

61

FORELØBIGE RETNINGSLINIER
FOR FREMSTILLING AF

LUFTINDBLANDET BETON



Udgivet af
DANSK INGENIØRFORENING

1. udgave 1954
2. oplag 1964

Eftertryk forbudt

TEKNISK FORLAG

KØBENHAVN

**FORELØBIGE RETNINGSLINIER
FOR FREMSTILLING AF
LUFTINDBLANDET BETON**

FORELØBIGE RETNINGSLINIER
FOR FREMSTILLING AF

LUFTINDBLANDET BETON



Udgivet af
DANSK INGENIØRFORENING

1. udgave 1954
2. oplag 1964

Eftertryk forbudt

TEKNISK FORLAG

KØBENHAVN

INDHOLDSFORTEGNELSE

Forord	7
Indledning	9
Luftindblanding	10
Definition af luftindblandet beton	10
Luftindblandingsmidlernes virkemåde	10
Kemisk sammensætning	11
Krav til luftindblandingsmidler	11
Tilsætning af luftindblandingsmidler	12
Den friske betons egenskaber	13
Bearbejdighed og konsistens	13
Vandbehov	15
Afblanding	16
Vandudskillelse	16
Den hærdnede betons holdbarhed	18
Frysning og optøning	18
Kemiske angreb	21
Vandtæthed, absorption og rustbeskyttelse	22
Betonens styrke og volumenbestandighed	24
Trykstyrke	24
Øvrige styrkeegenskaber	27
Volumenændring	28
Luftmængdens variation	30
Luftindblandingsmiddel	30
Konsistens	31
Betonens sammensætning	31
Blandemetode	32
Blandetid	33

Luftmængdens variation i praksis.....	33
Proportionering	34
Nødvendigt luftindhold	35
Proportionering ved metode I	37
Proportionering ved metode II	38
Proportionering ved metode III.....	40
Prøveblanding.....	44
Proportioneringseksempler	46
Ændring af en given beton	46
Proportionering ved prøveblanding	48
Måling af luftindholdet	50
Frisk beton	50
Hærdnet beton	54
Arbejdsteknik	55
Afmåling af materialer	55
Apparater til afmåling af luftindblandingsmiddel	56
Blanding	60
Transport	60
Udstøbnings teknik	60
Kontrol af luftindhold	62
Anvendelsesområder	63
Bedre støbelighed	63
Større holdbarhed	64
Frostsikkerhed	64
Betonbelæggninger	65
Afsluttende bemærkninger.....	65
Tillæg	66
Rumvægtsmetoden	67
Pyknometermetoden	70
Rullemetoden (Meyer-meter)	72
Trykmetoden (Press-ur-meter)	74
Litteraturfortegnelse.....	78

FORORD

Luftindblandet beton har siden 1940 fundet stærkt stigende anvendelse i U.S.A., først og fremmest fordi man der har konstateret, at den indblår dede luft forøger betonens modstandsevne overfor vejrligets nedbrydning. Da luftindblandet beton endvidere er lettere at transportere og udstøbe end almindelig beton, har den også fundet anvendelse i konstruktioner, hvor betonen er mindre udsat for vejrligets påvirkninger.

Luftindblandet beton har efter krigen fundet stadig større udbredelse i Vesteuropa og Skandinavien. For at give en oversigt over luftindblandingsindflydelse på betonens egenskaber og en anvisning i den rette brug af og kontrol med luftindblandet beton, nedsatte Dansk Ingeniørforenings hovedbestyrelse på opfordring af Betonsektionen i 1952 et udvalg til at udarbejde foreløbige retningslinier for fremstilling af luftindblandet beton. Udvalget fik følgende sammensætning:

Ole Glarbo, laboratorieingeniør, cand. polyt., Danmarks tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsteknik.

J. Brinch Hansen, chefindeniør, dr. techn., Christiani & Nielsen.

Morten Ludvigsen, vejingeniør, cand. polyt., Dansk Vejlaboratorium.

Erik V. Meyer, civilingeniør, dr. techn., Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor.

Poul Nerenst, civilingeniør, Statens Byggeforskningsinstitut, (udvalgets formand).

K. Otterstrøm, civilingeniør, Vandbygningsdirektoratet.

Ervin Poulsen, civilingeniør, Christiani & Nielsen, (udvalgets sekretær).

De foreløbige retningslinier er baseret på en omfattende kritisk gennemgang af udenlandsk litteratur, da erfaringerne med anvendelse af luftindblandingsmidler her i landet endnu er begrænsede. Ved retnings-

liniernes udarbejdelse har det været nødvendigt at udføre forsøg på Laboratoriet for Bygningsteknik. Ved disse forsøgs gennemførelse har medvirket laboratorieingeniør *C. S. Forum* og civilingeniør *Ervin Poulsen* fra Christiani & Nielsen.

Dansk Cement Central og A/S Carl Nielsen har gratis leveret materialer til disse forsøg.

Under arbejdet har udvalget været i stadig kontakt med specialister udpeget af de øvrige nordiske betonforeninger.

Dansk Ingeniørforening takker for den hjælp og assistance, der således er ydet udvalgets arbejde.

Inden for udvalget er man klar over, at de foreliggende retningslinier må betragtes som foreløbige, idet det vil være nødvendigt at samle flere praktiske erfaringer, inden man ser sig i stand til at udgive endelige retningslinier.

De foreløbige retningslinier har været genstand for en teknisk samtale i Betonsektionen torsdag d. 29. oktober 1953, og den på dette møde fremførte kritik er taget i betragtning ved den endelige redaktion. Hovedbestyrelsen har godkendt retningsliniernes udsendelse i den foreløbige form på et møde d. 24. september 1953.

INDLEDNING

Romerne brugte i oldtiden forskellige stoffer som blodalbumin, æggehvide etc. som tilsætning til hydraulisk mørtel for at opnå en forbedret bearbejdighed.

Disse stoffer virker på samme måde som de moderne luftindblandingsmidler, der især er udviklet i U.S.A. i tiden efter 1940. I midten af trediverne iværksattes de første forsøg. Den reduktion af betonstyrken, der forårsages af den indblandede luft, medførte dog en stilstand i udviklingen, indtil det ved laboratorieforsøg og i praksis blev påvist, at luftindblanding i beton bevirker en mangedoblet modstandsevne overfor frost og tøj og andre former for nedbrydning.

Disse erfaringer har medført en stadig stigende anvendelse af luftindblandet beton. I U.S.A. har en fremragende betonteknolog karakteriseret påvisningen af luftindblandings indflydelse på betonens holdbarhed som den mest betydningsfulde begivenhed inden for betonteknologien, siden *Abrams* i 1918 formulerede sammenhængen mellem betonens styrke og v/c -forholdet.

I de følgende afsnit gives en oversigt over luftindblandingsmidler og over den indblandede lufts indflydelse på den friske og den hærdnede betons egenskaber. Som en overgang til vejledning i proportionering af luftindblandet beton gennemgås de faktorer, der påvirker mængden af indblandet luft.

De næste afsnit beskriver, hvorledes man i praksis kan tilsætte luftindblandingsmidler på arbejdspladsen, og hvorledes luftindholdet kan kontrolleres. Der afsluttes med en oversigt over anvendelsesområder for luftindblandet beton.

I et tillæg gives en detaljeret beskrivelse af, hvorledes luftindholdet bestemmes, illustreret ved taleksempler.

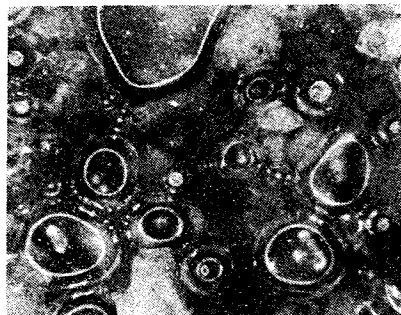


Fig. 1. Mikrofotografi af indblandede luftbobler efter E. Hauser. (50-76).*)

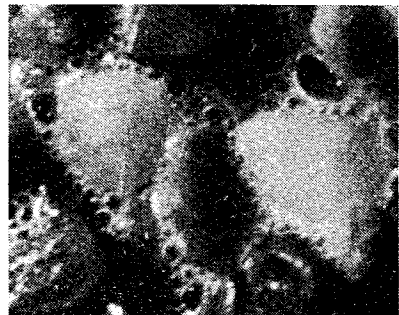


Fig. 2. Frisk luftindblandet mørtel i blandingsforholdet 1:6. Sandets kornstørrelse 0.1-1 mm. Forstørrelse 1-100. Efter Ammann. (52 A 3).

LUFTINDBLANDING

Definition af luftindblandet beton

I luftindblandet beton er der ved tilsætning af et luftindblandingsmiddel under blandingen dannet og fastholdt et stort antal meget små og tætliggende luftbobler. Hensigten med denne luftindblanding er ikke at fremstille en letbeton.

Luftindblandingsmidlernes virkemåde

Luftindblandingsmidler i form af opløsninger tilsættes betonen i meget små mængder under blandingen. Ved tilsætningen nedsættes støbevandets overfladespænding, og denne sænkning bevirker en vis skumdannelse. Ved blanding fordeles og fastholdes skummet som mange små luftbobler med varierende størrelse. Ved luftindhold inden for det anbefalede brugsområde er middeldiameteren ca. 0.1 mm.

Der vil ved et luftindhold på 3 til 5 rumfangsprocent af betonen være flere millioner luftbobler pr. liter beton.

Almindelig beton indeholder også luft, *indkapslet luft*. Luftmængden kan variere fra $\frac{1}{2}$ til 4% i afhængighed af konsistens og cementindhold. Luften findes i uregelmæssige, relativt store luftporer.

*) Tallene i parentes refererer til litteraturfortegnelsen side 78.

Kemisk sammensætning

Luftindblandingsmidler er som regel af organisk oprindelse og kan grupperes i

1. Naturlige og syntetiske harpikser.
2. Animalske og vegetabiliske fedtstoffer og deres fede syrer.
3. Forskellige fugtemidler som alkalimetalsalte, sulfaterede og sulfone-rede organiske forbindelser.
4. Vandopløselige harpikssæber og sæber af animalske og vegetabiliske fede syrer.

En del luftindblandingsmidler er yderligere tilsat stoffer, der fremskynder betonens hærdning og derved forøger de tidlige styrker.

Krav til luftindblandingsmidler

I Danmark findes endnu ikke normer for luftindblandingsmidler og luftindblandingscementer (cementer med indmalet luftindblandingsmiddel), men i U.S.A. er der af ASTM udarbejdet en foreløbig prøvemethode C 233-49T til bedømmelse af luftindblandingsmidler*) og C 175-51T til bedømmelse af luftindblandingscementer. Ved prøvning af luftindblandingsmidler undersøges det

1. om midlet indeholder skadelige kemikalier i sådanne mængder, at betonens kvalitet kan forringes i utilladelig grad,
2. om midlet ved tilsætning til beton forbedrer dennes kvalitet i frisk tilstand samt forøger den hærdnede betons holdbarhed uden væsentlige styrkereduktioner.

*) Ved et luftindhold på 4.5% skal den luftindblandede beton opnå 85% af den almindelige (luftfri) betons:

- 1) trykstyrke ved alle aldre mellem 2 og 365 dage
- 2) bøjningstrækstyrke ved alle aldre mellem 2 og 365 dage
- 3) adhæensionsstyrke ved 28 dage.
Endvidere kræves:
- 4) Volumenændring ved udtørring må ikke udgøre mere end 110% af den almindelige betons volumenændring ved alle aldre mellem 2 og 365 dage
- 5) vandudskillelse må ikke være mere end 65% af den almindelige betons vandudskillelse.
- 6) den relative holdbarhedsfaktor ved 200 frysnings- og optøningscykler af vandmættede prøvelegemer skal udgøre mindst 80% af den holdbarhedsfaktor, der opnås med et standardiseret luftindblandingsmiddel (Vinsol Resin).

Ved anvendelse af luftindblandingsmidler bør brugeren sikre sig, at det ved undersøgelse på anerkendt laboratorium er påvist, at midlerne opfylder ovennævnte krav.

Man har erfaring for, at nogle luftindblandingsmidler kan tage skade ved langvarig lagring.

Tilsætning af luftindblandingsmiddel

Luftindblandet beton kan fremstilles ved følgende to fremgangsmåder:

1. Betonen tilsættes en opløsning af luftindblandingsmidlet under blandingen.
2. Der benyttes cement, som under fabrikationen er tilsat et luftindblandingsmiddel (luftindblandingscement).

Den første fremgangsmåde må som regel foretrækkes, da luftindholdet i betonen kan reguleres blot ved en ændring i mængden af luftindblandingsmiddel, medens regulering af luftindholdet ved brug af luftindblandingscement er vanskeligere.

DEN FRISKE BETONS EGENSKABER

Bearbejdelighed og konsistens

Betons bearbejdelighed er en egenskab, som er vanskelig at definere. Der er i tidens løb udviklet forskellige empiriske metoder, som tilstræber at give et mål for såvel bearbejdelighed som konsistens. Disse metoder er navnlig baseret på at bestemme betonens formbarhed under tyngdens påvirkning eventuelt kombineret med ydre mekanisk påvirkning, f. eks. sætmål (egenvægt), Mo-måler (stød), Vebe-apparat (vibrering). Ingen af disse metoder bestemmer en grundlæggende fysisk egenskab ved den friske beton, men til sammenligning i praksis er de anvendelige.

De er dog ikke umiddelbart egnede til at sammenligne bearbejdelighed og konsistens for henholdsvis almindelig og luftindblandet beton. Dette skyldes, at betonen ved luftindblanding bliver mere sammenhængende, medens den indre friktion samtidig formindskes.

Den forøgede indre sammenhæng modvirker formforandring (og separation) ved ringe ydre påvirkning (f. eks. sammensynkning af af-

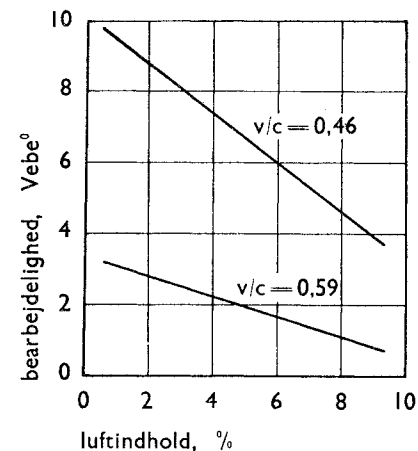


Fig. 3. Ved konstant v/c -forhold vil en forøgelse af luftmængden bevirke, at den nødvendige vibreringstid i sekunder (vebe grader) til omformning af betonkeglen i vebeapparatet formindskes, d. v. s. at bearbejdeligheden forøges, når luftindholdet forøges.

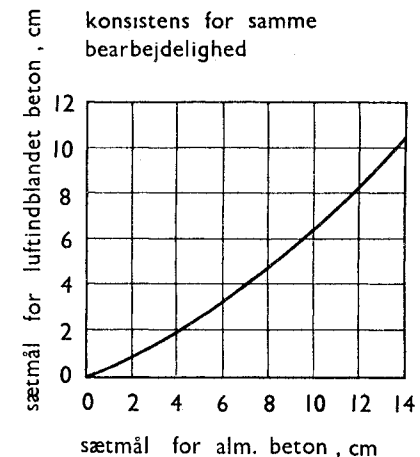


Fig. 4. Samme bearbejdelighed opnås for luftindblandet beton ved et mindre sætmål end for almindelig beton. Af figuren kan f. eks. aflæses, at et sætmål på ca. 8 cm for luftindblandet beton giver samme bearbejdelighed som et sætmål på 12 cm for almindelig beton.

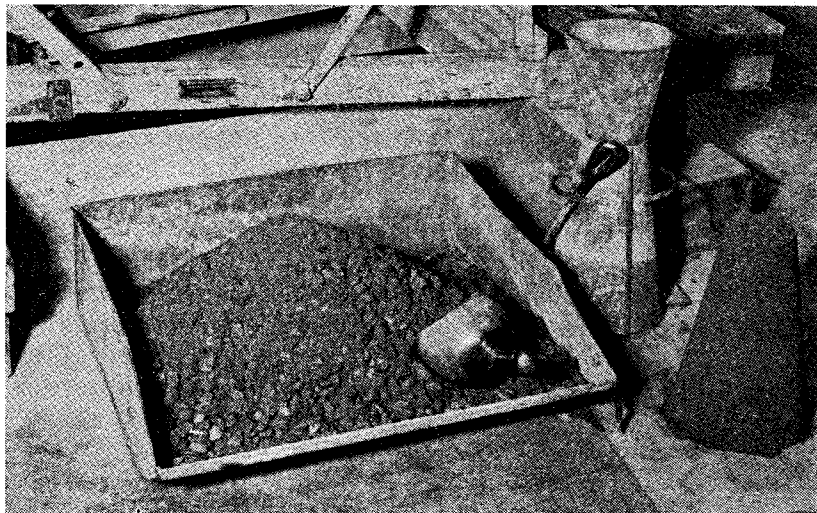


Fig 5. Vand, sand og sten efter blanding i 5 min. Sætmålet er 0, og ved udtømning fra blandemaskinen er der sket en afblanding. (50-76).

formet sætmålskegle), medens den formindskede indre friktion forårsager en forbedret bearbejdelse ved kraftigere ydre påvirkning (f. eks. slag med stikstang på afformet sætmålskegle, eller bearbejdning under udstøbning).

Anvendes sætmålsprøvning på byggepladsen, må man derfor ved brug af luftindblandet beton være opmærksom på følgende:

1. Hvis forskellen mellem to betonprøvers sammensætning *alene* består i, at den ene indeholder indblandet luft, vil sætmålet være størst for den luftindblandede beton, og den vil have en væsentlig bedre bearbejdelse end betonen uden luftindblanding.
2. Hvis den luftindblandede betons vandindhold formindskes, således at de to prøver får *samme sætmål*, vil den luftindblandede betons bearbejdelse stadig være bedre end den almindelige betons.
3. Hvis den luftindblandede betons vandindhold formindskes yderligere, indtil de to prøver har *samme bearbejdelse*, vil sætmålet være mindst for den luftindblandede beton.

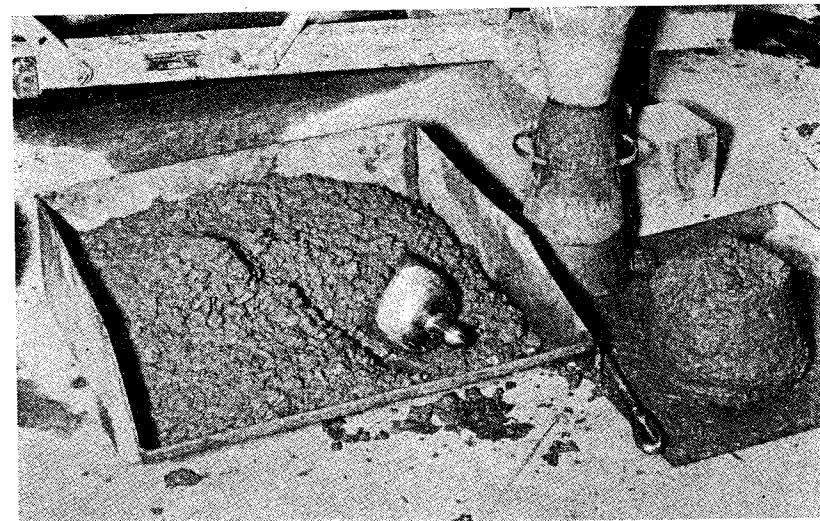


Fig. 6. Vand, sand og sten i samme blandingsforhold som fig. 5, tilsat et luftindblandingsmiddel. Blandingen er plastisk og sammenhængende. (50-76).

