

SBI - p. 72.

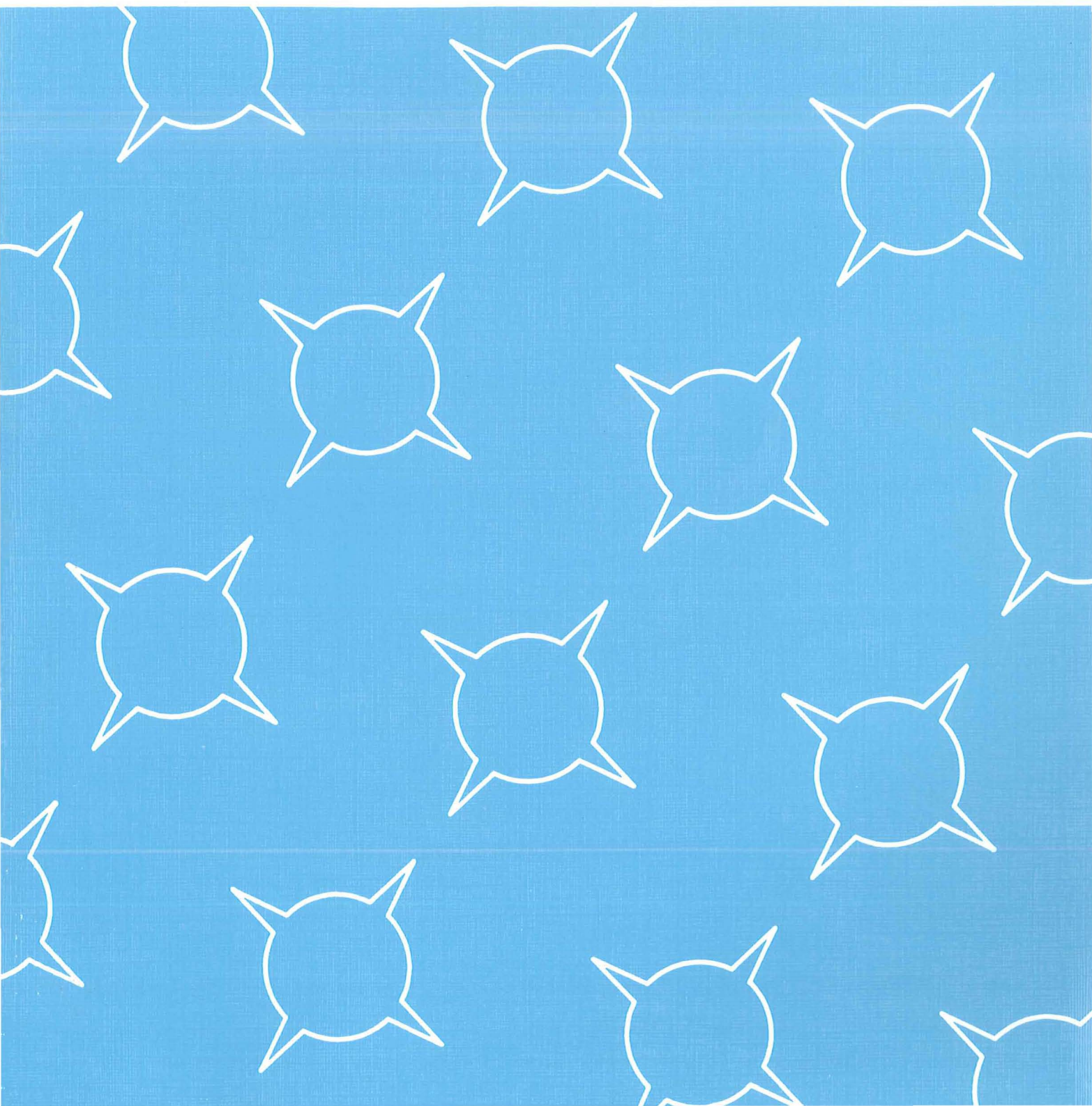
Byggematerialers frostbestandighed



Modellering af kritiske vandmætningsgrader

Ph.d.-afhandling

SBI-RAPPORT 268 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1996



Byggematerialers frostbestandighed

Modellering af kritiske vandmætningsgrader

ERNST JAN DE PLACE HANSEN

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

ex-1
- 6 JAN. 1997

01401 P



Ph.d.-afhandling

SBI-RAPPORT 268 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1996

SBI-rapporter er beretninger om afsluttede forskningsprojekter.

SBI-publikationer udgives i følgende serier: Anvisninger, Rapporter, Meddelelser, Byplanlægning og Beton. Publikationerne fås gennem boghandelen eller ved at tegne et SBI-abonnement. Institutets årsberetning, publikationskatalog og publiceringsdiskette er gratis og kan rekvireres fra SBI.

SBI-abonnement er en rabatorrdning med mange fordele for dem, der vil sikre sig løbende orientering om væsentlige udgivelser inden for byggeforskningsområdet. Ring til SBI og hør nærmere.

ISBN 87-563-0947-3.

ISSN 0573-9985.

Pris: Kr. 300,00 inkl. 25 pct. moms.

Oplag: 300.

Fotos: Jan Carl Westphall, SBI; C. Bramsen, BKM, DTU.

Figurer: Forfatteren, hvor kilder ikke er nævnt.

Omslagsillustration: Walter Rayher.

Tryk: Tekst og Tryk, Vedbæk.

Statens Byggeforskningsinstitut,
Postboks 119, 2970 Hørsholm.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:

SBI-rapport 268: Byggematerialers frostbestandighed.

Modellering af kritiske vandmætningsgrader. 1996.

Indhold

Forord	5
Forfatterens forord	7
Sammenfatning	9
1. Indledning	11
1.1 Baggrund	11
1.2 Rapportens formål	13
2. Litteraturgennemgang	15
2.1 Hvorfor er det svært at bestemme frostbestandighed ?	15
2.1.1 Luftindblanding og frostbestandighed	15
2.1.2 Direkte frostprøvning - hvad er problemerne ?	16
2.1.3 Indirekte frostprøvning og frostmodstandstal	18
2.2 Frysemekanismer	19
2.2.1 Hydraulisk tryk	21
2.2.2 Mikroskopisk islinsevækst	21
2.2.3 Andre mekanismer	23
2.2.4 Frysemekanismer - opsamling	25
2.2.5 Dilatation	27
2.3 Kritisk vandmætningsgrad	28
2.3.1 Frostbestandighed og udmattelsespåvirkning	28
2.3.2 Definition af vandmætningsgrad	29
2.3.3 Eksistensen af kritiske vandmætningsgrader	30
2.3.4 Fastlæggelse af kritisk vandmætningsgrad	32
2.3.5 Kritisk vandmætningsgrad og frostbestandighed	34
2.3.6 Beregning af af kritisk vandmætningsgrad	35
2.4 Kritisk vandmætningsgrad - videre perspektiver	35
2.4.1 Diskussion af begrebet kritisk vandmætningsgrad	35
2.4.2 Videre perspektiver	38
3. Materiale mekanisk model for frostnedbrydning	39
3.1 Kvalitativ beskrivelse af modellen	40
3.1.1 Udgangspunkt for revneudvikling	40
3.1.2 Beskrivelse af revneudvikling	42
3.2 Forudsætninger for modellen	43
3.2.1 Revnet materiales styrke	44
3.2.2 Modellering af porer og fasegeometri	47
3.2.3 E-modul for porefase delvist fyldt med is	51
3.2.4 Tøjning af porøst materiale under frysning	54
3.2.5 Spændingsopbygning under frysning	56
3.2.6 Porestørrelse og frysepunktstemperatur	58
3.3 Parameteroversigt	60
3.4 Anvendelse af beregningsmodellen	62
3.4.1 Beskrivelse af beregningsalgoritmen	63
3.4.2 Præsentation af resultater	64
3.5 Diskussion af beregningsmodellens forudsætninger	66
3.5.1 Definition af vandmætningsgrad	67
3.5.2 E-modul og definition af vandmætningsgrad	68
3.5.3 Vandmætningsgrad og parameteren B	69

3.5.4	Sammenligning af beregningsmodellen med frysemekanismer og andre modeller	71
3.5.5	Diskussion af beregningsalgoritme	73
3.5.6	Diskussion - sammenfatning	74
4.	Forsøgsplan	75
4.1	Indledning	75
4.2	Bestemmelse af parametre til den opstillede model	77
4.2.1	Porestruktur og volumentøjning	77
4.2.2	Porøsitet	80
4.2.3	Porestørrelsesfordeling	80
4.2.4	Poreform og kritisk porøsitet	82
4.2.5	Trækstyrke, E-modul og trykstyrke	83
4.2.6	Øvrige parametre	83
4.3	Eksposering i laboratoriet og naturen	84
4.3.1	Karakterisering af fugttransportegenskaber	84
4.3.2	Frostprøvning	85
4.3.3	Eksposering i naturen	85
4.4	Anvendte materialer	89
5.	Beskrivelse af forsøgsmetoder	91
5.1	Dilatationsforsøg	91
5.2	Resonansfrekvens	95
5.3	Porestruktur	98
5.4	Mekaniske egenskaber	101
5.5	Kapillarsugning	103
5.6	Frostprøvning	104
6.	Forsøgsresultater og diskussion	106
6.1	Dilatationsforsøg	106
6.2	Resonansfrekvens	113
6.3	Porestruktur	117
6.4	Mekaniske egenskaber	129
6.5	Fugttransport	134
6.6	Frostprøvning	137
6.7	Naturlig eksposering	143
6.8	Analyse og diskussion af beregningsmodel	144
6.8.1	Indledning	144
6.8.2	Kritisk vandmætningsgrad	148
6.8.3	Afhængighed af parameteren B	152
6.8.4	Afhængighed af porestruktur i øvrigt	154
6.8.5	Beregnete og eksperimentelt bestemte tøjninger	157
6.8.6	Frysepunktstemperatur og porefyldningsgrad	158
6.8.7	Analyse og diskussion af model - sammenfatning	161
7.	Konklusion	166
8.	Efterskrift	175
	Summary	177
	Symbolliste	179
	Litteratur	190

Forord

Denne SBI-rapport er resultatet af et ph.d. studie som blev påbegyndt i marts 1991 og afsluttet i juni 1994. Afhandlingen blev forsvaret ved en offentlig forelæsning med påfølgende bedømmelse den 31. oktober 1995. Forfatteren civilingeniør Ernst Jan de Place Hansen ph.d. arbejde blev godkendt af Danmarks Tekniske Universitet den 7. februar 1996.

Det gennemførte ph.d. studium samt den her foreliggende rapport, er et led i det forskeruddannelsesprogram, som i 1987 blev aftalt mellem Forskerakademiet, Boligministeriet, og Statens Byggeforskningsinstitut.

Vejledere har været docent, tekn. dr. Anders Nielsen og lektor, ph.d. Lauge Fuglsang Nielsen begge Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer, DTU samt seniorforsker, civilingeniør Erik Brandt, SBI, med førstnævnte som hovedvejleder.

Som censorer og medlemmer af bedømmelsesudvalget deltog de ovenfor nævnte samt professor, tekn. dr. Göran Fagerlund, Lunds Tekniske Universitet.

Det skal også nævnes at civilingeniør, ph.d. Erik Stoklund Larsen, Vejdirektoratet deltog i adskillige vejledermøder og bidrog med værdifuld specialviden ved de faglige diskussioner i forbindelse med ph.d. studiet.

Gennem hele projektet har der været et nært samarbejde med Danmarks Tekniske Universitet, DTU og i denne sammenhæng takker SBI de to vejledere fra DTU for en meget værdifuld og påskønnet indsats. Endelig retter vi en tak til civilingeniør, ph.d. Erik Stoklund Larsen for sin aldrig svigtende interesse for ph.d. projektet.

Statens Byggeforskningsinstitut
Afdelingen for Materialer og Konstruktioner
Georg Christensen, forskningschef

Forfatterens forord

Der foregår en fortsat udvikling af nye bygningsmaterialer og materiale-sammensætninger samt nye konstruktionsudformninger. Denne udvikling samt den hyppige brug af tørsalte i vintersæsonen gør det aktuelt at øge forståelsen af, hvorfor porøse byggematerialer fryser i stykker. Således har det i flere tilfælde vist sig, at praktisk erfaring med eksisterende materialer ikke uden videre kan overføres til nye materialer. Samtidig vil en praktisk anvendelig beregningsmodel for frostnedbrydning være en hjælp i forbindelse med materialedesign.

På baggrund af en gennemgang af eksisterende viden om frostnedbrydning præsenteres i den foreliggende rapport derfor en nyudviklet beregningsmodel til bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader ved frysning af porøse materialer.

En række laboratorieforsøg udføres på beton (ikke-luftindblandet) og tegl for at bestemme de nødvendige materialeparametre. På den baggrund diskuteres modellens muligheder og begrænsninger i forhold til traditionel frostprøvning og eksisterende teorier for frostnedbrydning.

En række supplerende undersøgelser, hvor prøveemner udsættes for forskellige former for eksponering udføres for at underbygge diskussionen. Flere af disse undersøgelser rapporteres særskilt i *Byggematerialers frostbestandighed - Supplerende undersøgelser*.

Det foreliggende arbejde er et led i opfyldelse af kravene for erhvervelse af ph.d.graden ved Danmarks Tekniske Universitet (DTU). Arbejdet består af tre dele: *Byggematerialers frostbestandighed - Modellering af kritiske vandmætningsgrader* (SBI-rapport 268), *Byggematerialers frostbestandighed - Bilag* samt ovennævnte *Byggematerialers frostbestandighed - Supplerende undersøgelser*.

Arbejdet er udført på Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) i samarbejde med Laboratoriet for Bygningsmaterialer (LBM), DTU og er finansieret af SBI og Forskerakademiet.

Tak til mine vejledere docent Anders Nielsen og lektor Lauge Fuglsang Nielsen, LBM samt seniorforsker Erik Brandt og forskningschef Georg Christensen, SBI.

Tak til ph.d. Erik Stoklund Larsen for gode diskussioner i starten af projektet, og til SBI's bibliotek for fremskaffelse af litteratur. Tak til AEC Rådgivende Ingeniører A/S og Prøvelyst Teglværk for levering af materialer, og til personale på SBI's og LBM's laboratorium for hjælp ved forsøg.

Hørsholm, juni 1995
Ernst Jan de Place Hansen

Nødvendige ændringer og rettelser er foretaget i forbindelse med udgivelsen som SBI-rapport.

Samtidig er tilføjet et efterskrift (afsnit 8).

En beskrivelse af hovedlinierne i ph.d.arbejdet er udgivet som [de Place,96e], mens [de Place,96d] desuden beskriver nogle af de tanker der er gjort for at fortsætte arbejdet med den præsenterede beregningsmodel.

Hørsholm, december 1996
Ernst Jan de Place Hansen

Sammenfatning

Den foreliggende rapport behandler emnet porøse byggematerialers frostbestandighed. Det overordnede mål er at beskrive og afprøve en ny beregningsmodel til bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader, herunder diskutere dens forudsætninger og virkemåde.

I en litteraturgennemgang konstateres, at der ikke findes en entydig forklaring på, hvad der sker rent fysisk, når (delvis) vandmættede porøse materialer udsættes for frysning. Desuden er det ikke muligt uden videre at anvende de fysiske forklaringer beregningsmæssigt. Som et resultat af dette eksisterer der i dag et stort antal frostprøvningsmetoder.

Begrebet kritisk vandmætningsgrad defineres, og dets fordele og ulemper mht. karakterisering af frostbestandighed sammenlignet med traditionel frostprøvning diskuteres.

Det påpeges, at en eksperimentel bestemmelse af kritisk vandmætningsgrad er arbejdskrævende, og at der er perspektiver i at opstille en beregningsmodel, der tager udgangspunkt i eksistensen af kritiske vandmætningsgrader, samt at porøse materialer indeholder revner.

Frostnedbrydning modelleres som værende forårsaget af forskelle i egentøjninger mellem porefase og faststoffase i forbindelse med frysning, hvilket fører til spændingskoncentrationer og revneudvidelse.

Metoder til en tilstrækkelig præcis kvantitativ beskrivelse af porestrukturen mangler. Porestrukturen karakteriseres i stedet ud fra forventede sammenhænge mellem porøsitet, poreform og E-modul, samt ved at udtrykke en eksperimentelt bestemt sammenhæng mellem volumenudvidelse og vandmætningsgrad på matematisk form.

Et forsøgsprogram opstilles med det formål at fastlægge værdier for de parametre, der indgår i den opstillede model. Modellen analyseres på basis af disse værdier. Forsøg udføres på betoner uden luftindblanding med forskellige vand/cementforhold og tegl med forskellig porøsitet opnået ved at tilsætte savsmuld i varierende mængde.

Som kontrol på beregningerne foretages eksperimentel bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader ved dilatationsforsøg samt ved bestemmelse af resonansfrekvens før og efter frysning. Der er generelt god overensstemmelse mellem kritisk vandmætningsgrad bestemt ved de to metoder.

Som forventet afhænger porøsitet, porestørrelsesfordeling og mekaniske egenskaber af mængden af savsmuld (tegl) henholdsvis vand/cementforholdet (beton).

Resultatet af frostprøvning af beton efter den svenske standard SS 13 72 44 stemmer overens med frostbestandighed udtrykt som differensen mellem den eksperimentelt bestemte kritiske vandmætningsgrad og vandmætningsgraden bestemt ved frivillig vandopsugning. Resultaterne viser en tydelig afhængighed af vand/cementforholdet.

Til understøtning af beregninger med modellen udføres en række supplerende betonforsøg, dels for at bestemme fugttransportkoefficienter, dels for at indsamle data for fugtforhold ved forskellige former for eksponering med det formål at kunne skønne praktisk opnåelige vand-

mætningsgrader. Det har kun i begrænset omfang været muligt at foretage den ønskede kobling mellem laboratorieundersøgelser og eksponeringsforsøg.

Efter to års naturlig eksponering er der ikke nogen synlig nedbrydning og ingen ændring af ultralydhastigheden. Der er generelt overensstemmelse mellem fugtforhold ved overfladen af eksponerede emner, udtrykt ved vådtiden, samt vejrforhold, udtrykt ved den relative fugtighed.

Diffusionsforsøg viser, at evnen til at transportere fugt på såvel damp- som væskeform er stærkt afhængig af betons vand/cementforhold.

Gammastråling kan benyttes til eksperimentel bestemmelse af fugtindhold i beton, men kræver stor målenøjagtighed.

I øvrigt henvises til særskilt rapportering i "*Byggematerialers frostbestandighed - supplerende undersøgelser*", [de Place,96c].

Dilatationsforsøg viser, at det er muligt at beskrive porestrukturens betydning for sammenhængen mellem volumenudvidelse og vandmætningsgrad på en simpel matematisk form vha. parameteren $B \cdot B$, der er modellens centrale parameter, må dog bestemmes med en vis usikkerhed pga. spredningen på forsøgsresultaterne.

Generelt er beregnede kritiske vandmætningsgrader lavere end eksperimentelt bestemte. For beton er det nødvendigt at tage hensyn til, at en stor del af porevolumenet optages af ikke-frysbar vand. Dette underbygger Fagerlunds definition på vandmætningsgraden.

De forskellige parametre opfylder deres funktion i modellen. Der tages således korrekt hensyn til pore størrelses betydning for frysepunkts-sænkningen, samt i hvor høj grad materialet er domineret af revner.

Modellen forudsætter i sin nuværende form isotrope, homogene materialer uden luftindblanding eller grove revner og uden tilstedeværelse af tørsalte, da det forenkler beregningerne.

Mulighederne for at anvende modellen på luftindblandede materialer antydes. Der må gøres op med forudsætningen om, at poresystemet kan opfattes som et sammenhængende system, uanset mængden af porer. Konkrete data for luftindblandede materialer er nødvendige for at underbygge dette.

Brug af modellen i forbindelse med kombineret frost-tørsalt påvirkning er ikke undersøgt nærmere, men vil givetvis kræve en ændring af den måde spændingsudviklingen beregnes på, ligesom der skal tages hensyn til en ekstra frysepunktssænkning.

Modellen er behæftet med en vis usikkerhed på grund af, at spændingsberegningerne og modelleringen af frostnedbrydning (egentøjningsforskelle) giver en forenklet beskrivelse af forholdene ved frysning af porøse materialer, som de udtrykkes ved de eksisterende fysiske forklaringer på frostnedbrydning. I et efterskrift (afsnit 8) samles op på et par punkter der skal arbejdes videre med.

Analysen af den præsenterede model viser, at der er perspektiver i at benytte beregningsmodeller til at bestemme kritiske vandmætningsgrader. Udviklingen af metoder til beskrivelse af porestruktur - bl.a. baseret på computersimulering - bør inddrages hvis modellen skal blive et reelt alternativ til en eksperimentel bestemmelse af kritisk vandmætningsgrad.

1. Indledning

1.1 Baggrund

På trods af mange års forskning i byggematerialers frostbestandighed, må spørgsmålet om, hvorvidt det fortsat er et relevant emne at beskæftige sig med, besvares med et ja. Faktisk baserer megen viden om frostbestandighed sig endnu i dag på praktisk erfaring og håndregler for byggematerialernes sammensætning, fremstilling, efterbehandling og anvendelse, samt konstruktionernes udformning. Af flere forskellige grunde er praktisk erfaring ikke længere tilstrækkelig, ikke mindst når det gælder udviklingen af nye byggematerialer, fx højstyrkebetoner. En øget forståelse for forholdene omkring frostnedbrydning er derfor nødvendig.

Vore dages beton er et kompliceret materiale med et stort antal delmaterialer. Der er derfor en lang række muligheder for at sammensætte sin beton. Viden om de enkelte delmaterialer er ikke nødvendigvis nok til at udtale sig om det færdige materiales frostbestandighed, idet de enkelte faktorer betydning ikke uden videre kan superponeres.

Således har cementbaserede materialers store specifikke overflade og spektret af pore størrelser central betydning, ligesom det har vist sig, at tilsætningsstoffer ikke kan kombineres vilkårligt uden problemer. Desuden afviger egenskaberne af betons overfladelag ofte markant fra resten af betonen. At sikre et tæt overfladelag er derfor en central opgave, [Kreijger,84] m.fl.

For at opnå en frostbestandig beton skal en lang række krav overholdes, dels til delmaterialer, dels til fremstilling og efterbehandling, se fx [Fagerlund,87]. Betonen skal samtidig skal overholde en række andre krav for at opfylde sin samlede funktion i konstruktionen. Flere af disse krav kan være i modstrid med hinanden, således at den gode, holdbare beton, der udtænkes ved skrivebordet, slet ikke kan opnås i praksis. Desuden kan tidsfaktoren være et problem for pladsstøbt beton. Afformning skal ske hurtigt, hvilket kan give problemer i form af revner, der kan lette adgangen for vand og dermed virke fremmede for frostskafer.

Kvaliteten af teglsten afhænger primært af, hvor homogen leren er, samt hvor kontrolleret tørringen og brændingen forløber. Den stadig mere automatiserede produktion på teglværkerne har resulteret i sten af en mere homogen kvalitet end tidligere, således at problemer, som fx Kung [1987] omtaler mht. temperaturgradienter i ovnene, er mindsket.

Mens en teglsten er et færdigt produkt, når den forlader teglværket, udvikler beton sine egenskaber i lang tid efter udstøbning. Til gengæld vil murværks frostbestandighed afhænge af samspillet mellem den fabriksfremstillede sten og den på byggepladsen blandede mørtel. Dertil kommer ydre påvirkninger. Et særligt problem for murværk er udfældning af salte, der er behandlet i [C.B.Nielsen,91].

Ændrede ydre påvirkninger

Vintervejr kan være alt fra +5°C og gråvejr/regnvejr til -20°C, 50 cm sne og høj sol. For byggematerialers frostbestandighed er det imidlertid ikke afgørende om temperaturen i lange perioder er -10° eller -20°C. Det er antallet af frysepunktpassager, dvs hvor tit vejret skifter fra frost til tøj, kombineret med en vis mængde nedbør, der er vigtigt.

Samtidig er det værd at tænke på, at mange materialer - sammenholdt med tidligere - udsættes for skrappere påvirkninger i dag. Dette er fx på grund af brugen af tørsalte, samtidig med at materialeforbruget i andre retninger optimeres, ofte aht. konstruktionens egenlast (vægt).

Udformningen af husenes ydervægge med langt mere isolering og mindre tagudhæng har også betydning, idet de yderste dele af facaderne er mere udsat mht. temperaturudsving end tidligere. Overgangen fra massive teglmure til hulmure med isolering betyder således, at ydermuren er mere udsat for frostskafer, [Ylä-Mattila,88], [Harris & Saunders,90].

Sammenlignes forskellige opbygninger af en *hulmur*, har det tilsyneladende *ikke* nogen betydning for fugt- og temperaturforholdene i formuren, hvilken tykkelse hulrummet bag formuren har, og i hvilken grad hulrummet er fyldt med isolering, [Sandin,89,91,92]. Formurens bestandighed styres interessant nok først og fremmest af formurens *egne* egenskaber samt den *ydre* påvirkning.

I 1960'erne var opfattelsen af beton, at det nærmest var vedligeholdelsesfrit. I dag ses problemer som fx smuldring af trapper, altangange, kantelementer på broer osv., primært pga. brugen af tørsalte. Blandt de nordiske lande har skader på broer særligt i Sverige været et problem, [Beton & frost,85]. I 1965 indførtes i Sverige krav til luftindblanding af beton, der var udsat for frost, men først med udviklingen af den nuværende svenske frostprøvningsmetode [SS 13 72 44] er antallet af skader for alvor gået ned.

I Danmark ses den ændrede opfattelse af betons holdbarhed tydeligt, jf. de stadig større krav, der stilles til betonens sammensætning i de senere års store broprojekter. Samtidig er levetidsberegninger ved at blive indført, men erfaringerne er endnu begrænsede og usikkerhederne tilsvarende store.

Ses frostskafer kun i laboratoriet ?

I forbindelse med frostbestandighed og frostskafer høres udsagnet om, at frostskafer vist kun ses ved laboratorieforsøg - ses frostskafer overhovedet i praksis ? Udsagnet hænger i høj grad sammen med, at der findes et stort antal frostprøvningsmetoder, som ikke er tilstrækkeligt velfunderede teoretisk.

Hovedparten af metoderne er udviklet ud fra ønsket om at opnå en enkel metode, der efterligner naturlig påvirkning mest muligt og samtidig accelererer denne, således at der ikke skal gå 5-10-20 år før et resultat opnås. Det accelererede forløb betyder til gengæld, at flere af prøvningsmetoderne udsætter materialerne for en urealistisk hård belastning. Det fører til tilsyneladende modstridende resultater, fx mht. nødvendigheden af kunstig indblanding af luft i højstyrkebeton, jf. afsnit 2.1.

I Danmark er der kun ganske få reklamationer mht. tegls frostbestandighed, hvilket kan få én til at tro at stenene brændes for godt. Det kan dog konstateres, at de skader der opstår, især sker på strengpressede sten og i mindre grad på blødstrøgne sten¹. Det hænger formentlig sammen med den laminering, der er et resultat af strengpresningsprocessen, [de Place & Schmidt,89], selv om det ikke er den eneste forklaring, [Robinson,84], [Falk,89].

Gængse frostprøvningsmetoder er som nævnt ikke velfundereret teoretisk. Problemet er, at der ikke findes en *entydig* fysisk forklaring på, hvad der sker, når vand i et porøst materiale som beton eller tegl fryser, jf. afsnit 2.2. Desuden er det vanskeligt at udtrykke de fysiske forklaringer på en sådan form, at de kan benyttes prøvnings- eller beregningsmæssigt til materialedesign.

Et andet problem er, at nedbrydning af materialer ofte sker som en kombination af flere samtidigt virkende faktorer, hvor én form for nedbrydning "lukker op" for en anden. Skadesbilledet kan derfor godt svare til en frostnedbrydning, uden at det nødvendigvis er den grundlæggende forklaring, se fx [Robinson & Borchelt,94].

1.2 Rapportens formål

I årenes løb er indsamlet en mængde praktisk viden omkring frostbestandighed og der er opstillet fysiske forklaringer på hvad der kan tænkes at ske, når vand i porøse materialer fryser. Problemet er at koble den praktiske viden med de teoretiske forklaringer. Til det formål er det ønskeligt at opstille beregningsmodeller, der inddrager såvel praktisk viden som teoretiske forklaringer.

Formålet med det rapporterede arbejde er derfor, at

- beskrive en ny beregningsmodel for frostnedbrydning, hvilke forudsætninger modellen bygger på, samt hvilke materialeparametre der indgår i beregningerne (afsnit 3).
Modellen betragter frostproblematikken "udefra". Det skal forstås således, at den tager udgangspunkt i: 1) at frysning af vand, uanset den rent fysiske forklaring, fører til indre deformationer og en spændingsopbygning, der kan give skader (revneudvidelser) i materialet, 2) at byggematerialer er sammensatte materialer, hvis egenskaber afhænger af, hvordan de forskellige faser er blandet sammen.
Modellen bygger desuden på eksistensen af kritiske vandmætningsgrader (afsnit 2.3).
- afprøve beregningsmodellens egnethed til bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader. Beregninger med modellen sammenholdes med eksperimentelt bestemte værdier for kritisk vandmætningsgrad.

¹ For beskrivelse af de to fremstillingsmetoder henvises til [Tegl 1,91].

- diskutere beregningsmodellen ud fra de mest gængse fysiske forklaringer på frostnedbrydning samt modellens anvendelse af begrebet kritisk vandmætningsgrad.

Til det formål præsenteres med udgangspunkt i den aktuelle problematik omkring frostprøvningsmetoder, de vigtigste frysemekanismer, samt begrebet kritisk vandmætningsgrad (afsnit 2).

Til opfyldelse af formålet opstilles et forsøgsprogram for tegl og beton (afsnit 4) til at

- bestemme de parametre der indgår i den opstillede beregningsmodel, og som kræves for at kunne foretage de nødvendige beregninger
- bestemme den kritiske vandmætningsgrad eksperimentelt
- udsætte materialer for forskellige former for eksponering, herunder standardiseret frostprøvning og frivillig vandopsugning, for at kunne vurdere materialernes frostbestandighed.

I den forbindelse indsamles materialedata, bl.a. med henblik på at kunne foretage fugttransportberegninger under forskellige former for eksponering.

2. Litteraturgennemgang

Ved at studere litteraturen omhandlende frostbestandighed viser det sig, at der selv på de mest grundlæggende områder findes forskellige opfattelser.

Det gælder for eksempel med hensyn til behovet for kunstig indblandet luft i højkvalitetsbeton og udformning af frostprøvningsmetoder. Et centralt problem er den utilstrækkelige teoretiske fundering af prøvningsmetoderne. Desuden har det vist sig af afgørende betydning for resultatet af frostprøvningen at kende vandmætningsgraden.

Derfor diskuteres i litteraturgennemgangen 1) den generelle problematik omkring frostprøvning, 2) frysemekanismer samt 3) begrebet kritisk vandmætningsgrad. Det er ikke tilstræbt at foretage en udtømmende litteraturgennemgang men at trække centrale begreber og diskussionsemner frem.

På basis af litteraturgennemgangen konstateres behovet for en beregningsmodel, 1) der bygger på eksistensen af kritiske vandmætningsgrader, 2) gør dette begreb mere anvendeligt i praksis, når frostbestandighed skal vurderes.

2.1 Hvorfor er det svært at bestemme frostbestandighed ?

2.1.1 Luftindblanding og frostbestandighed

Kunstigt indblandet luft er den normale foranstaltning til at imødegå frostskeer i beton. For det første betyder luftindblandingen, at noget af isdannelsen kan ske uden for det oprindelige poresystem, der derved aflastes. For det andet kan vandindholdet normalt reduceres som følge af luftindblanding, idet de mange små luftbobler gør betonen mere bearbejdelig.

For at få det fulde udbytte af luftindblandingen kræves, at denne bliver jævnt fordelt, og at det forventede luftindhold opnås. Gutmann [1988] viser, at betonens holdbarhed og styrke forbedres ved at benytte et luftindblandingsmiddel, der er karakteristisk ved at danne meget regelmæssige luftbobler med tykke vægge, fremfor et luftindblandingsmiddel, hvor luftboblerne har en mere uregelmæssig og ustabil form.

Tilsyneladende giver det i praksis problemer at opnå et ønsket luftindhold og en jævn fordeling af luftporer, jf. omfanget af undersøgelser, hvor betydningen af luftindblanding og mulighederne for at sikre et stabilt luftporesystem er undersøgt, fx [Mielenz et al,58-59] samt [Pigeon et al,89,90], [Plante et al,89], [Sauzier et al,90,91].

Pigeon et al konstaterer, at det er muligt at opnå et stabilt luftporesystem, men at der ikke nødvendigvis er sammenhæng mellem de parametre, der beskriver luftporestrukturen. Der mangler fortsat viden om mekanismer og om hvordan de forskellige parametre "styrer" luftporestrukturen.

Ved fastlæggelsen af behovet for luftindblanding må der desuden tages hensyn til, at den indblandede luft ikke kan regnes 100 % virksom, [Fagerlund,79,81,87,93a], [Geiker & Andersen,91]. En overdosering kan til gengæld reducere betonens styrkemæssige egenskaber unødigt meget, hvis der ikke samtidig sker en reduktion af vandindholdet, jf. ovenfor. Endelig har det vist sig, at visse kombinationer af luftindblandings- og plastificeringsmidler *forværrer* materialets frostbestandighed, [Fagerlund, 86], [Petersson, 89].

Hele denne problematik har affødt en diskussion om, hvorvidt luftindblanding i højstyrkebeton - eller rettere: højkvalitetsbeton - er nødvendig eller ej, hvilket der ikke er enighed om, [Geiker & Andersen,91], [Fagerlund,91], [Bache,91], [M.H.Hansen,92]. Hansen konkluderer, at der for en sikkerheds skyld altid bør blandes luft i, mens Bache er bange for at indblandet luft ligefrem kan virke modsat hensigten, hvis der er tale om en meget tæt beton.

En tilsvarende uenighed gør sig gældende med hensyn til om tilsætning af mikrosilica forbedrer frostbestandigheden, [Sellevold,88c].

Uenigheden skyldes i høj grad, at de eksisterende prøvningsmetoder ikke i tilstrækkelig grad afspejler virkeligheden, [Detwiler, Dalgleish & Williamson,89], [Pigeon et al,91], [Cohen, Zhou & Dolch,92]. Desuden er det et problem at efterligne "rigtig" færdigbehandlet beton i laboratoriet.

Sammenholdt med tidligere udsættes materialerne for skrappe påvirkninger i dag, først og fremmest pga. tørsalte. Det har gjort problematikken omkring prøvningsmetoder og luftindblanding særlig aktuell, idet hele spørgsmålet omkring, hvilke(n) mekanisme(r) der styrer frostnedbrydningen, kompliceres, jf. [Springenschmid,69,72], [Petersson,84], [Chandra & Xu,92], [Fagerlund,94]. Derfor fokuserer en stor del af forskningen i dag på tørsaltes betydning, [RILEM TC-117,92,93].

2.1.2 Direkte frostprøvning - hvad er problemerne?

Der findes i dag et stort antal prøvningsmetoder, hvori materialet udsættes for skiftevis frysning og optøning, i luft eller vand, med eller uden tørsalte, frysning fra én eller flere sider, som enkeltsten eller som del af en mur osv., jf. nedenfor. Der tales i denne forbindelse om *direkte* frostprøvning.

I det følgende ridses problematikken omkring direkte frostprøvning op. For en nærmere gennemgang og diskussion af prøvningsmetoder henvises til [Sellevold et al,86], [Stupart,89], [Setzer & Hartmann,91a] m.fl.

Flere af de metoder, hvor materialet udsættes for direkte frostprøvning, kan ikke fortælle om materialet er frostbestandigt, men kun hvordan det klarer sig i forhold til andre lignende (reference)materialer. Det primære problem i denne forbindelse er, at ikke alle naturens påvirkninger lader sig accelerere uden videre. Efterhånden er metoderne i stand til at rangordne materialerne i overensstemmelse med deres modstandsdygtighed i praksis. Det er dog i flere tilfælde fortsat et problem at opnå tilstrækkelig reproducerbarhed.

Typer af prøvningsmetoder

Der kan skelnes mellem to typer af prøvningsmetoder til direkte prøvning. I den ene gruppe findes de fleste standardiserede prøvningsmetoder, fx

2.1 Hvorfor er det svært at bestemme frostbestandighed ?

[ASTM C 666], [NT Build 419], [DIN 52 252] og [SS 13 72 44], hvor materialet udsættes for en standardiseret frostprøvning, bestående af gentagne frost-tø-cykler.

Frostprøvningen efterligner i større eller mindre grad naturlig påvirkning. Skadesdetektering sker typisk ved en "før-efter"måling af: 1) det dynamiske E-modul, 2) mængden af afskallet materiale, eller 3) ved at vurdere udseendet af overfladen. Den enkelte metode er normalt tilpasset et bestemt materiale, fx beton.

Til den anden gruppe hører metoder, der ligeledes benytter en standardiseret frost-tø-cyklus, men hvor inspektion af prøveemner sker løbende under prøvningen eller efter hver enkelt cyklus. Til denne gruppe hører metoder til bestemmelse af kritisk længdeændring [ASTM C 671], [Vuorinen,70] og kritisk vandmætningsgrad, [Fagerlund,77].

Skadesdetektering sker ved at måle længdeændringer eller dynamisk E-modul. Vuorinen [1970] og Fagerlund [1977] bestemmer samtidig vandmætningsgraden, mens [ASTM C 671] benytter en standardiseret konditionering, der gentages efter hver frost-tø-cyklus indtil der registreres frostskaader. En nærmere beskrivelse af disse metoder findes i afsnit 2.2.5 og afsnit 2.3.2ff.

Metoder hvor bestemmelse af vandmætningsgraden indgår, er mere arbejdskrævende end standardiseret prøvning. Til gengæld er de i princippet anvendelige på alle porøse materialer og giver flere informationer, ikke mindst ved en løbende registrering af længdeændringen.

Forbedring af prøvningsmetoder

Tidligere var det meget udbredt at udsætte materialer som tegl og beton for frysning fra alle sider. I dag er opfattelsen, at denne form for påvirkning ikke er relevant, hvis virkeligheden skal efterlignes. Flersidet påvirkning benyttes fortsat i visse metoder for beton, fx [ASTM C 666], mens det i dag kun sjældent benyttes ved frostprøvning af tegl, [Brüning, 77,87], [West, Ford & Peake,84], [van der Klugt,88].

Løbende laves ringtests på prøvningsmetoderne, fx [Plähn & Golz,84], [Sellevold,88a,88b], [Kukko & Paroll,93], [Siebel & Retschke,93], hvilket resulterer i forbedringer af eksisterende eller udvikling af nye metoder. Således har det været diskuteret, hvor store krav der skal stilles til temperaturforholdene under frost-tø-forløbet og i hvor høj grad disse kan forklare spredning i forsøgsresultater, [Sellevold & Farstad,91], [Setzer & Schrage,91], [Setzer & Hartmann,91a]. I forbindelse med frost-tørsalt-prøvning diskuteres det også, om det er nødvendigt at lade prøveemnerne opsuge en saltopløsning *inden* prøvningen, for at forbedre reproducerbarheden.

Den svenske frostprøvningsmetode til beton [SS 13 72 44] stiller ikke så skrappe krav til temperaturforholdene som den senere udviklede tyske CDF-test¹ [Setzer & Hartmann,91b], ligesom der er forskelle med hensyn til, hvordan mængden af afskallet materiale bestemmes. Hvor den svenske metode stiller en række krav til isolering af prøveemnerne, udnytter den tyske, at den mere nøjagtige styring af temperaturen overflødig gør indpakning.

1 CDF = Capillary Suction of Deicing Chemicals and Freeze-Thaw Test

Foreløbige resultater tyder på, at den tyske metode er mere reproducerbar og bedre til at skelne mellem god og dårlig beton end den svenske, jf. [Siebel & Retschke,93].

Luftporestruktur og direkte prøvning

Ikke alle steder benyttes en direkte frostprøvning til bestemmelse af frostbestandighed. I Danmark kontrolleres frostbestandigheden af beton således ved at stille krav til luftporestrukturen via Basisbetonbeskrivelsen [1987]. I Sverige er der dårlige erfaringer med at opnå frostbestandig beton ved alene at stille krav til luftindholdet [Fagerlund,84,91], hvorfor direkte prøvning, jf. [SS 13 72 44], benyttes.

Uoverensstemmelser mellem måling af luftporestruktur og direkte prøvning kan skyldes, at nogle prøvningsmetoder, fx [ASTM C 666], involverer påvirkninger, der fører til *indre* skader i materialet i form af *volumenekspansion*, dvs. skader der normalt ikke kan ses direkte, mens andre metoder - typisk metoder der involverer tørsalte, fx [ASTM C 672], [SS 13 72 44] - fører til *overfladeskader* i form af *afskalning*.

Normalt giver overfladeskader giver sig tidligst til kende. De vil dominere skadesbilledet indtil poresystemet har opnået en tilstrækkelig høj mætningsgrad. Herefter vil de indre skader dominere, [Petersson,86], [Fagerlund,94]. Afskalning ses især når materialet udsættes for frost kombineret med tørsalte.

Videreudvikling af frostprøvning

Frostnedbrydning er en kombination af materialeegenskaber og naturens påvirkning, hvilket der ikke skelnes imellem i en traditionel frostprøvning. En væsentlig grund til, at der eksisterer så mange metoder, er, at metoderne er tilpasset bestemte, kendte materialer og de lokale klimaforhold.

En mere langsigtet løsning mht. materialeudvikling kræver, at metoden ikke blot *eftertilgner* naturens påvirkning, men også *forklarer* hvorfor materialet er frostbestandigt eller ej. Det betyder, at såvel materiale som miljø bør indgå ved undersøgelse af byggematerialers frostbestandighed, hvilket kan ske ved at arbejde med kritiske vandmætningsgrader. Denne metode beskrives nærmere i afsnit 2.3.4 - 2.3.5.

