TR 269/92
ISSN 0907-7073

Genbrug af alkalireaktiv beton i aggressivt miljø

Finn R. Gottfredsen
Finn Thøgersen

Laboratoriet for Bygningsmaterialer
Danmarks Tekniske Højskole

Finn R. Gottfredsen & Finn Thøgersen
Genbrug af alkalireaktiv beton i aggressivt miljø
Laboratoriet for Bygningsmaterialer
Danmarks Tekniske Højskole
Marts 1993

Teknisk Rapport
TR 269/92
ISSN 0907-7073

Stikord
Alkalikiselreaktioner, genbrug, aggressivt miljø, flyveasketilsætning, forsøg, alkaliindtrængning, fugtindtrængning, vurderingsmetoder.

Resumé
I rapporten gennemgås resultaterne af en række forsøg til klarlæggelse af risikoen for skadelige alkalikiselreaktioner i forbindelse med genbrug af beton i aggressivt miljø. Der er varieret på parametre som v/c-forhold, maksimal stenstørrelse og reaktivitet af genbrugstilslag. Virkningen af flyveasketilsætning, initialrevner, luftindhold m.m. er ligeledes undersøgt.

Forord

Med økonomisk støtte fra Miljøstyrelsen gennemførtes i perioden september 1991 - november 1992 projektet "Genbrug af alkalireaktiv beton i aggressivt miljø". Projektet blev gennemført hos Laboratoriet for Bygningsmaterialer ved Danmarks Tekniske Højskole. Ansvarlige for projektet var undertegnede i samarbejde med docent Anders Nielsen og inspireret af professor Torben C. Hansen.

I nærværende rapport redegøres der for forløbet af projektet og resultaterne præsenteres. Den tekniske rapport er en lettere redigeret udgave af en arbejdsrapport udarbejdet for Miljøstyrelsen som afslutning på projektet. I forhold til arbejdsrapporten er den væsentligste ændring tilføjelsen af et tillæg der omhandler resultater opnået efter arbejdsrapportens udarbejdelse.

Lyngby, Marts 1993

Finn R. Gottfredsen & Finn Thøgersen

Indhold

Sammenfatning 1

1. Indledning 3

2. Genbrugsbeton 4
   2.1 Baggrund 4
   2.2 Egenskaber 5
      2.2.1 Gradering 6
      2.2.2 Densitet og absorption 6
      2.2.3 Styrke og stivhed 6
      2.2.4 Svind og krybning 7
      2.2.5 Holdbarhed 7

3. Genbrugsbeton i aggressivt miljø 8
   3.1 Alkalikiselreaktioner 8
      3.1.1 Reaktionsforløb 8
      3.1.2 Forebyggelse 9
   3.2 Genbrugsbeton med alkalireaktivt tilslag 10
      3.2.1 Risikovurdering 10
      3.2.2 Restreaktivitet 11
      3.2.3 Genbrugsbetons sammensætning 11
   3.3 Erfaringer med genbrug i aggressivt miljø 12

4. Forsøg 14
   4.1 Forsøgsmetode 14
      4.1.1 Prøvedimension 14
      4.1.2 Lagring og måling 14
   4.2 Tilslagsbetoner 15
      4.2.1 Laboratoriebetoner 15
      4.2.2 Konstruktionsbetoner 16
      4.2.3 Opsummering 17
      4.2.4 Knusning 18
      4.2.5 Densitet og absorption 19
      4.2.6 Beregning af mørtelandele 20
   4.3 Forsøgsplan 22
      4.3.1 Fastlæggelse af forsøgsparametre 22
      4.3.2 Forsøgsserier 25
   4.4 Proportionering og støbning 28
      4.4.1 Proportionering 28
      4.4.2 Sammensætning af tilslag 30
      4.4.3 Blanding og støbning 32
   4.5 Målemetoder 33
      4.5.1 Ekspansioner 33
      4.5.2 Vægtforøgelser 33
      4.5.3 Fugt og alkalier 34

5. Resultater 35
5.1 Ekspansionsresultater 35
5.1.1 Eksempler 37
5.1.2 Springere 45
5.2 Vejeresultater 46
5.2.1 Fugtoptagelse i beton 46
5.2.2 Eksempler 49
5.3 Diskussion af resultater 51

6. Fugt- og alkaliindtrængning 57
6.1 Fugtmålinger 57
6.1.1 Relativ fugtighed 57
6.1.2 Vand/tørstofforhold 59
6.2 Alkali-indtrængning 60
6.3 Sammenfatning 62

7. Vurdering af genbrugstilslag 63
7.1 DTI's metoder 63
7.1.1 Måling af restekspansion 63
7.1.2 Kemisk svind 64
7.2 Mørtelprismeforsøg 65
7.2.1 Omfang 65
7.2.2 Proportionering og udstøbning 66
7.3 Resultater 66
7.3.1 Restekspansioner 66
7.3.2 Kemisk svind 67
7.3.3 Mørtelprismeekspansioner 68
7.4 Diskussion 70
7.4.1 Mørtelprismeekspansioner vs. cylinderekspansioner 70
7.4.2 Restekspansion vs. mørtelprismeekspansion 71
7.4.3 Kemisk svind vs. mørtelprismeekspansioner 72
7.4.4 Konklusion 73

8. Konklusion 74
8.1 Forsøgsresultater 74
8.2 Perspektiver 75

9. Referencer 77

Appendix A - C

Tillæg: Udvikling 28 - 51 uger

Bilagsoversigt

Sammenfatning

For at øge andelen af bygningsmaterialer der genbruges, er det vigtigt at skabe mulighed for genbrug af større mængder beton, idet dette materiale udgør en meget stor del af byggeaffaldet. Nedknust beton kan bruges som fyldmateriale, eller som tilslag til ny beton. Når betonen bruges som tilslag til genbrugsbeton, er det muligt at spare på naturligt forekommende tilslag af høj kvalitet.

I passiv miljøklasse udgør knust beton et yderst velegnet tilslagsmateriale, mens det i forbindelse med genbrug i moderat og aggressivt miljø er vigtigt at sikre sig, at eventuelle reaktive partikler i den gamle beton ikke giver anledning til skadelige alkalikiselreaktioner i genbrugsbetonen. En stor del af de ældre betonkonstruktioner, der er aktuelle til genbrugsformål, er opført med brug af alkalireaktive materialer, og det er således nødvendigt at være opmærksom på problemet.

I forbindelse med det foreliggende projekt er der udført en forsøgsrække til undersøgelse af ekspansions- og skadesudviklingen af genbrugsbeton med alkalireaktivt tilslag. Der er udstøbt betoncylindre, hvor knust beton af fire forskellige betonkvaliteter er brugt som groft tilslag. Genbrugsbetonerne er støbt med varierende vand-cementforhold, flyveasketilsætning og maksimal stenstørrelse. Herudover er der undersøgt en række sekundære parametre, herunder delvis stenerstatning, luftindhold og brug af genbrugssand. Betoncylindrene er prøvet efter en modificeret udgave af Dansk Teknologisk Instituts mørtelprismemetode, TI-B 51. Der er desuden foretaget løbende vejninger af prøvelegemerne.

Sideløbende med ekspansionsforsøgene er de anvendte tilslagsbetoner blevet undersøgt med forskellige metoder til hurtig vurdering af restreaktiviteten.

Forsøgsresultaterne viser, at genbrug af alkalireaktiv beton er mulig, såfremt visse forholdsregler følges. Tilsætning af 35 % flyveaske til genbrugsbetoner, hvor hele stenfraktionen udgøres af knust reaktiv beton, vil, ved passende valg af andre forsøgsparametre, bevirke at ekspansionerne nedsættes til uskadelige værdier. Endvidere er det muligt at forhindre skader ved fortynding af det reaktive materiale, idet tilsætning af kun 20 % reaktiv beton til stenfraktionen har givet gode resultater. Endelig kan skader undgås ved at der bruges genbrugstilslag med passende lav restreaktivitet.

De undersøgte restreaktivitetsmetoder giver et brugbart grundlag for at vurdere en konkret betons anvendelighed som tilslag i aggressivt miljø. Yderligere undersøgelser er dog nødvendige for at fastsætte konkrete grænseværdier til brug i praksis.

1. Indledning

Gennem de senere år har der været en kraftig stigning i opmærksomheden omkring genbrug og ressourcebesparelser. Som en konsekvens af dette har regeringen i 1990 opstillet en målsætning gående ud på, at 50 % af affaldet fra bygge- og anlægssektoren skal genbruges i år 2000. Da der på nuværende tidspunkt kun bliver genbrugt omkring 10 %, er det åbenbart, at der i løbet af ganske få år skal ske en betragtelig indsats for at nå det opstillede mål. Ved en yderligere grad af genanvendelse af byggeaffald, vil der kunne opnås en væsentlig nedsættelse af forbruget af de naturlige ressourcer, der på visse områder på langt sigt kun vil være tilgængelige i begrænsede mængder. Herudover må der forventes en samfunds- og selskabsøkonomisk besparelse i transportudgifter tillige med en mindre transportforårsaget miljøbelastning, idet genbrugsmaterialer som oftest vil kunne findes tættere på anvendelsesstedet end de naturlige materialer, som de kan erstatte.

I praksis vil der, i forbindelse med en øget grad af genbrug, melde sig en del problemer omkring selektiv nedrivning og oparbejdning af nedrivningsprodukter til materialer, der er anvendelige i nybyggeri. Disse særlige forholdsregler vil uvægerligt fordyre genbrugsmaterialer i forhold til nye materialer. Det kan nævnes, at selektiv nedrivning regnes for at være 10-30 % dyrere end traditionel nedrivning. Dette problem er fra politisk hold søgt løst ved at indføre en generel affaldsafgift på 130 kr/ton for alt byggeaffald, der skal deponeres. Denne afgift forventes at stige til 195 kr/ton pr. 1/1 1993. Således skabes et økonomisk incitament for at øge genanvendelsesgraden. Det er dog ligeledes vigtigt, at den tekniske baggrund er i orden, d.v.s. der skal laves undersøgelser af anvendelsesmuligheder for de forskellige affaldstyper.

Da beton mængdemæssigt udgør en meget stor del af det genererede byggeaffald, er det vigtigt, at der skabes muligheder for at genbruge langt større mængder, end det i øjeblikket er tilfældet. Den foreliggende undersøgelse af genbrugsbeton udsat for aggressive miljøforhold kan forhåbentlig danne baggrund for anvendelse af genbrugsbeton på områder, hvor det hidtil ikke har været brugt, og således medvirke til at muliggøre opfyldelsen af regeringens målsætning.

2. Genbrugsbeton

2.1 Baggrund

Genbrugstilslag og ny beton støbt med genbrugstilslag er blevet undersøgt igennem ca. 50 år. Hovedparten af denne forskning er foregået i USA, Japan, Holland og Danmark. En samlet oversigt over forskningsresultaterne kan findes i [1]. Omfanget af den faktiske anvendelse af materialet lader dog fortsat en del tilbage at ønske.

I forbindelse med opfyldelsen af den i indledningen omtalte genbrugsmålsætning er det i særdeleshed vigtigt at øge genanvendelsen af beton, da dette materiale mængdemæssigt udgør langt den største del af byggeaffaldet. I "PROBA - Kortlægning og prognose for bygge- og anlægsaffald" [2] angives den samlede mængde af bygge- og anlægsaffald i 1990 til 4.4 mio. tons, heraf udgør "brokker", d.v.s. beton og mursten, 3.7 mio. tons. eller 84 %. Som nævnt i indledningen er genanvendelsesgraden i øjeblikket kun ca. 10 %. For at opnå en genanvendelsesgrad på 50 % skal der altså yderligere skabes mulighed for genbrug af omkring 1.5 mio. tons beton og tegl. Dette tal kan sammenlignes med det samlede årlige forbrug af sand, grus og sten, der ligger i størrelsesordenen 30-40 mio. tons [3].

Uforarbejdet beton- og teglaffald kan anvendes som decideret fyldmateriale. Denne anvendelse indebærer dog ikke nogen besparelse af naturlige råstoffer af høj kvalitet. I nedknust tilstand kan beton og tegl anvendes som stabilgrus til f.eks. vejbygning eller som tilslag til ny beton. Ifølge en undersøgelse lavet af Fredningsstyrelsen og RUC [4] anvendes omkring 67 % af grus-råstofforbruget som fyldmateriale, d.v.s. som fyld i anlægssektoren samt grusmateriale til vejbygning. Af de tilbageværende 33 % anvendes de 23 % som tilslag i færdigbeton, betonelementer og betonvarer. Det er således åbenbart, at det ud fra rent mængdemæssige betragtninger er muligt at anvende al den ekstra affaldsbeton, som ønskes genbrugt, til fyldmaterialer. Det må dog tages med i betragtning, at ved brug af nedknust beton som tilslag, spares på de naturligt forekommende ressourcer af højkvalitetsmaterialer, i modsætning til ved anvendelsen som fyldmateriale, hvor det er grusressourcer af en dårligere kvalitet der spares. Endvidere vil der optræde væsentlige besparelser i transportomkostninger, idet nedrivningsmaterialer oftest vil befinde sig i nærheden af de nye konstruktioner, i modsætning til naturlige tilslagsmaterialer der som regel skal hentes "ude på landet". Ved brug af mobile knuseanlæg vil det endda i mange tilfælde være oplagt at genbruge byggeaffaldet på stedet. Dette vil især være aktuelt for renovering af belægningsbeton på veje, flyvepladser o.lign.

For at fremme brugen af genbrugsbeton blev der i 1989, af Dansk Betonforening (DBF), udarbejdet en anvisning for genanvendelsesmaterialer i beton til passiv miljøklasse [5]. Med denne anvisning indførtes en formel baggrund for brugen af nedknust beton og tegl som groft tilslag til beton i passiv miljøklasse og tillige opstilledes kravværdier for tilslaget og regneregler til brug ved proportionering.

Enkelte projekter med genbrugsbeton er blevet gennemført i Danmark i de sidste år. Efter nedbrydningen af to jernbanebroer i Odense, er betonen således genbrugt som tilslag til ny beton i forbindelse med et boligbyggeri [6]. Et andet eksempel på genbrug er en ny bro ved Nyborg, hvor det knuste materiale delvis er brugt som fyld på Storebælt, men herudover skal en del ligeledes bruges i et boligbyggeri i Odense. Endelig er der af Miljøstyrelsen igangsat et projekt med betegnelsen "Det genanvendte hus", hvor der i udstrakt grad skal bruges genbrugsmaterialer.

Ud over disse projekter, der er forsøg støttet med tilskud fra det offentlige, er den faktiske anvendelse af genbrugsbeton med baggrund i anvisningen dog meget begrænset. Ved en rundspørge til flere færdigbetonleverandører (4K, GH og Unicon) er det blevet konstateret, at ingen af disse bruger genbrugstilslag i den normale produktion. Man er opmærksom på at muligheden eksisterer, men er p.g.a. manglende efterspørgsel og manglende økonomisk incitament ikke begyndt at bruge knust beton i produktionen af fabriksbeton. Desuden forudses der praktiske problemer ved den nødvendige omstilling af produktionsprocessen og der hersker usikkerhed omkring muligheden for at få sikre forsyninger af nedknust materiale. En del faktorer afholder således betonleverandørerne fra at anvende genbrugstilslag.

I øjeblikket bliver stort set al den nedrivningsbeton, som knuses og genbruges brugt som fyldmateriale, primært som stabilgrus. Til sådanne anvendelser er knust beton et yderst velegnet og konkurrencedygtigt materiale.

Afslutningsvis skal det nævnes, at der også i andre lande arbejdes med genbrug af beton. I USA bliver gammel belægningsbeton i udstrakt grad genbrugt ved anlæg af nye belægninger. I Japan og Holland findes anvisninger for genbrug af beton. I Holland stilles der direkte krav om, at der på visse områder skal bruges mindst 20 % genbrugstilslag.

2.2 Egenskaber

Via den betydelige forskning der er gennemført hidtil, i Danmark såvel som i udlandet, er det blevet fastslået, at nedknust beton udgør et velegnet tilslag til produktion af ny beton [1]. Der er dog visse specielle egenskaber, som det er nødvendigt at være opmærksom på. De fleste af disse har forbindelse med den knuste betons ændrede kornform og mere porøse karakter sammenlignet med naturligt tilslag.

I første omgang er det vigtigt at sikre sig, at materialet er ensartet, og at det ikke indeholder for store mængder af uønskede nedrivningsrester (træ, plast, jern, jord o.lign.). I DBF's anvisning kræves, at mindst 95 % af materialet består af beton, murværk eller tegl.

2.2.1 Gradering

Ved nedknusning af beton i kæbe- eller slagmølleknuser fås et velgraderet materiale, der, for det grove tilslags vedkommende, giver en beton med god bearbejdelighed. Derimod kan der, ved brug af store mængder nedknust materiale også i sandfraktionen, opstå problemer med bearbejdeligheden. Det er således tilrådeligt at anvende naturligt tilslag i sandfraktionen. DBF's anvisning tillader ikke genbrug af partikler mindre end 4 mm.

2.2.2 Densitet og absorption

De enkelte partikler af den knuste beton består enten af ren mørtel eller af sten fra den originale beton med vedhæftet mørtel. Da mørtel har en væsentligt højere absorption og lavere densitet end naturlige sten, er det under proportioneringen nødvendigt at tage hensyn til disse ændrede egenskaber. Typisk vil densiteten af nedknust beton være 2200-2500 kg/m^3 og absorptionsværdierne 5-10 %. Ved produktion af genbrugsbeton er det således særlig vigtigt løbende at overvåge absorptionen for at kunne styre vand-cementforholdet nøjagtigt. I DBF's anvisning opdeles det nedknuste tilslag i to kvalitetsklasser efter veldefinerede densitetskrav.

2.2.3 Styrke og stivhed

Styrken af genbrugsbetonen er ret afhængig af kvaliteten af genbrugstilslaget. Ofte finder man styrker, der ligger 5-10 % under den styrke man ville have opnået ved brug af konventionelt tilslag. Der findes dog også eksempler, hvor der er opnået højere styrker ved brug af genbrugstilslag. Dette kan forklares ved en positiv knusningseffekt, forstået på den måde, at det er de svageste dele af betonen, som går i stykker under knusningen. Det resulterende materiale vil altså bestå af de stærke og urevnede dele af den oprindelige beton. I den forbindelse kan det nævnes, at det er konstateret, at brug af genbrugspartikler mindre end 2 mm kan give anledning til et betydeligt styrketab [1]. Dette er altså endnu en grund til kun at bruge genbrugstilslag som stenerstatning.
I DBF's anvisning, hvor der nødvendigvis må anlægges et konservativt skøn, bruges en styrke-faktor på 0.9 for højkvalitetstilslag og 0.7 for genbrugstilslag af en lidt dårligere kvalitet. Med hensyn til E-modul findes normalt værdier, som er 15-40 % lavere end for normalbeton. I anvisningen bruges 20 % og 50 % reduktion i de to tilslagsklasser. Styrkeegenskaber for beton med genanvendelsesmaterialer er behandlet i [7].

2.2.4 Svind og krybning

Ved forsøg er det fundet, at udtørringssvind og krybning er 40-80 % højere i genbrugsbeton. Dette skyldes det høje mørtelindhold, idet mørtelen er den aktive fase i disse processer.

2.2.5 Holdbarhed

Holdbarhedsmæssigt er det vigtigt at skelne mellem beton i passiv miljøklasse, d.v.s. indendørs tørt miljø, hvor der ikke er problemer i forbindelse med genbrugsbeton, og beton i moderat og aggressiv miljøklasse, hvor der muligvis kan opstå problemer. Fugtpermeabiliteten, som er en vigtig faktor ved de fleste nedbrydningsprocesser, må forventes at være højere i genbrugsbeton, idet vand og vanddamp transporteres i mørtelfasen.

Ved undersøgelser af frostbestandigheden af genbrugsbeton er man nået frem til modstridende konklusioner. Europæiske og amerikanske undersøgelser har indikeret, at frostbestandigheden ikke påvirkes væsentligt, mens japanske undersøgelser har påvist noget lavere frostbestandighed. Dog har man i Japan gode erfaringer med 20 % tilsætning af genbrugsmateriale i stenfraktionen. Det må forventes, at genbrugstilslagets kvalitet er afgørende for frostbestandigheden. Er mørtelfasen i den nedknuste beton af en god stærk kvalitet med passende luftindblanding kan man ikke forvente problemer. Derimod vil en dårlig mørtel uden luftindblanding sandsynligvis give problemer. Endelig skal det påpeges, at porøse teglpartikler vil være potentielt skadelige ved frostpåvirkninger. I modsætning til passiv miljøpåvirkning, hvor disse materialer kan anvendes, vil nedknust tegl og murværk altså ikke kunne tillades som tilslag til beton i aggressivt miljø. I dette projekt vil det blive forudsat, at genanvendelsesmaterialet består af "ren" beton.

Et andet holdbarhedsmæssigt problem som hidtil ikke er blevet behandlet i forskningen er nedknust beton indeholdende større eller mindre mængder af alkalireaktivt tilslag. Dette emne vil blive belyst i den foreliggende rapport.

3. Genbrugsbeton i aggressivt miljø

3.1 Alkalikiselreaktioner

I det følgende gives en summarisk oversigt over alkalikiselreaktioners årsager, virkninger samt hvad der kan gøres for at undgå dem.

3.1.1 Reaktionsforløb

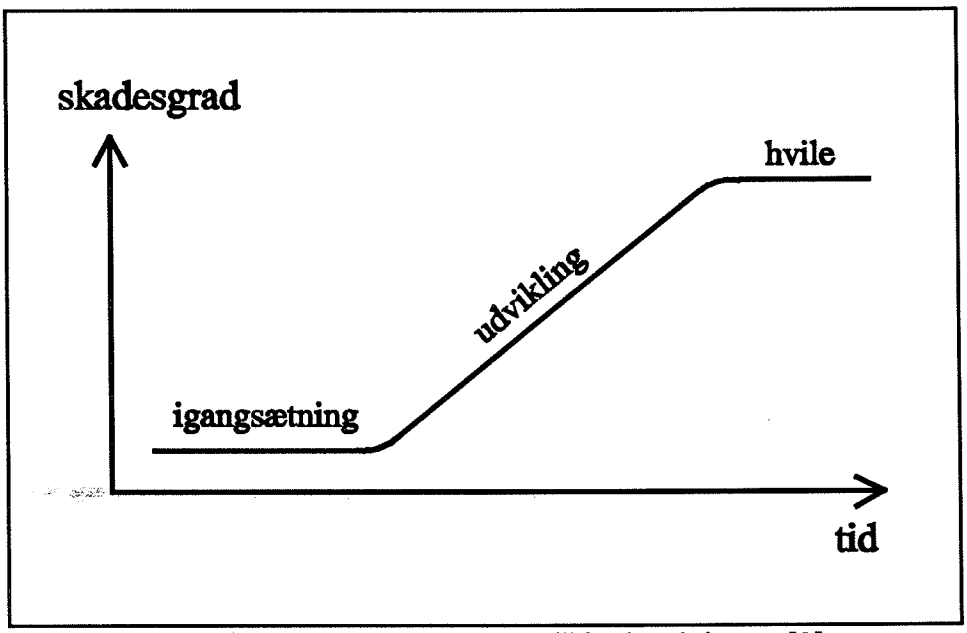
For at reaktionen kan foregå i en given beton kræves det, at tre komponenter er til stede:

1) Reaktivt tilslag
Der skal være brugt reaktivt materiale som tilslag i betonen. I Danmark kan de skadelige reaktioner næsten altid spores tilbage til flintpartikler i 2-4 mm fraktionen, hvorimod stenfraktionen yderst sjældent giver anledning til problemer ved brug af typiske danske tilslagsmaterialer. De skadelige flintpartikler i sandfraktionen konstateres oftest at være porøse opalflintkorn, hvorimod porøse og tætte calcedonflinter kun kan bringes til at reagere under meget hårde miljøbelastninger.

2) Alkalier
Den reaktive silica reagerer kemisk med alkali-ioner, primært Na^+ og K^+, der befinder sig i betonens porevæske. Disse alkalier kan enten komme fra cementen, eller de kan tilføres betonen fra ydre kilder som f.eks. tøsalte.

3) Fugt
Reaktionen kan kun antage et skadeligt omfang, såfremt der er et højt fugtniveau i betonen. Ved en relativ fugtighed i betonens porer under 80 - 85 % vil reaktionen ikke kunne forløbe.

Når ovenstående forudsætninger alle er opfyldt, kan der ske en reaktion og ekspansion som fører til dannelse af mikrorevner omkring de reagerende partikler, og i visse tilfælde til udvikling af et sammenhængende revnesystem med synlige overfladerevner. Alt dette sker, afhængigt af forholdene, over en kortere eller længere tidsperiode, men med et typisk tidsforløb for revneudviklingen p.g.a. alkalireaktioner som vist på fig. 3.1.



Figur 3.1: Principielt tidsforløb for alkalikiselreaktioner [8].

I begyndelsen sker der en spændingsopbygning omkring de reaktive partikler som fører over i en udviklingsperiode, hvor ekspansioner og revner er i vækst. Til slut vil ekspansionspotentialet af de reaktive korn være opbrugt, og konstruktionen når en hvileperiode. Den faktiske varighed af de angivne perioder bestemmes af konstruktionsdimension, materialesammensætning og miljøpåvirkning.

Et andet skadessymptom er springerdannelse forårsaget af reaktive partikler nær betonoverfladen.

3.1.2 Forebyggelse

Reaktionernes skadelige virkninger kan forebygges ved at begrænse en af de tre nødvendige faktorer. Ved lave indhold af porøs flint i sandet sker der ikke nogen volumenekspansion. I henhold til Basisbetonbeskrivelsen (BBB) [9] vil indhold af porøs flint under 2 % sikre mod skadelige alkalireaktioner. Et andet forebyggende skridt er begrænsning af alkaliindholdet i cementen. Alkaliindholdet i dansk Standard- og Rapidcement er 0.6 - 0.7 % ækv. Na_2O. I Lavalkali-sulfatbestandig cement, som normalt bruges i moderat og aggressiv miljøklasse, er alkaliindholdet mindre end 0.4 % ækv. Na_2O. I BBB foreskrives tillige et maksimalt samlet alkaliindhold i betonen på 3 kg/m^3. Tilskud af alkalier fra andre kilder kan modvirkes ved dels at bruge "rene" tilslagsmaterialer og blandevand, dels fremstille en tæt beton, som besværliggør indtrængen af alkalier fra omgivelserne. Tætheden har ligeledes indflydelse på betonens vandoptagelse, og dermed risikoen for at den relative fugtighed kommer over de kritiske 80 - 85 %.

Puzzolantilsætning, som f.eks. flyveaske (FA) eller mikrosilica (MS), vil både forøge betonens tæthed overfor indtrængning af fugt og alkalier,

samt binde en del af alkalierne i en uskadelig reaktion. I BBB åbnes mulighed for brug af op til 35 % FA + MS i forhold til mængden af cement + FA + MS (heraf dog højst 10 % MS).

3.2 Genbrugsbeton med alkalireaktivt tilslag

Ved brug af nedknust beton som tilslag til ny beton i moderat og aggressiv miljøklasse må man forudse en risiko for, at alkalireaktive partikler i den gamle beton kan give anledning til revnefremkaldende alkalireaktioner i den nye konstruktion. Det må anses for sandsynligt, at en meget stor del af den gamle beton, der vil være aktuel for genbrugsformål, indeholder alkalireaktivt tilslag. Dette skyldes, at der i Danmark er brugt store mængder af reaktive tilslagsmaterialer, især før man blev opmærksom på alkalireaktionernes farlighed.

3.2.1. Risikovurdering

Når risikoen ved genanvendelse af en konkret beton skal vurderes er det ønskeligt at kende blanderecept, samt de miljøpåvirkninger, som betonen har været eksponeret for. Med denne viden kan fire principielt forskellige betontyper opstilles:

1. Beton, som oprindelig er støbt med ikke-reaktivt tilslag.

2. Beton, som er støbt med reaktivt tilslag, hvor reaktionerne er ophørt p.g.a. at al den reaktive silica er blevet opbrugt. Denne situation svarer til hvile-perioden på fig. 3.1.

3. Beton støbt med reaktivt tilslag, hvor reaktionerne er igangværende, d.v.s. betonen ekspanderer (svarende til udviklingsperioden på fig. 3.1).

4. Beton støbt med reaktivt tilslag, hvor reaktionerne ikke er gået igang, da alkaliindholdet og/eller fugtniveauet i betonen har været for lavt (før eller under igangsætningsperioden på fig. 3.1). Det vil typisk dreje sig om betoner, som har været placeret i konstruktioner i passiv miljøklasse.

Det er indlysende, at beton der tilhører type 1 og 2 kan genbruges uden fare for yderligere alkalikiselreaktioner. Derimod kan det ikke afvises, at beton af typerne 3 og 4 vil kunne give anledning til skadelige ekspansioner ved brug som genbrugstilslag. Specielt vil type 4 være relevant, idet skønsmæssigt 80 % af al beton, og dermed også af den beton, der vil være aktuel som genbrugstilslag, bruges i passiv miljøklasse. I disse betoner vil der ofte være anvendt et reaktivt sand, idet der, p.g.a. det tørre miljø, ikke har været fare for alkalireaktioner.

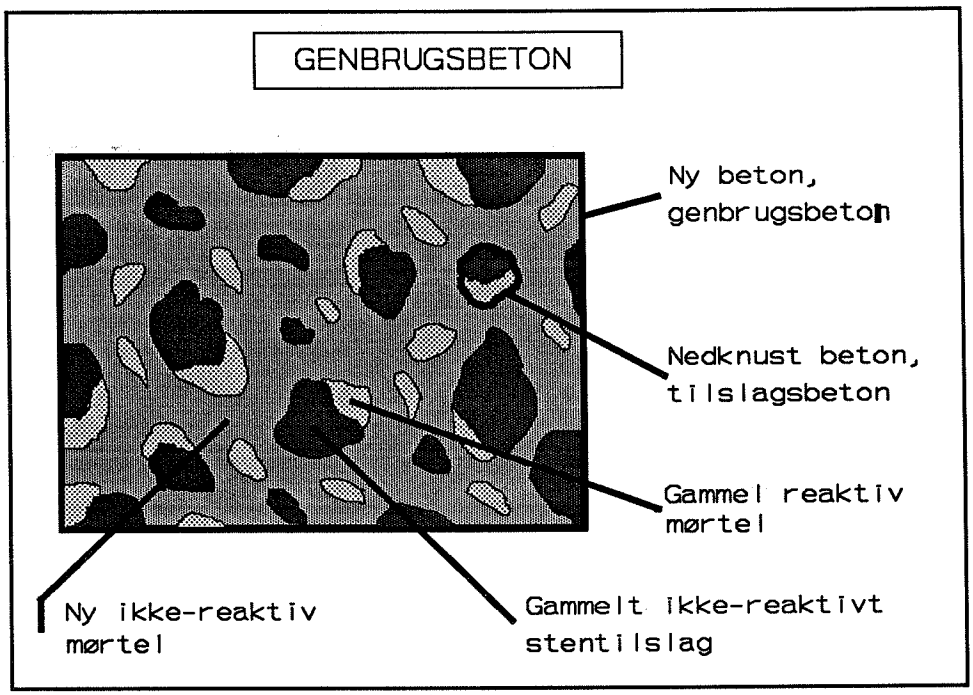
3.2.2. Restreaktivitet

I forbindelse med en vurdering og opdeling af beton til genbrug, kan begrebet restreaktivitet med fordel benyttes. Restreaktiviteten defineres som en given betons evne til at reagere og ekspandere ved en aggressiv miljøpåvirkning. Restreaktiviteten skal således opfattes som et udtryk for betonens indhold af reaktivt silica, der er til rådighed for fortsatte reaktioner. Det er åbenbart, at beton af type 1 ikke har nogen restreaktivitet, type 2 har muligvis en smule tilbage, type 3 vil have en del, mens type 4 har høj restreaktivitet. Konkrete metoder til bestemmelse af restreaktivitet vil blive behandlet i et senere afsnit.

3.2.3 Genbrugsbetons sammensætning

Under danske forhold vil det normalt være sandpartikler i 2 - 4 mm fraktionen der giver problemer hvad angår alkalikisel-reaktioner. Derfor må mørteldelen af den nedknuste beton anses for at være den skadelige bestanddel af genbrugsbeton. Dette forudsætter dog, at BBB's forskrifter følges ved fremstillingen af den nye genbrugsbeton, d.v.s. man må kunne gå ud fra, at der er brugt et sand beregnet for moderat og aggressiv miljøklasse, således at den nye mørtel er inaktiv m.h.t. alkalireaktioner.

