

10.8 Vandtæthed

Af Christian Munch-Petersen



Figur 1. Manglende vandtæthed af en betonkonstruktion er ofte et stort problem. På fotoet ses en vandtrykspåvirket kældervæg med utætheder som følge af revner og dårligt tætnede gennemføringer for clampsjern

For mange betonkonstruktioner er det afgørende, at de er vandtætte. Dette gælder udpræget for direkte vandtrykspåvirkede konstruktioner som fx en sænketunnel eller et vandtårn, hvor manglende vandtæthed ville medføre henholdsvis indtrængende og udsivende vand, der ville nedsætte konstruktionens levetid, funktion og udseende.

Men også almindelige kældervægge, støttemure og gulve ønskes som regel vandtætte, selv om de ikke er udsat for et egentligt vandtryk. En kælder skal være tør, en støttemur uden skjolder på forsiden og et gulv skal ikke ved gulvvask lede vand ned i den underliggende konstruktion.

En vandtæt beton er desuden mere holdbar over for nedbrydningsmekanismer, der har indtrængende vand og salte som forudsætning - fx frostnedbrydning, alkalikiselreaktioner og chloridindtrængning.

Kravet om vandtæthed kan opfyldes ved valg af et egnet betonmateriale, ved en gennemtænkt udformning af konstruktionen og ved en styret udførelse.

Revner udgør et særligt problem i forhold til vandtæthed, fordi en konstruktion udført i selv det bedste, vandtætte materiale kan blive utæt, hvis den revner. Der er således megen sandhed i det i betonbranchen udbredte udsagn: *Beton er tæt mellem revnerne!*

Dette vil blive kvalificeret nedenfor.

10.8.1 Vandtæthed af det urevnede betonmateriale

Beton kan ifølge afsnit 6 Proportionering beskrives som bestående af tilslagsmaterialer - sand og sten - der er limet sammen med cementpasta - primært cement og vand.

Danske tilslag af primært flint og granit er i praksis vandtætte. Det betyder, at vandtætheden af betonen afhænger af vandtætheden af materialet mellem tilslagene (limen) - det vil sige af cementpastaens vandtæthed.

Anvendes andre typer tilslag - fx Letklinker (se afsnit 3.7 Letklinker) - kan også tilslagsets (manglende) vandtæthed få betydning.

Cementpastaen er porøs således at forstå, at der i cementpastaen er porer af forskellig størrelse.

Porernes størrelse og poresystemets åbenhed afhænger primært af betonens vand-cement forhold forstået således, at et højt vand-cement forhold medfører mange, relative store og åbne porer, mens et lavt vand-cementforhold medfører relativt små og lukkede porer.

Cementpasta med et vand-cement forhold på mindre end ca. 0,45 vil i praksis være vandtæt. Et højt vand-cement forhold på fx 0,60 giver omvendt ikke en vandtæt cementpasta.

Vandtætheden er dog ikke absolut. Hvis en tunnelvæg af beton udsættes for fx 30 meters vandtryk, vil der med tiden ske en gennemsivning af vand fra ydersiden til indersiden. Hvis betonen har et vand-cement forhold på mindre end 0,40 og væggen fx er 80 cm tyk, kan denne gennemsivning gennem betonmaterialet dog ikke forventes at ske inden for konstruktionens levetid på 100 eller 120 år.

10.8.2 Vandtæthed af en betonkonstruktion

At selve betonmaterialet som ovenfor beskrevet er vandtæt, betyder dog ikke, at den betonkonstruktion, som materialet indgår i, også er vandtæt.

Mange konstruktioner opnår ikke vandtæthed - selv om de er udført med et vandtæt betonmateriale - fordi konstruktionen revner under udførelsen eller under påføring af belastning, fx som følge af vandtryk (sic!).

Hvis en betonkonstruktion - fx en beholdervæg - udsættes for et træk, der medfører at betonens trækstyrke overskrides, vil væggen revne. Armering i væggen vil ikke kunne hindre denne revnedannelse, men korrekt dimensioneret armering kan begrænse revnevidden.

Det skyldes, at beton typisk har et E-modul (se afsnit 10.3 E-modul), der er 10 gange mindre end armeringens E-modul. Når betonen revner ved typisk 2-3 MPa – se afsnit 10.2 Trækstyrke – er spændingen i armeringen derfor ca. 10 gange større svarende til 20-30 MPa, hvilket kun er en brøkdel af armeringens styrke. Skulle armeringen "overtage" belastningen når betonen revner – uden ekstra tøjninger – skulle armeringsprocenten være mindst 10 %.