2.1.3 Indirekte prøvning og frostmodstandstal

En entreprenør/rådgivende ingeniør er primært interesseret i, så hurtigt som muligt at få at vide om et specifikt materiale er tilstrækkelig frostbestandigt. Direkte frostprøvning, som omtalt ovenfor, er ikke særlig egnet som løbende kontrol på en byggeplads eller en fabrik/teglværk; dertil er en sådan prøvning for tidskrævende og/eller stiller for store krav til udstyr. Således kan frostprøvning af beton i følge de gængse metoder, jf. ovenfor, først ske 14 à 28 døgn efter udstøbning.

Frostbestandigheden kan forbedres vha. luftindblanding. Det er derfor forsøgt at benytte måling af luftindhold i frisk eller hærdnet beton eller bestemmelse af Powers' afstandsfaktor, [Powers,49], i frisk eller hærdnet beton som en løbende kontrol, jf. [Fagerlund,80,91], [Damgård Jensen,91], [M.H. Hansen,92] m.fl.

Måling på *frisk* beton er at foretrække, da det tager tid for betonen at hærde. Imidlertid er luftindholdet svært at styre og der er tilsyneladende ikke overensstemmelse mellem frisk og hærdnet betons luftindhold, [Kjær, 86]. Måling af luftindhold kan derfor ikke stå alene, hvilket stemmer overens med svenske erfaringer, jf. s.18 øverst.

Problemet ved at benytte Powers' afstandsfaktor er, at den bygger på idealiserede forhold. Den forudsætter, at luftporerne er lige store og arrangeret i et kubisk mønster og at de i øvrigt forbliver luftfyldte ved temperaturer over frysepunktet, dvs. ikke fyldes med urenheder o.lign. Det kræver desuden en bestemmelse af den specifikke overflade. I afsnit 2.3.3 diskuteres Powers' model i forhold til begrebet kritisk vandmætningsgrad

En anden mulighed er at foretage strukturanalyse vha. tyndslib, [Damgård Jensen,85], [Basisbetonbeskrivelsen,87], men det er en dyr metode, og den kan ikke foretages af hvem som helst.

Generelt gælder for indirekte prøvning, at det ofte er nødvendigt, 1) med en kontrol vha. direkte prøvning, 2) at beskrive materialet vha. flere forskellige parametre.

Frostmodstandstal

Et alternativ til sådanne analyser er de såkaldte frostmodstandstal, hvor frostbestandighedens afhængighed af porestrukturens parametre beskrives vha. primært empiriske udtryk.

For at kunne benytte sådanne udtryk forudsættes en vis grad af homogenitet i materialet. I praksis er der stor forskel på porestrukturen af henholdsvis cementpasta og overgangszonen mellem pasta og tilslag. Porestrukturen af strengpressede teglsten præges af en lagdeling parallelt med kop- og løberflader. Samtidig er der forskel på porestrukturen af byggematerialers overfladelag og resten af materialet. Dette gør det vanskeligt at opstille generelt anvendelige udtryk.

I bilag B3 [de Place,96b] gives eksempler på frostmodstandstal, hvoraf nogle testes i det foreliggende projekt. Se også [Sellebold et al,86] m.fl.

2.2 Frysemekanismer

Spørgsmålet "Hvorfor fryser porøse materialer i stykker?" kan langt fra besvares entydigt, hvilket afsnit 2.1 allerede har antydnet. Et faktum er det dog, at frostskaader kræver, at materialet indeholder og/eller er i kontakt med vand og eventuelt salte. Desuden skal temperaturen naturligvis være under frysepunktet.

Vand udvider sig 9 % når det fryser, men om denne udvidelse er den *direkte* årsag til at der opstår skader, er der derimod ikke enighed om. Uanset årsagen er det et faktum, at frysning af vand kan resultere i indre deformationer, der fører til en spændingsopbygning. Spændingerne kan resultere i revnedannelser, afskalning af materiale eller i sjældne tilfælde i en regulær sprængning af materialet.

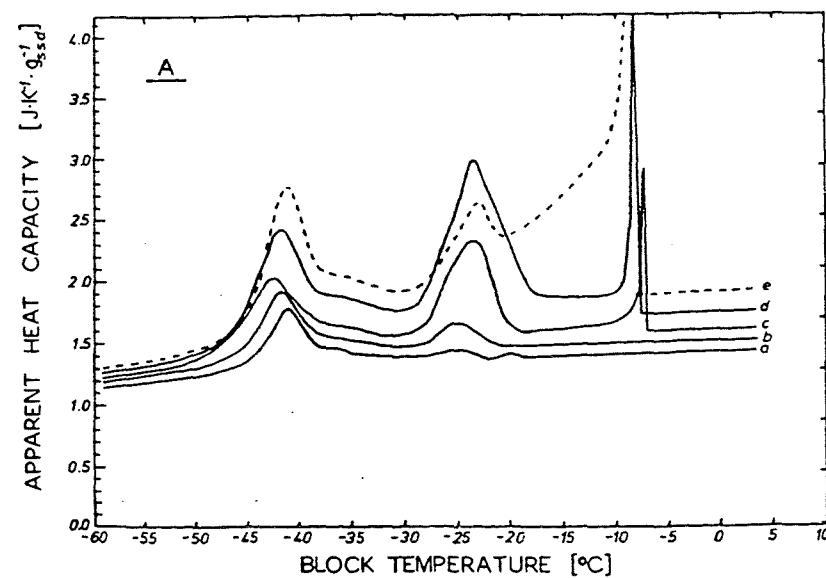
Kalorimeterforsøg på cementpasta har vist, at isdannelse koncentrerer ved veldefinerede temperaturer, [Fontenay,82], [Bager & Sellebold,82], [Bager,84], jf. figur 2.1.

Forsøgene viser ligeledes, at en vis udtørring af cementpastaen vil nedsætte risikoen for skader, forudsat at udtørringen ikke bremser hydratiseringen. Til gengæld vil udtørring ved 105°C efterfulgt af genmætning ændre forløbet af isdannelsen radikalt. Mængden af store porer øges på bekostning af mængden af små porer, ligesom kontinuiteten af poresystemet øges. Cementpastaen vil derfor være mere udsat for frostskafer, idet mængden af frysbar vand ved en given temperatur vil være kraftigt forøget, hvilket også Vuorinen [1970] finder frem til.

De mindste porer i et porøst materiale fyldes først med vand. Til gengæld fryser vand i gelporerne i teorien ikke før temperaturen er -78°C, [Helmuth,60] m.fl. I praksis er det mere kompliceret, idet vandet i gelporerne i følge teorien om mikroskopisk islinsevækst (afsnit 2.2.2), diffunderer til de større kapillarporer, hvor det har lettere ved at fryse.

Ved frysning af vand tales dels om *frysepunktssænkning* dels om *super cooling*, [Fagerlund,73d], [Zech & Setzer,89]. Frysepunktssænkning er en direkte følge af sammenhængen mellem porestørrelse og frysepunktstemperatur, mens super cooling skyldes, at en del af de store porer kun er tilgængelige via mindre porer, og at vandet i disse porer derfor fryser med en vis forsinkelse. Af andre faktorer kan nævnes urenheder i porevandet.

Alt i alt har porestørrelsesfordelingen og porestrukturen afgørende betydning for mængden af frysbar vand.



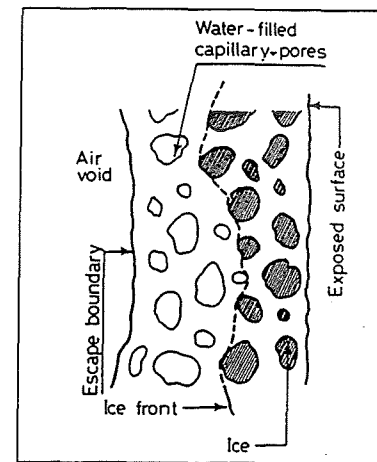
Figur 2.1. Resultat fra kalorimeterforsøg for vandmættet cementpasta. Isdannelsen udtrykt som frigivet varme optegnet som funktion af temperaturen, [Bager,84]. a, b, c, d og e repræsenterer forløbet for vand/cementforhold på 0,35, 0,40, 0,45, 0,50 og 0,60.

I litteraturen findes en række fysiske forklaringer på, hvad der sker når vand i et porøst materiale fryser. De fleste forklaringer er udviklet på baggrund af forsøg med cementpasta og tager udgangspunkt i Powers' & Brownyard's beskrivelse af cementpasta som kapillarporer omgivet af en permeabel cementgel, [Powers & Brownyard,47].

Af hensyn til diskussionen af den opstillede beregningsmodel, afsnit 3, præsenteres de mest gængse forklaringer - kaldet frysemekanismer - i det følgende. I øvrigt henvises til oversigtsreferencer, fx [Nerenst,60], [Setzer,77], [Soroka,79], samt de nævnte specifikke referencer.

2.2.1 Hydraulisk tryk

Powers [1945,49] opstillede teorien om *hydraulisk tryk*, da det viste sig, at materialer kan fryse i stykker, selvom der teoretisk set er plads nok til udvidelsen på 9%. Den hydrauliske trykteori bygger på, at vandet i de grove kapillarporer tættest ved overfladen, hvor temperaturen er lavest, fryser først og presser det ikke-frosne vand foran sig i retning af en luftpore eller en overflade, jf. figur 2.2.



Figur 2.2. Isdannelse i følge teorien om hydraulisk tryk, [Soroka,79]. Ved fortsat frysning vil isfronten presse vandet i kapillarporene mod luftboblen til venstre.

Denne fugttransport resulterer i et hydraulisk tryk, hvis størrelse er afhængig af materialets permeabilitet, isdannelseshastigheden og afstanden til en luftpore/overflade. Af samme grund defineres en kritisk afstand/tykkelse, der ikke må overskrides, hvis materialet skal kunne modstå frostpåvirkning i vandmættet tilstand, [Fagerlund,72b] m.fl. Luftindblanding bevirker, at afstanden til en luftpore, og dermed det hydrauliske tryk, mindskes.

Teorien om hydraulisk tryk kan forklare materialets volumenudvidelse ved stor isdannelseshastighed, idet hydraulisk tryk genereres så snart is dannes. Hydraulisk tryk er derfor særlig aktuel for grovporøse materialer eller materialer, hvor porestørrelsesfordelingen koncentrerer sig til nogle få porestørrelser.

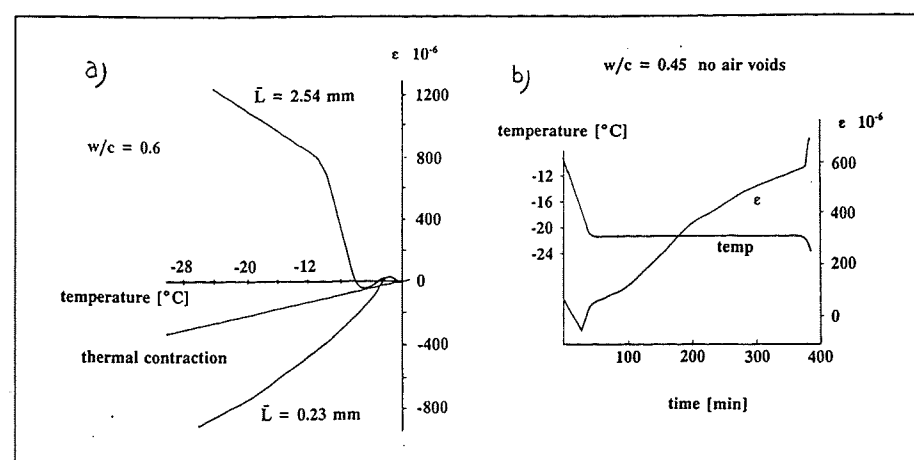
Som følge af isdannelsen mindskes permeabiliteten voldsomt. For tegl vil den efter frysning være af størrelsesordenen 0,1 à 0,4‰ i forhold til permeabiliteten før frysning, [Fagerlund,73a]. Dette kan forklare, hvorfor et permeabelt materiale som tegl kan fryse i stykker pga. hydraulisk tryk.

2.2.2 Mikroskopisk islinsevækst

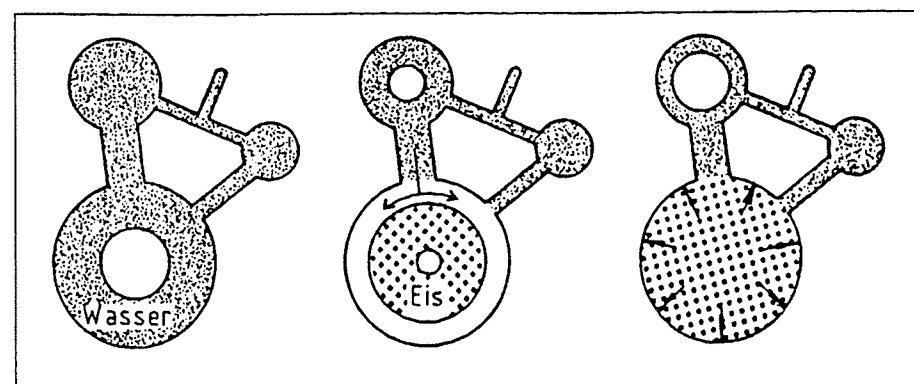
I følge teorien om hydraulisk tryk vil materialets udvidelse gå i stå, når temperatursænkningen standses, idet der så ikke dannes mere is. Forsøg, hvor længdeændringen af cementpasta måles som funktion af tempera-

turen, viser imidlertid, at prøveemner af cementpasta i visse tilfælde udvider sig *selv om* temperatursænkningen standses, jf. figur 2.3b. Desuden viser forsøg, hvor cementpastaen tilsættes kunstigt indblandet luft, at der i visse tilfælde sker en sammentrækning af materialet, som kan være *større* end den rent termiske, jf. figur 2.3a.

Begge observationer forklares ved, at isfasen i de store porer ved en given temperatur har et lavere energiindhold end det ikke-frosne vand i de små porer (gelporer). For at få mindsket denne energiforskel diffunderer vand fra de små til de store porer, hvor det fryser og får islinser til at vokse, jf. figur 2.4, deraf betegnelsen *mikroskopisk islinsevækst*.



Figur 2.3, efter [Powers & Helmuth, 53]. a: Længdeændring (ϵ) som funktion af temperatur for vandmættet, hærdnet cementpasta med forskellige mængder af indblandet luft, udtrykt ved afstandsfaktoren \bar{L} . Illustrerer, at frysning i visse tilfælde kan resultere i sammentrækning af materialet ud over den termiske bestemte. b: Længdeændring (ϵ) og temperatur som funktion af tid for cementpasta uden luftindblanding. Illustrerer at længdeændring kan fortsætte, uanset at temperatursænkningen standses.



Figur 2.4. Tre stadier under frysning i følge teorien om mikroskopisk islinsevækst, [Jungwirth, Beyer & Grübl, 86]. Vand diffunderer pga. energiforskel fra de små porer til den store pore, hvor det fryser og får islinser til at vokse. I sidste ende kan islinser blive så store, at der opstår spændinger i materialet, som kan føre til frostskafer.

Temperaturen er ikke tilstrækkelig lav til at få vandet i de små porer til at fryse på stedet.

Når vandet diffunderer ud af gelporerne sker der en udtørring af disse, hvilket forklarer den uventet store sammentrækning som Powers & Helmuth [1953] observerede i visse af forsøgene.

Islinsevæksten vil foregå langsomt, da den er et resultat af en diffusionsproces. Det forklarer, hvorfor der kan være en vis forsinkelse mellem temperaturændringer og længdeændringer, jf. figur 2.3b. Islinsevæksten vil fortsætte indtil der er opnået en energiligevægt mellem is og vand - og lige så længe er der risiko for frostskafer. Islinsevæksten i kapillarporer og den afledte spændingsopbygning begrænses ved luftindblanding. Pickett [1953] viser, at det er muligt at regne på fugttransport mellem porerne, som den foregår i følge teorien om mikroskopisk islinsevækst.

I følge [Haynes, 64], [Everett & Haynes, 65] skyldes mikroskopisk islinsevækst kapillære kræfter i poresystemet. En krum grænseflade mellem vand i en lille pore og is i en stor pore skaber undertryk i den lille pore, hvorefter vandet trækkes ud.

Mikroskopisk islinsevækst har størst betydning ved langsom frysning og/eller i finporøse - fx cementbundne - materialer, hvor en stor del af vandet er stærkt bundet i poresystemet, og hvor der er for få vandfyldte kapillarporer til at hydraulisk tryk kan få betydning. Islinsevækst er også observeret i tegl. Teorien om mikroskopisk islinsevækst opererer ligesom hydraulisk tryk med eksistensen af en kritisk tykkelse, der dog ikke kan beskrives på en enkel matematisk form.

Der tales også om islinsevækst i forbindelse med frysning af fugtig/våd jord, [Taber, 1929, 30]. Da faststoffet er langt blødere og svagere end i traditionelle byggematerialer, vil islinser i jord i princippet kunne vokse ubegrænset, forudsat der er adgang til vand, hvorfor der tales om *makroskopisk islinsevækst*. Ellers er mekanismen den samme som beskrevet ovenfor.

I tilfælde af, at vandet i poresystemet indeholder salte eller andre former for urenheder, tales om isdannelse pga. *osmotisk tryk*. I de grove porer vil urenhederne koncentreres i det ikke-frosne vand, der derved får en større koncentration af urenheder end vandet i de små porer. Denne koncentrationsforskel er drivkraften for transport af vand fra små til store porer, hvor vandet fryser og får islinser til at vokse.

2.2.3 Andre mekanismer

Beaudoin & MacInnis [1974] viser, at frostskafer også kan opstå når vand erstattes med benzen, der har den egenskab, at det trækker sig sammen når det fryser. Forfatterne konkluderer, at der ikke kan sluttes noget om materialets opførsel ud fra væskens opførsel, jf. den gængse kobling mellem vands udvidelse og frostskafer. I stedet vil forskelle i damptryk føre til et hydraulisk tryk, der kan ødelægge materialet, jf. tidligere.

Litvan [72a, 72b] har fremsat den teori, at det ikke er væksten af islinser, der fører til frostskafer. I stedet skyldes skaderne den fugttransport som frysningen giver anledning til, pga. forskelle i damptryk mellem is og ikke-

frosset vand. Hvis transporten fra små til store porer ikke kan foregå tilstrækkelig hurtigt sammenholdt med afkølingshastigheden, fordi materialet yder modstand mod denne transport, vil hydraulisk tryk føre til frostskafer.

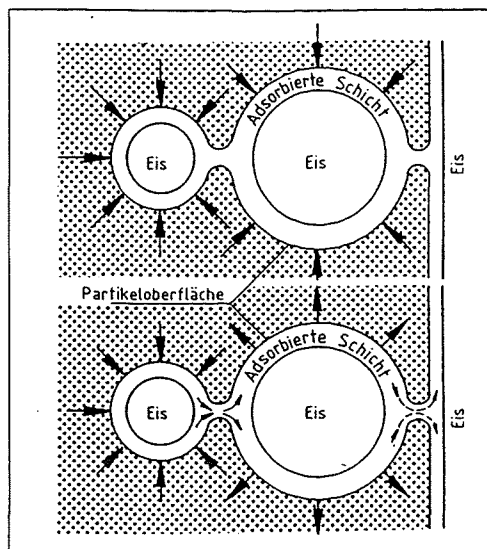
Litvan påviser, som Beaudoin & MacInnis ovenfor, at en udvidelse af materialet godt kan foregå, selv om poresystemet indeholder en væske, der trækker sig sammen ved frysning, [Litvan,72b]. Forsøg med lav frysehastighed, hvor en vandmængde - svarende til tre til fire gange den målte ekspansion af materialet - blev presset ud af prøveemnet, underbygger i følge Litvan denne opfattelse.

Litvan har også forsøgt at give en termodynamisk forklaring på, hvorfor noget af vandet først fryser ved meget lave temperaturer. Han antager i den forbindelse bl.a. at overfladespændingen er uafhængig af filmtykkelsen af det adsorberede vand, hvilket i følge Setzer [1977] er en grov forenkling.

Setzer [77,90,92,93] skelner mellem forhold i grovporøse og finporøse materialer. I finporøse materialer, fx cementpasta, fører de store overfladekræfter mellem vandmolekyler og faststof til dannelsen af en tynd film af adsorberet vand samt kondensering i gelporer.

Det adsorberede lag af vand bevirker, at frysning af det resterende vand ikke kræver så stor en ændring i energi som hidtil antaget, og at der derfor godt kan eksistere is selv i små porer. Til gengæld skal der tages hensyn til disse overfladekræfter ved opstilling af udtryk for sammenhængen mellem porestørrelse og frysepunktssænkning.

Setzer [1977] konkluderer på basis af undersøgelser af Sidebottom & Litvan [1971] og betragtninger angående termodynamiske ligevægts-tilstande, at der på samme tid kan eksistere is, vanddamp og adsorberet vand i poresystemet. Som følge af overfladespændinger for iskrystallen og det adsorberede vand, hvis størrelse vokser med aftagende porestørrelse, vil der opstå trykforskelle mellem små og store porer. Afhængig af de ydre omstændigheder kan det føre til sammentrækning af de små porer eller til frostskafer pga. overtryk i de store porer, jf. figur 2.5.



Figur 2.5. Illustration af frysemekanisme i følge Setzer [1977]. Indadrettede pile angiver størrelse af undertryk i den enkelte pore, forårsaget af overfladespændinger. Is og adsorberet vand antages at være i termodynamisk ligevægt. Øverst illustreres en ligevægtsituation opnået ved langsom afkøling. Den lille pore vil langsomt trække sig sammen pga. undertrykket. Nederst illustreres en situation med hurtig afkøling, der fører til diffusion af vanddamp fra små til store porer (angivet ved punkterede pile) for at bibeholde den termodynamiske ligevægt. Den hurtige afkøling kan eventuelt føre til overtryk i den store pore og dermed til frostskafer.

2.2.4 Frysemekanismer - opsamling

En række andre mekanismer, der mere eller mindre overlapper de ovenfor nævnte, er opstillet. Desuden er opstillet mekanismer, der specielt skal forklare den kombinerede virkning af frost og tørsalte, se fx [Jungwirth, Beyer & Gröbl,86]. To af disse er nævnt andetsteds i afsnittet, dels osmotisk tryk (afsnit 2.2.2) og Springenschmid's model (se nedenfor, figur 2.6).

Alt i alt mener Podvalnyi [1976], at der kan skelnes mellem mindst 15 forskellige mekanismer (fysiske forklaringer), hvilket umiddelbart virker ret uoverskueligt.

At antallet af mekanismer er så stort, skyldes formentlig, at der i flere tilfælde er fokuseret på nogle små afvigelser fra de eksisterende fysiske forklaringer. I praksis har disse afvigelser vist sig at være af mindre betydning for det samlede billede, og kan ofte forklares ved, at forsøgsomstændighederne ikke kan sammenlignes med tidligere forsøg.

Prout & Hoff [1991] har udført frost-tø-forsøg på tegl. De finder frem til, at størrelsen af de målte tøjninger ikke i fuldt omfang kan forklares ud fra størrelsen af spændinger, når disse beregnes ud fra den hydrauliske trykteori eller mikroskopisk islinsevækst. Prout & Hoff benytter som forklaring, at der vil være en stor del indespærret vand pga. flaskehalse i poresystemet.

At poresystemet indeholder særlig mange flaskehalse er imidlertid et udtryk for det pågældende materiales porestruktur, og har for så vidt ikke noget med den fysiske forklaring på frysning at gøre. Flaskehalse vil blot "forsinke" frysningen, jf. omtale af super cooling s.20. Dette underbygges af Jungwirth, Beyer & Gröbl [1986], der finder, at der ikke nødvendigvis er sammenhæng mellem absolut ismængde og udvidelse. J,B & G mener ikke, at denne uoverensstemmelse giver anledning til opstilling af nye mekanismer; det er simpelthen et resultat af forskelle i porestruktur.

Sammenligning af frysemekanismer

Selv om ikke alle forklaringer har lige stor berettigelse er det en kendsgerning, at der ikke eksisterer en entydig forklaring. Således må hydraulisk tryk og mikroskopisk islinsevækst kombineres for at forklare forløbet af isdannelse i et forløb, hvor såvel hurtig som langsom afkøling forekommer. Disse to teorier er de mest gængse forklaringer, på trods af eller måske netop som følge af, at det er de først opstillede forklaringer.

Senere opstillede forklaringer adskiller sig ikke fra disse mht. om is skubber vand foran sig eller om vand tiltrækkes af is. I stedet er der opstillet andre forklaringer på, hvad der specifikt er drivkraften bag isdannelsen og skadesudviklingen.

Således benytter Litvan [1972a] *damptryksforskelle* som forklaring, mens Powers & Helmuth [1953] taler om *forskelle i fri energi*. Litvan's model kan siges at kombinere den hydrauliske trykteori og mikroskopisk islinsevækst. I følge Litvan sker isdannelsen ved, at vand tiltrækkes af is (islinsevækst), mens skader opstår, hvis transporten hen mod islinsen ikke kan forløbe tilstrækkeligt hurtigt (hydraulisk tryk).

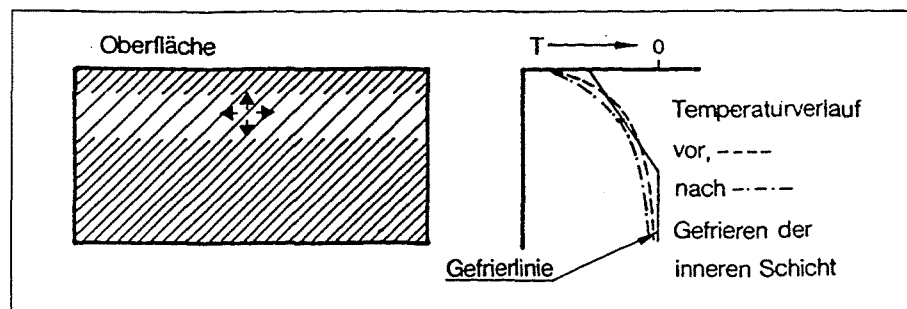
Det nye ved Setzer's model i forhold til Litvan's er, at Setzer [1977] i særlig grad interesserer sig for forholdene i de fine porer, hvor Litvan's model i første omgang kom til kort.

Til udvikling af prøvningsmetoder, der kan andet end blot efterligne frostnedbrydning, savnes generelt matematisk anvendelige beskrivelser af de fysiske forklaringer, selv om kvalitative betragtninger og simuleringer er mulige. Problemet lettes ikke af, at der som nævnt ikke findes en éntydig fysisk forklaring på frostnedbrydning.

Makroskopiske forklaringer på frostnedbrydning

De fleste frysemekanismer er opstillet ud fra studier af cementpasta. Udover at mekanismerne pt. ikke kan benyttes til praktiske spændingsberegninger, skal det tages i betragtning, at frostbestandighed ikke alene kan beskrives ud fra, hvad der foregår, når vand i cementpasta fryser. Flere forfattere betragter derfor forløbet udefra.

I følge Springenschmid [1969,72] kan udseendet af skader ved kombineret frost-tøsalt-påvirkning forklares som illustreret på figur 2.6.



Figur 2.6. Illustration af forklaring på skadesbilledet ved kombineret frost-tøsalt-påvirkning. [Springenschmid, 69,72]. Tæt skravering markerer frosne zoner; åben skravering markerer en zone med indespærret vand. Frysning af vandet i denne zone vil bevirke en afsprængning af yderste lag.

Ved afkøling dannes et temperaturprofil gennem konstruktionen. Samtidig vil der være en koncentrationsforskel mht. salt, med den største koncentration ved overfladen. Dette fører til, at vandet i det yderste lag samt i et lag et stykke inde i konstruktionen fryser før vandet i det mellemliggende lag. Da dette lag er spærret inde mellem de to andre, hvorved vandet ikke kan presses ud, kan en frysning af vandet i det mellemliggende lag i værste fald føre til, at det yderste lag "sprænges" af. Kunstigt indblandet luft vil modvirke dette ved at virke som buffer.

Podvalnyi [1976] antager, at forskelle i delmaterialernes temperaturudvidelseskoefficienter - bl.a. som følge af vands udvidelse ved frysning - er årsagen til frostskafer. Han opstiller på basis heraf udtryk til bestemmelse af spændinger i beton under frysning.

Beton modelleres som tre kuglemodeller inden i hinanden. Hver kuglemodel består af kugleformet tilslag omgivet af en matrix af form som en kugleskal. Sådanne kuglemodeller anvendes også ved undersøgelser af porøse materialers styrke og stivhed generelt, jf. bilag B1 [de Place, 96b].

Der tages normalt udgangspunkt i et specifikt materiale, fx beton eller tegl, i modsætning til den model, der præsenteres i afsnit 3.

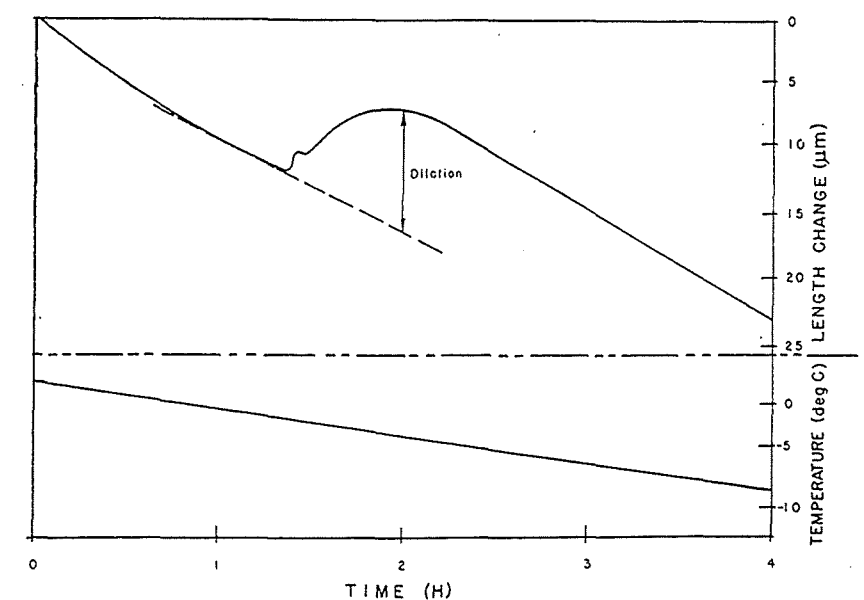
2.2.5 Dilatation

Til grundlæggende undersøgelser af porøse materialers frostbestandighed er det nødvendigt at vide mere om, hvorfor materialet fryser i stykker, og under hvilke forudsætninger det foregår. I den forbindelse er det oplagt at udnytte, at frostskafer opstår fordi en spændingsopbygning fører til revnedannelse og -udvidelse.

Derfor er måling af længdeændring som funktion af temperaturen under frysning ofte benyttet ved laboratorieforsøg, [Powers & Helmuth, 53], [MacInnis & Beaudoin, 68], [Vuorinen, 70], [Klamrovski & Neustupny, 84], [Fagerlund, 92a] m.fl.

Fordelen ved denne metode i forhold til traditionel frostprøvning er, at længdeændringer kan måles meget præcist; typisk med en nøjagtighed på 0,25 à 0,5 μm svarende til tøjninger på 0,00125 à 0,0025 ‰, hvis prøveemnets længde er 200 mm. Det skal sammenholdes med, at længdeændringer på 3 ‰ eller mere ses ved frysning, afhængig af materialetype og prøveemnets vandindhold.

Powers [1955] har beskrevet en éncyklus test, hvor dilatation følges kontinuerligt, og hvor frostbestandigheden bestemmes via den såkaldte kritiske dilatation. Dilatation er differensen mellem målt relativ længdeændring af et prøveemne med vand i porerne og den lineære længdeændring der skyldes temperaturændringen, jf. figur 2.7. Denne test er grundlaget for den nuværende ASTM-metode til bestemmelse af kritisk længdeudvidelse, [ASTM C 671].



Figur 2.7. Definition af dilatation (på engelsk: dilation), [ASTM C 671]. Kurverne viser længdeændring (øverst) og temperaturændring (nederst) som funktion af tid. Dilatation angiver afvigelsen fra den lineære længdeændring.

I [ASTM C 671] benyttes et relativt krav til dilatation for at vurdere om en kritisk tilstand er nået eller rettere, hvor lang tid der går før en kritisk tilstand nås. Den maksimale dilatation ved to på hinanden følgende frost-tø-cykler, med 14 dages vandlagring imellem, må ikke øges med en faktor to eller mere. Ulempen ved denne fremgangsmåde er, at varigheden af prøvningen, som specielt for tætte materialer kan være meget tidskrævende, ikke kendes på forhånd.

Buck [1988] foreslår på basis af egne forsøg at gøre metoden mere anvendelig ved at stille følgende *absolutte* krav til den maksimale dilatation for prøveemner vandlagret i 14 dage inden test:

$$\varepsilon_{max} \begin{cases} < 50 \mu & \Rightarrow \text{frostbestandig} \\ \geq 200 \mu & \Rightarrow \text{ikke frostbestandig} \end{cases} \quad (2.1)$$

hvor ε_{max} er den maksimale dilatation.

På denne måde kan én frost-tø-cyklus være tilstrækkelig til at vurdere frostbestandigheden. Pt. overvejes det at indbygge krav svarende til (2.1) i prøvningsmetoden, jf. [Buck,88]. Specifikke krav skal afpasses det aktuelle materiale.

Vuorinen [1970] videreudvikler Powers' metode og benytter en procedure, hvor kontinuerede længdemålinger erstattes af målinger ved +20°, 0° og -20°C. En *dilatationsfaktor* R_a defineres ved

$$R_a = (\Delta L/L)_{+20^\circ \rightarrow 0^\circ} - (\Delta L/L)_{0^\circ \rightarrow -20^\circ} \quad (2.2)$$

hvor $\Delta L/L$ er den relative gennemsnitlige længdeændring for et givet temperaturinterval. Vuorinen sætter $R_a = -60 \mu\text{m}/\text{m}$ som øvre grænse for en tilfredsstillende frostbestandighed, sammenholdt med værdier for den såkaldte *Durability factor*, [ASTM C 666].

I [Fagerlund,77] beskrives en prøvningsmetode til bestemmelse af kritisk vandmætningsgrad vha. dilatation. Ved at konditionere prøveemner til forskellige vandmætningsgrader, er det tilstrækkeligt med én frost-tø-cyklus for at fastlægge den kritiske vandmætningsgrad for et givet materiale, forudsat antallet af prøveemner er tilstrækkelig stort. Fagerlund's metode er emnet for det følgende afsnit.

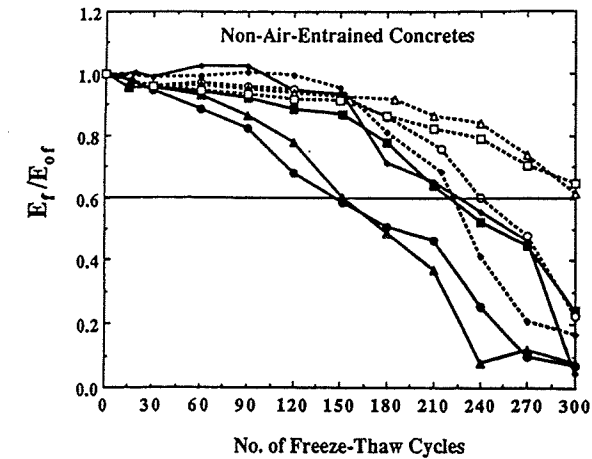
2.3 Kritisk vandmætningsgrad

2.3.1 Frostbestandighed og udmattelsespåvirkning

Det er ret almindeligt at udsætte et materiale for et stort antal frost-tø-cykler, når det skal afgøres om materialet er frostbestandigt eller ej, fx [ASTM C 666], [Dobrolubov-Romer,77], [SS 13 72 44].

Samtidig ses især for tætte betoner en langsom, fremadskridende nedbrydning, fx udtrykt ved den relative E-modul, jf. figur 2.8. Det har bevirket, at frostnedbrydning opfattes som resultatet af en udmattelsespåvirkning.

2.3 Kritisk vandmætningsgrad



Figur 2.8. Relativ E-modul som funktion af antal frost-tø-cykler for en række ikke-luftindblandede højstyrkebetoner, [Cohen, Zhou & Dolch,92]. Prøvning ifølge [ASTM C 666].

Udseendet af forløbet i figur 2.8 kan forklares ved, at vandindholdet langsomt øges under frysningen, fordi prøveemnerne ofte er i kontakt med vand ved frostprøvning, enten i forbindelse med optøning, fx [ASTM C 666], eller ved at prøveemnets overside er dækket af et lag vand eller en saltopløsning under prøvning, fx [SS 13 72 44]. Der er normalt ikke nogen styring af vandindholdet, blot antages det, at fx 14 eller 28 døgn vandlagring inden prøvning svarer til, at kapillarporesystemet er mættet.

Teoretisk kan det afvises, at frostskafer er resultatet af en egentlig udmattelsespåvirkning, [Fagerlund,80]. Betons udmattelsesstyrke f_N kan sættes til

$$f_N = f_1 (1 - 0,063 \log N) \quad (2.3)$$

hvor f_1 er betonens styrke ved statisk belastning [MPa] og N er antallet af lastcykler mellem 0 MPa og f_N MPa.

Det vil være rimeligt at regne med ca. 5000 frost-tø-cykler i en konstruktions levetid, hvilket medfører at $f_N = 0,77 f_1$, forudsat at materialet er vandfyldt forud for hver frost-tø-cyklus, og at materialet ikke kan restituere sig mellem cyklerne, hvilket er ret usandsynligt. Udmattelsespåvirkningen er derfor ret lille, omend en vis form for udmattelse kan iagttages ved forsøg, jf. sidste del af afsnit 2.3.4.

2.3.2 Definition af vandmætningsgrad

Den fysiske definition af vandmætningsgrad i forbindelse med frostbestandighed er

$$S_f = \frac{w_f}{w_f + a} \quad (2.4)$$

hvor w_f er mængden af frysbar vand og a er mængden af luftfyldte porer [m^3/m^3], dvs. de porer, der ikke er fyldt med vand og is. w_f og dermed S_f er afhængig af temperaturen.

For grovporøse materialer som tegl vil langt det meste fordampelige vand være frysbar, jf. [Fagerlund,74]. For disse materialer er det således ligegyldigt om S_f eller porefyldningsgraden S_e , der defineres som vist i (2.5), benyttes.

$$S_e = \frac{w_e}{P_a} \quad (2.5)$$

w_e og P_a er mængden af fordampeligt vand i prøveemnet henholdsvis porevolumen af åbne porer [m^3/m^3].

Med åbne porer skal forstås porer, der er tilgængelige for vand. I porevolumenet medregnes også indblandede luftbobler og eventuelle åbne porer i tilslaget, [Fagerlund,77]. Strengt taget er også S_e afhængig af temperaturen, jf. at vand ikke fylder det samme ved 0° og $20^\circ C$, [Pickett, 53], men i praksis har det ingen betydning.

I praksis er det lettere at forholde sig til, hvor meget vand poresystemet *alt i alt* må indeholde før frysning for at undgå frostskafer, end at få angivet, hvor stor mætningsgraden af *frysbar* vand må være.

I den forbindelse kan udnyttes at der som følge af definitionen på S_f og S_e gælder, at

$$S_f = \frac{S_e - K}{1 - K} ; K = \frac{w_{nf}}{P_a} \quad (2.6)$$

hvor w_{nf} er mængden af ikke-frysbar vand. Mængden af ikke-frysbar vand kan bestemmes eksperimentelt, fx [Vuorinen,70] eller teoretisk, fx [Fagerlund,77].

2.3.3 Eksistensen af kritiske vandmætningsgrader

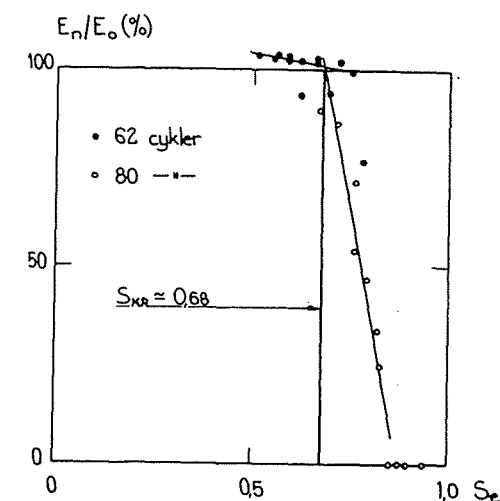
Fagerlund [1972b] har med udgangspunkt i teoretisk arbejde af Powers [1945,49] og Warris [1963,64] vist, at porøse materialer kun skades ved frysning, hvis vandmætningsgraden er større end en vis kritisk værdi, S_{KR} . Et eksempel er vist i figur 2.9, hvor skadesgraden udtrykkes som reduktion af det relative E-modul, E_n/E_0 .

Den kritiske vandmætningsgrad er en *materialekonstant*, dvs. den er uafhængig af ydre påvirkninger. Fagerlund [1992b] har vist, at frysehastigheden er næsten uden betydning for størrelsen af den kritiske vandmætningsgrad. Til gengæld har prøvepræparation en vis betydning, jf. bilag D [de Place,96b] og [Fagerlund,72b].

Der eksisterer kritiske værdier for hver enkelt materiale eller materialesammensætning, fx som funktion af betons vand/cementforhold. Værdien er uafhængig af antallet af frost-tø-cykler - se fx figur 2.9 og figur 2.12 - og bekræfter derfor, at frostnedbrydning ikke er et resultat af udmattelsespåvirkning. Blot en enkelt frost-tø-cyklus er i princippet tilstrækkelig til at fastlægge den kritiske værdi.

Eksistensen af kritiske vandmætningsgrader er siden eftervist af [Rombén,73], [Klamrowski & Neustupny,84], [Studer,84,92] m.fl.