På den baggrund er den principielle opbygning af genbrugsbeton som vist på figur 3.2. De indførte betegnelser vil blive benyttet i det følgende.



Figur 3.2: Model af genbrugsbeton

Som det ses på figur 3.2, kan den reaktive mørtel optræde enten som rene mørtelklumper, eller som mørtel vedhæftet stentilslaget fra den oprindelige beton. Under alle omstændigheder vil der dog være tale om inklusioner af potentielt ekspansivt materiale i en matrix af inaktiv karakter. I forhold til alkalireaktioner i ikke-genbrugsbeton, hvor de reaktive partikler er jævnt fordelt i hele matrixfasen (to-fase system), er der altså her tale om et tre-fase system. Umiddelbart kunne man forvente, at den "fortynding" af det reaktive materiale, som optræder i genbrugsbeton, ville gøre eventuelle fortsatte alkalireaktioner mindre alvorlige i forhold til reaktionerne i den gamle beton. Det må dog påpeges, at det ikke er en jævn fortynding der sker, idet de enkelte reaktive partikler i den gamle mørtel fortsat sidder med den oprindelige afstand. En egentlig teoretisk beregning af de opståede spændinger og deraf følgende revner vil ikke blive gennemført i det foreliggende projekt.

3.3. Erfaringer med genbrug i aggressivt miljø

I USA er der igennem snart 20 år blevet gjort en kraftig indsats omkring genbrug af betonvejbelægninger, og det er efterhånden lykkedes at nå frem til en både teknisk og økonomisk fordelagtig procedure. En kort gennemgang af de Amerikanske erfaringer omkring genbrug af gamle betonveje er givet i [10].

I et enkelt rapporteret tilfælde fra Wyoming har den gamle betonbelægning været kraftigt angrebet af alkalireaktioner. Alligevel har betonen kunnet genanvendes, idet man efter en betydelig indsats har udviklet en betonrecept tilsat flyveaske for at sikre mod nye ekspansioner. Dette eksempel på en velfungerende blanderecept for en genbrugsbeton med alkalireaktivt tilslag er vist i tabel 3.1. Det er værd at bemærke, at der i denne "Amerikanske" beton er brugt delvis substitution med genbrugsmaterialer i både sand- og stenfraktionen. Det fremgår dog, at stenene hovedsagelig er genbrugssten, mens sandet primært er nyt sand. Der er tilsat en flyveaskemængde svarende til 21 % af cement + flyveaske. Betonen har et luftindhold svarende til 5.5 vol-%.

Hvad angår danske erfaringer, er der i "Genbrug af betonbelægninger" [11] lavet en undersøgelse af fire forskellige belægningers potentielle alkalireaktivitet. Dette er gjort ved at udstøbe mørtelprismer med nedknust sand og prøve disse prismer efter den danske mørtelprismemetode TI-B 51. Denne undersøgelse viste, at tre af belægningerne ikke ekspanderede væsentligt, til trods for, at der oprindeligt var blevet brugt et alkalireaktivt sand ved udstøbningen. Disse belægninger havde dog heller ikke udvist tegn på skadelige alkalikiselreaktioner under deres funktionsperiode. Den fjerde belægning, som var blevet nedbrudt p.g.a. alkalireaktioner, ekspanderede så meget ved prøvningen, at det vurderedes, at den var uegnet som genbrugstilslag til ny beton.

Materiale	Sammensætning [kg/m^3]
Genbrugssten	670
Nye sten	357
Genbrugssand	150
Nyt sand	535
Cement	290
Flyveaske	79
Vand	141

Tabel 3.1: Betonrecept for genbrugsbelægningsbeton benyttet i Wyoming, USA. Fra [10].

Ovenstående eksempler omfatter stort set al den faglitteratur det har været muligt at finde omkring genbrug af potentielt reaktiv beton i agressivt miljø. Dette viser, at emnet er meget sparsomt behandlet, herhjemme såvel som i udlandet.

4. Forsøg

Til klarlæggelse af genbrugsbetons ekspansionsudvikling og dennes afhængighed af en række overordnede parametre, såsom indhold af reaktivt materiale, v/c-forhold og flyveasketilsætning, er der gennemført en omfattende forsøgsrække.

4.1 Forsøgsmetode

Ved undersøgelse af alkalikiselreaktioners ekspansionsforløb må man gøre sig klart, at det, for at opnå resultater indenfor et overskueligt tidsrum, er nødvendigt at accellerere processen. I Danmark er der skabt praksis for at dette gøres ved lagring i varmt saltvand. Den foreliggende forsøgsrække er blevet gennemført som en modificeret udgave af TI-B 51; mørtelprismemetoden.

4.1.1 Prøvedimension

Valget af prøvedimension var bestemt af to modsatrettede effekter. Da store prøvelegemer erfaringsmæssigt ekspanderer langsommere end små, var det af hensyn til tidsrammen for forsøgene ønskeligt, at prøvedimensionen var så lille som muligt. På den anden side er det klart, at det ved undersøgelse af beton, som indeholder enkeltpartikler af størrelsesordenen 2-3 cm, er nødvendigt at vælge en prøvedimension, som er så stor, at enkelte partikler ikke får nogen betydende effekt. Dette er en nødvendig forudsætning for at de målte ekspansioner kan opfattes som repræsentative for hele betonvolumenet. Det blev vurderet, at der med en prøvedimension på ø100 x 200 mm cylindre var taget passende hensyn til disse to afgørende forhold.

4.1.2 Lagring og måling

Der er udstøbt prøvecylindre af genbrugsbeton, som indledningsvis blev lagret i ferskvand i 28 døgn ved 20 °C. Herefter overførtes prøvelegemerne til to store kar (375 og 500 l) med en mættet saltopløsning (370 g NaCl pr. liter vand). Ved hjælp af en cirkulationspumpe i hvert kar blev vandet ført forbi et 1000 w varmelegeme med tilhørende termostatstyring, der holdt vandets temperatur på 50 +/- 2 °C. Prøvelegemerne blev anbragt i åbne plastkasser på en sådan måde, at alle overflader blev eksponeret for saltvandet. Prøvelegemernes længder er målt ved terminerne -4, 0, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 og 28 uger i forhold til starten på saltvandslagringen. I forbindelse med længdemålingerne er der foretaget vejninger. Yderligere detaljer om målinger og måleprocedure følger i afsnit 4.5.

4.2 Tilslagsbetoner

I forsøgene er der benyttet fire forskellige betoner. De to af betonerne blev af praktiske og forsøgsmæssige grunde fremstillet i laboratoriet direkte til formålet. De to andre betoner blev skaffet ude fra, og disse har været placeret i konstruktioner i adskillige år før forsøgene blev gennemført.

4.2.1 Laboratoriebetoner

En vigtig del af dette projekt har været en undersøgelse af ekspansionsudviklingen for genbrugsbetoner, hvor der er brugt tilslagsbetoner med forskellig grad af alkalireaktivitet. I den forbindelse var det ønskeligt at undersøge betoner svarende til de fire principielt forskellige typer, der er defineret i afsnit 3.2.1. Endvidere var det ønskeligt at undersøge en beton, der med hensyn til alkalireaktivitet var så farlig som muligt, det vil sige med et meget højt indhold af reaktiv kisel. Herudover var det nødvendigt at have en beton med minimal reaktivitet som reference. For at sikre at de to yderpunkter var repræsenteret, blev det besluttet at støbe disse to betoner, idet sammensætningen, specielt med hensyn til indhold af reaktivt materiale, hermed var kendt. De to "selvgjorte" betoner vil i det følgende blive betegnet R-0 (ikke-reaktiv) og R-3 (meget reaktiv).

Som det tidligere er beskrevet vil den reaktive fase for danske forhold næsten altid være mørtelfasen, og det blev derfor besluttet at bruge Rønnegranit som stentilslag i begge betoner, idet denne stentype er kendt for at være absolut inaktiv m.h.t. alkalikiselreaktioner. Som sandtilslag blev der til R-0-betonen brugt Københavner Søsand med et indhold af porøs flint på 0.9 % (heraf 0.1 % opalflint og 0.8 % calcedonflint). Til R-3 anvendtes Nymøllesand med 5.7 % porøs flint (3.6 % opalflint og 2.1 % calcedonflint). Petrografiske analyser findes i bilag 1. Det må forventes, at betoner støbt med disse to sand vil udvise markant forskellige ekspansionsudviklinger. Grænsen for godkendelse i moderat og aggressiv miljøklasse iflg. BBB er som bekendt 2 % porøs flint. Endvidere fremgår det af de petrografiske analyser, at det især er indholdet af opalflint, som er forskelligt for de to sand. Der er bred enighed om, at det især er opalflinten der giver anledning til skader i modsætning til den noget langsommere reagerende porøse calcedonflint [12].

De to tilslagsbetoner blev støbt med Rapidcement, v/c = 0.55, uden luftindblanding, sætmål 60 mm. Proportioneringsdata findes i bilag 2. Blanderecepterne fremgår af tabel 4.2.

Der blev blandet 200 l R-0-beton og 240 l R-3-beton. Luftindholdet i den friske beton blev målt til henholdsvis 1.3 % og 1.2 % for R-0 og R-3. Betonen blev udstøbt i ø150 x 300 mm cylinderforme og efter afformning lagret i vandbad ved 40 °C i 28 døgn. Denne temperatur blev valgt for at

accellerere styrkeudvikling og initiering af eventuelle alkalireaktioner. Lagringen svarer med hensyn til modenhedsdøgn til 67 døgns lagring ved 20 °C.

4.2.2 Konstruktionsbetoner

Ud over de netop beskrevne "yderpunktsbetoner" var det ønskeligt at undersøge betoner med en vis grad af alkalireaktivitet. Samtidig ville det være interessant at få fat på gamle betoner (måske ukendte m.h.t. sammensætning), i modsætning til de nye laboratoriefremstillede. Dette blev forsøgt opfyldt ved at fremskaffe yderligere to betontyper, i det følgende benævnt R-1 og R-2.

R-1-betonen bestod af blandede betonklumper, der blev hentet i Farum Grusgrav, hvor betonen for flere år siden var blevet deponeret fra forskellige nedrivningsprojekter. Ved en ren visuel bedømmelse virkede kvaliteten meget blandet, bl.a. var der rene mørtelklumper iblandt. Denne beton er interessant i den forstand, at man i praksis vil kunne stå overfor et ukendt blandet betonmateriale, hvis anvendelighed som genbrugstilslag skal vurderes. Som følge af betonens oprindelse kan der ikke angives en blanderecept for R-1 betonen. Med hensyn til alkalireaktivitet var det på forhånd umuligt at sige noget sikkert om denne beton, men man kunne dog formode, at der ville være en vis risiko, idet betonen sandsynlivis er støbt før der var opmærksomhed omkring forebyggelse af alkalireaktioner.

R-2-betonen bestod af borekerner udtaget fra Holbækmotorvejen, der blev udlagt i slutningen af 60'erne. Denne beton var støbt med v/c = 0.55 med iblandet luft. Der blev brugt Nymøllesand og Nymølle/Rønne-filler. Blanderecepten ses i tabel 4.2. Det fremgår, at betonen minder meget om den reaktive tilslagsbeton R-3, der er blevet fremstillet til dette forsøg. De udtagne borekerner er blevet undersøgt af Dansk Teknologisk Institut. Betonen var kraftigt revnet (beskrivelse af betonen: Bilag 3), og det blev fastslået at revnedannelsen primært skyldtes alkalikiselreaktioner forårsaget af reaktive partikler i sandfraktionen. På forhånd kunne det ikke afgøres, om reaktionerne stadig var igang, eller betonen havde udtømt sit ekspansionspotentiale.

4.2.3 Opsummering

En kort, samlet oversigt over de fire tilslagsbetoner der er benyttet i forbindelse med forsøgene ses i tabel 4.1.

Betegnelse	Beskrivelse
R-0	Støbt med søsand, Rønnegranit,v/c=0.55
R-1	Blandet beton fra nedrivning
R-2	Alkalikiselskadet beton fra Holbækmotorvejen
R-3	Støbt med Nymøllesand, Rønnegranit, v/c=0.55

Tabel 4.1: Oversigt over tilslagsbetoner

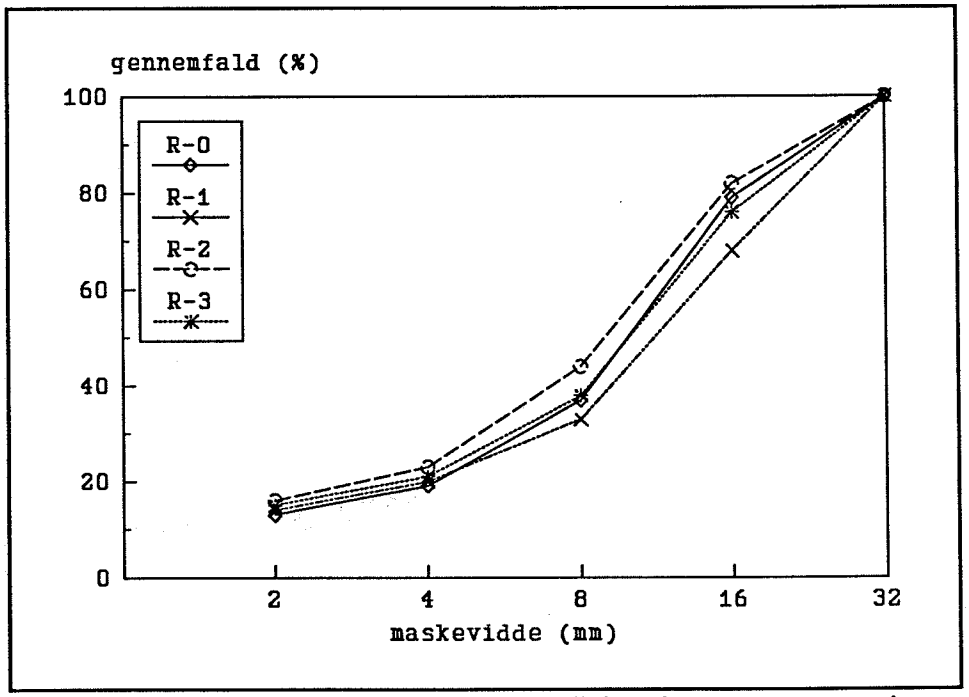
For tre af betonerne, nemlig R-0, R-2 og R-3, er recepterne kendte. Recepterne er angivet i tabel 4.2.

	R-0	R-2	R-3
Rapidcement	309	320	327
Vand	170	175	180
Sand	606	760	752
Filler	---	30	---
Granitskærver	1348	1002	1129
Densitet	2433	2287	2388

Tabel 4.2: Blanderecepter for tilslagsbetoner R-0, R-2 og R-3.
Alle tal i kg/m^3.

4.2.4 Knusning

De fire betontyper blev knust i en lille kæbeknuser, der var indstillet således at største stenstørrelse blev ca. 32 mm. Efter knusning blev betonerne sigtet i et sigteapparat, hvor sigterne havde cirkulære huller med diametrene 5 mm, 10 mm og 20 mm. Dette svarer med god tilnærmelse til en opdeling i standardfraktionerne: "Sand" (0-4 mm), perler (4-8 mm), ærter (8-16 mm) og nødder (16-32 mm), hvor de angivne diametre refererer til standardsigter med kvadratiske huller. De enkelte fraktioner er efterfølgende blevet undersøgt på et laboratoriesigteapparat (bilag 4). Den indbyrdes fordeling mellem de fire fraktioner fremgår af fig. 4.1. Denne sigtekurve er fremkommet ved vejning af hele det knuste materiale for de fire betoner, bortset fra gennemfaldet på 2 mm sigten, der er fundet ved laboratoriesigtning.



Figur 4.1: Sigteanalyser for de fire tilslagsbetoner, som de er kommet ud af kæbeknuseren.

Det fremgår af figuren, at det resulterende knuserprodukt er ganske ensartet, selv om der var forskelle i alder og sammensætning mellem de enkelte betoner. Ikke overraskende opfører de to nystøbte betoner R-0 og R-3 sig ens ved knusning. Det skal herudover bemærkes, at for alle fire betoner gælder, at ca. 20 % af det knuste materiale er mindre end 4 mm. Som tidligere nævnt vil man i praksis kun bruge genbrugstilslag i stenfraktionen, d.v.s. 80 % af de aktuelle nedknuste materialer er anvendelige. Graderingen af knuserprodukterne stemmer godt overens med de resultater man tidligere har opnået ved andre undersøgelser af genbrugsbeton [1].

4.2.5 Densitet og absorption

Der blev på den knuste beton målt densitet og absorption efter DS 405.2. Ved etablering af vandmættet overfladetør tilstand blev betonen dog vandlagret i 48 timer, således at der var bedre tid til at opsuge ekstra vand i forhold til konventionelt tilslag. Denne forholdsregel blev taget ud fra en forventning om ret stor absorptionsevne af genbrugstilslaget. Resultaterne for alle fire betontyper fremgår af tabel 4.3 og 4.4. Her er desuden medtaget værdier for 2-4 mm fraktionen, som senere bruges til mørtelprismeforsøg.

DENSITET	R-0	R-1	R-2	R-3
2 - 4 mm	2341	2240	2244	2334
4 - 8 mm	2439	2260	2309	2388
8 - 16 mm	2514	2303	2414	2434
16 - 32 mm	2479	2400	2537	2458

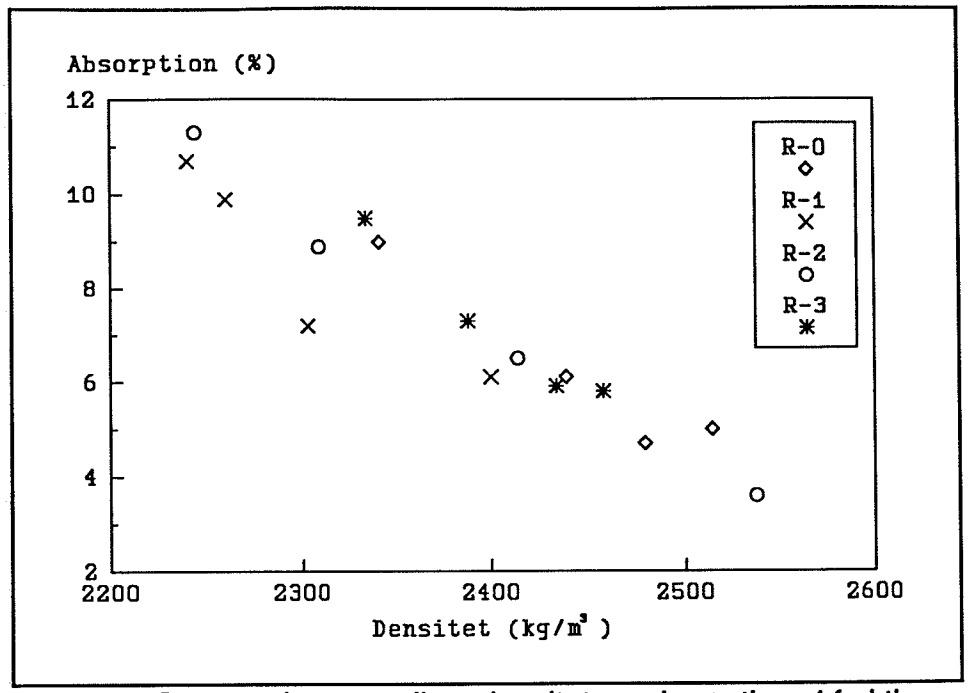
Tabel 4.3: Densiteter for alle de anvendte fraktioner.
Alle tal i kg/m^3

ABSORPTION	R-0	R-1	R-2	R-3
2 - 4 mm	9.0	10.7	11.3	9.5
4 - 8 mm	6.1	9.9	8.9	7.3
8 - 16 mm	5.0	7.2	6.5	5.9
16 - 32 mm	4.7	6.1	3.6	5.8

Tabel 4.4: Absorptionsværdier i % for alle anvendte fraktioner.

Sammenhørende værdier af densitet og absorption er afbildet på figur 4.2. Det fremgår, at sammenhængen er som man kunne forvente, d.v.s. høj densitet medfører lav absorption og vice versa.

For alle betoner gælder, at densiteten aftager og absorptionen stiger med faldende dimension af det nedknuste tilslag. Dette bunder i, at mørtel-andelen, som det fremgår af det følgende afsnit, er større i de små fraktioner.



Figur 4.2: Sammenhæng mellem densitet og absorption. 4 fraktioner af hver af de fire betoner er afbildet.

4.2.6 Beregning af mørtelandele

En væsentlig del af den forskel, der er mellem naturligt tilslag og knust beton, skyldes mørtelens specielle egenskaber. Ofte vil det derfor have interesse at kende mørtelens andel af den knuste beton. Ud fra densiteterne i tabel 4.3 samt kendskab til blanderecepterne, er det muligt at beregne mørtelandelen i de enkelte fraktioner. Beregningen er baseret på fremgangsmåden benyttet i [11].

Mørtelandelen, M, bestemmes for en given fraktion ved hjælp af følgende forhold:

$$M = \frac{D_s - D_f}{D_s - D_m} \cdot 100\% \qquad (4.1)$$

hvor M = Mørtelandel i vol-%.
D_s = Tørdensitet af sten uden mørtel.
D_f = Tørdensitet af fraktionen.
D_m = Tørdensitet af mørtel.

Tørdensiteten af fraktionen findes ud fra absorptionen **a**, der er angivet i tabel 4.4, og densiteten $D_{f,ssd}$, i vandmættet-overfladetør tilstand fra tabel 4.3. Der gælder følgende sammenhæng:

$$D_f = (1-a) \cdot D_{f,ssd} \qquad (4.2)$$

Mørtelens tørdensitet findes ud fra kendskabet til betonens sammensætning. I appendix A er dette gjort for betonerne R-0, R-2 og R-3.

Ved brug af formel (4.1) og (4.2) fås, med de i appendix A fundne tørdensiteter for mørtler, mørtelandele for de tre betoners enkelte fraktioner som angivet i tabel 4.5 til 4.7.

Fraktion mm	D_s kg/m^3	D_f kg/m^3	D_m kg/m^3	M vol-%
2-4		2130	1908	73
4-8		2290		54
8-16	2750	2388		43
16-32		2362		46

Tabel 4.5: **R-0**, mørtelandele i de enkelte fraktioner.

Fraktion mm	D_s kg/m^3	D_f kg/m^3	D_m kg/m^3	M vol-%
2-4		1990	1859	85
4-8		2103		73
8-16	2750	2257		55
16-32		2446		34

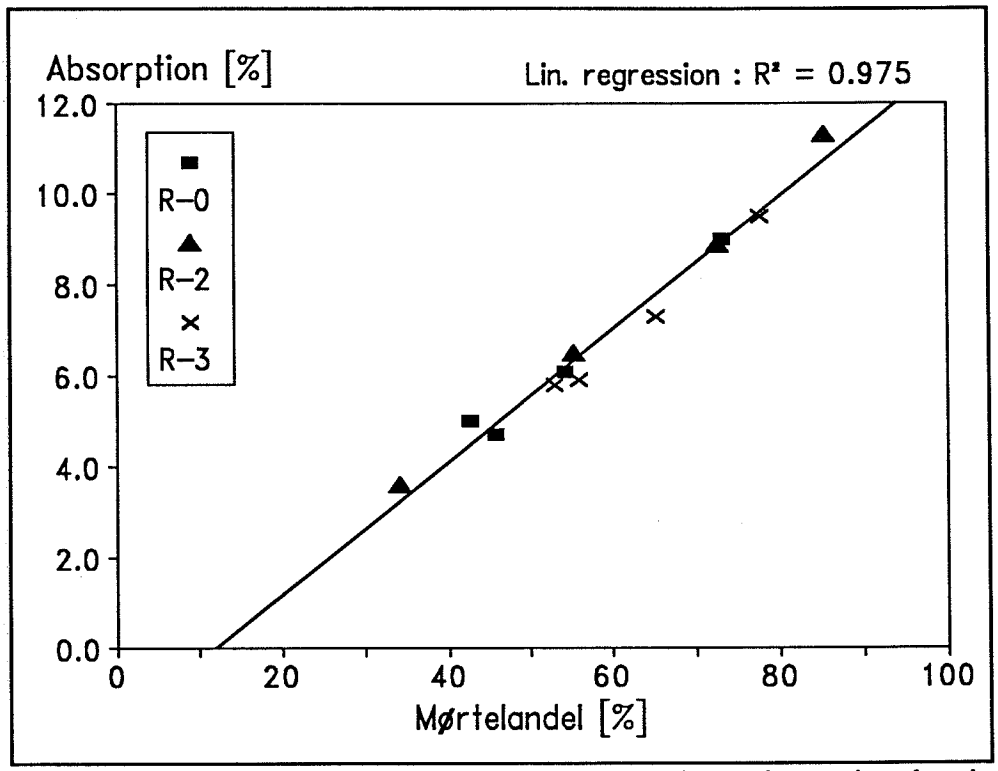
Tabel 4.6: **R-2**, mørtelandele i de enkelte fraktioner.

Fraktion mm	D_s kg/m^3	D_f kg/m^3	D_m kg/m^3	M vol-%
2-4		2112	1929	78
4-8		2214		65
8-16	2750	2290		56
16-32		2315		53

Tabel 4.7: **R-3**, mørtelandele i de enkelte fraktioner.

De fundne mørtelandele vil i appendix C blive brugt til en beregning af andelen af reaktiv mørtel i genbrugsbetonerne.

Som det blev nævnt i begyndelsen af dette afsnit, må der forventes at være en sammenhæng mellem mørtelindhold og absorption for tilslagsbetonerne. Dette er vist på figur 4.3. En lineær regression giver en meget god beskrivelse af sammenhængen.



Figur 4.3: Sammenhæng mellem mørtelindhold og absorption for de tre betoner hvor recepten er kendt.

4.3 Forsøgsplan

4.3.1 Fastlæggelse af forsøgsparametre

Den samlede forsøgsplan består af et hovedforsøg, som er et fuldfaktorforsøg med 4 parametre, samt 6 mindre sideforsøg (SF.I-SF.VI). Her følger en gennemgang af forsøgsparametrene og kommentarer til de valg, der er foretaget:

- v/c: Der er undersøgt to vand-cementforhold, 0.45 og 0.55, svarende til normværdierne ifølge DS 411 og BBB. (v/c-max = 0.45 i aggressiv miljøklasse og 0.55 i moderat miljøklasse). Disse normkrav er maksimalværdier. Der tillades under fremstillingsprocessen en afvigelse på +/- 0.03 fra den tilstræbte værdi. I dette projekt er 0.45 og 0.55 valgt som middelværdier, og det vurderes, at spredningen på v/c-forholdet vil være meget lav som følge af de kontrollerede laboratorieforhold.

- Cementtype: Der er valgt lavalkali-sulfatbestandig cement PC(A/HS/EA/G), idet det er denne cement, der i praksis anvendes i aggressiv og moderat miljøklasse. Denne cementtype er flyveaskefri og influerer således ikke på en undersøgelse af ekspansionernes afhængighed af flyveaskeindholdet.

- Sand: Som ikke-reaktivt sand til mørtelfasen i genbrugsbetonerne bruges det samme sand, som blev brugt til tilslagsbetonen R-0, d.v.s. et klasse A søsand med 0.9 % porøs flint, heraf 0.1 % opalflint.

- Indhold af genbrugsmateriale: Som udgangspunkt erstattes hele den grove fraktion med nedknust beton. Som omtalt i et tidligere afsnit har man i andre lande haft gode erfaringer med 20 % stenerstatning. Der undersøges derfor i et sideforsøg betoner med 20 % genbrugsmaterialer og 80 % nyt tilslag (SF.I).
  I hovedforsøget udgøres hele sandfraktionen af nye materialer, da genbrugsmaterialer mindre end 2 mm ofte giver styrke- og bearbejdelighedsproblemer, og derfor heller ikke i øjeblikket må benyttes i passiv miljøklasse. Der er udført et mindre sideforsøg med tilsætning af genbrugssandpartikler i 2-4 mm fraktionen (SF.IV).

- Reaktivitet af genbrugsmaterialer: De fire forskellige tilslagsbetoner, som er beskrevet i det foregående afsnit er undersøgt. R-0 og R-3 indgår i hovedforsøget, mens R-1 kun undersøges i SF I og SF II og R-2 kun i SF II. De øvrige sideforsøg er udført med R-3, idet der med denne beton var størst sandsynlighed for at få ekspansioner.

- Maksimal tilslagsstørrelse (d_{max}): Da størrelsesfordelingen af den genbrugte beton har betydning for fordelingen af de reaktive korn, er der undersøgt to forskellige d_{max}'er. Her er valgt de i praksis benyttede værdier d_{max} = 16 og 32 mm. Alt andet lige formodes fordelingen af reaktive partikler i genbrugsbetonen at blive mere jævn jo mindre den maksimale stenstørrelse gøres. I praksis har d_{max} også betydning for hvor meget af genbrugsmaterialet der udgøres af sten og mørtel. Som vist i det foregående afsnit bliver mørtelandelen i det nedknuste tilslag større når d_{max} nedsættes.

- Prøvedimension: Alle betonforsøg udføres med ø100 x 200 mm cylindre. Ved undersøgelse af materialer i sandfraktionen anvendes normalt 40 x 40 x 160 mm prismer. Der er lavet et mindre sideforsøg (SF.V) med mørtelprismer, dels til test af reaktivt genbrugssand, dels for at belyse dimensionsafhængigheden. Det vides fra andre forsøg, at slutekspansionen vokser med stigende prøvedimension [13].

- Initialrevner: Virkningen af initialrevner er undersøgt i et sideforsøg (SF.VI). Det må forventes, at alkaliindtrængningen, og dermed skadesudviklingen, sker hurtigere, når der er initialrevner i prøvelegemerne. Disse revner blev fremprovokeret som termorevner ved hjælp af et temperaturchok (50 °C → 0 °C).

- Luftindhold: For alle blandinger i hovedforsøget tilstræbtes det at holde en fast værdi på ca. 1 % naturligt indblandet luft. Erfaringsmæssigt nedsættes ekspansionerne ved stigende luftindhold, og denne indflydelse ønskes minimeret. Der er lavet et mindre sideforsøg, hvor der er blevet udstøbt cylindre med et luftindhold svarende til kravet i moderat og aggressiv miljøklasse, d.v.s. 15 % af kitmassevolumen. Luftindblandingsmidlet SikaAer er anvendt.

- Indhold af flyveaske: En vis puzzolantilsætning formodes at have en gunstig (ekspansionsnedsættende) effekt. Der er lavet forsøg med 0 og 35 % Stigsnæs flyveaske i forhold til mængden af cement plus flyveaske. De 35 % svarer til det maksimalt tilladelige indhold ifølge Basisbetonbeskrivelsen. Analyse af flyveasken findes i bilag 5. Det skal bemærkes, at den anvendte flyveaske på et enkelt punkt ikke opfylder ASTM's krav for flyveaske som tilsætningsstof til Portland cement beton (ASTM C 618-89), idet gennemfaldet på 45 µm sigten er 37 % mod kravet på højst 34 %. De øvrige krav (glødetab, kemisk sammensætning) er dog klart opfyldt, og den anvendte flyveaske må således betegnes som en velegnet puzzolantilsætning.

- Statistisk grundlag: Som hovedregel er der udstøbt tre prøvelegemer i hver serie, svarende til TI-B 51. I visse serier er der dog udstøbt seks prøvelegemer for at forbedre det statistiske grundlag.

4.3.2 Forsøgsserier

HOVEDFORSØG (HF):
Der er udført fuldfaktorforsøg med følgende hovedvariable, der vurderes at være de mest interessante:

V/C : To værdier.
Indhold af FA: To værdier.
Reaktivitet: To værdier.
d_{max}: To værdier.

I alt 16 forsøgsserier, der fremgår af følgende skema:

forsøgs-serie	v/c	FA-indh.	reaktivitet	d_{max} [mm]
1	0.45	0.00	0	16
2	0.45	0.00	0	32
3	0.45	0.00	3	16
4	0.45	0.00	3	32
5	0.45	0.35	0	16
6	0.45	0.35	0	32
7	0.45	0.35	3	16
8	0.45	0.35	3	32
9	0.55	0.00	0	16
10	0.55	0.00	0	32
11	0.55	0.00	3	16
12	0.55	0.00	3	32
13	0.55	0.35	0	16
14	0.55	0.35	0	32
15	0.55	0.35	3	16
16	0.55	0.35	3	32

Alle serier: Fuld erstatning af stenfraktionen med genbrugsmateriale. Luftindhold ca. 1 %.
I serierne 4 og 12, der er gennemgående referenceserier, udstøbtes 6 prøvelegemer. I hver af forsøgsserierne 4, 8, 12 og 16 blev der tillige udstøbt fire ekstra prøvelegemer, som er udtaget og undersøgt m.h.t. alkali- og vandindtrængning efter 4, 8, 16 og 24 uger.