Armeringsprocenterne er normalt betydeligt lavere - fx 1 eller maksimalt 2 % - hvilket betyder, at når betonen revner, vil der åbne sig en revne, der svarer til den forlængelse armeringen skal have, for at kunne optage kraften fra betonen. Revnevidderne bliver derfor mindre jo mere armering, der er i konstruktionen – alt andet lige.

Revnevidderne kan beregnes med de såkaldte "revneviddeformler", der blandt andet findes i EN 1992-1-1. Hvilken revnevidde, der er tilladelig, er et meget omstridt spørgsmål. Ofte tillades revnevidder på fx 0,2 eller 0,3 mm i almindelige betonkonstruktioner, men i konstruktioner, der skal være vandtætte, vil disse revnevidder kunne give store problemer med utætheder, hvis revnerne er gennemgående, det vil sige går fra konstruktionens inderside til yderside.

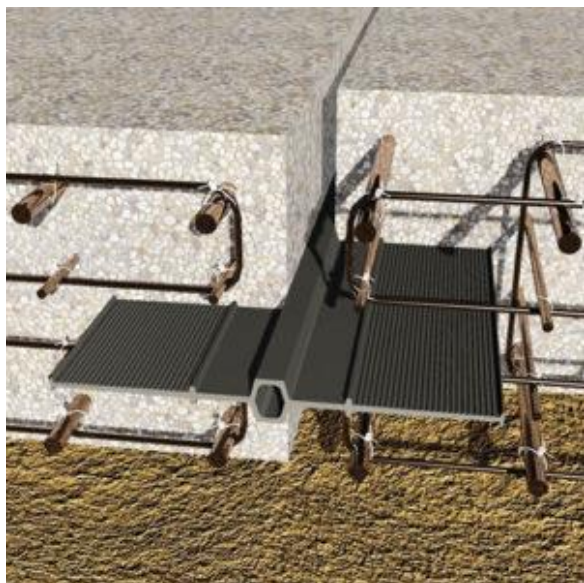


Figur 2. Termorevner er ofte gennemgående og skaber utætheder – også selv om konstruktionen er kraftigt armeret. Allerede efter kort tid vil der ske kalkudfældninger på revnens inderside.

Gennemgående revner skabes typisk under udførelsen som følge af temperaturforskelle under betonens hærdning, men også udtørringssvind – se afsnit 10.4 Svind og andre tøjninger under hærdningen, se afsnit 10.7 Volumenændringer forårsaget af hydratisering - kan medføre gennemgående revner. Revner fra vandtryksbelastninger skaber i mange tilfælde bøjningsrevner, der ikke er gennemgående, og som derfor ikke i sig selv medfører utætheder.

Støbeskel i en betonkonstruktion giver også problemer med at opnå vandtæthed. I et støbeskel opnås sjældent, at betonen på hver side af støbeskellet "gror sammen" under hærdningen, men oftere at termo- og svindbevægelser får støbeskellet til at åbne sig. Støbeskellet vil herefter være at betragte som en gennemgående revne.

Støbeskel kan tætnes med fugebånd. I praksis er det dog vanskeligt at opnå fuld tæthed med fugebånd, fordi de kræver stor omhyggelighed under monteringen og udstøbningen af betonen. Desuden skal fugebånd samles (stødes) og drejes om hjørner og kanter, hvorved der ofte opstår utætheder.



Figur 3. Fugebånd af gummi eller plast kan anvendes til at tætnes fx et støbeskel mellem to plader. Fugebånd kræver stor omhu under monteringen og udstøbningen for at fungere efter hensigten. Billedet er udlånt af Haucon.

Egentlige udstøbningsfejl vil ofte medføre utætheder. Hvis betonen ikke er kompakteret korrekt, og der opstår såkaldte "støbereder", hvor pastaen mangler mellem tilslagene, vil vandet kunne trænge stort set uhindret gennem betonen. Tilsvarende problemer opstår ved "kolde støbeskel", hvor to lag beton ikke er støbt sammen – typisk fordi der er gået for lang tid mellem udlægning af de to lag.