Vandbehov

Den reduktion af vandmængden, som kan opnås ved at indblende luft i betonen og arbejde med samme konsistens eller bearbejdelse, som benyttes, når betonen er fremstillet uden luftindblanding, afhænger af forskellige omstændigheder. Reduktionen af vandbehovet forøges, når:

1. mængden af indblandet luft forøges,
2. cementindholdet formindskes,
3. betonen gøres mere plastisk,
4. der anvendes skærver eller sten med uregelmæssig kornform fremfor rundslidte sten,
5. stenenes max. kornstørrelse formindskes.

Endvidere er der nogen forskel på de vandreduktioner, som opnås med de forskellige fabrikater af luftindblandingsmidler.

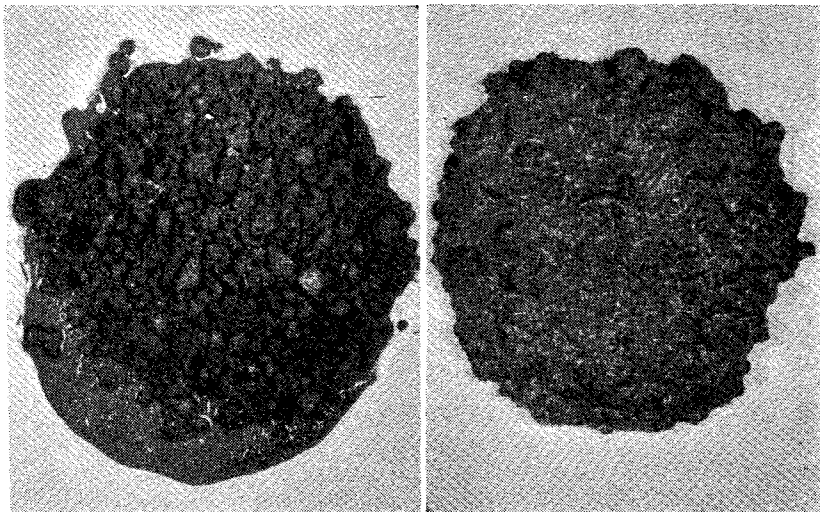


Fig. 7. Støbeligheden og sammenhængskraften af en strid betonblanding (til venstre) kan forbedres ved tilsætning af et luftindblandingsmiddel (til højre). (49 K 4).

Afblanding

Luftindblandet beton er mere sammenhængende (har større kohæsion) end almindelig beton, hvilket i praksis vil sige, at luftindblandet beton har mindre tendens til afblanding under udtømming samt ved transport og udlægning, idet mørtlen klæber til stenene.

Vandudskillelse

I perioden umiddelbart efter betonens udstøbning sker der en sætning af betonmassen, hvorunder vand i almindelig beton bevæger sig opad mod betonoverfladen. En del af vandet når helt op til overfladen og samler sig i små pytter, men noget samler sig på undersiden af stenene, hvor der dannes vandlommer. Dette fænomen kaldes vandudskillelse (eng. bleeding) og har stor betydning for den hærkede betons vandtæthed.

I luftindblandet beton og mørtel vil man iagttage meget mindre udskillelse af vand end i almindelig beton, bl. a. fordi den luftindblandede beton i frisk tilstand er mindre gennemtrængelig for vand. Fig. 8.

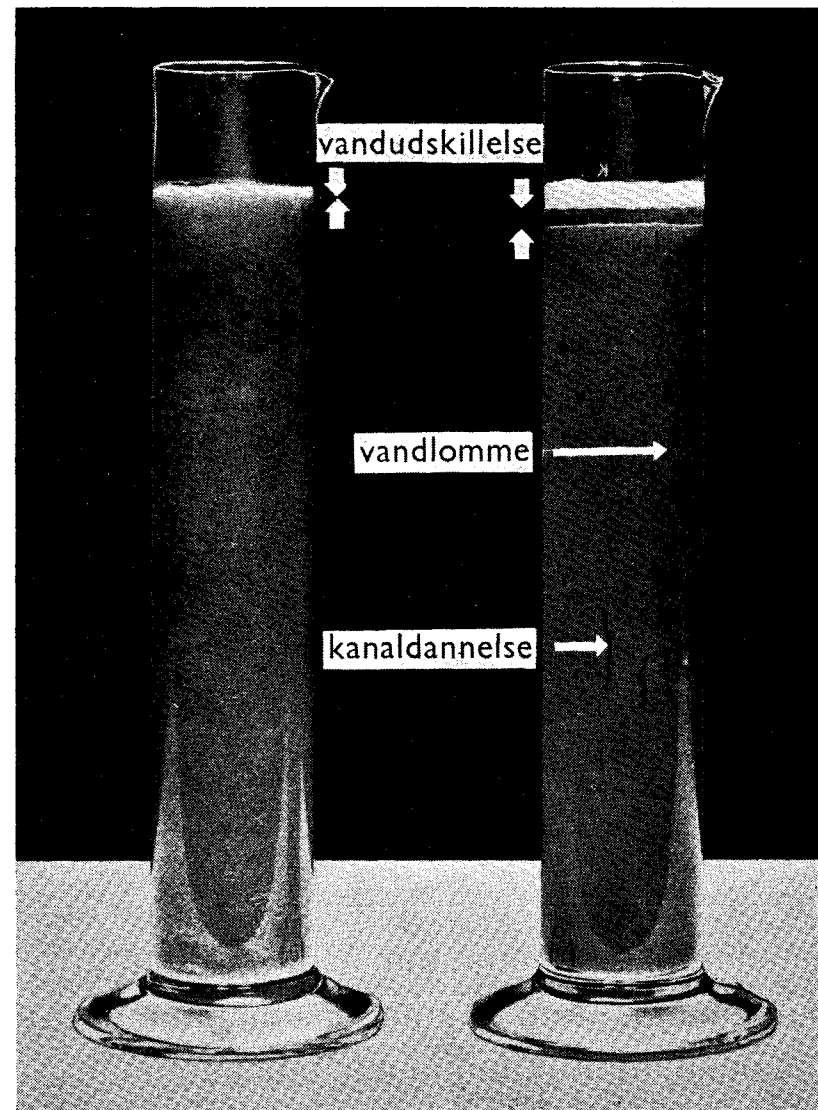


Fig. 8. Luftindblandet cementpasta (til venstre) har mindre vandudskillelse og mindre tendens til dannelse af vandlommer og kanålporer end cementpasta uden indblandet luft (til højre). (50-77).

DEN HÆRDNEDE BETONS HOLDBARHED

Frysning og optøning

Luftindblandet beton har både ved laboratorieforsøg og i praksis vist sig at have en mangedoblet modstandsevne overfor gentagne frysninger og optøninger, selv om cementpastaen er vandmættet.

Først i de seneste år er der fundet tilfredsstillende forklaringer på, hvad der sker under betonens frysning. *T. C. Powers* fra Portland Cement Association har opstillet teorier, som senere er bekræftet ved omfattende laboratorieforsøg. (47 P 4), (49 P 26) og (54 P 1).

Ifølge disse teorier ødelægges beton uden luftindblanding og med vandmættet cementpasta ved nogle få frysninger på grund af de hydrauliske tryk, der opstår i betonens kapillære porer.

Når der i luftindblandet beton findes indblandet så mange bobler, at afstanden mellem dem er af størrelsesordenen 0.2 mm, kan det hydrauliske tryk udlignes i boblerne som vist på fig. 9. Disse luftbobler vil normalt ikke fyldes med vand ved opugning eller mindre vandtryk.

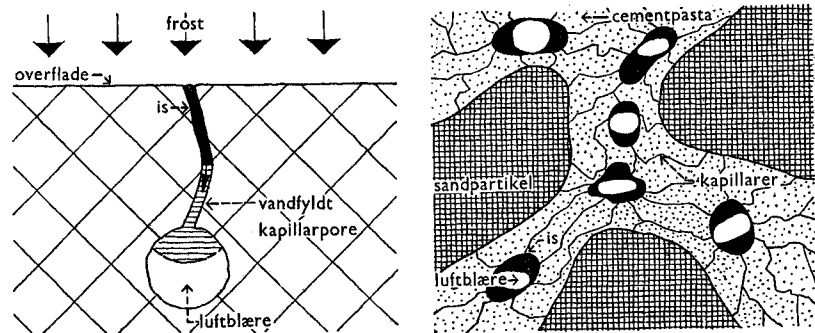


Fig. 9. Frysning af luftindblandet beton, skematisk. (50 L 22). I luftboblerne udlignes det hydrauliske tryk, som opstår, når vandet i kapillarerne fryser. Vandbevægelsen sker i frostens indtrængningsretning.

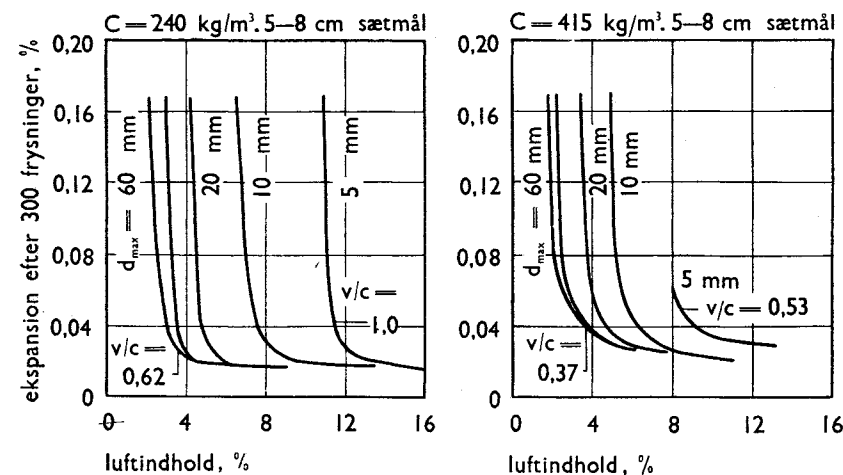


Fig. 10. Frostsikkerhed kan opnås ved indblanding af luft. Den nødvendige mængde afhænger af største stenstørrelse og cementindholdet. (52 K 2).

Den fuldstændige teori for betons ødelæggelse ved frost er for omfattende til at blive gennemgået her, men der henvises til SBI anvisning nr. 17 »Betonstøbning om vinteren«. (53 N 2).

Betons modstandsevne overfor gentagne frysninger og optøninger er ikke alene afhængig af det totale luftindhold, men også af luftboblernes størrelse og fordeling.

For at opnå en passende modstandsevne skal man ved en given afkølingshastighed have en bestemt mængde luft i mørtelfractionen, og det nødvendige luftindhold vil derfor ændre sig med største stenstørrelse og cementindholdet som vist på fig. 10.

Da man af hensyn til styrken ønsker lavt luftindhold, tilstræber man at benytte et luftindhold så nær som muligt ved kurvernes knæpunkter. Figuren viser iøvrigt tydeligt, at et lavt v/c -forhold ikke i sig selv giver en frostsikker beton, idet beton med 40 mm maksimal kornstørrelse og et v/c -forhold på 0,37 i det foreliggende tilfælde blev ødelagt, hvis den ikke indeholdt luft.

I afsnittet om proportionering er i tabel 1 angivet det nødvendige luftindhold for at opnå frostsikker-beton, idet man har benyttet en af-

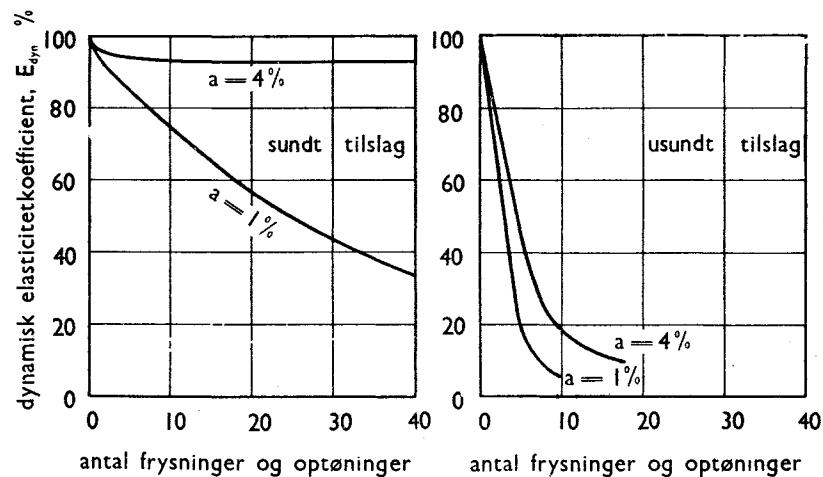


Fig. 11. Til venstre ses reduktion af den dynamiske elasticitetskoefficient ved frysning og optøning af beton med frostbestandige grusmaterialer. Tegningen til højre viser, at luftindblanding ikke kan gøre en beton frostsikker, hvis tilslagsmaterialet ikke er frostbestandigt. (43 A 3).

kølingshastighed på 5°C pr. time, der er i bedre overensstemmelse med det relativt milde klima her i landet end den ved laboratorieforsøgene (52 K 2) benyttede afkølingshastighed på 11°C pr. time.

Luftindblandingen har kun indflydelse på kitmassens frostsikkerhed og kan ikke gøre betonen frostsikker, hvis der anvendes usunde tilslagsmaterialer. Dette fremgår af fig. 11, hvor betonens ødelæggelse ved frost og optøning er målt ved reduktion i den dynamiske elasticitetskoefficient.

Beton i udendørs konstruktioner, der er udsat for frysning og optøning i vandmættet tilstand, kan sikres stor holdbarhed ved anvendelse af frostbestandige tilslagsmaterialer i forbindelse med det nødvendige luftindhold for at gøre cementpastaen frostsikker.

Alle betonkonstruktioner, der støbes om vinteren, kan blive udsat for beskadigelse på et tidligt tidspunkt i betonens levetid og bør gøres modstandsdygtig ved indblanding af luft og ved anvendelse af sunde tilslagsmaterialer.

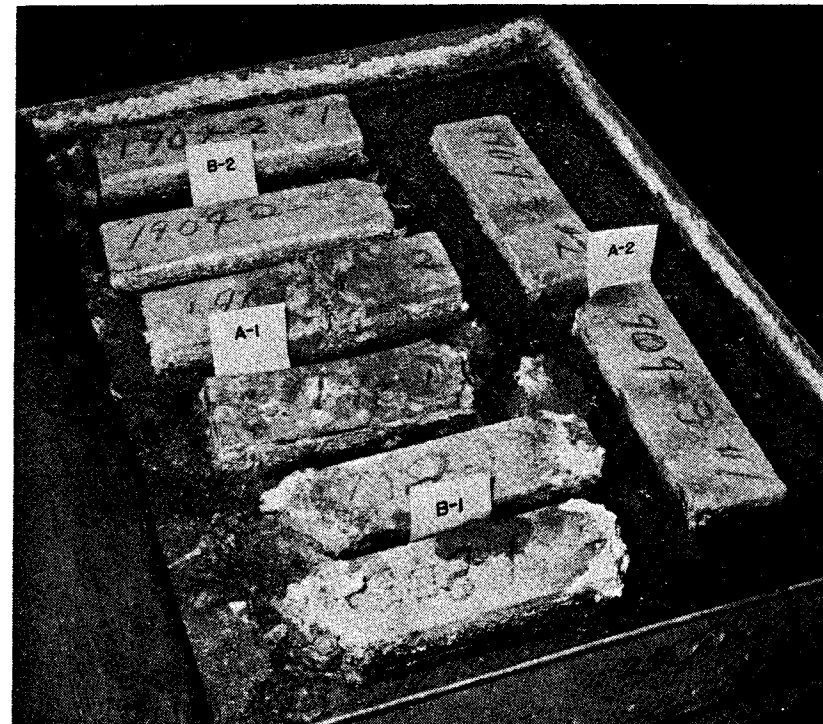


Fig. 12. Betons modstandsevne overfor sulfatangreb ved lagring i en 10% opløsning af natrium-magniumsulfat (2:1). A-2 og B-2 er beton med luftindblanding. A-1 og B-1 er tilsvarende almindelig beton. (51-30).

Kemiske angreb

Luftindblandet beton er mere modstandsdygtig end almindelig beton overfor visse kemiske angreb.

Sulfatangreb

Betons modstandsevne overfor sulfatangreb afhænger bl. a. af dens tæthed og den anvendte cements indhold af trikalcialuminat (C_3A) og fri kalk (CaO). Luftindblanding forøger betonens modstandsevne overfor sulfatangreb, fig. 12, men ikke i så høj grad, at man kan se bort fra de øvrige faktorerets betydning. (48 S 4), (49 D 15).

Optøningsmidler

Til optøning af is og sne på gader og veje anvendes ofte kogsalt (NaCl) eller kalciumklorid (CaCl_2), hvilket undertiden bevirker afskalninger og ødelæggelse af overfladen på almindelig beton. Ved luftindhold på nogle få procent opnås en mangedoblet modstandsevne overfor disse angreb, men tendensen i U.S.A. går mod stadig større luftindhold for at opnå fuldstændig beskyttelse. Såfremt disse optøningsmidler vinder større udbredelse her i landet i fremtiden, kan det være nødvendigt at forøge de i tabel 1, side 36, angivne gunstigste luftindhold, der kun sikrer, at betonen bliver bestandig overfor frost.

Alkali-grusreaktioner

Ved reaktioner mellem visse flinttyper (opal og porøs kalcedon) og alkalier dannes alkalikiselgel, der udfældes i den hærdnede beton. Ved opugning af vand i geldannelserne kan der opstå osmotiske tryk, der er store nok til at forårsage revnedannelse og ødelæggelse af betonen. I porøs beton finder gelerne bedre plads end i kompakt beton, og luftindblanding vil derfor have en gunstig indflydelse.

Denne form for ødelæggelse af betonen er iagttaget enkelte steder her i landet. (52 N 1).

Vandtæthed, absorption og rustbeskyttelse

En betons gennemtrængelighed for vand (permeabilitet) er mere afhængig af porernes form og indbyrdes forbindelse end af det totale porevolumen. I almindelig beton vil der ved vandudskillelse dannes et sammenhængende system af kanalporer, der står i forbindelse med overfladen eller vandlommerne under de større sten.

I luftindblandet beton vil der være betydelig mindre vandudskillelse og dermed mindre tendens til dannelse af kanalporer og vandlommer. Cementpastaen, der omgiver luftboblerne, vil være tættere, fordi luftindblandingen bevirker en reduktion i vandbehovet, således at v/c -forholdet bliver mindre. Luftindblandet beton vil således være mindre gennemtrængelig for vand end almindelig beton, til trods for at det totale porevolumen er større.