SIDEFORSØG(SF)
Til belysning af andre variable er der udført en række sideforsøg:

SF.I: Indhold af genbrugsmateriale:

forsøgs-serie	v/c	genbrugs-tilslag	reaktivitet
17	0.45	1/5 sten	1
18	0.45	1/5 sten	3
19	0.55	1/5 sten	1
20	0.55	1/5 sten	3

Alle serier: 0 % FA, d_{max} = 32 mm, 1 % luft.

SF.II: Reaktivitet af genbrugsmateriale:

forsøgs-serie	v/c	reaktivitet	d_{max} [mm]
21	0.45	1	16
22	0.45	1	32
23	0.45	2	16
24	0.45	2	32
25	0.55	1	16
26	0.55	1	32
27	0.55	2	16
28	0.55	2	32

Alle serier: Fuld stenerstatning, 0 % FA, 1 % luft.

SF.III: Luftindhold:

forsøgs-serie	v/c	genbrugs-tilslag	reaktivitet
29	0.45	1/1 sten	3
30	0.55	1/1 sten	3

Begge serier: Luftindhold svarende til 15 % af kitmassen, 0 % FA, d_{max} = 32 mm. 6 prøvelegemer i hver serie.

SF.IV: Tilsætning af genbrugssand:

forsøgs-serie	v/c	genbrugs-tilslag	reaktivitet
31	0.45	1/1 sten 1/2 sand	3
32	0.55	1/1 sten 1/2 sand	3

Begge serier: 0 % FA, d_{max} = 32 mm, 1 % luft.
Sandtilslaget består af 50 % genbrugsmateriale (2-4 mm) og 50 % søsand (0-2 mm).

SF.V: Mørtelprisme/cylinderforsøg med genbrugssand:

forsøgs-serie	v/c	genbrugs-tilslag	prøve-dimension
33	0.45	1/2 sand	100/200
34	0.45	1/2 sand	40x40x160
35	0.55	1/2 sand	100/200
36	0.55	1/2 sand	40x40x160

Alle serier: 0 % FA, d_{max} = 4 mm, reaktivitet 3, 1 % luft.
Samme mørtelsammensætning som i serierne 31 og 32.

SF.VI: Initialrevner:

forsøgs-serie	v/c	genbrugs-tilslag	d_{max}
37	0.45	1/1 sten	32
38	0.55	1/1 sten	32

Begge serier: 0 % FA, reaktivitet 3, 1 % luft.
6 prøvelegemer i hver serie.

4.4 Proportionering og støbning

De gennemførte forsøg medførte støbningen af ialt 136 10/20 cylindre og 6 prismer. Cylindrene indgik i 36 serier mens der var 2 serier med prismer. Dette svarede til 32 forskellige betonrecepter og 2 mørtelrecepter. Disse recepter er alle at finde i bilag 6. Af de 32 betonrecepter kan de 24 betegnes som værende normale betoner, hvor alt det grove tilslag består af nedknust beton. I denne gruppe finder vi hele hovedforsøget, samt sideforsøg II. De resterende 8 recepter er afvigende idet de omfatter delvis erstatning af den grove fraktion (SF.I), delvis erstatning af sandet (SF.IV) eller indehold af større mængder luft (SF.III).

4.4.1 Proportionering

De talrige forsøg, der gennem årene er foretaget med genbrugsbeton, har vist, at denne kan proportioneres stort set som var det beton støbt med almindeligt tilslag. Dog er det nødvendigt at tage hensyn til tilslagsmaterialernes forøgede absorption. Proportioneringen af de betoner der blev brugt i de foreliggende forsøg, blev foretaget efter den såkaldte DOE-metode som denne er beskrevet i [14].

Proportioneringen blev foretaget med følgende hovedvariable:

v/c-forhold	:	0.45 og 0.55
D_{max}	:	16 og 32 mm
FA-indhold	:	0 og 35 %

I øvrigt henvises til forsøgsplanen, der er gennemgået i afsnit 4.3.

Følgende to punkter krævede særlig opmærksomhed ved betonproportioneringen:

Vandbehov: Det vandbehov, der er nødvendigt for at opnå et bestemt sætmål, er meget afhængigt af det benyttede tilslag, herunder specielt kornformen. Knust beton er meget kantet og ru, og derfor skønnedes vandbehovet i første omgang ud fra vandbehovet for knuste skærver. På denne baggrund gennemførtes de indledende prøveblandinger, hvilket resulterede i meget flydende betoner, værdierne i [14] var således for høje. Forventningen gik ellers på et øget vandbehov, men dette viste sig altså ikke at holde stik. I forhold til de indledende skøn endte vandbehovet med at være 20-25 l mindre.
På den anden side viste tilsætningen af flyveaske sig at have mindre indflydelse på vandbehovet, end det f.eks. angives i [15]. Her tales om en nedsættelse af vandbehovet på omkring 10-15 l ved tilsætning af flyveaske, medens det i forbindelse med de aktuelle støbninger blev fundet, at vandbehovet var stort set uændret.

Flyveasketilsætning : De betoner der indeholdt flyveaske blev proportioneret efter de retningslinier, der er angivet i [15]. I det følgende gennemgås kort hvorledes cement- og flyveaskeindhold i disse betoner findes på basis af det benyttede vandindhold.
Der blev proportioneret efter to ønskede ækvivalente v/c-forhold, 0.45 og 0.55. Dette ækvivalente v/c-forhold kaldes i det følgende α, og er givet som

$$\alpha = \frac{w}{C+k\cdot F} \tag{4.3}$$

hvor w = vandindhold
C = cementindhold
F = flyveaskeindhold
k = flyveaskens aktivitetsfaktor

Ud over det ækvivalente v/c-forhold, sættes der krav til flyveaskeindholdet. Flyveaskeindholdet er givet som vægtforholdet mellem flyveaske og cement + flyveaske. Idet forholdet kaldes ß, gælder således følgende sammenhæng:

$$\beta = \frac{F}{C+F} \tag{4.4}$$

eller

$$F = \frac{\beta}{1-\beta}\cdot C \tag{4.5}$$

Indsættes nu (4.5) i (4.3) fås, at cementindholdet kan bestemmes af følgende formel

$$C = \frac{w}{\alpha\left(1+k\frac{\beta}{1-\beta}\right)} \tag{4.6}$$

Aktivitetsfaktoren for den benyttede Stigsnæs-flyveaske var ikke kendt, og blev heller ikke bestemt. Derfor benyttedes, som angivet i BBB, værdien k = 0.5. Flyveaskeindholdet der ønskes ved forsøgene er, som angivet i forsøgsplanen, det maksimalt tilladelige ifølge BBB, hvilket vil sige ß = 0.35. Indsættes disse værdier for k og ß i (4.6) fås følgende udtryk til bestemmelse af cementindholdet:

$$C = 0.788\,\frac{w}{\alpha} \tag{4.7}$$

Ved indsættelse af ß = 0.35 i (4.5), samt brug af (4.7), fås at flyveaskeindholdet kan bestemmes af følgende udtryk:

$$F = 0.538 \cdot C = 0.424 \frac{W}{\alpha} \qquad (4.8)$$

4.4.2 Sammensætning af tilslag

I de 24 "almindelige" serier bestod hele det grove tilslag af knust beton. Alle fire typer er benyttet i betoner med d_{max} = 16 såvel som 32 mm. Sammensætningen af de enkelte fraktioner ved de to maksimale stenstørrelser er angivet i tabel 4.8. Ved de valgte sammensætninger opnås gode graderinger af det samlede tilslag, samtidig med at så meget som muligt af det knuste tilslag anvendes.

d_{max}	Fraktionsandel		
	Perler	Ærter	Nødder
16 mm	40%	60%	---
32 mm	15%	45%	40%

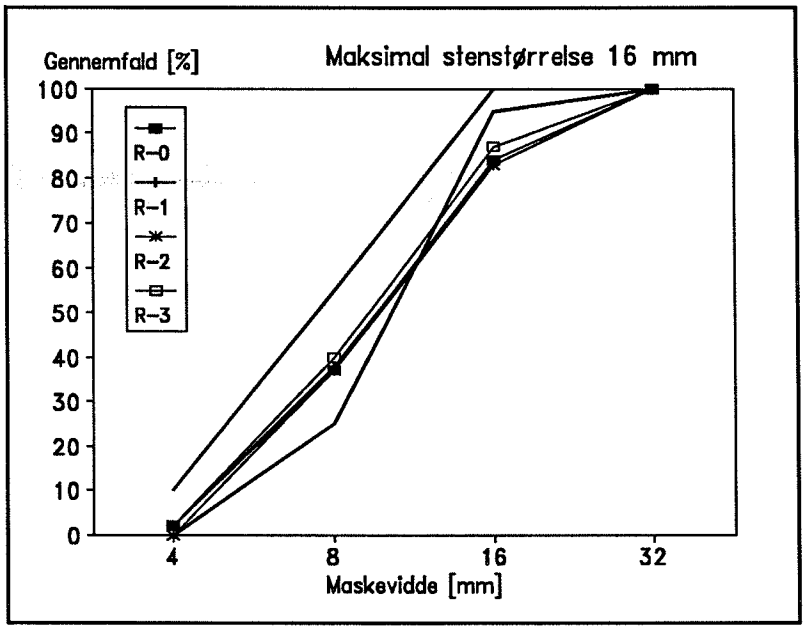
Tabel 4.8 : Sammensætning af groft genbrugstilslag.

Med de i tabel 4.8 angivne sammensætninger fås følgende densiteter og absorptioner for de fire materialer:

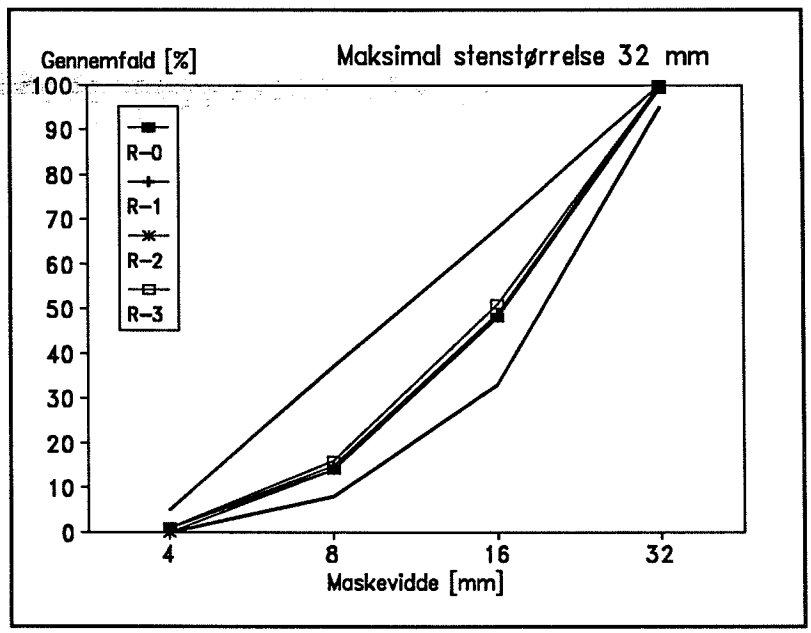
Materiale		Densitet [kg/m^3]	Absorption [%]
R-0	16 mm	2484	5.4
	32 mm	2485	5.0
R-1	16 mm	2286	8.3
	32 mm	2335	7.2
R-2	16 mm	2372	7.5
	32 mm	2447	5.7
R-3	16 mm	2416	6.5
	32 mm	2437	6.1

Tabel 4.9: Densiteter og absorptioner brugt ved proportionering.

Kornkurverne for de sammensatte tilslag ses på figurerne 4.4a og 4.4b. Det bør bemærkes, at der med d_{max}= 16 mm er problemer med at overholde de i Britisk Standard (BS) angivne grænser ved 16 mm sigten. Dette skyldes sigtningen efter knusningen, hvor der blev benyttet sigter med cirkulære huller. Den senere laboratoriesigtning har vist, at dette resulterede i at grænsen mellem ærter og nødder kom til at ligge lidt over 16 mm. I praksis har dette dog ingen betydning ved støbningen.



Figur 4.4a



Figur 4.4b

Figur 4.4a, 4.4b : Kornkurver for de sammensatte tilslagsbetoner. BS-grænsekurver er indtegnet.

4.4.3 Blanding og støbning

Der blev stillet følgende krav til den friske beton:

sætmål :	60-100 mm
luftindhold :	~1%

For de 24 "standard"-blandinger blev det gennemsnitlige sætmål på ca.90 mm, men varierede fra 40 til 140 mm. Så længe betonen blev bedømt til at være sammenhængende, gav sætmål uden for det krævede interval ikke anledning til særlige foranstaltninger.

Det gennemsnitlige luftindhold blev på 1.1%, og varierede mellem 0.5 og 1.6. Til trods for omhyggelig udstøbning, var det ikke muligt at nedbringe denne spredning. De senere målinger har dog ikke givet anledning til bekymring omkring variationen i luftindholdet. En oversigt over de opnåede sætmål og luftindhold for hver enkelt serie findes i bilag 7.

Følgende punkter krævede særlig opmærksomhed i forbindelse med betonstøbningen:

Konditionering af tilslag: Da knust beton er meget porøst og dermed har en høj absorptionsevne i forhold til almindeligt tilslag var det vigtigt at benytte tilslaget i en tilstand, hvor det var så nært vandmættet som praktisk muligt. For tilslagsbetonerne R-0 og R-3 blev dette opnået ved at opbevare det knuste tilslag i tætte plastposer fra umiddelbart efter knusning og sigtning til lige før blanding. Ved betonerne R-1 og R-2, der var meget tørre efter knusningen, var det nødvendigt at opbevare dem i vand et par døgn efter knusning og sigtning. Herefter blev de ligeledes opbevaret i plastposer. Løbende bestemmelse af fugtindholdet i betonerne viste, at vandindholdet ved støbningen var ca. 0.5 %-point mindre end absorptionen, hvilket viste sig at være tilstrækkeligt til at undgå problemer.

Luftindhold: Ved de indledende prøvestøbninger optrådte et helt uforudset problem: Selv efter kraftig vibrering måltes et luftindhold på 3-5 % i den friske beton. Dette problem gjaldt dog kun for beton uden flyveaske. Problemet blev løst ved at tilsætte et skumdæmpende middel, RM 4600, fra Fosroc A/S. Dette middel blev tilsat i meget beskedne mængder, 12-15 gr. pr. sats, og menes ikke at have haft nogen indflydelse på den hærdnede betons egenskaber. Det aktuelle luftindhold blev målt med Press-ur-meter på de friske betoner umiddelbart efter blanding og vibrering.

Alle betonprøvelegemer udstøbtes i ø100 x 200 mm cylinderforme. Der blev indstøbt måletappe af rustfrit stål i begge ender af cylindrene. Ved hjælp af to indlægsskiver af træfiberplade med passende hul til tappene, blev det efter afformningen muligt at frilægge måletappenes ender.

4.5 Målemetoder

4.5.1.Ekspansioner

Alle prøvelegemer er opmålt til terminerne -4, 0, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 og 28 uger i forhold til starten på saltvandslagringen. Før opmålingen er det vigtigt at sikre sig, at prøvecylindrene er akklimatiseret til den aktuelle temperatur i lokalet. Ved de første to målinger er prøvelegemernes temperatur i forvejen 20 °C, og der kan således måles uden problemer. Ved de efterfølgende målinger skal prøvelegemerne nedkøles fra 50 °C til 20 °C. Dette blev i praksis opnået ved at tage cylindrene op fra lagringskarret dagen før de skulle måles. Hver enkelt cylinder blev puttet i en plastpose for at forhindre udtørring, og de således forseglede cylindre blev samlet i en lukket plastkasse.

Næste dag blev cylindrene taget ud af plastposen, aftørret og placeret i en specialfremstillet måleopstilling med digitalt måleur (1/1000 mm). De enkelte cylindres længde blev bestemt relativt til længden af en til måleopstillingen hørende kalibreringsklods. Det blev sikret, at prøvecylindrene ved hver måling lå på samme måde i måleopstillingen. Den enkelte cylinder blev opmålt to gange, og såfremt forskellen på de to målinger var højst 5/1000 mm godkendtes målingen, og middeltallet noteredes. Var forskellen over 5/1000 mm (hvilket skete meget sjældent) måltes igen, indtil to målinger lå indenfor den valgte maksimale afstand på 5/1000 mm.

De enkelte cylindres ekspansioner blev udregnet i forhold til startlængden, d.v.s. længden efter 4 ugers indledende ferskvandslagring. Beregning af ekspansioner er gennemgået i appendix B.

4.5.2 Vægtforøgelser

I umiddelbar forlængelse af længdemålingen gennemførtes en vejning af prøvecylindrene, idet massetilvæksten antages at give en indikation af alkalireaktionernes fremskriden. Der sker dels vandoptagelse p.g.a. almindelig diffusion og kapillarsugning, idet en del af betonens porer er tomme efter selvudtørring, dels vandoptagelse i de mikrorevner (og makrorevner) der dannes ved alkalikiselreaktionen. Ved sammenligning mellem uskadede og skadede prøver formodes det, at disse to virkninger kan adskilles.

Svarende til ekspansionsberegningen bliver også vægtforøgelserne relateret til vægten efter 4 ugers ferskvandslagring. Beregning af vægtændringer er forklaret i appendix B.

Efter opmåling og vejning blev prøvelegemerne opvarmet i vandbad fra 20 °C til 50 °C i løbet af nogen timer, og endelig sat tilbage i lagringskarrene.

4.5.3 Fugt og alkalier

Ved løbende undersøgelse af ekstraprøvelegemer, der ligger uden for hovedforsøgsserien, er alkali- og vandindtrængningen forsøgt fulgt i hele forsøgsperioden. Dette er gjort for forsøgsserierne 4, 8, 12 og 16, d.v.s. to forskellige vand-cementtal, med og uden flyveasketilsætning, i alle tilfælde med den reaktive tilslagsbeton R-3. Der blev udtaget en cylinder fra hver serie ved terminerne 4, 8, 16 og 24 uger. Denne cylinder blev først flækket i en prøvemaskine, og derefter blev der fra den ene cylinderhalvdel med hammer og mejsel udtaget betonstumper fra overfladen og fra midten af cylinderen. Disse stumper blev puttet i måleglas og ved hjælp af en Rotronic-måler blev ligevægts-RF i betonen målt.

Fra den anden cylinderhalvdel blev der ved hjælp af en diamantfræser udtaget betonstøv fra to fræserspor; igen i midten af cylinderen og lige under overfladen. Dette betonstøv blev undersøgt m.h.t. indhold af alkalierne Na og K ved hjælp af atomabsorptions-spektrofotometer.

5. Resultater

5.1 Ekspansionsresultater

Alle cylindre er som beskrevet i det foregående afsnit blevet opmålt ved terminerne 0, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 og 28 uger. En oversigt over gennemsnitlige længdeændringer med tilhørende spredninger for de tre (eller seks) cylindre i hver serie ved terminerne 4, 16 og 28 uger er vist i tabel 5.1. For øvrige resultater henvises til bilag 8.

De største spredninger på ekspansionsresultaterne fås for R-3 betoner med flyveaske og d_{max} = 32 mm (serie 8 og 16). Når man ser bort fra disse to serier må det siges, at spredningerne er tilfredsstillende små i forhold til observationerne. Det må altså konkluderes, at det er lykkedes at udstøbe ensartede prøvelegemer, samtidig med at måleproceduren åbenbart ikke giver anledning til betydende spredninger.

Termin	4 uger		16 uger		28 uger	
Serie nr.	ΔL_{mid} [‰]	s [‰]	ΔL_{mid} [‰]	s [‰]	ΔL_{mid} [‰]	s [‰]
1	0.043	0.016	-0.030	0.012	0.030	0.018
2	0.088	0.018	0.026	0.031	0.041	0.053
3	0.958	0.470	5.377	0.213	6.152	0.151
4	0.955	0.508	6.182	1.001	7.253	1.127
5	-0.049	0.050	-0.180	0.041	-0.192	0.060
6	-0.103	0.043	-0.264	0.031	-0.241	0.026
7	-0.012	0.038	-0.075	0.053	-0.033	0.065
8	0.012	0.060	0.993	1.459	1.791	1.482
9	0.083	0.014	-0.061	0.107	-0.032	0.131
10	0.069	0.023	0.010	0.019	0.095	0.023
11	1.703	0.141	5.097	0.139	5.353	0.140
12	2.346	0.565	6.390	0.700	6.920	0.566
13	-0.063	0.033	-0.172	0.037	-0.158	0.024
14	-0.032	0.055	-0.310	0.194	-0.278	0.196
15	-0.012	0.028	0.085	0.311	0.388	0.277
16	-0.039	0.050	2.880	1.706	4.946	1.937
17	0.089	0.034	0.053	0.018	0.268	0.262
18	0.016	0.030	0.083	0.114	0.162	0.201
19	0.057	0.021	0.045	0.055	0.306	0.378
20	0.055	0.018	0.120	0.067	0.158	0.016
21	0.128	0.012	2.211	0.824	3.206	1.553
22	0.106	0.031	1.111	0.348	1.932	0.409
23	0.004	0.013	-0.014	0.013	0.085	0.011
24	0.061	0.016	0.041	0.040	0.114	0.049
25	0.150	0.017	1.750	0.348	2.233	0.464
26	0.110	0.012	1.498	0.314	2.364	0.195
27	0.150	0.050	0.142	0.025	0.209	0.004
28	0.110	0.025	0.088	0.009	0.136	0.016
29	2.374	0.325	5.884	0.549	6.503	0.577
30	3.981	0.304	5.622	0.475	6.121	0.428
31	2.275	0.820	7.246	0.780	8.144	0.808
32	2.632	0.469	6.607	0.436	7.080	0.572
33	0.232	0.074	4.520	0.782	6.449	0.892
34	0.838	0.163	1.122	0.105	1.292	0.312
35	0.595	0.236	4.477	0.171	5.463	0.095
36	1.687	0.539	2.091	0.461	2.190	0.353
37	1.761	0.388	6.284	0.758	7.369	0.760
38	2.873	0.534	6.731	0.490	7.244	0.513

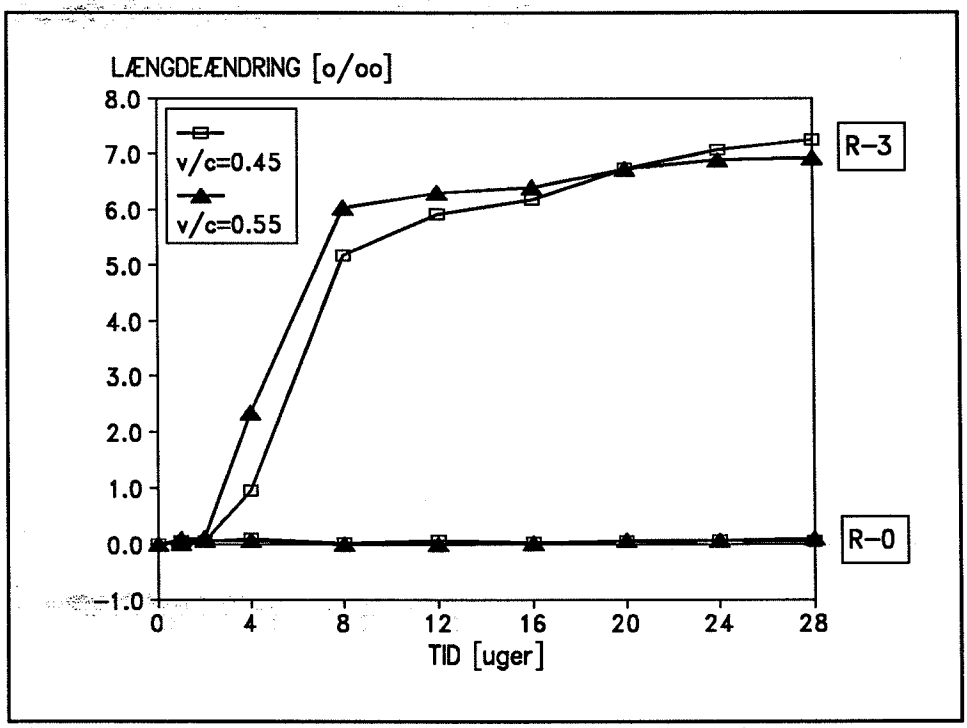
Tabel 5.1: Oversigt over middelværdi og spredning for længdeændringer ved tre udvalgte terminer.

5.1.1 Eksempler

I det følgende vil effekterne af de undersøgte forsøgsparametre blive belyst ved hjælp af eksempler på ekspansionsudviklinger. Resultaterne vil blive præsenteret i henhold til forsøgsplanen, d.v.s. der lægges ud med hovedforsøget.

Hovedforsøg

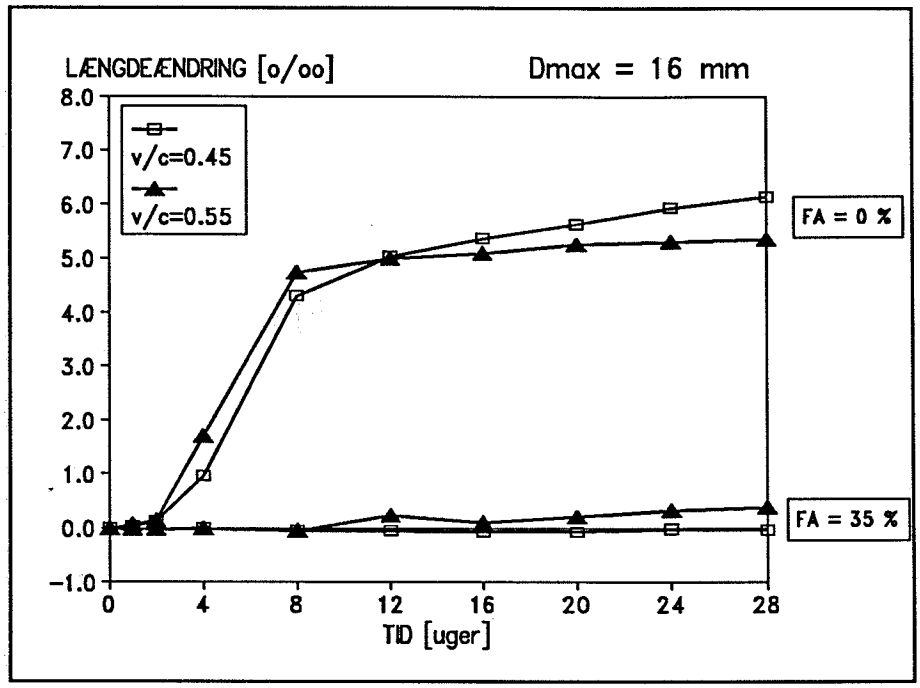
Reaktivitet: På figur 5.1 ses ekspansionsudviklinger for forsøgsserierne 2, 4, 10 og 12, d.v.s. R-0 og R-3 uden flyveaske, d_{max} = 32 mm.



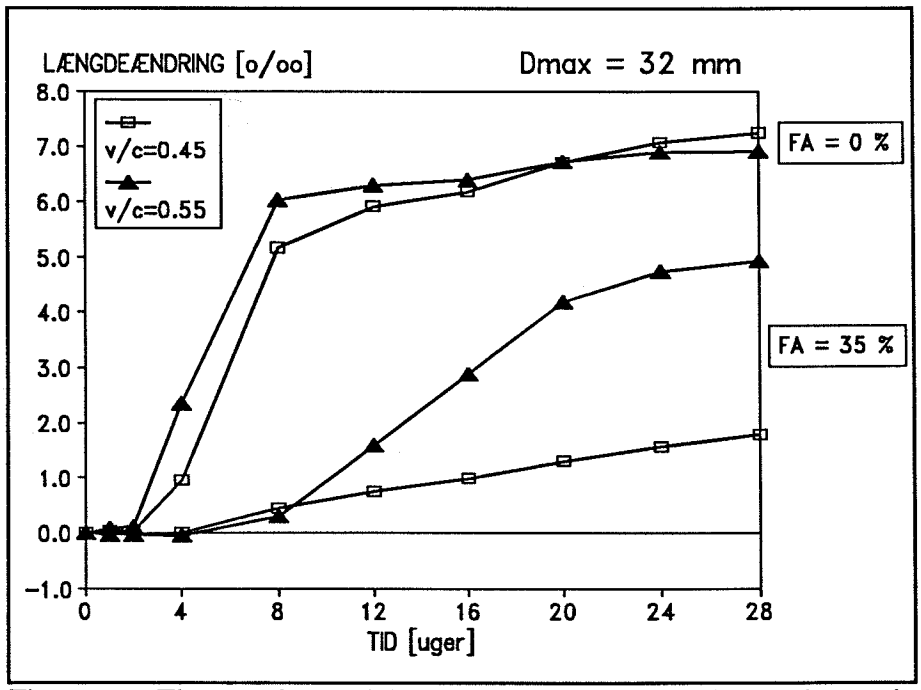
Figur 5.1: Ekspansionernes afhængighed af reaktiviteten.

Det viser sig som forventet, at den ikke-reaktive tilslagsbeton R-0 ikke giver anledning til ekspansioner selv ved den meget hårde miljøbelastning, der er anvendt under prøvningen. Derimod er det tydeligt, at genbrugsbeton støbt med den reaktive tilslagsbeton R-3 ekspanderer ganske meget. Den langt overvejende del af ekspansionen sker mellem 2 og 8 ugers lagringstid. Herefter sker der kun en ganske beskeden ekstra ekspansion. Endvidere fremgår det af figuren, at vand-cementforholdet ikke har den store betydning for ekspansionerne. Der er i hele forsøgsrækken en tendens til at ekspansionerne begynder tidligere for v/c = 0.55, men derimod er slutekspansionen i en del tilfælde størst for det laveste vand-cementtal 0.45.

Flyveasketilsætning: På figur 5.2 og 5.3 ses ekspansionsudviklinger for serierne 3, 7, 11 og 15 henholdsvis 4, 8, 12 og 16, altså illustrationer af flyveaskens effekt for betoner med reaktivt R-3 tilslag for d_{max} = 16 mm og 32 mm.



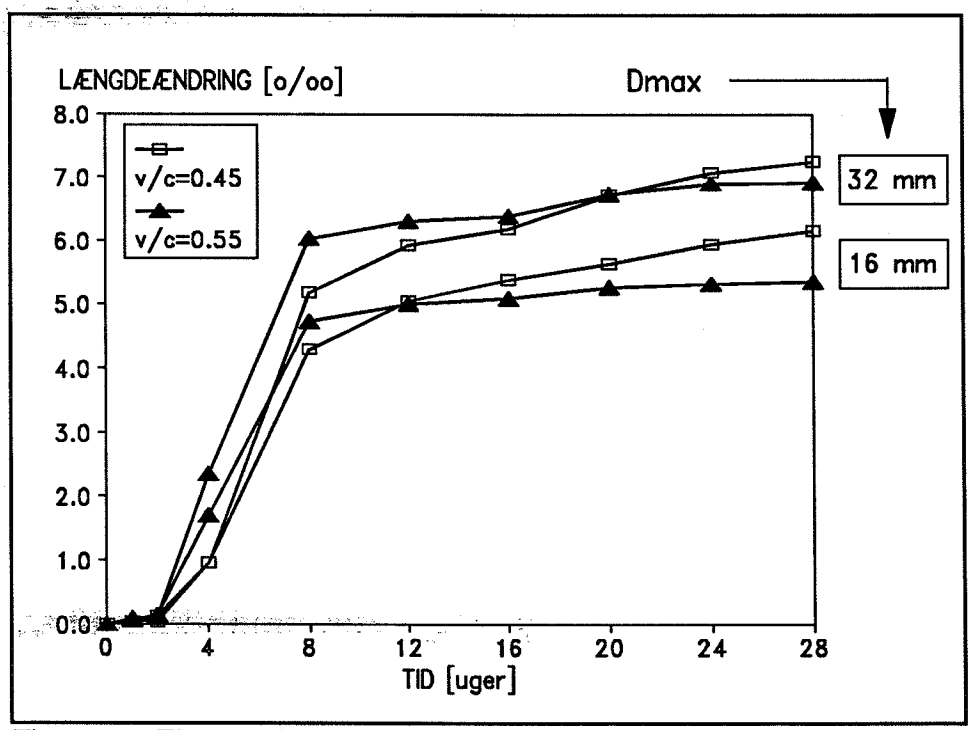
Figur 5.2: Ekspansionsudviklinger med og uden flyveaske ved d_{max} = 16 mm.