Hvis en konstruktion, der skulle have været vandtæt, har utætheder fx i form af revner, utætte støbeskel eller utætte fugebånd, kan konstruktionen søges tætnet ved injicering. Ved injicering presses et materiale (fx fin cement, akryl, epoxy eller polyurethan) ind i revnen eller støbeskellet, hærdet på denne plads og tætnet konstruktionen.

Det er imidlertid svært at tætnes de fineste revner, og er der bevægelser i revnerne fx fra statiske påvirkninger eller temperatur- og svindbevægelser, kan de injicerede revner blive utætte igen og skal re-injiceres - ofte over flere omgange.

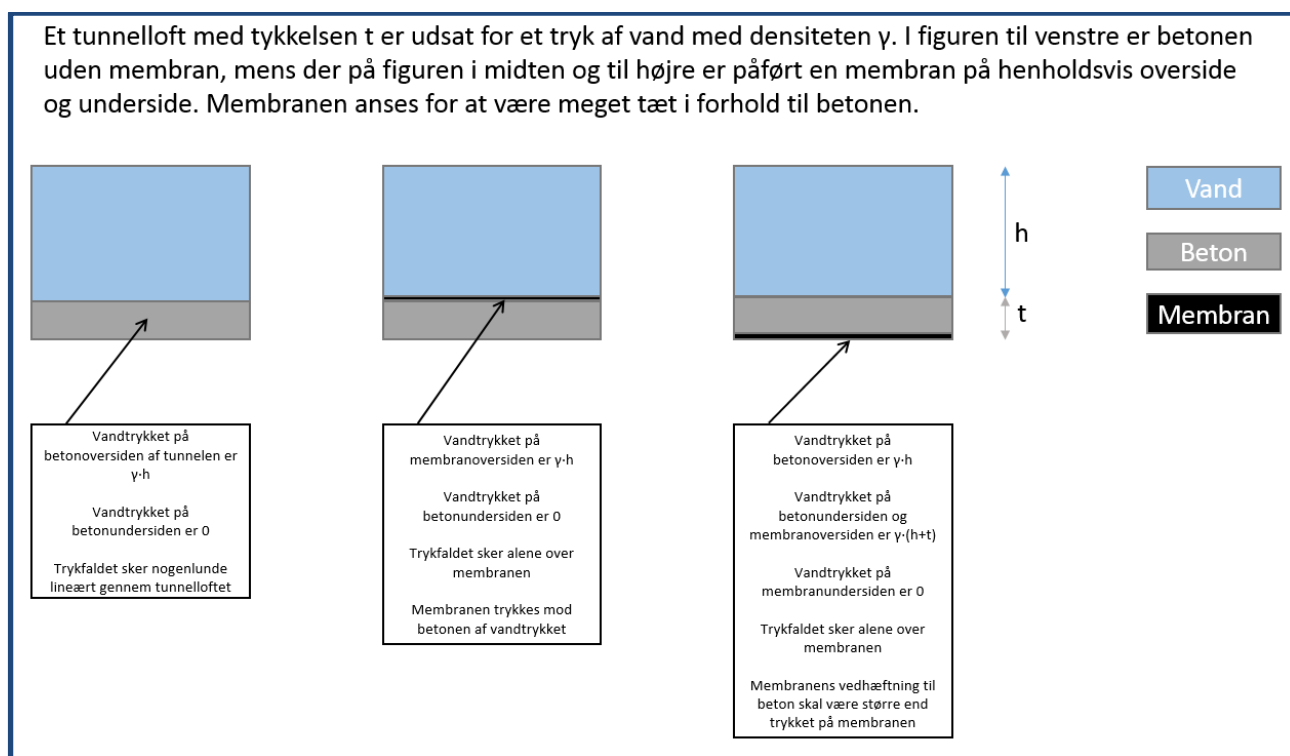
En yderligere komplikation er typisk, at revnerne først erkendes, når konstruktionen udsættes for vandtryk, og hvis dette vandtryk ikke kan fjernes fx fordi tunnelen er

blevet neddykket i vand eller beholderen er fyldt med vand, skal injiceringen dels foregå mod vandtrykket, dels i processen fortrænge vandet fra revner og andre hulrum.

Membraner kan anvendes til at gøre en betonkonstruktion vandtæt. En membran er et tyndt lag af et vandtæt produkt, der placeres på konstruktionens overflade. I praksis skal membranen altid placeres på tryksiden af betonen, således at membranen trykkes ind i mod betonen og ikke trykkes væk fra betonen.