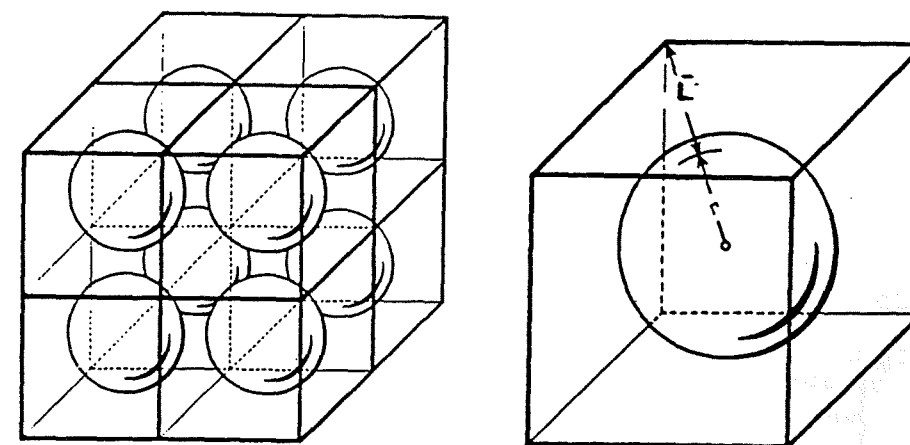
2.3 Kritisk vandmætningsgrad



Figur 2.9. Eksempel på eksperimentel bestemmelse af kritisk vandmætningsgrad, S_{KR} [Fagerlund,72b]. Cementmørtel, $w/c = 0,64$. Relativ E-modul som funktion af porefyldningsgrad, S_e , formel (2.5).

Erkendelsen af, at porøse materialer godt kan fryse i stykker, selv om der teoretisk set er plads nok til udvidelsen på 9 %, førte til opstillingen af den hydrauliske trykteori, beskrevet i afsnit 2.2.1, og til arbejdet med kunstig indblanding af luft i beton, [Powers,45].

I følge den hydrauliske trykteori vil det tryk som frysningen genererer afhænge af afstanden til en luftpore /overflade. Powers modellerer et system af luftporer som vist i figur 2.10 og definerer en afstandsfaktor \bar{L} baseret på denne model, [Powers,49].



Figur 2.10. Definition af Powers' afstandsfaktor \bar{L} , efter [Manns,70]. r er radius af luftporer.

Afstandsfaktoren er en funktion af betonens pastaindhold, luftindhold og luftporernes specifikke overflade. En kritisk værdi \bar{L}_{CR} , der ikke må overskrides hvis materialet skal være frostbestandigt, fastlægges. Powers antager, at luftporerne forbliver luftfyldte ved temperaturer over frysepunktet. I praksis vil luftporerne langsomt fyldes med vand og urenheder,

hvilket betyder, at der må indføres en ny afstandsfaktor, der tager hensyn til dette, jf. [Fagerlund,79,81,93b,94].

Selv om Powers' model af luftporesystemet er forenklet, finder han frem til, at der eksisterer kritiske vandmætningsgrader for kapillarporerne (kapillær vandmætningsgrad) og dermed også for hele pore-systemet.

Samtidig skriver Powers [1949], at betonens mætningsgrad og permeabilitet er de to afgørende faktorer for betonens levetid i en frost-prøvningstest. Ikke desto mindre afviser han tanken om kritiske vandmætningsgrader [Powers,56], hvilket skyldes, at han opfatter begrebet kritiske vandmætningsgrader alt for bredt.

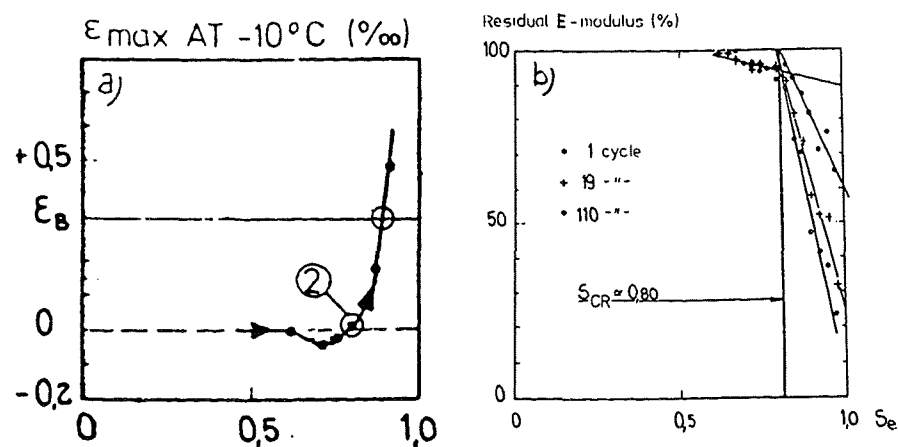
Vandmætningsgraden har ikke været holdt konstant under forsøgene, hvorved materialets evne til at optage fugt under forsøget har forstyrret resultatet. Desuden er der i visse forsøg ikke skelnet mellem virksomme og uvirksomme luftporer, [Fagerlund,72b,73a].

2.3.4 Fastlæggelse af kritisk vandmætningsgrad

Fagerlund [1977] beskriver to måder at bestemme kritiske vandmætningsgrader på, baseret på 1) at det relative dynamiske E-modul udtrykt som E_n/E_0 aftager voldsomt, når den kritiske vandmætningsgrad overskrides, jf. figur 2.11b, 2) at den maksimale deformation under frysning øges markant, når den kritiske vandmætningsgrad overskrides, jf. figur 2.11a.

E_n og E_0 er det dynamiske E-modul efter n frost-tø-cykler henholdsvis før frysning. E_n/E_0 bestemmes ud fra målinger af materialets resonansfrekvens, [de Place,94]. Alternativt kan fx spaltetrækstyrken bestemmes, men det har den ulempe, at der er tale om en destruktiv metode.

I princippet er én frost-tø-cyklus tilstrækkelig til at bestemme den kritiske vandmætningsgrad, men pga. følsomheden ved resonansfrekvensmetoden er det ofte nødvendigt at udsætte prøveemnet for et vist antal cykler (n), før skader kan registreres.



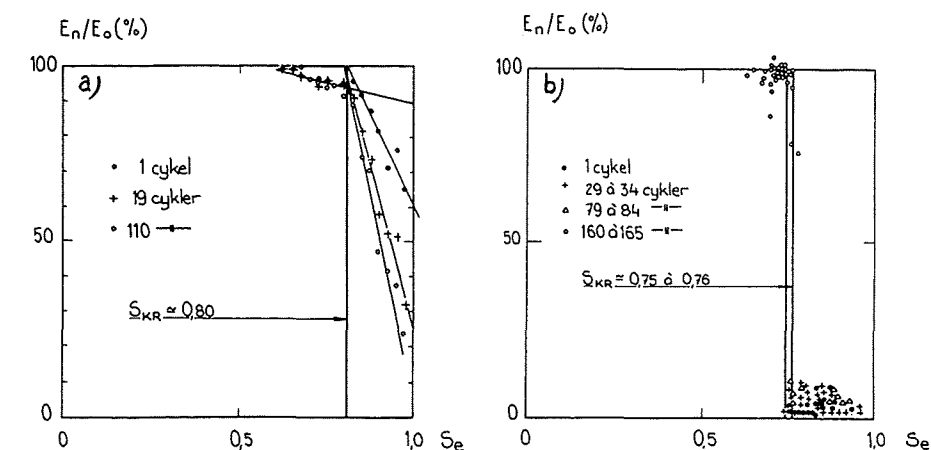
Figur 2.11. Fastlæggelse af kritisk vandmætningsgrad. Maksimal dilatation (a) henholdsvis relativt E-modul (b) som funktion af porefyldningsgrad S_e , [Fagerlund,72b,76]. ϵ_B er trækbrudtøjning. Kritisk vandmætningsgrad, S_{CR} , angivet i figur 2.11b, svarer til situationen angivet ved (2) i figur 2.11a.

2.3 Kritisk vandmætningsgrad

Den maksimale deformation bestemmes ud fra sammenhørende målinger af temperatur og længdeændringer enten løbende, [Fagerlund,72b], eller ved udvalgte temperaturer, som beskrevet af Vuorinen [1970].

Kritisk vandmætningsgrad defineres som 1) den største vandmætningsgrad, hvor materialet forbliver intakt, dvs. ikke får blivende skader som følge af frostpåvirkning, eller 2) den vandmætningsgrad, hvor materialet har nået brudtilstanden, [Fagerlund,76], dvs. hvor deformationen har overskredet materialets trækbrudtøjning, jf. figur 2.11a.

Kriterium 1) er at foretrække, ikke mindst fordi overgangen fra et intakt til et skadet materiale ofte er ret brat, afhængig af hvor sprødt materialet er, jf. figur 2.12.



Figur 2.12. Relativt E-modul, E_n/E_0 , som funktion af porefyldningsgrad, S_e , [Fagerlund,72b]. Illustration af, hvor forskellig konsekvensen af at overskride den kritiske vandmætningsgrad kan være. a: kalksandsten. b: hårdt brændt tegl.

Generelt giver en optegning som vist i figur 2.11 og figur 2.12 et godt overblik over forsøgsresultaterne, uanset, om én eller flere frost-tø-cykler benyttes. I sidstnævnte tilfælde kan den kritiske vandmætningsgrad desuden fastlægges ved at finde frem til den største vandmætningsgrad, hvor eventuelle skader ikke øges med antallet af frost-tø-cykler.

Skadesudvikling som funktion af antallet af frost-tø-cykler

I princippet bør skaderne ikke forøges, når først S_{CR} er overskredet, bl.a. fordi der er sket en revneudvidelse med efterfølgende mindskning af vandmætningsgraden. Vuorinen [1970] påpeger dog, at revneudvidelse af beton kan medføre, at mængden af frysbar vand øges, og at frost-tø-cyklus nummer to kan give ligeså store skader som den første. Desuden kan der ske ikke ubetydelige omlejninger af porevandet, [Klamrovski & Neustupny,84].

Flere forsøg viser, at det relative E-modul for prøveemner med vandmætningsgrad større end den kritiske ændres i nedadgående retning; dvs. at der konstateres et mere brat knæk på kurven, når antallet af cykler øges, [Rombén,73], [Klamrovski & Neustupny,84]. Det svarer til, at der sker en fortløbende revneudvidelse.

Fænomenet ses især i løbet af de første 6 à 10 cykler og kan muligvis forklares med, at der pga. revneudvidelsen bliver mere frysbar vand, jf. ovenfor. Kalorimeterforsøg viser desuden, at prøveemner af cementpasta, der opfugtes efter delvis udtørring, har langt mere frysbar vand end aldrig udtørrede prøveemner, [Bager & Sellevold,82], [Bager,84].

2.3.5 Kritisk vandmætningsgrad og frostbestandighed

Den kritiske vandmætningsgrad siger ikke i sig selv noget om materialets frostbestandighed. Dertil kræves en sammenligning med de påvirkninger materialet udsættes for i form af skiftende temperatur- og fugtforhold, udtrykt ved den aktuelle vandmætningsgrad af materialet, S_{AKT} , der er en funktion af tiden t . S_{AKT} er dels afhængig af de ydre påvirkninger, dels af materialets evne til at optage og binde fugt.

Frostbestandigheden defineres herefter som

$$F(t) = S_{f,KR} - S_{f,AKT}(t) \quad (2.7)$$

hvor indeks f angiver, at kun det frysbare vand medregnes, jf. definitionen på S_f .

Hvis $F > 0$ er materialet frostbestandigt. Af sikkerhedsgrunde kan det være relevant med en vis minimumværdi for F afhængig af, hvilke konsekvenser en overskridelse af den kritiske vandmætningsgrad får for det pågældende materiale, jf. figur 2.12. Med (2.7) er det da muligt at sammenligne forskellige materials frostbestandighed, når de udsættes for en given fugtbelastning, jf. [Fagerlund,77].

Frostbestandighed og levetid

At foretage en fuldstændig kortlægning af S_{AKT} i en konstruktions levetid er urealistisk. I stedet kan vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning, $S_{vac,kap}$ benyttes som tilnærmelse, [Fagerlund,72b], idet konstruktionen sjældent er udsat for direkte kontakt med vand i længere tid for derefter straks at udsættes for frysning, [Sandin,91]. Særlige forhold gør sig gældende ved vandrette konstruktioner som flisegange, parkeringsdæk mv., samt konstruktioner i kontakt med vand, fx dæmninger, havneanlæg, rensningsanlæg mv.

En egentlig prøvningsmetode baseret på eksistensen af kritiske vandmætningsgrader og anvendelsen af $S_{vac,kap}$ er beskrevet i [Fagerlund,77].

I [Sandström,91], [Carlsson,89] beskrives en prøvningsmetode for tegl, hvor prøveemnerne er forseglede, således at vandindholdet er konstant under frysning. Inden selve prøvningen begynder gennemfryses stenene ved at opbevare dem ved -10°C i 24 timer, hvorefter kun det yderste lag udsættes for vekslende frost-tø. Da der benyttes hele sten til prøvningen kan der dog ske en omlejring af vand lokalt i stenen.

For at sikre et veldefineret vandindhold skal prøveemnerne være så små som muligt, samtidig med at de er repræsentative for materialet, jf. bilag D [de Place,96b] og [Fagerlund,72b].

Levetiden mht. frostbestandighed er slut når

$$F = S_{f,KR} - S_{f,AKT} \approx S_{f,KR} - S_{f,vac,kap} = 0 \quad (2.8)$$

I [Fagerlund,80] vises, hvordan (2.8) og et udtryk for $S_{vac,kap}$ som funktion af tiden kan udnyttes til at skønne levetiden. I [Fagerlund,94] illustreres luftindblandings gavnlige effekt på levetiden.

2.3.6 Beregning af kritisk vandmætningsgrad

Da en præcis bestemmelse af kritisk vandmætningsgrad eksperimentelt er ret arbejdskrævende, er der opstillet udtryk til en indirekte/teoretisk bestemmelse af denne størrelse. Typisk sker det ved at udnytte viden fra allerede udførte forsøg, som så forsøges generaliseret i større eller mindre grad. Specielt har det været interessant at koble kritisk vandmætningsgrad sammen med parametre der i forvejen bestemmes, fx vand/cementforholdet. Tilsyneladende er interessen ikke den samme når det gælder tegl.

På basis af Powers & Brownyards model [1947] for cementpasta har Fagerlund [1973a] opstillet følgende teoretiske udtryk for ikke-luftindblandet beton:

$$S_{KR} = \frac{w/c - \alpha(0,19 + 0,25k)}{1,09(w/c - \alpha(0,19 + 0,25k)) + 1000l_0/C} \quad (2.9)$$

hvor w/c er vand/cementforholdet [kg/kg], α er hydratiseringsgraden, l_0 er luftindholdet af frisk beton [m^3/m^3], C er cementindholdet [kg/m^3] og $k = w_{nf}/w_{ne}$, dvs. forholdet mellem det ikke-frysable og det kemisk bundne, ikke-fordampelige vand.

I luftindblandede cementbaserede materialer, der er vedvarende i kontakt med vand, skal der tages hensyn til, at luftporerne langsomt fyldes, [Fagerlund,93a] m.fl. I [Fagerlund,79] beskrives principperne for, hvordan der kan tages hensyn til dette ved beregning af den kritiske vandmætningsgrad. Det kræver bl.a. kendskab til, hvordan de luftfyldte porers specifikke overflade ændres, efterhånden som porerne fyldes med vand.

Eksempler på *empiriske* udtryk til bestemmelse af kritisk vandmætningsgrad er vist i bilag B3 [de Place,96b].

2.4 Kritisk vandmætningsgrad - videre perspektiver

2.4.1 Diskussion af begrebet kritisk vandmætningsgrad

Hvorfor anvendes bestemmelsen af frostbestandighed vha. kritiske vandmætningsgrader så lidt ved frostprøvning?

Det har vist sig, 1) at metoden gør det muligt at holde *materialets* egenskaber adskilt fra *miljøets* påvirkning og derved kan benyttes til materiale-design, 2) at samme metode kan benyttes for *alle* former for porøse materialer.

På begge punkter har metoden tydelige fordele fremfor traditionel frostprøvning. Adskillelsen af materiale (udtrykt ved S_{KR}) og miljø (udtrykt ved S_{AKT}) gør det muligt at få betydelig mere viden om et givet materiale, end om det blot kan modstå en given standardiseret påvirkning.

Frostbestandigheden kan endda bestemmes hurtigt, idet 1) den kritiske vandmætningsgrad i princippet kan bestemmes vha. én frost-tø-cyklus, og i øvrigt er uafhængig af antallet af cykler, 2) miljøets påvirkning kan tilnærmes vha. frivillig vandopsugning, hvilket giver mulighed for at sammenligne materialer mht. levetid, jf. [Fagerlund,80].

Bestemmelse af kritisk vandmætningsgrad - fordele og ulemper

At begrebet kritisk vandmætningsgrad er så lidt benyttet ved praktisk bestemmelse af frostbestandighed skyldes først og fremmest, at en bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader er arbejdskrævende og derfor ikke uden videre er egnet til rutinecheck. En præcis bestemmelse kræver mange prøveemner, der hver især skal have et veldefineret vandindhold, og der skal foretages mange vejninger og målinger i løbet af forsøget, [Fagerlund,77] m.fl.

Er den kritiske vandmætningsgrad derimod bestemt, kan metoden benyttes til kontrol af den løbende produktion, fx på et teglværk, ved at sammenligne materialets evne til at opsuge vand kapillært med den kritiske vandmætningsgrad. Det forudsætter dog, at der ikke sker større ændringer i produktionen eller materialesammensætningen, eller at konsekvenserne af sådanne ændringer for den kritiske vandmætningsgrad kendes.

Metoden er egnet til laboratorieundersøgelser, hvor omfattende viden om frostbestandighed ønskes, eller i forbindelse med kalibrering af simple metoder. Den er desuden egnet i forbindelse med indførelse af nye luftindblandingsmidler, nye materialer, nye materialesammensætninger etc.

En eksperimentelt bestemt kritisk vandmætningsgrad vil altid være en *middelværdi* for det pågældende materiale. For inhomogene materialer kan denne middelværdi derfor være for upræcis til at karakterisere materialet - fx kan det være aktuelt at interessere sig ekstra meget for overfladelaget. Repræsentativitet og homogenitet er dog et generelt problem i forbindelse med prøvning af materialer; små prøveemner er ikke repræsentative, store prøveemner er for inhomogene.

Et andet problem som metoden har til fælles med traditionel frostprøvning, er koblingen mellem laboratorieforsøg og naturlig påvirkning. Ganske vist skelner metoden som nævnt mellem materialets og miljøets betydning for frostbestandigheden, men den *aktuelle* vandmætningsgrad må bestemmes tilnærmeth.

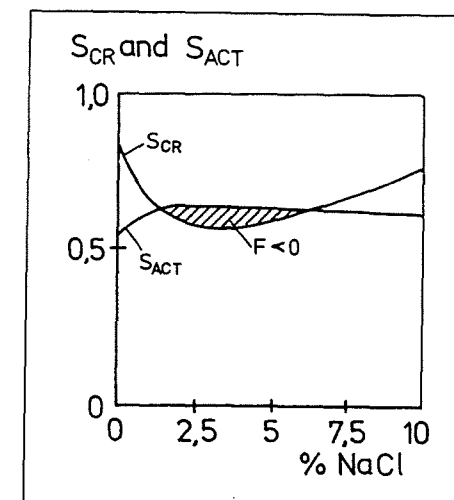
Der findes i dag beregningsmodeller for kombineret fugt- og varme-transport, fx [Pedersen,90], men sådanne beregninger kræver bl.a. detaljerede oplysninger om materialets diffusionsegenskaber og den naturlige påvirkning over en årrække. Det bliver ikke mindre kompliceret af, at et materiales nedbrydning ofte er et resultat af flere samtidigt virkende faktorer.

Ved direkte frostprøvning er ensidig påvirkning meget udbredt, da denne måde at belaste på efterligner naturlig påvirkning mest muligt, jf. afsnit 2.1.2. Alligevel fryses prøveemnerne fra alle sider, når den kritiske vandmætningsgrad bestemmes. Det skyldes først og fremmest, at det er afgørende at vandet ikke flyttes for meget rundt i materialet under frysningen.

Kritisk vandmætningsgrad og tørsalte

Eksistensen af kritiske vandmætningsgrader er påvist for *ren* frostpåvirkning, [Fagerlund,72b]. Imidlertid sker frostskafer i dag ofte som resultat af kombineret frost-tørsalt-påvirkning. Verbeck & Klieger [1957] har i sin tid påvist, at der tilsyneladende sker flest skader, når porøse materialer udsættes for en 2,5 % NaCl-opløsning kombineret med vekslende frost-tø.

Fagerlund [1976,91] opstiller en hypotese for, hvordan denne pessimale saltkoncentration kan forklares vha. S_{KR} . I følge denne hypotese har saltets tilstedeværelse to modsat rettede virkninger: 1) salt binder fugt, hvorved vandmætningsgraden S_{AKT} øges, 2) salt virker frysepunktsnedsættende, hvorved mængden af frysbar vand mindskes og den kritiske vandmætningsgrad S_{KR} tilsvarende øges. De to effekter antages at dominere ved lave henholdsvis høje saltkoncentrationer, jf. figur 2.13.



Figur 2.13. Illustration af hypotese for NaCl-koncentrationens effekt på kritisk og aktuel vandmætningsgrad, S_{CR} og S_{ACT} [Fagerlund,76].

Hidtidige forsøg har vist en meget *lille* effekt af saltkoncentrationen på S_{KR} og S_{AKT} , og hypotesen er derfor ikke eftervist endnu. Resultaterne forklares med, at saltet ikke i tilstrækkelig grad er trængt ind i prøveemnerne, [Fagerlund,92a]. Samtidig bekræfter undersøgelserne dog eksistensen af en pessimal saltkoncentration omkring 2,5 %.

At frost-tørsalt-problematikken er særlig kompliceret illustreres af, at der ikke en gang er enighed om, under hvilke forhold beton optager den største mængde saltopløsning; ved konstant lagring ved 20°C eller under vekslende frost-tø, [Fagerlund,92a], [Setzer & Hartmann,91a].

2.4.2 Videre perspektiver

Eksistensen af kritiske vandmætningsgrader er så central, at metoden i højere grad end i dag må kunne udnyttes til karakterisering af porøse materialers frostbestandighed. I den forbindelse må den store viden om porøse materialers egenskaber, og i hvilken grad egenskaberne påvirker frostbestandigheden, udnyttes.

Er det muligt at opstille en *beregningsmodel* til bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader på det grundlag? Den største fordel ved en sådan model vil være, at den overflødiggør det laboratoriekrevende arbejde ved bestemmelsen af kritiske vandmætningsgrader. Forinden skal der dog tilvejebringes en masse materialedata, og først derefter kan den komme til sin ret.

Det er vigtigt at indbygge alle væsentlige faktorer, uanset at der på flere punkter må gøres forenklinger, for at kunne foretage de nødvendige beregninger på nuværende tidspunkt. Modellen kan gøres mere avanceret og nøjagtig, efterhånden som fx frysemekanismer kan beskrives på en anvendelig matematisk form.

I afsnit 3 præsenteres en model, hvis udgangspunkt er, at forskelle i egentøjninger mellem vand/is og faststof i forbindelse med temperatur-sænkning fører til en spændingsopbygning, der i kritiske tilfælde fører til revneudvidelser.

For på basis af dette at opstille en model kræves viden om, 1) hvilken betydning revner har for styrken af et materiale, 2) hvilken indflydelse porestrukturen og tilstedeværelsen af is har på materialets E-modul, 3) hvordan de spændinger, som frysningen giver anledning til, bestemmes, 4) hvordan mængden af frysbart vand kan bestemmes ud fra porestørrelsesfordelingen.

I første omgang opstilles modellen for det tilfælde, at der er tale om *ren* frostpåvirkning af materialer *uden* luftindblanding og *uden* store revner, da det forenkler beregningerne mht. materialets homogenitet samt udviklingen af spændinger under frysningen. I den foreliggende rapport undersøges sådanne tilfælde. Beregninger på de simple tilfælde skal danne basis for at vurdere, hvorvidt modellen kan udbygges til at indregne fx betydningen af luftindblanding og tørsalte for frostbestandigheden.

3. Materialemechanisk model for frostnedbrydning

I det følgende præsenteres en teoretisk model for frostnedbrydning af porøse materialer. Modellen tager udgangspunkt i eksistensen af kritiske vandmætningsgrader, [Fagerlund,72b] og i L.Fuglsang Niensens arbejde med revnede materialer (revneteorien), [L.F.Nielsen,78,82b,88a], og sammensatte materialer (kompositteori), herunder porøse materialer, [L.F. Nielsen,82a,84,87,90a,93b].

Såvel revne- som kompositteori er centrale emner, idet 1) porøse materialer er sammensatte materialer (kompositmaterialer), 2) det er revneudbredelse der bevirker, at materialet mister sin sammenhæng og styrke.

Afsnit 3.1 beskriver modellen og dens virkemåde rent kvalitativt. Modellens forudsætninger præsenteres i afsnit 3.2 og diskuteres i afsnit 3.5, bla i relation til afsnit 2. Som baggrund gennemgås de materiale-mekaniske grundbegreber i bilag A [de Place,96b]. En oversigt over de indførte parametre gives i afsnit 3.3, mens afsnit 3.4 beskriver anvendelsen af modellen. Også anvendelsen diskuteres i afsnit 3.5.

Hvorfor tale om revner ?

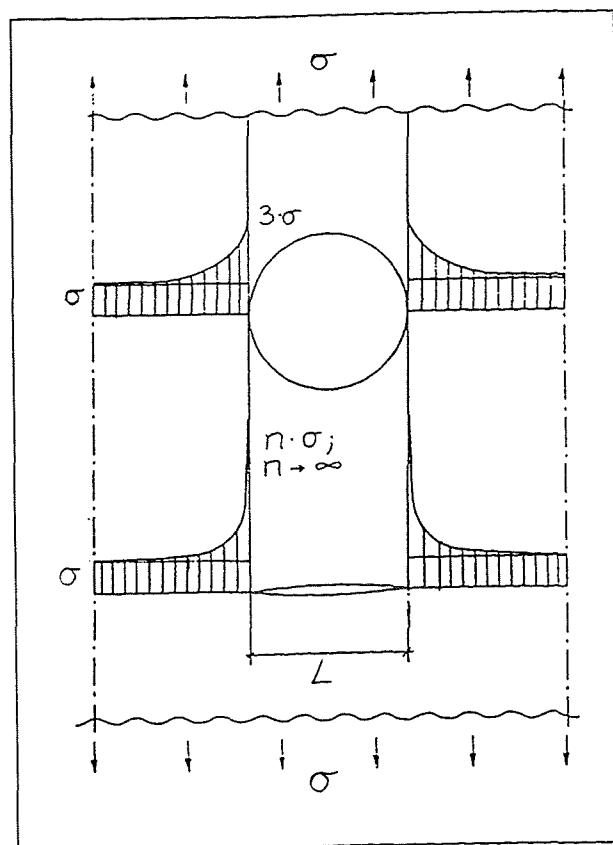
Alle bygningsmaterialer er født med fejl. Med fejl menes alle former for inhomogeniteter, revner, urenheder, indespærret luft osv. Inhomogeniteter er en naturlig del af materialet, men har ikke desto mindre betydning for materialets holdbarhed og mekaniske egenskaber. Egentlige fejl i form af revner, indespærret luft m.m., kan opstå i forbindelse med produktionen, fx hvis ler til teglsten tørres for hurtigt eller hvis beton ikke vibreres tilstrækkeligt. Sådanne fejl bør naturligvis undgås.

Alle former for fejl medvirker til, at der opstår spændingskoncentrationer i materialet, når det belastes. Det skyldes, at de enkelte faser pga. forskellige E-moduler ikke er lige gode til at overføre spændinger. Spændingskoncentrationerne opstår i faseovergange, fx mellem faststof og porer, eller i selve faststoffasen, fx mellem sten og mørtel, jf. bilag B1.

Problemet er særlig udtalt i overgange mellem faststof og porer, idet alle spændinger nødvendigvis må ledes uden om poren. Størrelsen af disse spændingskoncentrationer er meget afhængig af porernes form, jf. figur 3.1. På samme måde har "udformningen" af luftbobler betydning for holdbarhed og styrke, [Gutmann,88] (omtalt i afsnit 2.1.1).

Den belastning, der resulterer i spændingskoncentrationer, kan stamme fra materialets funktion rent statisk, men kan fx også skyldes temperatur- og/eller fugtbevægelser i selve materialet. Det er den sidstnævnte form for belastning, der er interessant i denne sammenhæng.

Begreberne revner og porer benyttes meget i afsnit 3. Det kan diskuteres, hvornår et hul i et materiale skal kaldes en revne, og hvornår det skal kaldes en pore, se fx [Fagerlund,72a]. I denne sammenhæng er det ikke afgørende, idet alle typer af huller vil influere på materialets egenskaber, dog er det vigtigt at kunne karakterisere hullets form, jf. figur 3.1.



Figur 3.1. Spændingskoncentration som funktion af poreform, [Hillerborg, 78b]. En uendelig stor skive påvirkes af en ydre, jævnt fordelt spænding, σ . I et område på begge sider af poren/revnen er spændingen lokalt større end σ . Hvor meget større afhænger af poreformen. Teoretisk set bliver spændingen uendelig stor ved spidsen af en helt spids revne.

3.1 Kvalitativ beskrivelse af modellen

3.1.1 Udgangspunkt for revneudvikling

Et porøst materiale, hvor porefasen indeholder en mængde frysbar vand som efterhånden fryser til is, betragtes. Hvad er det egentlig, der får materialet til at gå i stykker? Afsnit 2 har vist, at det ikke er så enkelt at beskrive. Det kan konstateres, at skader ses som revneudvidelser, der er en følge af en spændingsopbygning i materialet; tryk i porerne, træk i faststoffet.

I den foreliggende model forklares spændingsopbygningen ved forskelle i egentøjninger mellem materialets faststoffase og porefase som følge af frysningen af vand. Denne forklaring anvendes også af Podvalnyi [1976] og Kralj et al [1991], som beskrevet i afsnit 3.5.4.

Egentøjninger (fra engelsk: eigenstrain) er betegnelsen for ikke-elastiske tøjninger, fx termisk udvidelse eller faseomdannelse (frysning) jf. [Wang et al, 88]. Forskelle i egentøjninger skyldes i denne forbindelse først og fremmest, at vand udvider sig 9 % ved frysning. Den spændingsopbygning som denne egentøjningsforskel fører til, kan resultere i revneudvidelser og i sidste ende bevirke, at materialet fuldstændig mister sin styrke og stivhed og falder fra hinanden.

Et afgørende punkt i den materialemechaniske model er bestemmelsen af disse egentøjninger, og hvordan egentøjningerne omsættes til reelle tøjninger og spændinger.

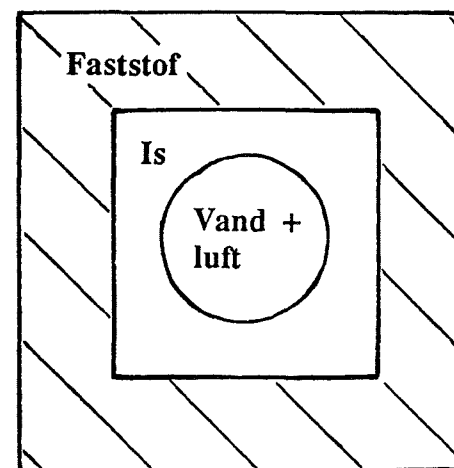
Når vand fryser til is sker der to ting, 1) en faseomdannelse, 2) en udvidelse. Faseomdannelsen bevirker, at isen til forskel fra vandet har en stivhed. Det er kombinationen af faseomdannelsen og udvidelsen der bevirker, at der opstår spændinger, som søges overført til omgivelserne, dvs. faststoffet.

I det følgende sammenlignes porefasen med en pappskive med hul i midten, jf. figur 3.2. Pappet symboliserer isen, der har en vis stivhed, hullet er vand + luft, der ingen stivhed har. Bemærk, at isen på dette tidspunkt kun har undergået faseomdannelsen, udvidelsen kommer først, når pappskiven lægges i vand.

Hvis pappskiven lægges i vand, vil den udvide sig til en bestemt størrelse, uanset hvor stort hullet er. Det skyldes, at der ikke er noget der forhindrer pappskiven i at udvide sig, svarende til en (ideel) situation, hvor porefasen i et porøst materiale kan udvide sig frit. Egentøjningen vil da være uafhængig af porøsiteten. At kilden til udvidelse af pappskiven ikke er den samme som den udvidelse der sker, når vand fryser til is, er ikke interessant i denne sammenhæng.

I praksis vil porefasens udvidelse til en vis grad forhindres af faststoffasen. En uendelig stiv ramme repræsenterer faststoffet. Spændingsopbygningen illustreres nu tydeligt, idet udvidelsen af pappskiven vil forhindres af den stive ramme.

Pappskivens stivhed (E-modul) vil være afgørende for, i hvor høj grad egentøjningerne omdannes til spændinger, og E-modulen er ikke uafhængig af hullets størrelse (porøsiteten), hvilket vil fremgå af afsnit 3.2.3.



Figur 3.2. Model af porøst materiale med én stor pore, repræsenteret ved en indrammet pappskive med et hul i midten. Rammen (skraveret) er faststoffet, pappet er isen, hullet er vand + luft.

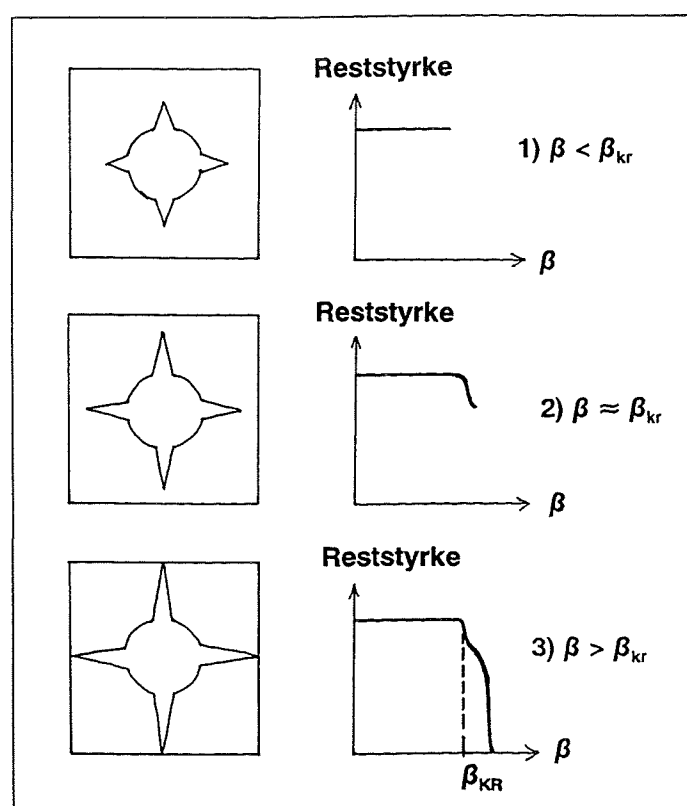
Et rigtigt poresystem er naturligvis alt for kompliceret til at kunne beskrives ved en pappskive med hul i midten, og i praksis er egentøjningerne derfor ikke uafhængige af porøsiteten. Indsnævring og udvidelser i poresystemet, vandets fordeling i poresystemet og porevæggens udseende har stor betydning for, hvor effektivt tøjningerne kan overføres som spændinger. Kun ved et fyldt henholdsvis tomt poresystem kan tøjnin-

gerne let bestemmes. I de mellemliggende tilfælde må egentøjningerne skønnes, hvilket omtales nærmere i afsnit 3.2.4.

3.1.2 Beskrivelse af revneudvikling

Revneudviklingen i forbindelse med frysning af vand i porøse materialer vil være afhængig af, hvor meget frysbart vand der er til stede. Begreberne *poretryk* og *porestyrke* indføres. Poretryk er det tryk, der opstår i poresystemet som følge af frysningen af vand. Porestyrken er det største poretryk, der lokalt kan modstås, uden at revnerne udvides. Porestyrken udtrykker således trækstyrken lokalt i materialet, jf. at tryk i poresystemet giver træk i faststoffet.

Tre forskellige situationer studeres, jf. figur 3.3. De tre situationer dækker tilsammen alle tilfælde i forbindelse med revneudvikling som beskrevet i den opstillede model for frostnedbrydning.



Figur 3.3. Illustration af revneudvikling og kobling til begrebet kritisk vandmætningsgrad. Poresystemet repræsenteres ved en revnepore, jf. afsnit 3.2.2. β er vandmætningsgraden, β_{kr} er den kritiske vandmætningsgrad.

1) Mængden af frysbart vand er så lille, at det tryk, den dannede is udøver på porevæggene, kan modstås.

2) Spændingskoncentrationerne bliver så store, at porestyrken overskrides. Revnerne udvider sig og materialet har nået en kritisk tilstand, materialestyrken aftager. Samtidig aflastes materialet, da revneudvidelsen har gjort det mere fleksibelt, E-modulet er mindsket. Efter en vis revneudvidelse kan der derfor opstå en balance mellem reduceret styrke og tryk.

3) Trykket bliver så stort, at revneudviklingen løber løbsk. Der sker en fuldstændig frostnedbrydning og materialets styrke falder til nul. Den kritiske vandmætningsgrad er overskredet.

ad 1) Det er kun den del af vandet, der fryser til is, som vil bevirke et poretryk. Selv om vandmætningsgraden er høj, kan poretrykket være relativt lavt, hvis kun en lille del af vandet er frysbart ved den pågældende temperatur. Porestørrelsesfordelingens betydning for mængden af frysbart vand skal derfor indregnes.

ad 2) Tilstedeværelsen af revner og porer fører til spændingskoncentrationer i et materiale udsat for belastning. Spændingskoncentrationerne er særlig udtalt ved revnespidser, jf. figur 3.1 og bilag A1 [de Place,96b]. Følgerne af et for stort poretryk er derfor størst ved revnespidserne.

En udvidelse af revnerne betyder, at faststoffasen får sværere ved at hænge sammen og spændingerne koncentrerer. Tærsklen for, hvor stort et poretryk, der kan modstås, sænkes. Porestyrken mindskes med andre ord.

Til gengæld vil revneforlængelsen give en mere løst sammenhængende faststoffase, dvs. fasen bliver mere eftergivende over for belastninger uanset om disse stammer fra mekanisk belastning eller som følge af ændrede temperatur- og/eller fugtforhold. E-modulet mindskes. Med et lavere E-modul vil der overføres færre spændinger fra porefasen til faststoffet, dvs. materialet aflastes.

Dette illustrerer hvor vigtigt det er at kunne beskrive materialets opbygning i faser (kompositteori).

Der er altså to modsat rettede virkninger af revneudvidelsen: 1) reduceret porestyrke, 2) reduceret poretryk som følge af det reducerede E-modul. Hvis en bestemt revneudvidelse bevirker, at poretrykket aftager mere end porestyrken, således at der atter opstår balance mellem poretryk og porestyrke, vil revnedannelsen gå i stå. En mere eller mindre stabil situation er da opnået ved en reduceret materialestyrke.

ad 3) Hvis mængden af frysbart vand er meget stor, vil forskellen mellem poretryk og porestyrke blive så stor, at det ikke på noget tidspunkt kan udbalanceres, selv ved en kraftig revneudvidelse med deraf følgende mindre poretryk. Revnerne vil i den situation forlænges til de når hinanden, således at materialet fuldstændigt mister sin sammenhæng og styrken falder til nul. Normalt mindskes styrken eller det tilhørende E-modul meget pludseligt, som illustreret i afsnit 2.3.4.

3.2 Forudsætninger for modellen

Ved opstillingen af den materialemechaniske model er gjort en række forudsætninger, der præsenteres i det følgende.

I sin nuværende form forudsætter modellen *homogene* materialer udsat for *ren* frostpåvirkning. I denne sammenhæng tales om homogenitet på *makroskopisk* niveau. Det sker i erkendelse af, at byggematerialer på *mikroskopisk* niveau er meget inhomogene, jf. indledende bemærkninger til afsnit 3.

For at kunne tale om homogenitet på makroskopisk niveau forudsættes i første omgang, at materialerne hverken indeholder grove revner eller

kunstig indblandet luft. Både denne forudsætning, samt kravet om, at der ikke er tørsalte tilstedes sker for at forenkle spændingsberegninger m.v.

Endelig forudsættes en begrænset temperaturgradient for at kunne tale om middelværdier for spændinger og tøjninger samt en jævn fordeling af vandet i poresystemet. Denne forudsætning er i overensstemmelse med Fagerlund [1972b,77].

Nedbrydning af porøse materialer som følge af vands frysning ses som revneudvidelser. Det er derfor vigtigt at kunne regne på revners betydning for materialets styrke (afsnit 3.2.1).

Da det i praksis er uoverkommeligt at tælle revner og måle revnestørrelser i et porøst materiale, defineres parametre til beskrivelse af porestrukturen, under ét kaldet fasegeometri, således at revnernes betydning tilnærmet kan udtrykkes ved porøsitet eller poreform (afsnit 3.2.2).

Normalt er et porøst materiale karakteriseret ved, at porefasen ingen stivhed har. Frysning af vand bevirker imidlertid, at porefasen får en vis stivhed, hvilket der skal tages hensyn til (afsnit 3.2.3).

Beregningsmodellen bygger på, at spændinger opstår, fordi faserne (faststof og porer) ikke kan udvide sig frit i forhold til hinanden, jf. forskelle i egentøjninger. Poresystemets udseende har betydning for, hvor effektivt disse tøjningsforskelle omsættes til spændinger (afsnit 3.2.4).

Med udgangspunkt i gennemsnitsværdier for spændinger og tøjninger i faststof- og porefase beregnes spændinger og tøjninger for materialet som helhed (afsnit 3.2.5). Disse spændinger skal sammenlignes med materialets styrke, for at vurdere om der vil ske en revneudvidelse i den givne situation.

Materialets porestørrelsesfordeling samt sammenhængen mellem porestørrelse og frysepunktstemperatur har betydning for, hvor meget vand der er frysbar ved en given temperatur og dermed for forløbet af spændingsudviklingen (afsnit 3.2.6).