Figur 5.3: Ekspansionsudviklinger med og uden flyveaske ved d_{max} = 32 mm.

Det fremgår af figurerne, at tilsætning af 35 % FA i alle tilfælde har en markant forsinkende virkning på ekspansionsudviklingen. Tillige er det sandsynliggjort, at slutekspansionsniveauet nedsættes. Dette kan dog ikke eftervises sikkert, idet ekspansionsudviklingen ikke er gået helt i stå for alle forsøgsserier. Endelig er der tilsyneladende klar forskel på flyveaskens effektivitet ved de to maksimale stenstørrelser. Med d_{max} = 16 mm og 35 % FA sker der kun meget små ekspansioner, hvorimod der fås noget større ekspansioner med d_{max} = 32 mm og 35 % FA.

Maksimal stenstørrelse: Ekspansionsudviklinger for serierne 3, 4, 11 og 12 er vist på figur 5.4, til illustration af d_{max}'s effekt ved beton med R-3 uden flyveasketilsætning.

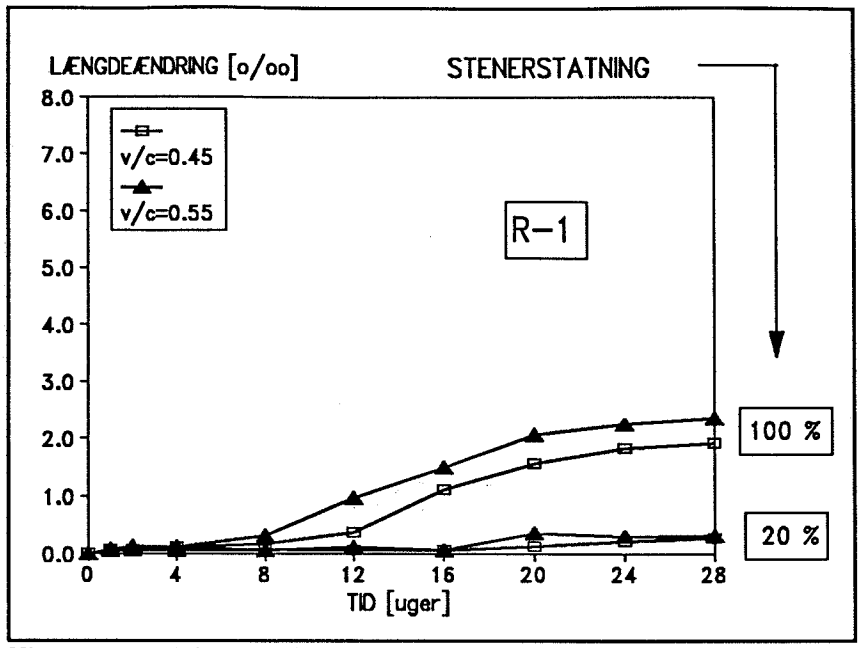


Figur 5.4: Ekspansionernes afhængighed af maksimal stenstørrelse for genbrugstilslaget.

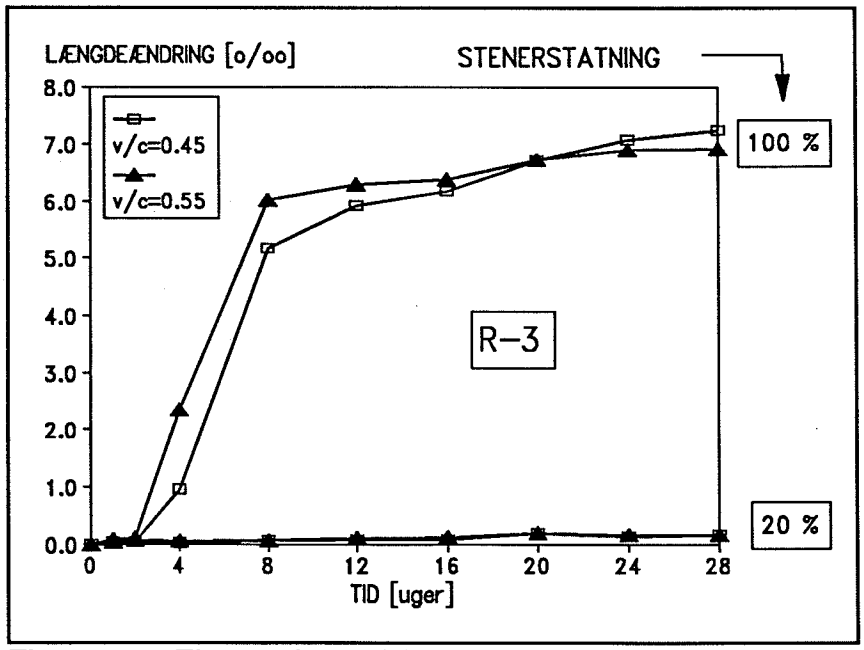
Der fås lidt større ekspansioner med 32 mm maksimal stenstørrelse i forhold til 16 mm. Dette er en generel tendens for hele hovedforsøget.

Sideforsøg I

Delvis stenerstatning: Ekspansionsudviklinger for serierne 17, 19, 22 og 26 henholdsvis 4, 12, 18 og 20 er vist på fig. 5.5 og 5.6. Heraf fremgår virkningen af 1/5 eller 1/1 stenerstatning med genbrugsmateriale for genbrugsbetoner med R-1 og R-3 tilslag.



Figur 5.5: Ekspansionsudviklinger ved 20 % og 100 % stenerstatning for R-1 tilslag.

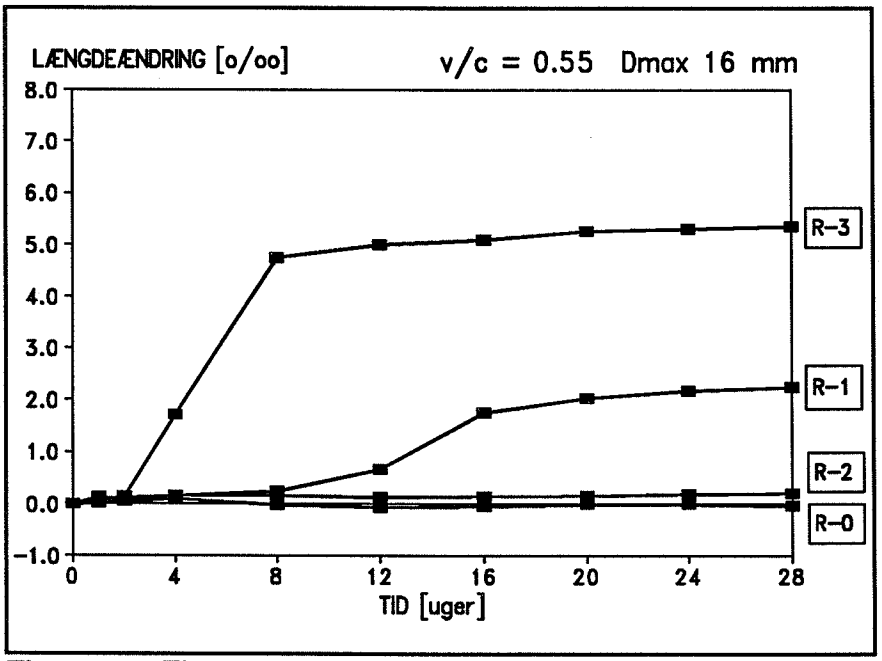


Figur 5.6: Ekspansionsudviklinger ved 20 % og 100 % stenerstatning for R-3 tilslag.

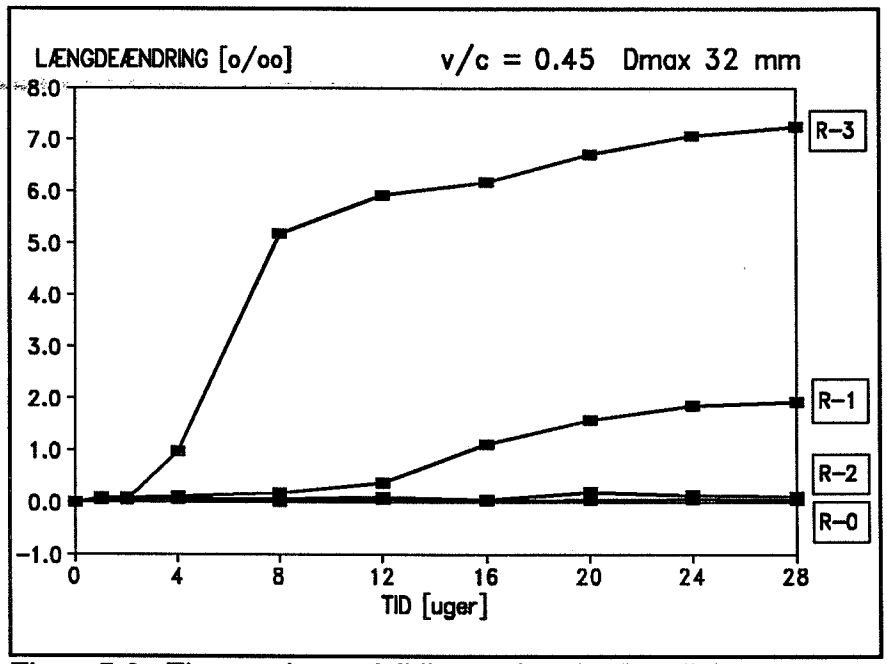
Med 20 % genbrugstilslag i stenfraktionen er ekspansionerne for både R-1 og R-3 meget begrænsede. Med R-1 tilslag fås slutekspansioner på omkring 1/8 af de værdier der fås ved fuld stenerstatning, mens dette forhold for R-3 tilslag er omkring 1/45.

Sideforsøg II

Reaktivitet af genbrugsmateriale: Til sammenligning af de fire forskellige tilslagsbetoner er forsøgsserierne 9, 11, 25 og 27 og 2, 4, 22 og 24 afbildet på fig. 5.7 og 5.8.



Figur 5.7: Ekspansionsudviklinger for de fire tilslagsbetoner med v/c = 0.55 og d_{max} = 16 mm.

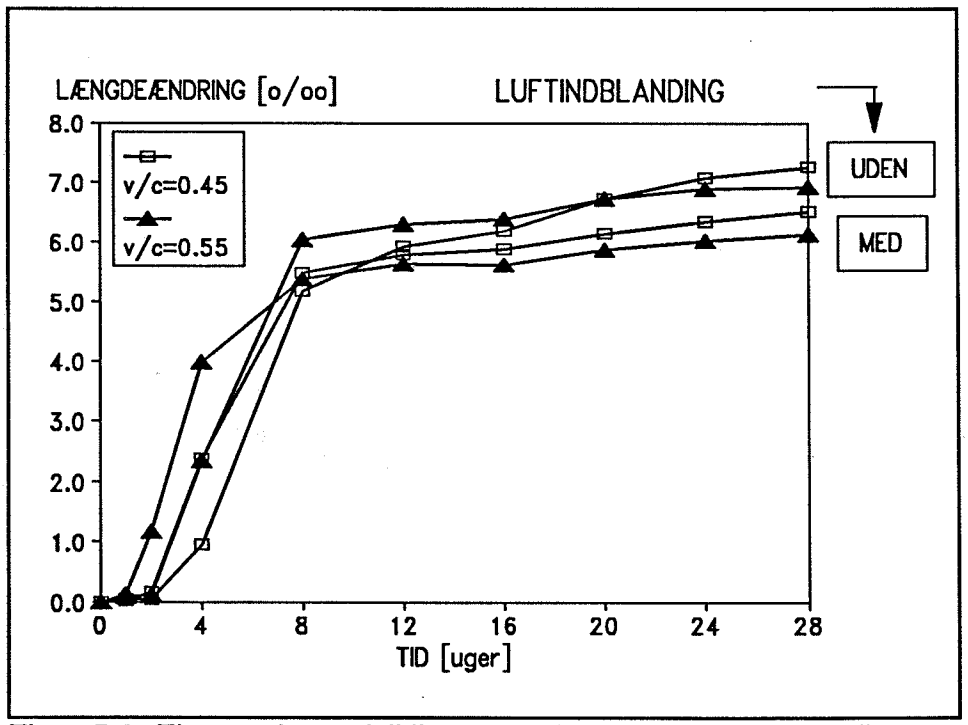


Figur 5.8: Ekspansionsudviklinger for de fire tilslagsbetoner med v/c = 0.45 og d_{max} = 32 mm.

Tilslagsbetonerne R-0 og R-3 er omtalt tidligere. R-1 betonen, der bestod af blandet nedrivningsbeton, har medført en vis ekspansionsudvikling, dog med senere starttidspunkt og mindre slutekspansion end den meget reaktive tilslagsbeton R-3. Brug af den alkalikisel-skadede vejbeton R-2 har medført meget små ekspansioner, der er af samme størrelsesorden som ekspansionerne ved brug af R-0 tilslag. I øvrigt kan det bemærkes, at med hensyn til vand-cementforhold og maksimal stenstørrelse findes de samme tendenser i sideforsøg II som allerede omtalt ved hovedforsøget.

Sideforsøg III

Luftindblanding: Ekspansioner for forsøgsserierne 4, 12, 29 og 30, d.v.s. med og uden indblanding af luft svarende til BBB's krav på 15 % af kitmassevolumen er afbildet på fig. 5.9.

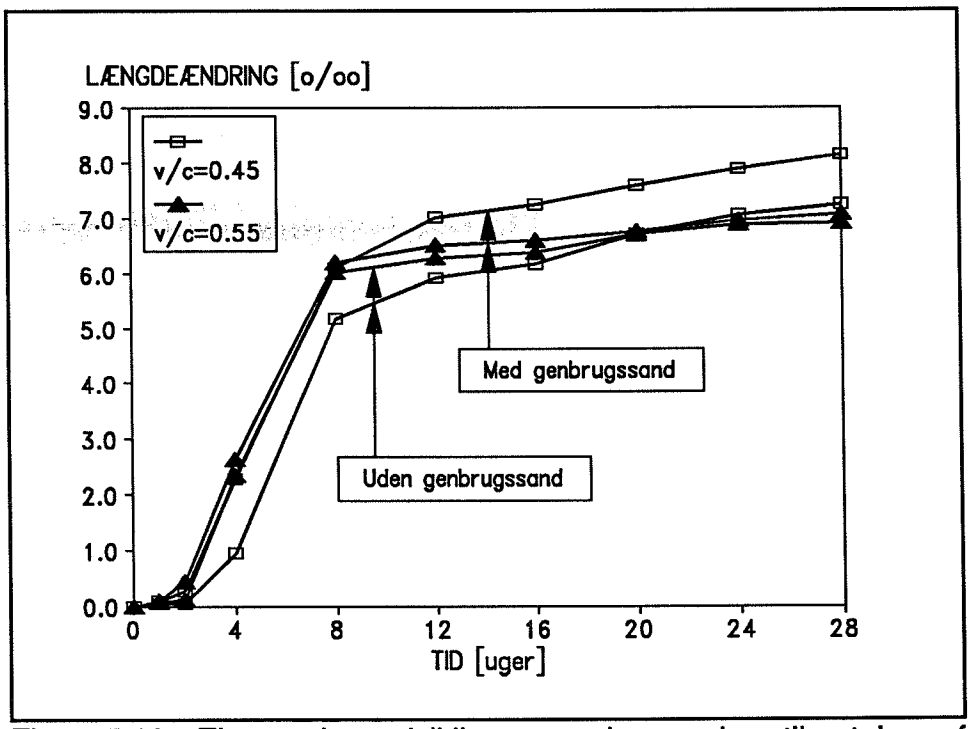


Figur 5.9: Ekspansionsudviklinger med og uden luftindblanding.

Luftindblandingen har tydeligvis ikke nogen markant indvirkning på de opståede ekspansioner. Der er tendens til hurtigere igangsætning, men lavere slutekspansion, når betonen indeholder 6-7 % luft i modsætning til ca. 1 %.

Sideforsøg IV:

Tilsætning af genbrugssand: Med tilsætning af 50 % 2-4 mm genbrugspartikler i sandfraktionen samt reaktivt stentilslag fås de på fig. 5.10 viste ekspansionsudviklinger for forsøgsserierne 4, 12, 31 og 32.

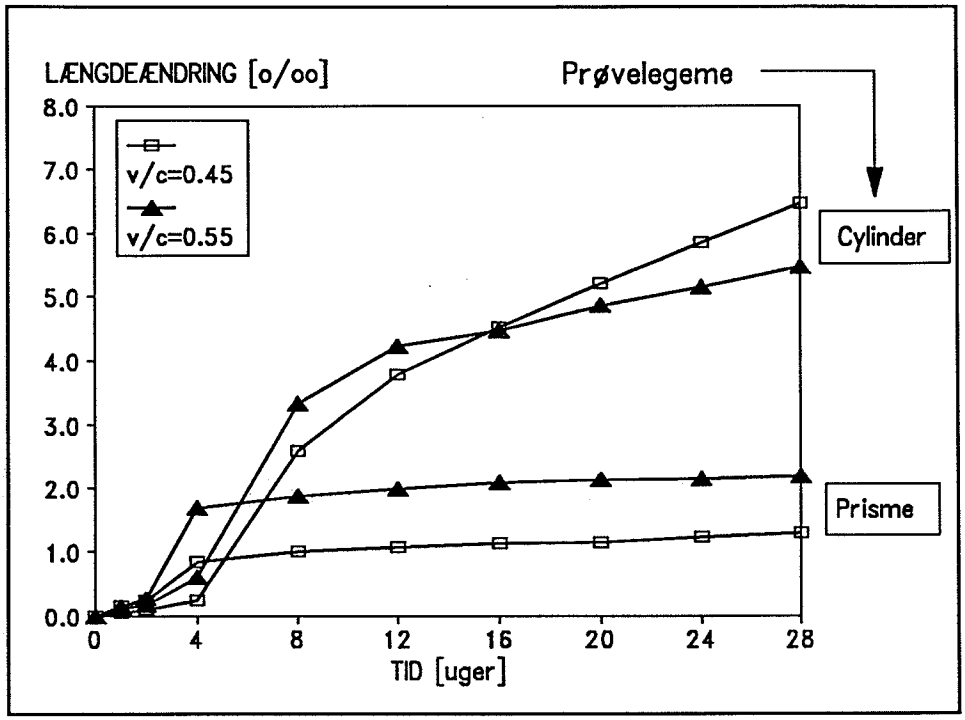


Figur 5.10: Ekspansionsudviklinger med og uden tilsætning af genbrugssand.

Der optræder ikke væsentlige ekstra ekspansioner ved brug af halvt genbrugssand.

Sideforsøg V:

Prøvedimension: Mørtelprøvelegemer med 50 % genbrugssand er udstøbt dels som ø100/200 mm cylindre, dels som 40 x 40 x 160 mm prismer. Ekspansionsudviklingens afhængighed af prøvedimensionen er illustreret på fig. 5.11 for serierne 33, 34, 35 og 36.



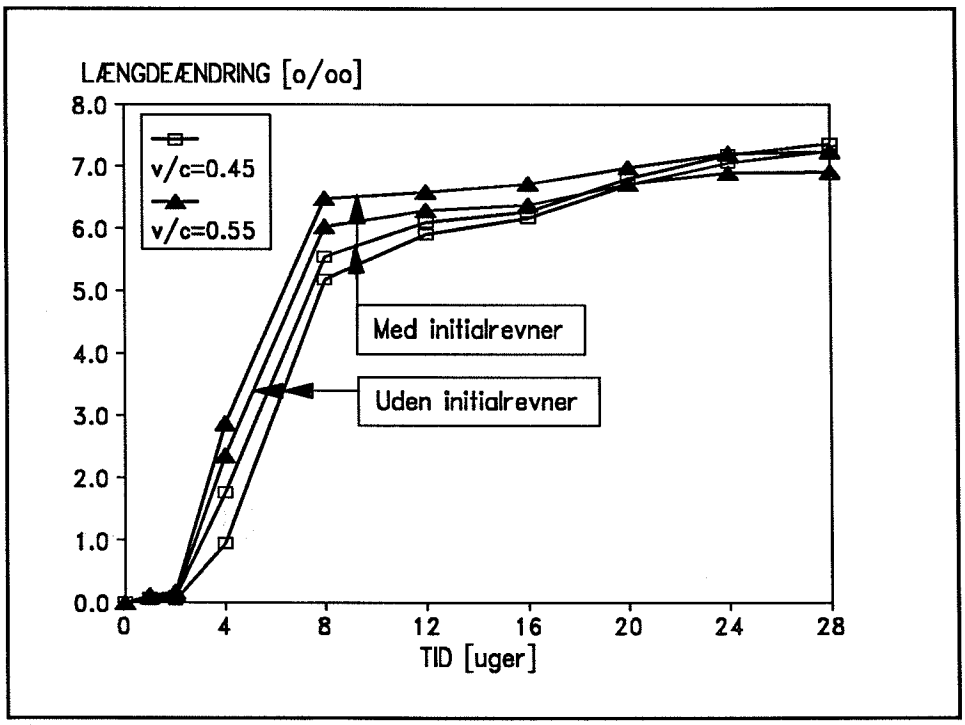
Figur 5.11: Ekspansionsudviklingens afhængighed af prøvedimensionen.

For mørtelprismer, d.v.s. med lille prøvedimension starter ekspansionsudviklingen hurtigere end for mørtelcylindre. Prismerne har efter 4 uger tilnærmelsesvis nået slutekspansionen mens mørtelcylindrene endnu ikke efter 28 uger er nået til en stationær tilstand.

Det er dog tydeligt, at slutekspansionsniveauet for cylindrene er flere gange højere end for prismerne.

Sideforsøg VI:

Initialrevner: På fig. 5.12 vises ekspansioner for forsøgsserierne 4, 12, 37 og 38, d.v.s. for betoncylindre med og uden inducerede termorevner.



Figur 5.12: Ekspansionsudviklingens afhængighed af tilstedeværelsen af initialrevner i prøvecylindrene.

Ekspansioner af betoncylindre med initialrevner er i starten en smule større end for cylindre uden revner, men der er tydeligvis ikke tale om nogen væsentlig forskel.

5.1.2 Springere

I forbindelse med de løbende målinger er der blevet iaggtaget springere på overfladen af mange af betoncylindrene. Springerdannelsen er det første symptom på alkalireaktioner i betonerne. Synlige overfladerevner ses først senere i forløbet. Springerne ses på alle betoner med R-3 tilslag, dog i lidt mindre omfang når der er brugt flyveaske. Endvidere var der springere på R-1 betoner, og på betoncylindre med 1/5 stenerstatning. I et enkelt tilfælde sås endda en springer på en betoncylinder med R-0 tilslag.

5.2 Vejeresultater

I forbindelse med ekspansionsmålingerne er alle prøvecylindre blevet vejet således at deres fugtoptagelse har kunnet følges. En oversigt over de gennemsnitlige vægtforøgelser med tilhørende spredninger ved tre udvalgte terminer er vist i tabel 5.2. Opbygningen af denne tabel svarer til opbygningen af tabel 5.1 der indeholder ekspansionsresultaterne. Vejningsresultater for alle terminer er angivet i bilag 9.

En sammenligning af tallene i tabel 5.1 (målinger) og tabel 5.2 (vejninger) viser at der er en vis sammenhæng mellem resultaterne. Det er således serierne der indeholder R-3 (f.eks. serie 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15 og 16) der udviser den største vægtforøgelse. Ligeledes udviser fire af serierne indeholdende R-1 betragtelige vægtforøgelser (serie 21, 22, 25 og 26). I disse serier er der også fundet store ekspansioner. Hvad angår spredningerne skal det bemærkes, at der her, som ved ekspansionerne, er store spredninger (>0.15%) på resultaterne for serierne 8 og 16, samt til dels serierne 21 og 25. Derimod kan den store spredning for serierne 15 og 20 ikke genfindes ved ekspansionerne.

5.2.1 Fugtoptagelse i beton

Den fugtoptagelse der sker i beton fordeler sig normalt mellem fugt i kontraktionsporer, dannet som følge af det kemiske svind, samt fugtoptagelse i luftporer.

Den vandmængde, W_k, der kan optages i kontraktionsporerne kan overslagsmæssigt udregnes efter følgende formel:

$$W_k = C \cdot \alpha \cdot 0.078 \cdot \frac{\rho_{w,s}}{\rho_w} \qquad (5.1)$$

hvor
- C = cementindhold
- α = hydratiseringsgrad
- ρ_w = densitet af vand (1000 kg/m^3)
- $\rho_{w,s}$ = densitet af mættet NaCl-opløsning (~1200 kg/m^3)

Den indgående konstant er fundet ud fra kendskabet til volumenreduktionen af det kemisk bundne vand.

Termin	4 uger		16 uger		28 uger	
Serie nr.	ΔM_{mid} [%]	s [%]	ΔM_{mid} [%]	s [%]	ΔM_{mid} [%]	s [%]
1	0.366	0.028	0.638	0.026	0.667	0.043
2	0.420	0.006	0.683	0.016	0.732	0.018
3	0.746	0.061	1.629	0.011	1.958	0.016
4	0.746	0.126	1.967	0.094	1.876	0.076
5	0.126	0.062	0.056	0.058	0.040	0.055
6	0.123	0.025	0.067	0.035	-0.017	0.081
7	0.249	0.046	0.205	0.057	0.174	0.054
8	0.216	0.071	0.734	0.314	1.021	0.314
9	0.430	0.019	0.715	0.042	0.802	0.031
10	0.423	0.037	0.681	0.038	0.805	0.021
11	0.877	0.013	1.882	0.093	2.178	0.091
12	1.155	0.153	2.088	0.104	2.024	0.075
13	0.027	0.060	-0.080	0.065	-0.034	0.060
14	0.167	0.015	0.115	0.023	0.072	0.037
15	0.019	0.082	0.214	0.112	0.682	0.204
16	0.127	0.076	1.263	0.369	1.854	0.422
17	0.349	0.025	0.546	0.044	0.698	0.100
18	0.284	0.023	0.456	0.040	0.587	0.007
19	0.361	0.017	0.536	0.028	0.637	0.065
20	0.438	0.006	0.656	0.095	0.661	0.200
21	0.401	0.057	1.267	0.060	1.553	0.186
22	0.423	0.058	1.105	0.035	1.361	0.058
23	0.332	0.044	0.548	0.049	0.696	0.021
24	0.285	0.045	0.480	0.012	0.542	0.023
25	0.595	0.022	1.263	0.104	1.524	0.187
26	0.532	0.056	1.236	0.045	1.375	0.074
27	0.608	0.046	0.971	0.068	1.030	0.059
28	0.519	0.024	0.842	0.052	0.846	0.037
29	1.099	0.160	2.238	0.170	2.504	0.110
30	1.539	0.115	2.384	0.158	2.639	0.135
31	0.974	0.102	2.161	0.032	2.369	0.097
32	1.265	0.051	2.488	0.026	2.539	0.081
33	0.656	0.024	1.892	0.082	2.051	0.047
35	0.875	0.018	2.021	0.090	2.301	0.034
37	0.876	0.069	1.901	0.096	1.992	0.106
38	1.152	0.073	2.015	0.082	2.095	0.070

Tabel 5.2: Oversigt over middelværdi og spredning for vægtændringer ved tre udvalgte terminer.

Den vandmængde W_L, der kan optages i luftporer bestemmes af følgende formel:

$$W_L = L \cdot \rho_{w,s} \qquad (5.2)$$

hvor L = luftens volumenandel af betonen
$\rho_{w,s}$ = densitet af mættet NaCl-opløsning (~1200 kg/m^3)

Det skal understreges, at luftporer normalt er så grove, at de ved almindelig kapillarsugning kun bliver delvist vandfyldte. Formel (5.2) angiver således en maksimumværdi for den vandmængde der kan optages i luftporerne. Ved forsøgene har cylindrene flere gange været udsat for store temperaturændringer i forbindelse med opmålingen. Dette har formentlig medført kondensation af en del fugt i luftporerne ved hver nedkøling, således at luftporerne kan antages at være vandfyldte efter 28 uger og 10 nedkølinger.

Den vægtforøgelse, ΔM_W, der forårsages af vandoptagelsen kan herefter skønnes ved hjælp af følgende udtryk:

$$\Delta M_W = \frac{W_k + \Delta \cdot W_L}{\rho_b} \cdot 100\% \qquad (5.3)$$

hvor W_k = bestemmes ved indsættelse i (5.1)
W_L = bestemmes ved indsættelse i (5.2)
Δ = den andel af luftporerne der er vandfyldte
ρ_b = den friske betons densitet

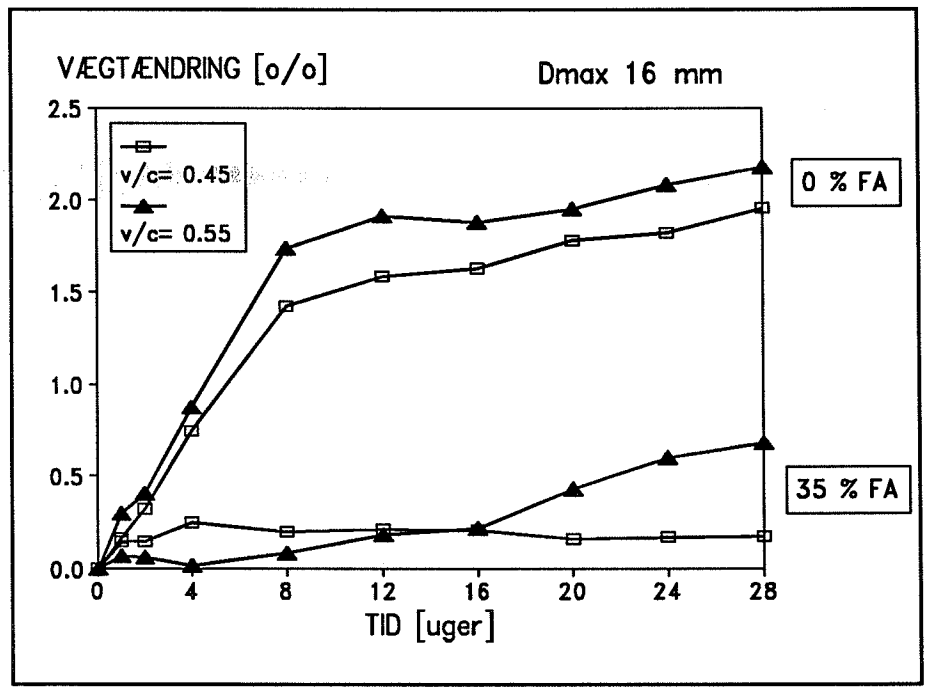
På basis af formlerne (5.1), (5.2) og (5.3) er der udregnet to eksempler i tabel 5.3, der viser størrelsesordenen af den vandoptagelse, der kan finde sted i en sund og urevnet beton. Med de brugte forudsætninger kan det første eksempel opfattes som en nedreværdi og det andet eksempel som en øvreværdi for de betoner der indgår i de aktuelle forsøg. Det skal bemærkes, at værdierne i tabel 5.2 er fundet på beton der først har været lagret fire uger i ferskvand. I denne periode har de optaget mellem 0.5 og 1.0 % vand, en mængde der skal tillægges værdierne i tabel 5.2 før disse kan sammenlignes med værdierne i tabel 5.3.

Forudsætninger	Resultater	
$C = 300\ Kg/m^3$ $\alpha = 75\ \%$ $L = 0.7\ \%$ $\rho_b = 2350\ kg/m^3$ (Nedreværdi)	$W_k = 21.1\ kg/m^3$	$W_L = 8.4\ kg/m^3$
	$\Delta = 0 \Rightarrow$	$\Delta M_W = 0.90\ \%$
	$\Delta = 1 \Rightarrow$	$\Delta M_W = 1.26\ \%$
$C = 400\ Kg/m^3$ $\alpha = 85\ \%$ $L = 1.5\ \%$ $\rho_b = 2250\ kg/m^3$ (Øvreværdi)	$W_k = 31.8\ kg/m^3$	$W_L = 18.0\ kg/m^3$
	$\Delta = 0 \Rightarrow$	$\Delta M_W = 1.41\ \%$
	$\Delta = 1 \Rightarrow$	$\Delta M_W = 2.21\ \%$

Tabel 5.3: Eksempler på vandoptagelse i beton. Tallene er fundet ved hjælp af (5.1), (5.2) og (5.3).