Hvis en membran placeres på indersiden af en væg med ydre vandtryk, vil membranen – hvis den er tæt – med tiden blive udsat for et tryk, der er lig med det ydre vandtryk, og en sådan membran skal derfor dels kunne klare selve trykket, dels have en vedhæftningsstyrke til betonen, der mindst svarer til vandtrykket.

Normalt kan man ikke regne med en samvirkning mellem beton og membran. Det betyder, at membranen alene skal være den vandtætte del af konstruktionen og dette betyder igen, at betonens egen tæthed ikke har betydning.



Figur 4. Trykforholdene gennem en betonkonstruktion afhænger af, om konstruktionen er påført en membran eller ikke, samt på membranens placering. Hvis membranen placeres på den side, hvor vandtrykket påføres, vil betonen være tør – hvis membranen er tæt.

Membranmaterialer er ofte pladeprodukter, der skal samles til en sammenhængende membran. Det kan være stålplader, som det fx blev anvendt på Guldborgsundtunnelens bund og sider, men ofte anvendes bitumenplader eller plastmembraner leveret i ruller. For disse membrantyper gælder, at de skal samles (fx svejses eller limes), og evt. utætheder opstår typisk i disse samlinger.

I teorien kan man selvfølgelig foreskrive BÅDE at anvende en vandtæt beton OG udføre konstruktionen uden revner og støbeskel – SAMT pålægge en membran, men i praksis vil dette komme til at betyde, at hverken membran eller betonkonstruktion bliver vandtæt, fordi der ikke fokuseres nok på tætheden af hverken beton eller membran – fx ud fra en af de følgende "tankegange": "en lille fejl i betonen klares nok af membranen" – eller "betonen er jo tæt, så hvad betyder en mindre fejl i membranen".

Øresundstunnelen (indviet 1. juli 2000) blev således krævet udført uden membran for at sikre, at entreprenøren skulle fokusere på betonkonstruktionens tæthed. Det lykkedes at opnå fuld tæthed af de enkelte tunnelelementer i den 3.510 meter lange tunnel, mens et mindre antal støbeskel mellem de 22 meter lange segmenter forsynet med fugebånd har været lidt utætte og krævet gentagne injiceringer.

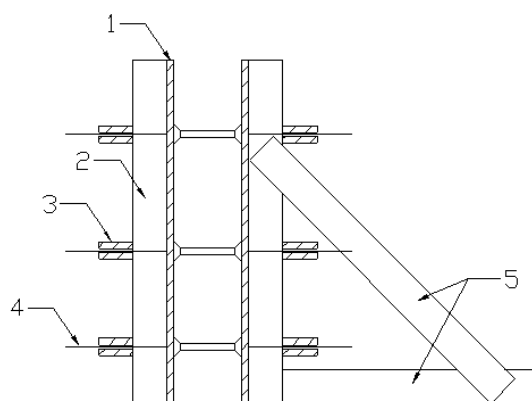
Membraner kan også males eller sprøjtes på (fx asfalt eller diverse kunststoffer), hvorved samlinger i teorien kan undgås, hvis arbejdet kan udføres i én samlet arbejdsgang, hvilket dog sjældent er tilfældet.

Hvis betonen bag membranen kan blive udsat for at revne, skal membranen kunne bære henover denne revne, hvilket både teoretisk og i praksis er vanskeligt – især hvis revnen er i bevægelser, fx som følge af temperaturbevægelser.

Clampsjern

Clampsjern (også kaldet formbindere) anvendes til at holde to formsider sammen ved en vægstøbning. I den traditionelle udførelse er clampsjernet en armeringsstang, der føres gennem et afstandsør indstøbt i betonen og forankres på hver sin formside.

1. Støbeflade
2. Oplænere (trykfordelende lag)
3. Spændbrædder (trykfordelende lag)
4. Formbindere (clampsjern)
5. Afstivning



Figur 5.: Clampsjern

Typisk fjernes clampsjernet efter støbning, og der sættes en prop i hullet på begge sider af væggen. Det er klart, at et sådant rør udgør en stor risiko for utæthed, hvis væggen udsættes for vandtryk.

Der findes derfor forskellige systemer til at tætne røret, og også systemer, hvor stangen ikke sidder i et rør, men faststøbes på tværs af væggen og senere afskæres på begge sider i et hul med dybde som det foreskrevne dæklag. Dette hul skal derefter udsættes med mørtel.

