



Betons natur, autogen healing

Temablad 14, Afløbsfraktionen, Dansk Beton Industriforening
www.afloebfraktionen.dk

Autogen healing af beton

Mange materialer bliver svagere med tiden. Når det drejer sig om beton forholder tingene sig dog lige modsat. I flere år efter udstøbning fortsætter betonen med at udvikle sin tæthed og dermed styrke. Det sker ved forskellige fysiske og kemiske processer. På engelsk kaldes det „autogen healing“. Her beskrives fem processer, se afsnittene 1- 5. Man kan populært sige, at betonrøret ikke er „færdigt“ som produkt, hvad angår styrke og tæthed, ved leveringen.

Autogen healing af beton har været kendt i årevis. Over 50 års praktiske erfaringer med anvendelse af armering i betonkonstruktioner har vist at „revneviddedesignet“ er acceptabelt: Ved beregning og prøvning accepteres ved max. belastning op til 0,3 mm brede revner i betonen, også når betonen anvendes i et aggressivt miljø. For at armeringen kan træde i funktion skal betonen revne.

At det går godt med hensyn til korrosion af armeringen og betonkonstruktionens tæthed skyldes blandt andet forskellige fysiske og kemiske processer som kan forsegle en revne. Disse processer benævnes på engelsk „autogen healing“

I det følgende gennemgås de 5 vigtigste tæthedsøgende mekanismer for betonrør kort.

1. Fortsat hydratisering

Efter sædvanlig dansk praksis betragtes en beton som færdighærdet efter 28 modenhedsdøgn. Det er imidlertid et kendt faktum, at betonen udvikler styrke og tæthed i lang tid ud over denne grænse.

Specielt i disse dage hvor der ofte anvendes relativt store mængder puzolaner (mikrosilica og flyveaske) i betonproduktionen, er betonens sene styrkepotentiale øget.

Når cement kommer i forbindelse med vand opløses den yderste skal af cementkornene og danner en skal af bindemiddel. Da de dannede produkter fylder ca. dobbelt så meget som den uhydratiserede cement, bliver skallen stadig tykkere og tættere efterhånden som hydratiseringen af cementen skrider frem. Den øgede tæthed og tyk-



De reaktionsprodukter der dannes under betonens hærkning, fylder over dobbelt så meget som den reagerede cement. Det er dette forhold der giver betonen sin store tæthed.

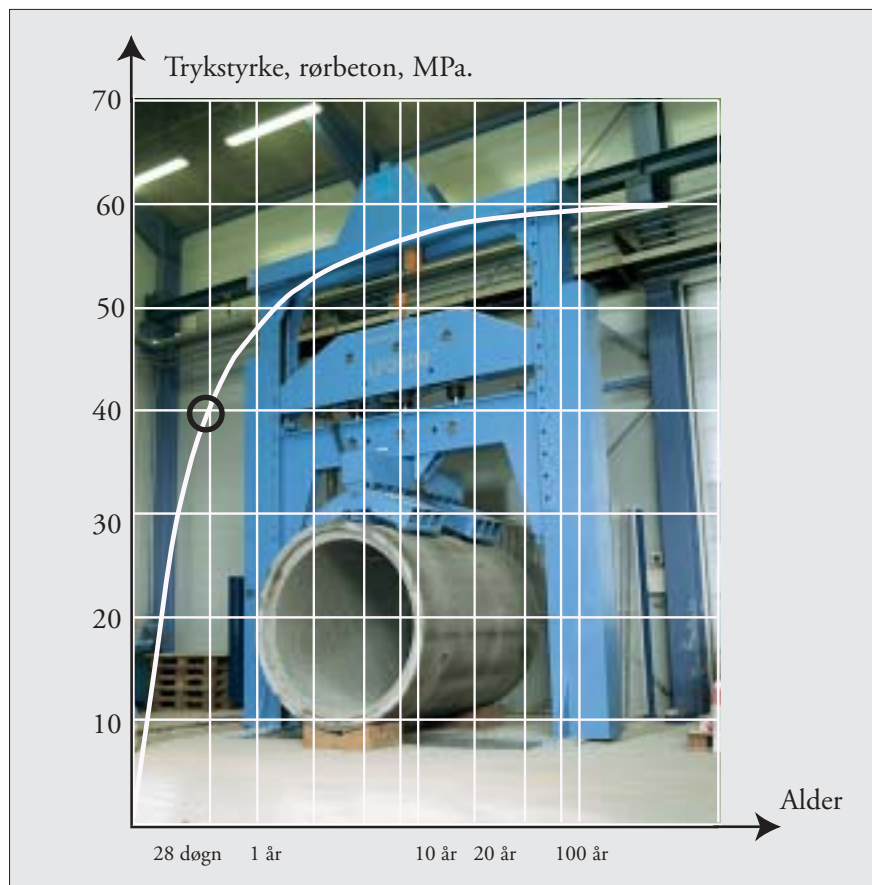
Et lavt v/c-forhold betyder kortere afstand mellem cementkornene i den friske beton. Dermed bliver bindemidlet tættere, da det så at sige ikke skal „nå“ så langt for at skabe kontakt med de omkringliggende cementkorn.