5.2.2 Eksempler

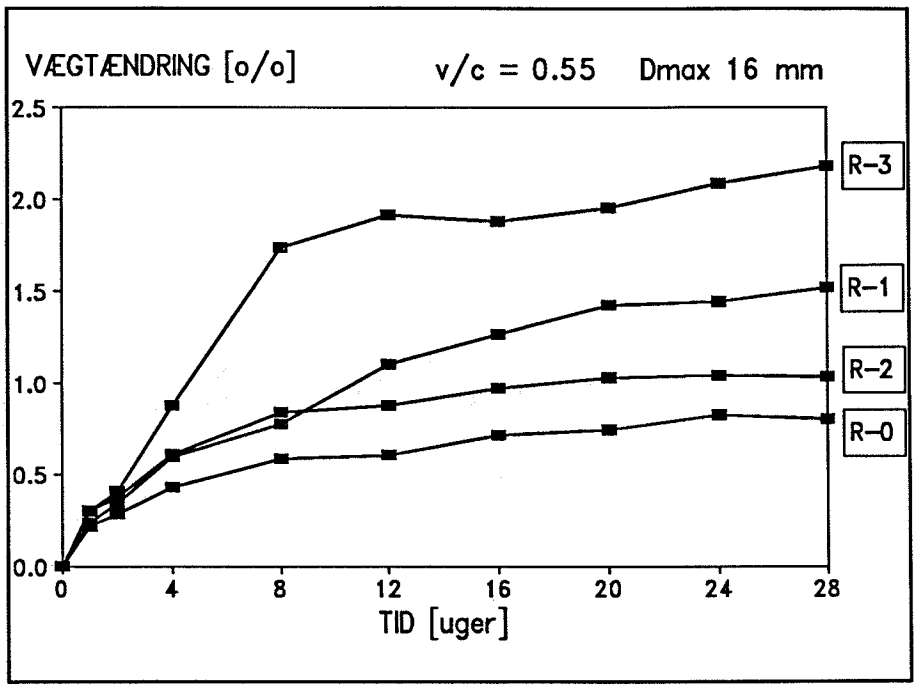
Et par eksempler på vægtforøgelseskurver vil nu blive vist. Først illustreres vægtændringens afhængighed af flyveaskeindholdet (forsøgsserierne 3, 7, 11 og 15):



Figur 5.13: Vægtændringens afhængighed af flyveaskeindhold.

Det fremgår tydeligt, at flyveasken reducerer betonens vægtforøgelse. Ekspansionskurverne for de samme forsøgsserier er vist på figur 5.2.

Vægtændringerne for de fire forskellige tilslagsbetoner (serierne 9, 11, 25 og 27) er vist på fig. 5.14.



Figur 5.14: Vægtændringer for de fire forskellige tilslags-betoner.

Ved sammenligning med fig. 5.7 ses det, at vægtforøgelserne følger det samme mønster som ekspansionerne, d.v.s. betoner med R-3 tilslag ligger øverst, fulgt af R-1, R-2 og R-0.

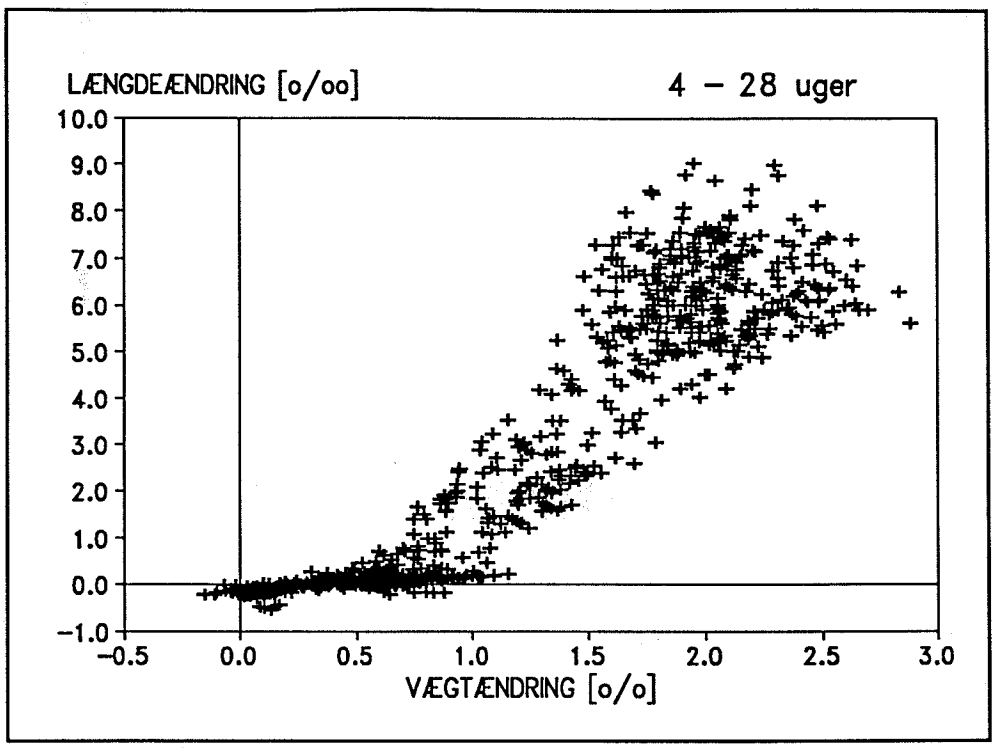
5.3 Diskussion af resultater

For at kunne vurdere de opståede ekspansioners skadelighed, er det nødvendigt at have kendskab til hvilket ekspansionsniveau der forårsager et sammenhængende revnenet i betonen, idet revnedannelsen anses for at være den primære skadelige effekt af alkalireaktioner. Ved mørtelprismeforsøg bruges en grænseværdi på 1.0 ‰ ekspansion efter 8 ugers lagring i saltvand. Denne grænse kan ikke overføres direkte til de udførte betonforsøg, idet såvel materiale som prøvedimension er ændret. Ud fra en rent mekanisk betragtning må det forventes, at den kritiske betonekspansion er mindre end den kritiske mørtelekspansion, idet betonen indeholder inaktive sten. I løbet af måleperioden er det blevet iagttaget, at der er fremkommet synlige revner på overfladen af cylindrene ved ekspansioner på over 1 ‰. Alt i alt må det konkluderes, at for beton er ekspansioner under 0.5 - 1.0 ‰ ikke kritiske m.h.t. revnedannelse.

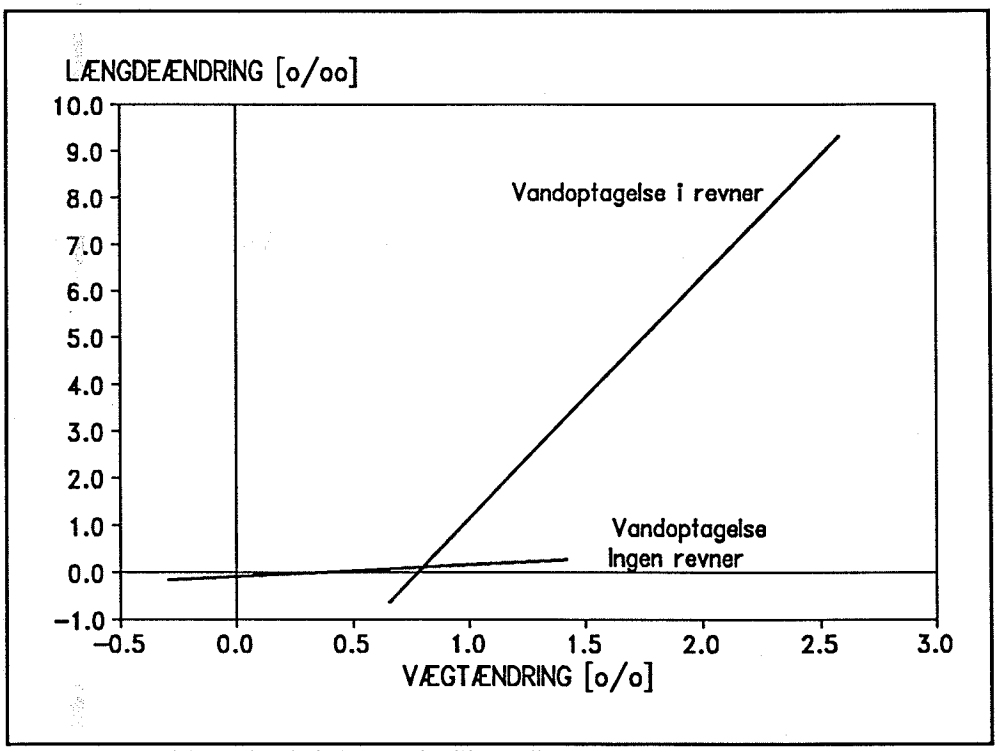
Revnedannelsen i betonprøvelegemerne antages at kunne følges ved hjælp af de løbende vejninger, idet der under vandlagringen optages vand i det åbne revnesystem. Som vist i afsnit 5.2.1 (tabel 5.3) kan der ved kapillarsugning højst optages vand i kontraktions- og luftporer svarende til en vægtforøgelse på ca. 1.5 - 2 %. I den indledende ferskvandslagringsperiode optages 0.5 - 1.0 %, d.v.s. fra starten af saltvandslagringen kan der højst optages omkring 1 %. Yderligere vægtforøgelser må skyldes vandoptagelse i betonens revner. Der kan altså defineres en kritisk vægtforøgelse på ca. 1 %, svarende til den føromtalte kritiske ekspansion.

Ved afbildning af samhørende værdier for ekspansion og vægtændring kan disse kritiske værdier illustreres. På fig. 5.15 er målepunkter for alle cylindre i forsøgsrækken optegnet. Det skal understreges, at en enkelt cylinder er repræsenteret ved 7 punkter i dette diagram, idet alle måleterminer fra 4 til 28 uger er medtaget.

Figuren illustrerer de mulige tilstande, som en konkret cylinder kan befinde sig i, samtidig med at tidsudviklingen anskueliggøres. I starten vil betonerne optage vand i det normale poresystem uden at der sker nogen ekspansion. I visse tilfælde sker der en lille kontraktion, formentlig p.g.a. kemisk svind. Denne tilstand er illustreret ved det store antal punkter, der ligger oveni x-aksen fra nul til én procents vægtændring. Efterhånden som alkalireaktionerne går i gang i visse af betonerne vil der opstå revner i disse, og både længde- og vægtændring overstiger de før opstillede kritiske værdier. Det fremgår af figuren, at denne udvikling får karakter af en bilineær funktion, som illustreret på fig. 5.16.

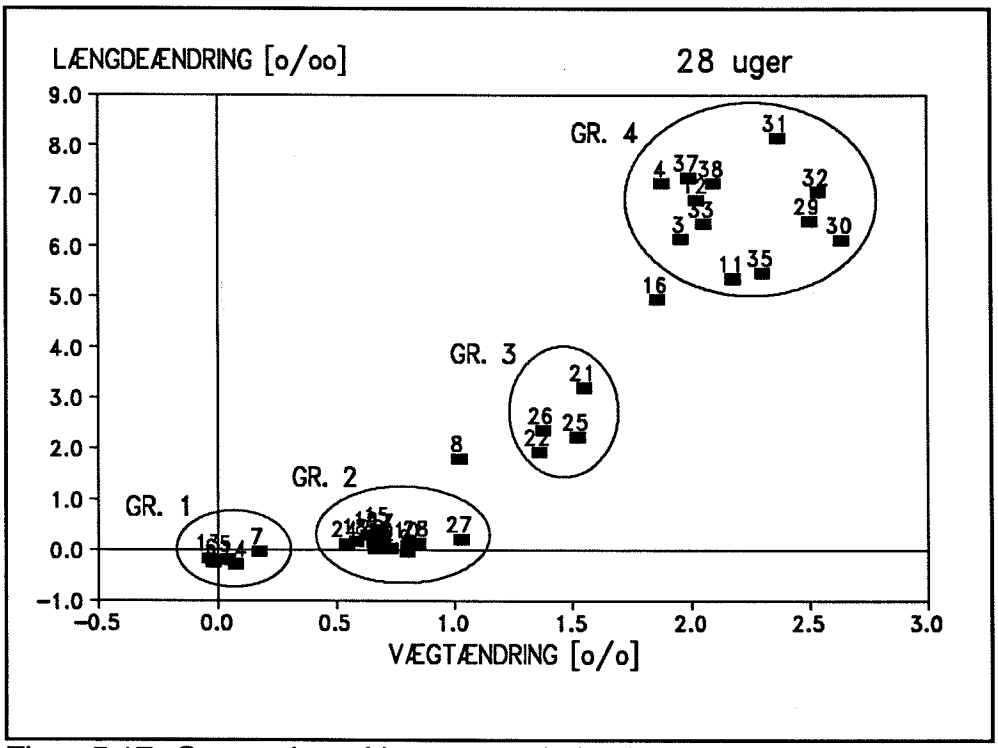


Figur 5.15: Samhørende værdier af vægtændring og længdeændring for alle cylindre ved terminerne 4, 8, 12, 16, 20, 24 og 28 uger.



Figur 5.16: To principielt forskellige tilstande for betoncylindrene.

Ved betragtning af de ekspansions- og vægtoptagelseskurver der er vist i tidligere afsnit, er det tydeligt, at tilnærmelsesvis alle forsøgsserier er nået frem til en stationær tilstand ved afslutningen af forsøgene. På fig. 5.17 er sammenhængen mellem længdeændring og vægtændring i sluttilstanden optegnet for alle serier.



Figur 5.17: Gruppering af betontyper i slutsituationen.

Det viser sig, at resultaterne ligger indenfor fire afgrænsede grupper som angivet på figuren. Om cylindrene i disse grupper kan følgende konstateres:

Gruppe 1: Disse cylindre har en meget beskeden vægtændring og ekspansionen er faktisk negativ, d.v.s. cylindrene bliver en smule kortere i løbet af forsøgsperioden. Det drejer sig om betoner med det ikke-reaktive tilslag R-0 med flyveasketilsætning.

Gruppe 2: Cylindrene har udvist meget beskeden ekspansion, men en vis vægtændring forårsaget af vandoptagelse i poresystemet. Gruppen omfatter R-0 betoner uden flyveaske, alle R-2 betoner samt betoner med 1/5 stenerstatning.

Gruppe 3: Her er der sket en vis ekspansion og tilsvarende en vis vægtændring. Betonerne er synligt revnede. Alle R-1 betoner befinder sig i denne gruppe.

Gruppe 4: Disse betoner er alle kraftigt revnede og har følgelig fået store længdeændringer og vægtforøgelser p.g.a. vandoptagelse i revnerne. Alle betoner med det reaktive tilslag R-3 uden flyveasketilsætning befinder sig i denne gruppe.

De eneste forsøgsserier, der falder uden for denne opdeling er de fire serier med R-3 tilslag med flyveasketilsætning. Serie 7 med v/c = 0.45 og d_{max} = 16 mm ligger i gruppe 1, serie 15 med v/c = 0.55 og d_{max} = 16 mm ligger i gruppe 2, serie 8 med v/c = 0.45 og d_{max} = 32 mm ligger mellem gruppe 2 og 3 mens serie 16 med v/c = 0.55 og d_{max} = 32 mm ligger lige under gruppe 4.

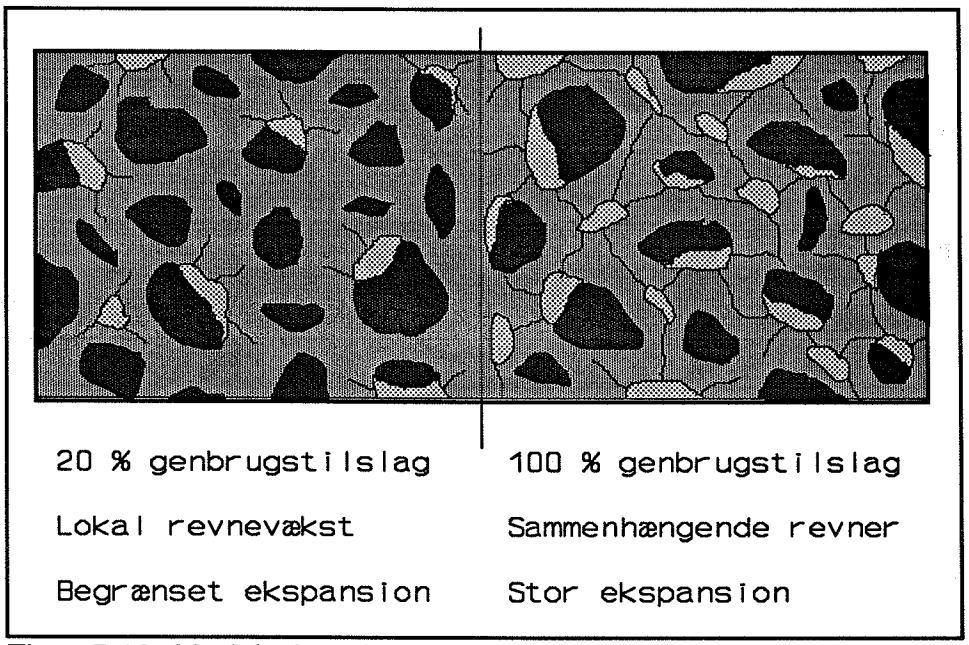
Ud fra denne gruppering af slutresultaterne samt de resultater der er blevet præsenteret i de foregående afsnit, vil virkningen af de forskellige forsøgsparametre blive kommenteret.

Reaktiviteten af det anvendte genbrugsmateriale er tydeligvis af afgørende betydning for ekspansionsudviklingen. Forsøgene viser, at det er lykkedes at dække de fire principielt forskellige betontyper der er defineret i afsnit 3.2.1. Ved brug af R-0 og R-2 tilslag opstår der kun meget begrænsede og uskadelige ekspansioner. For R-0's vedkommende er dette ikke overraskende, idet denne beton er støbt med ikke-reaktive tilslagsmaterialer (type 1). R-2 betonen har tilsyneladende opbrugt sit ekspansionspotentiale i forbindelse med de reaktioner, der er foregået mens betonen var placeret i sit oprindelige miljø (type 2). Ved brug af R-1 tilslag opstår der ekspansioner, der må karakteriseres som skadelige. Denne gamle blandede beton har altså givet anledning til fortsatte reaktioner (type 3). Endelig er der ved brug af R-3 tilslag opstået ganske betragtelige ekspansioner og udbredt revnevækst. Denne beton var støbt med et meget reaktivt sand, og alkalireaktionerne er udviklet fra startsituationen (type 4).

Flyveasketilsætning har betydning for både fugtoptagelse og ekspansionsudvikling. Flyveaskens tætnende virkning illustreres ved forskellen på gruppe 1 og 2 i fig. 5.17. I gruppe 1, der indeholder R-0 betoner med flyveaske, sker der praktisk taget ikke nogen fugtoptagelse, mens der i gruppe 2, der indeholder de tilsvarende betoner uden flyveaske, optages vand svarende til en vægtændring på 0.7 - 0.8 %. Flyveaskens ekspansionsnedsættende virkning for betoner med R-3 tilslag viser sig at være meget afhængig af andre parametre. For serie 16, d.v.s. med d_{max} = 32 mm og v/c = 0.55, er virkningen yderst begrænset. Derimod er der meget stor effekt for serie 7 (d_{max} = 16 mm, v/c = 0.45), der befinder sig helt nede i den "bedste" gruppe 1. Flyveaskens virkningsgrad for nedbringning af ekspansioner stiger med faldende vand-cementforhold og faldende maksimal stenstørrelse. Placeringen af serierne 8 og 15 viser, at nedsættelse af d_{max} giver en forholdsvis bedre effekt end nedsættelse af v/c.

Vand-cementforhold og maksimal stenstørrelse har ikke den store indvirkning på resultaterne, når der ses bort fra den netop beskrevne flyveaskeeffekt. De parallelle forsøgsserier, hvor der varieres på v/c og d_{max}, giver resultater, der både med hensyn til ekspansion og vægtændring ligger ganske tæt på hinanden. Dog er der en generel tendens til at betoner med d_{max} = 32 mm ekspanderer mere end betoner med d_{max} = 16 mm. Dette skyldes delvist, at der er mere reaktiv mørtel i betoner med d_{max} = 32 mm. Herudover optræder dog også en generel mekanisk effekt, som er blevet konstateret af andre forskere [16], nemlig en bedre styrke og holdbarhed af betoner med 16 mm maksimal stenstørrelse i forhold til 32 mm.

20 % erstatning af stenfraktionen med genbrugsmateriale i modsætning til fuld erstatning giver ekspansioner, der må betegnes som uskadelige. Der er dog ganske stor forskel på den effekt der opnås afhængig af hvilken beton der undersøges. For R-3 bliver ekspansionerne ca. 45 gange mindre, mens de for R-1 kun reduceres til 1/8. Tilsyneladende er effekten mere udtalt, jo mere reaktiv betonen er. Det ser dog under alle omstændigheder ud til, at ekspansionsgraden er under 1/5 ved brug af 1/5 reaktivt tilslag. Denne positive fortyndingseffekt er forsøgt illustreret på fig. 5.18.



Figur 5.18: Model af genbrugsbeton med 20 % og 100 % genbrugstilslag i stenfraktionen.

Ved fuld stenerstatning med reaktivt materiale kan der opstå et sammenhængende revnenet imellem områder med reaktiv mørtel, mens der ved 20 % erstatning er så langt imellem de ekspanderende områder, at revnerne ikke når hinanden. Denne effekt er ligeledes behandlet i appendix C. Det er i denne forsøgsrække ikke undersøgt, ved hvilke erstatningsgrader den beskrevne positive fortyndingseffekt optræder.

Luftindholdet har tilsyneladende ikke den store indvirkning på ekspansionerne. Ekspansioner burde teoretisk set blive nedsat p.g.a. luftporesystemet. Til gengæld er trækstyrken af den luftindblandede pasta lavere, så alt i alt er effekten åbenbart negligérbar. Det fremgår af fig. 5.17, at de luftindblandede betoner (serie 29 og 30) som forventeligt optager ganske meget vand.

Tilsætning af genbrugssand i 2-4 mm fraktionen giver ikke anledning til væsentlige ekstra ekspansioner. Der skulle således ikke være noget i vejen for at bruge en vis mængde genbrugssand, hvis det med andre midler lykkes at nedbringe ekspansionerne til sikre værdier.

Initialrevner i prøvelegemerne har ikke givet anledning til større slutekspansioner. I starten sker ekspansionsudviklingen en anelse hurtigere når der er initialrevner, men denne forskel forsvinder naturligt nok efterhånden som cylindrene revner p.g.a. alkalireaktionerne. Den ret beskedne forskel i starten kan skyldes, at det ikke er lykkedes at opnå ret mange revner ved det kuldechok, som cylindrene blev udsat for, og at disse revners accellererende effekt er lille.

Prøvelegemets dimensionen har stor betydning både for ekspansionsudvikling og slutekspansioner. Dette er vigtigt at holde sig for øje ved opstilling af eventuelle godkendelseskrav baseret på resultater opnået ved forskellige prøvemetoder.

Ved vurdering af forsøgsresultaterne skal man gøre sig klart, at der er tale om en prøvemetode, hvor betonen udsættes for et meget aggressivt miljø. Dette er nødvendigt for at opnå resultater inden for en overskuelig tidshorisont. Man kan dog spørge sig selv, om prøvemetoden kun accellererer et forløb, der under alle omstændigheder ville ske, eller der optræder effekter, som i virkelighedens verden ikke er mulige. F.eks. vil der p.g.a. den meget kraftige saltpåvirkning, og dermed tilførsel af alkalier, sandsynligvis udvikles reaktioner, som aldrig ville finde sted i moderat, og nok heller ikke i aggressiv miljøklasse. Alt i alt kan det konkluderes, at prøvemetoden må forventes at give resultater "på den sikre side" i forhold til virkeligheden.

Ved forsøgene er det blevet konstateret, at der meget ofte dannedes springere på betonoverfladerne. Dette problem er meget svært at løse, idet der kun kræves en enkelt reaktiv partikel nær overfladen for at danne en springer. Tilsætning af flyveaske forhindrer ikke springerdannelse. Det er dog sandsynligt, at den kraftige alkalitilførsel virker befordrende for dannelsen af springere. I den forbindelse kan det nævnes, at på betonfacader, hvor springere vil udgøre et alvorligt problem, er der ringe risiko for kraftige alkalipåvirkninger.

6. Fugt- og alkaliindtrængning

I de fire serier 4, 8, 12 og 16 er der, jvf. afsnit 4.3.2, udstøbt 4 ekstra cylindre til brug ved undersøgelsen af fugt- og alkaliindtrængning i genbrugsbeton. Indtrængningens afhængighed af v/c-forhold, flyveasketilsætning og tid er undersøgt. Det skal understreges, at de foretagne undersøgelser kun er at opfatte som stikprøver, da en egentlig undersøgelse ville være så omfattende og tidskrævende at den ville sprænge rammerne for det foreliggende projekt. Prøveudtagning og målinger i forbindelse med undersøgelserne er beskrevet i afsnit 4.5.3.

6.1 Fugtmålinger

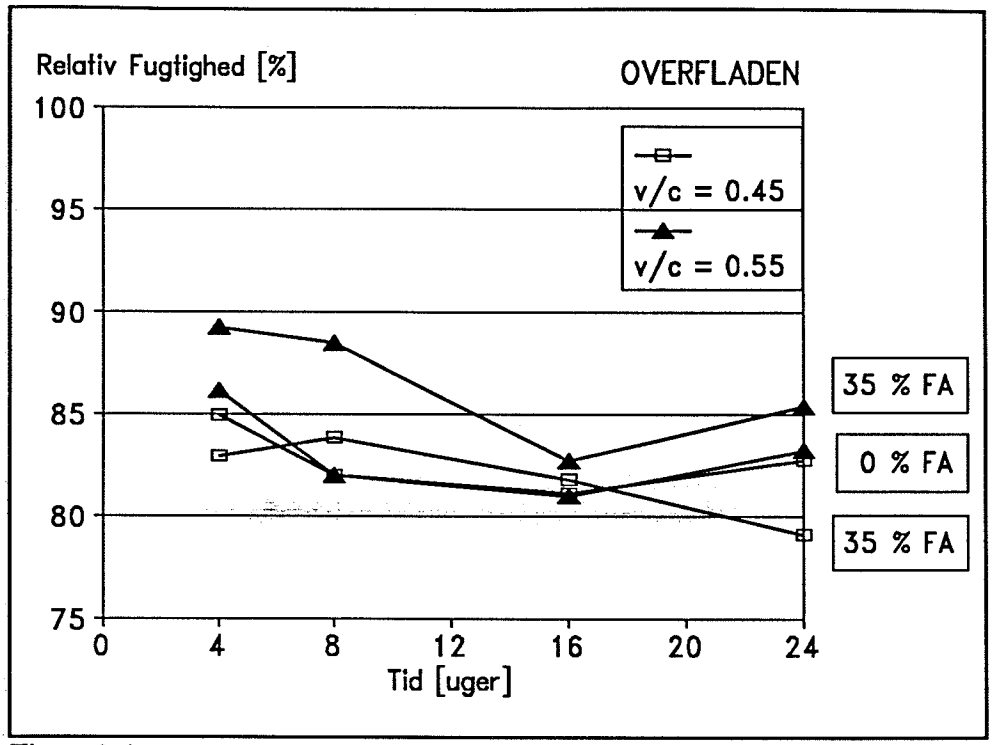
6.1.1 Relativ fugtighed

Resultaterne af de foretagne målinger af relative fugtigheder (RF) er vist på figur 6.1. Det er svært at drage klare og entydige konklusioner på baggrund af de opnåede resultater. For det første er det statistiske grundlag meget spinkelt, idet hvert punkt på figuren kun repræsenterer en enkelt måling. Ydermere er målemetoden behæftet med en usikkerhed der skønnes at være ±3 %. Endelig er målingerne påvirket af en vis temperaturafhængighed. For at kompensere for denne temperaturafhængighed, er der ved hver måling foretaget en bestemmelse af temperaturen, hvorefter de fundne relative fugtigheder er korrigeret til en fast temperatur, nemlig 22°C.

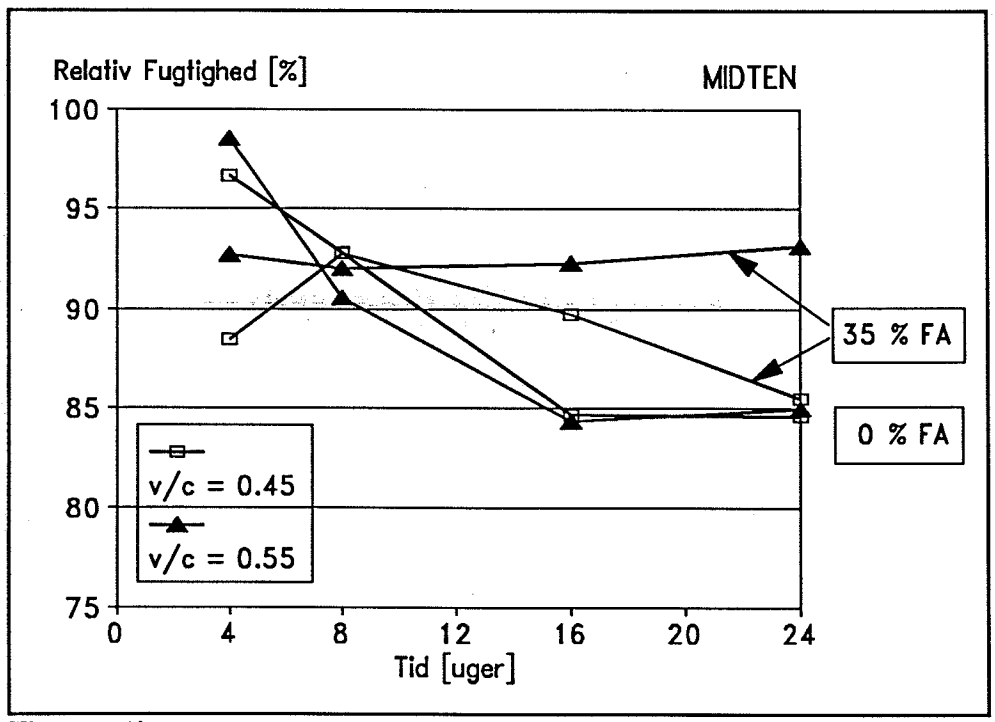
I tabel 6.1 er angivet middel af resultaterne for alle fire betontyper, hvilket vil sige uafhængigt af v/c-forhold og flyveaskeindhold. Resultaterne for henholdsvis overfladen og midten er angivet for de fire terminer, hvor der er målt.

Termin	Overfladen		Midten		Forskel
	RF_{mid} [%]	s [%]	RF_{mid} [%]	s [%]	(Mi+Ov)
4	85.8	2.6	94.1	4.5	8.3
8	84.1	3.1	92.0	1.0	7.9
16	81.7	0.8	87.8	3.9	6.1
24	82.6	2.6	87.1	4.1	4.5

Tabel 6.1 : Resultat af målinger af relative fugtigheder. Middelværdi og spredning er udregnet for fire cylindre, én cylinder fra hver af serierne 4, 8,12 og16.



Figur 6.1a



Figur 6.1b

Figur 6.1a, 6.1b : Resultat af RF-målinger på prøver udtaget ved henholdsvis overfladen og midten af udvalgte betoncylindre.

Resultaterne i tabel 6.1 viser en klar tendens til, at den relative fugtighed er større i midten af cylindrene end ved overfladen. Samtidig synes den relative fugtighed i midten at falde efterhånden som tiden går, medens

resultaterne for overfladen viser et mere konstant niveau. Således bliver forskellen mellem midte og overflade mindre med tiden. De beskrevne tendenser må siges at være omvendt af hvad man umiddelbart skulle forvente; i overfladen af vandlagrede cylindre burde der per definition være en relativ fugtighed på 100%. Forklaringen på denne modstrid er saltindtrængning. Den relative fugtighed over en mættet NaCl-opløsning er ca. 75%. I overfladelaget hvor der er sket en betydelig saltindtrængning, vil den relative fugtighed derfor nærme sig denne værdi efterhånden som porevæsken nærmer sig en mættet NaCl-opløsning. Med tiden trækker saltet længere ind i cylinderen, hvorved den relative luftfugtighed også sænkes her. Den observerede reduktion af den relative fugtighed i midten af cylindrene er således en indikation af, at der er sket en indtrængning af NaCl.