3.2.1 Revnet materiales styrke

Den generelle teori for styrken af et materiale med én revne, baseret på de såkaldte enkeltrevnemodeller, er nærmere beskrevet i bilag A1 [de Place,96b]. Kort fortalt kan den praktiske trækstyrke, σ_{cr} , for et materiale med én enkelt revne belastet i revnens plan, relateres til den teoretiske styrke, $\sigma_{cr,0}$, for det samme materiale helt uden revner ved

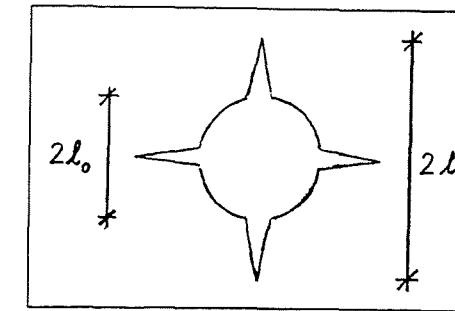
$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{cr,0}} = \frac{\sqrt{l_0}}{\sqrt{l}} \quad (3.1)$$

hvor l og l_0 er den halve revnelængde af den aktuelle revne henholdsvis en karakteristisk længde i materialet ¹.

For et porøst bygningsmateriale kan en typisk poreradius benyttes som mål for l_0 . l skal i så fald defineres som vist i figur 3.4.

¹ $\sigma_{cr,0}$ betegnes i bilag A1 [de Place,96b] som σ_{max}

3.2 Forudsætninger for modellen

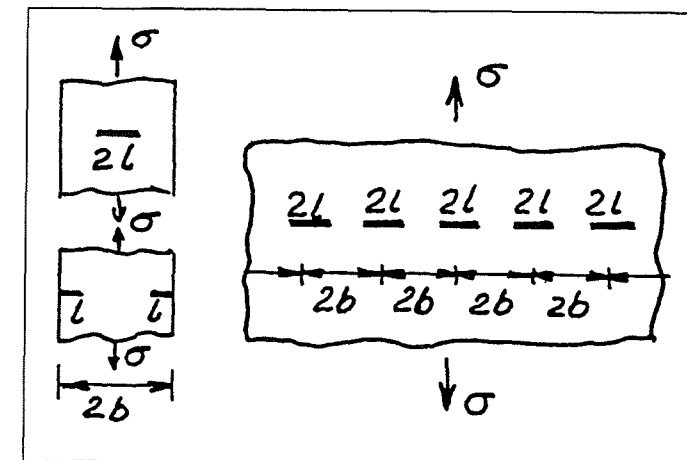


Figur 3.4. Illustration af revnelængde l og karakteristisk længde l_0 i et porøst materiale, hvor porestrukturen modelleres vha. den viste revnepore. Se også figur 3.7.

(3.1) er en god tilnærmelse, når $\sigma_{cr} < 0,4 \cdot \sigma_{cr,0}$, der opfyldes af de fleste traditionelle bygningsmaterialer, [L.F.Nielsen,86]. For $\sigma_{cr} > 0,4 \cdot \sigma_{cr,0}$ må (3.1) erstattes af (A.6), jf. bilag A1.

For at kunne udnytte enkeltrevnemodellerne på virkelige materialer fyldt med revner, modelleret i figur 3.5, indføres interaktionsfaktoren F . Jo tættere revnerne er på hinanden, desto mere mærker de hinanden, udtrykt ved et større F . Samtidig mindskes styrken og der gælder derfor

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{cr,0}} \approx F^{-1} \frac{\sqrt{l_0}}{\sqrt{l}} \quad (3.2)$$



Figur 3.5. Multirevne- samt bæltmodeller, [L.F.Nielsen,86]. Et materiale med mange revner, der er placeret i samme plan ved siden af hinanden eller med lille afstand mellem revne og kant henholdsvis kantrevner. Materialet belastes med en jævnt fordelt spænding σ vinkelret på revnernes plan.

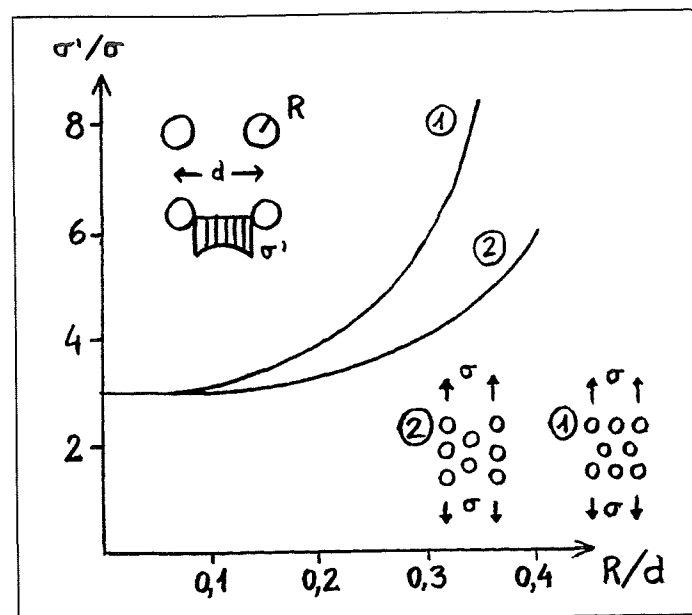
Figur 3.6 viser betydningen af interaktion mellem naborevner (porer) som funktion af porekonfiguration og -afstand. Den relative spænding σ'/σ afbildes som funktion af forholdet mellem poreradius R og poreafstand d . σ er den ydre spænding, σ' er spændingen ved revne"spidsen".

For $R/d < 0,1$ er $\sigma'/\sigma = 3$ svarende til, at porerne ikke kan mærke hinanden, jf. figur 3.1.

Teorien omkring F er ikke særlig veludviklet, men (3.3) har vist sig at beskrive F ganske godt, [L.F.Nielsen,88b]. Betydningen af l og b ses af figur 3.5.

$$F\left(\frac{l}{b}\right) = \frac{1}{\sqrt{1 - (l/b)^2}} \quad (3.3)$$

(3.3) gælder for $l/b \leq 1$, dvs. at revnelængden skal være mindre end revneafstanden. Hvis revnerne ligger for tæt, vil de påvirke hinanden så meget, at antagelsen om en spændingsfordeling med en flydezone ved revnespidsen - bilag A1 [de Place,96b] - ikke længere holder. Revnerne kan ligge i to eller tre planer vinkelret på hinanden uden at det får konsekvenser for (3.3), [L.F.Nielsen,90a].



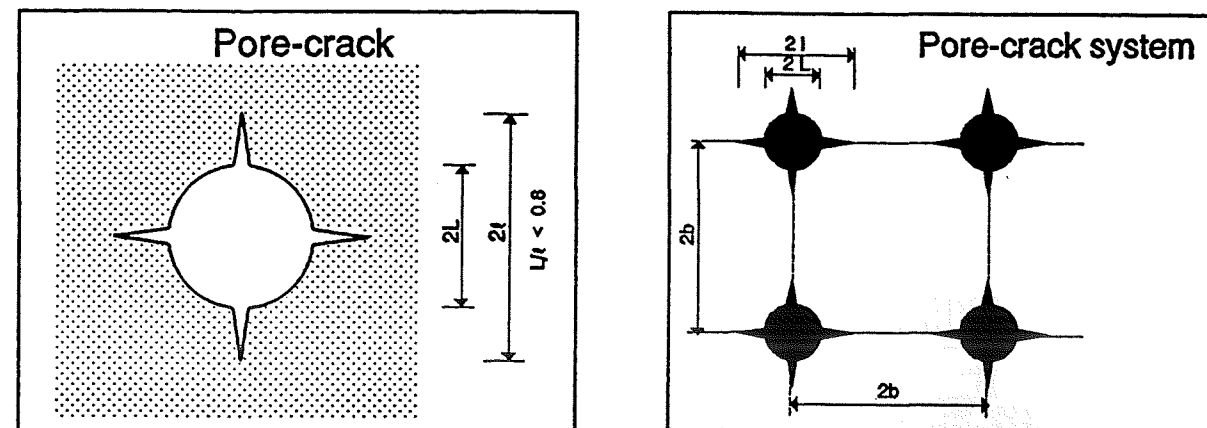
Figur 3.6. Relativ spænding ved revne"spidsen" som funktion af poreafstand R i forhold til porediameter d , vist for to forskellige porekonfigurationer af cylinderformede porer, efter [Penttala,89]. σ er ydre, jævnt fordelt spænding, σ' er største spænding lokalt.

Størrelserne l og b er ret upraktiske at arbejde med i praksis. I afsnit 3.2.2 indføres i stedet porøsiteten c og den kritiske porøsitet c_d . Fremover tales derfor først og fremmest om porøsitet og porøse materialer, men revneaspektet er fortsat et centralt punkt, jf. figur 3.7.

I bilag B1 [de Place,96b] refereres til andre studier af porøse materials styrke og revneudvikling, hvor der typisk tages udgangspunkt i et specifikt materiale. Der undersøges bl.a. i hvilken grad revneudviklingen kan styres ved sammensætningen af et materiale, eller hvordan styrke og/eller stivhed af et porøst materiale kan beskrives ud fra kendskab til de indgående faser, herunder begreber som porøsitet og porestørrelsesfordeling.

3.2.2 Modellering af porer og fasegeometri

Et materiale modelleret vha. isotropt fordelte revneporer, som vist i figur 3.7, betragtes. Revnerne har til formål at sikre, at revneteorien - som den er beskrevet ovenfor samt i bilag A1 - kan anvendes. Det forudsætter, at $L/l < 0,8$, hvor L er poreradius og l er afstand fra poremidte til revnespids, [L.F.Nielsen,87,93a].



Figur 3.7. Porøst materiale, modelleret som isotropt fordelte revneporer, [L.F.Nielsen,93a]. $L/l < 0,8$ kræves for at kunne benytte revneteorien ved spændingsberegning.

Revneporens porøsitet c antages at være koncentreret i poredelen af revneporen og bestemmes tilnærmelsesvis som $(L/b)^{2.5}$, hvor b er halv poreafstand, jf. figur 3.7. Poren er vist som en cirkel (kugle), men har i praksis en mere kompliceret form - også ud over tilstedeværelsen af revner, der udgår fra poren. At porer i praksis ikke har form som en cirkel (kugle) tages der bl.a. højde for ved at indføre parameteren B ved beregning af tøjninger, jf. afsnit 3.2.4.

At porerne er isotropt fordelte betyder i denne sammenhæng, at de danner et kubisk net og griber ind i hinanden. Porerne må derfor ikke opfattes som værende isoleret fra hinanden.

Kritisk porøsitet

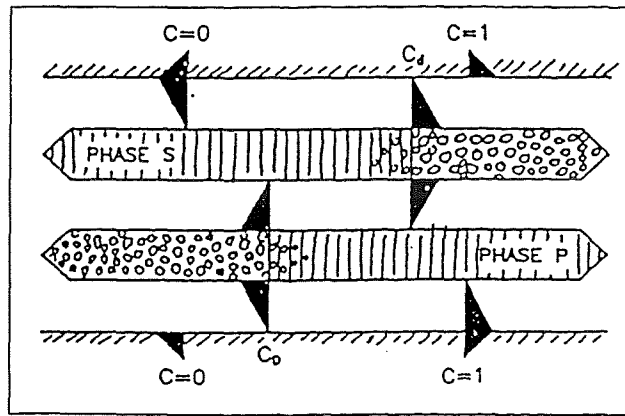
Ved høje porøsiteter (≥ 40 à 50 %) vil materialet rent fysisk ikke længere kunne beskrives ved en model, som vist i figur 3.7. Poresystemet bliver meget komplekst efterhånden som flere og flere porer vokser sammen.² Beregninger viser imidlertid, at et givet materiale mister sin styrke og sit E-modul fuldstændigt ved én og samme porøsitet, kaldet den *kritiske porøsitet* eller c_d , [L.F.Nielsen,90a]. Derfor benyttes resultaterne generelt, på trods af den rent fysiske uoverensstemmelse.³

² En revnepore placeres i en kasse med sidelængden $2x$. En porøsitet på 50 % svarer til $L \approx 0,8x$. Udnyttes kravet $L/l < 0,8$ for en revnepore, fås $2l > 2L/0,8 = 2,5L = 2x$. Med en porøsitet på 50 % vil revnen nå fra kant til kant i kassen. Grænsen på 50 % svarer derfor til kravet om $l/b \leq 1$ for formel (3.3).

³ Se næste side

Begge faser i det porøse materiale, porefasen og faststoffasen, kan optræde i henholdsvis diskret⁴ og kontinuert⁴ form; eventuelt i begge former samtidigt. c_d og den tilsvarende størrelse c_D betegner overgangen fra kontinuert til diskret fase, jf. figur 3.8. For nemheds skyld angives en skarp overgang; reelt er der tale om en vis overgangszone, [L.F.Nielsen, 93a].

Bentz & Garbozci [1991a] opererer også med en kritisk porøsitet (kaldet *percolation threshold*), nærmest svarende til c_D . Det sker i forbindelse med opstillingen af en computermodel til simulering af cements hydratisering og dermed udviklingen af et poresystem, jf. bilag B2 [de Place,96b].



Figur 3.8. Fasegeometri. Definition af kritiske porøsiteter, c_d og c_D , [L.F.Nielsen,90d]. Kugler symboliserer diskret geometri, lodrette streger kontinuert geometri. P betegner porefase, S (solid) betegner faststoffase.

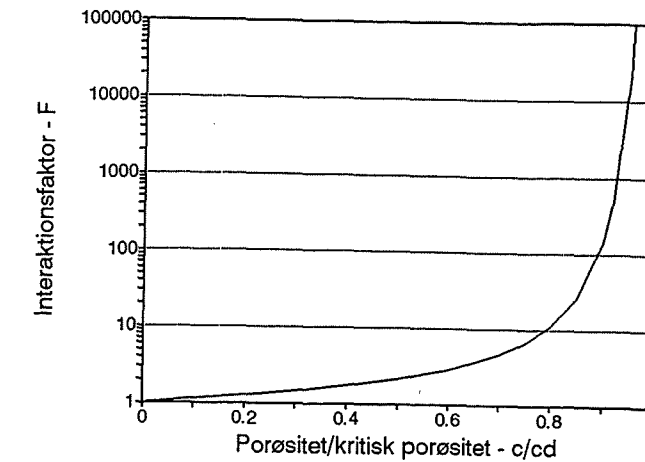
For et materiale, der kan beskrives ved figur 3.7 og figur 3.8, kan interaktionsfaktoren F udtrykkes som funktion af porøsiteten c og den kritiske porøsitet c_d , jf. (3.4), der illustreres i figur 3.9. (3.4) er mere praktisk at håndtere end (3.3).

$$F\left(\frac{c}{c_d}\right) = \exp\left(\frac{c}{c_d} \frac{1 - 0.5c/c_d}{1 - c/c_d}\right) \quad (3.4)$$

Ved udledning af (3.4) er forudsat $c_D = 0$, dvs. at porefasen først ved forsvindende porøsitet mister sin sammenhæng. Selv ved ganske lave porøsiteter antages således at alle porer er tilgængelige for vand, hvilket synes at være en rimelig antagelse for materialer som tegl og ikke-luftindblandet beton af almindelig kvalitet.

3 Et antal sammenlignelige betoner fremstillet af de samme råmaterialer betragtes. Betonene har forskellig sammensætning og porøsitet og antages at have samme c_d . Faststoffet i beton består af tilslag/sten, samt pasta/mørtel uden porer. For at opnå en højporøs beton med et sammenhængende og homogent faststof, må mængden af pasta/mørtel øges og mængden af tilslag/sten mindskes. Det forklarer, hvorfor den kritiske c_d sagtens være højere end svarende til pastaens/mørtlens volumenandel af en aktuel beton.

4 diskret = ikke sammenhængende, kontinuert = sammenhængende



Figur 3.9. Interaktionsfaktor F som funktion af relativ porøsitet c/c_d , efter [L.F.Nielsen,88a]. Ved hjælp af F tages højde for at et virkeligt materiale, sammenholdt med enkeltrevnemodeller, indeholder mange revner, der vil kunne "mærke" hinanden.

En luftindblandet beton vil derimod have et system af isolerede porer - ud over det naturlige poresystem.

Poreform

Ud over at tale om diskret og kontinuert porefase er det nødvendigt at se på formen af porerne for at kunne give en tilstrækkelig præcis beskrivelse af porestrukturen.

For forsvindende porøsitet ($c \approx 0$) henholdsvis forsvindende mængde faststoffase ($c \approx 1$), indføres formfaktorerne μ_0 og μ'_0 til beskrivelse af poreformen.

μ_0 aftager med stigende kompleksitet af porefasen, jf. tabel 3.1. Det kan også udtrykkes ved, at en lavere μ_0 svarer til en porestruktur, der er mere revneformet. En tilsvarende kobling findes for μ'_0 .

Desuden indføres formfunktionerne μ og μ' der betegner poreformen henholdsvis formen af faststoffasen for vilkårlig porøsitet. I overensstemmelse med begreberne μ_0 , μ'_0 , c_d og c_D gælder

$$\mu_0 = \mu(0) \quad \mu'_0 = \mu'(1) \quad (3.5)$$

$$\mu(c_d) = 0 \quad \mu'(c_D) = 0 \quad (3.6)$$

(3.6) svarer til, at porefasen henholdsvis faststoffasen er så kompleks, at faststoffasen henholdsvis porefasen har mistet sin sammenhæng.

Ved at forudsætte en lineær sammenhæng mellem μ og c henholdsvis μ' og c og udnytte (3.5) og (3.6), kan formfunktionerne μ og μ' udtrykkes ved

$$\mu = \mu_0 \frac{c_d - c}{c_d} \quad \mu' = \mu'_0 \frac{c - c_D}{1 - c_D} \quad (3.7)$$

Tabel 3.1. Kobling mellem porestruktur og formfaktor, μ_0 [L.F.Nielsen,86].

Dominerende geometri af porefase (fase 2) ved $c \approx 0$	Formfaktor μ_0
bulede plader, skaller	lav
indhyllede netværk	0 - 0,4
jævne plader	middel
forgreninger, filigran	0,3 - 0,7
indhyllede lommer	høj
kompakte klumper	0,6 - 1

En lineær sammenhæng er indtil videre en tilstrækkelig præcis beskrivelse⁵. I øvrigt har afvigelser fra en lineær sammenhæng tidligere vist sig ikke at have særlig indflydelse på resultatet af beregninger med modellen på cementpasta (beton), [de Place,93b].

Forudsættes desuden fasesymmetri omkring porøsiteten c_{SYM} , hvor $c_{SYM} = \frac{1}{2} \cdot (c_d + c_D)$, kan udtrykket for μ' omskrives til

$$\mu' = \mu_0 \frac{c - c_D}{c_d} \quad (3.8)$$

jf. bilag A2 [de Place,96b]. Fasesymmetri udtrykker, at de to faser populært sagt er hinandens spejlbillede⁶.

Ved hjælp af udtrykket for μ i (3.7) kan (3.4) omskrives til

$$F = \exp\left(\frac{1 - \Gamma^2}{2\Gamma}\right) ; \Gamma = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.9)$$

Interaktionsfaktoren F kan altså udtrykkes vha. porøsitet (3.4) såvel som ved poreform (3.9). Indsættes (3.9) i (3.2) fås

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{cr,0}} = \exp\left(\frac{\Gamma^2 - 1}{2\Gamma}\right) \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{l}} \quad (3.10)$$

hvor l_0 er erstattet af L i overensstemmelse med figur 3.7.

Poresystemet er defineret således, at L/l tilnærmet kan udtrykkes vha. formfunktionen μ

$$\mu = \left(\frac{L}{l}\right)^{2.5} \quad (3.11)$$

hvor L er poreradius og l er afstanden fra poremidte til revnespids, jf. figur 3.7.

5 Se næste side

6 Se næste side

Jo længere revner, desto lavere værdi har formfunktionen, svarende til mere "kringlede" porer, hvilket udnyttes i beregningsalgoritmen, [L.F. Nielsen,88c,89,93a].

(3.11) vil i princippet også kunne anvendes på revneporer, hvor selve poren har en anden form end den cirkulære. Det giver imidlertid problemer at finde et generelt anvendeligt mål for "radius" af denne pore, svarende til L . Desuden vil det stadig være forholdet L/l der afgør, i hvor høj grad revnerne har betydning for styrken.

Af andre eksempler på udtryk for poreformen kan nævnes Nakamura et al [1991], der udtrykker poreformen vha. omkreds og areal.

Mulighederne for at beskrive poreformer, og porestruktur i øvrigt, er blevet forbedret med indførelsen af computere til billedbehandling. På det seneste ses også fraktalgeometri forsøgt anvendt. Med fraktalgeometri er det fx muligt at beskrive hvor meget en given linie afviger fra en ret linie. I bilag B2 [de Place,96b] refereres til en række anvendelser af disse metoder og værktøjer.

3.2.3 E-modul for porefase delvist fyldt med is

Generelt er E-modulet af et kompositmateriale, dvs. et sammensat materiale, afhængig af, hvordan de indgående faser er opbygget rent geometrisk. Jo mere præcist fasegeometrien kan beskrives, desto mere nøjagtigt kan E-modulet bestemmes, jf. bilag A2. Ofte benyttes kuglemodeller⁷ ved beskrivelsen af porøse materials stivhed, jf. bilag B1.

Et porøst materiale er et specialtilfælde af et kompositmateriale, karakteriseret ved at $E_p = 0$, hvor P står for porefase. For et porøst materiale gælder at

$$\frac{E_0^*}{E_s} = \mu \frac{1 - c}{\mu + c} \quad (3.12)$$

hvor E_0^* og E_s er E-modulet for det porøse materiale henholdsvis faststoffasen, og μ er poreformen ved porøsiteten c , jf. (3.7). (3.12) er illustreret i figur 3.10, med $E_s = 60$ GPa og $c_d = 0,75$.

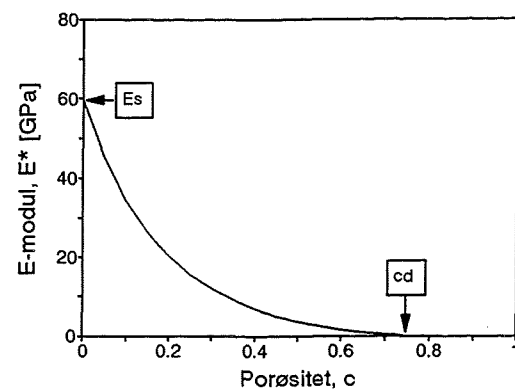
I det følgende betragtes et porøst materiale med et kontinuert poresystem uanset porøsiteten, dvs. $c_D \approx 0$. Tegl og ikke-luftindblandet beton af almindelig kvalitet regnes blandt disse. Materialet er isotropt, dvs. har samme fysiske egenskaber i alle retninger. Før frysning indeholder porefasen vand og luft og har ingen stivhed ($E_p = 0$).

Efter frysning indeholder porefasen desuden is og har derfor en vis stivhed, afhængigt af, hvordan isen er placeret i poresystemet. Materialet kan nu ikke længere opfattes som et traditionelt porøst materiale karakteriseret ved, at porefasen ingen stivhed har, jf. (3.12).

5 Ikke-lineære sammenhænge mellem μ og c kan udtrykkes vha. eksponenten M , jf. symbollisten samt [L.F.Nielsen,90d] m.fl.

6 Et antal tegl fremstillet af samme råmateriale men med forskellig porøsitet betragtes. Fasesymmetri udtrykker da, at porer og faststof gradvis bytter plads rent geometrisk, efterhånden som porøsiteten øges.

7 En kuglemodel består af et kugleformet tilslag/pore omgivet af en matrix med form som en kugleskal.



Figur 3.10. E-modul, E_0^* , som funktion af porøsiteten, c . Illustration af (3.12), hvor $\mu = \mu_0(1 - c/c_d)$, jf. (3.7). $\mu_0 = 0,3$.

I stedet opfattes den oprindelige porefase nu selv som et porøst materiale (indices * og P) med luft og ikke-frosset vand som porefase (index P) og is som faststof (index I).

For dette "nye" porøse materiale omskrives (3.12) til

$$\frac{E_P^*}{E_I} = \frac{A\beta_{f,tot}}{A+1-\beta_{f,tot}} \quad (3.13)$$

hvor porøsiteten af systemet is \Leftrightarrow vand+luft udtrykkes ved $1 - \beta_{f,tot}$. $\beta_{f,tot}$ betegner mængden af frysbar vand regnet i forhold til det totale porevolumen.

A erstatter μ i (3.12) og beskriver hvordan is, ikke-frosset vand og luft fordeler sig i porerne, jf. nedenfor.

Betydningen af, hvordan vandmætningsgraden defineres behandles nærmere i afsnit 3.5. Der tages udgangspunkt i, at $\beta_{f,tot}$ i modsætning til Fagerlunds definition på vandmætningsgraden, S_f (afsnit 2.3.2), betegner mængden af frysbar vand regnet i forhold til det totale porevolumen.

Porefasens E-modul E_P^* relateres til faststoffets E-modul E_S ved det såkaldte effektive stivhedstal, n_{eff} ⁸, for porefasen:

$$n = n_{eff} = \frac{K_P^*}{K_S} = \frac{K_I}{K_S} \frac{A\beta_{f,tot}}{A+1-\beta_{f,tot}} \quad (3.14)$$

(3.14) er generaliseret til at beskrive tre-dimensionale forhold ved at indføre det såkaldte bulk-modulus $K_i = E_i/(1-2\nu_i)$, hvor ν_i er Poisson-tallet.

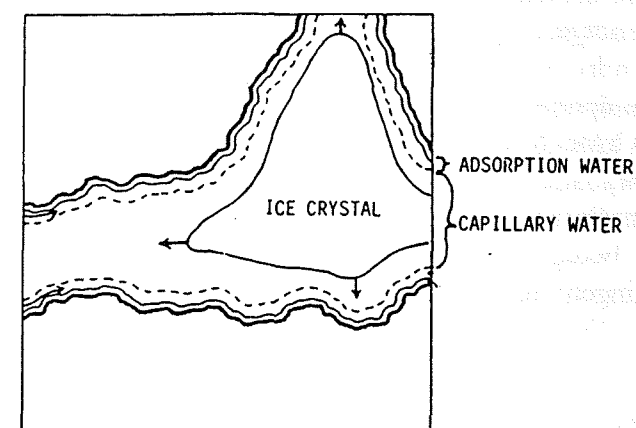
Fordeling af is, vand og luft i poresystemet

Parameteren A i (3.13) og (3.14) beskriver hvordan is, ikke-frosset vand og luft fordeler sig i porerne, jf. figur 3.11. En lav værdi af A svarer til, at luft og ikke-frosset vand koncentrerer sig i områder med en kompleks

porestruktur. $A = 0,8$ à 1 betyder, at vand og luft er samlet i næsten kugleformede klumper inde i et sammenhængende "is-skelet".

I litteraturen findes undersøgelser af, hvordan is er "placeret" i poresystemet. Der er dog primært tale om undersøgelser af is i indblandede luftporer, [Grasenick & Soretz,82], [Monteiro et al,89], der ikke kan sammenlignes med det naturlige poresystem.

Fastlæggelsen af A baserer sig derfor bl.a. på det faktum, at en stor del af vandet i det naturlige poresystem er bundet til porevægge eller i små porer, specielt i finporøse materialer. Den del af det samlede poresystem, hvor det ikke-frosne vand befinder sig, må derfor forventes at have en forholdsvis kompliceret form, jf. figur 3.11. Dette er især tilfældet ved høje vandmætningsgrader, hvor luftmængden er lille og fordelingen af denne af samme grund har begrænset betydning.



Figur 3.11. Illustration af poresystem med en iskrystal omgivet af ikke-frosset vand, dels i form af kapillært bundet vand, dels vand adsorberet til porevæggen, [Nieminen & Romu,88]. Konstanten A i (3.13) skal udtrykke formen af den del af poresystemet der ikke indeholder is.

A må formodes at være temperaturafhængig for finporøse materialer, jf. at fordelingen af is og vand vil ændres efterhånden som frysningen skrider frem, hvorved E-modulet ændres. Afhængigheden skønnes dog ikke at være større end at en konstant er et godt bud på nuværende tidspunkt.

Meget små eller store værdier af A (tæt på 0 eller 1), svarende til at vand og luft kun befinder sig i revner eller i nærmest kugleformede områder af poresystemet, synes ikke at være realistisk. Dette er ikke uden betydning, idet beregninger med modellen viser, at med mindre A er tæt på 0 eller 1, kan en vis usikkerhed ved fastlæggelsen af A accepteres, uden at det får afgørende betydning for den kritiske vandmætningsgrad, jf. afsnit 6.8.4.

⁸ I et poresystem uden is er $n_{eff} = 0$

3.2.4 Tøjning af porøst materiale under frysning

Beregningsmodellen bygger på, at forskelle i egentøjninger mellem porefase og faststoffase ved frysning af vand fører til spændinger i materialet, jf. afsnit 3.1.

Egentøjninger er en fællesbetegnelse for ikke-elastiske tøjninger. Hvor stor en del af tøjningerne der effektivt medvirker til spændingsopbygningen afhænger af, 1) om porestrukturen indeholder mange flaskehalse, 2) hvor "ru" porevægge materialet har, 3) hvordan vandet er fordelt i poresystemet. Derfor indføres begrebet *effektive egentøjninger* (indeks *eff*).

Effektiv, fri egentøjning

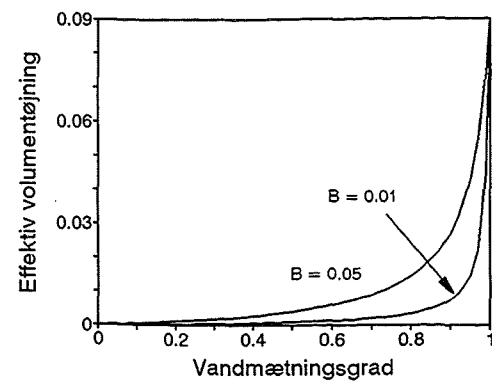
Egentøjningen af porefasen kendes kun eksakt for en vandmætningsgrad på 0 henholdsvis 1. I de mellemliggende tilfælde må egentøjningerne skønnes, da porestrukturens indflydelse er nærmest umulig at bestemme teoretisk. Det er en kendsgerning, at frostskader kan opstå selv ved vandmætningsgrader mindre end den teoretiske ($1/1,09 = 0,917$), jf. afsnit 2.2. Udtryk for sammenhængen mellem egentøjning og vandmætningsgrad er opstillet, hvor bl.a. dette forhold tages i betragtning, [L.F.Nielsen, 88c,91a,93a].

Den *effektive, frie* egentøjning af porefasen, $\alpha_{P,eff}$ udtrykkes ved (3.15), jf. [L.F.Nielsen,93a]. α betegner volumentøjning. Ved små volumentøjninger vil længdetøjningen være ca. 1/3 af denne. Udtrykket for $\Gamma_{P,eff}$ er vist i figur 3.12.

$$\alpha_{P,eff} = \alpha_{P,T} + \Gamma_{P,eff} ; \Gamma_{P,eff} = \frac{B\beta_{f,tot}}{B+1-\beta_{f,tot}}\Gamma_P \quad (3.15)$$

At tøjningen $\alpha_{P,eff}$ er en såkaldt *frie* tøjning betyder, at den svarer til en spændingsfri udvidelse af porefasen.

Der skelnes i (3.15) mellem tøjning som følge af temperaturændringer, $\alpha_{P,T} = \Delta\alpha_{P,T}\Delta T$, og tøjninger som følge af frysning, $\Gamma_{P,eff} \Delta\alpha_{P,T}$ er den specifikke temperaturudvidelseskoefficient for is, ΔT er en temperaturændring. $\Gamma_P = 0,09$ jf. vands udvidelse ved frysning.



Figur 3.12. Effektiv volumentøjning, $\Gamma_{P,eff}$, som funktion af vandmætningsgrad $\beta_{f,tot}$ og B , jf. (3.15). $\Gamma_P = 0,09$.

B er en konstant, hvis størrelse afhænger af porestrukturens udseende. Formålet med at indføre B er at skabe en kobling mellem den cirkulære form af poren, vist i figur 3.7, og den virkelige porestruktur. Jo mere kringlet poresystem og jo flere flaskehalse desto højere B . B kan derfor kaldes en "effektivitetsfaktor". Betydningen af B illustreres i figur 3.12.

I litteraturen kan findes enkelte andre eksempler på hensyntagen til poresystemets udformning, fx [Nakamura et al,91], jf. bilag B2 [de Place, 96b].

$\beta_{f,tot}$ udtrykker mængden af frysbar vand, regnet i forhold til det *totale* porevolumen.

Den frie egentøjning af *faststoffasen* α_S udtrykkes som den frie, temperaturafhængige udvidelse $\alpha_{S,T} = \Delta\alpha_{S,T}\Delta T$.

Materialets reelle tøjning

I et virkeligt porøst materiale, der består af såvel faststof som porer, forhindrer faststoffet, at porefasen kan udvide sig frit, hvorved spændinger opstår.

Materialets volumentøjning ϵ_{kk}^* kan, jf. [L.F.Nielsen,91a,93a], udtrykkes ved (3.16), hvor $\Delta\alpha = \alpha_{P,eff} - \alpha_S$. Indeks *kk* markerer, at ϵ er en volumentøjning, jf. symbollisten. Stivhedstallene k^* og $n = n_{eff}$ fås af (3.21) og (3.14). (3.16) bygger på ligningssystemet i (3.18), afsnit 3.2.5.

$$\epsilon_{kk}^* - \alpha_S = \Delta\alpha \frac{1/k^* - 1}{1/n - 1} \quad (3.16)$$

Ved at indsætte (3.15) i (3.16) fås

$$\frac{B\beta_{f,tot}}{B+1-\beta_{f,tot}} = \frac{1/\Gamma_P [(\epsilon_{kk}^* - \alpha_S) \frac{1/n-1}{1/k^*-1} + \alpha_S - \alpha_{P,T}]}{\Delta\alpha} \quad (3.17)$$

der kan benyttes til at bestemme konstanten B . Som volumentøjning ϵ_{kk}^* og vandmætningsgrad $\beta_{f,tot}$ indsættes sammenhørende eksperimentelt bestemte værdier.

$\epsilon_{kk}^* - \alpha_S$ udtrykker materialets *volumentøjning* rensset for bidrag fra faststoffets lineære, temperaturafhængige tøjning (deformation).

Bemærk at *dilatation*, som den er defineret i afsnit 2.2.5, er den tilsvarende *længdetøjning*.

Eksperimentelt bestemte tøjninger vil ligeledes ofte være *længdetøjninger*, således også i dette projekt. Disse skal så omregnes til *volumentøjninger* før B kan fastlægges.

Der må i praksis forventes en vis spredning på værdien af B . Den aktuelle værdi af B vil afhænge af, under hvilke omstændigheder de eksperimentelle værdier for volumentøjning og vandmætningsgrad er bestemt, dvs. hvilken minimumtemperatur og hvilke vandmætningsgrader, der er benyttet.

Ligesom for (3.13) kan valget af udtryk for vandmætningsgraden ($\beta_{f,tot}$) i (3.15) og (3.17) diskuteres. I afsnit 3.5.3 illustreres, at det rent praktisk giver problemer at benytte $\beta_{f,tot}$ ved optegning af en ε - β -sammenhæng for et materiale med et stort indhold af ikke-frysbart vand.

3.2.5 Spændingsopbygning under frysning

Ligningssystem til spændingsberegning

Tøjningens og E-modulets indflydelse på opbygning af indre spændinger i faserne er illustreret med papskive-analogien, afsnit 3.1.1, uanset at der er tale om en forenklet model. L.F.Nielsen [1991a] benytter et ligningssystem fra den lineære elasticitetsteori for at opstille udtryk til bestemmelse af spændinger. Der opstilles en ligevægtsligning samt en kompatibilitetsligning⁹ og to konstitutive ligninger som vist i (3.18).

$$\begin{aligned} c\sigma_{P,kk} + (1-c)\sigma_{S,kk} &= 0 \\ c\varepsilon_{P,kk} + (1-c)\varepsilon_{S,kk} &= \varepsilon_{kk}^* \\ \sigma_{P,kk} &= 3K_P(\varepsilon_{P,kk} - \alpha_{P,eff}) \\ \sigma_{S,kk} &= 3K_S(\varepsilon_{S,kk} - \alpha_S) \end{aligned} \quad (3.18)$$

$\sigma_{P,kk}$ og $\sigma_{S,kk}$ samt $\varepsilon_{P,kk}$ og $\varepsilon_{S,kk}$ udtrykker middelspænding og -tøjning i pore- og faststoffase. ε_{kk}^* er materialets totale volumentøjning. Indeks kk angiver at der er tale om volumetrisk spænding og tøjning, jf. symbolisten. Gennemsnitsværdier er markeret ved understregning.

$\alpha_{P,eff}$ og α_S er porefasens og faststoffasens frie volumetriske udvidelse, c er porøsiteten.

$K_i = E_i/3(1-2\nu_i)$ er bulk modulus, der er indført fordi der regnes med volumetriske spændinger og tøjninger. ν_i er Poisson-tallet for fase i .

Ligevægtsbetingelsen - øverste ligning i (3.18) - angiver, at materialet ikke er påvirket af en ydre kraft, spændinger opstår *udelukkende* pga. forhold inde i materialet (materialekombinationen faststof/vand). Dette er en ret forenklet måde at betragte spændingsudviklingen under frysning på.

Modellen er ganske vist udviklet til at beskrive betydningen af revneudbredelse for et materiales styrke og stivhed generelt, [L.F.Nielsen, 91a,93a], men der er ikke umiddelbart kobling mellem ligningssystemet i (3.18) og frysemekanismerne omtalt i afsnit 2.2. I øjeblikket findes ikke udtryk, der gør det muligt at beregne spændinger, som de opstår i følge frysemekanismerne. Dette diskuteres nærmere i afsnit 3.5.4.

Bestemmelse af spændinger i materialet

Hill [1963] har opstillet et udtryk, kaldet *Hill-relationen*, hvormed gennemsnitstøjning henholdsvis -spænding af de indgående faser kan

⁹ Kompatibilitetsligning = betingelse for forenelighed

udtrykkes vha. fasernes E-moduler og den spænding, som materialet belastes med. (3.19) viser Hill-relationen i omskrevet form for spændinger og tøjninger i porefasen, jf. [L.F.Nielsen,91a]. Tilsvarende udtryk kan opstilles for faststoffasen (indeks S).

$$\sigma_{P,kk} = \frac{1/k^* - 1}{c(1/n-1)} \sigma_{kk}^* ; \varepsilon_{P,kk} = \frac{1-k^*}{c(1-n)} \varepsilon_{kk}^* \quad (3.19)$$

σ_{kk}^* og ε_{kk}^* er materialets middelspænding og -tøjning. $k^* = K^*/K_S$ og $n = n_{eff} = K_P^*/K_S$ er stivhedstal for selve materialet henholdsvis for porefasen.

Ud fra (3.18) og (3.19) opstilles (3.20) for spænding i porefasen $\sigma_{P,kk}$ og et tilsvarende udtryk for $\sigma_{S,kk}$, jf. [L.F.Nielsen,74,82a,91a]. Materialets volumentøjning, ε_{kk}^* , udtrykkes ved (3.16).

$$\sigma_{P,kk} = -3K_S \Delta\alpha \frac{c(1/n-1) - (1/k^* - 1)}{c(1/n-1)^2} \quad (3.20)$$

hvor $\Delta\alpha = \alpha_{P,eff} - \alpha_S$. $\alpha_{P,eff}$ fås af (3.15). $\alpha_S = \Delta\alpha_{S,T} \Delta T$. Stivhedstallet k^* for materialet fås af

$$k^* = \frac{K^*}{K_S} = \frac{E^*}{E_S} = \frac{n+\theta[1+c(n-1)]}{n+\theta-c(n-1)} \quad (3.21)$$

jf. bilag A2 [de Place,96b]. Stivhedstallet n for porefasen fås af (3.14), dvs.

$$n = n_{eff} = \frac{K_P^*}{K_S} = \frac{E_P^*}{E_S} = \frac{E_I}{E_S} \frac{A\beta_{f,tot}}{A+1-\beta_{f,tot}} \quad (3.22)$$

Generelt kan benyttes vilkårlige Poisson-tal for de to faser. I denne sammenhæng benyttes $\nu_P = \nu_S = 0,2$, fordi denne værdi er dækkende for de fleste porøse bygningsmaterialer. Desuden forenkler det beregningerne voldsomt og letter dermed den praktiske brug af beregningsmodellen, hvilket illustreres i [L.F.Nielsen,90d].

Det betyder bl.a., at $n_{eff} = K_P^*/K_S = E_P^*/E_S$ og $k^* = K^*/K_S = E^*/E_S$, hvilket er udnyttet i (3.21) og (3.22).

For is ses værdier af Poisson-tallet på ca. 0,3, [Sanderson,88], [Kralj, Pande & Middleton,91], dog angives kun værdier for *ren* is i store klumper. Selv for is benyttes derfor en værdi på 0,2 i denne sammenhæng.

Geometrifunktionen θ i (3.21) bestemmes af

$$\begin{aligned} \theta &= 0,5 [H + \sqrt{H^2 + 4n(1-\mu_0)}] \\ H &= \mu_0(1 - c/c_d(1-n)) \end{aligned} \quad (3.23)$$

jf. bilag A2 [de Place,96b]. $n = n_{eff}$. θ udtrykker under ét fasegeometriens betydning for materialets E-modul og styrke for en vilkårlig fasegeometri.

θ udtrykkes udelukkende vha. parametre for porefasen, c , c_d , μ_0 og n_{eff} ved at udnytte, at materialerne er fasesymmetriske.

Porestyrke og materialestyrke

(3.20) der udtrykker spændingen i den enkelte pore, skal kobles til materialestyrker (σ_{cr} , $\sigma_{cr,0}$) beskrevet i afsnit 3.2.1 og bilag A1. I [L.F. Nielsen,88c,93a] vises, hvordan porestyrken $\sigma_{P,cr}$ kan relateres til materialets trækstyrke σ_{cr} ved

$$\frac{\sigma_{P,cr}}{\sigma_{cr}} = f^{-1} \quad (3.24)$$

Porestyrken udtrykker den største spænding, der lokalt kan modstås uden at der sker en revneforlængelse, dvs. den "lokale" trækstyrke af materialet ved frysning til en given temperatur, mens trækstyrken σ_{cr} refererer til materialet i optøet tilstand, dvs. før eller efter frysning.