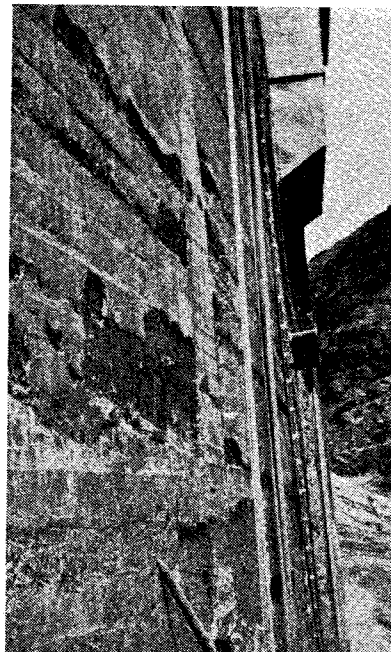


Fig. 13. Schweizisk betonspærredæmning angrebet af frost i 10–15 cm dybde. Alder ca. 20 år. (52 A 3).

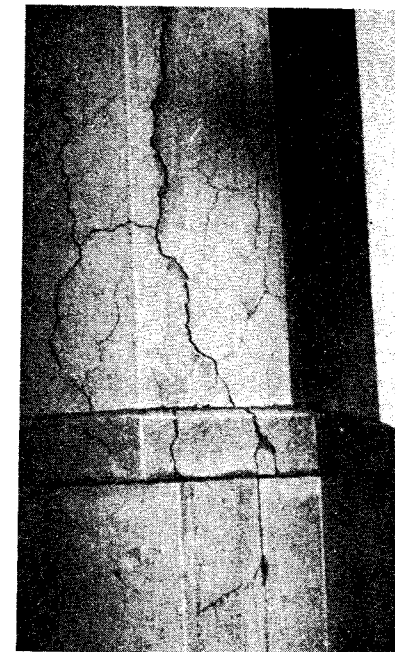


Fig. 14. Betonbygværk i U.S.A. med revnedannelser som følge af skadelige alkali-grusreaktioner. (52 N 1).

Absorptionen og den kapillære opugningsevne i hærdnet beton bliver mindre, når der er indblandet luft, fordi den kapillære stighøjde reduceres på grund af de mange små luftbobler, der virker som tværnsnit-udvidelse af kapillarerne og nedsætter den kapillære sugning. (51 L 3).

Betons evne til at beskytte armeringen mod rustangreb afhænger af dæklagets tykkelse, vandgennemtrængelighed og absorptionsevne. Luftindblandet beton kan derfor forventes at give bedre beskyttelse end almindelig beton, men da de foreskrevne dæklag ikke altid yder tilstrækkelig beskyttelse, må det frarådes at nedsætte dæklagets tykkelse, selvom der benyttes luftindblandet beton.

BETONENS STYRKE OG VOLUMENBESTANDIGHED

Trykstyrke

Som tidligere omtalt (side 10) findes der i almindelig beton *indkapslet luft*. Dette har man i mange år været klar over, men man har almindeligvis ikke taget hensyn til luftindholdet ved forudsigelse af betonens trykstyrke. I *Feret's* formel af 1894 indgår dog luftindholdet på lige fod med vandindholdet, hvorimod *Abrams* og *Bolomey* sætter trykstyrken i afhængighed af henholdsvis v/c og c/v uden at tage hensyn til luftindholdet.

Bolomey's formel lyder således:

$$\sigma = K (c/v - 0.5), \quad (1)$$

σ = trykstyrken

K = en konstant

c/v = vægtforholdet mellem betonens cementindhold og vandindhold.

Denne formel stemmer udmærket overens med forsøgsresultater, når der anvendes plastisk beton uden luftindblanding.

Forøges luftindholdet i betonen, f. eks. ved luftindblanding, vil trykstyrken reduceres med 5 å 6% for hver procent luft, der indblandes, såfremt betonsammensætningen, herunder vandindholdet, iøvrigt holdes konstant.

Ved teoretiske betragtninger kan man eftervise, at denne eksperimentelt fundne styrkereduktion svarer til den formindskelse af det effektive tværsnitsareal, der forårsages ved indblanding af 1% luft.

Trykstyrken afhænger således også af mængden af indblandet luft, og dette må man tage hensyn til ved i formlen at erstatte vandet (v) med summen af vand og luft ($v + 1$), hvor luften måles i liter.

Den ændrede formel, i det følgende kaldet den *udvidede Bolomey-formel*, får da følgende form:

$$\sigma = K_1 \left(\frac{c}{v + 1} - K_2 \right) \quad (2)$$

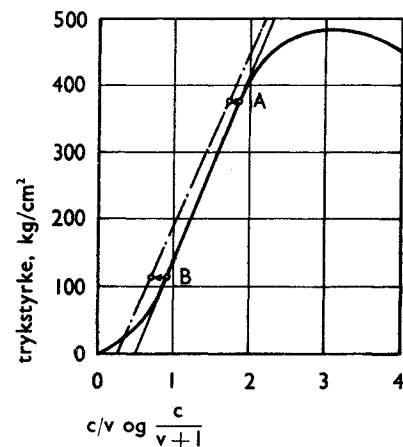


Fig. 15. Når der i *Bolomey's* formel tages hensyn til den indblandede luft, vil den stiplede linie, der angiver sammenhængen mellem trykstyrken og kitmassens sammensætning, have mindre hældning og afskære et mindre stykke på absisseaksen, end når der ses bort fra luftindholdet.

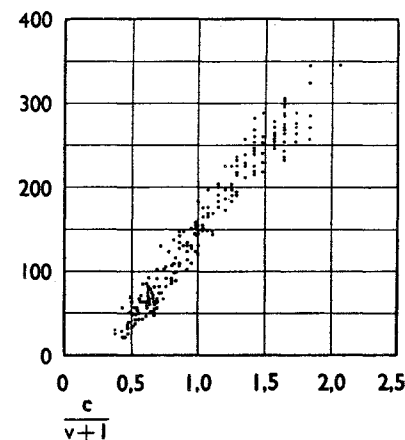


Fig. 16. Afhængigheden mellem trykstyrken og $\frac{c}{v+1}$. Der er ved forsøgene anvendt 5 forskellige luftindblandingsmidler og luftindhold fra 0 til 30%. (49 B 5).

Forsøgene på Danmarks tekniske Højskole (53-9) og udenlandske forsøgsresultater (49 B 5) har vist, at den udvidede *Bolomey-formel* også gælder for almindelig beton, når der tages hensyn til den indkapslede luft. Dette benyttes til at bestemme konstanterne i formlen.

I fig. 15 vil almindelig plastisk beton med egenskaber svarende til punkt A have et stort cementindhold og altså et lille luftindhold (se tabel 10). Beton svarende til B vil derimod have et lille cementindhold og følgelig et stort luftindhold. Afsættes ethvert punkt på *Bolomey's* kurve som funktion af $\frac{c}{v+1}$, vil A flytte et lille stykke og B et stort stykke til venstre. Den viste kurves hældning bliver derved ca. 10% mindre og skæringspunktet med absisseaksen flytter fra $c/v = 0.5$ til $\frac{c}{v+1} = \text{ca. } 0.25$.

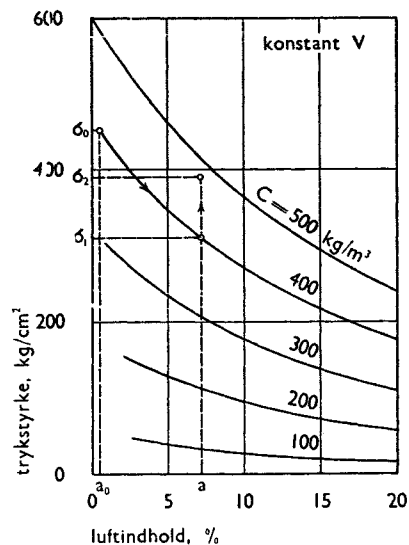


Fig. 17. Ved konstant v/c-forhold vil styrken aftage, når luftindholdet stiger, men samtidig er det muligt at formindskede vandmængden uden at bearbejdigheden forringes.

Den udvidede Bolomey's formel får da følgende udseende:

$$\sigma = 0.9 K \left(\frac{c}{v+1} - 0.25 \right) \quad (3)$$

hvor K har samme værdi som for almindelig beton (jvfr. formel (1)).

Formlen har gyldighed i intervallet: $0.5 \leq \frac{c}{v+1} \leq 2.5$

I fig. 16 er cylindertrykstyrkerne fra en omfattende amerikansk forsøgsserie afbildet som funktion af forholdet mellem cementvægten og det totale volumen af vand og luft. (49 B 5). Ved forsøgene er anvendt fem forskellige luftindblandingsmidler, og luftindholdet har varieret fra 0% til 30%.

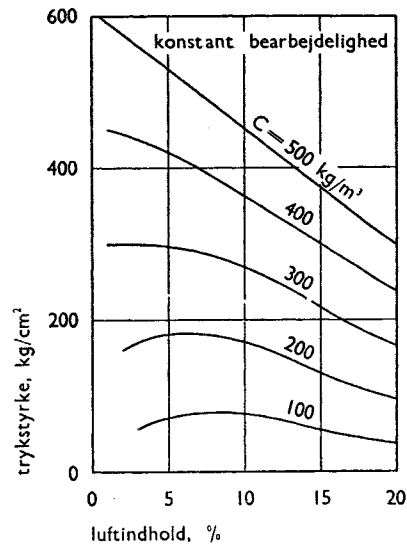


Fig. 18. Ved konstant bearbejdighed kan man for mager beton forvente en forøgelse af styrken ved rimeligt luftindhold.

Fig. 17 illustrerer styrketabet ved luftindblanding. Trykstyrken σ_0 for en almindelig beton med luftindholdet a_0 vil reduceres til σ_1 , hvis der indblandes så meget luft, at det totale luftindhold bliver a , og det forudsættes, at v/c-forholdet holdes konstant. Som tidligere omtalt (side 15) bliver betonens bearbejdighed ved luftindblandingen betydelig forbedret, således at vandindholdet kan reduceres. Derved stiger styrken f. eks. fra σ_1 til σ_2 , styrketabet er nu $\sigma_0 - \sigma_2$ mod før $\sigma_0 - \sigma_1$.

Da vandreduktionen er større ved magre end ved fede betoner, se tabel 7, bliver der ved plastiske betoner med et cementindhold på 250–300 kg/m³ ikke tale om styrketab, og ved magre betoner bliver styrken større under forudsætning af rimelige luftindhold. Fig. 18.

Ved luftindhold indtil 3–4% kan man regne med, at luftindblandet plastisk beton har samme styrke som almindelig beton for samme bearbejdighed ved et cementindhold på ca. 300 kg/m³. Hvis de to betoner har samme sætmål, d. v. s. den luftindblandede beton har større bearbejdighed, vil styrken være den samme ved et cementindhold på ca. 250 kg/m³. Sammenlignet med almindelig beton har luftindblandet beton lavere styrke ved højere cementindhold end ca. 300 kg/m³ og højere styrke ved lavere cementindhold end ca. 250 kg/m³.

Øvrige styrkeegenskaber

Betonens øvrige styrkeegenskaber påvirkes ved luftindblanding i det væsentlige på samme måde som beskrevet for trykstyrken. Ændringerne er dog ikke af samme størrelse. *Bøjningstrækstyrkens* procentuelle ændringer andrager således kun 50 til 75% af trykstyrkens. (50 L 22).

Adhæsiionsstyrke

Betonens vedhæftning til armeringsjern afhænger bl. a. af følgende forhold:

1. *Armeringsjernet's stilling.* Betons vedhæftning til lodret indstøbte jern påvirkes meget lidt af luftindblandingen.
2. *Vandudskillelse.* Efter betonens udstøbning sker der som tidligere omtalt en vandudskillelse. Vandet kan samle sig under vandret indstøbte armeringsjern og danne de såkaldte vandlommer. Herved vil adhæsionen mellem beton og armering reduceres.

I luftindblandet beton, hvor vandudskillelsen er meget lille, vil vedhæftningen mellem beton og armering altså af denne grund være bedre end i almindelig beton. Fig. 19.

3. *Luftansamlinger.* Ved bearbejdning (især vibrering) vil en del luft uddrives, såvel af luftindblandet som af almindelig beton. Denne luft vil under uddrivningen kunne danne luftansamlinger under vandret indstøbte armeringsjern. Disse luftansamlinger svækker adhæsionen mellem beton og armering, og mængden af luft kan blive større, jo højere jernet ligger i betonen. Luftmængden under jernet afhænger desuden af betonens tendens til at udskille luften (konsistens m. v.).

4. *Armeringsjernets profilering.* Det ovenstående gælder især for almindelig rundjern uden profilering. Ved armeringsjern som kamstål, tentorstål etc. har vandudskillelse og luftansamlinger ikke så stor betydning.

Da forholdet mellem adhæsiionsstyrken og trykstyrken er nogenlunde det samme for almindelig beton og luftindblandet beton med rimeligt luftindhold *er det kun nødvendigt at forlange en minimumstrykstyrke for betonen.* (50 L 22).

Elasticitetskoefficient

Arbejdslinien for luftindblandet beton har samme forløb som for almindelig beton, men elasticitetskoefficienten reduceres 2—3% for hver procent indblandet luft.

Slid

I almindelighed aftager slidfastheden, når trykstyrken aftager. Ved luftindblandet beton er formindskelsen ubetydelig ved et luftindhold på indtil 6%. Fra 6% til 10% mindskes slidfastheden stærkere. (46 K 4).

Ved luftindblanding kan man modvirke dannelsen af de porøse slam-lag med ringe slidfasthed, som ofte dannes ved almindelig beton.

Volumenændring

svind og krybning påvirkes ikke i væsentlig grad ved indblanding af luft.

Temperatur- og fugtighedsændringer påvirker luftindblandet beton med luftindhold indtil ca. 6% på samme måde som almindelig beton. Ved større luftindhold stiger volumenændringerne noget. (50 L 22).

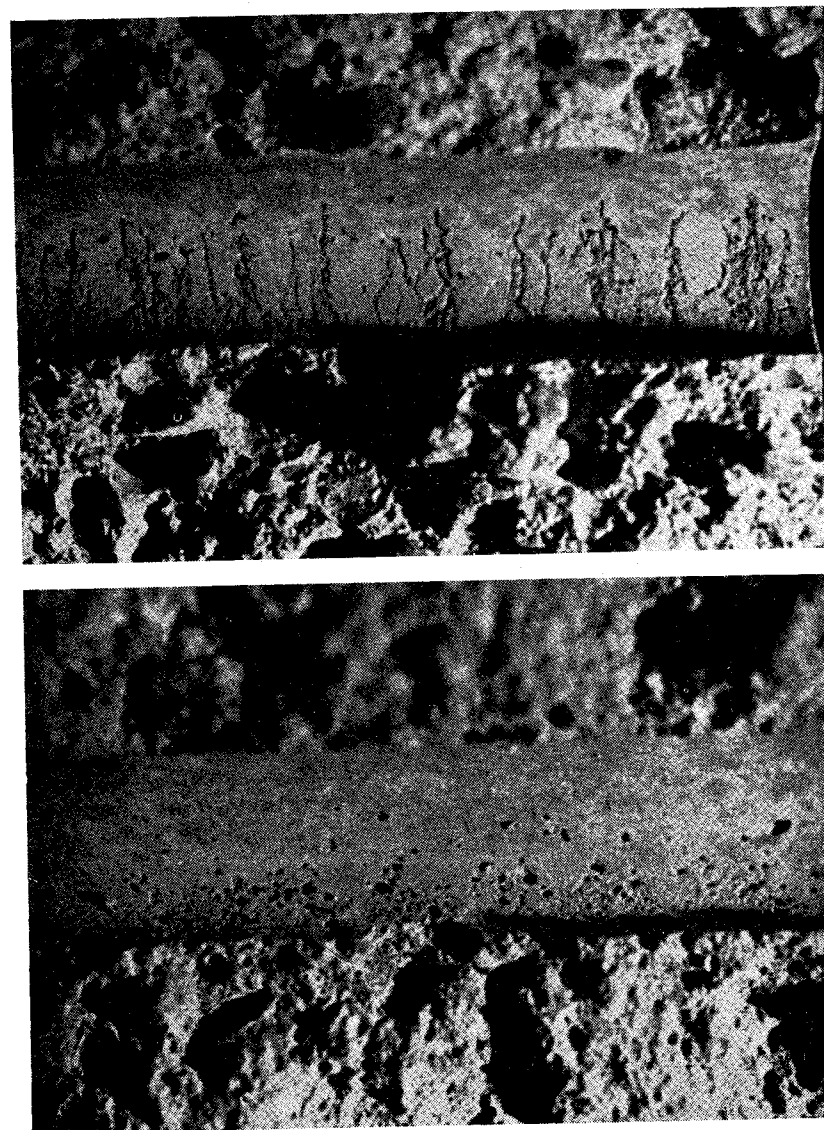


Fig. 19. Under vandret indstøbte armeringsjern fås i almindelig beton vandlommer og kanaldannelser (øverst). I luftindblandet beton fås luftansamlinger (nederst). (52-27).

LUFTMÆNGDENS VARIATION

Den indblandede luftmængde er ikke entydigt bestemt af den benyttede mængde luftindblandingsmiddel. En række faktorer indvirker på luftindholdet, og af hensyn til proportioneringen og den daglige kontrol gives en kortfattet oversigt over de enkelte faktoreres indflydelse, når de øvrige faktorer holdes konstante.

Luftindblandingsmiddel

Det er naturligt, at både luftindblandingsmidlets art og mængde har indflydelse på den indblandede luftmængde. Fig. 20.

De forskellige luftindblandingsmidler kan imidlertid også for et og samme luftindhold give forskellig vandreduktion, f. eks. på grund af forskel i størrelsen af de indblandede luftbobler. Af hensyn til styrken vil det være mest økonomisk at benytte det luftindblandingsmiddel, der giver størst vandreduktion.

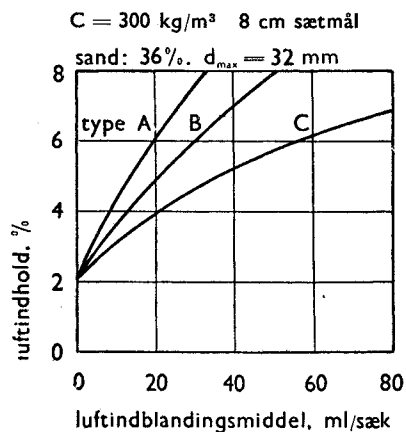


Fig. 20. Luftindholdet stiger mere med tilsætningsmængden ved luftindblandingsmidler af type A (billigt i brug) end ved type C (mindre følsomt for overdosering).

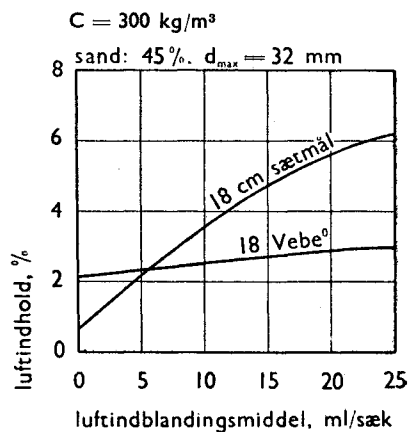


Fig. 21. Luftindholdet stiger mere med tilsætningsmængden for beton med blød konsistens end for beton med stiv konsistens. (53-9).