De fundne resultater er desværre så usikre, at der ikke kan udledes noget om hvorvidt flyveasketilsætning har en indflydelse på den relative fugtighed. Dog synes der, jvf. fig. 6.1, at være en tendens til en forskel mellem de to v/c-forhold for cylindrene med flyveaske. På cylindre med det høje v/c-forhold 0.55 måles der således efter 16 og 24 uger tydeligt højere relative fugtigheder end på cylindrene med det lave 0.45. V/c-forholdet synes derimod ikke at have nogen indflydelse på den relative fugtighed i cylindrene uden flyveaske.

6.1.2 Vand/tørstofforhold

For de samme cylindre, som der er målt RF på, er der også bestemt vand/tørstof-forhold. Resultaterne af disse bestemmelser er om muligt endnu sværere at uddrage konklusioner af end RF-målingerne. Som det fremgår af tallene i tabel 6.2 er der således ikke entydig forskel på resultaterne for midte og overflade. Ligeledes synes der heller ikke at være nogen klar tidsmæssig udvikling. Alt i alt må det således konkluderes at vand-tørstofforholdet er et dårligt mål for vandindtrængningen. Igen må det skyldes, at de opnåede resultater er kraftigt påvirkede af den saltophobning der sker i cylindrene.

	Overfladen		Midten		Forskel
Termin	$(v/t)_{mid}$ [%]	s [%]	$(v/t)_{mid}$ [%]	s [%]	(Mi+Ov)
8	7.0	0.44	7.5	0.40	0.5
16	6.7	1.07	7.2	1.14	0.5
24	7.6	0.48	7.1	1.24	-0.5

Tabel 6.2: Resultat af målinger af vandtørstof-forhold (v/t). Middelværdi og spredning er udregnet for fire cylindre, én cylinder fra hver af serierne 4, 8,12 og 16.

For at undgå denne påvirkning af resultatet fra saltet blev det i stedet forsøgt at bestemme vandmætningsgrader, men igen gav saltophobningen anledning til store problemer. Således blev der i visse tilfælde konstateret vægttab efter vandlagring af prøver, hvilket forklares med at der sker en udvaskning af salt under lagringen. Dette betød at vandmætningsgraden faktisk blev bestemt til at være over én, hvilket er meningsløst.

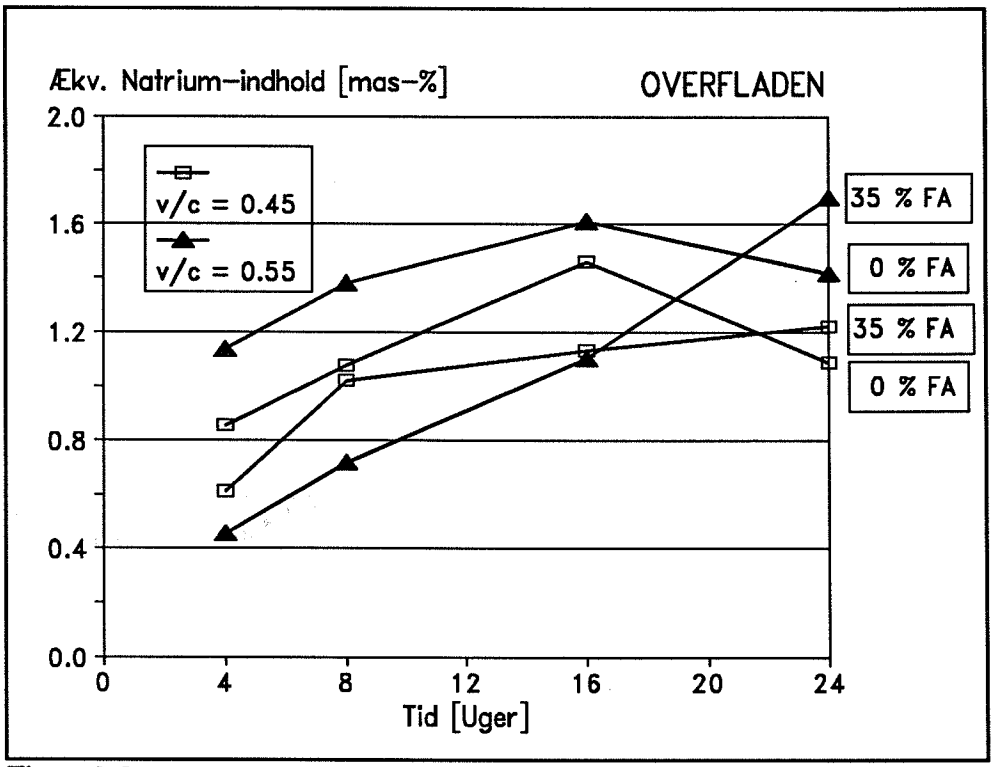
6.2 Alkali-indtrængning

På de udtagne prøver er indholdet af alkalier, nærmere bestemt natrium og kalium, bestemt ved hjælp af et atomabsorptions-spektro-fotometer. Måletal samt omregninger er angivet i bilag 10. De beregnede alkaliindhold er angivet på figur 6.2 for prøver udtaget henholdsvis ca. én centimeter under overfladen og ved midten af cylindrene, hvilket vil sige i en dybde af ca. fem centimeter. Det skal bemærkes, at indholdet af natrium og kalium er omregnet til et ækvivalent indhold af natrium ved hjælp af følgende sammenhæng:

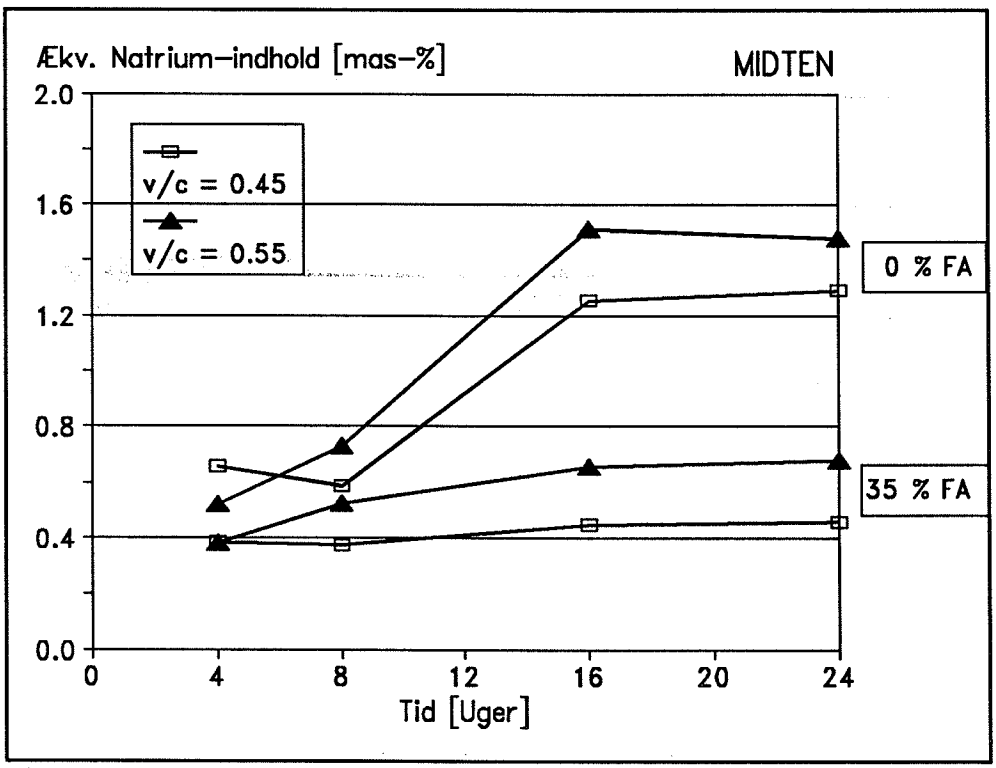
$$\text{ækv } Na_2O = Na_2O + 0.658\ K_2O$$

Det fremgår af målingerne foretaget ved overfladen, at der allerede efter 4 uger er sket en indtrængning af alkalier, især i betonerne uden flyveaske. Indtrængningen synes at fortsætte indtil 16 uger efter lagringens påbegyndelse, hvorefter der for de tre betoners vedkommende indtræffer en stagnering, og til dels en nedsættelse. Undtagelsen fra dette er betonen der indeholder 35 % flyveaske og har et v/c-forhold på 0.45. I denne beton synes alkaliindtrængningen at fortsætte selv efter 24 uger, endda på et meget højt niveau.

Resultaterne fra midten af cylindrene giver et mere klart indtryk af en forskel mellem betonerne. Der er således efter 24 uger et tydeligt lavere indhold af alkalier i betonerne tilsat flyveaske i forhold til betonerne uden flyveaske. Samtidig ses der en tydelig tidsmæssig udvikling, der indikerer at alkaliindholdet når en maksimumværdi efter 16 uger. Den maksimumværdi der nås i midten af cylindrene ses, for betonerne uden flyveaske, at svare til maksimumværdierne fundet ved overfladen. Resultaterne fra midten viser også en generel afhængighed af v/c-forholdet, hvor alkaliindholdet ved et v/c-forhold på 0.55 ligger ca. 0.2 % over alkaliindholdet ved et v/c-forhold på 0.45.



Figur 6.2a



Figur 6.2b

Figur 6.2a, 6.2b : Resultat af alkalibestemmelser på prøver udtaget ved overfladen og midten af udvalgte betoncylindre.

6.3 Sammenfatning

Det må konstateres at udbyttet af de foretagne fugtmålinger er meget begrænset. Dette skyldes, at målingerne i uforudset grad har været influeret af saltindtrængningen i cylindrene. Kombineret med et beskedent antal målinger resulterer det i, at tolkningen af resultaterne er meget vanskelig og egentlige konklusioner har ikke kunnet drages.

Bestemmelsen af alkaliindtrængningen har været lidt mere entydig, og samtidig er resultaterne nogenlunde som forventet. Resultaterne viser således tydeligt, at flyvasketilsætning øger betonens tæthed og dermed nedsætter alkaliindtrængningen væsentligt. Ligeledes er der tendens til at nedsættelse af v/c-forholdet nedsætter indtrængningen, idet det øgede cementindhold også øger tætheden.

7. Vurdering af genbrugstilslag

Et af de spørgsmål der umiddelbart rejser sig, når man står over for en konstruktion man ønsker at genbruge i aggressivt miljø er, hvor meget reaktivitet der er tilbage i betonen. Et væsentligt bidrag til besvarelsen af dette spørgsmål kan i første omgang fås ved at undersøge hvilke materialer der har været brugt ved fremstillingen af betonen, Derved fås et første indtryk af, om betonen kan forventes at indeholde væsentlige mængder af reaktive partikler. I tilfælde med f.eks. meget gamle konstruktioner er disse oplysninger sjældent tilgængelige, og andre metoder til vurdering af betonens reaktivitet er derfor nødvendige.

Foruden et kendskab til de benyttede råmaterialer, er det ofte en hjælp at kende det miljø konstruktionen har været placeret i før nedrivningen. Er dette miljø aggressivt, uden at det har ført til alkalikisel-reaktioner, tyder det på, at betonen er fremstillet med ikke-reaktivt tilslag, og derfor må kunne genbruges i aggressivt miljø uden fare for udvikling af alkalikiselreaktioner. Er sagen derimod den, at konstruktionen har været placeret i passivt miljø, kan brugen af reaktivt tilslag ikke udelukkes, tværtimod er dette meget sandsynligt.

En bestemmelse af betonens reaktivitet vil ofte være ønskelig for at kunne vurdere, om det er nødvendigt at benytte forebyggende foranstaltninger såsom flyveasketilsætning eller kun delvis erstatning.

7.1 DTI's metoder

På Dansk Teknologisk Institut (DTI) er der udviklet to metoder til bestemmelse af restreaktivitet på beton:

- måling af restekspansion
- kemisk svind

Disse metoder vil kort blive gennemgået i det følgende.

7.1.1 Måling af restekspansion.

Metode : Denne metode er en modificeret udgave af den kendte mørtelprismemetode TI-B 51. Fra udborede cylindre udsaves to prismer af størrelsen 40 x 40 x 80 mm. Prismerne forsynes med pålimede måletappe i enderne og lagres, en i vand og en i en mættet NaCl-opløsning ved 50 °C. Herefter måles længdeændringer efter 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16 og 20 uger.

Ekspansionen på grund af alkalikisel-reaktioner er da forskellen mellem ekspansioner af salt- og vandlagrede prismer.

En kategorisering af betonen kan herefter foretages på baggrund af de opnåede ekspansioner, f.eks. i fire grupper gående fra ufarligt svarende til ingen ekspansioner og til meget reaktiv beton, svarende til store ekspansioner. Metoden er dog endnu så ny, og erfaringerne så små, at grænseværdierne til brug for en sådan kategorisering endnu ikke er etableret.

Kommentarer : Metoden er forholdsvis simpel og det vurderes at den giver sikre resultater. Den største umiddelbare ulempe ved metoden er, at den er meget langsom; resultater opnås først efter 20 uger. Desuden er metoden ny og erfaringsgrundlaget begrænset.

Metoden kræver, at den beton der skal vurderes, findes i så store stykker at udsavning af prismer er muligt. Det en forudsætning for metodens anvendelighed, at betonen der skal vurderes er forholdsvis homogen således at nogle få prismer kan være repræsentative for den samlede beton. Metoden er således mest velegnet ved vurdering af enkelte, store konstruktioner.

7.1.2 Kemisk svind

Denne metode er meget lig en metode der benyttes til vurdering af sands reaktivitet.

Metode : Prøver, udtaget fra betonen der ønskes vurderet, knuses til ca. 16 mm, hvorefter de vaskes på sigte 1/4 eller 1/8 mm.

Sandet frigøres ved at overhælde betonen med koncentreret saltsyre og omrøre jævnligt. Efter 1 døgn dekanteres, prøven skylles med vand og ny saltsyre hældes på. Efter et par timer skylles med vand, reststykker nulres og ny saltsyre hældes på. Denne procedure fortsættes til prøven ikke bruser ved påhældning af saltsyre og der ikke ses cementpasta på tilslaget. Da uhydratiseret cement bidrager til det kemiske svind, er det vigtigt at al cement fjernes.

Efter et par timer vaskes prøven grundigt og sigtes. Sigtekurven bestemmes, og der måles kemisk svind på fraktionerne 0.5-1 mm, 1-2 mm og 2-4 mm.

Kommentarer : Afsyringen vil fjerne eventuel kalk fra sandet. Dette resulterer i for høje værdier af det kemiske svind, hvis ikke resultaterne omregnes til ml svind/kg sand + opløst kalk.

Afsyringen medfører desuden en "oplukning" af porøse kalkopaler, idet kalkdelen opløses. Disse opaler vil herefter være åbne over for reaktioner og medvirke til et øget kemisk svind. Ved vurdering af det kemiske svind er det derfor vigtigt at korrigere for indholdet af kalk mm. Dette besværliggør brugen af metoden.

Et andet minus ved metoden er brugen af stærke kemikalier (saltsyre), der betyder at prøvetilberedning kun bør foretages af øvede laboranter.

Metodens store fordel er, at den er meget hurtig, således at resultater kan opnås i løbet af få døgn.
Desuden kan metoden bruges på allerede nedknust beton, der evt. er kommet fra flere kilder. Det er dog vigtigt, at der i sådanne tilfælde udtages repræsentative prøver.

7.2 Mørtelprismeforsøg

En tredje vurderingsmetode der er benyttet i forsøgene, er måling af længdeændringer på udstøbte prismer. Metoden, der er brugt i dette projekt, er en lettere modificeret udgave af TI-B51.

Modifikationen gælder primært tilslaget, idet dette sammensættes af 50% ureaktivt søsand i fraktionen 0-2 mm, samt 50% knust beton i fraktionen 2-4 mm. Som i TI-B51 benyttes et v/c-forhold på 0.50 og lagringen foregår i en mættet NaCl-opløsning ved 50°C. Længdeændringer måles efter 1, 2, 4, 8, 12, 16 og 20 uger.

7.2.1 Omfang

Der blev udstøbt 5 serier af mørtelprismer med nedknust beton. I de fire er der brugt de tidligere beskrevne betoner R-0..R-3. Til den femte serie er der brugt nedknust beton fra borekerner udtaget af motorringvejen (Ring 3). Denne beton, i det følgende betegnet MRV, var, lige som R-2, skadet af alkalikiselreaktioner ved udtagningen.

Yderligere blev der støbt en serie med hver af de to sand, Københavner Søsand og Nymøllesand, der er brugt ved udstøbning af tilslagsbetonerne R-0 og R-3. Dette er gjort for at få et grundlag for en sammenligning af det oprindelige sands reaktivitet med restreaktiviteten af de tilsvarende tilslagsbetoner R-0 og R-3.

I hver af de syv serier blev der udstøbt tre prismer med dimensionerne 40x40x160 mm. Som hos betoncylindrene blev der indstøbt måletappe i begge ender. En oversigt over de udstøbte prismer er givet i tabel 7.1.

For at få et indtryk af effekten af det meget aggressive prøvningsmiljø der er benyttet under forsøgene, blev der i to af serierne, MP05 og MP07, udstøbt tre ekstra prismer. Disse blev herefter opbevaret i vand uden tilsat NaCl, men ved 50 °C. Disse to serier benævnes i det følgende MP05W og MP07W.

Forsøgs-serie	v/c	Tilslag 0-2 mm	2-4 mm
MP01	0.50	Søsand	R-1
MP02	0.50		R-2
MP03	0.50		MRV
MP04	0.50		R-0
MP05(W)	0.50		R-3
MP06	0.50	Søsand	Søsand
MP07(W)	0.50	Nymøllesand	Nymøllesand

Tabel 7.1 : Oversigt over udstøbte mørtelprismer

7.2.2 Proportionering og udstøbning

Grundlaget for mørtelproportioneringen er TI-B51, der foreskriver et v/c-forhold på 0.50 og en sammensætning givet ved 3 dele sand til 1 del cement taget efter vægt. Denne sammensætning blev benyttet i serierne MP06 og MP07, idet disse var ment som en afprøvning af sandenes reaktivitet efter TI-B51.

I de øvrige serier MP01-MP05, hvor halvdelen af sandet, nemlig hele fraktionen 2-4 mm, bestod af knust beton, viste prøvestøbninger at den foreskrevne sammensætning gav meget flydende mørtler. Dette resulterede i kraftig bleeding under vibreringen, og det blev derfor besluttet at tilsætte ekstra sand, således at resultatet blev en sammensætning svarende til 10 dele sand til 3 dele cement. V/c-forholdet på 0.50 blev bibeholdt. Luftindhold og densitet blev bestemt ved pyknometermetoden umiddelbart efter blandingen.

Mørtelrecepter og resultater af luftindhold- og densitetsbestemmelse er angivet i bilag 11.

7.3 Resultater

De vigtigste resultater fra de tre vurderingsmetoder gennemgås i det følgende. På grundlag af resultaterne foretages der, for hver af prøvningsmetoderne, en kort vudering af restreaktiviteten af de prøvede tilslagsbetoner. Det skal understreges, at alle vurderinger af tilslagsbetonernes egnethed til brug i aggressivt miljø forudsætter, at der ikke gøres brug af flyveasketilsætning eller andre forebyggende foranstaltninger.

7.3.1 Restekspansioner

Der er bestemt restekspansion på tre af de benyttede betontyper: R-0, R-2 og R-3. Ved R-0 og R-3 er der sket en dobbelt bestemmelse,

medens det for R-2´s vedkommende kun var muligt at foretage en enkelt bestemmelse. Bestemmelsen er foretaget af DTI. Prøvningsrapporten indeholdende alle målinger findes i bilag 12. I tabel 7.2 er der angivet et uddrag af de fundne resultater.

Beton-type	Antal bestemmelser	Restekspansion i ‰ efter 8 uger	20 uger
R-0	2	-0.19	-0.21
R-2	1	-0.07	1.40
R-3	2	10.63	11.56

Tabel 7.2 : Resultatet af DTI´s restekspansionmålinger.

Vurdering: Resultaterne viser, som det måtte forventes, at R-3 udviser en betydelig restekspansion, omkring 1% efter 8 uger. Derimod udviser R-0 ingen restekspansion, resultatet viser at der faktisk sker en kontraktion. Dette beror på, at de vandlagrede prismer ekspanderer mere end de saltlagrede, omend på et lavt niveau (< 0.4 ‰). På R-2 måles en vis grad af restekspansion, der dog er nogen tid om at udvikle sig. Først efter 20 uger er ekspansionen over 1 ‰.

Ifølge BBB anses sand for at være uegnet til brug i aggressivt miljø, såfremt ekspansionen, målt efter TI-B51, efter 8 uger er større end 1 ‰. Overføres dette kriterium til også at gælde restekspansion, må R-3 vurderes som værende uegnet som tilslag i beton i aggressivt miljø, medens R-0 er velegnet. R-2 overholder kriteriet, men resultatet tyder på at dette alene skyldes at ekspansionerne er længe om at udvikle sig. R-2 bør således kun benyttes med forsigtighed i aggressivt miljø.

7.3.2 Kemisk svind

Bestemmelse af kemisk svind er foretaget af DTI på alle fem betontyper, R-0..R-3 samt MRV. Resultaterne er angivet i tabel 7.3. Prøvningsrapporten findes i bilag 13.

Vurdering: I [17] anføres det, at grænseværdien fra BBB på 1 ‰ ekspansion efter 8 uger, kan oversættes til et kemisk svind på 0.4 ml/kg sand efter 20 timer. Om denne værdi også gælder når der, som her, måles på afsyret sand, er svært at sige. Af mangel på bedre vil denne værdi dog blive benyttet i den følgende vurdering.

Prøvebetegnelse	Kemisk svind [ml/kg]
R-0, ærter	0.37
R-1, ærter	0.49
R-2, perler R-2, ærter	0.74 0.85
R-3, ærter	1.20
MRV, perler	0.66

Tabel 7.3 : Resultat af kemisk svind bestemmelse på afsyret sand fra tilslagsbetoner. Tallene er ikke korrigeret for opløst kalk.

Med grænseværdien på 0.4 ml/kg betyder resultaterne i tabel 7.3, at kun R-0 må vurderes som egnet til brug i aggressivt miljø. De øvrige overskrider alle grænseværdien, og må vurderes som uegnede. Iøvrigt ses de fundne kemiske svind at være jævnt fordelt mellem yderpunkterne, hvor R-3 igen viser sig som den mest reaktive og R-0 som den mindst reaktive. Det skal understreges at tallene ikke er korrigeret for mængden af opløst kalk. Dette ville måske ændre vurderingen af betonerne, men da mængden af opløst kalk ikke er bestemt har denne korrektion ikke været mulig.

7.3.3 Mørtelprismeekspansioner

I tabel 7.4 er udvalgte ekspansionsresultater angivet. I bilag 14 findes en samlet oversigt over alle resultater fra mørtelprismeforsøgene.

Serie	Sand-type (2-4 mm)	Ekspansion i ‰ efter 8 uger	20 uger
MP04	R-0	0.093	0.155
MP01	R-1	1.505	2.031
MP02	R-2	0.150	0.172
MP05	R-3	2.288	3.171
MP03	MRV	0.150	0.174
MP06	Søsand	0.099	0.166
MP07	Bakkesand	12.475	17.725
MP05W	R-3	0.138	i.b.
MP07W	Bakkesand	0.089[1)]	i.b.

Tabel 7.4 : Resultat af ekspansionsmålinger på udstøbte mørtelprismer.
[1)] Kun resultater fra to prismer pga. støbefejl. (i.b. = ikke bestemt.).

Vurdering af tilslagsbeton (MP01..05): Benyttes som grænseværdi 1 ‰ ekspansion efter 8 uger, må det på baggrund af de fundne ekpansioner vurderes, at R-1 og R-3 er uegnet til brug som tilslag i aggressivt miljø. De øvrige tre typer er klart under grænseværdien, og må vurderes som egnede. Det er værd at bemærke, at resultatet er det samme hvis vurderingen foretages på baggrund af ekspansionerne målt efter 20 uger.

Vurdering af sand (MP06..07): Ekspansionerne fundet for sandene viser at søsandet er meget lidt reaktivt, og klart under grænseværdien efter både 8 og 20 uger. Bakkesandet medfører derimod store ekspansioner, mere end 10 gange større end grænseværdien på 1 ‰, allerede efter 8 uger.

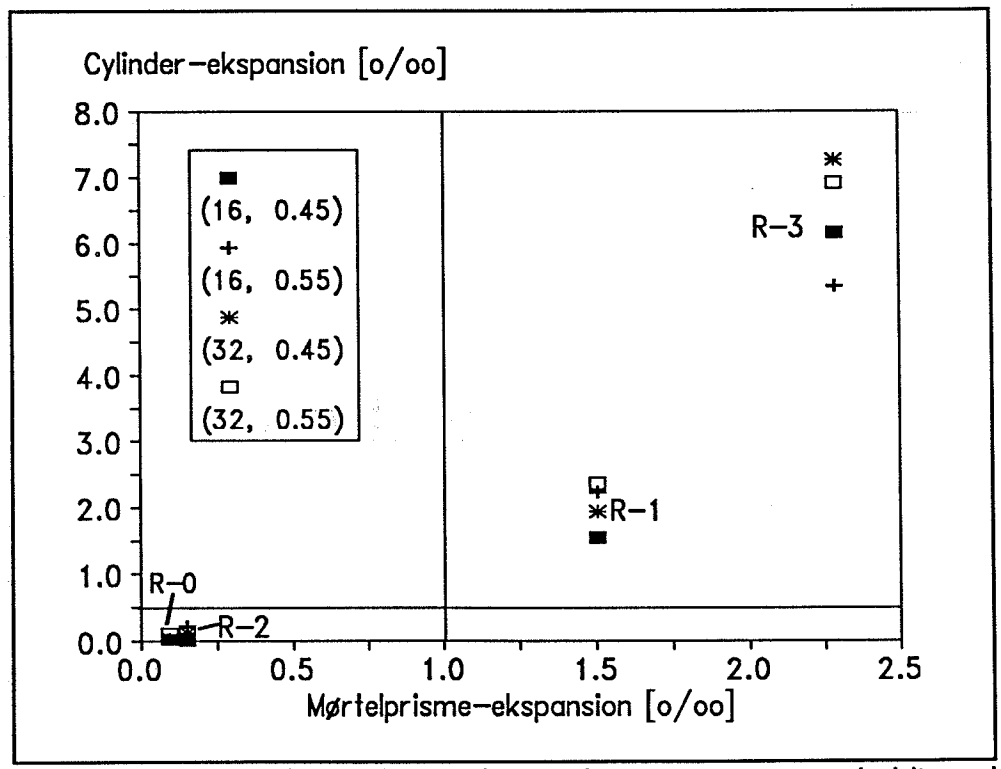
Vurdering af prøvemetode(MP05W,MP07W): De vandlagrede prismer udviser endog meget beskedne ekspansioner efter 8 uger. Dette viser, at alkalikiselreaktioner ikke har udviklet sig på trods af et betydeligt indhold af reaktive partikler i prismerne. Dette viser meget tydeligt, at alkalitilførsel udefra er afgørende for om reaktioner udvikles når der, som her, benyttes cement med et meget lavt alkaliindhold.

7.4 Diskussion

I dette afsnit sammenlignes ekspansioner målt på mørtelprismer med ekspansioner målt på beton-cylindre støbt med de tilsvarende tilslagsbetoner. Endvidere sammenholdes resultaterne af de to vurderingsmetoder, restekpansion og kemisk svind, med mørtelprisme-ekspansionerne. Dette fører frem til en samlet vurdering af de tre metoder.

7.4.1 Mørtelprismeekspansioner vs. cylinderekspansioner

På figur 7.1 er resultaterne af mørtelprisme-ekspansioner sammenstillet med ekspansioner målt på cylindre med samme tilslagsbeton. De angivne prismeekspansioner er målt efter 8 uger, cylinderekspansionerne er målt efter 28 uger. Desuden er grænseværdien for mørtelprismeekspansion efter BBB på 1 ‰ indtegnet. Som beskrevet i afsnit 5.3 kan cylinder-ekspansioner karakteriseres som skadelige når de er større end 0.5-1.0 ‰. På figuren er grænseværdien angivet som 0.5 ‰.



Figur 7.1 : Mørtelprisme-ekspansioner efter 8 uger sammenholdt med betoncylindres slutekspansioner (efter 28 uger). Signatur=(D_{max}, v/c).

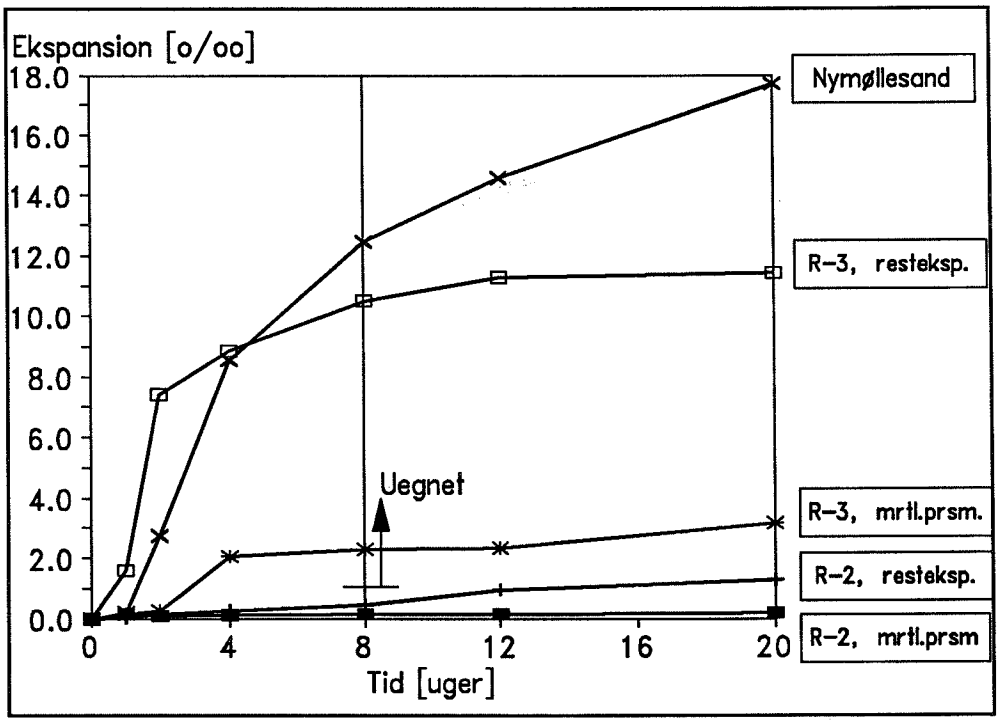
Med disse grænseværdier vurderes R-0 og R-2, som det fremgår af figur 7.1, af begge metoder til at være egnet til brug i aggressivt miljø. De to øvrige tilslagsbetoner, R-1 og R-3, vurderes af begge metoder til at være uegnet. Denne vurdering ses at være uafhængig af D_{max} og v/c-forhold for cylindrene.

På basis af ovenstående forventes det, at mørtelprisme-metoden er velegnet til vurdering af betons restreaktivitet. Det må dog pointeres at denne konklusion bygger på relativt få målinger.

7.4.2 Restekspansion vs. mørtelprismeekspansion

På figur 7.2 er optegnet resultaterne fra længdemålingerne på henholdsvis udsavede betonprismer, den såkaldte restekspansion, og udstøbte mørtelprismer for R-2 og R-3. Som det ses er der meget forskel på de ekspansioner der fås ved de to metoder. Dette er specielt udpræget for betontype R-3, hvor ekspansionerne fundet på de udsavede prismer efter 20 uger er 3-4 gange større end ekspansionerne på de støbte mørtelprismer. Indtegnet er også ekspansionen for mørtelprismerne støbt med Nymøllesand, altså det sand der er brugt ved støbningen af R-3. Ekspansionen af den rene mørtel ses at ligge over begge de to restreaktivitetsmålinger, omend ikke meget over restekspansionsværdierne.

Den relative forskel mellem restekspansion og mørtelekspansion er endnu større for R-2, hvor mørtelprismerne er ekspanderet mindre end 0.2 ‰ efter 20 uger, hvor restekspansionsmetoden giver ekspansioner på ca. 1.4 ‰ efter 20 uger. For R-0's vedkommende måles, jvf. tabel 7.2 og 7.4, meget små ekspansioner ved begge metoder.