Faktoren f udtrykker poreformens betydning for opbygningen af poretryk ved frysning. $0 \leq f \leq 1$. Pt. regnes med, at isen kan trænge helt ind i revnerne og udøve et tryk, dvs. den værst tænkelige situation hvad spændingsopbygning angår.

Hvis revneporen i figur 3.7 udelukkende består af revner, fås $f = 1$ og at poretryk er lig trækstyrke. Jo mere revneporen ligner en cirkulær pore, desto større poretryk kan den modstå, udtrykt ved et lille f . Se også symbollisten og [L.F.Nielsen,88c,89,93a].

Bemærk at poreformen som sådan, udtrykt ved μ og μ_0 , ikke ændres ved at variere f , der udelukkende relaterer til isens indtrængning i en pore.

Der foretages i projektet enkelte beregninger, hvor det undersøges, hvilken betydning det har for den kritiske vandmætningsgrad, hvis revnerne kun er delvis virksomme ved opbygningen af poretryk, jf. afsnit 6.8.7.

3.2.6 Porestørrelse og frysepunktstemperatur

For spændingsopbygning og E-modul spiller det en stor rolle, hvor stor en del af vandet, der er frysbar (eller rettere frosset) ved en given temperatur. Om vandet er frosset eller ej afhænger af porestørrelsen - jo mindre poreradius desto stærkere er vandet bundet og desto sværere har det ved at fryse. Af hensyn til beregningerne er det derfor vigtigt ikke blot at erkende denne sammenhæng, men også beskrive den rent matematisk.

En teoretisk sammenhæng mellem frysepunktstemperatur og porestørrelse kan opstilles, [Fagerlund,73d] m.fl. Forenklet kan sammenhængen udtrykkes ved

$$d = d(T) = - \frac{\eta}{\ln\left(\frac{T + 273}{273}\right)} \text{ [nm]} \quad (3.25)$$

hvor d er porediameteren og T temperaturen [$^{\circ}\text{C}$], [L.F.Nielsen,93a]. Det antages, at vand i porer med en diameter mindre end d ikke er frosset ved temperaturen T . η er en konstant. Afhængig af hvilken reference der

benyttes, svarer den teoretiske sammenhæng til $\eta = 0,5$ à $1,5$, [Helmuth, 60], [Fagerlund,73d,93b], [Zech & Setzer,89], [Bache,91] m.fl.

I praksis kan en yderligere frysepunktssænkning forekomme. Det skyldes, at en del af de store porer kun er tilgængelige via små porer, jf. den såkaldte "flaskehals-effekt", således at en temperatur svarende til poreradius af de små porer skal nås, før der også kan ske frysning i de store porer. Hvis størrelsen af denne effekt er kendt, kan der tages højde for den ved at ændre værdien af η i (3.25).

Porestørrelsesfordelingens betydning for mængden af frysbar vand $\beta_{f,tot}$ udtrykkes ved

$$\beta_{f,tot} = \beta(T) = \begin{cases} \beta_w - z(d) & \text{for } z(d) \leq \beta_w \\ 0 & \text{for } z(d) > \beta_w \end{cases} \quad (3.26)$$

hvor β_w er porefyldningsgraden, der udtrykker forholdet mellem det samlede vandindhold og det totale porevolumen. T er temperaturen [$^{\circ}\text{C}$]. $z(d)$ er det tilhørende relative porevolumen, der udtrykker mængden af ikke-frysbar vand, jf. sammenhængen mellem porediameter d og temperatur T .

Mængden af frysbar vand $\beta_{f,tot}$ regnes ligesom β_w i forhold til det totale porevolumen.

$z(d)$ er en funktion af porestørrelsen og bestemmes af

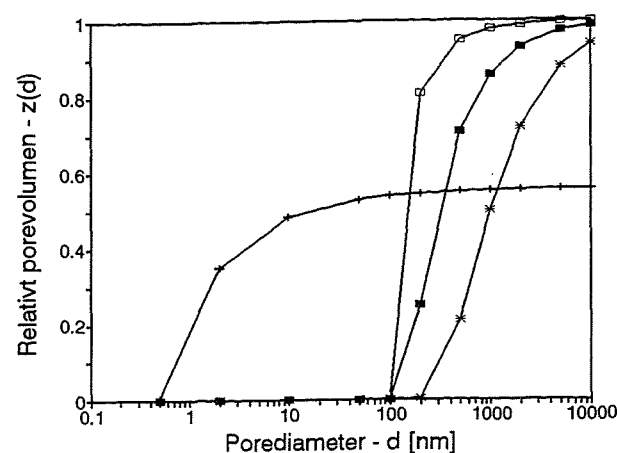
$$z(d) = z_M^X ; X = \frac{(d_M/d_f)^\phi - 1}{(d/d_f)^\phi - 1} \quad (3.27)$$

hvor ϕ er en fordelingsparameter, d_f er mindste porediameter og d_M er en porediameter ved et karakteristisk relativt porevolumen z_M , jf. [L.F.Nielsen,93a]. d er porediameteren svarende til en frysepunktstemperatur T , jf. (3.25). Parametrene ϕ , d_f , d_M , z_M kan bestemmes ved at indlægge et bedste skøn gennem en eksperimentelt bestemt porestørrelsesfordeling.

Figur 3.13 viser eksempler på, hvilken betydning de enkelte parametre har for udseendet af porestørrelsesfordelingen. De benyttede værdier af parametrene er angivet i tabel 3.2.

Tabel 3.2. Værdier af parametre til figur 3.13.

Serie		■	+	*	□
d_f	[nm]	100	0,4	100	100
d_M	[nm]	300	15	1000	300
ϕ		1	-0,5	1	1
z_M		0,5	0,5	0,5	0,9



Figur 3.13. Eksempler på tænkte pore størrelsesfordelinger bestemt vha. parametrene ϕ , d_I , d_M og z_M , formel (3.27). Værdier for parametrene angives i tabel 3.2.

3.3 Parameteroversigt

En række forskellige parametre er indført og defineret i afsnit 3.2 for at kunne bestemme kritiske vandmætningsgrader vha. materiale mekanik med den viden om porøse bygningsmaterialer der eksisterer i dag. I visse tilfælde må de indførte parametre indtil videre skønnes, eller bestemmes indirekte.

Således mangler der metoder til en kvantitativ beskrivelse af porestrukturen, hvilket gør det vanskeligt at omsætte den eksisterende viden til matematiske udtryk, jf. afsnit 3.2.3 og 3.2.4.

Tilsvarende baserer spændingsberegninger sig på gennemsnitsværdier for pore- og faststoffase, jf. afsnit 3.2.5, og på et ligningssystem, der ikke umiddelbart kan kobles til frysemekanismer, beskrevet i afsnit 2.2.

Intentionen med at udtrykke de forskellige parametre på matematisk form er at kunne benytte modellen som et designredskab, uanset hvor velfunderet den bagvedliggende viden er. Det er tanken at udnytte sådanne modelberegninger i forbindelse med valg af materialer til konstruktioner af forskellig art. Derfor er det tilstræbt at inddrage alle de faktorer, der er af betydning for frostnedbrydning, uanset at der på flere punkter benyttes forholdsvis simple løsninger.

Det er tidligere nævnt, at modellen i sin nuværende form *ikke* medregner betydningen af tørsalte og kunstig luftindblanding. Det er temmelig kompliceret at inddrage disse faktorer og desuden omsonst, så længe modellen ikke er testet i forhold til ren frostprøvning. Efterhånden som de forskellige mekanismer og faktorer kan beskrives mere raffineret, kan de simple løsninger skiftes ud. På nuværende tidspunkt kan modellen derfor opfattes som en "pilot" model.

I tabel 3.3 angives de parametre, der skal fastlægges værdier for, ved forsøg eller tabelopslag. For hver parameter angives i hvilken del af afsnit 3.2 de omtales første gang. Efterfølgende beskrives kort, hvilken funktion de enkelte parametre har i modellen. I afsnit 4.2 beskrives det forsøgsprogram som opstilles for at kunne bestemme parametrene.

3.3 Parameteroversigt

Tabel 3.3. Oversigt over parametre i modellen.

parameter	beskrivelse	indført i afsnit
<i>Geometri og pore størrelsesfordeling</i>		
c, c_d, c_D	porøsitet, kritiske porøsiteter	3.2.2
μ_0	poreform (revners andel)	3.2.2
$z = f(\phi, d_I, d_M, z_M, d(T))$	pore størrelsesfordeling	3.2.6
ϕ, d_I, d_M, z_M	parametre der benyttes til at opnå en matematisk beskrivelse af z	3.2.6
η	konstant der kobler poreradius og frysepunktstemperatur	3.2.6
<i>Styrke og stivhed</i>		
E_I, E_S	elasticitetsmodul for is samt for faststoffase	3.2.3
f_I	materiallets trækstyrke	3.2.1 ¹
A	is i poresystemet	3.2.3
<i>Egentøjninger</i>		
$\Delta\alpha_{p,T}, \Delta\alpha_{s,T}$	specifikke temperaturudvidelseskoefficienter	3.2.4, 3.2.5
Γ_P	udvidelseskoefficient ved frysning	3.2.4
B	indsnævringer og ujævnheder i poresystemet	3.2.4

1 I afsnit 3.2.1 betegnet som σ_{cr} .

De fleste parametre må bestemmes ved forsøg. Dog kan der benyttes tabelværdier for isens E-modul E_I og dens specifikke temperaturudvidelseskoefficient $\Delta\alpha_{p,T}$, jf. [Sanderson,88], [Wang et al,88], [Bache,91] m.fl. Vands udvidelseskoefficient ved frysning Γ_P er som bekendt 0,09. Også den specifikke temperaturudvidelseskoefficient for faststoffet $\Delta\alpha_{s,T}$ kan bestemmes ved tabelopslag, men bestemmes i dette projekt eksperimentelt.

Geometri og pore størrelsesfordeling

Til denne gruppe hører porøsiteten c , den kritiske porøsitet c_d og formfaktoren μ_0 . Såvel formfaktoren som forholdet mellem porøsitet og kritisk porøsitet har betydning for materialets styrke og E-modul. Jo tættere c/c_d er på 1 og jo mere revneformede porerne er, desto lavere er styrken og E-modulet. En lavere styrke betyder, at en kritisk spændingstilstand hurtigere opnås, mens et lavere E-modul betyder, at materialet er mere "fleksibelt" og ikke i samme grad omdanner tøjninger til spændinger.

Den kritiske porøsitet c_d er indført for at tage højde for den situation, at porøsiteten ikke behøver at være 1 før styrke og stivhed er reduceret til 0. Det er tilstrækkeligt, at faststoffasen har mistet sin sammenhæng.

Tilsvarende betyder $c < c_D$, at porefasen *kun* består af isolerede porer. c_D kan sættes til 0 for materialer som tegl og beton uden kunstig luftindblanding, da porefasen kan regnes sammenhængende, selv ved lave porøsiteter.

Til denne gruppe af parametre hører også porestørrelsesfordelingen, der har betydning for, hvor meget frysbar vand materialet indeholder ved en given temperatur mindre end 0°C. Fire parametre er indført for at kunne udtrykke en eksperimentelt bestemt porestørrelsesfordeling matematisk, så den kan anvendes til beregninger.

Konstanten η er indført for at koble porestørrelse og frysepunkts-temperatur og samtidig tage hensyn til, at sammenhængen mellem disse størrelser ikke er entydig.

Styrke og stivhed

I en beregningsmodel, hvor frostnedbrydning beskrives ved revne-udbredelse i porøse, delvist revnede materialer, er styrke og stivhed centrale parametre. Revnedannelsen som følge af vands frysning til is, skyldes et indre poretryk, der resulterer i trækspændinger i materialet. Derfor er materialets *trækstyrke* interessant.

Ændringer i styrken som følge af revneudvidelse udtrykkes ved ændringer i *interaktionsfaktoren* F , der beskriver i hvor høj grad de enkelte revner kan mærke hinanden. F kan udtrykkes tilnærmelsesvis vha. porøsitet og kritisk porøsitet, jf. afsnit 3.2.2.

Ændringer i materialets E-modul kan ikke udtrykkes på samme enkle måde, idet E-modulet i modsætning til trækstyrken afhænger af, hvorvidt porefasen har en vis stivhed eller ej. Materialets E-modul må derfor udtrykkes vha. E-moduler for is og faststof, porøsiteten c og formfaktoren μ_0 , samt en parameter, A , der beskriver den geometriske fordeling af is og ikke-frosset vand + luft i porefasen.

Egentøjninger

Modellen tager udgangspunkt i, at forskelle i fasernes egentøjninger fører til spændinger og revneudvidelse og dermed til nedbrydning. Egentøjninger er fasernes frie udvidelser som følge af temperaturændringer og faseomdannelse (frysning). Derfor indgår fasernes specifikke temperatur-udvidelseskoefficienter og vands udvidelseskoefficient ved frysning i modellen.

Udseendet af poresystemet har betydning for, hvor stor en del af egentøjningerne, der effektivt medvirker til spændingsopbygning, hvilket udtrykkes ved konstanten B . Jo mere kringlet poresystem og jo flere flaskehalse, desto sværere har overskydende vand ved at komme væk. Jo hurtigere opbygges spændinger, og desto større er B .

Andre parametre

Ud over de i tabel 3.3 angivne parametre, opererer modellen med to regnetekniske parametre, β_w og *fract fr*. Deres funktion beskrives i afsnit 3.4.1.

3.4 Anvendelse af beregningsmodellen

Efter at beregningsmodellens forudsætninger og de indgående parametre er præsenteret, beskrives i det følgende, hvordan beregningen forløber og hvordan resultaterne afbildes.

3.4.1 Beskrivelse af beregningsalgoritmen

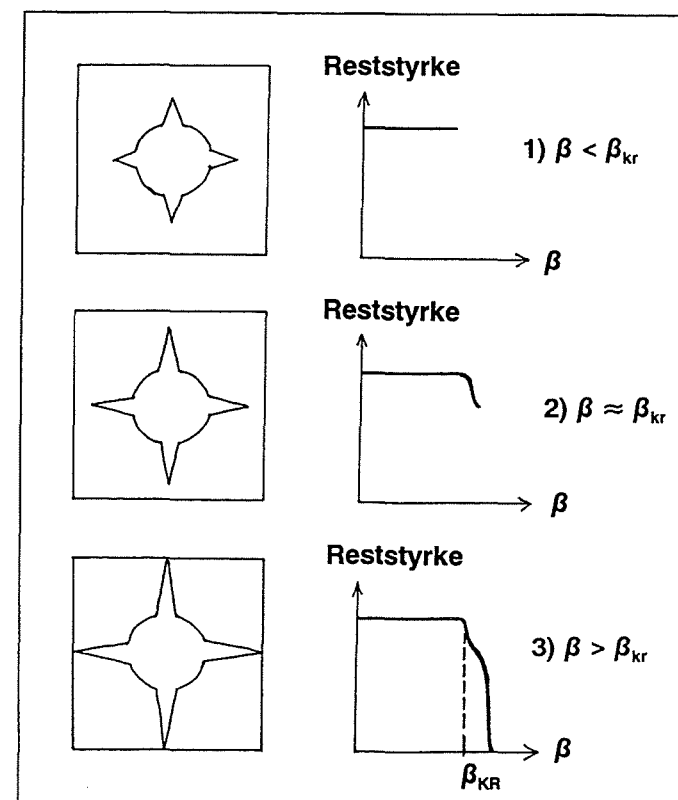
Et gennemløb af algoritmen består i, gradvist at lade temperaturen aftage, og for hver temperatur at undersøge, 1) om den tilhørende frysbar vandmængde - beregnet ud fra oplysninger om porestørrelsesfordelingen og et startvandindhold - bevirker at spændingerne i poresystemet overskrider materialets styrke, 2) hvor meget styrken og E-modulet i givet fald reduceres. Desuden beregnes materialets volumetøjning.

Bemærk, at en sådan analyse svarer til ét dilatationsforsøg med et givet vandindhold, jf. afsnit 2.2.5. Algoritmen må derfor gennemløbes et vist antal gange, med forskellige vandindhold, før den kritiske vandmætningsgrad - som den er defineret i afsnit 2.3.2 - kan fastlægges. I afsnit 3.5.5 og afsnit 6.8 diskuteres dette nærmere.

I beregningsalgoritmen indføres to regnetekniske parametre. Den ene parameter er vandmætningsgraden (porefyldningsgraden) β_w , der udtrykker hvor meget vand der "fyldes" i prøveemnet før beregningen. Den anden størrelse kaldes *fract fr*, der står for "fraction frozen" dvs. hvor stor en del af det frysbar vand som ved en given temperatur rent faktisk er frosset. Det giver mulighed for at tage hensyn til, at frysning tager tid, specielt for finporøse materialer.

Rent regneteknisk indføres de to størrelser ved beregning af $\beta_{f, tot}$ jf. (3.26), henholdsvis ved at erstatte $\beta_{f, tot}$ til en given temperatur med $\beta_{f, tot} \cdot \text{fract fr}$.

Selve algoritmen er beskrevet i [L.F.Nielsen,93a], hvorfor kun enkelte punkter skal fremhæves her.



Figur 3.14. Illustration af revneudvikling og kobling til begrebet kritisk vandmætningsgrad. Poresystemet repræsenteres ved en revnepore. β er vandmætningsgraden, β_{kr} er den kritiske vandmætningsgrad.

Beregningerne foregår som nævnt som funktion af temperaturen. For en given temperatur beregnes de spændinger, der er afledt af vandets frysning. Så længe spændingerne ikke overskrider materialets styrke, er materialet upåvirket, svarende til situation 1 i figur 3.14.

Viser det sig, at spændingerne i materialet ved en given temperatur overstiger materialets styrke, forlænges revnerne regneteknisk ved at lade den kritiske porøsitet c_d aftage stepvist og derefter påny sammenligne spændinger og styrke. Dette gentages, 1) til balance opnås mellem de reducerede spændinger og en reduceret styrke, eller 2) til styrken er nul, svarende til at revnerne er forlænget så meget, at den kritiske porøsitet c_d er reduceret til den oprindelige porøsitet c . De to muligheder svarer til situation 2 og 3 i figur 3.14.

Ud over styrken beregnes for hvert enkelt tilfælde det reducerede, relative E-modul samt volumentøjningen.

3.4.2 Præsentation af resultater

Afhængigt af, hvilket programmeringssprog og tegneprogram, der benyttes, kan indlæsning af parametre og selve udførelsen af beregningerne foregå mere eller mindre elegant. De mest interessante sammenhænge er: 1) vandmætningsgrad af frysbar vand, $\beta_{f,tot}$, som funktion af temperaturen, 2) reststyrke og relativt E-modul som funktion af $\beta_{f,tot}$ samt 3) volumentøjning som funktion af temperatur henholdsvis $\beta_{f,tot}$. Desuden kan bl.a. pore størrelsesfordelingen optegnes. Eksempler er vist som figur 3.15 - 3.19.

Sammenhæng mellem figur 3.15 - 3.19

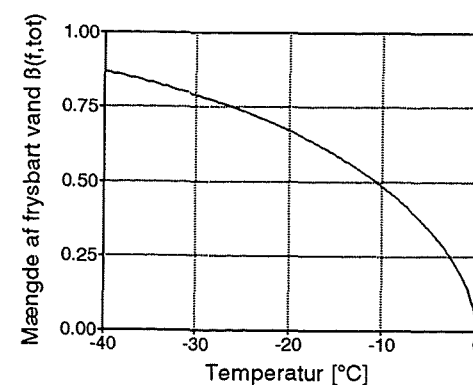
Figur 3.19 viser pore størrelsesfordelingen udtrykt vha. (3.27). Figur 3.15 viser den relative mængde af frysbar (eller rettere frosset) vand som funktion af temperaturen, afbildet som en sumkurve. Sammenhængen er udelukkende bestemt af værdien af parameteren η samt af pore størrelsesfordelingen.

Udseendet af figur 3.16 - 3.18 afhænger af samtlige parametre i beregningsmodellen. I figur 3.16 aflæses tydeligt, ved hvilken vandmætningsgrad materialet begynder at miste styrke og dermed har opnået en kritisk tilstand, β_{cr} . Den tilsvarende situation kan genfindes i figur 3.18 markeret med β_{cr} hvor det dog knap anes på kurven. Samtidig angives ved $\epsilon_{kk,cr}$ et punkt, hvor materialet har nået en volumenudvidelse svarende til, at reststyrken i figur 3.16 er nul og materialet derfor ikke længere kan "restitueres". Først på dette tidspunkt, hvor materialet ikke længere kan modstå kræfterne, der skyldes vandets fortsatte frysning, ses en mærkbar volumenudvidelse.

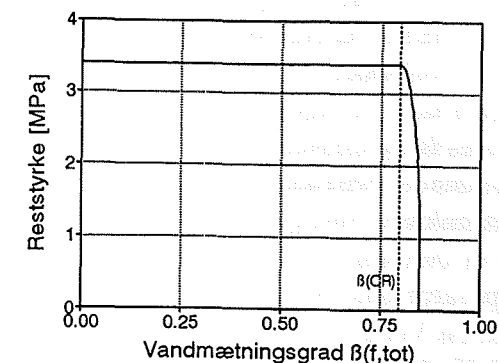
Bemærk at volumenudvidelse i såvel figur 3.17 som figur 3.18 er den samlede volumentøjning under frysning, dvs. inklusive den volumentøjning, der skyldes at vand/is og faststof trækker sig sammen, når det afkøles. Sidstnævnte bevægelse angives i figur 3.17 ved den punkterede linie markeret med "Dummy".

Svarende til den kritiske vandmætningsgrad, β_{cr} findes en kritisk temperatur, der betegner, hvor lav temperaturen skal være før begyndende revnedannelse og frostskeer opstår for et givet materiale med et bestemt vandindhold. Den kritiske temperatur angives med et "+" i figur

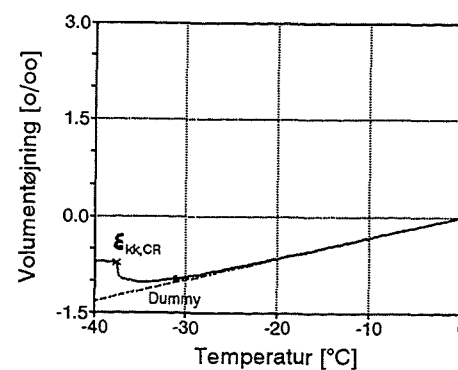
3.17. Trækkes en lodret linie fra denne temperatur til den tilsvarende i figur 3.15 kan på y-aksen aflæses en vandmætningsgrad der svarer til β_{cr} i figur 3.16 og 3.18.



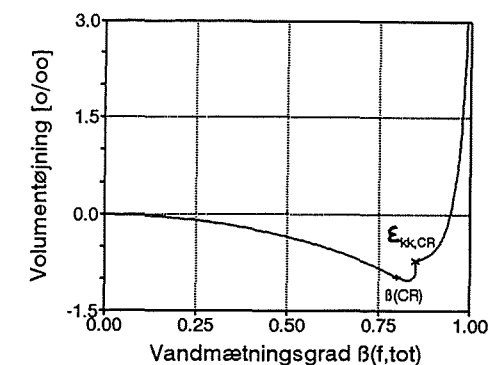
Figur 3.15. (Summeret) mængde af frysbar (frosset) vand i forhold til det totale porevolumen som funktion af temperaturen. Følges kurven startende ved 0° viser figuren, hvor meget vand der er frosset ved en given temperatur, dvs. hvordan frysningen skrider frem.



Figur 3.16. Trækstyrke som funktion af vandmætningsgrad bestemt som mængden af frysbar vand i forhold til det totale porevolumen. β_{CR} er kritisk vandmætningsgrad.

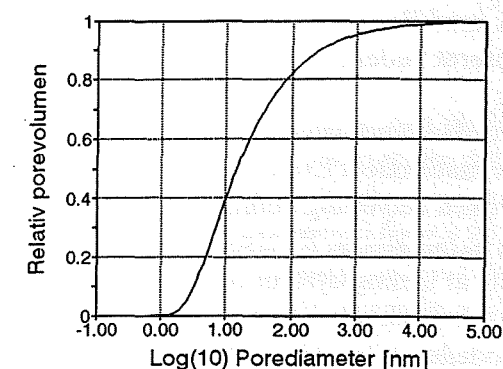


Figur 3.17. Volumentøjning som funktion af temperatur. $\epsilon_{kk,cr}$ er kritisk volumentøjning, svarende til at styrken er 0. Dummy angiver materialets lineære, temperaturbestemte tøjning.



Figur 3.18. Volumentøjning som funktion af vandmætningsgrad.

Figur 3.19. Pore størrelsesfordeling. Relativt porevolumen som funktion af porediameter. Semi-logaritmsk afbildning.



Anvendelse af figurer - eksempel

For vandmætningsgrader mindre end den kritiske, svarende til situation 1 i figur 3.14, vil kurven i figur 3.16 forløbe vandret, i figur 3.17 med en hældning svarende til faststoffets temperaturudvidelseskoefficient, og i figur 3.18 med en svag nedadgående krumning.

Kritisk vandmætningsgrad aflæses til ca. 0,77 og temperaturen er nået ned på -32°C. At forløbet er krumt i figur 3.18, men lineært i figur 3.17, skyldes forløbet af sammenhængen mellem temperatur og mængden af frysbar vand, jf. figur 3.15.

Køles længere ned, kommer materialet ind i en overgangszone med begyndende revnedannelse, svarende til situation 2 i figur 3.14. Materialet vil forholdsvis hurtigt miste sin styrke, ved en vandmætningsgrad på ca. 0,86 er den nul, og temperaturen er nået ned på -38°. Først når denne temperatur nås, har materialet mistet sin sammenhæng - svarende til situation 3 i figur 3.14 - og vil udvide sig frit. Denne frie udvidelse kræver dog et forholdsvis stort temperaturfald, da mængden af frysbar vand kun øges langsomt med aftagende temperatur på dette tidspunkt, jf. figur 3.15.

Kobling til Fagerlunds definition på kritisk vandmætningsgrad

Et gennemløb af beregningsalgoritmen som den er beskrevet ovenfor svarer som nævnt til ét dilatationsforsøg. Figurene 3.16 - 3.18 skal i den forbindelse opfattes således, at de viser på hvilket tidspunkt - dvs. ved hvilken temperatur eller hvilken relativ mængde frysbar vand - en kritisk tilstand opnås i det pågældende "forsøg".

Figur 3.16 kan derfor ikke umiddelbart sammenlignes med figurer i afsnit 2.3, der er fremkommet ved at bestemme relativt E-modul af en lang række prøveemner med forskellige vandmætningsgrader efter frysning til én bestemt temperatur, [Fagerlund,72b]. En diskussion af dette følger i afsnit 3.5.5.

Til gengæld viser figurerne, om det oprindelige vandindhold er kritisk eller ej. Er den kritiske temperatur, der aflæses af figur 3.17, lavere end hvad der opnås i praksis, vil der ikke opstå skader pga. frysning.

3.5 Diskussion af beregningsmodellens forudsætninger

Den præsenterede beregningsmodel for frostnedbrydning bygger på en række forudsætninger, jf. afsnit 3.2. Som det er fremgået kan der føres kritik mod flere af disse. Følgende punkter og deres betydning vil blive diskuteret nedenfor med henvisning til de afsnit, hvor de omtales første gang:

- hvordan vandmætningsgrad skal defineres og hvilken betydning det har for materialets E-modul (afsnit 3.2.3)
- hvilken betydning definitionen af vandmætningsgrad har for tøjninger og parameteren B (afsnit 3.2.4)
- valg af ligningssystem til spændingsberegning (afsnit 3.2.5) og kobling til frysemekanismer (afsnit 2.2), herunder diskussion i relation til andre modeller (bilag B3 [de Place,96b]) samt valget af revnemodel (bilag A1)

Desuden diskuteres selve beregningsalgoritmen - som den fremstilles i afsnit 3.4. En egentlig diskussion af modellens egnethed til brug ved vurdering af porøse materials frostbestandighed sker først i afsnit 6.8 på basis af konkrete resultater.

3.5.1 Definition af vandmætningsgrad

Porestørrelsesfordelingen af et porøst materiale har afgørende betydning for, hvor meget vand der er frysbar ved en given temperatur, jf. afsnit 2.2 og afsnit 3.2.6. Da størrelsen af E-modul, tøjninger og spændinger afhænger af, hvor meget vand der fryser, vil beregningerne derfor i høj grad afhænge af, hvordan vandmætningsgraden defineres.

L.F.Nielsen [1993a] definerer mætningsgraden for frysbar vand således:

$$\beta_{f, \text{tot}} = \beta(T) = \begin{cases} \beta_w - z(d) & \text{for } z(d) \leq \beta_w \\ 0 & \text{for } z(d) > \beta_w \end{cases} \quad (3.28)$$

hvor β_w er porefyldningsgraden regnet som det samlede vandindhold (frysbar og ikke-frysbar) i forhold til det totale porevolumen, svarende til vandmætningsgraden af fordampeligt vand S_e , afsnit 2.3.2.

$z(d)$ er det relative porevolumen, der udtrykker mængden af ikke-frysbar vand hørende til frysepunktstemperaturen T [°C].

$\beta_{f, \text{tot}}$ udtrykker således mængden af frysbar vand i forhold til det totale porevolumen.

Da det er tilstedeværelsen af is, der bevirker, at porefasen har en vis stivhed, kan det diskuteres, om $\beta_{f, \text{tot}}$ skal erstattes af

$$\beta_I = 1,09 \cdot \beta_{f, \text{tot}} \quad (3.29)$$

der udtrykker hvor stor en del af det samlede porevolumen, der er fyldt med is.

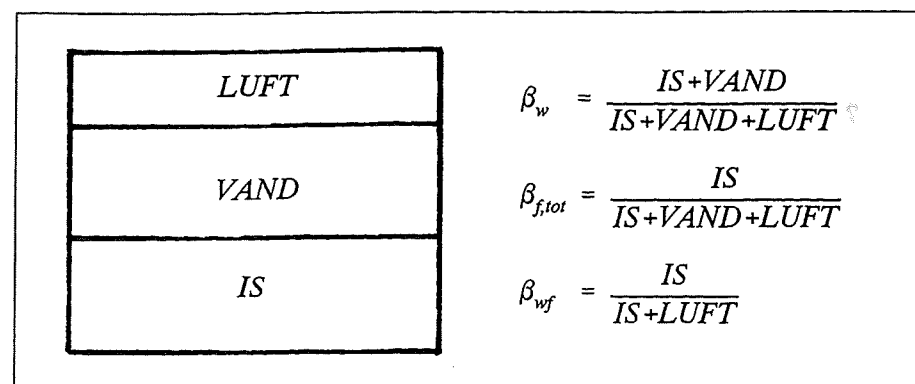
Skal vandmætningsgraden af frysbar vand defineres i overensstemmelse med Fagerlund [1972b] skal den derimod udtrykkes som

$$\beta_{wf} = \begin{cases} \frac{\beta_w - z(d)}{1 - z(d)} & \text{for } z(d) \leq \beta_w \\ 0 & \text{for } z(d) > \beta_w \end{cases} \quad (3.30)$$

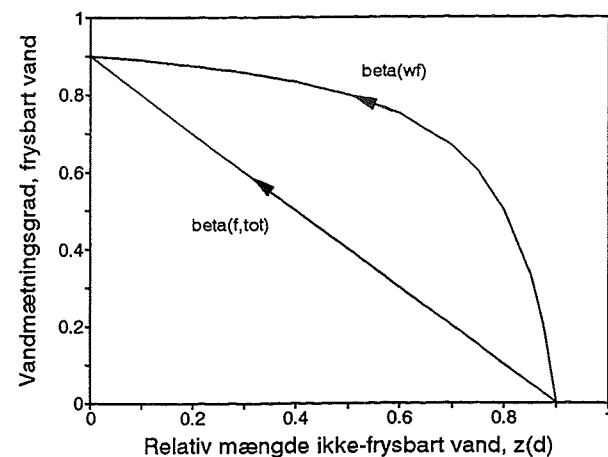
(3.30) udtrykker mængden af frysbar vand i forhold til den plads det reelt har til rådighed, dvs. det totale porevolumen fraregnet den del, der er fyldt med ikke-frysbar vand, svarende til S_p , afsnit 2.3.2.

Forskellen på definitionen af β_w , $\beta_{f, \text{tot}}$ og β_{wf} illustreres i figur 3.20.

Figur 3.21 illustrerer forskellen på (3.28) og (3.30) for $\beta_w = 0,9$. Det ses, at β_{wf} vokser langt hurtigere end $\beta_{f, \text{tot}}$ for aftagende mængde af ikke-frysbar vand, $z(d)$, for høje værdier af $z(d)$.



Figur 3.20. Definition af vandmætningsgrader. β_w svarer til S_e , β_{wf} svarer til S_f , afsnit 2.3.2.



Figur 3.21. Vandmætningsgrad udtrykt som $\beta_{f,tot}$ og β_{wf} som funktion af det ikke-frysable vand $z(d)$. Eksemplet gælder for $\beta_w = 0,9$. Pilenes retning svarer til en afkøling (frysning).

Betydningen af at benytte $\beta_{f,tot}$ eller β_{wf} for et givet materiale afhænger derfor i høj grad af pore størrelsesfordelingen, jf. kobling mellem pore størrelse og frysepunktstemperatur.

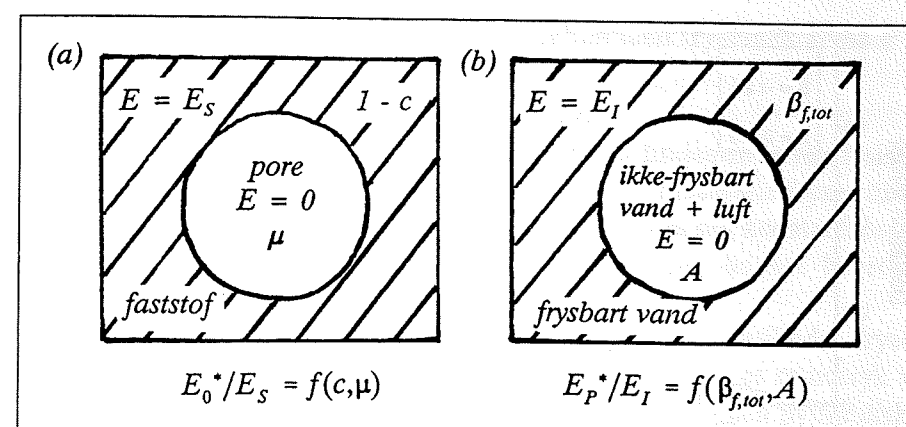
3.5.2 E-modul og definition af vandmætningsgrad

E-modulet for den frosne pore fase, E_p^* , defineres vha.

$$\frac{E_p^*}{E_I} = \frac{A\beta_{f,tot}}{A+1-\beta_{f,tot}} \quad (3.31)$$

hvor parameteren A beskriver poreformen af den del af poresystemet, der ikke er fyldt med is, og E_I er isens E-modul, jf. afsnit 3.2.3.

Det kan også udtrykkes ved at blandingen af is, vand og luft er erstattet af et homogent ækvivalent materiale, der udfylder hele poresystemet og har stivheden E_p^* . Ved at erstatte porøsiteten c med $1-\beta_{f,tot}$ og formfunktionen μ med A etableres en analogi mellem et porøst materiale beskrevet ved (3.12) og blandingen is+vand+luft beskrevet ved (3.31). Analogien illustreres i figur 3.22.



Figur 3.22. Analogi mellem (a) porøst materiale (faststof + porer) og (b) porefasen opfattet som et porøst materiale (frysable vand + ikke-frysable vand & luft). E_o^* og E_p^* er det porøse materiales E-modul henholdsvis porefasens E-modul. Principskitse.

Netop det faktum, at det ækvivalente materiale relaterer til hele poresystemet er forklaringen på, at vandmætningsgraden defineres ved (3.28) i stedet for (3.30).

Det betyder til gengæld, at den del af porefasen, der ikke er fyldt med frysable (frosset) vand, ikke regnes at have nogen stivhed, uanset hvordan den er sammensat. Hvorvidt det har nogen praktisk betydning sammenholdt med størrelsen af de kræfter der udløses ved frysning af vand kan diskuteres.

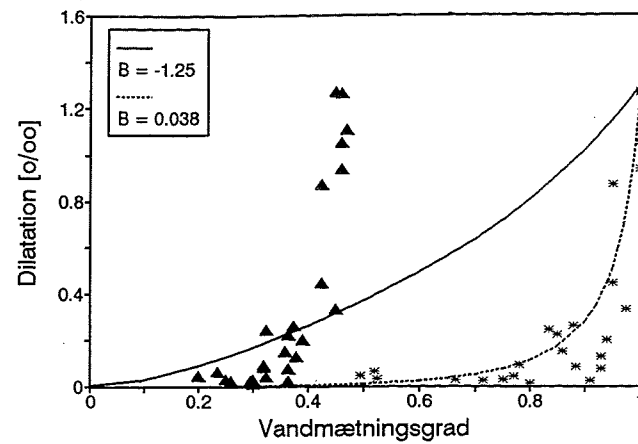
Umiddelbart kan det synes mere korrekt at benytte β_I i stedet for $\beta_{f,tot}$ i (3.31), da det trods alt er i form af is, at det frysable vand bidrager til porefasens og dermed materialets stivhed. Forskellen mellem β_I og $\beta_{f,tot}$ er primært aktuelt for grovporøse materialer, jf. den store andel af frysable vand, sammenlignet med andre materialer. Til gengæld ses det oftere på grovporøse materialer, at en del af isdannelsen sker på overfladen, således at fyldningsgraden ikke øges med en faktor 1,09.

I modsætning til $\beta_{f,tot}$ og β_I relaterer β_{wf} ikke til hele poresystemet, jf. figur 3.20. Benyttes β_{wf} som udtryk for vandmætningsgraden i (3.31) kan den ovenfor beskrevne analogi derfor ikke benyttes. Anvendelsen af $\beta_{f,tot}$ eller β_I er til gengæld forbundet med andre problemer, jf. afsnit 3.5.3.

3.5.3 Vandmætningsgrad og parameteren B

B er indført for at tage hensyn til, at poresystemet er mere kompliceret end det kan beskrives vha. cirkulære porer med "fødte" revner. Jo mere kringlet poresystem og desto flere flaskehalse, jo hurtigere opbygges spændinger og desto større B .

B bestemmes ud fra sammenhørende værdier af vandmætningsgrad og dilatation (ikke-lineær volumetøjning) vha. (3.17), afsnit 3.2.4. Figur 3.23 illustrerer, hvilken betydning definitionen af vandmætningsgraden har for størrelsen af B og anvendeligheden af (3.17), når der er tale om materialer, der indeholder store mængder ikke-frysable vand ved normale frosttemperaturer, fx beton. Volumetøjninger er omregnet til længdeændringer, jf. afsnit 3.2.4 og 4.2.1.



Figur 3.23. Dilatation (ikke-lineær længdeændring) som funktion af vandmætningsgrad, $\beta_{f,tot}$ (øverste kurve) henholdsvis β_{wf} (nederste kurve). Beton 0.45, egne forsøg. Punkter repræsenterer forsøgsdata. Kurverne repræsenterer teoretisk forløb udtrykt ved B , hvor B er fastlagt ud fra forsøgsdata, jf. (3.17). Vandmætningsgraden $\beta_{f,tot}$ er bestemt vha. (3.28), β_{wf} vha. (3.30). Frysepunktstemperatur -20°C .

Konkret indgår B i modellen ved beregningen af den effektive, frie volumentøjning, $\Gamma_{P,eff}$ som følge af frysning, jf. (3.32) (= (3.15)). Dette udtryk er baseret på, at dilatationen er størst for en vandmætningsgrad på 1. Imidlertid overstiger vandmætningsgraden for beton 0.45 regnet som $\beta_{f,tot}$ aldrig 0,5 pga. det store indhold af ikke-frysbar vand ved -20°C . Der er derfor ikke noget at sige til, at det går galt i det viste eksempel.

Hvorvidt problemet kan løses ved at ændre udtrykket for den effektive volumentøjning, $\Gamma_{P,eff}$ fra

$$\Gamma_{P,eff} = \frac{B \beta_{f,tot}}{B + 1 - \beta_{f,tot}} \Gamma_P \quad (3.32)$$

til fx

$$\Gamma_{P,eff} = \frac{B \beta_{f,tot}}{B + 0,5 - \beta_{f,tot}} \Gamma_P \quad (3.33)$$

er ikke undersøgt nærmere.

Figur 3.23 viser derimod, at der er god overensstemmelse mellem eksperimentelle resultater og beregnet forløb, når β_{wf} benyttes som udtryk for vandmætningsgraden.

Ved fastlæggelsen af parameteren B må β_{wf} derfor foretrækkes fremfor $\beta_{f,tot}$ som udtryk for vandmætningsgraden. Derimod er det problematisk at benytte β_{wf} ved beregning af E-modulet, jf. afsnit 3.5.2. En mulig løsning er at operere med to forskellige definitioner på vandmætningsgraden ved beregning af kritiske vandmætningsgrader med den opstillede model. Betydningen af dette er undersøgt i forbindelse med udvikling af en modificeret beregningsalgoritme, jf. afsnit 3.5.5.

3.5.4 Sammenligning af beregningsmodellen med frysemekanismer og andre modeller

Beregningsmodellen i forhold til frysemekanismer

Aflitteraturgennemgangen er det fremgået, at der findes en række fysiske forklaringer på, hvad der sker, når vand i et porøst materiale fryser til is, jf. afsnit 2. Uanset hvilken forklaring der benyttes, må det konstateres, at frostnedbrydningen skyldes en spændingsopbygning, uanset hvordan denne så er opstået.