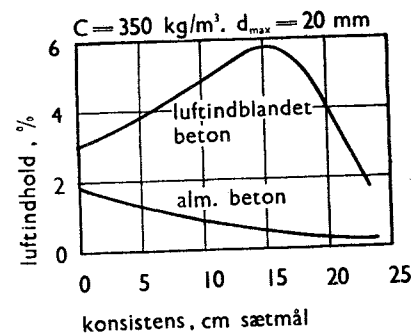


Fig. 22. Luftindholdet i almindelig beton aftager, når sæt målet vokser. I luftindblandet beton har luftindholdet maksimum for en konstant mængde luftindblandingsmiddel, når konsistensen er tykflydende. (50 A 16).

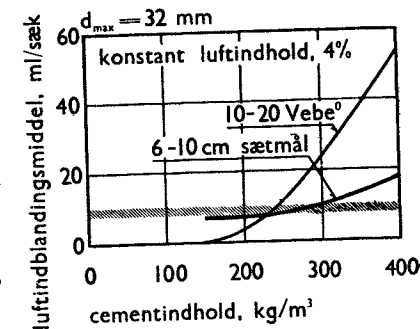


Fig. 23. Mængden af luftindblandingsmiddel til opnåelse af et konstant luftindhold på f. eks. 4 pct. må forøges med cementindholdet. Ved stive konsistenser kræves meget større mængder end angivet i brochurerne (skraveret areal) (53-9).

Konsistens

Maksimum af luftindhold ved en given tilsat mængde luftindblandingsmiddel opnås, når konsistensen er tykflydende. Fig. 22.

I mere flydende beton end svarende til denne konsistens, vil en del af de indblandede luftbobler ikke fastholdes, men undvige.

I stivere beton er det vanskeligt at få indblandet luft i betonen.

I begge tilfælde skal der derfor bruges større mængder luftindblandingsmiddel.

Ved tykflydende konsistens er det vigtigt, at luftindblandingsmidlet afmåles nøjagtigt. Fig. 22.

Betonens sammensætning

Betonens delmaterialer har forskellig indflydelse på luftindholdet. Cement og filler virker hæmmende, fig. 23, sand fremmende, og sten har ringe indflydelse på mængden af indblandet luft.

Tilslagsmaterialernes kornform indvirker på mængden af indblandet luft. Skarpkantet tilslag kræver mindre tilsætning af luftindblandingsmiddel end rundkornet tilslag for at opnå samme luftindhold. Skærver indeholder ofte stenmel, der medfører, at mængden af luftindblandingsmiddel må forøges. Da en given mængde luftindblandingsmiddel stort set indblander et bestemt luftindhold i betonens mørtel, vil luftindholdet, som procent af hele betonens rumfang, aftage, når maksimal stenstørrelse vokser.

Forskellige fabrikater og typer af cement kræver varierende tilsætning af luftindblandingsmiddel for opnåelse af det ønskede luftindhold. Man er derfor henvist til at bestemme den nødvendige mængde luftindblandingsmiddel for at opnå et givet luftindhold ved prøveblandinger.

Blandemetode

Da luftindblandingen er betinget af en vis »piskning« under blandingen, kan håndblanding give mindre luftindblanding end det, der opnås ved brugen af blandemaskiner, hvor betonen falder eller blandes ved vinger, der »pisker«. Det må derfor også her frarådes at basere en proportionering på håndblandede prøveblandinger, såfremt betonen under arbejdets udførelse skal maskinblandes. Størrelsen af prøveblandingen må ikke være for lille, men skal stå i et rimeligt forhold til blanderens størrelse, da også satsens størrelse har nogen indflydelse på luftindholdet. Ifølge danske erfaringer er der ingen væsentlig forskel på tvangsblenderes og fritfaldsblenderes evne til at indblende luft ved stive konsistenser.

Blandetid

Under blandingens første minutter stiger den indblandede luftmængde meget stærkt. Ved en eventuel efterfølgende blanding vil luftindholdet kun ændres lidt.

Man kan regne med tilfredsstillende udnyttelse af luftindblandingsmidlerne ved overholdelse af de normalt foreskrevne blandetider.

Alt skum er mere bestandigt ved lav end ved høj temperatur. Man får derfor mindre luft indblandet og fastholdt ved højere betontemperaturer. Luftmængdens variation med temperaturen er ikke lige udpræget for alle typer luftindblandingsmidler. Formindskelsen i luftmængden kan udgøre indtil en fjerdedel ved 10° temperaturstigning.

LUFTMÆNGDENS VARIATION I PRAKSIS

Ovenstående gennemgang af de faktorer, der påvirker luftindholdet, viser:

1. Den nødvendige mængde af luftindblandingsmiddel kan ikke bestemmes *alene* ud fra opgivelse i brochurer, men må findes ved forsøg med de materialer og den betonsammensætning man agter at anvende.
2. Luftindholdet må kontrolleres hyppigt, især hvor man ønsker en frostsikker beton uden for store reduktioner af styrken, da dette kræver, at luftindholdet skal ligge inden for snævre grænser.
3. For givne materialer og konstant forhold mellem cement, sand og sten vil de væsentligste ændringer i luftindholdet skyldes ændringer i konsistensen, medens temperaturen har mindre indflydelse i kortere arbejdsperioder.

Ved ringe kontrol med betonens sammensætning fra blanding til blanding kan også andre af de tidligere nævnte faktorer få indflydelse.

PROPORTIONERING

Proportionering af luftindblandet beton kan foretages enten ved små ændringer af en allerede foreliggende betonsammensætning, eller direkte ud fra forudsætningerne.

Ved gennemgang af proportioneringen omtales tre metoder, idet man begynder med den simpleste og ender med en metode, som med hensyn til nøjagtighed er i overensstemmelse med den »nøjagtige« metode for betonproportionering, der er udarbejdet af Meyer og Plum. (50 M 29).

Princippet for ændring af beton med given sammensætning til luftindblandet beton er fremstillet grafisk i fig. 24. Ved de enkelte figurer er til venstre angivet delmaterialernes vægt og absolutte rumfang. I skemaet under figuren er cementindholdet angivet pr. m³ beton. Den første figur viser betonen med den givne sammensætning, hvor der er ca. 1 % indkapslet luft (tabel 10).

1. trin. Ved tilsætning af et luftindblandingsmiddel bliver betonrumfanget større end 1 m³, og cementindholdet pr. m³ beton reduceres. Sætmålet bliver større, og bearbejdeligheden er stærkt forøget.
2. trin. For at opnå samme bearbejdelighed som før, formindskes vandmængden.
3. trin. For at opnå samme styrke som for den givne beton må cementindholdet forøges for beton med cementindhold over 250 kg/m³.
4. trin. For at reducere betonrumfanget til 1 m³ reduceres mængden af tilslagsmateriale.

Luftindblandingen gør det muligt at reducere sandprocenten, og dette er bl. a. en betingelse for at opnå den i 2. trin angivne reduktion i vandbehov.

Betegnelse	Almindelig beton	Luftindblandet beton					
		1. trin	2. trin	3. trin	4. trin		
		Luftindblandingsmiddel		15 kg cement		17 l tilslag	
Vand	180	180	162	162	162	162	162
Cement	300	300	300	315	315	315	315
Luft		96	96	101	101	101	101
Tilslag	1820	1820	1820	1820	1775	1775	1775
Ændring		+ .30 liter luft	÷ 18 liter vand	+ 15 kg cement ~ 5 liter	÷ 17 liter tilslag ~ 45 kg		
Formål		størreluftindhold	samme bearbejdelighed	samme styrke	fyldte 1000 liter		
Rumfang	1000 liter	1000 + 30 = 1030 liter	1030 ÷ 18 = 1012 liter	1012 + 5 = 1017 liter	1017 ÷ 17 = 1000 liter		
Vægt	2300 kg	2300 kg	2300 ÷ 18 = 2282 kg	2282 + 15 = 2297 kg	2297 ÷ 45 = 2252 kg		
Cement	300 kg/m ³	292 kg/m ³	297 kg/m ³	310 kg/m ³	315 kg/m ³		
Sand:sten	40:60	40:60	40:60	40:60	37:63		
Sætmål	givet	vokset	mindsket i forhold til den givne beton				
Bearbejdelighed	givet	stærkt forøget		samme som den givne beton			

Fig. 24. Ændring af alm. beton med given sammensætning til luftindblandet beton.

Nødvendigt luftindhold

Frostsikker beton

Et meget stort antal forsøg er udført af Paul Klieger på Portland Cement Association i U.S.A. (52 K 2) for at bestemme betingelserne for at opnå en frostsikker beton. Man fandt, at det nødvendige luftindhold i mørtelfractionen ($d \leq 4.8$ mm) var ca. 10% ved en afkølingshastighed af 11°C pr. time. Ved hjælp af Powers' teori (49 P 26) er tabellen omregnet til en afkølingshastighed på 5°C pr. time, der skulle give tilstrækkelig sikkerhed i det danske klima, selv for stærkt udsatte konstruktioner.

De i tabellen angivne tal vil give tilstrækkelig sikkerhed ved betonstøbning om vinteren i Danmark efter retningslinierne i Statens Byggeforskningsinstituts anvisning nr. 17. (53 N 2).

Da det er meget vigtigt, at de angivne luftindhold findes i betonen efter transport og komprimering, bør kontrol med luftindholdet foretages efter komprimeringen. Såfremt der konstateres væsentlige reduktioner i luftindholdet under komprimeringen (vibrering), må betonen have et større luftindhold, når den tømmes ud af blandemaskinen.

TABEL 1. Det gunstigste luftindhold i % af betonrumfanget for opnåelse af frostsikker beton i afhængighed af cementindhold C og største kornstørrelse d_{\max} .

cementindhold C kg/m ³	største kornstørrelse d_{\max} i mm				
	4	8	16	32	64
150	8.5	7.0	6.0	5.0	4.5
200	7.5	6.0	5.0	4.5	4.0
250	6.5	5.0	4.5	4.0	3.5
300	6.0	4.5	4.0	3.5	3.5
350	6.5	5.0	4.0	3.5	3.5
400	7.0	5.5	4.5	4.0	4.0
450	7.5	6.0	5.0	4.5	4.5

Bedre støbelig beton

Da den forbedring af den friske betons egenskaber, der bevirkes af luftindblandingen, kan opnås med mindre luftindhold end angivet i tabel 1, bør man i de tilfælde, hvor betonen ikke vil blive udsat for frysning i våd tilstand, ikke overskride de i tabel 2 angivne luftindhold, hvor der er taget hensyn til, at behovet for indblanding af luft for at forbedre støbeligheden er aftagende med stigende cementindhold. Med de angivne luftindhold vil styrken kun reduceres, når cementindholdet er større end 300—350 kg/m³.

TABEL 2. Det gunstigste luftindhold i % af betonrumfanget for opnåelse af forbedret støbelighed i afhængighed af cementindhold C og største kornstørrelse d_{\max} .

cementindhold C kg/m ³	største kornstørrelse d_{\max} i mm				
	4	8	16	32	64
150	7.5	6.0	5.0	4.5	4.0
200	6.5	5.0	4.5	4.0	3.5
250	6.0	4.5	4.0	3.5	3.0
300	5.5	4.0	3.5	3.0	2.5
350	5.0	3.5	3.0	2.5	2.0
400	4.0	3.0	2.5	2.0	1.5
450	3.5	2.5	2.0	1.5	1.0

Proportionering ved metode I

Ved denne metode ændres en almindelig beton med en given sammensætning til luftindblandet beton på følgende måde:

1. *Luftindholdet bestemmes* af tabel 1, hvis man ønsker en frostsikker beton eller af tabel 2, hvis man ønsker en beton med forbedret støbelighed.

2. *Vandmængden reduceres*, så man opnår den ønskede bearbejdelighed. Man må erindre, at man opnår samme bearbejdelighed for luftindblandet beton ved et noget mindre sætmål end for almindelig beton, som angivet i tabel 8.

3. *Cementindholdet*. Ved magre betonblandinger ($C = 150$ kg/m³ eller 1:4:8 efter rumfang) kan styrken under gunstige forhold forøges op til 15%. Ved blandinger med et cementindhold på ca. 300 kg/m³ (1:2½:3½ efter rumfang) kan styrketabet anslås til 0—5%. Ved fede blandinger ($C = 400$ kg/m³, d. v. s. 1:2:2 efter rumfang) må man regne med et styrketab på 3—4% pr. procent indblandet luft, selvom vand og sandmængden reduceres, og i dette tilfælde kan det blive nødvendigt at forøge cementindholdet.

4. *Tilslagsmængden reduceres* med 2—3 kg pr. sæk cement for hver procent indblandet luft. Hvis den oprindelige beton har haft et normalt blandingsforhold mellem sand og sten, vil den luftindblandede beton blive meget mørtelig og klæbrig, med mindre hele reduktionen af tilslagsmængden sker i sandet. Denne fremgangsmåde bevirker en yderligere formindskelse af vandbehovet.

Taleksempel. Der skal støbes jernbeton i rumfangsblandingsforholdet 1:2½:3½ ($v/c = 0.6$). Betonen skal benyttes i en udendørs konstruktion i kontakt med jord. Da betonen skal være frostsikker, benyttes tabel 1, hvor man finder det nødvendige luftindhold til 3.5%, ($C = 290$ kg/m³, $d_{\max} = 32$ mm).

Det oprindelige blandingsforhold er:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ sæk cement} &= 31 \text{ l portlandcement} = 42.5 \text{ kg cement} \\
 \text{til } 31 \cdot 2\frac{1}{2} &= 77 \text{ l sand à } 1.5 \text{ kg/l} = 115 \text{ kg sand} \\
 \text{til } 31 \cdot 3\frac{1}{2} &= 109 \text{ l sten à } 1.5 \text{ kg/l} = 164 \text{ kg sten} \\
 \text{til } 0.6 \cdot 42\frac{1}{2} &= 25 \text{ l vand} = 25 \text{ kg vand}
 \end{aligned}$$

Den oprindelige beton skønnes at få et sætmål på ca. 8 cm, hvis der benyttes sømaterialer (se tabel 6, $V = 290 \cdot 0.6 = 175$ l/m³).

Vandmængden reduceres; så der opnås samme bearbejdelighed, hvilket svarer til et sætmål på 6 cm (tabel 8). Cementmængden ændres ikke, og sandmængden reduceres med 2 kg pr. sæk cement for hver procent indblandet luft.

I dette tilfælde bliver sandreduktionen pr. sæk cement:

$$1 \cdot 2 \cdot 3.5 = 7 \text{ kg sand} \sim 5 \text{ l sand.}$$

Proportionering ved metode II

Ved mindre krævende arbejder, og såfremt der ikke i forvejen kendes en betonsammensætning for beton uden luftindblanding, kan man med fordel anvende de i tabellerne 3, 4 og 5 angivne blandingsforhold udregnet som vægtmængder/m³ færdig beton.

Tabel 3 angiver blandingsforholdet for almindelig beton uden luftindblanding og gives her for, at man kan sammenligne med tabel 4, hvor man har benyttet samme cementindhold som i tabel 3 uden korrektion for ændringerne i styrken. Tabel 5 angiver blandingsforholdene for luftindblandet beton, hvor man ønsker at opnå samme styrke som i tabel 3.

TABEL 3. Omtrentlige styrker og materialforbrug pr. m³ for almindelig beton. Portlandcement og sømaterialer forudsættes anvendt.

cement C kg/m ³	d _{max} mm	terningsstyrke ¹⁾ 20 cm, 28 døgn kg/cm ²		tilslag (tørvægt) kg/m ³		sandindhold ²⁾ % ≤ 4mm		udbytte liter/sæk c
		10-12 cm sætmål	0-2 cm ³⁾ sætmål	10-12 cm sætmål	0-2 cm ³⁾ sætmål	10-12 cm sætmål	0-2 cm ³⁾ sætmål	
150	64	115	140	1970	2060	45	42	280
200	32	170	230	1910	2030	46	43	210
250	32	245	320	1900	2010	45	42	170
300	32	320	410	1880	1980	43	40	145
350	16	345	465	1790	1920	50	47	120

¹⁾ Styrkerne er et middeltal af, hvad der kan opnås ved gode danske materialer, omhyggeligt arbejde og kontrol.

²⁾ Gælder for en velegnet sandsort.

³⁾ Svarer til ca. 5 vebe[°].

TABEL 4. Omtrentlige styrker og materialforbrug pr. m³ for luftindblandet, frostsikker beton med samme cementindhold som benyttet i tabel 3. Portlandcement og sømaterialer forudsættes anvendt.

ce- ment C kg/m ³	d _{max} mm	a %	terningsstyrke ¹⁾ 20 cm, 28 døgn kg/cm ²		tilslag (tørvægt) kg/m ³		sandindhold ²⁾ % ≤ 4mm		udbytte liter/sæk c
			8-10 cm sætmål	0-1 cm ³⁾ sætmål	8-10 cm sætmål	0-1 cm ³⁾ sætmål	8-10 cm sætmål	0-1 cm ³⁾ sætmål	
150	64	4.5	135	150	2020	2060	41	38	280
200	32	4.5	190	220	1960	2020	42	39	210
250	32	4.0	250	290	1910	1970	42	39	170
300	32	3.5	305	365	1860	1910	40	37	145
350	16	4.0	330	400	1770	1850	47	44	120

¹⁾ Styrkerne er et middeltal af, hvad der kan opnås ved gode danske materialer, omhyggeligt arbejde og kontrol.

²⁾ Gælder for en velegnet sandsort.

³⁾ Svarer til ca. 5 vebe[°].

TABEL 5. Omtrentlige styrker og materialforbrug pr. m³ for luftindblandet, frostsikker beton med samme styrke som tilstræbt i tabel 3.

cement C kg/m ³	d _{max} mm	a %	terningsstyrke ¹⁾ 20 cm, 28 døgn kg/cm ²		tilslag (tørvægt) kg/m ³		sandindhold ²⁾ % ≤ 4 mm		udbytte liter/sæk c		
			8-10 cm sætmål	0-1 cm ³⁾ sætmål	8-10 cm sætmål	0-1 cm ³⁾ sætmål	8-10 cm sætmål	0-1 cm ³⁾ sætmål	8-10 cm sætmål	0-1 cm ³⁾ sætmål	
135	145	64	4.5	115	140	2030	2060	41	38	315	290
185	200	32	4.5	170	230	1980	2020	42	39	230	215
245	270	32	4.0	245	320	1910	1950	42	39	175	160
305	335	32	3.5	320	410	1860	1900	40	37	140	130
360	400	16	4.0	345	465	1760	1800	47	44	120	105

¹⁾ Styrkerne er et middeltal af, hvad der kan opnås ved gode danske materialer, omhyggeligt arbejde og kontrol.

²⁾ Gælder for en velegnet sandsort.

³⁾ Svarer til ca. 5 vebe[°].