Der findes også clamps-systemer, hvor den tværgående stang er af armeret plast (som en "fiskestang") og derfor kan afskæres glat på overfladen uden korrosionsproblemer.

10.8.3 Krav om vandtæthed

Krav til en betonkonstruktions vandtæthed stilles både som krav til betonmaterialets tæthed og til betonkonstruktionens tæthed.

10.8.3.1 Definition på vandtæthed

Ofte kræves vandtæthed, uden at dette begreb er defineret.

I andre situationer kræves fx et betonmateriale med en vis tæthed og en konstruktionsudformning med begrænsede revnevidder.

Denne kravformulering kan medføre problemer, fordi en konstruktion kan opfylde disse krav og blive opfattet som værende utæt. Enhver revne kan medføre større eller mindre utætheder, og da den projekterende typisk tillader revner i sin dimensionering, er der her en indbygget konflikt.

Tilsvarende vil et betonmateriale med moderat tæthed i begrænset tykkelse – fx en traditionel 20 cm tyk kældervæg med beton med et vand/cement forhold på 0,55 – medføre gennemsvingning af vand gennem selve betonmaterialet. Hvis en sådan kælder holdes opvarmet og udluftet, vil den opfattes som vandtæt, men hvis det gamle oliefyr med stort varmespild udskiftes med et gasfyr, og der samtidigt skiftes til moderne tætte vinduer, vil kælderen i stedet blive opfattet som være utæt og fugtig.

10.8.3.2 Krav til vandtæthed af betonmaterialet

I DS/EN 1992-3 er der ikke anført specifikke krav til betonmaterialets vandtæthed. De almindelige krav som anført i materialestandarden EN 206 kan derfor anvendes. Her står imidlertid heller ikke krav til betonmaterialets vandtæthed.

I det danske implementeringsdokument til EN 206 kaldet DS/EN 206 DK NA er der i afsnit 6.2.3 stillet forslag til, hvordan krav til betonmaterialets vandtæthed kan specificeres. Dette er gjort ved først af definere 2 slags vandtæthed:

1. **Fugttætte konstruktioner** – fx kældervægge uden egentligt vandtryk
2. **Vandtætte konstruktion**, hvor vandtæt forstås som tæt over for vand under tryk – fx vægge i tunneler, kældre under grundvandspejlet etc.

For den fugttætte beton skal betonen opfylde krav til eksponeringsklasse XC2 (moderat miljø), hvilket blandt andet betyder vand-cement forhold på højst 0,55, og betonen skal indeholde mindst 375 kg betonfiller (fine partikler med en kornstørrelse på højst 0,25 mm) pr. kubikmeter.

For den vandtætte beton skal betonen opfylde krav til miljøklasse XS2 (aggressivt miljø), hvilket blandt andet betyder vand-cement forhold på højst 0,45, og betonen skal indeholde mindst 375 kg betonfiller pr. kubikmeter. Desuden skal det ækvivalente cementindhold være mindst 300 kg pr. kubikmeter.

10.8.3.3 Krav til vandtæthed af en betonkonstruktion

Anvendes et vandtæt betonmateriale som beskrevet i DS/EN 206 DK NA, vil det ikke være gennem betonmaterialet konstruktionen lækker vand. Populært sagt er en beton af denne type "tæt mellem revnerne".

Krav til vandtætte konstruktioner består derfor af 1) krav til et vandtæt materiale og 2) krav til at undgå utætheder i form af primært revner, men også utætte støbeskel og stenreder fra dårlig komprimering i forbindelse med udstøbningen.

I det europæiske (og danske) normsystem for betonkonstruktioner findes en del 3, DS/EN 1992-3 [1], der i princippet kun omhandler beholdere, hvor vandet skal holdes inde, men som det også anføres i punkt (106) i denne, kan "punkterne om dimensionering for væsketæthed" også være relevante for fx tunneler, hvor vandet skal holdes ude. DS/EN 1992-3 er da også anvendt i forskellige udbudsmaterialer til at beskrive fx vandtæthed af tunneler.

Tabel 7.105 – Klassifikation efter tæthed

Tæthedsklasse	Krav til tæthed
0	En vis grad af gennemsivning kan accepteres, eller gennemsivning af væsker er ikke relevant.
1	Gennemsivning skal begrænses til en lille mængde. Enkelte pletter på overfladen eller gennemtrængende damp kan accepteres.
2	Gennemsivning skal være minimal. Udseendet må ikke forringes af pletter.
3	Gennemsivning er ikke tilladt.