Egentlige spændingsberegninger baseret på de opstillede frysemekanismer er det indtil videre småt med. Et eksempel er et udtryk til bestemmelse af det maksimale hydrauliske tryk i følge den hydrauliske trykteori, baseret på forenkede forudsætninger mht. poregeometri, vandets strømning etc., jf. [Fagerlund,79] m.fl. Dette udtryk er primært egnet til kvalitative betragtninger. Prout & Hoff [1991] anvender det dog til at afvise, at observerede tøjninger ved frostforsøg på tegl ikke udelukkende kan forklares ud fra hydraulisk tryk og mikroskopisk islinsevækst.

Manglen på matematiske beskrivelser af frysemekanismerne bevirker, at spændingsberegninger i litteraturen bygger på udtryk, der ikke umiddelbart har nogen kobling til frysning af vand. Et eksempel på dette er det ligningssystem - baseret på lineær elasticitetsteori og middelværdibetragtninger, hvad angår spændinger og tøjninger - der er vist i afsnit 3.2.5.

Spændingsberegningerne tager udgangspunkt i, at vandets udvidelse ved frysning er den direkte årsag til materialets nedbrydning, og at frysepunktstemperaturen udelukkende er bestemt af porestørrelsen, hvilket er en forenklet betragtning, hvis teorien om mikroskopisk islinsevækst følges. Der tages dog hensyn til, at udseendet af poresystemet har betydning for, hvor effektivt udvidelsen overføres til spændinger.

Umiddelbart minder udgangspunktet mest om den hydrauliske trykteori, der bedst beskriver isdannelsen ved en stor frysehastighed. Det skal bemærkes, at algoritmen via størrelsen *fract fr* i princippet tager højde for, at frysning kan tage tid, jf. afsnit 3.4.1. Beregninger baseret på egne resultater viser dog, at *fract fr* har begrænset betydning for værdien af kritiske vandmætningsgrader med den nuværende udformning af modellen.

Beregningsmodellen i forhold til andre modeller

Andre har arbejdet med at regne på spændingsudvikling eller isdannelse, fx [Podvalnyi,76], [Olsen,84], [Kralj et al,91] jf. bilag B3 [de Place,96b], men ingen af disse modeller er så omfattende som den ovenfor præsenterede. Således tager ingen af modellerne hensyn til poreformens betydning. Kralj et al [1991] konstaterer dog, at både vandmætningsgrad, porestørrelsesfordeling og frysepunktssænkning har betydning for spændingsudviklingen og tager hensyn til disse ved at indføre en effektiv porøsitet.

Til gengæld forenkles betydningen af vandmætningsgraden, idet Kralj et al bygger deres model på, at der først opbygges spændinger når vandmætningsgraden overstiger 0,917. Podvalnyi [1976] inddrager slet ikke

vandmætningsgraden. Olsen [1984] regner på forløbet af isdannelse og ikke på spændingsudvikling.

Både Podvalnyi og Kralj et al bygger en beregningsmodel på, 1) at spændinger opstår som følge af forskelle i egentøjninger ved frysning af vand, 2) at spændinger kan regnes lineærelastisk. Der benyttes således samme udgangspunkt som for modellen præsenteret i denne rapport.

Kralj et al påpeger, at en sådan spændingsudvikling svarer til den såkaldte "sealed container" frysning, hvor vandet er spærret inde i et lukket system. Et sådant system er mest egnet til et forløb, hvor isdannelsen sker pludseligt, således at poresystemet hurtigt blokeres.

På dette punkt er den materiallemekaniske model, der præsenteres i denne rapport, mere avanceret. Den forsøger vha. parameteren B at tage hensyn til, at spændingsopbygningen sker mere eller mindre pludseligt, afhængigt af porestrukturen.

Den kritik der kan fremføres overfor den materiallemekaniske model mht. kobling til frysemekanismer, og specielt at den ikke i tilstrækkelig høj grad tager hensyn til betydningen af mikroskopisk islinsevækst, gælder således i endnu højere grad for ovennævnte modeller.

Til forskel fra de fleste andre modeller tager den materiallemekaniske model udgangspunkt i porøse materialer generelt, [L.F.Nielsen,93a]. Nielsen konstaterer, at spændingsopbygning fører til revnedannelse på steder i materialet, hvor der er en høj spændingskoncentration, uanset hvor i materialet det er.

Viser det sig muligt at benytte samme model til såvel finporøse som grovporøse materialer er det en fordel, bl.a. giver det mulighed for umiddelbart at sammenligne forskellige materialer. En sammenligning kan være problematisk hvis forskellige modeller benyttes, da de ofte bygger på forskellige forudsætninger.

Til gengæld tager en specifik model udgangspunkt i et konkret materiale og dets særlige egenskaber samt eksisterende viden om fx vedhæftning mellem tilslag og pasta/mørtel (beton) eller mursten og mørtel (murværk). Det er dog værd at bemærke, at såvel Podvalnyi som Kralj et al definerer et såkaldt modelmateriale med idealiserede egenskaber for overhovedet at kunne udføre beregninger.

Valg af revnemodel

En ting er spændingsberegninger, en anden ting er, hvilket udgangspunkt der benyttes for revneudbredelsen, dvs. hvilken revnemodel, der benyttes, jf. bilag A1 [de Place,96b]. I den opstillede model benyttes den mest simple revnemodel (Griffith), der er bedst egnet til sprøde materialer, hvor revneudvidelsen sker meget pludseligt og hurtigt, når først revnen har fået en vis længde.

Revnemodellen er dog modificeret således, at der tages hensyn til, at fejl i porøse byggematerialer er af en helt anden størrelsesorden end i fx metaller.

Andre revnemodeller bygger på, at der dannes en zone af mikrorevner ved revnespidsen og at en stor del af den energi, der frigøres ved revneforlængelse omdannes til plastisk energi foran revnespidsen. Soroka [1979] skriver således, at den mængde energi, der kræves for at få revnen til at udvide sig, i praksis er betydelig større end Griffith antager, og at

dette energibehov vil vokse indtil en vis grænse, pga. at mikrorevnezonen vokser.

Umiddelbart synes Griffith's model derfor at gøre materialet mindre modstandsdygtigt overfor indre spændinger end det reelt er. Kommende projekter kan forhåbentlig afsløre hvilke konsekvenser det kan få for spændingsudviklingen, i dette projekt er det ikke undersøgt nærmere. I bilag A1 vises dog, at Griffith's revnemodel er tilstrækkelig præcis, når porestrukturen er "født" med en passende stor andel af revner udtrykt ved, at materialestyrken ikke er alt for tæt på materialets teoretiske styrke.

I øvrigt er der i beregningsmodellen taget højde for, at revnevæksten kan gå i stå inden materialet fuldstændig har mistet styrke og stivhed, jf. afsnit 3.1.2 og 3.4.1.

3.5.5 Diskussion af beregningsalgoritme

Et gennemløb af beregningsalgoritmen som den beskrives i [L.F.Nielsen, 93a] svarer til ét dilatationsforsøg, jf. afsnit 3.4.1. Beregning foregår med en *fastholdt* vandmætningsgrad (porefyldningsgrad) (β_w) og variabel (aftagende) temperatur - og dermed voksende mængde af frysbar vand.

Siden er algoritmen udbygget, således at der også kan foretages beregninger med *variabel* (voksende) vandmætningsgrad - og dermed voksende mængde frysbar vand - og fastholdt temperatur. En sådan beregning svarer til, at et stort antal prøveemner studeres ved én bestemt temperatur, fx -20°C .

Samtidig er indført et udtryk for vandmætningsgraden af frysbar vand svarende til Fagerlund's definition. Det er sket for at undgå de problemer der illustreres i figur 3.23. Analysen med variabel vandmætningsgrad svarer til den af Fagerlund beskrevne metode til bestemmelsen af kritiske vandmætningsgrader, [Fagerlund,72b,77].

De to måder at betragte frysning på - kaldet *Dilation* og *Crit Sat* - har hver sine fordele og ulemper:

Dilation: hele afkølingsforløbet følges, dvs. hvordan udvidelsen udvikler sig med aftagende temperatur, men kun for én vandmætningsgrad.

Crit Sat: situationen ved mange forskellige vandmætningsgrader og én bestemt temperatur sammenlignes. Til gengæld kan det være nødvendigt at gentage beregningerne for flere forskellige temperaturer for at få et overblik.

De to måder at betragte frysning på kan derfor supplere hinanden.

I *Crit Sat* benyttes β_{wf} som udtryk for vandmætningsgraden. Af afsnit 3.5.2 fremgår, at det er problematisk at benytte β_{wf} ved beregning af E-modulet. Der er derfor foretaget enkelte beregninger for at undersøge, hvilke konsekvenser det får for den kritiske vandmætningsgrad at operere med to forskellige definitioner af vandmætningsgrad ved beregning af henholdsvis E-modulet, E^* , og parameteren B , jf. afsnit 6.8.2.

Selve princippet for beregning af E-moduler, tøjninger, spændinger og revneudvidelser ændres ikke af at lade porefyldningsgraden β_w være den styrende parameter i stedet for temperaturen. Algoritmen følger derfor beskrivelsen i [L.F.Nielsen,93a]. Resultaterne kan fortsat udtrykkes vha. figur 3.15 - 3.19, dog giver figur 3.15 og 3.17 ingen mening, da temperaturen ikke varieres ved beregning med *Crit Sat*.

Crit Sat er først indført på et forholdsvis sent tidspunkt i projektet, og er derfor kun anvendt i begrænset omfang, dog således at det er muligt at sætte de to algoritmer op mod hinanden, jf. afsnit 6.8.1.

3.5.6 Diskussion - sammenfatning

Diskussionen af modellens forudsætninger har vist, at det ikke er ligegyldigt, hvordan vandmætningsgraden defineres. Problematikken kompliceres af, at én definition er at foretrække ved beregning af materialets E-modul, E^* , en anden ved beregning af parameteren B , der udtrykker porestrukturens betydning for sammenhængen mellem vandmætningsgrad og dilatation (ikke-lineær volumentøjning).

Den præsenterede beregningsmodel opererer med et ligningssystem, der ikke umiddelbart har kobling til frysemekanismer. Andre beregningsmodeller tager et lignende udgangspunkt. Til gengæld tager den præsenterede model i højere grad hensyn til især porestrukturens betydning end tilsvarende beregningsmodeller.

Det kan diskuteres efter hvilket princip beregning af kritiske vandmætningsgrader skal foregå på, 1) ved fastholdt porefyldningsgrad og aftagende temperatur svarende til ét dilatationsforsøg, eller 2) ved fastholdt temperatur og voksende porefyldningsgrad svarende til, at et stort antal dilatationsforsøg studeres ved én temperatur.

4. Forsøgsplan

4.1 Indledning

Det overordnede mål for projektet "Byggematerialers frostbestandighed" er ved forsøg at verificere den model, der er præsenteret i afsnit 3. Sideløbende udføres forsøg med det formål at sammenholde modellens forudsigelser med forskellige former for eksponering. Der skelnes derfor mellem *to grupper* af forsøg:

1) Forsøg til bestemmelse af materialeparametre

De undersøgte materialer karakteriseres med henblik på at fremskaffe værdier for de parametre, der indgår i den opstillede model, jf. afsnit 3.3. Centrale punkter er bestemmelse af a) sammenhængen mellem vandmætningsgrad og volumentøjning ved frysning samt b) porestørrelsesfordelingen og porestrukturen, herunder mængden af frysbart vand.

I afsnit 4.2 beskrives principperne for, hvordan de enkelte parametre og egenskaber bestemmes.

2) Eksponering i laboratoriet og naturen

I en række supplerende forsøg udsættes materialerne for forskellige former for eksponering, der i større eller mindre grad svarer til en naturlig påvirkning. Der udføres a) standardiseret frostprøvning, b) naturlig eksponering samt c) undersøgelse af kapillarsugnings- og diffusions-egenskaber, jf. afsnit 4.3.

En samlet oversigt over de udførte forsøg ses på figur 4.1. Forsøgene udføres dels på Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), dels på Laboratoriet for Bygningmaterialer (LBM), DTU.

Kobling af forsøg

Ved en kobling af disse to grupper af forsøg ønskes det kontrolleret, om modellens forudsigelser er relevante. Modellen kan nemlig ikke fortælle, hvorvidt et materiale er frostbestandigt eller ej, men kun om hvilken værdi den kritiske vandmætningsgrad har. Denne oplysning skal kombineres med viden om sandsynligheden for, at den kritiske vandmætningsgrad vil overskrides i praksis, før et udsagn om frostbestandigheden er mulig.

Som udgangspunkt for at fastlægge, om et givet materiale er frostbestandigt eller ej, vil det være rimeligt at kræve, at materialet kan modstå frost i kapillært mættet tilstand, dvs. at den kritiske vandmætningsgrad er større end vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning, jf. [Sandin, 92] m.fl.

Ved at foretage beregninger af fugttransport i materialet ønskes det undersøgt, om vandmætningsgraden ved frostprøvning, på det tidspunkt hvor der opstår skader i materialets overfladelag, svarer til modellens forudsigelser.

Tabel 4.1. Oversigt over parametre, der skal fastlægges ved forsøg.

parameter	beskrivelse	omtales i afsnit
<i>Geometri og porestørrelsesfordeling</i>		
c, c_d, c_D	porøsitet, kritiske porøsiteter	4.2.2, 4.2.4
μ_0	poreform (revners andel)	4.2.4
$z = f(\phi, d_r, d_M, z_M, d(T))$	porestørrelsesfordeling	4.2.3
ϕ, d_r, d_M, z_M	parametre der benyttes til at opnå en matematisk beskrivelse af z	4.2.3
η	konstant der kobler poreradius og frysepunktstemperatur	4.2.6
<i>Styrke og stivhed</i>		
E_I	elasticitetsmodul for is samt for	*
E_S	faststoffase	4.2.5
f_t	materialets trækstyrke	4.2.5
A	is i poresystemet	4.2.6
<i>Egentøjninger</i>		
$\Delta\alpha_{P,T}$	specifikke temperaturudvidelses-	*
$\Delta\alpha_{S,T}$	koefficienter	4.2.1
Γ_P	udvidelseskoefficient ved frysning	*
B	indsnævringer og ujævnheder i poresystemet	4.2.1

* Fastlægges ved tabelopslag.

Dilatationsforsøg

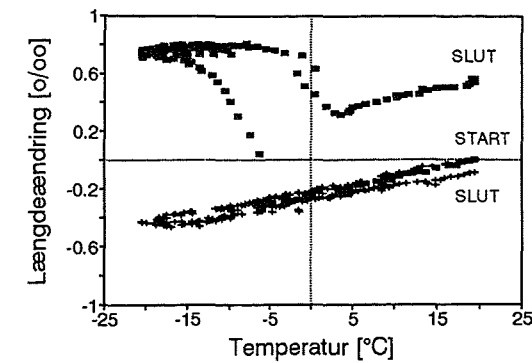
Sammenhængen mellem vandmætningsgrad og volumentøjning, udtrykt som længdeændring¹, bestemmes ud fra forsøg i klimakammer, hvor længdeændringen af forseglede prøveemner med kendt vandmætningsgrad måles under frost-tø-belastning, jf. figur 4.2. Samtidig findes specifikke temperaturudvidelseskoefficienter, $\Delta\alpha_{S,T}$, for de undersøgte materialer som hældningen på den lineære del af forløbet i figur 4.2.

Herefter bestemmes den maksimale dilatation, dvs. den største afvigelse fra den lineære længdeændring. Til bestemmelse af B omregnes længdeændringer til volumentøjninger, jf. afsnit 3.2.4. På basis af dette B opregnes en kurve som vist i figur 4.3, hvor der atter er sket en omregning fra volumentøjning til længdeændring.

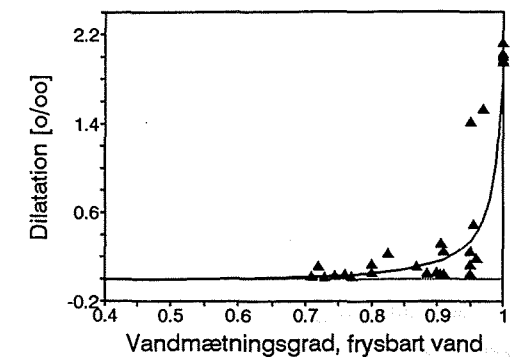
Ved fastlæggelse af B er det af hensyn til tolkningen af beregningsresultater vigtigt at holde sig for øje, ved hvilke forsøgsomstændigheder sammenhørende værdier af vandmætningsgrad og dilatation er bestemt, ikke mindst om det er foregået ved én bestemt temperatur, fx -20°C .

Forsøgene, der er nærmere beskrevet i afsnit 5.1, vil også resultere i en eksperimentelt bestemt kritisk vandmætningsgrad, som kan sammenlignes med den beregnede.

4.2 Bestemmelse af parametre til den opstillede model



Figur 4.2. Længdeændring som funktion af temperaturen. Forløb vist for vandmætningsgrad større (■) henholdsvis mindre (+) end den kritiske vandmætningsgrad. Egne forsøg, beton 0.45.



Figur 4.3. Maksimal dilatation (ikke-lineær længdeændring) bestemt ved -20°C som funktion af vandmætningsgrad af frysbar vand (β_{wf}) ved samme temperatur. Punkter repræsenterer forsøgsdata. Kurven illustrerer sammenhængen mellem dilatation og vandmætningsgrad, udtrykt ved parameteren B . Egne forsøg, beton 0.70.

Forsøgene udføres på prøveemner af størrelsen $30 \times 30 \times 160$ mm (beton og en serie tegl) henholdsvis $40 \times 40 \times 160$ mm (øvrige tegl), i begge tilfælde udskåret af større emner. Betonemners tværsnitsdimension er lille i forhold til en største stenstørrelse på 16 mm, jf. tabel 4.2, men er valgt for at opnå et større antal prøveemner. Se i øvrigt bilag D [de Place, 96b] angående størrelse af prøveemner.

Bestemmelse af resonansfrekvens

I forbindelse med dilatationsforsøg bestemmes resonansfrekvens og indre dæmpning af materialerne før og efter frost-tø-belastning. Resonansfrekvens og indre dæmpning giver hver især oplysninger om materialets dynamiske egenskaber. Ændringer af disse størrelser bruges som mål for, om materialet har opnået en kritisk tilstand mht. frostpåvirkning, jf. afsnit 2.3. Resonansfrekvensforsøg giver ikke i sig selv oplysninger til den i afsnit 3 opstillede model, men giver sammen med dilatationsforsøg en dobbeltbestemmelse af den kritiske vandmætningsgrad.

Gennemgående benyttes de samme prøveemner som til dilatationsforsøg. Til resonansfrekvensforsøg på beton suppleres med prøveemner med størrelsen $30 \times 30 \times 120$ mm. Opstillingen beskrives nærmere i afsnit 5.2.

Tidligere har det vist sig vanskeligt at registrere ændringer i resonansfrekvensen på prøveemner ved det fugtindhold, de frostprøves med, uanset størrelsen af vandmætningsgraden, [de Place & Schmidt, 89]. Dette forklares ved, at vandets tilstedeværelse vanskeliggør detekteringen af revner. Derfor sker målinger på betonemner også før opfugtning samt efter udtørring. På tegl måles kun i tør tilstand.

Fordelen ved at måle på prøveemnet i opfugtet tilstand er, at tidskrævende udtørringer undgås undervejs. Fordelen gør sig især gældende i tilfælde af, at prøveemnet testes flere gange med stadig stigende vandmætningsgrad.

¹ Ved små volumenændringer, α , kan regnes med $\alpha \approx 3 \cdot \Delta l$, hvor Δl er længdeændringen.

Fastlæggelse af vandmætningsgrader til forsøg

Vandmætningsgraden β_w af det enkelte prøveemne styres ved at konditionere det til en vægt, svarende til den ønskede vandmætningsgrad, enten vha. kapillarsugning eller vha. vacuumvandmætning og udtørring. Disse metoder har hver sine fordele og ulemper. I øvrigt kan fordelingen af vandet i poresystemet afhænge af, om vandmætningsgraden opnås ved opfugtning fra tør tilstand eller udtørring fra våd tilstand, jf. bilag D [de Place,96b].

Et frostbestandigt materiale skal som minimum kunne tåle at fryse i kapillært mættet tilstand, jf. afsnit 4.1, hvilket benyttes som udgangspunkt for valget af vandmætningsgrader i de aktuelle forsøg.

De lavest benyttede værdier er typisk 5 à 10 % under vandmætningsgraden svarende til kapillær mætning. Resultater af disse forsøg kan derfor opfattes som en reference, da det ikke forventes, at der opstår skader ved så lave vandmætningsgrader. Disse vandmætningsgrader er opnået vha. kapillarsugning.

Hovedparten af de anvendte værdier befinder sig mellem kapillær mætning og vacuumvandmætning, da det viser sig, at den kritiske vandmætningsgrad skal findes i dette område. Figur 4.3 viser, hvilke vandmætningsgrader, der er anvendt for en beton med et vand/cementforhold på 0,7. Vandmætningsgraden, β_{wp} , er korrigeret for mængden af ikke-frysbar vand, i overensstemmelse med definitionen på S_p afsnit 2.3.2. Disse vandmætningsgrader er primært opnået vha. vacuumvandmætning efterfulgt af en passende udtørring.

Det præcise antal forsøg fastlægges ikke på forhånd, idet resultatet af udførte forsøgløbende benyttes til at beslutte, hvilke vandmætningsgrader der skal studeres nærmere. På den måde sker en indkredsning af den kritiske vandmætningsgrad. Det forventes samtidig at give et veldefineret forløb af sammenhængen mellem vandmætningsgrad og volumentøjning (eller længdeændring) omkring den kritiske vandmætningsgrad, hvilket letter bestemmelsen af B . Et eksempel på et sådant forløb er vist i figur 4.3.

4.2.2 Porøsitet

Porøsiteten c bestemmes vha. vacuumvandmætning i forbindelse med præparation af prøveemner til ovennævnte forsøg. Trykmætning er indledningsvis brugt på prøveemner af beton for at bedømme, hvor meget vand der kan tilføres ekstra ved denne metode. Forsøgsmetoder beskrives i afsnit 5.3.1.

4.2.3 Porestørrelsesfordeling

En pore størrelsesfordeling beskriver sammenhængen mellem poreradius og (relativt) porevolumen for et porøst materiale. En sådan fordeling skal stykkes sammen vha. forskellige metoder, da pore størrelsen typisk strækker sig over seks dekader (nm til mm). I denne optegning indgår et vist skøn, idet der kan være gab eller overlap mellem kurvedele.

Det samlede porevolumen skal svare til porøsiteten. Som nedre grænse for betragtning af porer benyttes 1 nm, der skal sammenholdes med, at vandmolekylets diameter er ca. 0,3 nm.

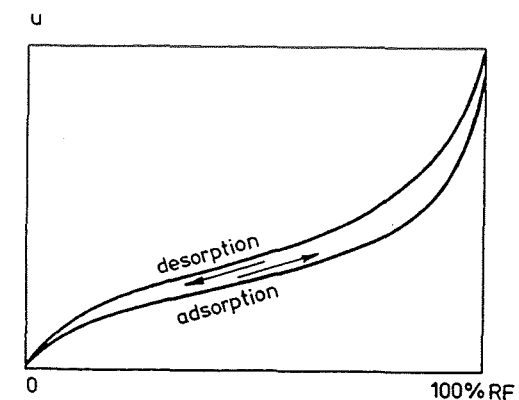
4.2 Bestemmelse af parametre til den opstillede model

Ved hjælp af parametrene φ , d_p , d_M og z_M lægges et bedste skøn gennem en eksperimentelt bestemt pore størrelsesfordeling. Herved opnås en matematisk beskrivelse af fordelingen, hvilket er nødvendigt for at kunne foretage beregninger med den opstillede model.

Sorption

I det finporøse område - op til 100 à 200 nm - benyttes indirekte metoder, [Fagerlund,73b], [Villadsen,92] m.fl., da der stilles ekstreme krav til mikroskoper og prøveemner til studier af så små porer². Indirekte metoder bygger på 1) at porerne er cylinderformede, 2) at store porer er tilgængelige uden at små porer skal passeres.

I denne undersøgelse benyttes *sorption* til at studere de mindste porer, som beskrevet i afsnit 5.3.2. Ved sorption bestemmes sammenhørende værdier af relativ fugtighed, RF , og fugtindholdet, u , i vægt%, jf. figur 4.4.



Figur 4.4. Sorptionsisoterm. Fugtindhold (u) som funktion af relativ luftfugtighed (RF), [Hagemann,91].

Porestørrelsesfordelinger bestemt vha. sorptionsisotemer benyttes i dette projekt bl.a. til at bestemme mængden af frysbar vand. Desuden er sorptionsisotemer nødvendige for beregninger af fugttransport, da de giver en række oplysninger om materialets fugt tekniske egenskaber. Derfor benyttes denne metode, selv om den er ret tidskrævende sammenlignet med andre indirekte metoder.

For beton bestemmes såvel adsorptions- som desorptionsisoterm på SBI. Adsorptionsisoterm for tegl er bestemt i et eksamensprojekt, [Ejsing,93].

Pålideligheden af sorptionsisotemer afhænger af, hvor repræsentative prøveemner der benyttes til forsøget. Betonprøver med et for lille indhold af sten vil opnå et højere ligevægtsfugtindhold end betonen som helhed. For hver enkelt materialeserie konditioneres tre prøver ved samme RF . Resultatet for de tre prøver under ét antages at være repræsentativt for det pågældende materiale.

Ved at bestemme en adsorptions- såvel som en desorptionsisoterm er det muligt at vurdere betydningen af den såkaldte flaskehalseffekt [Gregg

² Med et transmissionselektronmikroskop kan atomare elementer studeres. En sådan undersøgelse kræver imidlertid *meget* tynde prøver (10 à 100 nm).

& Sing,67], [Ahlgren,72], der normalt forklares ved, at der kun er adgang til visse af de store porer via mindre porer. Dette har bl.a. betydning for materialets evne til at transportere fugt. Flaskehalseffekten "aflæses" som en hysteresse mellem adsorption og desorption, jf. figur 4.4. Effekten kan også visualiseres vha. en todimensional computermodel, [Quenard & Sallee,92].

Slib og mikroskopi

De større porer studeres ved at fremstille *planslib*, der fotograferes i et scanningelektronmikroskop (SEM) på Institutet for Metallære, DTU, som beskrevet i afsnit 5.3.3. Fotos benyttes til poretælling vha. et billedbehandlingsprogram på LBM, jf. afsnit 5.3.4. Ud over at give oplysninger om porestørrelsen kan studier i mikroskop give informationer om poreform, orientering af revner etc., af relevans for beregningerne med den opstillede model, jf. afsnit 3.2.2.

For porer i tegl med radius større end 10 à 50 μm foretages desuden manuel poretælling, [Ejsing,93].

4.2.4 Poreform og kritisk porøsitet

Formfaktoren μ_0 , der beskriver poreformen ved forsvindende porøsitet, udtrykkes som et tal mellem 0 (meget "kringlet" poresystem) og 1 (kugleformede porer), jf. tabel 3.1. μ_0 bestemmes ud fra

$$\frac{E^*}{E_s} = \frac{1 - c}{1 + \frac{c}{\mu_0 \left(1 - \frac{c}{c_d}\right)}} \quad (4.1)$$

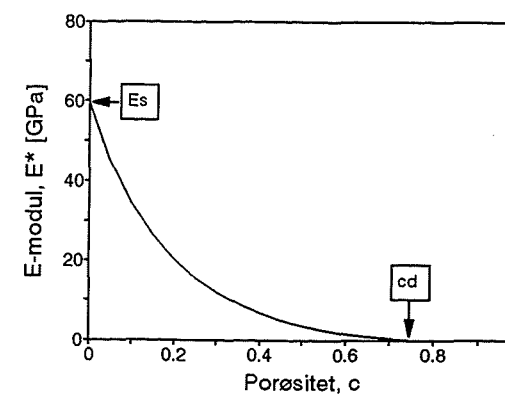
jf. formel (3.7) og (3.12), afsnit 3.2. E_s og E^* er faststoffets henholdsvis materialets E-modul, c er materialets porøsitet og c_d er den kritiske porøsitet, jf. nedenfor.

Bestemmelse af μ_0 direkte ud fra fotos / slib kan pt. kun foretages kvalitativt. Derfor benyttes fotos primært til at sammenligne serierne indbyrdes for at vurdere, om de kan karakteriseres ved samme poreform eller ej.

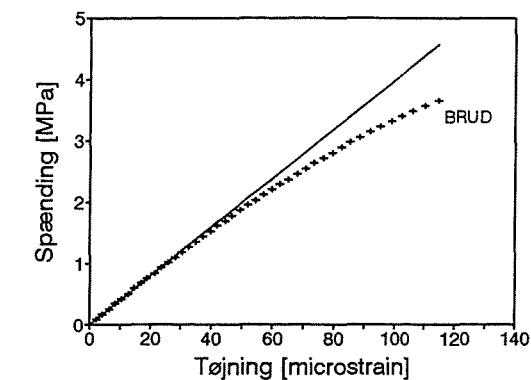
Et porøst materiale har en given porøsitet, styrke og stivhed. Belastes det på en sådan måde at der sker en revneudvidelse, vil porøsiteten øges, mens styrke og stivhed vil aftage. På et tidspunkt vil revneudbredelsen bevirke, at materialets faststof mister sin sammenhæng og som følge deraf ikke længere har nogen styrke og stivhed.

Materialet siges da at have en porøsitet, der betegnes den kritiske porøsitet, c_d . c_d fastlægges ud fra viden om den totale porøsitet c , E-modul/trækstyrke og porestruktur, jf. figur 4.5.

Den kritiske porøsitet c_d betegner den porøsitet, hvor poresystemet ikke længere er sammenhængende. Denne størrelse sættes til nul, svarende til, at poresystemet regnes sammenhængende, uanset hvor lav porøsiteten er. Det forudsætter materialer med åbne porer, som fx beton uden luftindblanding, eller tegl, jf. afsnit 3.2.2.



Figur 4.5. Eksempel på forløbet af materialets E-modul E^* som funktion af porøsiteten c , jf. (4.1). $\mu_0 = 0,3$. Skæring med akser bestemmer faststoffets E-modul E_s og den kritiske porøsitet c_d .



Figur 4.6. Arbejdslinie. Spænding som funktion af tøjning. Brudspænding angiver trækstyrken. Arbejdsliniens begyndeshældning angivet ved skrå linie markerer materialets E-modul E^* . Egne forsøg, beton 0.45.

4.2.5 Trækstyrke, E-modul og trykstyrke

Materialernes trækstyrke f_t og E-modul E^* bestemmes på SBI ved enakset trækprøvning ved måling af sammenhørende værdier af belastning og tøjning. E-modulet defineres som en gennemsnitlig hældning af arbejdslinien for spændinger op til 0,5 MPa (beton) henholdsvis tøjninger op til 100 μstrain (tegl), i begge tilfælde som en tilnærmelse til begyndeshældningen, jf. figur 4.6. Ud fra sammenhænge mellem E^* og porøsiteten c bestemmes faststoffets E-modul E_s , jf. figur 4.5.

Til trækprøvning af beton benyttes $\varnothing 100$ mm cylindre, hvor en 10 mm tyk skive er savet af i hver ende for at undgå randeffekter og for at opnå plane limflader. Trækprøvning sker efter en og fem måneders lagring ved 23°C og 65% RF, jf. bilag C1 [de Place,96b], E-modul bestemmes kun på fem måneder gamle cylindre.

Til trækprøvning af tegl benyttes prøveemner af samme størrelse som de prøveemner, der benyttes til dilatations- og resonansfrekvensforsøg, afsnit 4.2.1.

For at lette sammenligningen med andre forsøg, hvor beton ofte karakteriseres ved sin trykstyrke, bestemmes også denne. Trykstyrken indgår *ikke* i modellen. Trykprøvning sker på 22 måneder gamle cylindre, der er opbevaret ved 23°C og 65% RF, jf. bilag C1, og udføres på LBM.

Forsøgsmetoder beskrives i afsnit 5.4.

4.2.6 Øvrige parametre

I modellen optræder konstanten η , der beskriver sammenhængen mellem frysepunktstemperatur og porestørrelse, jf. afsnit 3.2.6, og formfaktoren A , der beskriver, hvordan is og ikke-frosset vand + luft er fordelt i poresystemet, jf. afsnit 3.2.3. A og η må pt. skønnes, men det er muligt at foretage kvalificerede skøn.

η kan vælges svarende til den teoretiske sammenhæng mellem porestørrelse og frysepunktstemperatur, som den fx er udledt i [Fagerlund, 73d]. Reelt kan frysepunktstemperaturen være lavere pga. underafkøling

af vandet, og det kan derfor være relevant at vælge η svarende til en vis frysepunktssænkning i forhold til den teoretiske sammenhæng.

I øvrigt kræves en sammenhæng mellem porestørrelse og frysepunktstemperatur, hvis kalorimetri benyttes i stedet for sorption til at bestemme en porestørrelsesfordeling, [Villadsen,92].

Fordelingen af is, ikke-frosset vand og luft udtrykt ved formfaktoren A , har betydning for porefasens stivhed og dermed for spændingsopbygningen i materialet. A skønnes ud fra en formodning om, at det ikke-frosne vand primært befinder sig ved porevægge og i små porer, hvor det er stærkt bundet. Reelt er A en funktion af temperaturen, men på nuværende tidspunkt er det fuldt tilstrækkeligt at regne A konstant, jf. afsnit 3.2.3.

4.3 Eksponering i laboratoriet og naturen

For at koble de modelrelaterede forsøg til praktiske forhold foretages eksponeringsforsøg samt undersøgelser af materialets evne til at optage og transportere fugt. Bortset fra kapillarsugning, afsnit 4.3.1, udføres disse forsøg udelukkende på beton, jf. figur 4.1. Forsøgsmetoder beskrives nærmere i afsnit 5.5 - 5.6 samt [de Place,96c], jf. afsnit 4.1.

4.3.1 Karakterisering af fugttransportegenskaber

Kapillarsugning

Ved kapillarsugning bestemmes materialets evne til frivilligt at opsuge vand ved at sænke prøveemnet ca. 5 mm ned i vand og løbende bestemme sammenhørende værdier af tid og vægt, jf. afsnit 5.5 og [Beton-Bogen,85].

Desuden bestemmes vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning, $S_{vac,kap}$. Sammenholdt med den kritiske vandmætningsgrad giver det et udtryk for den potentielle frostbestandighed, jf. afsnit 2.3.5. Potentiel frostbestandighed dækker over, at $S_{vac,kap}$ er en tilnærmelse til de vandmætningsgrader, der i praksis kan opnås, men som er vanskelige at overføre til laboratorieforsøg.

Kapillarsugning foretages på prøveemner, der benyttes til dilatations- og resonansfrekvensforsøg.

Diffusion

Ved diffusionsforsøg bestemmes diffusionskoefficienter, dvs. størrelser der beskriver materialets evne til at transportere fugt på damp- og/eller væskeform. Diffusionskoefficienter kan bestemmes ved at udsætte to modstående flader af en skive af materialet for forskellige fugtforhold, fx forskellige RF .

Diffusionskoefficienter skal kombineret med sorptionsisotermer og porestørrelsesfordelinger danne basis for beregninger af kombineret væske-, damp- og varmetransport vha. programmet *MATCH* (*Moisture and Temperature Calculations for Constructions of Hygroscopic Materials*), [Pedersen,90].

Diffusionsforsøg udføres på 15 mm tykke skiver skåret af $\varnothing 100$ mm cylindre og sker i klimarum på SBI.

Beregning af fugttransport og fugtfordelingsprofiler

Med *MATCH* ønskes fugt- og varmetransport simuleret ved en standardiseret frostprøvning, afsnit 4.3.2, henholdsvis eksponering i naturen, afsnit 4.3.3. Mere konkret betyder det, at beregninger skal ske for tilfælde, 1) hvor materialet udsættes for vekslende frost-tø samtidig med, at overfladen er dækket af vand, 2) hvor materialet efter en periode med megen regn - svarende til efterår i Danmark - udsættes for frost.

Fugtfordelinger beregnet vha. *MATCH* skal sammenlignes med eksperimentelt bestemte fugtfordelinger. En eksperimentel bestemmelse søges foretaget vha. *gammastrålings-fugtmåleudstyr* i forbindelse med standardiseret frostprøvning. Måling med gammastråling beskrives nærmere i [de Place,93a,96c] og [Frandsen & Jensen,93].

Det er tanken at sammenholde fugtfordelingen under frostprøvning med den kritiske vandmætningsgrad, teoretisk eller eksperimentelt bestemt, for at undersøge, om materialet i den zone, hvor der sker nedbrydning, har et vandindhold svarende til den kritiske vandmætningsgrad.

4.3.2 Frostprøvning

Betonens frostbestandighed bedømmes vha. en direkte frostprøvning som det er beskrevet i den svenske frostprøvningsstandard SS 13 72 44 [1988]. Frostbestandigheden udtrykkes ved mængden af afskallet materiale efter et givet antal frost-tø-cykler. Frostprøvning sker både med og uden tilstedeværelse af salt på 50 mm tykke skiver skåret af $\varnothing 100$ mm cylindre.

En sådan prøvning har vist sig i rimelig grad at være i overensstemmelse med praksis for almindelig kvalitetsbeton, [Sellevold,88b] m.fl. En direkte frostprøvning kan på samme måde som en bestemmelse af trykstyrken lette sammenligningen med andres forsøg. Metoden er beskrevet nærmere i afsnit 5.6. Prøvning udføres på SBI.

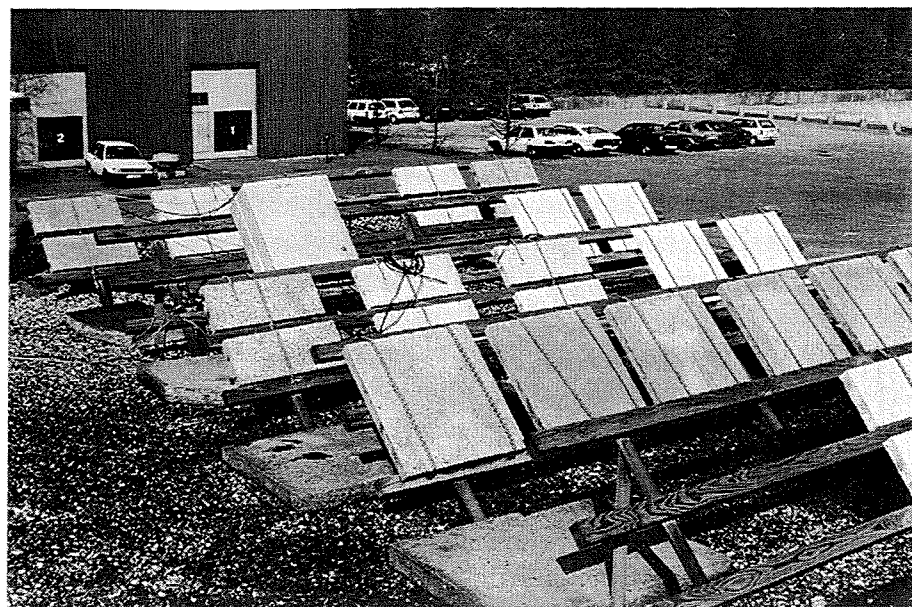
Det undersøges, om der er overensstemmelse mellem klassificeringen af beton i følge den direkte frostprøvning og frostbestandighed bestemt vha. den kritiske vandmætningsgrad. Desuden foretages sammenligning med frostbestandigheden udtrykt ved *frostmodstandstal*. Disse udtrykker frostbestandigheden indirekte som funktion af vand/cementforhold, mængden af luftporer etc., jf. afsnit 2.1.3 og bilag B3 [de Place,96b].

4.3.3 Eksponering i naturen

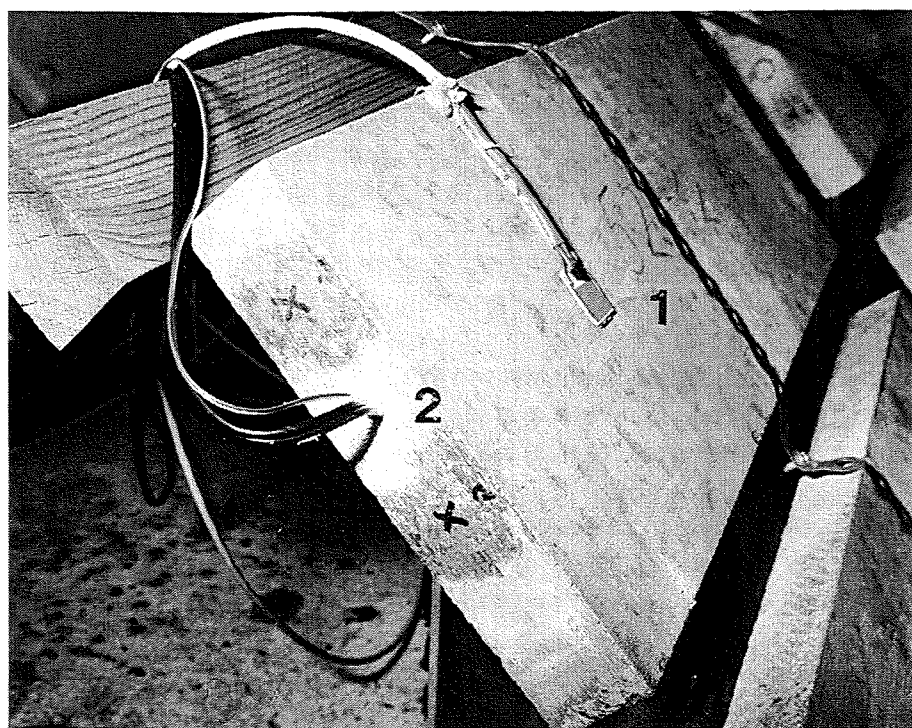
På et fladt tag ved Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) anbringes 6x3 40x200x500 mm betonfliser med en 45° hældning orienteret mod syd. Et udsnit af eksponeringsstationen ses på figur 4.7.