Proportionering ved metode III

En nøjagtig proportionering af luftindblandet beton foretages principielt på samme måde som for almindelig beton, d. v. s. at man på basis af formler eller tabeller udregner et første blandingsforhold, der benyttes ved fremstilling af en prøveblanding. På grundlag af resultaterne herfra udregnes det endelige blandingsforhold. Ved hjælp af og ud fra den foreskrevne styrke bestemmes det nødvendige forhold mellem cement og vand + luft (den udvidede Bolomey-formel). Når vandindholdet er bestemt for almindelig beton ved hjælp af tabel eller lignende, skønnes en reduktion af vandmængden ud fra cementmængden og den indblandede luftmængde. Den forøgede bearbejdelse gør det muligt at sænke grusets kornkurve i sandområdet. Fremgangsmåden fremgår af det følgende og eksemplerne side 46–49.

Trykstyrke

Luftindblandet betons trykstyrke kan forudsiges ved hjælp af den udvidede Bolomey-formel:

$$\sigma = 0.9 K \left(\frac{c}{v + 1} - 0.25 \right)$$

hvor K er konstanten fra Bolomey's formel for almindelig beton, side 24. K er afhængig af betonens alder, cementens art og kvalitet, grusets overfladeruhed, prøvelegemets form m. v. og bør derfor bestemmes ved prøvestøbninger. For danske materialer vil K som regel have følgende værdier:

For almindelig portlandcement $K = 250\text{--}300 \text{ kg/cm}^2$ for 20 cm terninger efter 28 døgns lagring i overensstemmelse med DS 411.

For hurtighærdnende portlandcement $K = 300\text{--}350 \text{ kg/cm}^2$ for 20 cm terninger efter 14 døgns lagring. Til den foreskrevne styrke gives et sikkerhedstillæg i afhængighed af, hvilken kontrolklasse arbejdet udføres efter. Den tilstræbte styrke i proportioneringen skal være 10% højere for kontrolklasse A og 15% højere for kontrolklasse B.

Vandbehov

Vandbehovet for almindelig beton kan bestemmes på sædvanlig måde eller ved hjælp af tabel 6.

TABEL 6. Omtrentligt vandbehov for almindelig beton. De angivne vandmængder er inklusive fugtighed i materialerne.

komprimeringsmetode		håndstamping			vibrering		
tilslag	d _{max} mm	sætmål 12 cm		korrektion, liter pr. cm sætmål	sætmål 2 cm*		korrektion, liter pr. cm sætmål
		sømat.	bakkem.		sømat.	bakkem.	
ærtsten ..	16	205	220	± 3.0	160	170	± 2.5
nøddesten .	32	185	200	± 2.5	150	160	± 2.5
singels ...	64	175	190	± 2.5	150	160	± 2.0

Kun til prøveblanding og foreløbigt brug.

* ca. 5 vebe°.

De i tabellen angivne værdier er ikke minimumsværdier, men snarere maksimumsværdier, som ikke bør overskrides uden at forsøge en ændring af forholdet mellem sand og sten d. v. s. ændring af kornkurven.

Tabellen gælder iøvrigt for sø- og bakkematerialer med almindelig god kornform. For skærver gives et tillæg på 10–15%.

Vandbehovet for luftindblandet beton er mindre end angivet i tabel 6, idet luftindblandingen i sig selv bevirker en reduktion i vandbehovet. Det er muligt at opnå samme bearbejdelse med en mindre sandmængde og et mindre sætmål, som angivet i tabel 8. Den samlede vandreduktion er angivet pr. procent luftindhold i tabel 7. Luftindhold og vandreduktion regnes proportionale.

Tabellen er baseret på danske forsøg (53–9) og talrige udenlandske opgivelser. (53 W 4), (52–28).

TABEL 7. Samlet procentvis reduktion i vandbehov pr. procent luft for beton, hvis sten har aflang, afrundet kornform.

cementindhold kg/m ³	komprimeringsmetode	
	håndstamping	vibrering
150	4.0	3.5
200	3.5	3.0
250	3.0	2.5
300	2.5	2.0
350	2.0	1.5
400	1.5	1.0
450	1.0	0.5

Kun til prøveblanding og foreløbigt brug.

For skærver gives et tillæg på 0.5 enhed. De anførte værdier gælder for $d_{\text{max}} > 8 \text{ mm}$. Ved pumpebeton skal støbevandet alene give betonen et sætmål på mindst 5 cm. (53 I 1).

almindelig beton	luftindbl. beton
15 cm	11—12 cm
12 »	9—10 »
10 »	7—8 »
8 »	5—6 »
6 »	4—5 »
3 »	1—2 »

TABEL 8. Sætmål for luftindblandet beton ($a = 4\%$) med samme bearbejdelighed som en tilsvarende almindelig beton.

Kun til prøveblanding og foreløbigt brug.

Konsistens

Luftindblandet beton er mere sammenhængende end almindelig beton, og samme bearbejdelighed kan opnås med mindre sætmål som angivet i tabel 8. Denne sætmålsreduktion, der gælder for et luftindhold på 4%, er taget i betragtning i tabel 7. Hvis betonen ikke bearbejdes ved kraftig håndstampning eller vibrering, må sætmålet ikke reduceres.

Cementindhold

Ved anvendelse af den udvidede Bolomey-formel:

$$\sigma = 0.9 K \left(\frac{c}{v + 1} - 0.25 \right)$$

kan man beregne den nødvendige værdi af $\frac{c}{v + 1}$ for at opnå en ønsket styrke. Når vandbehovet V i liter/ m^3 er bestemt af tabel 6 og 7 og luftindholdet L i liter/ m^3 af tabel 1 eller tabel 2, kan cementindholdet C i kg/m^3 beregnes. (Cementindholdet skal også opfylde kravene i DS 411, § B7, tabel 2).

Grusets sammensætning

Da luftindblandet beton virker federe og er mere sammenhængende end almindelig beton, vil man almindeligvis ikke behøve at tilsætte et særligt fillermateriale.

Sandmængden ($d \leq 4$ mm) for almindelig beton afhænger af største stenstørrelse, cementindhold, komprimeringsmetode, tilslaget beskaffenhed og betonens anvendelse. Der tilstræbes et sandindhold, som giver den ønskede bearbejdelighed med mindst muligt vandbehov.

TABEL 9. Omtrentligt sandindhold ($d \leq 4$ mm) i % af samlet tilslag for almindelig beton.

cementindhold C kg/m^3	største kornstørrelse d_{max} i mm				
	8	12	16	32	64
150	74	61	56	47	45
200	73	60	55	46	44
250	72	59	54	45	43
300	71	58	52	43	41
350	70	56	50	41	39
400	68	54	48	39	37
450	66	52	46	37	35

Kun til prøveblanding og foreløbigt brug.

TABELLENS FORUDSÆTNINGER

Komprimering: Håndstampning for vibrering fradrag: 2—5 enheder
 Tilslag: Sø- og bakkematerialer for skærver tillæg: 2—5 enheder
 Armering: Tætliggende armering for åben armering fradrag: 2—5 enheder
 Sandets finhedsmodul: ca. 2.3 ændring ± 0.1 i FM ændring: ± 1 enhed

Ved indblanding af luft i beton vil mørtelvolumenet forøges, og man må derfor foretage en reduktion af sandmængden i forhold til almindelig beton.

Reduktionen i sandmængden kan sættes til $a - 1$, hvor a er luftindholdet i procent, og sandmængden udregnes for almindelig beton.

Til bestemmelse af sandindholdet for almindelig beton til brug for prøveblandinger kan man som orientering benytte tabel 9.

Luftindblandingsmiddel

For de fleste luftindblandingsmidler opgives af forhandleren den omtrentlige mængde, der skal tilsættes pr. sæk cement.

Før man fastsætter tilsætningsmængden, bør man gennemgå de faktorer, der har indflydelse på luftmængdens variation, (se side 30—32). Der udtages 2—3 repræsentative prøver, og luftindholdet bestemmes som middeltal af disses luftindhold. Afvigelserne fra middeltallet må ikke overskride 0.2 enheder.

PROPORTIONERINGSEKSEMPLER

A. Ændring af en given beton

Den givne beton:

Cement:	300 kg/m ³	vf. 3.12 kg/l	96 l/m ³	} 289 l/m ³
Vand:	180 »	1.00 »	180 »	
Luft:			13 »	
Tilslag:	1880 »	2.65 »	711 »	
	2360 kg/m ³		1000 l/m ³	

Sand : sten = 40 : 60 %

c : sa : st : v = 1 : 2.51 : 3.76 : 0.60

Tilslag : Sømateriale

Kornform : aflang (irregulær)

d_{max} = 32 mm

Sætmål: 10 cm

Tilstræbt terningstyrke (20 cm) : $\sigma_{28} = 320 \text{ kg/cm}^2$

Åben armering

Kontrolklasse A.

Der anvendes luftindblandet beton for at opnå bedre støbelighed.

a) Samme cementindhold

Luftindhold: Ud fra tabel 2 fastsættes det totale luftindhold til 3%.

Konsistens og vandreduktion: Ud fra tabel 8 fastsættes det tilstræbte sætmål til 8 cm og af tabel 7 forudsiges vandreduktionen til:

$$\Delta V = 3 \cdot 2.5\% \text{ af } 180 = 14 \text{ l/m}^3$$

Trykstyrke: Den søgte betons styrke forudsiges til:

$$\sigma = 0.9 \cdot 275 \cdot \left(\frac{300}{180 - 14 + 30} - 0.25 \right) = 315 \text{ kg/cm}^2.$$

Tilslagets sammensætning: Sandprocenten findes til:

$$40 - (3 - 1) = 38\%.$$

Mængder:

Cement:	300 kg/m ³	vf. 3.12 kg/l	96 l/m ³	} 292 l/m ³
Vand:	166 »	1.00 »	166 »	
Luft:			30 »	
Tilslag:	1875 »	2.65 »	708 »	
	2341 kg/m ³		1000 l/m ³	

Betonens endelige sammensætning bliver således:

$$c : sa : st : v = 1 : 2.37 : 3.87 : 0.55$$

b) Samme styrke

Luftindhold: Ud fra tabel 2 fastsættes det tilstræbte luftindhold til 3%.

Konsistens og vandreduktion: Ud fra tabel 8 fastsættes det tilstræbte sætmål til 8 cm og af tabel 7 anslås vandreduktionen til:

$$\Delta V = 3 \cdot 2.5\% \text{ af } 180 \text{ l/m}^3 = 14 \text{ l/m}^3.$$

Cementindhold: For den givne beton haves:

$$\frac{c}{v+1} = \frac{300}{180 + 13} = 1.56$$

Cementindholdet for den søgte beton bliver da:

$$C = 1.56 \cdot (180 - 14 + 30) = 305 \text{ kg/m}^3.$$

Mængder:

Cement:	305 kg/m ³	vf. 3.12 kg/l	98 l/m ³	} 294 l/m ³
Vand:	166 »	1.00 »	166 »	
Luft:			30 »	
Tilslag:	1877 »	2.65 »	706 »	
	2348 kg/m ³		1000 l/m ³	

Tilslagets sammensætning: Sandprocenten findes til:

$$40 - (3 - 1) = 38\%.$$

Betonens endelige sammensætning bliver således:

$$c : sa : st : v = 1 : 2.33 : 3.83 : 0.54.$$

B. Proportionering ved prøveblanding

Krav til betonen:

Terningstyrke (20 cm) = 300 kg/cm²

Konsistens: 10 cm sætmål

Kontrolklasse A, håndstampning

Åben armering

Cement: Dansk Portlandcement

Tilslag: Sømateriale

Kornform: aflang (irregulær)

$d_{\max} = 32$ mm

$v_f = 2.65$ kg/l

Porøsitet: 0.5% (trykmetoden)

$FM_{sa} = 2.3$

Luftindhold: Af tabel 2 bestemmes det tilstræbte totale luftindhold til 3%.

Konsistens og vandindhold: Af tabel 8 bestemmes det tilstræbte sætmål til 8 cm og af tabel 6 og 7 bestemmes vandbehovet til:

$$V = V_0 - \Delta V = 180 - 3 \cdot 2.5\% \text{ af } 180 = 166 \text{ l/m}^3.$$

Cementindhold: Ud fra den tilstræbte styrke $1.1 \cdot 300 = 330$ kg/cm² bestemmes $\frac{c}{v+1}$ af følgende ligning:

$$330 = 0.9 \cdot 275 \left(\frac{c}{v+1} - 0.25 \right)$$

$$\frac{c}{v+1} = \frac{330}{0.9 \cdot 275} + 0.25 = 1.59 \text{ kg/l.}$$

Cementindholdet bestemmes derefter til:

$$C = 1.59 \cdot (166 + 30) = 315 \text{ kg/m}^3.$$

Tilslagets sammensætning: Af tabel 9 bestemmes sandprocenten til:

$$(43 - 3) - (3 - 1) = 38\%$$

Mængder:

Cement:	315 kg/m ³	vf. 3.12 kg/l	101 l/m ³	} 297 l/m ³
Vand:	166 »	1.00 »	166 »	
Luft:			30 »	
Tilslag:	1863 »	2.65 »	703 »	
	2344 kg/m ³		1000 l/m ³	

Betonens endelige sammensætning bliver således:

$$c : sa : st : v = 1 : 2.24 : 3.66 : 0.53.$$

Prøveblanding

Der skønnes en tilsætning af et luftindblandingsmiddel på 10 ml pr. sæk cement og af en prøveblanding på 60 liter bestemmes:

1. Sætmål: 6 cm
2. Korrigeret luftindhold ved trykmetoden: $2.5 - 0.5 = 2.0\%$.

Den fordrede mængde luftindblandingsmiddel forudsiges til:

$$m_0 = 10 \cdot \frac{3.0 - 1.3}{2.0 - 1.3} = 24 \text{ ml pr. sæk cement.}$$

Af en ny prøveblanding med denne mængde tilsætningsmiddel konstateres:

1. Sætmål: 8 cm.
2. Korrigeret luftindhold ved trykmetoden: $3.6 - 0.5 = 3.1\%$.
3. 7 døgns styrken $\sigma_7 = 275 \text{ kg/cm}^2 \geq 0.8 \cdot 330 \text{ kg/cm}^2$.
(DS 411, side 21).

MÅLING AF LUFTINDHOLDET

Frisk beton

Kontrol med luftindholdet er vigtigt, fordi betonens styrke reduceres med 3–5 % for hver procent luft, der indblandes udover det luftindhold, man har fastsat ved proportioneringen.

Ved fremstilling af frostsikker beton er det på den anden side betydningsfuldt at sikre sig, at betonen har det luftindhold, der er angivet i tabel 1, side 36, da modstandsevnen hurtigt aftager, når luftindholdet synker under den gunstigste værdi, se fig. 10.

Kun luftindholdet, der findes i betonen efter komprimeringen, har betydning for betonens holdbarhed, og kontrollen må derfor udføres på en sådan måde, at det bestemte luftindhold svarer til den færdigbehandlede betons luftindhold.

Der findes kun få undersøgelser i udlandet vedrørende de grænser, der bør opstilles for luftindholdets variation, men erfaringerne synes dog at vise, at det vil være rimeligt at kræve, at afvigelserne fra de foreskrevne luftindhold ikke overskrider:

Kontrolklasse	A: ± 0.5 volumenprocent luft		
—	B: ± 1.0	—	—
—	lavere end B: ± 1.5	—	—

Umiddelbart skulle man forvente, at variation i luftindholdet ville betyde en forøgelse af variationen i betonstyrken, men erfaringerne viser foreløbig, at den forbedrede støbelighed som følge af luftindblandingen forøger betonens ensartethed, hvorved man opnår væsentlig mindre variationer i styrken af luftindblandet beton sammenlignet med almindelig beton.

Ved anvendelse af luftindblandingsmidler for at opnå beton med bedre støbelighed er det ikke så væsentligt, at en del af den indblandede luft

er undvejet under transport og bearbejdning. Hvis betonen ikke senere bliver udsat for frostpåvirkninger, vil det nærmest være en fordel, såfremt den indblandede luft delvis uddrives, idet styrkereduktionen derved formindskes.

Forskellige metoder til kontrol med den friske betons luftindhold er kort gennemgået i det følgende. Den detaljerede fremgangsmåde findes i et tillæg side 66.

Rumvægtsmetoden

Betonens rumvægt formindskes ved luftindblanding. Såfremt man kender betonens rumvægt uden luft og bestemmer den friske betons rumvægt ved vejning af et kendt betonvolumen, kan luftindholdet beregnes.

Rumvægtsmetoden kan således benyttes, når betonsammensætningen og delmaterialernes vægtfylde er nøjagtig kendt og stadig kontrolleres. Under disse omstændigheder kan den endvidere benyttes som kontrol på luftindholdsbestemmelser ved andre metoder.

Pyknometermetoden

Ved pyknometermetoden bestemmes luftindholdet i en betonprøve ved at veje denne under vand før og efter en omrøring, der bevirker, at luften uddrives af prøven. Når herudover betonprøven vejes før vand hældes over, kan dens rumfang bestemmes og heraf luftindholdet i procent af betonrumfanget.

Med de bestemte størrelser samt kendskab til delmaterialernes vægtfylde og blandingsforholdet kan luftindholdet endvidere beregnes ved rumvægtsmetoden som kontrol.

Til pyknometermetoden kræves et ret stort antal nøjagtige vejninger.

Som pyknometerglas benyttes almindelige henkogningsglas eller cylinderglas med plansleben rand.

Rullemetoden

Ved rullemetoden fyldes en specielt konstrueret beholder ca. halvt med et kendt betonvolumen. Det resterende volumen fyldes med vand til et nulmærke, og beholderen lukkes. Den rystes, rulles eller vugges derefter kraftigt, således at al luft udvaskes. Det rumfang vædske, der kræves til efterfyldning, angiver da luftindholdet. Fig. 25.

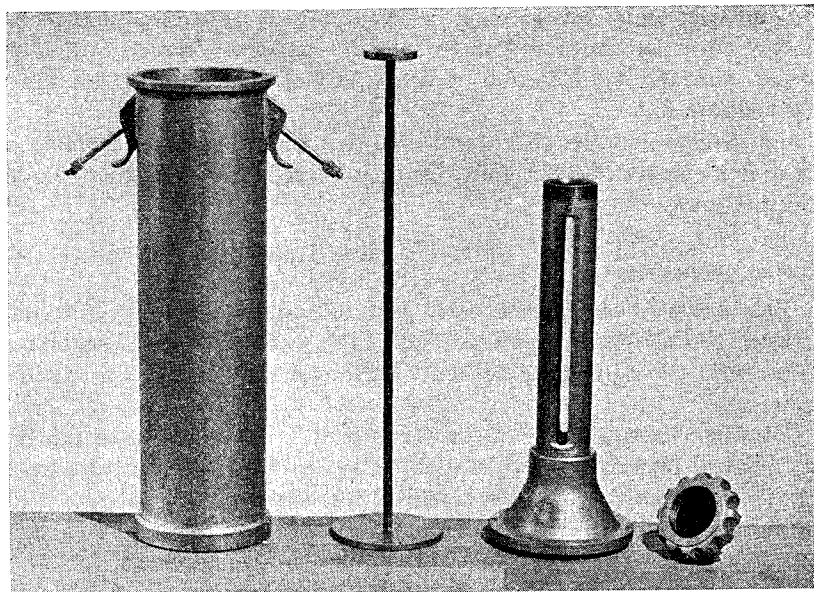


Fig. 25. De fire bestanddele af et Meyer-meter. (Luftindholdsbestemmelse ved rullemetoden).