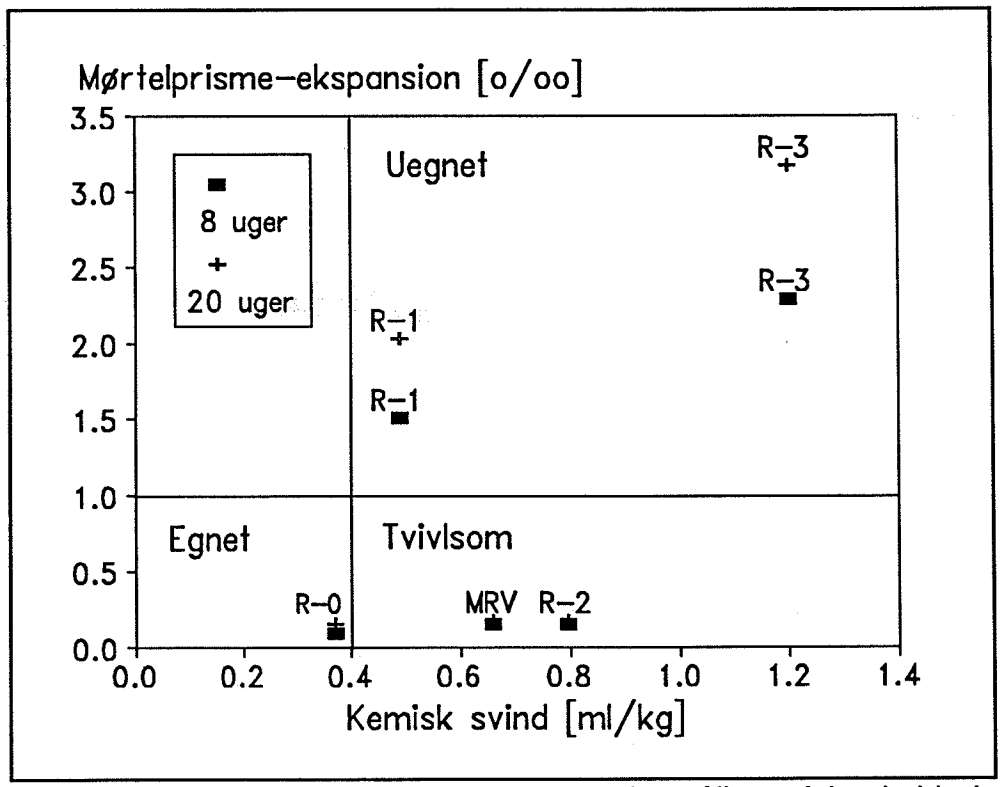


Figur 7.2 : Forløbet af mørtelprisme-ekspansion og rest-ekspansion. Nymøllesandets ekspansion, målt efter TI-B51, er angivet til sammenligning.

Benyttes som grænseværdi for ekspansionen 1 ‰ efter 8 uger, bliver vurderingen af de tre betoner ens efter de to metoder. Dette betyder at R-0 og R-2 vurderes som egnet og R-3 som uegnet til brug i aggressivt miljø. Det er dog bemærkelsesværdigt, at restekspansionerne målt på R-2 og R-3 er væsentlig højere end de tilsvarende mørtelprisme-ekspansioner. Det er derfor tvivlsomt, om den samme grænseværdi kan bruges ved begge metoder. Yderligere forsøg er nødvendige for at klarlægge dette.

7.4.3 Kemisk svind vs. mørtelprismeekspansioner

På figur 7.3 er resultaterne fra bestemmelsen af det kemiske svind sammenstillet med mørtelprismeekspansionerne efter henholdsvis 8 og 20 uger. Resultaterne er vist for alle fem betontyper. Det fremgår at begge metoder, med de i figuren angivne grænseværdier, vurderer R-1 og R-3 som uegnet og R-0 som egnet ved brug i aggressivt miljø. Derimod er der ikke overensstemmelse mellem metoderne ved vurderingen af R-2 og MRV, idet de forkastes ved kemisk svind-metoden, men godkendes efter mørtelprismeekspansionen efter både 8 og 20 uger.



Figur 7.3 : Vurdering af tilslagsbeton ved måling af henholdsvis kemisk svind og mørtelprismeekspansion. Grænseværdierne er forklaret i teksten.

Denne tilsyneladende uoverensstemmelse må, da mørtelprismeekspansionerne på det foreliggende grundlag anses for mest pålidelige,

skyldes bestemmelse af for store kemiske svind. Det vides at R-2 såvel som MRV har indeholdt væsentlige mængder reaktivt materiale, der har udmøntet sig i revnedannelse i de oprindelige konstruktioner som følge af alkalikiselreaktioner. Det er derfor nærliggende at tro, at der i forbindelse med bestemmelsen af det kemiske svind er fritlagt kisel, der i konstruktionen ikke var tilgængeligt for reaktioner. Disse to eksempler viser at der, som nævnt i kommentaren i afsnit 7.1.2, er problemer forbundet med bestemmelse af restreaktivitet ved hjælp af kemisk svind.

7.4 Konklusion

Der er fundet en god sammenhæng mellem mørtelprisme-ekspansioner og betoncylinder-ekspansioner. På denne baggrund findes mørtelprisme-metoden, med de omtalte modifikationer, velegnet til vurdering af betons restreaktivitet.

Bestemmelse af restreaktivitet ved måling af restekspansion på udsavede prismer synes lovende. Yderligere forsøg er dog nødvendige for at kunne fastlægge en grænseværdi for acceptable ekspansioner.

På baggrund af sammenligningen mellem mørtelprisme-metoden og kemisk svind metoden vurderes det, at kemisk svind giver en noget usikker vurdering af betons restreaktivitet. Yderligere afprøvning af metoden må således anbefales.

8. Konklusion

8.1 Forsøgsresultater

De udførte forsøg viser, at det er muligt at genbruge alkalireaktiv beton i moderat og aggressiv miljøklasse, når der tages visse forholdsregler. Følgende parametre forbedrer hver for sig genbrugsbetonens holdbarhed under hårde miljøpåvirkninger:

- Tilsætning af 35 % flyveaske vil under alle omstændigheder forsinke ekspansionsudviklingen væsentligt. Tillige er det sandsynliggjort, at det er muligt at nedbringe slutekspansionen, d.v.s. ekspansionsniveauet når den reaktive silica er opbrugt. Flyveaskens evne til at nedsætte ekspansionerne til uskadelige værdier afhænger af vand-cementforhold og maksimal stenstørrelse.

- Ved 20 % erstatning af stenfraktionen med genbrugsmateriale opstår ikke skadelige ekspansioner. Der optræder en positiv fortyndingseffekt, således at ekspansioner nedsættes forholdsvis mere end fortyndingsgraden indikerer.

- Ved en maksimal stenstørrelse for det nedknuste tilslag på 16 mm nedbringes slutekspansioner en del i forhold til ved brug af tilslag med 32 mm maksimal stenstørrelse.

- Ved brug af tilslagsbetoner med en lav restreaktivitet opstår der ikke skadelige ekspansioner.

I forbindelse med det foreliggende projekt er tre forskellige restreaktivitetsmetoder blevet undersøgt, og det er fastslået, at det er muligt at få en god vurdering af en konkret betons potentielle farlighed ved brug af disse metoder. En yderligere indsats er dog påkrævet, før der kan opstilles præcise godkendelsesværdier for de enkelte metoder.

8.2 Perspektiver

På baggrund af de opnåede resultater kan der, med hensyn til den praktiske anvendelse af genbrugsbeton i aggressivt miljø, opstilles følgende perspektiver:

1. Det synes muligt at bruge selv meget reaktiv nedknust beton til erstatning af hele stenfraktionen i ny beton, uden at det fører til skader, idet det er fundet, at ekspansioner nedbringes væsentligt ved tilsætning af 35 % flyveaske. Yderligere undersøgelser er påkrævede for at vise om tilsætning af flyveaske og evt. microsilica under alle omstændigheder kan nedbringe ekspansioner til et niveau, hvor de er uskadelige.
   Viser denne fremgangsmåde sig at være brugbar, overflødiggøres restreaktivitetsmålinger på den nedknuste beton, idet selv beton med maksimal reaktivitet vil kunne genbruges uden skader til følge. Det vil derimod være nødvendigt at opstille krav til den flyveaske og microsilica, der skal bruges til nedbringelse af ekspansioner, samt finde frem til det optimale indhold af disse tilsætningsstoffer.
   Hvis en sådan tilsætning af flyveaske og microsilica viser sig effektiv vil der tillige åbne sig mere generelle perspektiver. I Danmark har man hidtil forsøgt at undgå skadelige alkalikiselreaktioner ved at stille strenge krav til tilslagsmaterialerne. Disse krav har betydet, at mange af de naturligt forekommende tilslagsmaterialer ikke har kunnet anvendes i aggressivt miljø, og det har derfor været nødvendigt at transportere de velegnede materialer over store afstande. Forebyggelse af alkalireaktioner ved hjælp af tilsætning af flyveaske og microsilica vil muliggøre anvendelse af tilslagsmaterialer af en dårligere kvalitet, og resultere i væsentlige transportbesparelser.

2. Såfremt den under 1. beskrevne løsning ikke kan gennemføres i praksis, f.eks. fordi de tilgængelige danske flyveasker ikke er effektive nok, vil det dog være muligt at genbruge beton der har en lav restreaktivitet. Der kan opstilles betonrecepter med puzzolantilsætning og brug af tilslagsbetoner med restreaktiviteter, der ligger under fastlagte grænseværdier, hvorved skader forhindres. Yderligere undersøgelser er nødvendige til fastlæggelse af disse grænseværdier.

3. En tredje løsningsmodel kunne være at foreskrive tilsætning af en vis procentdel genbrugsmateriale til alt betontilslag, uafhængigt af anvendelsen. Erfaringer fra udlandet, samt resultaterne fra dette projekt, tyder på, at der kan tilsættes 20 % af en meget reaktiv beton, uden fare for at der opstår skadelige ekspansioner. De 20 % er ikke nødvendigvis den optimale erstatningsgrad. Yderligere undersøgelser er nødvendige for at bestemme denne. Samtidig er det ved denne løsningsmodel nødvendigt at analysere markedssituationen, idet det skal sikres,

at der er nok genbrugsmateriale til rådighed for at kunne opfylde den valgte erstatningsgrad. I praksis kunne en sådan generel anvendelse af genbrugsmateriale gennemføres ved at lade både knusning og blanding af naturligt og knust tilslag ske hos grusleverandøren. Denne løsning ville spare entreprenører og færdigbetonfabrikanter for praktiske problemer som opstilling af ekstra siloer og omstilling af produktionsprocessen.

Som påpeget i det indledende afsnit, kan alt det byggeaffald, der skal genbruges for at opfylde den opstillede målsætning om 50 % genbrug i år 2000, sagtens bruges som fyldmateriale, hvis der anlægges en rent mængdemæssig betragtning. Ud fra en ressourcemæssig betragtning vil det dog være langt mere tilfredsstillende at bruge en del af den gamle beton som tilslag til ny beton, idet der spares på højkvalitetsmaterialer og transportomkostninger. Da anvendelsen af genbrugsbeton i dag er ret begrænset, er det nødvendigt at gøre en ekstra indsats for at promovere materialet. Der kan laves flere demonstrationsprojekter i fuld skala. Herudover er det fra politisk hold muligt at tilskynde til yderligere genbrug ved forhøjelse af deponeringsafgifter.

9. Referencer

[1] Hansen, T.C.: *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*, RILEM TC-37-DRC, E & FN Spon, London, 1992.

[2] Miljøstyrelsen: *PROBA - Kortlægning og pronose for bygge- og anlægsaffald*, DEMEX m.fl., 1990. (Miljøprojekt nr. 150 og 151).

[3] Miljøministeriet og Danmarks Geologiske Undersøgelse: *Råstofproduktionen i 1988, Landområdet*, Intern rapport nr. 11, 1990.

[4] Fredningsstyrelsen og Roskilde Universitetscenter: *De grusforarbejdende branchers marked*, arbejdsrapport, 1985.

[5] *Dansk Betonforenings anvisning for genanvendelsesmaterialer i beton til passiv miljøklasse*, Dansk Betonforening, publ.nr. 34, 1989.

[6] Miljøstyrelsen og Axel Nielsen a/s: *Anvendelse af nedknust beton i ny beton*, Miljøprojekt nr. 157, 1990.

[7] Miljøstyrelsen: *Styrkeegenskaber for beton med genanvendelsesmaterialer*, Dansk Beton Teknik a/s, Axel Nielsen a/s og DIA-B, 1989.

[8] Nielsen, A.: *Alkalikiselreaktioners tidsforløb*, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, TR-164, 1986.

[9] *Basisbetonbeskrivelsen for bygningskonstruktioner*, Bygge- og Boligstyrelsen, 1986.

[10] Yrjason, W.: *Recycling of Portland Cement Concrete Pavements*, report no. 154, Transportation Research Board, National Research Council, 1989.

[11] Puckman,K., Henrichsen,A., Hansen,O.R.: *Genbrug af betonbelægninger*, Statens Vejlaboratorium, laboratorierapport 63, 1987.

[12] Brandt,K., Thorsen,T., Munch-Petersen,C.: *Alkalikiselreaktioner i beton*, Miljøministeriet og Skov- og Naturstyrelsen, 1989.

[13] Davis,C.E.S: *Studies in Cement-Aggregate Reaction XXV*, Australian Journal of Applied Science, 1957.

[14] Hansen,T.C: *Beton i henhold til DS 411-84*, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, TR-146, 1986.

[15] Hansen,T.C, Hedegård,S: *Proportionering af grovbeton og flyveaskebeton*, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, TR-167, 1986.

[16] *Recycling Portland Cement Concrete*, DP 47-85, Federal Highway Administration, USA.

[17] Knudsen,T: *Alkali-kisel projektet under ATV, nogle resultater,* Dansk Beton nr. 3, 1986.

APPENDIX A

Beregning af mørteldensitet

Mørtelens tørdensitet, D_m, der er nødvendig ved bestemmelse af mørtelandele, bestemmes ud fra kendskabet til blanderecept samt densiteten af de indgående materialer ved hjælp af følgende tre sammenhænge:

$$M_m = C(1+\Delta w \cdot \alpha) + Sa$$

$$V_m = \frac{C}{D_c} + \frac{Sa}{D_{Sa}} + \frac{W}{1000} + \frac{L}{1} \qquad (A.1)$$

$$D_m = \frac{M_m}{V_m}$$

hvor
- C = Cementindhold
- W = Vandindhold
- ΔW = Det kemisk bundne vands andel (~ 25 %)
- α = Hydratiseringsgrad
- Sa = Sandindhold
- V_m = Mørtelens volumenandel
- M_m = Mørtelens tørmasse efter hydratisering.
- D_c = Densitet af cementen.
- D_{sa} = Densitet af sandet.
- L = Luftindhold.

For de tre tilslagsbetoner R-0, R-2 og R-3, hvor recepterne er kendt kan tørdensiteter for mørtelen bestemmes. Det skal bemærkes, at der for betonerne R-0 og R-3 er regnet med en hydratiseringsgrad på 75 %, medens den for R-2´s vedkommende er sat til 90 %.

R-0 Materialer	Indhold kg/m³	Densitet kg/m³	Vol.-andel m³/m³
Rapid cement	309	3100	0.100
Sand, Søsand	606	2630	0.230
Vand	170	1000	0.170
Luft			0.010
Mørtel ialt	1085		0.510
Sten	1348	2750	0.490
Beton ialt	2433		1.000

Tabel A.1: Volumenregnskab for R-0.

Tørdensitet af mørtel D_m = [309(1+0.25·0.75)+606]/0.510 = 1908 kg/m³

R-2 Materialer	Indhold kg/m^3	Densitet kg/m^3	Vol.-andel m^3/m^3
Rapid cement Sand, Nymølle Filler Vand Luft	320 760 30 175	3100 2550 2600 1000	0.103 0.298 0.012 0.175 0.048 *
Mørtel ialt Sten	1290 1002	 2750	0.636 0.364
Beton ialt	2292		1.000

Tabel A.2: Volumenregnskab for R-2. (* = Skønnet værdi.)

Tørdensitet af mørtel D_m= [320(1+0.25·0.90)+760+30]/0.636=1859 kg/m^3

R-3 Materialer	Indhold kg/m^3	Densitet kg/m^3	Vol.-andel m^3/m^3
Rapid cement Sand, Nymølle Vand Luft	327 752 180	3100 2550 1000	0.105 0.294 0.180 0.012
Mørtel ialt Sten	1259 1129	 2750	0.591 0.410
Beton ialt	2388		1.001

Tabel A.3: Volumenregnskab for R-3.

Tørdensitet af mørtel D_m= [327(1+0.25·0.75)+752]/0.591 = 1929 kg/m^3

Appendix B

Beregning af ekspansioner og vægtændringer

I det følgende gennemgås de formler, der er brugt ved bestemmelse af relative længdeændringer og relative vægtændringer.

Til brug ved ekspansionsbestemmelserne indføres følgende størrelser:

$$\begin{aligned} l_0 &= l_k + \overline{\Delta l}_0 \\ l_i &= l_0 - 2 \cdot l_t = (l_k - 2 \cdot l_t) + \overline{\Delta l}_0 \\ l_n &= l_k + \overline{\Delta l}_n \end{aligned} \qquad \text{(B.1)}$$

hvor l_0 angiver den ydre og l_i den indre afstand mellem måletappene efter de 4 ugers indledende ferskvandslagring. l_k angiver kalibreringsklodsens længde og l_t er længden af måletappen. $\overline{\Delta l}_n$ angiver middel af de to længdemålinger foretaget på hver cylinder ved termin n, svarende til lagring i saltvand i n uger.

Ekspansionen, ΔL_n, til en given termin n bestemmes herefter af følgende formel

$$\Delta L_n = \left(\frac{l_n - l_0}{l_i} \right) \cdot 1000 \text{ o/oo} \qquad \text{(B.2)}$$

idet ekspansionen angives i promille. Indsættes heri de ovenfor definerede størrelser fås følgende udtryk

$$\Delta L_n = \left(\frac{\overline{\Delta l}_n - \overline{\Delta l}_0}{(l_k - 2 \cdot l_t) + \overline{\Delta l}_0} \right) \cdot 1000 \text{ o/oo} \qquad \text{(B.3)}$$

Idet $l_k \equiv 200{,}0$ mm og $l_t = 17{,}9$ mm fås ved indsættelse følgende udtryk til bestemmelse af ekspansionen:

$$\Delta L_n = \left(\frac{\overline{\Delta l}_n - \overline{\Delta l}_0}{164{,}2\,\text{mm} + \overline{\Delta l}_0} \right) \cdot 1000 \text{ o/oo} \qquad \text{(B.4)}$$

Ved beregning af cylindrenes relative vægtændring, ΔM_n, bruges vægten m_0 efter 4 ugers ferskvandslagring som startværdi. Det er dog nødvendigt at korrigere for vægten, m_t, af de to tappe, da disse ikke optager vand. Idet cylinderens vægt efter n ugers saltlagring er m_n, fås følgende udtryk til bestemmelse af vægtændringen ved termin n:

$$\Delta M_n = \frac{m_n - m_0}{m_0 - 2 \cdot m_t} \cdot 100\ \% \qquad \text{(B.5)}$$

Da målinger viser at $m_t = 4.52$ g, bestemmes cylindrenes vægtændring således af følgende udtryk:

$$\Delta M_n = \frac{m_n - m_0}{m_0 - 9.04\ \text{g}} \cdot 100\ \% \qquad \text{(B.6)}$$

APPENDIX C

Genbrugt mørtels andel af ny beton

Det er nævnt tidligere, at en del af betons egenskaber er kraftigt relateret til mørteldelen af beton. Derfor kan det i forskellige sammenhænge have interesse at bestemme mørtelens, herunder den genbrugte mørtels, andel af betonen. I forbindelse med dette projekt har den den genbrugte mørtels andel speciel interesse, da det, som nævnt i afsnit 3.2.3, antages at alle reaktive korn forefindes i mørteldelen af den genbrugte beton. Indholdet af reaktive korn i den nye beton må således være proportionalt med indholdet af genbrugt mørtel. Derfor er det af stor interesse at kunne udregne den genbrugte, reaktive mørtels andel af den nye beton.

I genbrugsbeton kan mørtelen opdeles i to slags: ny, ikke-genbrugt mørtel og gammel, genbrugt mørtel. Dette er vist på figur 3.2. Det er forholdsvis simpelt at bestemme den nye mørtels andel af betonen ud fra recepten. Fremgangsmåden er gennemgået i afsnit 4.2.6. Bestemmelsen af den genbrugte mørtels andel vil blive gennemgået i det følgende.

Formeludledning

Følgende sammenhæng, fundet ved en simpel volumenbetragtning, må gælde i de tilfælde, hvor det genbrugte tilslag kun optræder i én af fraktionerne sand og sten og samtidig udgør hele denne ene fraktion:

$$A_{m,g} = A_m \cdot A_g \tag{C.1}$$

hvor A_g : Genbrugstilslagets andel af ny beton.
A_m : Mørtels andel af genbrugstilslag.
$A_{m,g}$: Genbrugt mørtels andel af ny beton.

I de tilfælde hvor det genbrugte tilslag kun udgør en del af en eller flere af fraktionerne sand og sten kompliceres tingene en del, og således må følgende størrelser indføres:

ρ_g : Densitet af genbrugt materiale i fraktionen .
ρ_0 : Densitet af ikke-genbrugt materiale i fraktionen .
M_g : Masse af genbrugt materiale i fraktionen.
M_0 : Masse af ikke-genbrugt materiale i fraktionen.
A_f : Fraktionens andel af ny beton (fremgår af recept).
$A_{g,f}$: Den genbrugte del af fraktionens andel af ny beton
$A_{0,f}$: Den ikke-genbrugte del af fraktionens andel af ny beton.
$A_{m,f}$: Mørtelens andel af den genbrugte fraktion.

Index **f** henviser til den betragtede fraktion. Der kan i denne forbindelse være tale om to fraktioner: sten og sand.

Forholdet mellem genbrugt og ikke genbrugt materiale i den enkelte fraktion udtrykkes ved den diminsionsløse størrelse **n**. Der gælder følgende:

$$n = \frac{M_g}{M_0 + M_g} \qquad \text{(C.2a)}$$

$$1-n = \frac{M_0}{M_0 + M_g} \qquad \text{(C.2b)}$$

Volumenandelene for genbrugt og ikke-genbrugt materiale i den enkelte fraktion er givet som

$$A_{g,f} = \frac{M_g}{\rho_g} \qquad \text{(C.3a)}$$

$$A_{0,f} = \frac{M_0}{\rho_0} \qquad \text{(C.3b)}$$

For den enkelte fraktion må således gælde følgende:

$$A_f = A_{g,f} + A_{0,f} \qquad \text{(C.4)}$$

Af C.2a og C.2b fås

$$\frac{M_o}{M_g} = \frac{1-n}{n} \qquad \text{(C.5)}$$

Af C.3a og C.3b fås

$$A_{0,f} = A_{g,f} \frac{M_0}{M_g} \frac{\rho_g}{\rho_0} \qquad \text{(C.6)}$$

der indsat i C.4 giver

$$A_f = A_{g,f}\left(1 + \frac{M_0}{M_g}\frac{\rho_g}{\rho_0}\right) \qquad \text{(C.7)}$$

eller

$$A_{g,f} = \frac{A_f}{1+\frac{M_0}{M_g}\frac{\rho_g}{\rho_0}} = \frac{A_f}{1+\frac{1-n}{n}\frac{\rho_g}{\rho_0}} \qquad \text{(C.8)}$$

idet C.5 er indført i sidste led.

Den samlede mørtelandel for hele betonen fås nu ved at summere bidragene fra de enkelte faser:

$$A_{m,g} = \sum_{f=sa,st} A_{g,f} \cdot A_{m,f} \qquad \textbf{(C.9)}$$

Bestemmelse af $A_{m,f}$

På baggrund af de i tabel 4.5 til 4.7 angivne mørtelandele i de enkelte fraktioner, samt kendskabet til sammensætningen af tilslaget, kan de gennemsnitlige mørtelandele, der svarer til $A_{m,f}$, bestemmes ud fra følgende sammenhænge:

d_{max} =16 mm => $A_{m,f} = 0.40 \cdot M_{perler} + 0.60 \cdot M_{ærter}$

d_{max} =32 mm => $A_{m,f} = 0.15 \cdot M_{perler} + 0.45 \cdot M_{ærter} + 0.4 \cdot M_{nødder}$

Ved indsættelse af værdierne i tabel 4.5..4.7 fås følgende for de tre betoner hvor mørtelandelene er bestemt:

Tilslagstype	d_{max}	$A_{m,f}$
R-0	16 mm	47.3 %
	32 mm	45.6 %
R-2	16 mm	62.2 %
	32 mm	49.4 %
R-3	16 mm	59.7 %
	32 mm	56.2 %

Tabel C.1 : Mørtelindhold for sammensatte tilslag.

Resultater

R-0

I otte serier udgøres hele stenfraktionen af genbrugstilslag af type R-0. I det følgende er andelen af den genbrugte mørtel udregnet for disse serier ved indsættelse i (C.1).

Serie	d_{max} mm	Genbrugt fraktion	A_g	A_m	$A_{m,g}$
1	16	4-16	0.454	0.473	0.215
2	32	4-32	0.510	0.456	0.233
5	16	4-16	0.443	0.473	0.210
6	32	4-32	0.490	0.456	0.224
9	16	4-16	0.452	0.473	0.214
10	32	4-32	0.507	0.456	0.231
13	16	4-16	0.469	0.473	0.222
14	32	4-32	0.502	0.456	0.229

Tabel C.2 : Resultater for R-0.

R-2

I fire serier udgøres hele stenfraktionen af genbrugstilslag af type R-2. I det følgende er andelen af den genbrugte mørtel udregnet for disse serier.

Serie	d_{max}	Genbrugt fraktion	A_g	A_m	$A_{m,g}$
21	16	4-16	0.469	0.622	0.292
22	32	4-32	0.527	0.494	0.260
25	16	4-16	0.468	0.622	0.291
26	32	4-32	0.531	0.494	0.262

Tabel C.3 : Resultater for R-2.

R-3

Den reaktive tilslagsbeton, type R-3, der er blevet fremstillet i forbindelse med dette projekt, er speciel på den måde at det kun er sandet der er reaktivt, medens stenene anses for at være helt ikke-reaktive. Dette gør, at alle reaktioner i den nye beton udelukkende skyldes den reaktive mørtel, og det er derfor væsentligt at kende den reaktive mørtels andel af tilslagsbetonen da den direkte siger noget om indholdet af reaktive korn.

I tolv serier udgøres hele stenfraktionen af genbrugstilslag af type R-3. For disse serier udregnes følgende mørtelandele for den reaktive mørtel i den nye beton ved hjælp af formel (C.1):

Serie	d_{max} mm	Genbrugt fraktion	$A_{g,f}$	$A_{m,f}$	$A_{m,g}$
3	16	4-16	0.459	0.597	0.274
4,37	32	4-32	0.520	0.562	0.292
7	16	4-16	0.448	0.597	0.268
8	32	4-32	0.500	0.562	0.281
11	16	4-16	0.451	0.597	0.269
12,38	32	4-32	0.518	0.562	0.291
15	16	4-16	0.462	0.597	0.276
16	32	4-32	0.513	0.562	0.288
29	32	4-32	0.542	0.562	0.304
30	32	4-32	0.540	0.562	0.303

Tabel C.4 : Resultater for R-3.

I otte serier udgør genbrugstilslag af type R-3 kun delvist en del af tilslaget i en af fraktionerne sand og sten. Ved hjælp af (C.8) fås, at det reaktive genbrugstilslag, opdelt efter fraktioner, har følgende andel i de respektive serier:

Serie	Fraktion	n	ρ_0 [kg/m^3]	ρ_g [kg/m^3]	A_f	$A_{g,f}$
18	sten	0.2	2750	2437	0.499	0.110
20	sten	0.2	2750	2437	0.497	0.109
31	sand sten	0.5 1.0	2630 2750	2334 2437	0.321 0.402	0.170 0.402
32	sand sten	0.5 1.0	2630 2750	2334 2437	0.353 0.390	0.187 0.390
33,34	sand	0.5	2630	2334	0.539	0.286
35,36	sand	0.5	2630	2334	0.585	0.310

Tabel C.5 : Bestemmelse af $A_{g,f}$ for serier indeholdende hel eller delvis genbrugstilslag i en eller flere fraktioner.

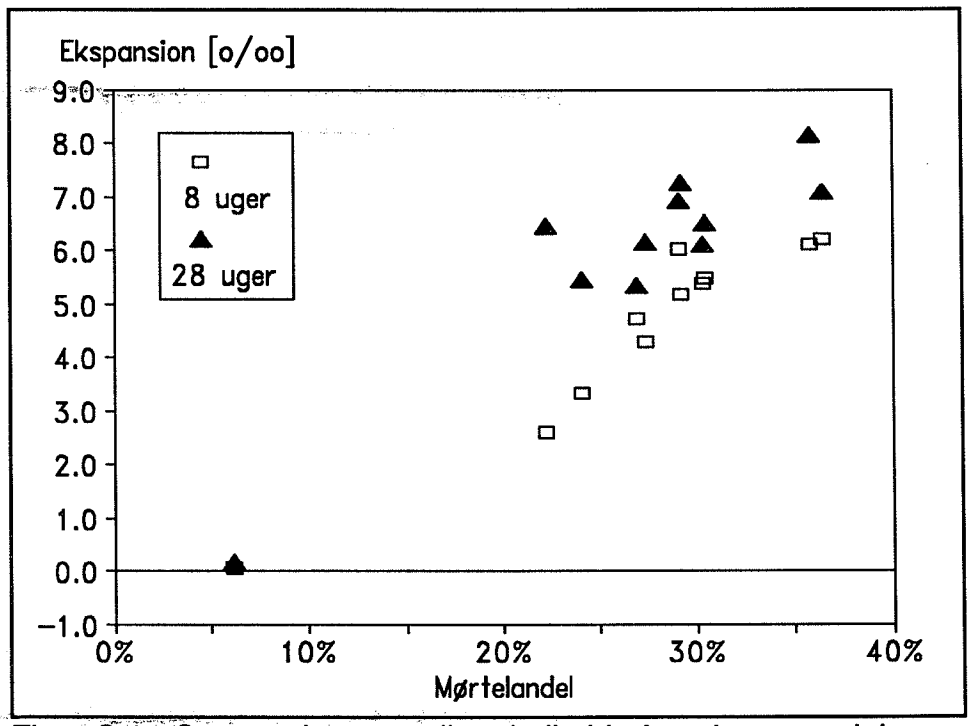
Indsættes nu de fundne værdier for $A_{g,f}$ i (C.9) fås følgende:

Serie	d_{max} [mm]	Genbrugt fraktion	$A_{g,f}$	$A_{g,f}$	$A_{m,f} \cdot A_{g,f}$	$A_{m,g}$
18	32	sten	0.110	0.562	0.062	0.062
20	32	sten	0.109	0.562	0.061	0.061
31	32	sand sten	0.170 0.402	0.777 0.562	0.132 0.226	} 0.358
32	32	sand sten	0.187 0.390	0.777 0.562	0.145 0.219	} 0.364
33,34	4	sand	0.286	0.777	0.222	0.222
35,36	4	sand	0.310	0.777	0.241	0.241

Tabel C.6 : Resultater for R-3.

Indhold af reaktiv mørtel vs. ekspansioner

Det forventes, at de reaktive korn er jævnt fordelt i mørtelen. Derfor er det nærliggende at forvente en sammenhæng mellem indholdet af reaktiv mørtel og de ekspansioner der måles. På figur C.1 er ekspansioner efter 8 og 28 uger optegnet som funktion af mørtelandelene for alle betoner med R-3 tilslag. Hvert punkt repræsenterer gennemsnittet for tre cylindre. Udregningen af mørtelandelene fremgår af tabel C.4..C.6. Serierne der indeholder flyveaske er ikke medtaget på figuren.



Figur C.1 Sammenhæng mellem indhold af genbrugt, reaktiv mørtel og cylinderekspansioner for serier støbt med R-3. Hvert punkt repræsenterer middelekspansioner for tre cylindre.

Det fremgår af figuren, at der ved 8 ugers terminen er en god sammenhæng mellem den genbrugte mørtels andel og de målte ekspansioner, således at højere mørtelindhold giver anledning til højere ekspansioner. Denne tendens udviskes noget ved 28 ugers terminen, hvor alle ekspansioner for cylindre med et indhold af genbrugt mørtel over 20 % efterhånden ligger på samme niveau.