Der foretages måling af fugt- og temperaturforhold ved overfladen samt inde i fliserne. De forskellige målemetoder, der benyttes, præsenteres kort nedenfor. En nærmere beskrivelse findes i [de Place,96c]. Kombineret med beregninger af fugttransport er formålet med sådanne målinger bl.a. at give oplysninger om aktuelle vandmætningsgrader. Desuden følges betonens nedbrydning vha. måling af ultralydhastighed.

På 2x3 fliser monteres en vådtidsmåler og i 4x3 fliser anbringes et termoelement og en fugtmåleudstyr, som vist på figur 4.8, for at kunne registrere fugt- og temperaturforholdene ved overfladen henholdsvis inde i betonflisen.



Figur 4.7. Overblik - eksponeringsstation, SBI. Billedet er taget mod nordøst. Fliserne i det aktuelle projekt er fastholdt med ét spændebånd. Kassen på næstbageste række indeholder dataopsamlingsudstyr.



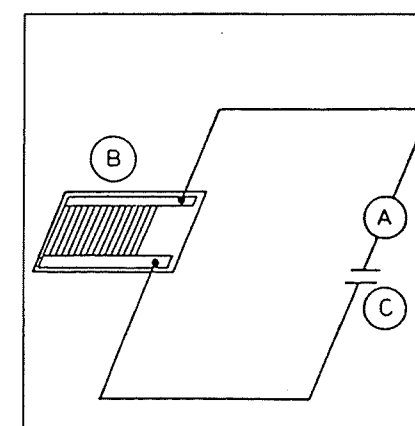
Figur 4.8. Placering af følere på eksponeret betonflise. Forsiden er en støbeflade, dvs. den har vendt ind mod formen ved udstøbning. 1 angiver en vådtidsmåler (Wetcorr), anbragt ca. 100 mm fra nærmeste kant. 2 viser, hvor termoelement og fugtmåledyvel er ført ind, ca. 80 mm fra overkanten. Hullet er 80 mm dybt. X'er markerer, hvor den ene transducer anbringes ved ultralydmåling. Punkter er anbragt ca. 40 mm henholdsvis 80 mm fra over- henholdsvis underkant af flisen.

Data fra vådtidsmålerne samt fra halvdelen af termoelementerne og dyvlerne registreres automatisk vha. dataloggere, der er anbragt i en fugttæt kasse på eksponeringsstationen, jf. figur 4.7. Data opsamles månedsvist. De resterende dyvler og termoelementer benyttes til manuel måling.

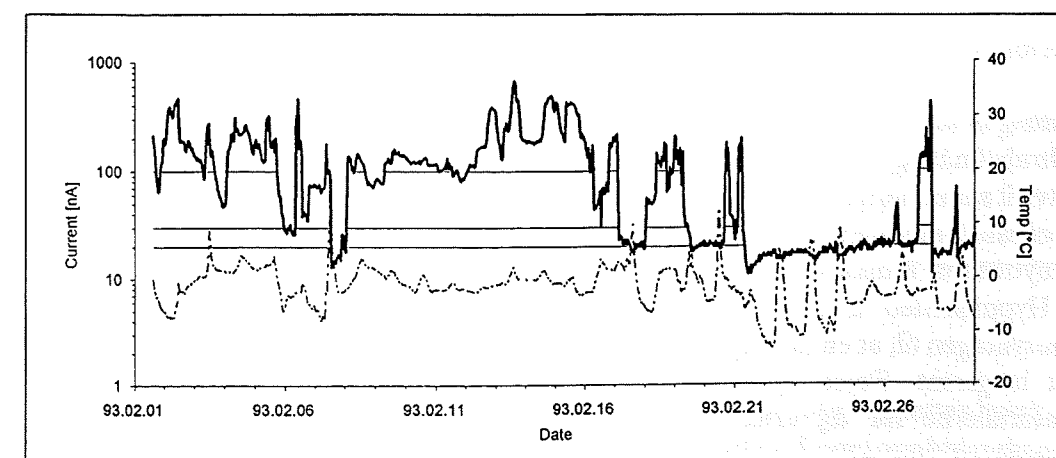
Den naturlige eksponering fortsætter ud over dette projekt, jf. figur 4.1, dog uden den automatiske dataopsamling.

Vådtidsmåling (Wetcorr)

Til måling ved overfladen benyttes et norsk udviklet måleudstyr kaldet Wetcorr. Wetcorr består af måleceller, der fastgøres til materialets overflade, jf. figur 4.8, og dataopsamlingsenheder. Ved at lægge en spænding over målecellen kan overfladefugten registreres, jf. figur 4.9. Det sker ud fra det princip, at dannelsen af en fugtfilm på sensorens overflade som følge af dug, kondens eller nedbør, øger ledningsevnen og derfor kan registreres som en øget strøm gennem målekredsen. En våd celle vil således give et stort udslag, mens en tør celle vil give et meget lille udslag, i teorien 0 A. Samtidig måles overfladetemperaturen.



Figur 4.9. Måleprincip til registrering af fugtbelastning. [Svennerstedt, 89]. A er amperemeter, B er målecelle, C er spændingskilde. Strømstyrken afhænger af fugtbelastningen.



Figur 4.10. Resultat af måling med Wetcorr. Overfladetemperatur og strøm gennem målecelle som funktion af tiden. Punktet linie angiver temperaturen. Vandrette linier er niveaulinier, der benyttes til at bestemme vådtiden for forskellige strømstyrker, her er benyttet 20, 30 og 100 nA. Egne målinger, februar 1993.

Den tid som strømstyrken overstiger en grænseværdi kaldes *vådtiden*, deraf navnet vådtidsmåler. Grænseværdien vil afhænge af de nærmere omstændigheder ved målepunktet, jf. [Henriksen & Haagenrud,94]. Figur 4.10 viser et eksempel på resultatet af sådanne målinger.

Fugtmåledyvlere

Til måling af fugt og temperatur inde i materialet benyttes trædyvlere og termoelementer, der placeres i huller boret ind fra siden af betonfliserne, jf. figur 4.8.

Ved at måle den elektriske modstand mellem to stifter boret ind i dyvlens ene ende, bestemmes fugtindholdet i trædyvlen. Trædyvlens fugtindhold antages at være i ligevægt med det omgivende hulrums *RF* og tilnærmelsesvis med *RF* i en vis zone af det omgivende materiale. Trædyvlere er derfor primært egnede til at følge langsomme ændringer i fugtindholdet, fx som følge af naturlig eksponering.

Trædyvlen er oprindeligt udviklet til måling i trækonstruktioner, se fx [Munch-Petersen,90].

Termoelementet registrerer temperaturen i hullet.

Registrering af vejrdata

Vejrdata i form af nedbørsmængden, antal solskinstimer, relativ luftfugtighed og lufttemperatur registreres automatisk hver time og opsamles månedsvist. Opsamling af vejrdata foregår af tekniske grunde ikke i hele eksponeringsperioden.

Ved at beskrive klimaet vha. relativ luftfugtighed og lufttemperatur er det muligt at udnytte en række eksisterende programmer til beregning af fugt- og/eller varmetransport, fx *MATCH*. Til gengæld kan mikroklimaet fx under et tagudhæng afvige væsentligt fra makroklimaet. I sådanne tilfælde vil data opsamlet vha. vådtidsmålere være et værdifuldt supplement.

I dette projekt udsættes fliserne for fri eksponering, jf. figur 4.7, hvorved en vis sammenhæng mellem vådtid og vejrforhold, først og fremmest udtrykt ved den relative fugtighed, kan forventes. Der foretages derfor en sammenligning af resultater for disse størrelser.

Måling af ultralydhastighed

Ultralydmåling er meget anvendt som ikke-destruktiv måling og benyttes ofte til sammenlignende målinger af betons kvalitet, fx for at undersøge hvordan E-modulen udvikler sig. Ændringer i det dynamiske E-modul kan benyttes som indikation af, om beton nedbrydes ved naturlig eksponering.

Hyppigheden af målinger med ultralyd i dette projekt vælges under hensyntagen til, at en nedbrydning under de beskrevne forhold vil forløbe ret langsomt. Først og fremmest er det af interesse at undersøge materialerne før og efter vintersæsonen. Placering af målepunkter fremgår af figur 4.8.

Referenceemner

4x3 40x200x500 mm betonfliser samt 3 betonprismer opbevares som reference for de eksponerede prøveemner ved 23°C og 65% *RF*, jf. bilag C1 [de Place,96b]. Der er ikke monteret vådtidsmålere. I alle

betonprismer samt i 3 fliser er anbragt fugtmåledyvlere. Måling af ultralydhastighed foregår på alle prøveemner. Temperatur aflæses på termohygrograf. Måling foregår manuelt i forbindelse med måling udendørs.

4.4 Anvendte materialer

I projektet arbejdes med blødstøgne tegl og med ikke-luftindblandet beton som repræsentanter for henholdsvis grovporøse og finporøse materialer.

I begge tilfælde er isotrope materialer tilstræbt, ligesom det har været ønsket at materialerne var så enkelt sammensatte som muligt, for at undgå for mange forstyrrende variable. En vigtig faktor i den forbindelse er, at den opstillede model pt. ikke tager højde for de specielle forhold der gør sig gældende for materialer med kunstigt indblandet luft.

Der arbejdes med fire teglserier og tre betonserier. For begge materialers vedkommende tages udgangspunkt i en referenceserie. En parameter, nemlig porestrukturen, ændres, for tegls vedkommende ved at tilsætte savsmuld i forskellige mængder før brændingen, og for betons vedkommende ved at ændre vand/cementforholdet.

Beton

Beton fremstilles hos firmaet AEC Rådgivende Ingeniører A/S i Trørød. Der er fremstillet tre blandinger med et vand/cementforhold, *w/c*, på 0,3, 0,45 og 0,7. Betonserierne benævnes gennemgående ved deres vand/cementforhold, dvs. beton 0.30 osv. Betonrecepter er vist i tabel 4.2.

Tabel 4.2. Betonrecepter. Mængder angives i [kg/m³].

	Type/Oprindelse /Klasse	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
<i>w/c</i>		0,3	0,45	0,7
Cement	PC(R/IS/MA/G)	426	349	264
Vand	Drikkevand	109	155	185
SP-TSS *	Peramin F	27,7	3,5	0
Sand	Ry 0-4 mm, kl SA	643	643	643
Sten 1	Glensanda 4-8 mm, kl A	189	189	189
Sten 2	Glensanda 8-16 mm, kl A	1058	1058	1058

*: Superplastificeringsmiddel.

For at opnå en så simpel sammensætning som muligt tilsættes hverken luftindblandingsmidler, flyveaske eller mikrosilica. For at opnå blandinger med omtrent samme konsistens (sætmål) tilsættes superplastificeringsmiddel (SP-TSS) til blandingerne med *w/c* = 0,3 og 0,45. Bortset herfra er den eneste forskel på de tre blandinger forholdet mellem vand og cement. Cementen er en Rapidcement, mens tilslag er smeltevandssand og granitskærver med en største stenstørrelse på 16 mm.

For hver serie er blandet to batches på hver 40 liter. Prøveemner til de forskellige forsøg vælges så vidt muligt fra begge batches, jf. bilag C1 [de Place,96b].

Tegl

Der benyttes blødstrøgne sten fremstillet af gul ler fra Prøvelyst Teglværk i Karlebo. Gule sten er valgt, da de erfaringsmæssigt er lidt dårligere end røde. Blødstrøgne sten er valgt på trods af, at de erfaringsmæssigt er af en bedre kvalitet end strengpressede. Til gengæld er strengpressede sten mere besværlige at regne på rent modelmæssigt, pga. den laminering der opstår under produktionen. Der er kun valgt én type sten, da blødstrøgne og strengpressede pga. strukturforskelle og forskelle i tilsætning af sand til leret ikke kan sammenlignes. Til gengæld varieres porøsiteten ved at tilsætte ekstra savsmuld til leren.

100 sten udtaget fra den almindelige produktion en tilfældig dag i januar 1993 benyttes som reference. Serien benævnes tegl 0. Af produktionsmæssige årsager tilsætter teglværket ca. 4 vol% savsmuld til leret ved fremstillingen. Ønsket om en referenceserie helt uden savsmuld kunne derfor ikke opfyldes.

Et antal serier med forhøjet indhold af savsmuld blev fremstillet på Prøvelyst uden at det ønskede resultat - en højere porøsitet - blev opnået. Disse eksperimenter er beskrevet nærmere i bilag C2.

I stedet er der i forbindelse med et eksamensprojekt på LBM, DTU fremstillet tre serier, hvor det lykkedes at opnå en højere porøsitet vha. et forhøjet indhold af savsmuld. Ubrændte, utørrede sten med en sammensætning svarende til serien tegl 0 blev anvendt som basis. Fremstillingen af disse serier, der er foretaget manuelt på LBM med brænding på Inst f Mineralindustri, DTU, er nærmere beskrevet i [Ejsing,93]. Sammensætningen af blandingerne angives desuden i bilag C2. I det følgende benævnes disse serier tegl A, tegl B og tegl C.

Opbevaring af teglemner sker ved almindelig indendørs klima.

5. Beskrivelse af forsøgsmetoder

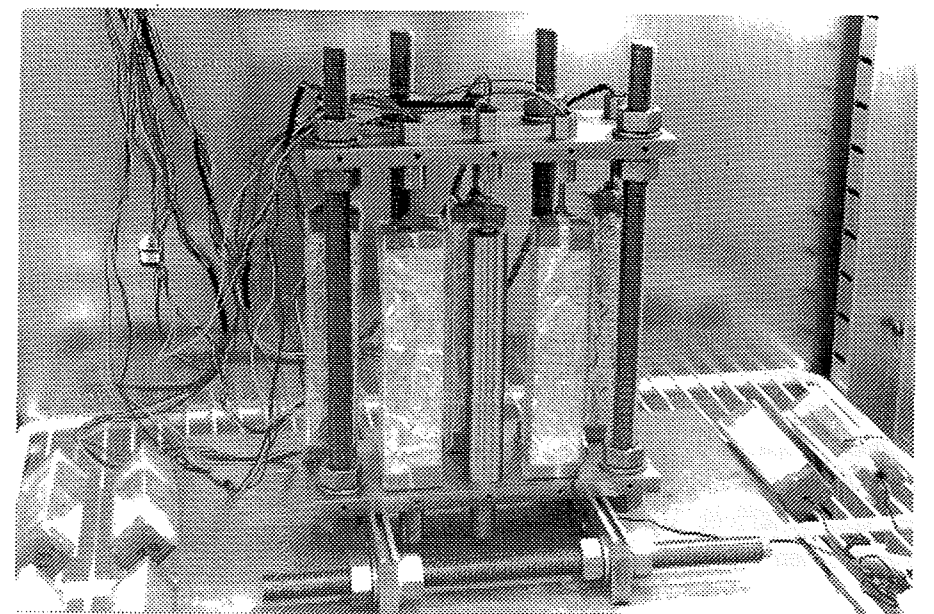
5.1 Dilatationsforsøg

Ved frysning af porøse vandholdige materialer vil der ske to former for længdeændringer, dels en lineær der skyldes temperaturændringen, dels en ikke-lineær der antages at være et resultat af, at vand udvider sig, når det fryser. *Dilatation* betegner størrelsen af den ikke-lineære længdeændring, jf. afsnit 2.2.5, dvs. den længdeændring der forbindes med vands udvidelse ved frysning. Ud fra sammenhørende værdier af dilatation og vandmætningsgrad bestemmes parameteren B i den opstillede model, jf. afsnit 4.2.1, ligesom den kritiske vandmætningsgrad fastlægges.

Til bestemmelse af længdeændringer af tegl- og betonprøver under frysning benyttes et computerstyret klimaskab, der i det følgende benævnes *SKANFRYS*. *SKANFRYS* er udstyret med mulighed for at måle flytninger/deformationer med lineære flytningsmålere. *SKANFRYS* er beskrevet nærmere i [C.B.Nielsen,92] samt bilag E1.1 [de Place,96b]. I det følgende omtales primært de ændringer i opstillingen, der er foretaget i forhold til beskrivelsen i [C.B.Nielsen,92].

5.1.1 Opstilling

Målingerne foregår vha. en måleramme som vist i figur 5.1. Målerammen består af to metalplader og fire gevindstænger med tilhørende møtrikker udført i rustfri stål.



Figur 5.1. Opstilling til dilatationsforsøg i klimaskab. Lodret stillet måleramme med fem prøveemner og en dummy (forrest, midtfor), alle monteret med flytningsmålere.

Imålerammen er monteret fem prismeformede forseglede prøveemner, to i forreste række og tre i bageste, jf. figur 5.1, samt en 160 mm lang cylinderformet stang af materialet *INVAR*, der ses midt på billedet i figur 5.1. Desuden er monteret seks flytningsmålere. *INVAR*stangen indgår som referenceforsøgsemne i samtlige forsøg, da den har en veldefineret temperaturudvidelseskoefficient, jf. bilag E1.2 [de Place,96b]. Det bevirker, at de deformationer som flytningsmålerne registrerer, kan korrigeres for rammens egen deformation under forsøget. *INVAR*stangen muliggør samtidig en slags kvalitetskontrol af hvert enkelt forsøg.

Målerammen er til disse forsøg stillet vertikalt, jf. figur 5.1, dels for at udnytte antallet af flytningsmålere bedre, dels for at undgå mellemunderstøtninger som en horisontal opstilling nødvendiggør. Med en vertikal opstilling er én flytningsmåler pr. prøveemne tilstrækkeligt, forudsat at prøveemnerne er fikseret i den modsatte ende. En vertikal opstilling er mere følsom overfor rystelser under forsøget. Målerammens gevindstænger er placeret således, at rammen så vidt muligt er forhindret i at bøje eller vride under forsøget. Se også bilag E1.1.

En flytningsmåler består af en differentialtransformer (spole), der spændes fast i målerammen vha. en pinolskrue, og en bevægelig kerne. Der ses bort fra friktion mellem kerne og spole. Kernen skal derfor fastgøres til prøveemnet, jf. afsnit 5.1.4. Opbygningen og virkemåden af flytningsmålerne er beskrevet nærmere i [C.B.Nielsen,92]. Se også bilag E1.1.

5.1.2 Computerstyring

Klimastyring og dataopsamling foregår via en computer samt et specialfremstillet styreprogram, der registrerer temperatur og relativ fugtighed i *SKANFRYS*. Forløb af temperatur og relativ luftfugtighed kan indprogrammeres - enten fra en manuskriptfil eller manuelt - således at et vilkårligt forløb af klimaet kan opnås.

Programmet kan desuden styre og registrere data fra op til otte flytningsmålere i *SKANFRYS*. Antallet af tilsluttede målepunkter samt intervallet mellem to målinger kan angives. Kalibrering af flytningsmålere foregår også fra programmet. En manual for programmet findes i [C.B. Nielsen,92].

5.1.3 Registrering af temperatur

Temperatur og relativ fugtighed i skabet registreres af en føler placeret øverst i skabet. Desuden måles temperaturen i prøveemner vha. termoelementer, jf. nedenfor, for at kontrollere overensstemmelsen mellem skabstemperatur og prøvetemperatur under fryse-tø-forløbet. Temperaturmålinger med termoelementer opsamles automatisk vha. en datalogger, der kort beskrives i bilag E1.3 [de Place,96b]. Termoelementerne kalibreres inden forsøget ved henholdsvis -20° , 0° og $+20^{\circ}\text{C}$.

5.1.4 Klargøring og måling

Forsegling af prøveemner

Ved frysning af vandholdige, porøse materialer vil noget af vandet diffundere ud af prøveemnet og fryse på overfladen, hvorved vandmætningsgraden i prøveemnet mindskes. Dette er primært et problem for grov-

porøse materialer, pga. deres høje porøsitet og store indhold af frysbart vand.

For at minimere problemet forsegles prøveemner af tegl på alle flader på nær endeflader med en tokomponent polyurethan, der smøres på inden vandopsugning. Der sker ikke yderligere forsegling inden forsøget.

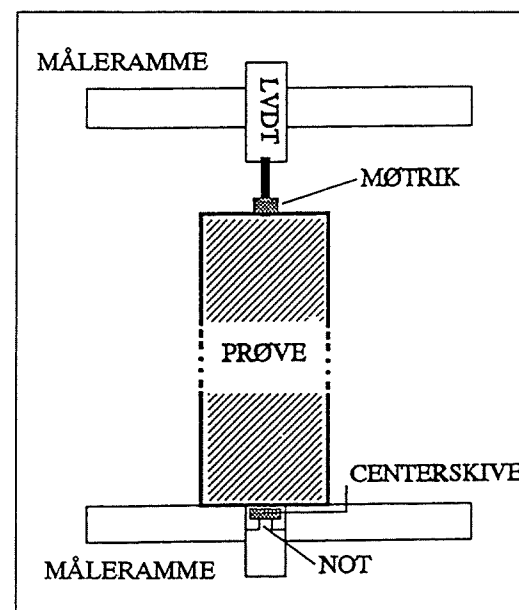
For beton er problemet langt mindre pga. den lavere porøsitet og et stort indhold af ikke-frysbart vand. Betonemner forsegles derfor med en forsegling bestående af to lag polyethylenfolie med et lag aluminiumfolie imellem, primært for at undgå fugttab under forsøget. Forsegling af beton sker efter opnåelse af den ønskede vandmætningsgrad.

Valg af forsegling omtales yderligere i bilag D [de Place,96b].

Fiksering af prøveemner i måleramme

En møtrik og en centerskive af messing limes på hver sin ende af prøveemnet. Møtrikken benyttes til at fastholde flytningsmålerens kerne til prøveemnet med. Ved at have kontakt med en not skal centerskiven forhindre sideværts bevægelser af prøveemnet nederst i rammen, jf. figur 5.2. Noten er spændt fast i målerammen vha. en pinolskrue og kan indstilles i højden, således at der lige netop sker en fiksering uden at prøveemnet direkte hviler på noten.

Med en vertikal opstilling opnås som nævnt en øget bevægelsesfrihed, idet mellemunderstøtninger kan undgås. For at få glæde af dette er det nødvendigt, at prøveemnernes endeflader er parallelle, samt at skiverne placeres præcist på disse, således at enhver form for indspænding undgås.



Figur 5.2. Fiksering af prøveemne i måleramme. Møtrikken er en rouletmøtrik med indvendig diameter 3 mm, udvendig 10 mm. Centerskiven er en skive uden gevind, med indvendig diameter 5 mm, udvendig 10 mm, tykkelse 2,5 mm.

Centrering af skiverne sikres bedst ved først at lime centerskiven fast til prøveemnet. Dernæst skrues møtrikken fast på flytningsmålerens kerne. Endelig anbringes prøveemnet i målerammen og flytningsmålerens spole - som er anbragt i det dertil hørende monteringshul i målerammen -

udnyttes til at få placeret møtrikken korrekt på prøveemnet. Hvis skiverne ikke er ordentligt centreret kan målingen forstyrres, fordi kernen ikke kan vandre frit i spolen. Det samme vil ske, hvis vinklerne mellem prøveemnets endeflader og langsider ikke er rette.

Indstilling af flytningsmålere

Når prøveemnet er anbragt i målerammen, skal flytningsmålerens spole eventuelt forskydes i vertikal retning, således at udgangsspændingen kommer så tæt på nulpunktet som muligt. Herved kan flytningsmåleren registrere bevægelser i begge retninger. Udenfor det målbare område (+/-2V) viser forstærkeren overflow (-1. henholdsvis 1.).

Montering af termoelementer

I udvalgte prøveemner, der ikke benyttes til selve dilatationsforsøget, bores et hul i længderetningen, inden prøveemnet opfugtes. Når prøveemnet har opnået den ønskede vandmætningsgrad, anbringes et termoelement i hullet, der stoppes til med et varmeisolerende materiale. Termoelementets ende er snoet et par gange rundt om sig selv for at minimere varmeledning til/fra omgivelserne. Desuden anbringes et termoelement mellem prøveemne og forsegling for at måle overfladetemperaturen. Termoelementer kobles til datalogger, jf. [Nielsen & Markussen,91].

Prøvning (fremgangsmåde)

Gennemgående benyttes de samme prøveemner til dilatationsforsøg og bestemmelse af resonansfrekvens (afsnit 5.2). I hovedsagen benyttes følgende fremgangsmåde:

- montering af messingskiver, jf. figur 5.2
- forsegling (tegl)
- bestemmelse af resonansfrekvens på tørt prøveemne (afsnit 5.2)
- vacuumvandmætning (afsnit 5.3.1)¹
- konditionering til en ønsket vandmætningsgrad (afsnit 4.2.1)
- opbevaring i plastpose af hensyn til fugtudjævning²
- bestemmelse af resonansfrekvens på opfugtet prøveemne³
- forsegling (beton)
- dilatationsforsøg
- forsegling fjernes (beton)
- bestemmelse af resonansfrekvens på opfugtet prøveemne³
- eventuelt nyt forsøg⁴ (beton)
- udtørring
- bestemmelse af resonansfrekvens på tørt prøveemne (afsnit 5.2)
- afsluttende vacuumvandmætning samt udtørring ved 105° (beton)

1 Vacuumvandmætning sker for at bestemme vægt i vandmættet tilstand og skønne porøsiteten (en endelig bestemmelse kræver kendskab til vægt efter udtørring ved 105°C).

2 Varighed af fugtudjævning normalt 2-4 døgn (beton) henholdsvis 1 døgn (tegl).

3 Beton, afsnit 5.2.

4 Proceduren gentages fra "konditionering til en ønsket vandmætningsgrad" på uskadte emner. Hvorvidt et emne er uskadt afgøres ved at sammenligne resonansfrekvens før og efter dilatationsforsøget samt ved at studere forløbet af dilatationsforsøget. Er der tydelige afvigelser fra et lineært forløb, karakteriseres emnet som skadet.

Temperaturcyklus

Som start- og sluttemperatur benyttes +20°C, mens -20° er laveste temperatur under forsøgene. Dog benyttes +10° som sluttemperatur for første og anden cyklus i et enkelt betonforsøg med tre frost-tø-cykler. Alle forsøg afsluttes med en konstant temperatur på 20° i mindst en time.

Afkølings- og optøningshastigheder er valgt så de i rimelig grad afspejler virkelige forhold, jf. [Fagerlund,72b,77].

Ved samtlige teglforsøg benyttes en temperaturcyklus med en afkølings- og optøningshastighed på 3°/h henholdsvis 2°/h for temperaturer over henholdsvis under +2°. Så snart temperaturen -20° er nået påbegyndes optøning.

For beton benyttes 5°/h som afkølings- og optøningshastighed, mens antallet af frost-tø-cykler varierer fra én til tre, jf. bilag F2 [de Place,96b]. En skabstemperatur på -20° fastholdes ved forsøg med beton i op til otte timer for at undersøge, om der kan iagttages en fortsat længdeændring ved konstant temperatur, jf. [Powers & Helmuth,53] og afsnit 2.2.2.

5.2 Resonansfrekvens

Alle materialer vil ved frekvenser, der er karakteristiske for det enkelte materiale, komme i egensvingninger. Disse frekvenser er de såkaldte *resonansfrekvenser*. Resonansfrekvensen kan benyttes til at detektere skader for porøse materialer. Det skyldes, at den giver et indirekte mål for det dynamiske E-modul, som mindskes, når porøse materialer udsættes for nedbrydning, fx ved frost-tø-påvirkning.

Der gælder, jf. [Pickett,45] m.fl., at

$$E_{DYN} = k m f_e^2 \quad (5.1)$$

hvor E_{DYN} betegner det dynamiske E-modul [GPa], k er en konstant [m^{-1}], der afhænger af prøveemnets geometri, hvilken type svingninger prøveemnet sættes i, hvilken resonansfrekvens der er tale om, samt af Poisson's forhold ν . m angiver prøveemnets vægt [kg], f_e er resonansfrekvensen [Hz].

Til bestemmelse af resonansfrekvens i forbindelse med forsøg i SKANFRYS benyttes et modalanalyseudstyr fra Brüel & Kjær bestående af en signalanalysator, et accelerometer og en krafttransducer, jf. bilag E2.1 [de Place,96b]. Krafttransduceren er udformet som en lille hammer og benævnes sådan i det følgende.

Måling af resonansfrekvens foregår i hovedsagen på prøveemner, der benyttes til dilatationsforsøg, og anbringes derfor i SKANFRYS som vist i afsnit 5.1. Resterende prøveemner anbringes vandret på trådhylder i SKANFRYS. Prøvepræparation samt forløb af temperaturcyklus sker i øvrigt som beskrevet i afsnit 5.1.4.

5.2.1 Skadesdetektering vha. resonansfrekvens

Princippet ved målemetoden er følgende: Accelerometret fastgøres med bivoks til et prøveemne, der ophænges med understøtninger i femtedels-

punkterne, jf. afsnit 5.2.2. Med hammeren slås midt på prøveemnet i dets tværretning, hvorved det sættes i svingninger.

Ved resonansfrekvenserne vil materialet reagere særligt kraftigt på hammerslaget, jf. at det er kommet i egensvingninger. Reaktionen registreres af accelerometret.

Det bedste resultat fås ved at anbringe accelerometret så langt som muligt hen mod enden af den flade, der slås på med hammeren, som antydnet på figur 5.3. For at sikre et pålideligt resultat er det en fordel at slå flere gange, fx 10. Analysatoren er i stand til at behandle en sådan række af slag, jf. bilag E2.1 og [de Place,94].

På signalanalysatoren afbildes den normerede reaktion som funktion af frekvensen. Resonansfrekvenser vil give sig til kende som toppunkter på kurven. I dette projekt er kun den laveste resonansfrekvens - grundfrekvensen - benyttet, da denne er lettest at detektere.

For at bestemme E_{DYN} vha. (5.1) skal k bestemmes. Imidlertid er det *ændringen* af E_{DYN} , der er den interessante størrelse i denne sammenhæng. Ved at arbejde med forseglede prøveemner, hvorved m er uændret, kan (5.2) benyttes til at vurdere skadesgraden udtrykt som en reduktion af E_{DYN} , [Warris,64], [Fagerlund,72b]. Derved bliver bestemmelsen af k unødvendig i praksis.

$$\frac{E_n}{E_0} = \left(\frac{f_n}{f_0} \right)^2 \quad (5.2)$$

hvor indeks 0 og n angiver, at værdien er bestemt efter 0 henholdsvis n frost-tø-cykler.

Warris [1964] konkluderer, at en reduktion af E_{DYN} på op til 10 % kan accepteres, før materialet kan siges at være skadet. Dette kriterium lægges derfor til grund for bestemmelsen af den kritiske vandmætningsgrad ud fra måling af resonansfrekvensen. Resonansfrekvensen samt dennes anvendelse i forbindelse med detektering af frostskafer behandles mere udførligt i [de Place,94].

Ud over resonansfrekvens bestemmes også den indre dæmpning, d , udtrykt ved tabsvinklen

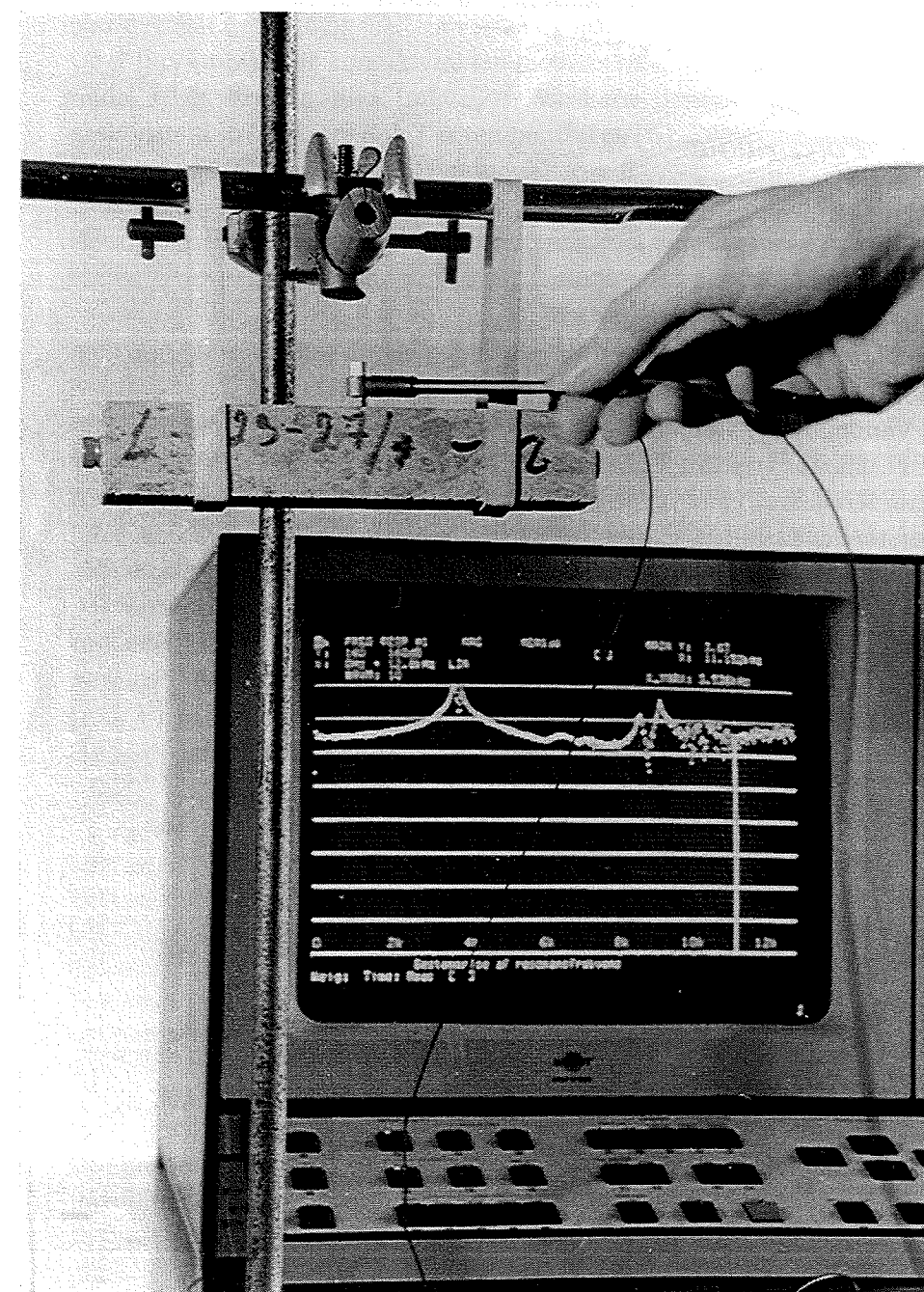
$$\delta = \frac{f_2 - f_1}{f_e} \pi \quad (5.3)$$

hvor f_1 og f_2 er frekvenser med en amplitude på $\sqrt{2}/2$ af amplituden for f_e , resonansfrekvensen. Den indre dæmpning kan herefter bestemmes som $d = \tan \delta$. Da det også for dæmpningen gælder, at det er *ændringen*, der har interesse, har det dog ingen betydning, om d eller δ anvendes.

Et fejlfrit materiale vil kun i begrænset omfang dæmpe et dynamisk signal, mens et skadet materiale fyldt med revner vil dæmpe signalet voldsomt. Indre dæmpning har tidligere vist sig at være mindre egnet til at detektere frostskafer for grovporøse materialer som tegl, idet dæmpningen varierer *meget* for vandmætningsgrader omkring den kritiske, [Fagerlund,72b].

5.2.2 Opstilling

Der benyttes en opstilling, hvor prøveemnerne understøttes i femtedelspunkterne vha. to gummibånd, ophængt i et stativ med en passende tung fod. At understøtningen netop sker i femtedelspunkterne - eller helt præcist $0,224 \times l$ fra hver ende af prøveemnet, hvor l er længden af prøveemnet - skyldes at disse punkter er knudepunkter for svingninger ved grundfrekvensen, jf. [de Place,94], [Vinkeloe,62]. Opstillingen er vist på figur 5.3.



Figur 5.3. Opstilling til bestemmelse af resonansfrekvens ved bøjningspåvirkninger. Prøveemnet er ophængt i femtedelspunkterne. Accelerometret er skjult bag hånden.

En sådan opstilling kan benyttes fordi komponenterne - hammer og accelerometer - er meget små. Desuden er belastningen fra hammerslaget meget lille i forhold til en opstilling, hvor prøveemnet belastes vedvarende med en vibrator. I så fald kan det være aktuelt med en mere solid understøtning, jf. [de Place,94].

Analysatoren fodres med en række informationer om typen af måling, komponenternes karakteristika etc., som beskrevet i [de Place,94], der ligeledes giver en mere udførlig beskrivelse af det benyttede apparatur. I bilag E2.2 [de Place,96b] ses den benyttede skærmopsætning til styring af de udførte målinger. Specifikationer på udstyr findes i [de Place,94] og [B&K Manual,92].

5.3 Porestruktur

Porestrukturen beskrives vha. den totale porøsitet, en porestørrelsesfordeling samt poreformen som omtalt i afsnit 4.2.2 - 4.2.4.

5.3.1 Porøsitet og densitet

Den totale porøsitet kan bestemmes ved at vandmætte prøveemner vha. vacuum eller overtryk (150 atm).

Vandmætning vha. vacuum foregår ved at evakuere prøveemnerne tørt i en eksikator i mindst 3 timer ved et tryk på 1 torr ($1 \cdot 10^{-3}$ atm), hvorefter demineraliseret vand ledes ind. Derefter evakueres atter for at få den største del af luften drevet ud af materialets porer. Luft ledes ind i eksikatoren. Afhængig af materialetype opbevares prøveemnerne under vand i et eller flere døgn, hvorefter de vejes under vand, m_{sw} , og i mættet, overfladetør tilstand, m_{ssd} . Prøveemnerne tørres ved 105°C til konstant vægt og vejes, m_{105} . Den åbne porøsitet, p_a , og tørdensiteten, ρ_d , kan herefter bestemmes som

$$p_a = \frac{V_{p\ddot{a}}}{V} = \frac{m_{ssd} - m_{105}}{m_{ssd} - m_{sw}} \quad (5.4)$$

$$\rho_d = \frac{m_{105}}{V} = \frac{m_{105}}{m_{ssd} - m_{sw}} \rho_w \quad (5.5)$$

V er volumenet af materiale incl. porer, $V_{p\ddot{a}}$ er porevolumenet [m^3].

Som et alternativ eller supplement til vacuumvandmætning kan trykmætning benyttes. Vacuumvandmættede prøveemner kan med fordel benyttes. Prøveemnerne placeres i en trykbeholder med manometer. Beholderen fyldes med vand til det løber over. Låget sættes på og boltes fast, hvorefter der skabes et overtryk på 150 atm. Trykket bibeholdes til følgende dag, hvor prøveemnerne vejes straks efter at være taget ud af beholderen (m_{ssd} og m_{sw}).

5.3.2 Sorption

Porøse bygningsmaterialer er hygroskopiske, dvs. de har en evne til at optage fugt fra luften og binde den som vandmolekyler til overfladen af porerne. Dette fænomen kaldes adsorption. Tilsvarende tales om

desorption, når materialet afgiver fugt, jf. figur 4.4. Afhængigt af den relative luftfugtighed, RF , vil molekylerne bindes i et eller flere lag til overfladen, [Gregg & Sing,67], [Ahlgren,72], [Hagemann,91]. Ved høj RF vil der ske en kapillarkondensation, hvorved poren efterhånden fyldes med vand. Porestørrelsen er bestemmende for, ved hvilken RF der sker kondensation, jf. Kelvins ligning

$$\ln(RF) = - \frac{2 \sigma M \cos\theta}{r_k \rho_v R T} \approx - \frac{1,075 \cdot 10^{-9} [\text{m}]}{r_k} \quad (5.6)$$

σ er overfladespænding mellem væske og luft [N/m], M er væskens molvægt [kg/kmol], θ er kontaktvinklen mellem væske og materialets overflade, r_k er Kelvinradius [m], ρ_v er væskens densitet [kg/m^3], R er gaskonstanten [$\text{J}/(\text{kmol K})$], T er temperaturen [K]. Tilnærmelsen gælder for vand ved 20°C , jf. [CRC Handbook]. $\theta \approx 0^\circ$.

En sorptionskurve angiver sammenhørende værdier af relativ fugtighed, RF , og ligevægtsfugtindhold, u , i et materiale. u angives typisk i [kg/kg]. Er der tale om værdier bestemt ved en fastholdt temperatur, tales der om en *sorptionsisoterm*. RF kan styres vha. mættede saltopløsninger. Ved at anbringe små materialeprøver i eksikatorer over forskellige salte indtil vægtkonstans, kan sorptionsisotermen fastlægges. Som prøver benyttes nedknust materiale.

Når en adsorptionsisoterm bestemmes, skal prøverne efter knusning tørres ved 105° til vægtkonstans, hvilket har den ulempe, at porestrukturen kan "forstyrres", jf. s.19-20. Til en desorptionsisoterm benyttes våde prøver, hvorved problemet undgås.

I tabel 5.1 angives de salte, der er anvendt til sorptionsisotemer. Der foretages dobbeltbestemmelse af de enkelte værdier, jf. afsnit 4.2.3.

Tabel 5.1. Mættede saltopløsninger og de tilhørende ligevægtsværdier for RF benyttet ved bestemmelse af sorptionsisotemer.

Salt		RF [%]	Anvendt til
Lithium chlorid	LiCl	11	beton & tegl
Kalium acetat	KCH_3COO	23	-
Magnesium chlorid	MgCl_2	33	-
Kalium carbonat	K_2CO_3	44	-
Natrium bromid	NaBr	58,5	beton
Natrium nitrit	NaNO_2	65	tegl
Natrium chlorid	NaCl	75,5	beton
Kalium nitrat	KNO_3	93	beton & tegl
Kalium sulfat	K_2SO_4	97	beton

Ligevægtsfugtindholdet, u , bestemmes på basis af tørvægten, m_{105} , og massen ved ligevægt, m

$$u = \frac{m - m_{105}}{m_{105}} \quad (5.7)$$

Sorptionsisotermen kan benyttes til at bestemme en porestørrelsesfordeling for porer af størrelsen 1 nm - 100 nm vha. en såkaldt *V-t poreanalyse*, jf. bilag E3.1 [de Place,96b]. Denne analyse giver sideløbende med en porestørrelsesfordeling også en værdi for den specifikke overflade af materialet, dvs. porernes overfladeareal regnet i forhold til porevolumen eller materialets vægt, jf. bilag E3.2. Jo mere finporøs og kompliceret porestruktur, desto større specifik overflade.