Den dannede cementpasta har ved lave v/c-tal tæthed af samme størrelsesorden som granit.

kelse af skallen bevirker, at vandets adgang til den uhydratiserede cement bliver stadig vanskeligere, og derved falder hydratiseringshastigheden gradvist. Hydratiseringen går dog ikke helt i stå, før der enten ikke er mere frit vand eller uhydratiseret cement til stede i betonen.

Da beton er et porøst materiale, vil der i hele betonens levetid optages og afgives fugt til og fra omgivelserne, alt afhængig af omgivelsernes temperatur og fugtighed. Den fugt, der optages fra omgivelserne indgår i den videre hydratisering af cementen. Processen går langsomt pga. betonens tætte porestruktur, og den tætte skal af bindemiddel omkring den uhydratiserede cement. Betonen vil dog på trods af den langsommelige fugtoptagelse på den vis øge sin styrke og tæthed.

Rørens styrke bliver ved med at udvikle sig over mange år. Den sene styrkeudvikling er blandt andet afhængig af puzolanindhold og cementtype. For rørbeton er den sene styrkeudvikling specielt kraftig pga. et stort indhold af restcement, som umiddelbart ikke udnyttes tidligt i hærdeprocessen.



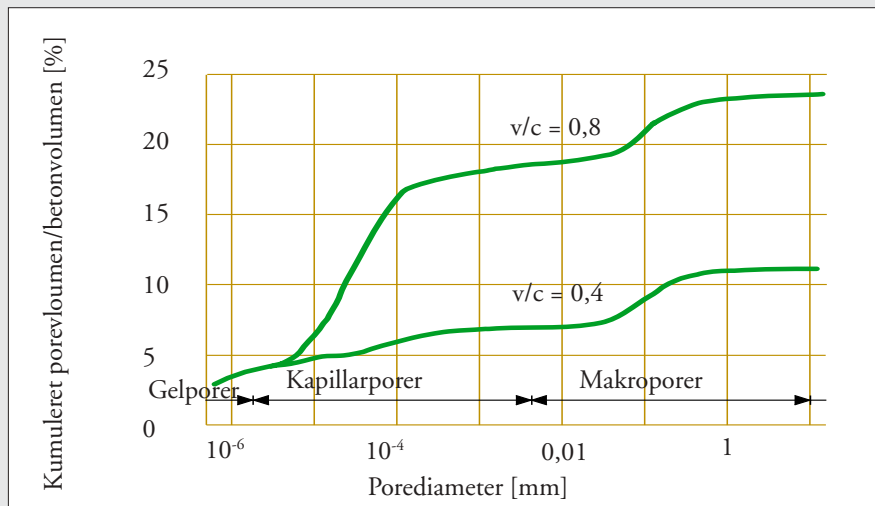
Beton er et porøst materiale

Det ligger i betons natur, at beton, ligegyldigt hvor høj kvaliteten er, altid vil være et porøst og inhomogent materiale.

De porer der findes i beton kan opdeles i tre grupper:

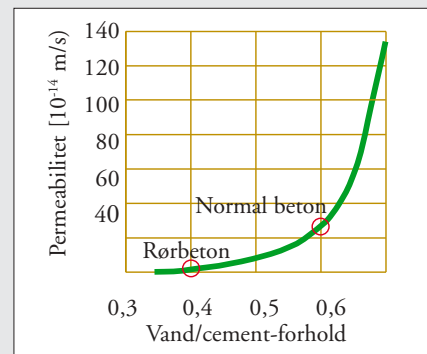
- ◆ Gelporer, ca. $0,5 - 2 \cdot 10^{-6}$ mm
- ◆ Kapillarporer, ca. $2 - 5 \cdot 10^{-3}$ mm
- ◆ Makroporer, ca. $0,005 - 1$ mm

Den afgørende faktor for en betons porestruktur, altså fordelingen mellem gel- kapillar- og makroporer, er forholdet mellem vand og cement, v/c -forholdet i den friske beton. Jo lavere v/c -forholdet er, des mindre plads er der så at sige for cementen at skulle udfylde med bindemiddel. Dette betyder en tættere cementpasta i betonen, og dermed mere holdbar og stærk beton.



Såvel samlet porevolumen som fordelingen mellem de enkelte poretyper, afhænger især af betonens v/c -forhold. Af figuren fremgår det, at der for det første er et større samlet porevolumenet ved højt v/c -forhold. Derudover ses det, at mens volumen af gelporer og makroporer er stort set ens for de to v/c -forhold, er der stor forskel i volumen af kapillarporerne. Netop kapillarporerne er afgørende for betonens permeabilitet.

På figuren ses betons permeabilitet (vandgennemtrængelighed) som funktion af v/c -forholdet. Med lavere v/c -forhold, fås tættere beton, og dermed også en lavere permeabilitet. Permeabiliteten er helt afgørende for vandtransporten gennem beton udset for vandtryk. Den beton der anvendes til betonrør, har typisk et v/c -forhold på $0,35-0,4$. Dette betyder en betydelig mindre permeabilitet end normal konstruktionsbeton, som typisk har et v/c -forhold på $0,6$.



Ved gennemsavning af et betonrør kan det bedre forstås hvordan et betonrør er bygget op. Beton er aldrig 100 % luft- eller vandtæt. Selv en beton af meget høj kvalitet vil der for tilstrækkelig højt tryk, kunne presses vand igennem betonens poresystem. Men med tiden øges betonens tæthed og muligheden for vandtransport gennem betonen er meget begrænset.

2. Restcement

Den beton der typisk anvendes til betonrør har et lavt v/c-forhold. Det giver som udgangspunkt en meget tæt, stærk og holdbar beton. Det lave v/c-forhold og den specielle fremstillingsmetode for betonrør betyder, at der ikke er tilstrækkeligt vand i betonen til, at alt cement i cementpastaen bliver hydratiseret under fremstillingen.

Der kan gå mange år før alt restcement er hydratiseret, men de rigelige mængder cement sikrer en lang fortsat hydratisering som kan indgå i en tætningsproces.

Restcementindholdet konstateres tydeligt, når frasorterede rør eller ældre rør knuses til genbrug. Hvis den knuste beton udsættes for vand bindes det knuste materiale sammen pga. restcementen.



Depot med knuste betonrør. Restcement binder den knuste beton sammen.

3. Selvtætning ved dannelse af kalciumkarbonat

Der er flere forhold ved betonen der gør, at den i mange tilfælde er i stand til med tiden at udvikle yderligere tæthed. For beton generelt er dannelse af kalciumkarbonat af stor betydning.

Dannelse af kalciumkarbonat, også populært kaldet kalkudfældninger, er et resultat af at beton, der er placeret udendørs, er udsat for påvirkning af fugt og luftens CO_2 . Herved dannes kalciumkarbonat, der ses som gul-hvide kalkudfældninger. Efterhånden som der dannes mere og mere kalciumkarbonat, vil utæthederne i betonen blive mindre og mindre for til

sidst helt at lukkes.

Dannelsen af kalciumkarbonat er den hyppigste grund til selvtætning af beton, og vil i mange tilfælde være nødvendig for at nogle af de øvrige tætningsmekanismer kan have effekt ^{13/}. Dannelsen af kalciumkarbonat er beskrevet meget kortfattet. I ^{13/} gives der

Kalkudfældning kan beskrives ved:

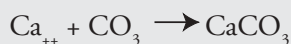
Vand som er i forbindelse med atmosfærisk luft, vil indeholde en mængde opløst CO_2 . Opløsningen af CO_2 i vand foregår efter følgende proces:



Det gennemsivende vand opløser den kalciumhydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, der findes i cementpastaen.



Derved findes der altså i vandet såvel karbonat-ioner, CO_3^- , samt kalcium-ioner, Ca^{++} . Disse ioner danner den ikke-vandopløselige kalciumkarbonat:



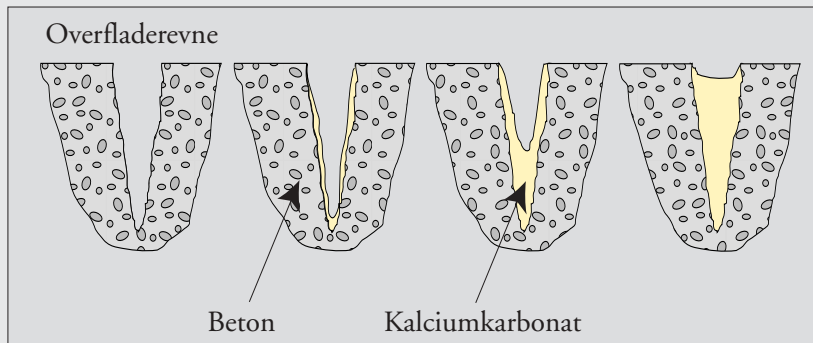
en meget grundig og gennemgribende indføring i emnet.

Hvis en defekt i et rør er lukket af kalciumkarbonat er denne tætning af så stor styrke, at højtryksspuling ikke giver fornyet utæthed. Den dannede kalciumkarbonat strækker sig typisk et godt stykke ind i rørvæggen. Højtryksspuling vil kun fjerne dele af det yderste lag.

Det er denne kalciumkarbonat der udfældes langs porer og mikrorevner i betonen, og ses som kalkudfældninger.



Kalciumkarbonatudfældning i betonrør. Kalciumkarbonaten har lukket den gennemgående defekt i betonen 100 %.



Ved udfældning af kalciumkarbonat lukkes revnen med tiden.



Revneblokada af CaCO_3 krystaller (Kalciumkarbonatudfældninger). Revnevidde 0,2 mm. Foto af tyndslib.

4. Pakning af fine partikler fra det indsvivende vand

Hvis der er en lille utæthed igennem betonvæggen, vil det være en labyrintvej igennem betonens porestruktur. Her er der mange chancer for at fine partikler og urenheder i det indsvivende vand pakker sig og tætnet for yderligere indsvivning. Små sandkorn og specielt lerpartikler, der trænger ind i en revne sammen med det indsvivende vand, kan pga. en lille kornstørrelse skabe en meget tæt og fast kitmasse i revnen. Undersøgelser viser, at vandgennemtrængningen gennem en revne falder meget markant, hvis det gennemtrængende vand indeholder fine partikler.¹³⁾

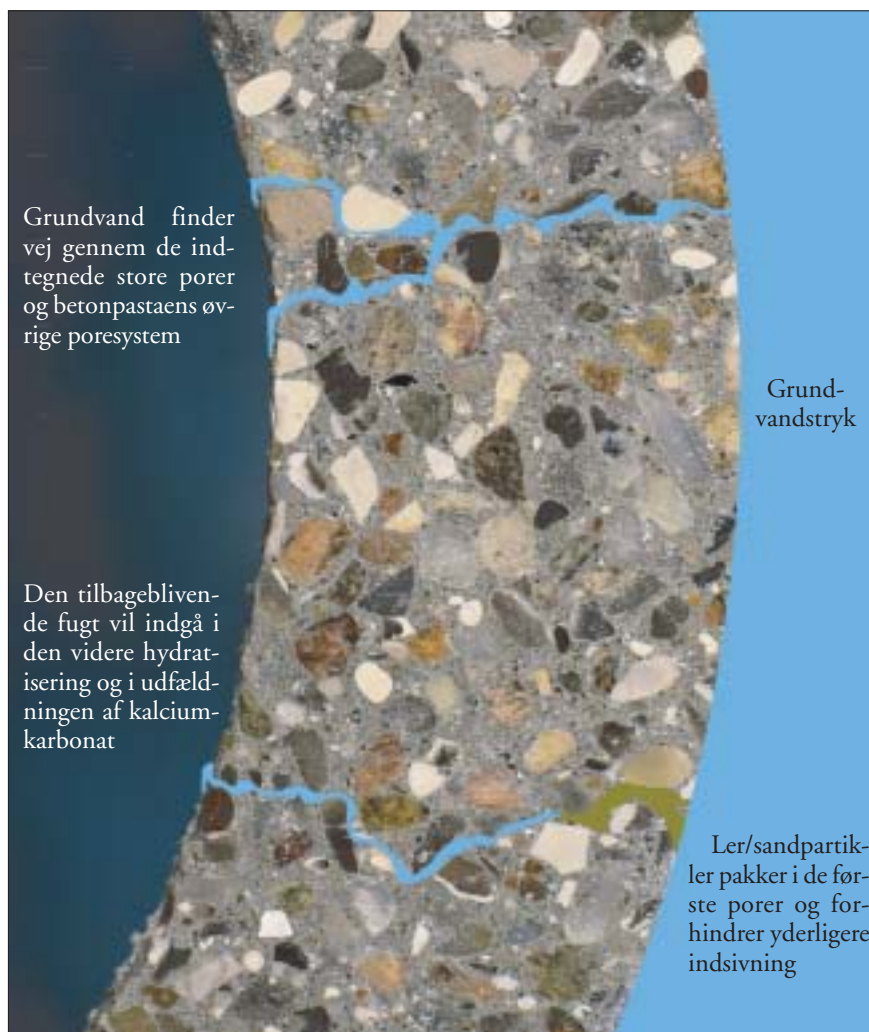
De indsvivende partikler indgår i en selvtættende proces sammen med de øvrige tæthedsmekanismer. Indtrængende partikler kapsles f.eks ind i udfældet calciumcarbonat.

Hvis grundvandet er aggressivt over for betonen (lav pH-værdi), er der risiko for at indsvivende grundvand med tiden i stedet laver labyrintvejen igennem betonen større. Det er dog kun meget få steder i Danmark, hvor grundvandet er aggressivt over for moderne tæt rørbeton. Her tænkes på specielle moseområder.

5. Udfældninger

Udfældninger kan også foranledige at en labyrintvej igennem betonvæggen lukkes. Udfældninger består af fast materiale som kalk eller okker. Disse stoffer findes visse steder i grundvandet. Når grundvandet siver igennem utætheder og iltes via luften i afløbsrøret, udfældes disse stoffer. Disse aflejringer kan være så hårde, at de skal fræses væk.

Udfældninger på grund af indsvivende grundvand ved påhugget stik. Udfældningerne består her delvis af okker. Det er ofte set at udfældninger ligefrem kan tætnet en fejlbehæftet samling. Ligeledes vil udfældningerne som regel også medvirke til at tætnet mindre indsvivninger i rørstammen. Fænomenet med udfældninger som sætter sig som hårde skorper, ses også i dagligdagen, hvor udfældningerne ses i forbindelse med dryppende vandhaner og lignende.



Øverst i billedet har grundvand fundet vej igennem betonens poresystem. Her vist noget fortegnat. Der er indtegnat en del makroporer, og vandet finder også vej mellem tilslag og pasta.