Udvaskningsprocessen må eventuelt gentages en eller flere gange. Metoden kan derfor være noget tidskrævende. Til gengæld kræves ikke vejning, og kendskab til betonsammensætning er ikke nødvendigt.

Nogle amerikanske luftmålere og det danske *Meyer-meter* er baseret på dette princip.

Trykmetoden

Acme luftmåler. Metoden er baseret på Boyle-Mariottes lov, og luftindholdet bestemmes på følgende måde:

En specielt konstrueret beholder fyldes med et kendt betonvolumen. En overdel fastspændes lufttæt til beholderen, og man påfylder vand til et nulmærke. Ved hjælp af en luftpumpe forøges lufttrykket til et bestemt overtryk (i bjergegne må korrigeres for trykdifferenser). Volumenformindskelsen er da afhængig af luftindholdet, og luftprocenten kan direkte aflæses på en skala. Fig. 26.

Press-ur-metret. Denne metode bygger også på Boyle-Mariottes lov, og luftindholdet bestemmes på følgende måde: En specielt konstrueret beholder fyldes med et kendt betonvolumen, og en overdel fastspændes. Et luftkammer pumpes op til et bestemt overtryk uden at være i forbindelse med beholderen, der indeholder betonprøven. Når man derefter åbner en ventil mellem de to luftrum, vil der ske en trykudligning, idet de indblandede luftbobler sammenpresses. Luftprocenten kan direkte aflæses. Fig. 27.

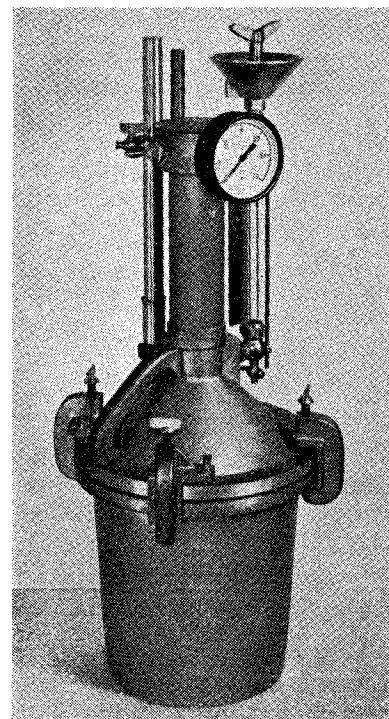


Fig. 26. Acme-måler til luftindholdsbestemmelse ved trykmetoden. (50-89).

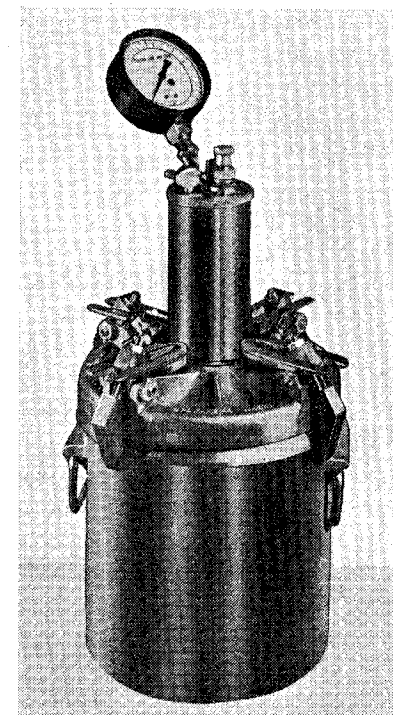


Fig. 27. Press-ur-meter til luftindholdsbestemmelse ved trykmetoden. (50-89).

Hærdnet beton

Luftindholdet kan beregnes ved mikroskopisk undersøgelse af polerede snitflader i den hærdnede beton, hvor luftboblernes antal, størrelse og indbyrdes afstand bestemmes. (47 V 1), (51 L 7). Luftindholdet kan ligeledes bestemmes ved knusning af en betonprøve til et pulver med samme finhed som cement, hvorefter vægtfylden bestemmes og benyttes til beregning af de faste stoffers volumen, der fratrækkes betonprøvens volumen før knusningen. Metoden kræver beregning af betonens indhold af fordampeligt vand og grusmaterialernes porøsitet. Korrektionerne bliver således afhængige af betonprøvens hærdningsgrad. (50 K 11).

Man har forsøgt at bestemme luftindholdet i den hærdnede beton ved mætning ved hjælp af vacuum med en vædske, der ikke reagerer med betonens bestanddele (50 K 11) og ved anvendelse af de samme principper, som benyttes ved bestemmelse af luftindholdet i frisk beton ved trykmetoden. (50 A 16), (49 V 1). Disse metoder kræver specielt laboratorieudstyr og er behæftet med en del principielle vanskeligheder.

Den mikroskopiske metode giver de bedste oplysninger, men tager ret lang tid at udføre.

ARBEJDSTEKNIK**Afmåling af materialer**

Luftindblandingsmidler bevirker som tidligere nævnt en lang række forbedringer af betonens egenskaber, men betyder ikke, at der kan udvises mindre omhu end normalt med hensyn til afmåling af materialer, betonens blanding etc. På den anden side kræves der ikke særlige foranstaltninger for at anvende luftindblandet beton, udover at man må benytte en pålidelig metode til afmåling og tilsætning af selve luftindblandingsmidlet. Metodens nøjagtighed må tilpasses efter den nøjagtighed, der iøvrigt udvises ved materialernes afmåling og den ensartethed af betonens kvalitet, der tilstræbes, samt efter den benyttede arbejds-teknik.

I et foregående afsnit (s. 30) er omtalt, hvorledes luftmængden varierer med en lang række faktorer.

Såfremt der under et arbejdes udførelse føres nogenlunde omhyggelig kontrol, der sikrer en ensartet beton, vil der sjældent blive tale om stadige reguleringer af mængden af tilsætningsmiddel, medmindre der fremstilles flere typer beton, som er forskellige med hensyn til cementindhold, konsistens m. v. Det kan nævnes, at man ved udførelse af betonbelægninger her i landet med konstant tilsætningsmængde igennem et par måneder har opnået et luftindhold på 3.5 % med en absolut spredning*) på 0.2—0.3 %, d. v. s. at luftindholdet i procent har været 3.5 ± 0.5 . Den herved forårsagede variation i betonstyrken kan anslås til højst ± 2 %.

*) Spredningen kan beregnes som $s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$, hvor \bar{x} er middeltallet, x er enkeltobservationerne, n er antallet af observationer.

Apparater til afmåling af luftindblandingsmiddel

Den anvendte metode bør være enkel, pålidelig og let at anvende. Såfremt der fremstilles beton, der varierer med hensyn til cementindhold og konsistens, må mængden af luftindblandingsmiddel kunne varieres over brugsområdet ved en hurtig omstilling. De benyttede afmålingsapparater bør være fremstillet således, at de ikke tilstoppes af f. eks. cement, indtørret luftindblandingsmiddel eller evt. bundfald, og deres nøjagtighed må ikke væsentligt forringes under brugen på grund af slid.

Øse

Det enkleste hjælpemiddel er en beholder, der lige netop indeholder det ønskede rumfang af luftindblandingsmiddel. En større beholder med luftindblandingsmidlet stilles ved siden af blandemaskinen, og herfra fyldes målebeholderen ved hjælp af en øse, hvorpå vædsken hældes direkte i blandemaskinen. Såfremt der anvendes beton med varierende sammensætning og konsistens må der forefindes målebeholdere af forskellig størrelse.

Denne meget enkle tilsætningsmetode er anvendelig selv ved større arbejder, men kræver kontrol med at der tilsættes een og kun en dosis tilsætningsmiddel for hver blanding.

Ved mindre blandemaskiner bliver mængden af tilsætningsmiddel pr. blanding så lille, at det af hensyn til nøjagtigheden vil være en stor fordel at anvende opløsninger, der er fortyndet så stærkt, at der f. eks. skal bruges $\frac{1}{2}$ liter opløsning pr. blanding.

Burettemåler

Et andet enkelt apparat er et måleglas i form af et lodret graderet stigrør anbragt på aftapningsrøret fra en større beholder med luftindblandingsmiddel, der er anbragt ca. 1 m over hanerne. Buretten (stigrør) fyldes til den ønskede højde ved at indstille en tregangshane således, at der er forbindelse mellem den store beholder med luftindblandingsmiddel og buretten. Ved udtømmning drejes tregangshanen, hvorved tilførsel af luftindblandingsmiddel fra beholderen forhindres. Apparatet er enkelt og let at fremstille, og med lidt øvelse kan de ønskede mængder afmåles med stor sikkerhed. Ændring af mængderne er let at foretage.

Brickett-måler

Dette apparat består principielt af en kasseformet målebeholder med stigrør og indstilleligt udløbsrør. Mængden af luftindblandingsmiddel reguleres ved at ændre udløbsrørets højde ved hjælp af et håndtag, der på en skala direkte viser den afmålte mængde. Måleren fyldes fra et højereliggende reservoir, der gennem en tregangsventil er forbundet til både måleren og til røret, der fører til blandemaskinen. Med ventilen i 1. stilling fyldes måleren og stigrøret, som er ført op til over øverste vædskestand i reservoiret. Drejes ventilen til 2. stilling, lukkes for tilløbet fra reservoiret og åbnes for måleren, så denne tømmes ud i blandemaskinen. Som reservoir kan benyttes en 8–10 liter flaske, der anbringes i omvendt stilling med halsen i en mindre bakke, hvorfra et rør fører til tregangsventilen. Dette arrangement giver en konstant vædskehøjde over måleren, og stadig kontrol med mængden af luftindblandingsmiddel i reservoiret.

Aftapningsledningen fra måleren bør afbrydes under tregangsventilen, og der bør indskydes en tragt noget under munden. Operatøren kan derved kontrollere, at luftindblandingsmidlet flyder hurtigt til blandingen, og at hele portionen udtømmes fuldstændigt, inden hanen drejes til genfyldning af måleren. En del af stigrøret bør være af gennemsigtigt

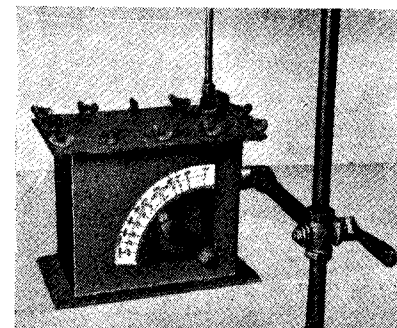


Fig. 28. Brickett-måler til afmåling af luftindblandingsmidler. (50–90).

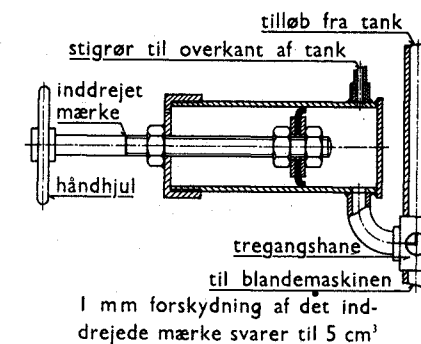


Fig. 29. Dansk udformning af Acme-princippet for afmåling af luftindblandingsmidler.

materiale, for at det kan kontrolleres, at måleren virkelig fyldes hver gang. På grund af den luft, der suges igennem stigrøret, hver gang måleren tømmes, kan det ske, at røret efterhånden tilstoppes med cement, støv og indtørret luftindblandingsmiddel. Stigrøret skal derfor med mellemrum afmonteres og renses med varmt vand og en stiv børste. På grund af rystelserne i et transportabelt anlæg er det bedst at montere måleren på et bræt tæt ved blandemaskinen.

Acme-måler

Acme-måleren er en variant af Brickett-måleren. Målebeholderen er cylinderformet, udløbsåbningens højde er konstant, men beholderens rumfang kan ændres ved hjælp af et forskydeligt stempel. I lighed med Brickett-måleren er Acme-måleren forsynet med stigrør og tregangshane.

Wattmåler

Principielt består disse målere af en pumpe med variabel stempelslaglængde. Den ene bevægelse af stemplet suger en portion luftindblandingsmiddel ind i cylinderen, den anden pumper den ud i en ledning, der fører til blandemaskinen. Stemplets slaglængde reguleres ved hjælp af en stille-skrue med kontramøtrik. Pumpen leveres med stativ, der let monteres på tromlen med luftindblandingsmidlet. Da målere af Watt-typen arbejder efter trykprincippet, er de uafhængige af, om måleren står vandret.

Målere af Brickett-, Acme- og Watt-typen har som regel et måleområde fra ca. 115 til ca. 1150 ml. De kan gøres helt eller delvis automatiske. Dette opnås ved at forbinde henholdsvis tregangshanen eller pumpestangen til f. eks. blandemaskinens material-elevator på en sådan måde, at måleren tømmes, når elevatoren går op, og fyldes, når den går ned. Forbindelsen bør ske gennem en fjederanordning, således at fuldstændig tømning af elevatoren kan sikres ved at rykke den frem og tilbage i øverste stilling, uden at der tilføres mere luftindblandingsmiddel til betonblandingen. En sammenkobling af håndtagene til støbevandet og luftindblandingsmiddel er uhensigtsmæssigt, hvis betonens rette konsistens opnås ved først at tilsætte en fast mængde støbevand og derefter små mængder ved at åbne lidt for tregangshanen til vandbeholderen, da der samtidig vil blive tilsat mere luftindblandingsmiddel.

Oliepumpe

En almindelig oliepumpe kan benyttes, men de afmålte mængder skal helst være ca. 1 liter, og det er derfor nødvendigt at fortynde luftindblandingsmidlet meget stærkt.

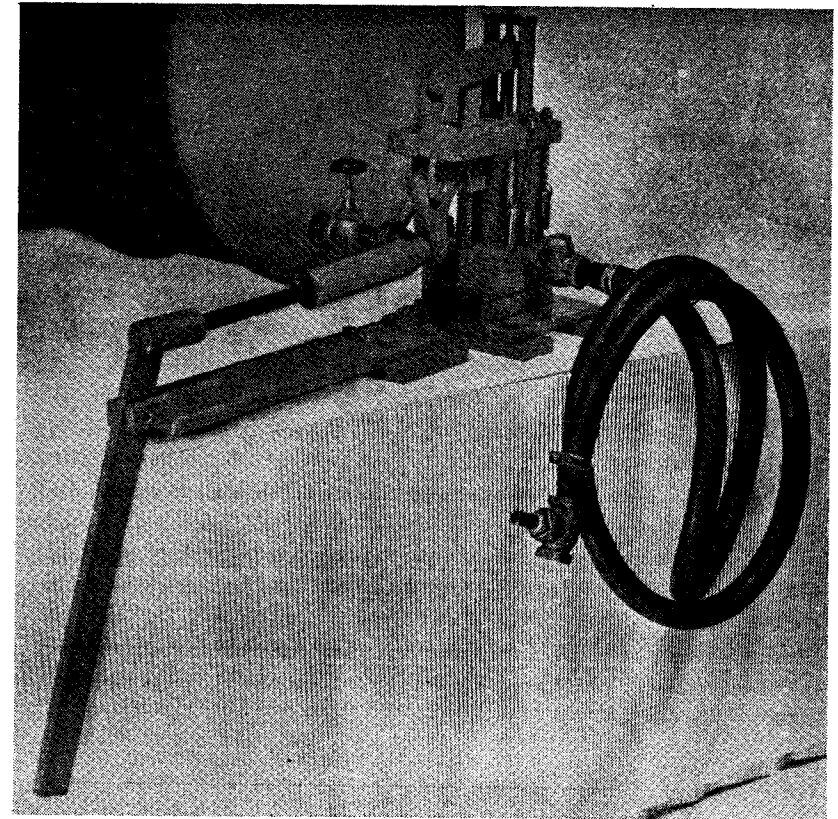


Fig. 30. Watt-måler til afmåling af luftindblandingsmidler. (50-90).

Automatiske apparater

Ved meget store arbejder eller i fabrikker for færdigblandet beton kan målere af *Brickett*-typen gøres helautomatiske ved anvendelsen af en *elektrisk styret tregangsventil* i forbindelse med et tidsindstillet afbryder-ur. Slutning af strømmen åbner målerens afløbsventil, og efter en tidsperiode, der sikrer fuldstændig tømning af måleren, lukker uret for afløbsventilen og åbner for påfyldningsventilen. Vædskestanden i beholderen for luftindblandingsmidlet holdes konstant ved hjælp af en pumpe, der startes og standses gennem en afbryderanordning i reservoiret.

Der findes andre helautomatiske apparater til afmåling af luftindblandingsmidler, som findes nærmere beskrevet i litteraturen. (50—90).

Blanding

Luftindblandet beton bliver i reglen lidt hurtigere ensartet end almindelig beton. De for almindelig beton foreskrevne blandetider bør dog overholdes.

Blandetiden bør ikke variere for meget, da dette kan medføre ændringer i luftindholdet. Sker der større forsinkelser i arbejdet, der medfører, at betonen ikke kan udtømmes efter en rimelig blandetid, bør blandemaskinen standses.

Transport

Luftindblandet beton er mindre tilbøjelig til at afblende end almindelig beton og tåler derfor transport bedre end denne. Luftindblandet beton kan således transporteres flere kilometer i lastbiler med tippelad og uden blandedanordning. Noget lufttab sker dog undervejs fra blandedmaskinen til udstøbningsstedet, især hvor betonen udsættes for kraftige rystelser.

Udstøbningssteknik

Luftindblandet beton virker federe, mere sammenhængende og mere klæbrig og har mindre vandudskillelse end almindelig beton. Dette medfører, at udstøbningssteknikken og især efterbehandlingsteknikken bliver lidt anderledes end ved almindelig beton.

Komprimering

Luftindblandet beton egner sig lige så vel til vibrering med overfladevibratoren og pervibratoren som almindelig beton gør det, men formvibratoren kan give anledning til luftansamling langs formsiden. Hvor det er muligt, bør de førstnævnte vibratoren derfor anvendes under fuld udnyttelse af den reduktion i vandmængden, der kan opnås ved luftindblandingen.

Betonflader mod formsider

Normalt dannes der ikke flere luftblærer mod formsiderne ved luftindblandet beton end ved almindelig beton. Ved for langvarig vibrering langs formsiderne kan der dog opstå en del skæmmende blærer, navnlig når formsiderne hælder ind mod betonen. Disse blærer undgås bedst ved at udstøbe i så tynde lag som muligt, ved at undgå overvibrering langs formsiderne og ved at stikke mellem form og beton med en flad spade. Formsiderne bør være glatte, og der må ikke anvendes for tykke lag smøring eller for tyktflydende formolier. Forme med en absorberende beklædning, f. eks. af bløde træfiberplader, giver særlig gode resultater. Ved glideforskalling vil almindelig beton udskille vand og cementslam langs formen, hvorved glidningen lettes. Denne udskillelse af vand og cementslam er mindre ved luftindblandet beton, og kraftforbruget til flytning af formen vil ofte blive større. Anvendelse af luftindblandet beton må foreløbigt frarådes ved fremstilling af tynde vægge i glideforskalling, da friktionen langs væggen kan blive så stor, at væggen rives over.