Punkterne nederst til venstre i figur C.1 repræsenterer serierne med 20 % erstatning af det grove tilslag. I disse serier måles, som tidligere nævnt, kun meget beskedne ekspansioner. Specielt ekspansionerne efter 28 uger synes at ligge i underkanten af, hvad man ville forvente ved ekstrapolation ud fra de øvrige punkter. Dette tyder på, at der mellem mørtelindhold på 7 % og 20 %, ligger en tærskelværdi for hvornår der

udvikles det sammenhængende revnenet der giver anledning til store ekspansioner.

Det skal understreges at sammenhængen i figur C.1 er optegnet uden hensyn til en lang række sekundære variable, såsom v/c- forhold, luftindhold mm. En sammenhæng bedre end den fundne er således ikke at forvente.

Tillæg:

Udvikling 28 - 51 uger

Indhold:

1. Indledning

2. Resultater
   2.1 Ekspansioner
   2.2 Trykstyrker

3. Afsluttende bemærkninger

1. Indledning

De resultater der er afrapporteret i hovedrapporten bygger på ekspansioner målt efter 28 ugers lagring i saltvand. Efter 32 uger blev knap halvdelen af cylindrene taget ud af forsøget, idet ekspansion og vægt blev målt en sidste gang, hvorefter trykstyrken blev bestemt ved almindelig trykprøvning. De resterende serier blev lagret i yderligere nogle uger, således at de endte med at have været lagret i ialt 51 uger. Herefter blev også disse målt og vejet hvorefter trykstyrken blev bestemt. Undtagelsen fra dette er serierne 7, 8, 15 og 16, der alle indeholder flyveaske og er støbt med reaktiv tilslagsbeton af type R-3. De ialt 12 cylindre fra disse fire serier vil blive lagret i saltvand i yderligere et år, for nærmere at klarlægge flyveaskens betydning for ekspansionsudviklingen. Af praktiske årsager vil denne lagring dog foregå ved 20°C.

I nærværende tillæg redegøres der nærmere for ekspansionsudviklingen i perioden fra 28 til 51 ugers lagring. Præsentationen af resultaterne vil primært foregå ved hjælp af kurver og vil såvidt muligt svare til præsentationen i afsnit 5 i hovedrapporten.

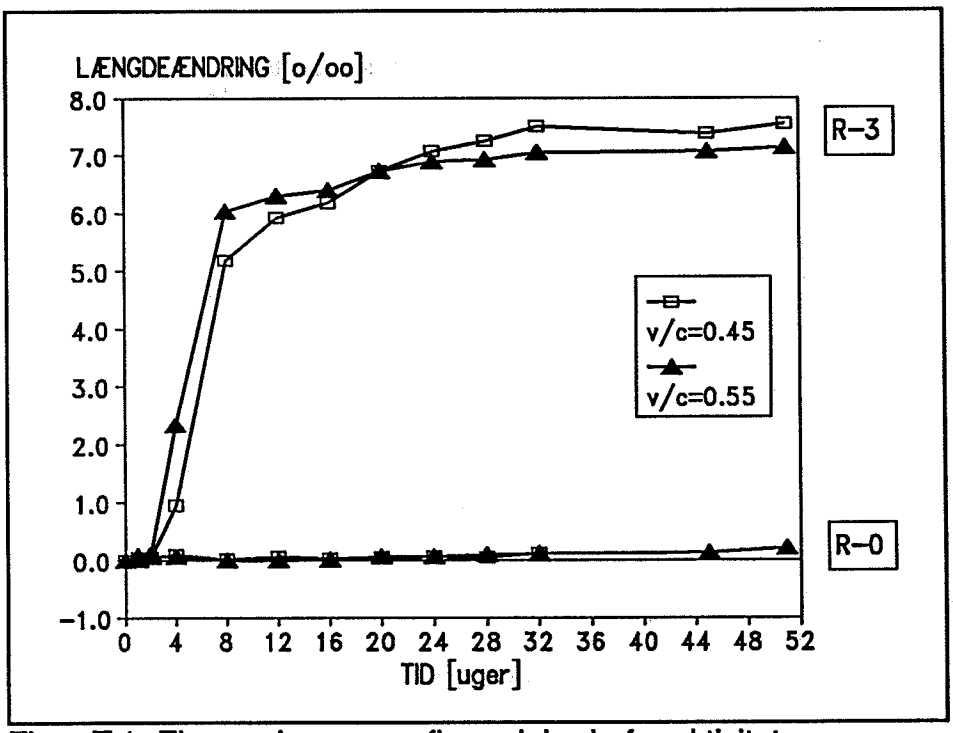
Endvidere behandles de fundne trykstyrker nærmere, idet styrkerne sammenholdes med de ekspansioner, som cylindrene har opnået ved prøvningstidspunktet.

2. Resultater

2.1 Ekspansioner

I det følgende vil ekspansionsudviklingerne blive illustreret på samme form og i samme rækkefølge som i hovedrapporten.

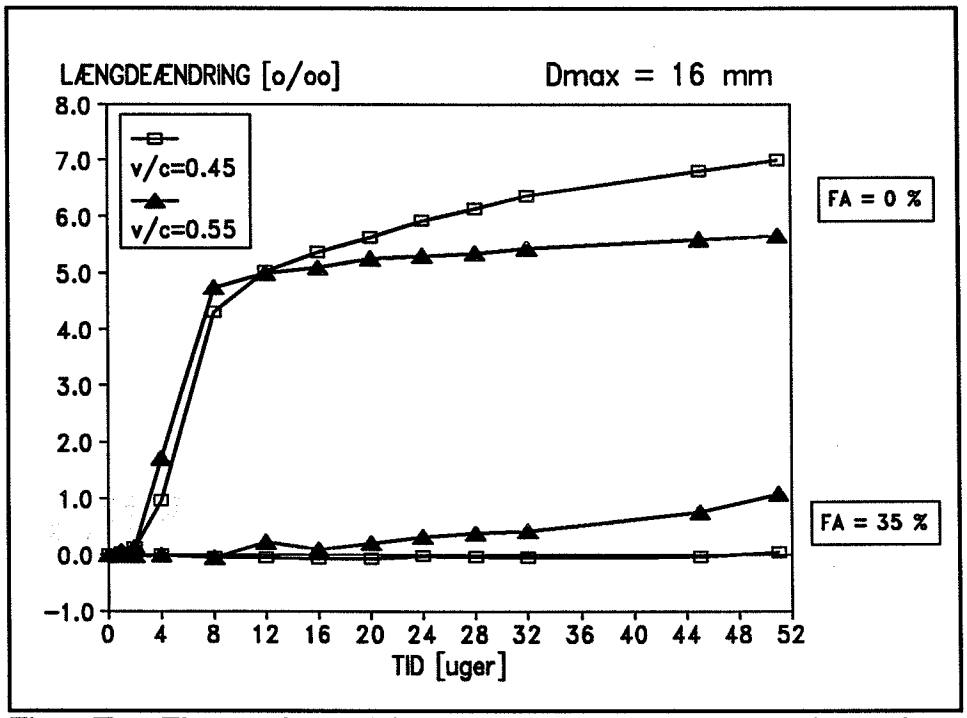
Reaktivitet: På figur T.1 vises ekspansionsudviklinger for forsøgsserierne 4, 10 og 12 (serie 2 er udgået efter 32 ugers lagring). Denne figur svarer til fig. 5.1 i hovedrapporten.



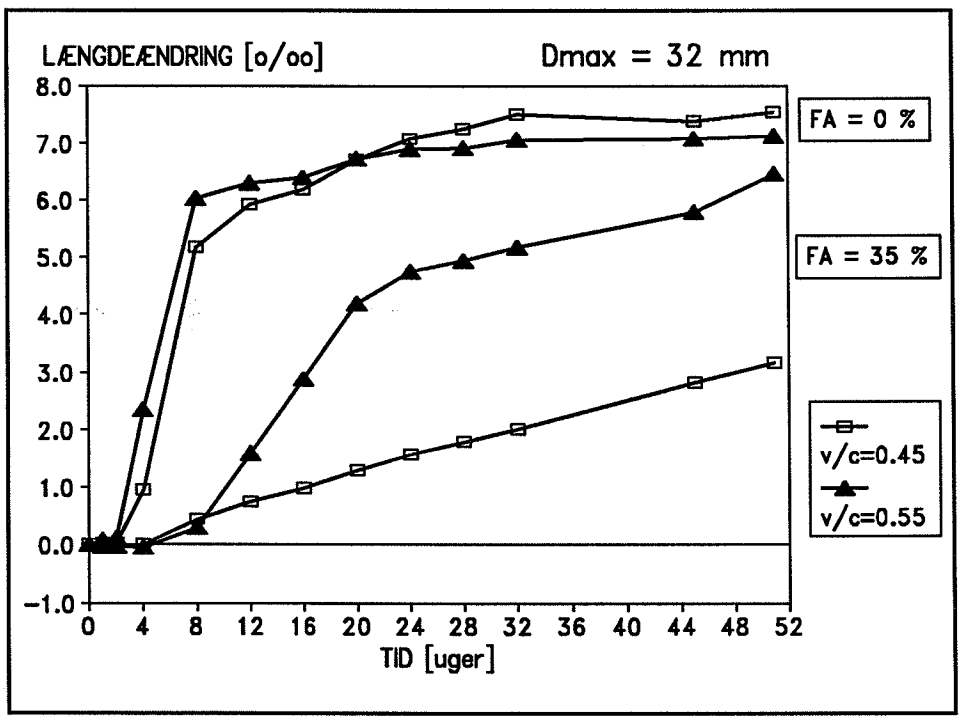
Figur T.1: Ekspansionernes afhængighed af reaktiviteten.

Det fremgår af figuren, at de tendenser der er beskrevet i hovedrapporten videreføres, d.v.s. den ikke-reaktive tilslagsbeton R-0 giver stadig ikke anledning til ekspansioner selv efter ca. 1 års saltvandslagring. Ekspansionsudviklingen for den reaktive tilslagsbeton R-3 stagnerer, som beskrevet tidligere, ved 5 - 6 ‰ efter 8 ugers lagringstid, men er efter 1 år steget til godt 7 ‰. Dette niveau nås dog allerede efter 32 uger.

Flyveasketilsætning: På figur T.2 og T.3 ses ekspansionsudviklinger for serierne 3, 7, 11 og 15 henholdsvis 4, 8, 12 og 16, svarende til figurerne 5.2 og 5.3 i hovedrapporten.



Figur T.2: Ekspansionsudviklingen med og uden flyveaske ved d_{max} = 16 mm.



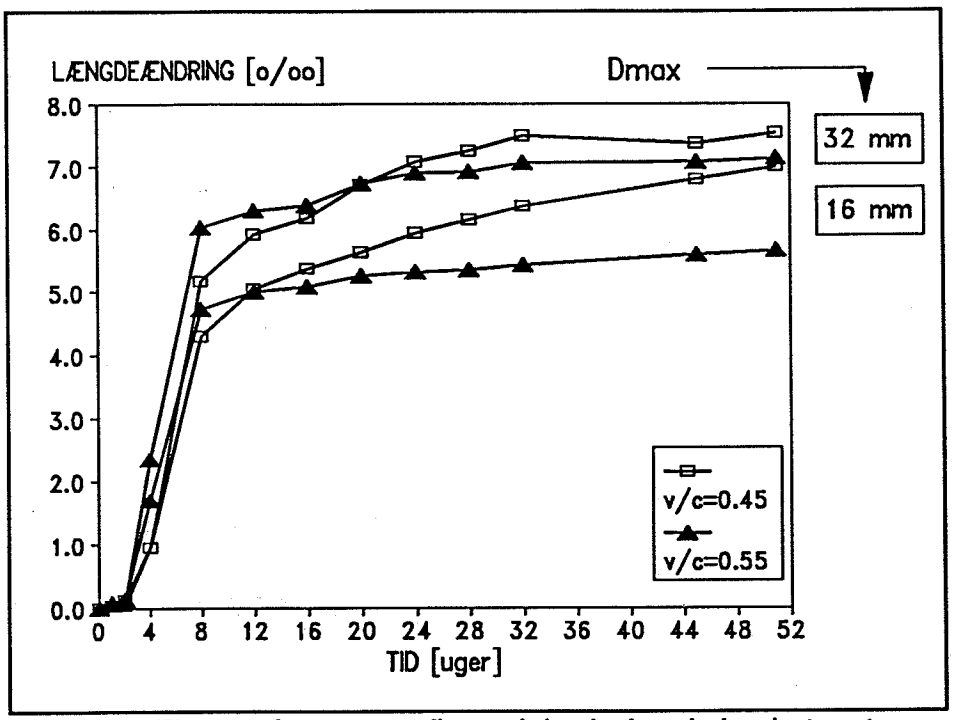
Figur T.3: Ekspansionsudviklinger med og uden flyveaske ved d_{max} = 32 mm.

Som allerede påpeget i rapportens konklusioner er flyveaskens effektivitet stærkt afhængig af betonens vand-cementforhold og maksimale stenstørrelse.

Med v/c = 0.55 og d_{max} = 32 mm ses ekspansionen for cylindre med flyveaske at nærme sig ekspansionen for cylindre uden flyveaske. Tendensen synes således at være, at slutekspansionen ender med at

blive den samme i dette tilfælde, hvilket vil sige uafhængigt af flyveaske-tilsætningen. Flyveasketilsætningen er således kun i stand til at forsinke udviklingen.
Med v/c = 0.45 og d_{max} = 16 mm er ekspansionen efter 1 år derimod stadig tilnærmelsesvis nul, og tilsætningen af flyveaske er i dette tilfælde et særdeles effektivt middel til at forhindre ekspansioner.
Det bør bemærkes, at tilsætningen af flyveaske betyder, at ekspansionerne efter 51 uger er størst i serierne med v/c = 0.55, medens ekspansionerne i tilfældene uden flyveaske er størst i serierne med v/c = 0.45.

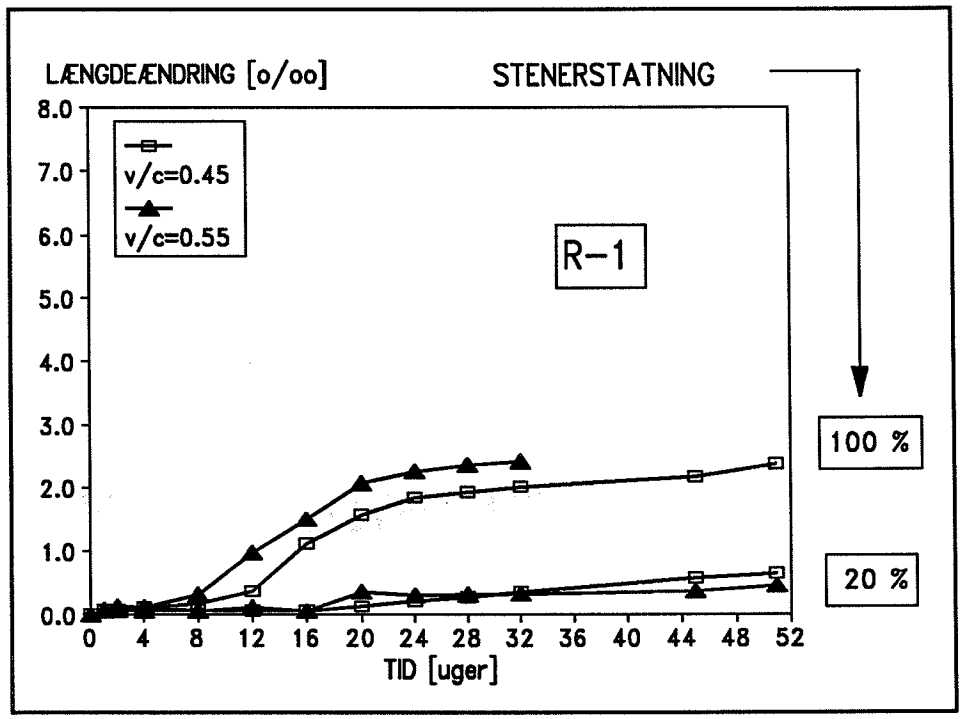
Maksimal stenstørrelse: Ekspansionsudviklinger for serierne 3, 4, 11 og 12 er vist på figur T.4. Denne er en videreførsel af figur 5.4 i hovedrapporten.



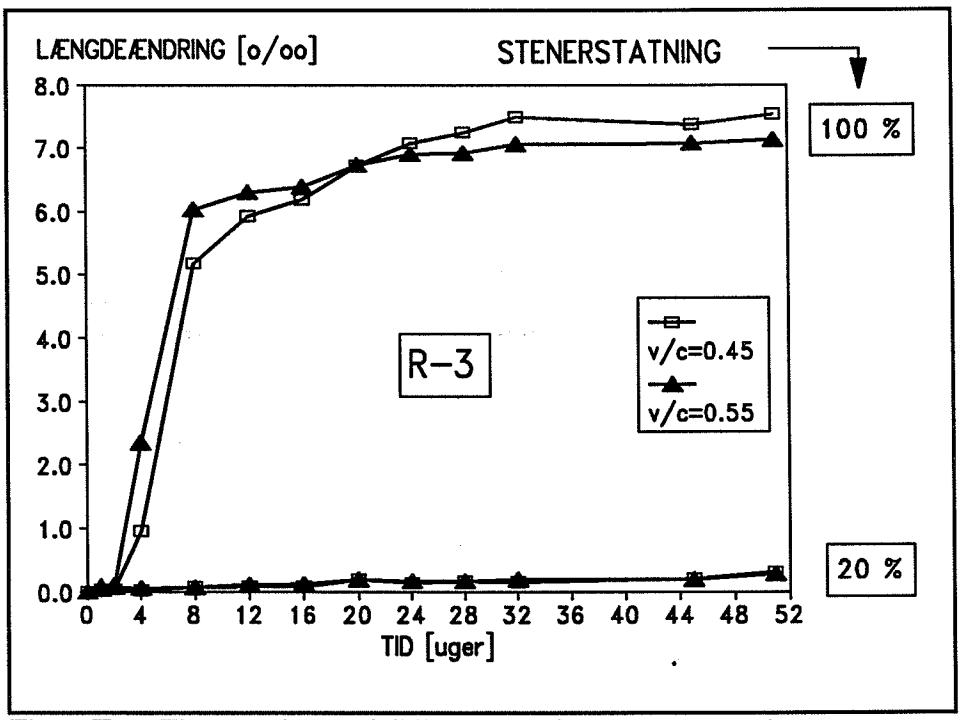
Figur T.4: Ekspansionernes afhængighed af maksimal stenstørrelse for genbrugstilslaget.

Det fremgår, at for v/c = 0.55 fås der øjensynlig større ekspansioner med d_{max} = 32 mm end med 16 mm, mens denne effekt ikke er så markant med v/c = 0.45, idet udviklingen peger på at slutekspansionen i dette tilfælde er uafhængig af den maksimale stenstørrelse.
Som det fremgik af det foregående afsnit, har maksimal stenstørrelse en betydelig indflydelse på flyveaskens evne til at nedsætte ekspansionerne.

Delvis stenerstatning: På figur T.5 og T.6 ses ekspansionsudviklinger for serierne 17, 19 og 22 henholdsvis 4, 12, 18 og 20, svarende til figur 5.5 og 5.6 i hovedrapporten.



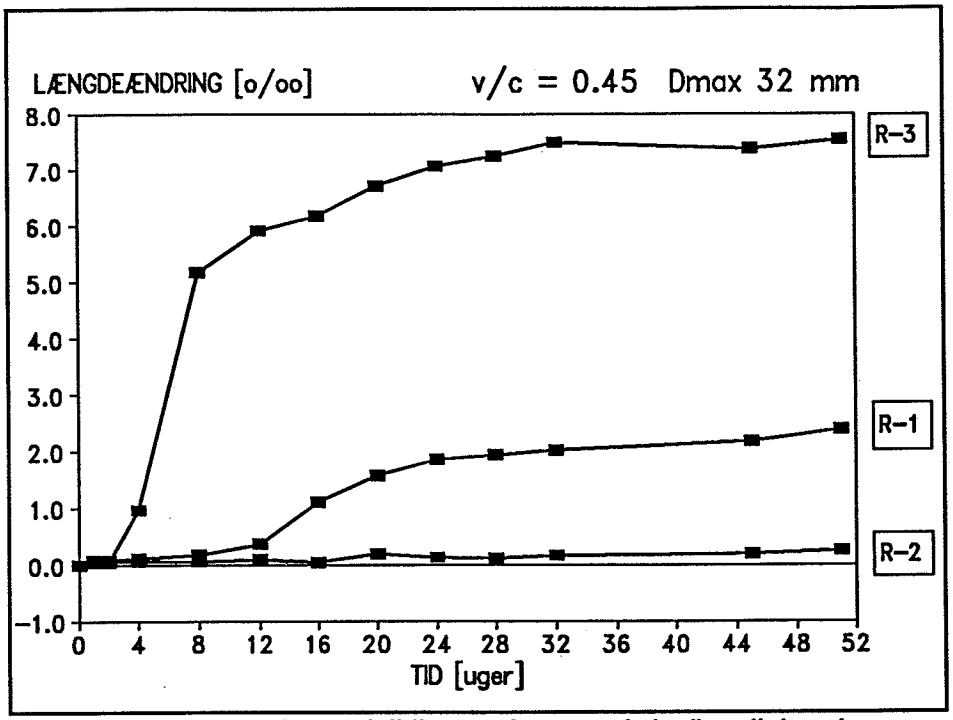
Figur T.5: Ekspansionsudviklingen ved 20% og 100% stenerstatning for R-1 tilslag.



Figur T.6: Ekspansionsudviklingen ved 20% og 100% stenerstatning for R-3 tilslag.

Med 20 % genbrugstilslag er ekspansionerne efter 1 års lagring stadig ganske beskedne. I øvrigt bemærkes det, at den positive fortyndingeffekt kun eksisterer med R-3 tilslag, idet ekspansionerne ved 20 % genbrugstilslag med R-3 tilslag nu er ca. 1/25 af de værdier der fås ved fuld stenerstatning, mens dette forhold med R-1 tilslag er omkring 1/4.

Reaktivitet af genbrugsmateriale: På figur T.7 ses ekspansionsudviklinger for serierne 4, 22 og 24, svarende til figur 5.8 i hovedrapporten. Serierne med tilslagsbeton af type R-0, der udviste meget beskedne ekspansioner, blev taget ud af forsøget efter 32 uger og er derfor ikke medtaget på figuren.



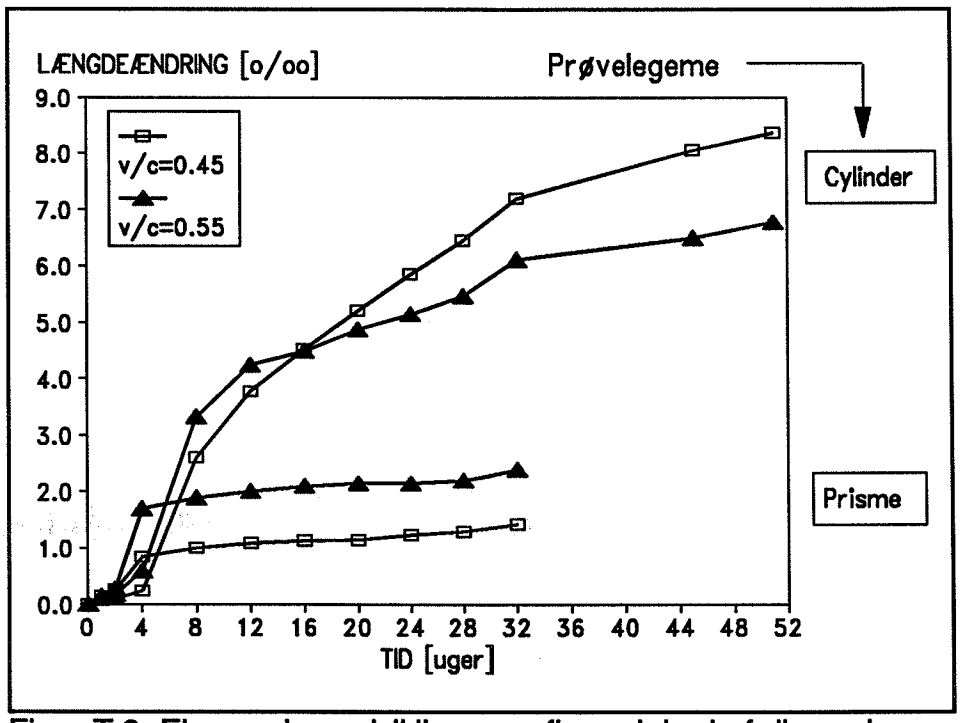
Figur T.7: Ekspansionsudviklingen for tre af de fire tilslagsbetoner.

Det ses, at der i perioden 28 - 51 uger stort set ikke er sket nogen ændring i de ekspansioner der er målt for betoner med R-1, R-2 og R-3 tilslag.

Prøvedimension: Forsøgsserierne 33, 34, 35 og 36 er afbildet på fig. T.8. I hovedrapporten svarer denne til figur 5.11. Prismemålingerne er afsluttet efter 32 uger, da der på dette tidspunkt i lang tid ikke var sket nogen væsentlig udvikling.

Det fremgår af figuren, at mørtelcylindrenes ekspansion, der efter 28 uger stadig var inde i en kraftig udvikling, efterhånden er stagneret. Tilsyneladende tager det længere tid for mørtelcylindre at nå slutekspansionen end det gør for betoncylindre. Slutekspansionsniveauet for mørtelcylindre er øjensynlig 5 - 6 gange højere end for mørtelprismer, d.v.s. en klar dimensionsafhængighed kan konstateres.

Sideforsøgene med luftindblandet beton, beton med tilsætning af genbrugssand, samt betoncylindre med initialrevner blev alle afsluttet efter 32 ugers lagring, og vil således ikke blive illustreret her.



Figur T.8: Ekspansionsudviklingens afhængighed af dimension.

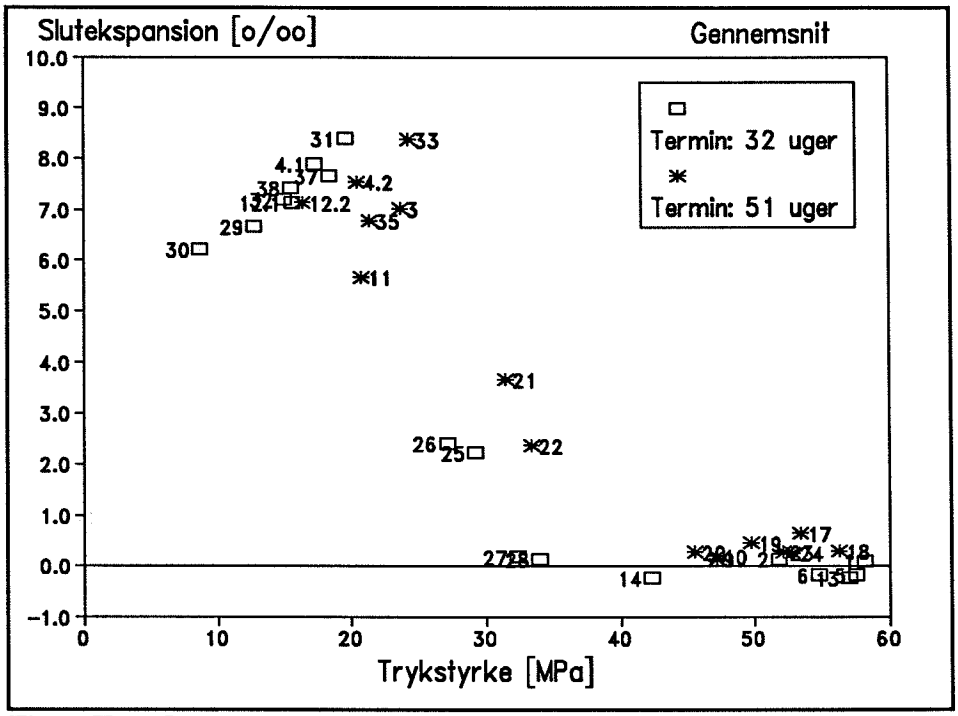
2.2 Trykstyrker

Ved afslutningen af saltvandslagringen af de enkelte forsøgsserier er trykstyrken af cylindrene målt. Dette er sket ved to forskellige tidspunkter, idet nogle af serierne, som tidligere nævnt, blev udtaget efter 32 uger, mens andre blev liggende frem til 51 uger. Endelig er forsøgsserierne 7, 8, 15 og 16 blevet gemt for at undersøge flyveaskens langtidsvirkning. I tabel T.1 er de gennemsnitlige trykstyrker for de tre (eller seks) cylindre i hver serie angivet. Det skal bemærkes, at cylindrene i serierne 4 og 12 er udtaget af to gange med tre cylindre hver gang. Dette medfører, at trykstyrken i disse serier er bestemt efter såvel 32 som 51 uger.

Serienr.	Trykstyrke [MPa]	
	32 uger	51 uger
1	58.2	
2	51.8	
3		23.7
4	17.3	20.5
5	57.6	
6	54.8	
7		i.b.
8		i.b.
9		47.1
10		47.1
11		20.8
12	15.7	16.4
13	57.0	
14	42.3	
15		i.b.
16		i.b.
17		53.4
18		56.3
19		49.8
20		45.6
21		31.5
22		33.4
23		52.1
24		52.8
25	29.3	
26	27.1	
27	32.3	
28	33.9	
29	12.8	
30	8.8	
31	19.6	
32	15.0	
33		24.3
35		21.4
37	18.4	
38	15.5	

Tabel T.1: Gennemsnitlige trykstyrker for betoncylindrene i de enkelte serier.

i.b.: Trykstyrken er ikke bestemt for disse serier.



Figur T.9: Sammenhæng mellem trykstyrke og slutekspansion.

På figur T.9 vises sammenhængen mellem cylindrenes ekspansion ved afslutningen af lagringen og de beregnede gennemsnitsstyrker.

Ved sammenligning med figur 5.17 i hovedrapporten ses det, at styrken af de enkelte forsøgsserier grupperer sig på lignende vis. Det viser sig ikke overraskende, at de betoner, der p.g.a. alkalikiselreaktioner er kraftigt revnede, og dermed ekspanderede, har væsentlig mindre styrke end urevnede betoner uden alkalireaktioner. Styrken af de kraftigt revnede betoner er kun 1/2 - 1/3 af de urevnede betoner. Specielt bemærkes det, at de to betoner med luftindblanding (serie 29 og 30) har meget lave styrker. Serierne 21, 22, 25 og 26 (betoner med R-1 tilslag) udgør lige som i figur 5.17 en mellemgruppe, hvor der er sket en vis ekspansion og dermed et vist styrketab. Variationen af styrkerne af de urevnede betoner bunder i forskelle i vand-cementforhold, flyveasketilsætning, maksimal stenstørrelse og tilslagskvalitet.

3. Afsluttende bemærkninger

De ekspansionsudviklinger der er vist i dette tillæg giver ikke anledning til at ændre på de konklusioner, der er draget i hovedrapporten. I hovedparten af tilfældene er der ikke sket nogen væsentlig udvikling i ekspansionerne for lagringstiden 28 - 51 uger. Dette indebærer, at man ved fremtidige undersøgelser af en given betons anvendelighed som genbrugstilslag med den aktuelle prøvemetode sandsynligvis kan nøjes med en forsøgsperiode på omkring et halvt år. Dog skal der ved undersøgelse af flyveaskes gunstige virkning påregnes en noget længere

forsøgsperiode, idet flyveasken øjensynlig har en meget forsinkende virkning på ekspansionerne.

Styrkeprøvningen viser som forventet, at en kraftig udvikling af alkalireaktioner, og deraf følgende gennemrevning, medfører væsentligt nedsatte trykstyrker.

Bilagsoversigt

1. Petrografiske analyser for de to anvendte sand.
2. Proportionering og støbning af tilslagsbetoner.
3. Data vedr. tilslagsbetonerne R-2 og MRV.
4. Sigteanalyser for de enkelte fraktioner af tilslagsbetonerne.
5. Analyse af flyveaske.
6. Proportionering af genbrugsbetoner.
7. Støbedata for genbrugsbetoner.
8. Ekspansionsresultater.
9. Vejeresultater.
10. Bestemmelse af alkali-indhold.
11. Proportionering og støbning af mørtelprismer.
12. Restekspansion.
13. Kemisk svind.
14. Mørtelprismeresultater.

Bilag forefindes på Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH.