at luftindholdet er lavere i den nedre del pga. næsten hydrostatisk tryk. Dette er bl.a. dokumenteret i forbindelse med SCC-Konsortiet, hvor luftindhold og luftporestruktur blev målt på kerner boret ud i 3 højder på en 4 meter høj væg [5]. Luftindholdet var lavere i bunden og desuden var luftporene mindre som et resultat af sammenpresning af luftporene.

Alle parametre nævnt i dette afsnit vil typisk blive dokumenteret i forbindelse med forprøvning og prøvestøbning af betonen, og det er således kun variationer i delmaterialerne (specielt flyveaske) der kan være en udfordring i forbindelse med den daglige betonproduktion.

### 5.2.5 Litteratur

- [1] Kristensen, L.F., Kan man dokumentere at der er 10 milliarder luftbobler i en m<sup>3</sup> frisk beton, Beton 4, 36-38, November 2012.
- [2] Feys, D., Roussel, N., Verhoeven, R., Shutter, G., "Influence of air bubbles size and volume fraction on rheological properties of fresh self-compacting concrete", Rilem International symposium on rheology of cement suspensions such as fresh concrete, august 2009, Reykjavik.

- [3] Rust, A.C., Manga, M., Effects of bubble deformation on the viscosity of dilute suspensions, *Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 104, 53-63, 2002.
- [4] HETEK, Undersøgelse af stavvibrering, Rapport nr. 88, 1997
- [5] SCC-Konsortiet, Luftporestruktur og frostbestandighed for SCC, 2007