Frie betonoverflader

Ved luftindblandet beton til betonbelægninger på veje og flyvepladser kan det være nødvendigt at ændre arbejdsteknikken, når der benyttes vejmaskiner til betonens komprimering og afretning. På grund af luftindholdet er luftindblandet beton elastisk og hæver sig bag vibratorbjælkens bagkant. Dette må tages i betragtning ved fastsættelsen af betonens overhøjde ved udlægning og den grove afretning.

Den større kohæsion og klæbrighed kan bevirke, at luftindblandet beton har tilbøjelighed til at revne efter glittebjælken. Dette kan undgås ved at forøge antallet af glittebjælkens tværgående bevægelser pr. m

fremføring af vejmaskinen eller ved ændringer i blandingsforholdet mellem sand og sten.

Vandudskillelsen er almindeligvis stærkt reduceret ved luftindblandet beton, og den sidste overfladebehandling af betonen med håndværktøj kan følge umiddelbart efter vejmaskinens sidste passage, hvilket er en meget stor fordel i det danske klima, hvor dette arbejde om efteråret ved almindelig beton ofte har måttet vente flere timer. I tørt vejr, sol og blæst, er det absolut nødvendigt, at den sidste behandling udføres inden betonoverfladen er blevet tør. Fugtning af overfladen ved forstøvning eller påstækning af vand med en kalkkost eller lignende må frarådes. Pudsebrædder bør være af stål.

Det ovenfor nævnte gælder også for mindre arbejder, hvor der anvendes håndbetjente vibrobjælker og retskinner.

Såsnart det er muligt, skal frie betonoverflader beskyttes mod fordamning med vådt sækkelærred eller lignende, der senere, når betonen er afbundet, kan erstattes med halmmåtter, vådt sand etc.

Kontrol af luftindholdet

Anvendelse af luftindblandet beton giver mange fordele ved mange typer betonkonstruktioner og medfører kun få ændringer i den almindelige arbejdsteknik, men det skal atter understreges, at *en kontrol med luftindholdet, der står i forhold til arbejdets omfang og vigtighed, er absolut nødvendig* og bør udføres mindst lige så ofte, som der fremstilles prøvelegemer til bestemmelse af styrken, og helst af den blanding, der benyttes til prøvelegemerne.

Luftindblandingscementer vil måske komme på markedet, men dette overflødig gør ikke kontrol med luftindholdet.

ANVENDELSESOMRÅDER

Luftindblanding kan på en billig måde forbedre visse betonegenskaber, f. eks. støbelighed, homogenitet, modstandsevne mod frost og tøj, uden at andre egenskaber forringes væsentligt.

Dette medfører imidlertid ikke, at luftindblanding er egnet til beton under alle forhold, eller at der kan slækkes på krav til betonmaterialernes kvalitet og sammensætning og omhuen ved blanding, transport, udstøbning og efterbehandling.

Når der anvendes blød beton (til håndstampning) med cementindhold på 250 kg/m^3 og derunder, eller stiv beton (til vibrering) med cementindhold på 200 kg/m^3 og derunder, kan man regne med, at der *kun* er fordele ved at anvende luftindblanding. Anvendes federe blandinger, må man i hvert foreliggende tilfælde afveje fordele og mangler ved luftindblanding i forhold til de betonegenskaber, der anses for de mest betydningsfulde. Ved overvejelser af denne art kan den foranstående redegørelse for luftindblandings virkninger på den friske og hærdnede betons egenskaber benyttes i forbindelse med de følgende mere generelle bemærkninger om anvendelsesområder.

Bedre støbelighed

Den forbedring af støbeligheden, der opnås ved luftindblanding, er særlig betydningsfuld for magre betonblandinger, hvor forbedringen opnås uden styrketab.

Ved plastisk beton med god sammensætning af tilslagsmaterialerne bliver forbedringen af støbeligheden mindre og mindre udpræget, når cementindholdet vokser.

Ved cementindhold over 250 kg/m^3 bliver styrketabet mærkbart, og luftindblanding bør i så fald kun anvendes efter nøje overvejelse og under forudsætning af omhyggelig og hyppig kontrol med luftindholdet.

Ved beton med lavere cementindhold end 250 kg/m^3 vil det i de fleste tilfælde være hensigtsmæssigt at bruge luftindblandingsmidler, fordi man kan få smukkere overflader og bedre forbindelse i støbeskellene. Som et særligt område indenfor husbygningen kan nævnes mager beton til fundamenter, kældernedgange etc.

Beton til undervandsstøbning skal være sammenhængende for at undgå udvaskning af cementen, og luftindblanding kan formentlig muliggøre en cementbesparelse.

Ved meget tør beton til betonblokke, betonrør m. v. hævdes det at være en fordel at anvende luftindblandet beton, men der skal benyttes ret store mængder luftindblandingsmiddel.

Beton med skærver eller med lette tilslagsmaterialer kan få stærkt forbedret støbelighed, når der anvendes luftindblandingsmidler.

Ved anvendelse af betonpumper må der tages hensyn til, at de store pumpetryk kan sammenpresse den indblandede luft til en brøkdelen af dens volumen ved atmosfærisk tryk (Boyle-Mariottes lov), og betonen må derfor være proportioneret på en sådan måde, at vandtilsætningen alene sikrer den nødvendige konsistens. (53 I 1).

Større holdbarhed

Alle betonkonstruktioner, der er udsat for frost og tø i vandmættet tilstand, vil få forlænget levetid ved indblanding af de foreskrevne mængder luft under forudsætning af, at der anvendes frostbestandige tilslagsmaterialer. I forhold til denne gevinst er et ringe styrketab eller forøgelse af cementmængden uden betydning.

Luftindblanding vil derfor være fordelagtig ved vandbygningskonstruktioner (51 L 4), broer over vandløb o. lign., betonstolper i fugtig jord og kantsten.

Frostsikkerhed

Ved betonstøbning om vinteren er der ved alle konstruktioner en risiko for frysning og optøning på et tidspunkt, hvor almindelig beton har ringe modstandsevne. Ved anvendelse af luftindblandet beton med luftindhold som angivet i tabel 1 vil risikoen for frostskeer være meget stærkt reduceret allerede efter få døgns hærkning, og betonstøbning om vinteren kan udføres på mere økonomisk måde, fordi beskyttelsesperioden kan forkortes.

Betonbelægninger

Betonbelægninger på veje og flyvepladser udføres med fordel af luftindblandet beton af følgende grunde: Betonen kan blandes på en central blandestation og transporteres på lastbiler uden afblanding. Der er mindre vandudskillelse, og arbejdet med håndværktøj kan følge umiddelbart efter komprimeringen. Det er lettere at opfylde kravene til overfladens jævnhed. Variationen i betonstyrkerne bliver mindre og modstandsevnen overfor frost og tø bliver mangedoblet.

AFSLUTTENDE BEMÆRKNINGER

Luftindblandet beton har hidtil her i landet fortrinsvis været anvendt til betonbelægninger og med gode resultater, og det kan forventes, at man i stigende omfang vil anvende luftindblanding på mange andre områder indenfor betontechnikken. Den udarbejdede vejledning har til hensigt at udbrede kendskabet til luftindblandet betons egenskaber, således at denne nye landvinding indenfor betontechnologien hurtigt kan indføres i dansk praksis uden for mange overgangsvanskeligheder.

Vejledningen er foreløbig, fordi udvalget på visse områder ikke har kunnet få tilstrækkeligt underbyggede oplysninger, hverken fra den udenlandske litteratur eller fra danske forsøg.

TILLÆG

Prøvemethoder ved bestemmelse af luftindhold

	side
1. Rumvægtsmetoden	67
2. Pyknometermetoden	70
3. Rullemetoden (Meyer-meter)	72
4. Trykmetoden (Press-ur-meter)	74

Rumvægtsmetoden

Materiel

1. Et målekar med plansleben kant og et rumfang på ca. 5 liter.
2. Et mindst 6 mm tykt glaslag af en sådan størrelse, at det kan dække målekarret.
3. En vægt med kapacitet indtil 15 kg og vejenøjagtighed 1 gram.
4. Et stikstang (f. eks. en 60 cm lang rundjernsstang, 16 mm, med afrundet ende).
5. En retskede.
6. En træhammer.

Såfremt man benytter betonbeholderen fra et Press-ur-meter eller lignende, der har et rumfang på ca. 7 liter, skal vægten have en kapacitet på ca. 25 kg.

Fremgangsmåde

pkt. 1. Rumfanget bestemmes ved at veje beholderen henholdsvis i tom og vandfyldt tilstand. Differensen mellem de 2 vejninger angiver da beholderens rumfang.

For at sikre en nøjagtig fyldning af beholderen, kan det være nødvendigt at benytte en glasplade som låg. Man må huske at aftørre beholderen før vejningen samt sikre, at der ikke er luftbobler under glaspladen.

Rumfanget bestemmes som middeltallet mellem 3 uafhængige bestemmelser.

pkt. 2 A. *Håndstampning*. Beholderen fyldes i 3 lag. Hvert lag komprimeres med stikstangen. Ved komprimering af det første lag beton må man passe på ikke at beskadige beholderens bund. Ved komprimering af de 2 følgende lag må stikstangen kun gennemtrænge det foregående lag ganske lidt. Ved plastisk til stiv beton kan det være nødvendigt at efterstampe med en træstamper.

Efter komprimeringen af hvert lag bankes beholderen let rundt langs siden, indtil der ikke viser sig store luftbobler på overfladen.

pkt. 2 B. *Vibrering*. Beholderen fyldes med beton i 3 lag. Hvert lag vibreres, indtil betonoverfladen er blank, og der ikke viser sig store luftbobler. Vibreringen kan foretages ved hjælp af et vebeapparat eller en stavvibrator, som holdes mod beholderens væg eller underlaget.

pkt. 3. Derefter afrettes overfladen med retskeden. Man udfører savende bevægelser med retskeden, der holdes i en vinkel på ca. 30° med betonoverfladen. Ved luftindblandet beton, der er meget elastisk, vil betonoverfladen have tilbøjelighed til at hæve sig bag retskeden, og den fremførende bevægelse må derfor afpasses således, at denne hævnings ikke finder sted. 1 mm overhøjde kan medføre en fejl i vægten på op til 100 g.

pkt. 4. Den overflødig beton fjernes, beholderen tørres af og vejes.

pkt. 5. Den luftfri betons teoretiske rumvægt γ_0 beregnes ved at dividere den samlede vægt af cement, C, støbevand, V, og tilslagsmaterialer, G, med disses samlede rumfang:

$$R_C + V + R_G$$

De nævnte størrelser fremgår af betonproportioneringen eller af satstallene.

$$\gamma_0 = \frac{C + V + G}{R_C + V + R_G}$$

pkt. 6. Den luftfyldte betons rumvægt γ bestemmes ved at dividere betonprøvens vægt, p_B , med målekarrets rumfang r_M .

$$\gamma = \frac{p_B}{r_M}$$

pkt. 7. Luftindholdet bestemmes af følgende formel

$$a = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_0}\right) \cdot 100\%$$

Luftindholdet bestemmes som middelværdi af mindst 2 uafhængige bestemmelser.

Den her beskrevne metode kan også benyttes som kontrol ved andre luftmålemetoder.

Luftindholdet kan også bestemmes direkte uden beregning ved hjælp af tabeller, kurver eller nomogrammer. Især hvor man gennem længere tid benytter samme blandingsforhold efter vægt er det fordelagtigt at benytte en tabel som f. eks. tabel 11, side 69.

Taleksempel

Mængderne pr. kubikmeter for en luftindblandet beton er bestemt ved proportioneringen.

Cement:	300 kg/m ³	96 l/m ³
Vand:	164 -	164 -
Luft:		40 - (tilstræbt)
Tilslag:	1834 -	700 -
Total:	2298 kg/m ³	1000 l/m ³

ad pkt. 1. Beholder, vandfyldt:	10.907 kg
Beholder, tom:	3.866 -
Rumfang:	7.041 liter (r_M)
ad pkt. 4. Beholder, betonfyldt:	20.013 kg
Beholder, tom:	3.866 -
Betonprøve, vægt (se tabel 11):	16.147 kg (p_B)

$$\text{ad pkt. 5. } \gamma_0 = \frac{2298}{1000 - 40} = 2.394 \text{ kg/l}$$

$$\text{ad pkt. 6. } \gamma = \frac{16.147}{7.041} = \frac{2.293 \text{ kg/l}}{0.101 \text{ kg/l}} (\gamma_0 - \gamma)$$

$$\text{ad pkt. 7. } a = \frac{0.101 \cdot 100}{2.394} = 4.2\%$$

TABEL 11. Eksempel på tabel til bestemmelsen af en given betons luftindhold efter rumvægtsmetoden.

a%	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
2.	16.526	16.509	16.492	16.475	16.459	16.442	16.425	16.408	16.391	16.374
3.	16.358	16.341	16.324	16.307	16.290	16.274	16.257	16.240	16.223	16.206
4.	16.189	16.173	16.156	16.139	16.122	16.105	16.089	16.072	16.055	16.038
5.	16.021	16.005	15.988	15.971	15.954	15.937	15.920	15.904	15.887	15.870

Der er benyttet den i taleksemplet angivne betonsammensætning og betonbeholder.

$$\text{Ligning } p_B = r_M \cdot \gamma_0 \left(1 - \frac{a}{100}\right)$$

Taleksempel: $p_B = 16.147$ kg. Ved indgang i tabellen findes denne værdi at ligge mellem 16.156 og 16.139. Luftindholdet er 4.2 %.

Pyknometermetoden**Materiel**

1. Et pyknometermålekar, af glas eller metal, med plansleben kant og et rumfang på ca. 4 liter.
2. Et mindst 6 mm tykt glaslåg evt. med glaslins. Se fig. 31.
3. En vægt med kapacitet indtil 15 kg og vejenøjagtighed 1 gram.
4. En stikstang (f. eks. en 60 cm lang rundjernsstang (eller rundstok), \varnothing 16 mm, med afrundet ende).
5. En retskede eller paletkniv.
6. Evt. en træhammer, såfremt målekarret er af metal.
7. Evt. en gummiørespøjte.

Som pyknometermålekar kan benyttes et cylinderglas (eller henkogningsglas) med plansleben kant eller en tilsvarende metalbeholder.

Fremgangsmåde

pkt. 1. Rumfanget bestemmes ved at veje beholder + låg henholdsvis i tom og vandfyldt tilstand. Differensen mellem de 2 vejninger angiver da beholderens rumfang.

Man må huske at aftørre beholderen før vejningen samt sikre, at der ikke er luftbobler under glaslåget. Dette opnås bedst ved benyttelse af et glaslåg med en glaslins fastkittet på den ene side. Se fig. 31.

Rumfanget bestemmes som middeltal af 3 bestemmelser.

pkt. 2A. *Håndstampning*. Beholderen fyldes ca. halvt i 2–3 lag. Hvert lag komprimeres med stikstangen.

Ved komprimeringen af det første lag må man påse ikke at beskadige beholderens bund, og ved komprimeringen af de efterfølgende lag må stikstangen kun gennemtrænge de foregående lag ganske lidt.

Efter komprimeringen af hvert lag bankes beholderen, såfremt denne ikke er af glas, let rundt langs siden, indtil der ikke viser sig store luftbobler på overfladen.

pkt. 2B. *Vibrering*. Beholderen, der ikke må være af glas, fyldes med beton à 3 lag. Hvert lag vibreres, indtil betonoverfladen er blank, og der ikke viser sig store luftbobler. Vibreringen kan foretages ved hjælp af et vebeapparat eller en stavvibrator, som holdes mod beholderens væg.

pkt. 3. Beholder + beton + låg vejes, hvorefter man fylder beholderen op med vand. Påfyldningen af vand foretages enten fra en hane for-

synet med forstøverspids eller ved at hælde vandet ned ad en retskede eller paletkniv, således at betonen ikke opslemmes.

pkt. 4. Låget påsættes, beholderen aftørres og vejes.

pkt. 5. Låget fjernes, og ca. $\frac{1}{4}$ af vandet tømmes ud (f. eks. ved hjælp af en gummiørespøjte). Med retskeden eller paletkniven omrøres og opslemmes betonen nu således, at al luft uddrives. Derpå efterfyldes med vand, og det dannede skum skræbes af med retskeden eller paletkniven.

Låget påsættes, når cementslammet efter nogen tids henstand (1–2 min.) er sunket.

pkt. 6. Beholderen tørres af og vejes. Differencen, Δv , mellem denne vejning og vejningen under pkt. 4 angiver da rumfanget af den uddrevne luft. Pkt. 5 og 6 gentages, såfremt al luft ikke er uddrevet.

pkt. 7. Luftindholdet bestemmes som middelværdi af mindst 2 uafhængige målinger af følgende formel, hvor r_B er betonprøvens rumfang:

$$a = \frac{\Delta v}{r_B} 100\%$$

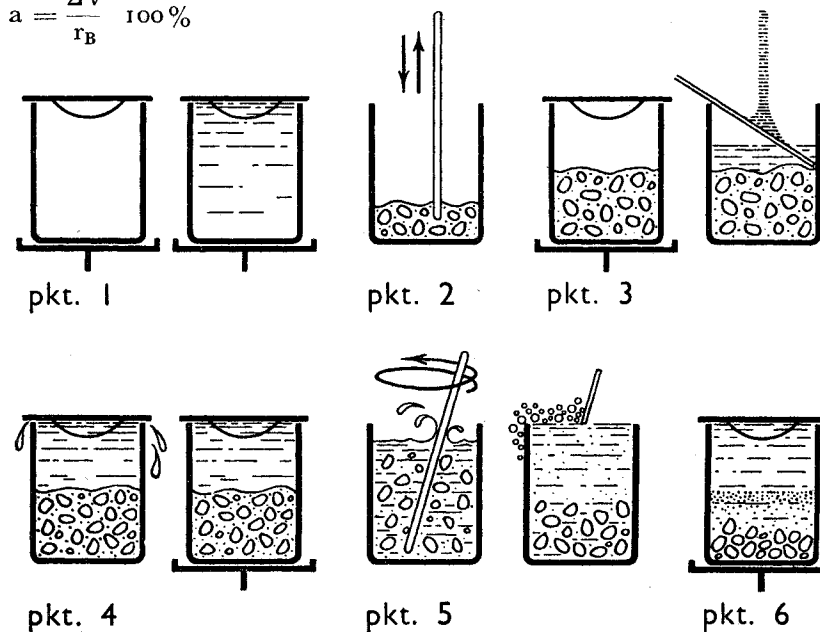


Fig. 31. Luftindholdsbestemmelse ved pyknometermetoden.