Lidt længere nede i billedet er en lignende vej igennem poresystemet lukket af fine partikler i det indtrængende grundvand. Partiklerne danner en tæt kitmasse som får stor styrke på grund af udfældet calciumcarbonat og hydratisering af noget af restcementen i rørbetonen. Denne proces sikrer ofte en 100 % lukning for yderligere gennemstrømning af grundvand.



Ældre betonrør har opnået høj tæthed

De over 50000 km ældre betonrør der findes i Danmark, dokumenterer til fulde betonens forskellige tæthedsmekanismer.

Ved TV-inspektion af ældre betonrør ses sjældent utætheder i rørstammerne, mens at dårlige påhugninger og utidssvarende samlinger giver utætheder.

Ældre betonrør blev i forhold til nutidens teknologi fremstillet med

meget simple støbe- og blandeteknikker, med langt mere uens grusmaterialer og cement. Ældre rør havde desuden kun den halve godstykkelse i forhold til rør i dag.

Hvis nutidens betonrør blev fremstillet som førhen ville man ved TV-inspektionen se mange indsvindinger, fugtpletter, stenreder mv. og rørene ville ikke klare tæthedsprøvningen. Men fakta er, at de forskellige tæthedsmekanismer med tiden har gjort gamle rør meget tætte.

Mange undersøgelser af ældre rør

En lang række ældre betonrør er undersøgt i erhvervsforsker/Ph. D-projektet „Bedømmelse af betonafledningers restlevetid“ af Flemming Lapertis, Niras A/S. I alt 60 rør er indsamlet fra forskellige kommuner i landet. Laboratorieundersøgelserne viser en meget stor spredning på betonkvaliteten af de ældre rør¹⁵⁾, men også brudlaststyrker på over det dobbelte for nogle rør i forhold til den krævede normstyrke. Det skyldes blandt andet den fortsatte styrkeudvikling i betonen.

På Norges Tekniske Højskole har seniorforsker Dr. Sveinung Sægrov med flere udført omfattende undersøgelser af ældre betonrør¹⁶⁾. Oplysninger kan fås ved henvendelse til Afledningsfraktionen.



Rør fra 1924. Ingen utæthed i rørstamme, dog utidssvarende samlinger. Ved brudlastprøven konstateres der dobbelt brudlaststyrke i forhold til normen.

Referencer

- 11) „Concrete Pipe Handbook, 1998, American Pipe Association
- 12) „Beton Bogen“ CtO, Aalborg Portland, 2.udgave, Aalborg, 1985.
- 13) „Wasserdurchlässigkeit und Selbstheilung von Trennrissen in Beton“, Carola Katarina Edwardsen, DAF Stb, Hefte 455 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin, 1996.
- 14) „Revner i beton kan lukke sig selv“ Artikel i Dansk Beton, 1999. Carola Katarina Edwardsen, Cowi.
- 15) „Bedømmelse af afledningers restlevetid“ Ph.D/Erhvervsforskerprojekt, Flemming Lapertis, Niras A/S.
- 16) „Tilstand og tilstandsændring for beton gavlovsledninger“. Dr. ing. avhandling. Sveinung Sægrov. 1992. Norges tekniske Højskole.

Medlemmer af Afledningsfraktionen:

Abbednæs Cementvarefabrik A/S
Gammelrand Beton A/S
Grindsted Betonvarefabrik A/S
Hammershøj Betonvarefabrik ApS
I.B.F A/S
I.B.F - Nord A/S
NOVA Mørtel og Betonvarefabrik
RC Betonvarer A/S
Thisted-Fjerritslev Cementvarefabrik A/S

Information om betonoverflader og samlinger

Dette temablad kan med stor fordel læses sammen med temablad 15 som omhandler tæthedsprøvning, og temablad 16, som omhandler betonrørs overflader og TV-inspektion.

Temabladet er udarbejdet af Afledningsfraktionen, Dansk Beton Industriforening i samarbejde med SBH-Consult A/S, Rådgivende Ingeniørfirma F.R.I.

Temablade kan rekvireres pr. e-mail: danent@danent.dk, via internet på www.afledningsfraktionen.dk, eller via telefonnr. 33 747 747.

*Afledningsfraktionen
November 2001*