Tabel 1. I DS/EN 1992-3, Tabel 7.105 defineres fire tæthedsklasser.

I DS/EN 1992-3 er det beskrevet, hvilken revnedannelse, revnevidder og revnetyper, der tillades i de fire klasser. Som det fremgår er konstruktioner i tæthedsklasse 0 og 1 ikke egentligt vandtætte.

I tæthedsklasse 2 anføres, at gennemgående revner bør undgås, medmindre der anvendes en membran.

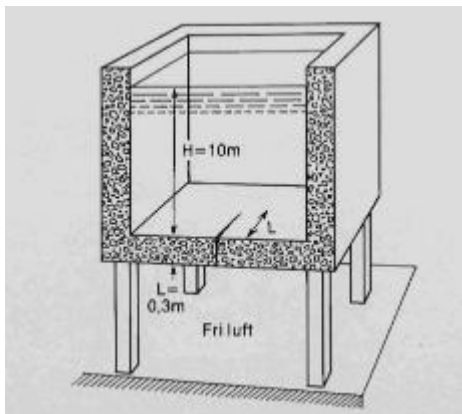
I tæthedsklasse 3 anføres, at membraner eller forspænding er nødvendigt for at sikre vandtæthed.

En kælder eller en tunnel – der ønskes "vandtæt" - vil typisk blive placeret i tæthedsklasse 2, mens tæthedsklasse 3 typisk vil blive anvendt til beholdere.

10.8.4 Beregning af en konstruktions vandtæthed

Det er svært at beregne en konstruktions reelle vandtæthed.

I Beton-Bogen [2] er der i kapitel 3.4 Fugtmekanik anført et eksempel 3.4-3, hvor der regnes på tætheden af bundpladen i et vandtårn. Eksemplet viser, hvor store usikkerheder en sådan beregning indebærer, men eksemplet viser også, hvor vigtigt det er at undgå revner i vandtætte konstruktioner.



Der regnes på vandtætheden af vandtårnets bund.

Vanddybden er 10 meter.

Bunden er 30 cm tyk og udført i en beton med $v/c=0,50$ og et cementindhold på 300 kg/m^3 .

Denne beton kan ikke regnes for at være vandtæt i henhold til kravene i DS/EN 206 DK NA, som beskrevet ovenfor.

Mængden af vand, der transporteres igennem bunden, beregnes med et antal formler og et antal forudsætninger, som anført i [2]. Som det fremgår er en sådan beregning forbundet med en betydelig usikkerhed.

Hvis undersiden af pladen ikke udtørres (er fugtig), er vandmængden, der trænger igennem bunden, skønnet til $0,1 \text{ g/m}^2 \cdot \text{døgn}$.

Hvis undersiden af pladen udtørres (er tør), er vandmængden, der trænger igennem bunden skønnet til $10 \text{ g/m}^2 \cdot \text{døgn}$ – altså 100 gange mere end ved en fugtig underside. Det skyldes, at der oven i det statiske vandtryk på de 10 m skal lægges sugning fra kapillære kræfter i betonens små porer. Og disse kræfter er meget store. Bemærk, at bunden af pladen i denne situation vil være tør, og af en iagttager vil pladen blive anset for vandtæt – ”den er jo tør”. Vandfronten er beregnet til at være ca. 12 mm inde i betonen.

Hvis der dannes en revne i bundpladen på blot 1 meters længde og med en revnevidde på 0,1 mm beregnes en gennemstrømning på hele 1.811 kg/døgn .

En revne på 0,1 mm regnes endda af de fleste for en meget lille revne. Mange kravdokumenter tillader revner på 0,2 mm eller 0,3 mm.

Gennemstrømningen for revner af disse størrelser kan med de samme forudsætninger beregnes til henholdsvis 14.500 kg/døgn og 48.900 kg/døgn .

Eksemplet viser, at det ikke er en tom talemåde at sige: ”Beton er tæt mellem revnerne!”

Figur 6. Gennemgang af resultaterne fra eksempel 3.4-3 fra Beton-Bogen [2].

10.8.5 Referencer

- [1] Eurocode 2 – Betonkonstruktioner – Del 3: Betonkonstruktioner til opbevaring af væsker og pulvere.

- [2] Beton-Bogen, Aalborg Portland, Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor, 2. udgave 1985.