Taleksempel

ad pkt. 1.	Beholder + låg + vand	7.558 kg
	Beholder + låg	3.518 -
	Beholderrumfang	4.040 liter
ad pkt. 4.	Beholder + beton + låg + vand	10.358 kg
ad pkt. 3.	Beholder + beton + låg	8.467 -
	Rumfang vand	1.891 liter
	Rumfang beton: $4.040 - 1.891 =$	2.149 liter (r_B)
ad pkt. 6.	Beholder + beton + låg + vand + Δv	10.448 kg
ad pkt. 4.	Beholder + beton + låg + vand	10.358 -
ad pkt. 6.		0.090 liter (Δv)
ad pkt. 7.	Rumfang uddrevet luft: $a = \frac{0.090}{2.149} \cdot 100 = 4.2\%$	

Kontrol ved rumvægtsmetoden giver $a = 4.0\%$, idet betonen tænkes sammensat som angivet på side 50.

Rullemetoden (Meyer-meter)**Materiel**

1. Et Meyer-meter komplet:
 - a. En cylindrisk beholder forsynet med en lukkemekanisme til fastspænding af apparatets overdel.
 - b. En i cm inddelt målestang forsynet med en cirkulær plade.
 - c. En overdel bestående af et konisk stykke og en cylinder med udkæringer, der tillader aflæsninger på vandstandsglassets skala. Overdelen passer lufttæt til beholderen og kan fastspændes på denne ved hjælp af lukkemekanismen.
 - d. Et skruedæksel, der lufttæt kan lukke overdelens øverste ende uden at sammenpresse luften i beholderen.
2. En stikstang (f. eks. en 60 cm lang rundjernsstang, \varnothing 16 mm, med afrundet ende).
3. Skumbrydningsmiddel (f. eks. F. L. Smidth skumbryder eller isopropylalkohol).
4. En 10 ml pipette eller et 10 ml måleglas.
5. En træhammer.

Fremgangsmåde

pkt. 1 A. *Håndstamping*. Beholderen fyldes med 20–25 cm beton i 3 lag. Hvert lag komprimeres med 25 stik af stikstangen jævnt fordelt over betonoverfladen. Ved komprimering af første lag beton må man påse ikke at beskadige beholderens bund. Ved komprimeringen af de efterfølgende lag må stikstangen kun gennemtrænge det foregående lag ganske lidt.

Efter komprimeringen af hvert lag bankes beholderen let rundt langs siden med træhammeren, indtil der ikke viser sig store luftbobler på overfladen.

pkt. 1 B. *Vibrering*. Beholderen fyldes med 20–25 cm beton i 3 lag. Hvert lag vibreres, indtil betonoverfladen er blank, og der ikke viser sig store luftbobler. Vibreringen kan foretages ved hjælp af et vebeapparat eller en stavvibrator.

pkt. 2. Betonrumfanget måles med målestangen, idet man eventuelt først udjævner betonoverfladen med målestangens lille plade. Målingen sker ved at anbringe målestangen med den store plade mod betonen, sigte over beholderens kant og aflæse betonhøjden på målestangens skala.

pkt. 3. Medens målestangen endnu er i beholderen, hældes vand ned langs målestangen, således at betonen ikke opslemmes. Derefter fjernes målestangen, og overdelen fastspændes, man efterfylder med vand til nul-stregen og skruer dækslet fast.

pkt. 4. Apparatet tages derefter med begge hænder, og idet det anbringes i omtrent vandret stilling, gennemrystes det så kraftigt, at luftboblerne udvaskes.

pkt. 5. Apparatet stilles derefter på et vandret underlag, dækslet skrues af, og et *helt antal ml* skumbrydende vædske tilsættes. Vandstandens synkning aflæses, idet der tages hensyn til den tilsatte mængde skumbrydende vædske (1 ml tilsat vædske \sim 1 mm hævnings af overfladen).

Meyer-metrets mål er således indrettet, at luftprocenten direkte udregnes som forholdet mellem den aflæste synkning i mm og den målte betonhøjde i cm. Luftindholdet bestemmes som middelværdien af 2 uafhængige bestemmelser.

Taleksempel

ad pkt. 2. Aflæst betonhøjde	22 cm
ad pkt. 5. Målt synkning	90 mm
Tilsat 2 ml isopropylalkohol	2 mm
Korrigeret synkning	92 mm

$$a = \frac{92}{22} = 4.2\%$$

Trykmetoden (Press-ur-meter)**Materiel**

1. Et Press-ur-meter komplet:

- En betonbeholder med rumfang ca. 7 liter ($\frac{1}{4}$ cu.ft.).
- En overdelen, der kan fastspændes til underdelen. Overdelen er forsynet med indbygget pumpe, trykkammer, manometer, ventiler, haner og spændeordninger. (Se fig. 27).

2. En kalibreringsbeholder.

3. Et bøjet og et ret rør.

4. En gummioresprøjte.

5. En stikstang.

6. En retskede.

7. En træhammer.

pkt. 1 A. *Håndstampning*. Beholderen fyldes med beton i 3 lag. Hvert lag komprimeres med stikstangen (50 stik jævnt fordelt over betonoverfladen). Ved komprimering af første lag må man påse ikke at beskadige beholderens bund. Ved komprimering af de efterfølgende lag må stikstangen kun gennemtrænge det foregående lag ganske lidt. Efter komprimering af hvert lag bankes beholderen let rundt langs siden med en træhammer, indtil der ikke viser sig store luftbobler på overfladen.

pkt. 1 B. *Vibrering*. Beholderen fyldes med beton i 3 lag. Hvert lag vibreres, indtil betonoverfladen er blank, og der ikke viser sig store luftbobler. Vibreringen kan foretages ved hjælp af et vebeapparat eller en stavvibrator, der holdes mod beholderens væg eller underlaget.

pkt. 2. Efter komprimeringen afrettes betonoverfladen. Man udfører savende bevægelser med retskeden, der holdes i en vinkel på ca. 30° med betonoverfladen. Ved luftindblandet beton, der er meget elastisk, vil

betonoverfladen have tilbøjelighed til at hæve sig bag retskeden, og den fremførende bevægelse må derfor afpasses, således at denne hævnings ikke finder sted.

pkt. 3. Overdelen fastspændes, og der tilføres vand med gummioresprøjten gennem den ene hane, indtil al luft er uddrevet gennem den anden.

pkt. 4. Ved hjælp af den indbyggede pumpe bringes viseren op til strengen på manometerskalaen, der svarer til den foreskrevne udgangsstilling. Viseren reguleres ind ved at pumpe lidt eller lukke luft ud med nåleventilen, medens der bankes let på manometret med en finger.

pkt. 5. Begge haner lukkes, og trykket udlignes ved hjælp af trykventilen, som trykkes ned i nogle sekunder, medens der bankes let på manometret, indtil viseren er i ro.

pkt. 6. Betonens luftindhold i procent aflæses direkte på manometerskalaen.

pkt. 7. Hanerne åbnes, hvorefter pkt. 4, 5 og pkt. 6 gentages. De to målinger må kun afvige 0.1 %.

Luftindholdet (incl. luftindholdet i gruspartiklernes porer) noteres som middelværdi af mindst 2 uafhængige bestemmelser (afvigelse højst $\pm 0.2\%$).

Apparatet renses omhyggeligt efter brugen.

Angående grusets korrektionsfaktor, se side 76.

Justering af apparatet

pkt. 1. Beholderen fyldes med vand. Overdelen spændes på med det rette rør fastskruet i gevindet under den ene hane. Begge haner holdes åbne. Der efterfyldes vand med gummioresprøjten gennem den hane, hvorunder det rette rør er anbragt.

pkt. 2. Lufttrykket pumpes op til lidt mere end den begyndelsestryk-streg, der er angivet af fabrikanten. Viseren reguleres nøjagtigt ind ved hjælp af pumpen eller nåleventilen.

pkt. 3. Begge haner lukkes. Trykventilen presses ned i nogle sekunder, indtil viseren er i ro.

Nulpunkt kontrolleres. Manometret skal vise 0% luft.

Hvis 2 eller flere forsøg viser vedvarende afvigelse fra 0%, må der vælges en anden begyndelsestryk-streg, således at afvigelsen udlignes. Den nyvalgte begyndelsestryk-streg benyttes ved følgende forsøg.

Tæthed kontrolleres. Hvis viseren ikke kan bringes i ro under trykud-

ligningen, men drejer sig mod tiltagende luftindhold, er apparatet utæt, og alle samlinger må eftergås. Eventuelt strammes overdelens spændskruer.

pkt. 4. Det *bøjede* rør skrues fast på hanen, hvorunder det rette rør er anbragt. Trykventilen holdes nede, mens vandet løber ud i juster-beholderen (345 ml. ~ 5 % luft), indtil den er fyldt. Den modstående hane åbnes, hvorved vandet i det bøjede rør løber tilbage i beholderen, som nu indeholder 5 % luft.

pkt. 5. Med begge haner åbne pumpes trykket op som ovenfor beskrevet. Hanerne lukkes og trykket udlignes.

Skala kontrolleres. Når viseren er kommet i ro, skal den vise 5 % luftindhold. Hvis 2 eller flere forsøg viser afvigelse, som er større end 0.2 %, justeres viseren ved drejning på justerskruen, der er anbragt på manometerskiven.

pkt. 6. Når manometret viser korrekt 5 % prøves på tilsvarende måde for 10, 15 og 20 %.

Der må til stadighed føres kontrol med, at apparatet er tæt.

Tilslagsmaterialernes korrektionsfaktor

Ved bestemmelse af luftindhold ved trykmetoden skal de målte luftindhold korrigeres, når gruset indeholder porøse korn.

Tilslaget luftindhold bestemmes på en grusprøve, der skal have samme sammensætning, fugtighedsindhold og vægt som gruset, der benyttes ved betonfremstillingen.

Der afvejes følgende mængder sand og sten:

$$P_{sa} = \frac{r_B}{1000} \cdot P_{SA} \text{ kg pr. betonprøve}$$

$$P_{st} = \frac{r_B}{1000} \cdot P_{ST} \text{ kg pr. betonprøve}$$

hvor

r_B er betonprøvens rumfang i liter

P_{SA} er mængden af sand i kg/m^3

P_{ST} er mængden af sten i kg/m^3

De afvejede mængder sand og sten blandes omhyggeligt og fyldes i beholderen, der i forvejen er fyldt ca. $\frac{1}{3}$ med vand. Blandingen til-sættes i små skefulde, således at der ikke indblandes luft. Beholderen bankes let på siden med en træhammer under og efter ifyldningen, og de øverste par cm af prøven stødes let med stikstangen.

Når blandingen er anbragt i beholderen og har været under vand 5–10 min., fjernes alt skum med en retskede, og luftindholdet bestemmes på sædvanlig måde som middeltal mellem 2–3 uafhængige målinger. Det her målte luftindhold skal direkte fradrages det ved betonprøven målte luftindhold. Grusets korrektionsfaktor bestemmes ved arbejdets begyndelse og må kontrolleres fra tid til anden.

LITTERATURFORTEGNELSE

- (43 A 3) Effect of Air-entrapping Portland Cement on the Resistance to Freezing and Thawing of Concrete Containing Inferior Coarse Aggregate. E. O. Axon, T. F. Willis and F. V. Reagel. A.S.T.M. Proc., Philadelphia 1943. Vol. 43, p 981.
- (46 B 10) Hartsprodukter som tillsats till betong. (Concrete Admixtures of Resin Products.) V. Bährner. Betong. Stockholm 1946. Vol. 31. No. 4. pp 225-251.
- (46 K 4) Homogeneity of Air-Entraining Concrete. Henry L. Kennedy. Proc. A.C.I., Detroit June 1946. Vol. 42. pp 641-644.
- (46 M 13) Lidt om »Air-Entraining«-cement. Beton-Teknik. København 1946. Vol. 12. No. 1. pp 23-24.
- (46 W 4) Addition of Air-entraining Agent at Concrete Mixer Advocated. Charles E. Wuerpel. Civil Engineering. November 1946. Vol. 16. No. 11. pp 496-498.
- (47 B 5) Vinsol resin och Darex såsom tillsats till betong. (Comparing Investigation of Vinsol Resin and Darex as Admixtures to Concrete.) V. Bährner, Betong. Stockholm 1947. Vol. 32. No. 4. pp 317-327.
- (47 P 4) Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Part 8. The Freezing of Water in Hardened Portland Cement Paste. Part 9. General Summary of Findings on the Properties of Hardened Portland Cement Paste. T. C. Powers and T. L. Brownyard. Proc. A.C.I., Detroit April 1947. Vol. 43. pp 933-992. With 12 references to literature p 969 (Part 8).
- (47 V 1) The Camera Lucida Method for Measuring Air Voids in Hardened Concrete. George J. Verbeck. Proc. A.C.I., Detroit, May 1947. Vol. 43. pp 1025-1039.
- (48 S 4) Durability of Concrete Exposed to Sea Water and Alkali Soils-California Experience. Thomas E. Stanton. Proc. A.C.I., Detroit, May 1948. Vol. 44. No. 9. pp 821-847. (Correction see ACI News Letter, April 1949. p 29.)
- (49 B 5) Practices, Experiences and Tests with Air-entraining Agents in Making Durable Concrete. R. F. Blanks and W. A. Cordon. Proc. A.C.I., Detroit, February 1949. Vol. 45. pp 469-487. With 12 references to literature.
- (49 D 15) Cement Performance in Concrete Exposed to Sulfate Soils. L. A. Dahl. Proc. A.C.I., Detroit, December 1949. Vol. 46. pp 257-272.

- (49 F 22) Hvad har vi lært om L-beton? (What have we learned about air-entraining concrete?) C.S. Forum. Meddelelser fra DIF's Arbejdsgruppe for Beton og Jernbeton. Copenhagen, December 1949. Vol. 1. No. 3. pp 103-108.
- (49 H 10) Air-Entrainment. Beton med luftindblandingsmidler. T. Heilmann. Beton-Teknik. Copenhagen, April 1949. Vol. 15. No. 1. pp 1-23.
- (49 K 4) Lightweight-Aggregate Concrete. R. W. Kluge, M. M. Sparks and E. C. Tuma. Proc. A.C.I., Detroit, May 1949. Vol. 45, pp 625-642. With 2 references to literature.
- (49 L 16) The Reology of Fresh Concrete and the Vibration of Concrete. R. L'Hermite. Rev. Mat. Constr. Ed. C. June 1949. No. 405. pp 179-87.
- (49 P 26) The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete. T. C. Powers. Research Laboratories of the Portland Cement Association. Bulletin 33. Washington 1949. Preprint from Proceedings of the Highway Research Board. Vol. 29. 28 pp.
- (49 V 1) A Method for Determining the Air Content of Fresh and Hardened Concrete. Robert P. Vellines and Thomas Ason. Proc. A.C.I., Detroit, May 1949. Vol. 45. pp 665-671. With 4 references to literature.
- (50 M 29) Betonproportionering. Erik V. Meyer og Niels M. Plum. Beton. Bind II. Proportionering. pp 73-108. København 1950. Teknisk Forlag.
- (50-76) Make Mine with Air, Mr. Mixer! Darex AEA Bulletin No. 1. Dewey and Almy Chemical Company. Cambridge 40, Mass. August 1950.
- (50-77) Controlled Air Curbs Bleeding. Darex AEA Bulletin No. 3. Dewey and Almy Chemical Company. Cambridge, Mass. November 1950.
- (50-89) Controlled Air: The 5th Ingredient. Darex AEA Bulletin No. 2. Dewey and Almy Company. Cambridge, Mass., 1950.
- (50-90) Darex AEA Dispensers and Air Meters. Dewey and Almy Chemical Company. Cambridge, Mass., 1950
- (50 A 16) Luftindhold i beton og airmetrets teori. S. E. Andersen og Ervin Poulsen. Laboratoriet for Bygningsteknik. Danmarks tekniske Højskole. Eksamensprojekt 1950. København, 1950. 107 pp, 2 litteraturhenvisninger.
- (50 K 11) Exploratory Tests to Develop a Method for Determining the Air Content of Hardened Concrete. Alexander Klein, David Pirtz and Milos Polivka. A.S.T.M. Proc. Philadelphia 1950. Vol. 50. pp 1283-1286. With 3 references to literature. Discussion p. 1287.
- (50 L 22) Basic Principles of Air-Entrained Concrete. William Lerch. Research Laboratories of the Portland Cement Association. Chicago, May 1950. With 12 references to literature.
- (51-30) Controlled Air Betters Durability. Darex AEA Bulletin No. 4. Dewey and Almy Chemical Company. Cambridge 40, Mass., April 1951.

- (51 L 3) Nouveaux procédés de traitement des bétons. R. L'Hermite. Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. Paris, March-April 1951. (Béton, Béton armé, No. 17). No. 180. Nouvelle Série.
- (51 L 4) Betong i sjøvann. Inge Lyse. Teknisk Ukeblad. Oslo, April 1951. Vol. 98. No. 16. pp 291-300.
- (51 L 7) Calculation of Air Bubble Size Distribution from Results of a Rosiwal Traverse of Aerated Concrete. G. W. Lord and T. F. Willis. A.S.T.M. Bulletin. Philadelphia, October 1951. No. 177. pp 56-60. With 8 references to literature.
- (52-27) Influence of Air Entrainment on Bond Strength and Abrasion Resistance. Darex AEA Bulletin No. 7. Dewey and Almy Chemical Company. Cambridge, Mass. March 1952.
- (52-28) Factors in Redesigning Air Entrained Mixes. Darex AEA Bulletin No. 8. Dewey and Almy Chemical Company. Cambridge, Mass. August 1952.
- (52 A 3) Luftporenbeton. A. Ammann. Schweizerische Bauzeitung. 1952. Vol. 70. No. 1, p. 7, No. 2, p. 21.
- (52 K 2) Studies of the Effect of Entrained Air on the Strength and Durability of Concretes Made with Various Maximum Sizes of Aggregate. Paul Klieger. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association. Chicago, October 1952. Research Department Bulletin 40. Authorized reprint from Proceedings of the Highway Research Board, Vol. 31. p 177 (1952).
- (52 N 1) Betonteknologiske studier i U.S.A. Poul Nerenst. Statens Byggeforskningsinstitut. Copenhagen, 1952. Studie nr. 7. With an English Summary. With 117 references to literature.
- (53-9) Luftindblanding i beton. Forsøg udført på Laboratoriet for Bygningsteknik sommeren 1953. København 1953. 5 pp.
- (53 I 1) Anvendelse af luftindblandingsmidler ved Hansthols havns vestmole i 1951. G. M. Idorn. Beton og Jernbeton. Meddelelser fra DIF's betonsektion. 5. årgang. Nr. 5. Teknisk Forlag, København 1953.
- (53 N 2) Betonstøbning om vinteren. P. Nerenst, E. Rastrup og G. M. Idorn. Statens Byggeforskningsinstitut. København 1953. Anvisning nr. 17. 21 litteraturhenvisninger.
- (53 W 4) Entrained Air in Concrete. Peter Joseph Frederic Wright, Proc. of the Institution of Civil Engineers. London, May 1953. Vol. 2. No. 3.
- (54 P 1) Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing. T. C. Powers and R. A. Helmut. Proceedings, Highway Research Board. Washington D.C. 1953. Vol. 33.