5.3.3 Slib og mikroskopi

Til studier af porestruktur i mikroskop fremstilles planslib af beton og tegl. Små prøver (15x15x20 mm) indstøbes i epoxy, hvorefter al epoxyen på nær et meget tyndt lag slibes af på den flade, der skal studeres. Til slut poleres overfladen. Epoxyen skal sikre, at porestrukturen ikke forstyrres ved den efterfølgende behandling og undersøgelse.

Slibet fotograferes i et scanningelektronmikroskop (SEM). Efter montering af planslib i SEM beskydes slibet med elektroner. De reflekterende elektroner skaber SEM-billedet. For at opnå refleksion indampes forinden sølvpartikler i slibets overflade under vacuum. Ved at benytte en såkaldt backscattered teknik ved fotografering øges kontrasten i billedet. Herved opnås normalt gode billeder med stor dybdeskarphed ved forstørrelser op til ca. 1000x.

På basis af disse billeder kan porestrukturen studeres, ligesom en porestørrelsesfordeling i området fra ca. 0,1 μm til ca. 1 mm kan bestemmes manuelt eller vha. billedbehandling, jf. afsnit 5.3.4.

For alle prøver startes med en forstørrelse på 1010x, hvorefter der zoomes ud og fotograferes ved 503x, 252x og 31,4x. På den måde er det lettere at undgå at nærbillederne fx kun viser en sten. Forinden studeres slibet overordnet for at finde repræsentative udsnit.

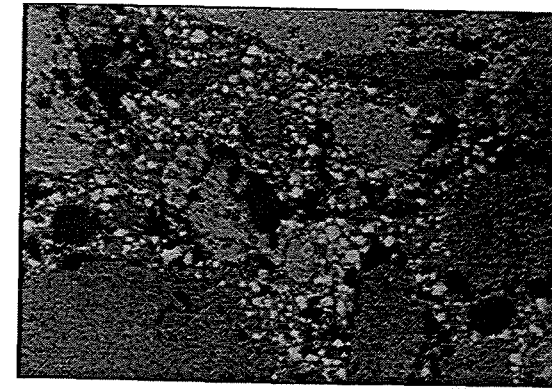
Forstørrelserne ændres ved overførsel af negativer til 13x18 cm s/h papirkopier og atter i forbindelse med billedbehandlingen, jf. afsnit 6.3. På den måde er 31,4x fx blevet til 65x på figur 5.4 - 5.6.

5.3.4 Billedbehandling

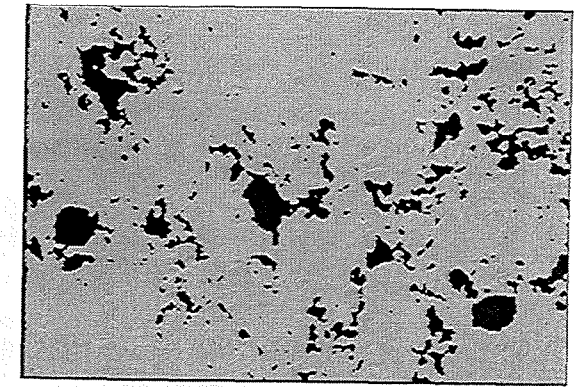
Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTU, råder over et billedbehandlingsprogram kaldet PIPPIN. PIPPIN er i stand til at digitalisere et billede, fx et SEM-foto, der derefter kan analyseres med henblik på at bestemme en porestørrelsesfordeling. Uanset at billedbehandlingen er computerbaseret, vil resultatet i høj grad afhænge af, hvordan et billede tolkes af programmets bruger.

Figur 5.4 viser et digitaliseret SEM-foto. Figur 5.5 viser det samme billede efter at det er opdelt i to faser, porer og faststof. Figur 5.6 viser billedet undervejs i porestørrelsesanalysen, hvor porer under en vis størrelse er fjernet. Bemærk, at de tiloversblevne porer samtidig er blevet noget afrundede.

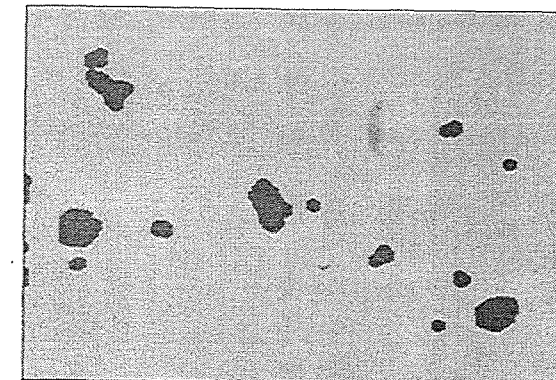
Ved at notere sammenhørende værdier af porestørrelse og restporøsitet bestemmes en porestørrelsesfordeling, typisk for porer med en radius på 0,1 μm til 1 mm. Opstillingen samt brug af PIPPIN er beskrevet nærmere i [de Place & Mullit,94].



Figur 5.4. Digitaliseret billede af beton 0.30. Forstørret 65 gange. Virkelig størrelse af udsnit: 1,1 x 0,76 mm.



Figur 5.5. Binariseret billede af beton 0.30. Det digitaliserede billede er opdelt i to faser.



Figur 5.6. Binariseret billede af beton 0.30. De mindste porer er fjernet ved en såkaldt Dilationsteknik, [de Place & Mullit,94].

I litteraturen findes andre eksempler på computerbaserede metoder til beskrivelse af porestruktur, fx ved at benytte en række todimensionale billeder til at opnå en tredimensionel beskrivelse, eller ved at studere poresystemets konnektivitet (sammenhæng), jf. bilag B2 [de Place,96b].

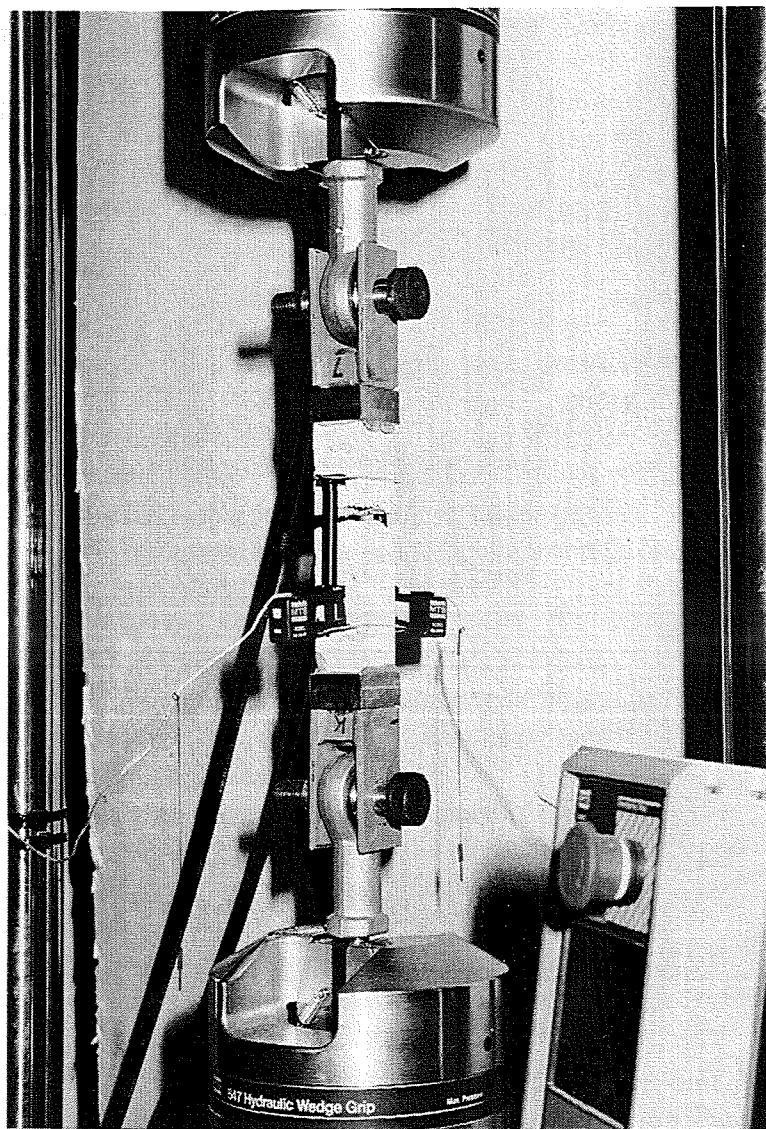
5.4 Mekaniske egenskaber

5.4.1 Trækstyrke, E-modul

Trækstyrke og E-modul af de undersøgte materialer bestemmes ved enaksede trækforsøg på SBIs 100 kN servo-hydrauliske universalprøvemaskine. En vilkårlig belastningshistorie kan programmeres vha. en computer, der styrer prøvemaskinen.

Prøveemner til trækprøvning fastholdes i maskinen vha. de tilhørende kæber. Der gøres ikke foranstaltninger for at styre hvor bruddet skal opstå, fx ved at indsnævre tværsnittet midt på prøveemnet.

Et kontrolpanel benyttes til at åbne og lukke kæber med samt til at starte og stoppe forsøg. Kontrolpanelet er integreret med styreprogrammet. Kontrolpanelet og kæberne ses på figur 5.7. I bilag E4.1 [de Place,96b] gives et samlet overblik over opstillingen.



Figur 5.7. Opspænding af prøveemne til trækforsøg. I midten prøveemne af tegl med ekstensometre. Prøveemnet er via charnierer spændt fast i prøvemaskinens kæber. Nederst til højre ses kontrolpanelet.

Opspænding af prøveemner

For at opnå en énakset spændingstilstand indgår to charnierer i opspændingen som vist på figur 5.7. En opspænding med charnierer benyttes, da materialerne er så sprøde, at spændings-tøjnings-relationen vil forløbe stort set lineært til brud. Ulempen ved en opspænding med charnierer i forhold til en mere stiv opspænding er, at charniererne kan låse sig fast og give anledning til spændingskoncentrationer ved endeflader pga. asymmetrisk belastning. De benyttede charnierer er en variant af eksemplet i [DS 423.24].

Bestemmelse af tøjning

Til bestemmelse af tøjning monteres straingages på prøveemner af beton henholdsvis ekstensometre på prøveemner af tegl. Sidstnævnte er vist på figur 5.7. Straingages benyttes på beton, da ekstensometre ikke anses for at være tilstrækkelig følsomme til at registrere de tøjninger der vil

5.5 Kapillarsugning

forekomme. Montering af gages og ekstensometre beskrives nærmere i bilag E4.2 [de Place,96b].

Belastningshastighed

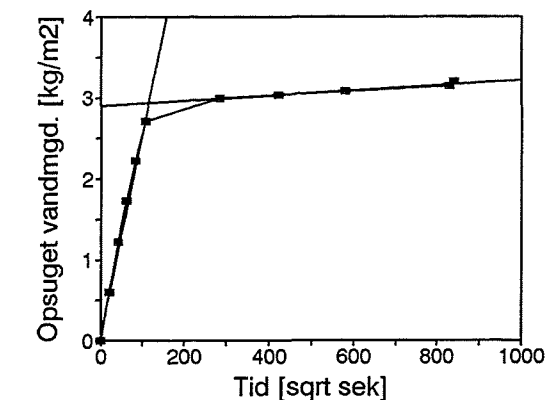
Alle forsøg er kraftstyrede, dvs. foregår med en fastholdt belastningshastighed for den pågældende serie. Belastningshastigheder vælges ud fra skønnede trækstyrker og pilotforsøg, og således at alle trækforsøg for beton henholdsvis tegl får omtrent samme varighed. Hastigheder på 3, 4 og 6 kN/min benyttes for beton 0.70, 0.45 og 0.30. For tegl benyttes 0,5 kN/min for tegl B og C, samt 1 kN/min for tegl 0 og A.

5.4.2 Trykstyrke

Betons trykstyrke bestemmes ved trykprøvning af $\varnothing 100$ mm cylindre til brud. Der benyttes en 60 tons (MAN) henholdsvis 200 tons (Alpha) hydraulisk prøvemaskine på Lab f Bygningmateriale, DTU. Belastningshastigheden, der styres manuelt, vælges således, at den skønnede brudlast nås efter 3-5 min.

5.5 Kapillarsugning

Et porøst materiale, der er i kontakt med vand, vil frivilligt optage vand pga. kapillarkræfter (hårrørvirkning), [Hagemann,91], [Beton-Bogen, 85]. Opsugningen vil typisk forløbe i to faser - en hurtig og en langsom, jf. figur 5.8. Den langsomme fase forklares normalt ved, at der sker en opfyldning af den del af de store porer, der kun kan nås via mindre porer.



Figur 5.8. Opsugningsforløb, frivillig vandopsugning.

Kapillaritetstallet, k [$\text{kg}/(\text{m}^2 \sqrt{\text{s}})$], udtrykker hastigheden af vandopsugningen i den hurtige fase. k bestemmes ved

$$k = \frac{m_{kp} - m_0}{A\sqrt{t_{kp}}} \quad (5.8)$$

hvor m_0 og m_{kp} er begyndelsesvægten henholdsvis vægten ved det såkaldte knækpunkt [kg], dvs. skæringspunktet mellem de to indlagte rette linier

på figur 5.8. t_{kp} er tiden til samme knæpunkt [s]. A er arealet af den flade, der er i kontakt med vandet [m²]. Afhængig af porestrukturen er knæpunktet mere eller mindre veldefineret.

Ved at kombinere resultater fra kapillarsugning og vacuumvandmætning (afsnit 5.3.1) bestemmes, i hvor høj grad det totale porevolumen fyldes ved kapillarsugning. Dette udtrykkes ved vandmætningsgraden

$$S_{vac, kap} = \frac{m_{kap} - m_{105}}{m_{ssd} - m_{105}} \quad (5.9)$$

$S_{vac, kap}$ kan bruges som tilnærmelse for en i praksis forekommende maksimal vandmætningsgrad [Fagerlund,77], og et frostbestandigt materiale bør derfor kunne tåle at blive udsat for frost i kapillarmættet tilstand. Størrelsen af $S_{vac, kap}$ benyttes som udgangspunkt for fastlæggelse af vandmætningsgrader til forsøg, hvor dilatation og resonansfrekvens bestemmes, afsnit 5.1 - 5.2.

$S_{vac, kap}$ kan bestemmes som vandmætningsgraden ved knæpunktet på figur 5.8, eller når massetilvæksten efter et antal dage næsten er gået i stå.

5.6 Frostprøvning

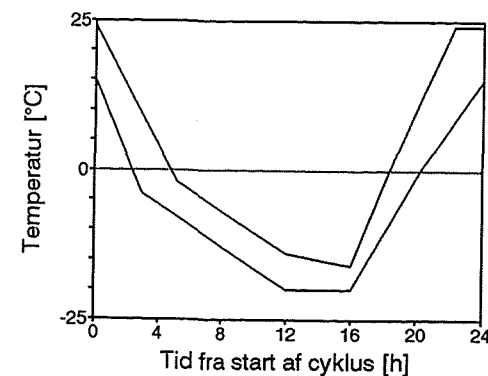
Beton frostprøves efter den svenske frostprøvningsstandard, [SS 13 72 44]. Standarden kan benyttes både til ren frostprøvning og frost-tøsaltprøvning, og både støbte prøveemner samt prøveemner boret ud af et større emne kan anvendes.

Prøvepræparation

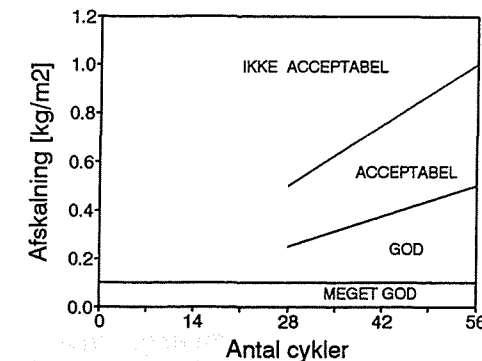
I dette projekt benyttes ø100 mm cylindre, der skæres op i 50 mm tykke skiver. Skiverne forsegles med et fugt- og varmeisolerende materiale (Armaflex® fra firmaet Armstrong). Datablad findes i bilag E5 [de Place, 96b]. På dette punkt afviges fra standarden, der skelner mellem et fugt-isolerende lag (3 mm tyk gummidug) og et varmeisolerende lag (fx 20 mm polystyrenskum).

Grundet dårlige erfaringer med kvaliteten af denne udformning af forseglingen, samt gode erfaringer med brugen af Armaflex fra tidligere projekter, anvendes Armaflex som isolering. Det kræves, at det fugt-isolerende lag er modstandsdygtigt over for en saltopløsning, samt at det er tilstrækkelig elastisk ned til -20° C.

Fugtisolering skal være anbragt senest 3 døgn før prøvningen, hvorefter den frie overflade dækkes med et 3 mm tykt lag vand. For prøveemner der testes for frost-tøsalt-påvirkning, skal vandet 15 min før prøvningen starter erstattes med et 3 mm tykt lag af 3% NaCl-opløsning. Alle prøveemner dækkes derefter med polyethylen-folie for at forhindre fordampning af vandet/opløsningen. I øvrigt henvises til [SS 13 72 44].



Figur 5.9. Krav til temperaturforløb - frostprøvning, [SS 13 72 44]. Temperaturen skal ligge mellem de to kurver.



Figur 5.10. Definition af frostbestandighed, [SS 13 72 44].

Prøvning

Til selve prøvningen benyttes et klimaskab, hvortil er koblet en kølemaskine, der køler henholdsvis afrimer til angivne tidspunkter. Prøveemnerne udsættes for temperaturcykler, således at kravene vist i figur 5.9 opfyldes. Temperaturen måles i vandet/saltopløsningen.

For hver betontype fremstilles 12 prøveemner, hvoraf seks testes med rent vand og seks med 3% NaCl-opløsning. Herved opfyldes standardens krav til samlet testareal. Temperaturen måles i fem prøveemner, én med vand og fire med NaCl, dels for at kontrollere at forløbet i figur 5.9 følges, dels for at studere om placeringen af prøveemnerne i klimakammeret har betydning for forløbet.

Efter 7, 14, 28, 42 og 56 cykler børstes og skylles løst materiale af prøveemnerne. Prøveemnerne tildækkes hver især med 3 mm vand/saltopløsning og returneres til klimakammer. Det afbørstede materiale tørres ved 105° og vejes (m_n). n er antallet af cykler. m_n/A beregnes. A betegner arealet af fladen, der udsættes for frost. Alt efter værdien af m_{56}/A samt m_{56}/m_{28} klassificeres betonen som meget god, god, acceptabel eller ikke acceptabel, jf. figur 5.10.

6. Forsøgsresultater og diskussion

I projektet skelnes mellem forsøg der har til formål: 1) at fremskaffe værdier for de parametre der indgår i den opstillede model, 2) at koble modellens forudsigelser til forskellige former for eksponering, jf. afsnit 4. Præsentationen af forsøgsresultater vil så vidt muligt følge denne opdeling, dog således at relevante sammenligninger eller henvisninger foretages løbende. Sidst i dette afsnit benyttes de samlede resultater til en analyse af den opstillede model.

For at lette sammenligningen af resultater vil den målte egenskab ofte kædes sammen med porøsiteten, p_a , for beton evt. vand/cementforholdet, w/c . De tre betonserier vil så vidt muligt blive benævnt ved det benyttede vand/cementforhold, fx beton 0.30. Teglsierier benævnes 0, A, B og C i overensstemmelse med afsnit 4 og [Ejsing,93]. Hovedresultater præsenteres i afsnit 6. Supplerende resultater og data findes i bilag F, [de Place,96b]. Der henvises til dette med F foran tabel- eller figurnummer.

6.1 Dilatationsforsøg

Formålet med dilatationsforsøgene er: 1) ud fra sammenhængen mellem dilatation og vandmætningsgrad at fastlægge parameteren B i den opstillede model, 2) at bestemme kritiske vandmætningsgrader, S_{KR} , eksperimentelt. I den forbindelse benyttes begreberne maksimal og permanent dilatation (*længdeændring*).

Maksimal dilatation, ϵ_{max} , udtrykker den største afvigelse fra et retlinet forløb - der er betinget af materialets egen temperaturudvidelseskoefficient - og er et udtryk for, hvor store spændinger der opstår under fryseforløbet. For at kunne tale om et uskadt prøveemne må ϵ_{max} ikke overstige trækbrudtøjningen.

Perm(anent) dilatation, ϵ_{perm} , er et udtryk for den blivende dilatation (*længdeændring*) efter afslutning af forsøget ϵ_{perm} skal være omtrent nul, hvis prøveemnet skal kunne regnes for at være uskadt.

Vandmætningsgrader beregnes med vacuumvandtættede prøveemner som reference, for betons vedkommende dog korrigeret for mængden af ikke-frysbart vand, w_{nf} , ved -20°C , hvor ϵ_{max} opnås. Af samme grund betegnes den kritiske vandmætningsgrad ved S_{KR} eller $S_{f,KR}$. w_{nf} bestemmes vha. porestørrelsesfordelingen, jf. afsnit 6.3.

Parameteren B beregnes som en middelværdi, der fastlægges ud fra sammenhørende værdier af ϵ_{max} - omregnet til *volumentøjning* - og vandmætningsgraden som beskrevet i afsnit 3.2.4. Herefter kan en kurve baseret på dette B optegnes. *Bemærk* at B -kurver i figurerne nedenfor inden optegning omregnes, så de viser dilatation (ikke-lineær *længdeændring*) som funktion af vandmætningsgraden, jf. afsnit 4.2.1.

6.1 Dilatationsforsøg

6.1.1 Beton

Figur 6.1 - 6.3 viser resultaterne af dilatationsforsøg for beton. En vandret linie angiver trækbrudtøjningen bestemt ved enaksede trækforsøg, jf. afsnit 6.4. Den kritiske vandmætningsgrad $S_{f,KR}$ markeres med en lodret linie.

Forløbet for beton 0.30 adskiller sig tydeligt fra de øvrige, idet ϵ_{max} kun for fuldstændig vandmættede prøveemner overskrider trækbrudtøjningen. Desuden er spredningen på ϵ_{max} for vandmættede prøveemner meget stor. For beton 0.45 og 0.70 fås en mere blød overgang mellem små og store ϵ . ϵ_{max} ses at vokse med vand/cementforholdet.

To B -kurver er vist for hver beton for at vise betydningen af at udelade målepunkter med $\beta = 1$ ved beregningen af B . Betydningen ses at være mindst for beton 0.70 og størst for beton 0.30, hvilket skyldes, at sammenhængen mellem B -kurver og målepunkter er bedst for beton 0.70.

Samtlige værdier for ϵ_{max} , ϵ_{perm} og vandmætningsgrader er angivet i bilag F1, [de Place,96b]. Figur F1 - F3 viser eksempler på forløbet af dilatationsforsøget for vandmætningsgrader henholdsvis større og mindre end $S_{f,KR}$.

Sammenlignes værdier for eksperimentelt bestemte kritiske vandmætningsgrader, er $S_{f,KR}$ lavest for beton 0.45 og højest for beton 0.30, jf. tabel 6.1. Der er således ikke nogen sammenhæng med porøsiteten bestemt ved vacuumvandmætning, i tabel 6.1 angivet som gennemsnitsværdi for hver af de tre betoner. Det hænger til dels sammen med porestørrelsesfordelingen og dennes betydning for mængden af frysbart vand, jf. afsnit 6.3.

For beton 0.45 angives en alternativ værdi for $S_{f,KR}$, der er aktuel, hvis forsøgsresultater med $S_f \approx 0,85$ tillægges mindre vægt og der i stedet tages mere hensyn til, at forsøg med S_f på 0,90 eller højere opnår en ret lav ϵ_{max} . Værdien er ikke markeret i figur 6.2. Se også figur 6.9, afsnit 6.2.

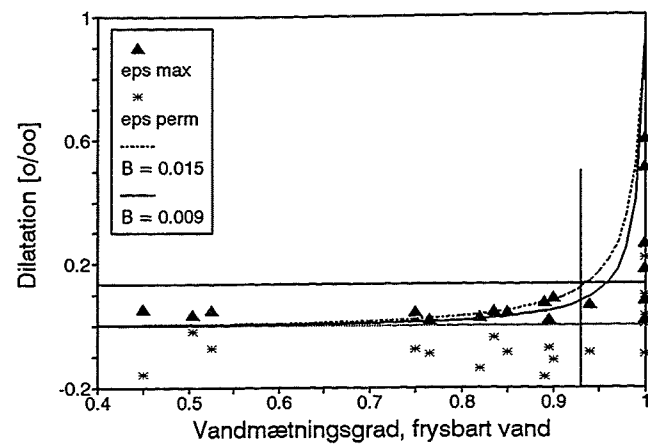
Tabel 6.1. Kritisk vandmætningsgrad fastlagt ud fra målinger af maksimal dilatation.

	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
$S_{f,KR}$	0,93	0,83 (0,90)	0,89
porøsitet	0,081	0,112	0,139

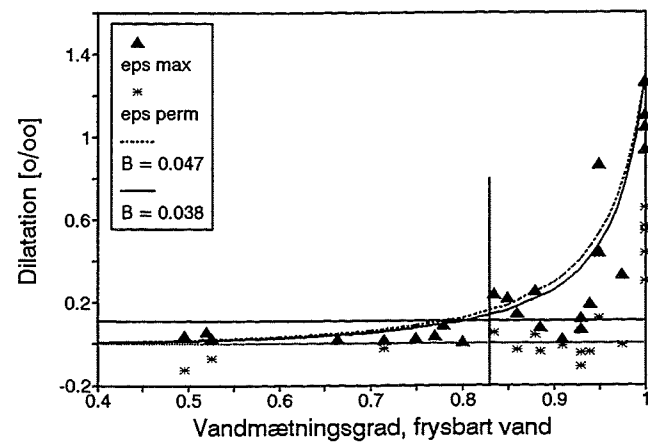
For beton 0.70 er to målepunkter med $\epsilon_{max} = 1,6\text{‰}$ udeladt ved beregningen af B . Medregnes disse fås $B = 0,048$ i stedet for 0,013. Forløbet bliver da som vist i figur F4. Det ses tydeligt, at $B = 0,048$ er alt for høj for beton 0.70.

Sammenlignes de opnåede værdier for ϵ_{max} med tilsvarende undersøgelser, har Klamrovski & Neustupny [1984] fx opnået værdier på 0,4 à 1 ‰ for $S > S_{KR}$ for en beton med vand/cementforhold 0,45, dvs. svarende til resultaterne i figur 6.2.

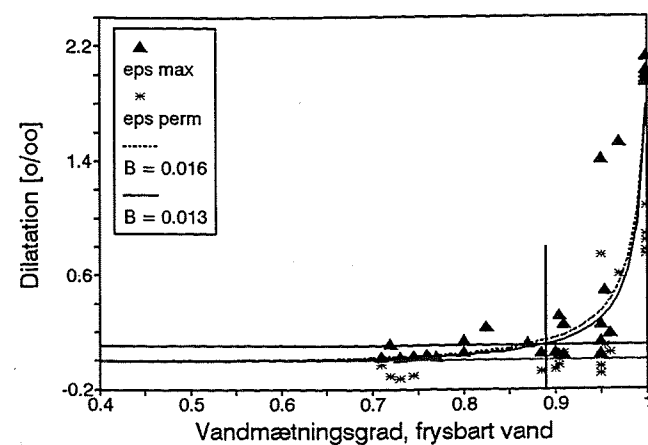
I følge Buck [1988] bør $\epsilon_{max} < 0,05\text{‰}$ og $\epsilon_{max} > 0,2\text{‰}$ kunne benyttes som udtryk for frostbestandig og ikke frostbestandig beton, jf. afsnit 2.2.5. De foreliggende resultater viser, at der i praksis skal en mere nuanceret vurdering til for at kunne udtale sig om dette. Det er i hvert fald nødvendigt at gøre sig klart, hvilke forudsætninger - bl.a. mht. fugthistorie - der tages som udgangspunkt.



Figur 6.1. Maksimal og blivende dilatation (ikke-lineær længdeændring) som funktion af vandmætningsgrad korrigeret for mængden af frysbart vand ved -20°C . Beton 0.30. ϵ_{max} er bestemt ved $\theta_{min} = -20^{\circ}\text{C}$. $B = 0,015$ opnås, hvis forsøgsresultater med en vandmætningsgrad på 1 ikke medregnes. Kritisk vandmætningsgrad er markeret med en lodret linie, trækkbrudtøjning med en vandret linie.



Figur 6.2. Dilatation som funktion af vandmætningsgrad. Beton 0.45. $B = 0,047$ opnås, hvis forsøgsresultater med en vandmætningsgrad på 1 ikke medregnes.



Figur 6.3. Dilatation som funktion af vandmætningsgrad. Beton 0.70. $B = 0,016$ opnås, hvis forsøgsresultater med en vandmætningsgrad på 1 ikke medregnes.

I et enkelt forsøg med fem emner af beton 0.30 er temperaturen -20°C fastholdt i otte timer for at undersøge, om der sker yderligere længdeændring. I givet fald kan længdeændringen forklares som værende forårsaget af mikroskopisk islinsevækst, jf. figur 2.3b. Forsøget resulterede ikke i yderligere længdeændringer.

Bestemmelse af blivende deformation (ϵ_{perm})

Mens det er muligt at fastlægge $S_{f,KR}$ på basis af resultater for ϵ_{max} er en bestemmelse af $S_{f,KR}$ ud fra resultater for ϵ_{perm} mere usikker, selv om der generelt er en rimelig sammenhæng mellem forløbet af ϵ_{perm} og ϵ_{max} som funktion af vandmætningsgraden. I flere tilfælde, specielt for vandmætningsgrader under den kritiske, har forsøgene ført til negative værdier for ϵ_{perm} , hvilket umiddelbart ikke giver nogen mening.

Svind af betonen i forbindelse med omlejring af vand under frysning og optøning kunne tænkes at have betydning, en forklaring som dog afvises af Klamrovski & Neustupny [1984], der primært får negative ϵ_{perm} for luftindblandede betoner.

De negative værdier gør sig særlig gældende for beton 0.30, specielt når værdierne sammenholdes med størrelsen af ϵ_{max} . Desuden konstateres en forstærkende effekt ved flercyklusforsøg, som specielt er benyttet for beton 0.30. Et eksempel på dette er vist som figur F5, [de Place, 96b]. For beton 0.45 og 0.70 er denne effekt af mindre betydning. Derimod ses en forstærkende effekt mht. størrelsen af dilatationen når $S_{f,KR}$ overskrides, jf. figur F6.

Temperaturmålinger viser, at temperaturen inde i prøveemnerne er op til to grader højere under afkøling henholdsvis op til to grader lavere under opvarmning end temperaturen målt med skabets føler, jf. figur F7. Af figuren ses, at temperaturforskellen i forbindelse med afrimning momentvis er væsentlig større, hvilket skyldes følerens placering i skabet.

Korrigeres deformationskurver for en temperaturforskellen på to grader, fås et forløb af temperatur-deformations-sammenhængen med stort set sammenfaldende kurver for frysning og optøning, svarende til at der (næsten) kun er temperaturbestemte deformationer, jf. figur F8 - F10. Bemærk i øvrigt at der bortset fra en krumning indledningsvis på kurven er et pænt parallelt forløb mellem afkøling og optøning.

Udformningen af forsøgsopstillingen kan også tænkes at have betydning for værdien af ϵ_{perm} , idet målenøjagtigheden er afhængig af, hvor omhyggeligt prøveemnerne er skåret til, jf. afsnit 5.1.

Flere faktorer ses således at kunne have betydning, og da forekomsten og størrelsen af negative ϵ_{perm} ikke er systematisk, er det derfor vanskeligt at give en entydig forklaring. Der er ikke foretaget yderligere undersøgelser af dette.

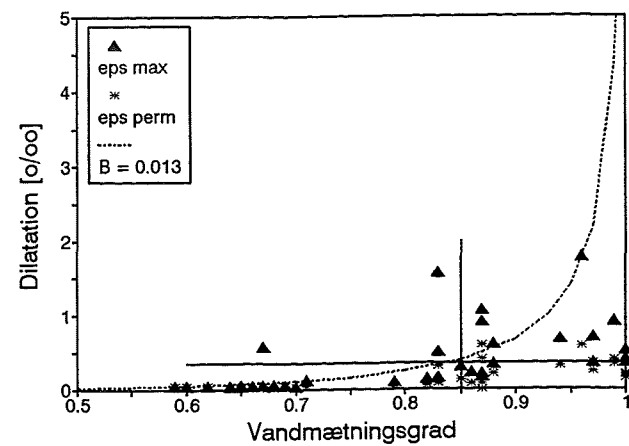
6.1.2 Tegll

Figur 6.4 - 6.7 viser resultaterne for tegll. I hver af de fire figurer er indlagt en kurve baseret på en middelværdi for B bestemt ud fra samtlige forsøgsresultater. Samtlige dilatationsforløb for tegll er vist i bilagsrapport til [Ejsing, 93].

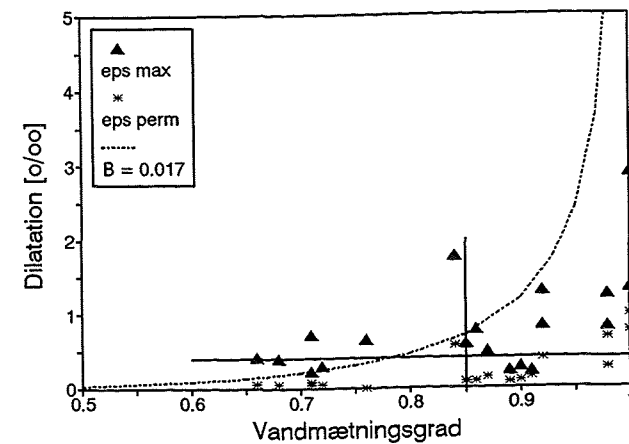
Spredningen på resultaterne samt manglen på resultater for $S \approx 0,8$ bevirker, at kritiske vandmætningsgrader S_{KR} , baseret på sammenhørende værdier af vandmætningsgrad og ϵ_{max} , bestemmes med en vis usikkerhed. Størrelsen synes dog at være næsten uafhængig af porøsiteten, jf. tabel 6.2.

Tabel 6.2. Kritisk vandmætningsgrad fastlagt ud fra målinger af maksimal dilatation.

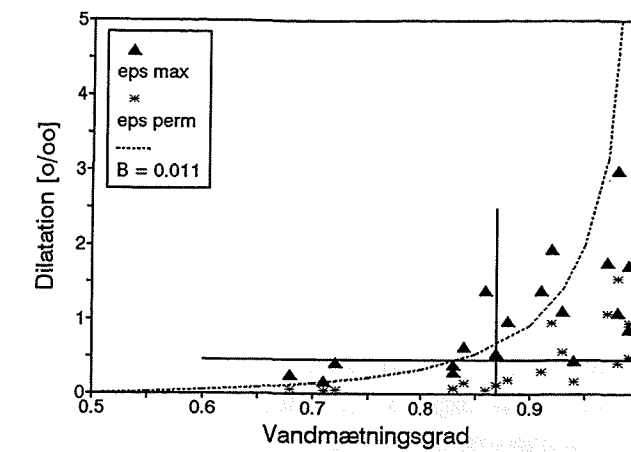
Serie	Tegl 0	Tegl A	Tegl B	Tegl C
S_{KR}	0,85	0,85	0,87	0,88
porøsitet	0,42	0,50	0,55	0,62



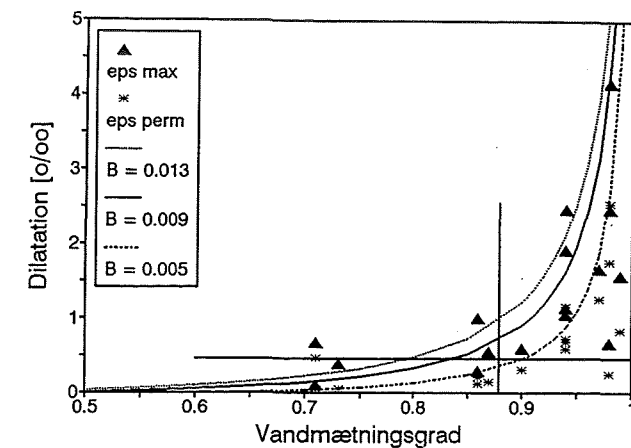
Figur 6.4. Maksimal og blivende dilatation (ikke-lineær længdeændring) som funktion af vandmætningsgrad. Tegl 0. ϵ_{max} opnås ved -10°C . $\theta_{min} = -20^{\circ}\text{C}$. Kritisk vandmætningsgrad er markeret med en lodret linie, trækbrudtøjning med en vandret linie.



Figur 6.5. Dilatation som funktion af vandmætningsgrad. Tegl A.



Figur 6.6. Dilatation som funktion af vandmætningsgrad. Tegl B.



Figur 6.7. Dilatation som funktion af vandmætningsgrad. Tegl C. $B = 0,009$ er et beregnet gennemsnit. De øvrige værdier angiver den største og mindste værdi for B som det skønnes rimeligt at lade repræsentere de viste forsøgsresultater.

0-seriens prøveemner har et mindre tværsnit end de øvrige tegl, jf. afsnit 5.1, hvilket der skal tages hensyn til ved sammenligning af resultater. Et mindre tværsnit resulterer tilsyneladende i en lavere kritisk vandmætningsgrad, ca. 3-4 % mindre for et tværsnit på 30x30 mm i forhold til et tværsnit på 40x40 mm, jf. [Fagerlund,72b]. Det vil svare til, at tegl 0 får en S_{KR} på 0,88 à 0,89.

Alt i alt er virkningen på værdien af S_{KR} af at tilsætte ekstra savsmuld meget begrænset, sammenholdt med hvor store ændringer af lermassens sammensætning der er tale om, jf. bilag C2, [de Place,96b]

Tegl 0, der repræsenterer en normal teglværkssten, har en dilatation på ca. 1 ‰ for $S > S_{KR}$, jf. figur 6.4, hvilket er ca. det dobbelte af hvad Fagerlund [1972b] opnår for svenske tegl.

Jo mere porøse tegl er, desto tydeligere er sammenhængen mellem vandmætningsgrad og dilatation. Dilatationen, både ϵ_{max} og ϵ_{perm} ses at stige med porøsiteten. Desuden bemærkes de meget lave værdier for ϵ_{max} for tegl 0, når vandmætningsgraden er 1.

Der er god overensstemmelse mellem forløbet af ϵ_{max} og ϵ_{perm} som funktion af vandmætningsgraden. Det betyder, at de angivne værdier for S_{KR} også vil opnås, hvis der tages udgangspunkt i resultaterne for ϵ_{perm} .

Sammenhængen mellem B -kurven og forsøgsresultaterne ses at være bedst for tegl B og C, mens sammenhængen er meget dårlig for tegl 0 og A. Generelt er sammenhængen dårlig for vandmætningsgrader over 0,95.

Det er værd at bemærke, at teglforsøgene foregik med prøveemner, der ikke var forseglet i enderne, hvilket muliggør et vist fugttab. Størrelsen af fugttabet blev ikke bestemt ved forsøgene, [Ejsing,93], men efterfølgende undersøgelser har vist, at fugttabet svarer til en ændring af vandmætningsgraden på ca. 1 %. Dette fugttab har således ikke afgørende betydning for fastlæggelsen af prøveemnets vandmætningsgrad.

Bemærk at vandmætningsgraden til gengæld kan mindskes med ca. 2,5 % under afkølingen pga. at noget af vandet diffunderer ud til endefladerne og fryser der.

Sammenholdt med beton er fordelingen af målepunkter mere "skyformet", hvilket gør det vanskeligere at nå frem til en værdi for B , der i rimelig grad repræsenterer samtlige resultater. Desuden savnes resultater for vandmætningsgrader på 0,98 og derover. Derfor er flere forskellige værdier af B benyttet ved beregning med den opstillede model, jf. afsnit 6.8. Et eksempel på, hvilken betydning værdien af B har, er vist i figur 6.7.

For tegl ses i modsætning til beton ikke nogen negativ ϵ_{perm} . Det underbygger forklaringen om, at svind som følge af omlejring af vand i forbindelse med frysning kan være årsagen for betons vedkommende, selv om der kan sættes tvivl ved denne forklaring, jf. afsnit 6.1.1.

Også for tegl observeres typisk en temperaturforskel mellem skabets føler og prøveemnerne på én til to grader, hvilket ikke forventes at få afgørende betydning for ændringer af vandmætningsgraden lokalt i materialet.

6.1.3 Dilatationsforsøg - sammenfatning

For alle forsøgsserier ses en stor spredning i resultater, når S_{KR} overskrides. Det er værd at bemærke, at ϵ_{max} for $S > S_{KR}$ for tegls vedkommende med meget få undtagelser overskrider trækbrudtøjningen angivet ved den vandrette linie, svarende til at prøveemnet er skadet. For beton er dette ikke helt så markant, hvilket dog kan skyldes, at niveauet for dilatation generelt undervurderes, jf. diskussionen af betonresultater ovenfor. For betons vedkommende kan prøvestørrelsen desuden spille ind, jf. bilag D, [de Place,96b].

Generelt ændres S_{KR} kun lidt ved ændring af vand/cementforholdet (beton) eller tilsætning af savsmuld (tegl).

Deformationer som følge af frysning er som ventet større for tegl end for beton og øges med porøsiteten af beton henholdsvis tegl. Kræfterne/deformationerne under frysning er større i tegl end i beton, hvilket illustreres af, at ikke en eneste betonprøve har synlige skader i form af overfladerevner m.m., mens flere teglprismer enten får store revner eller brækker itu, jf. [Ejsing,93].

Forsøgene viser, at det er muligt at beskrive sammenhængen mellem vandmætningsgrad og maksimal dilatation ved parameteren B som beskrevet i afsnit 3.2.4. Spredningen på resultaterne betyder dog, at det

er vanskeligt entydigt at fastlægge én værdi for B for den enkelte forsøgsserie, hvilket der tages hensyn til ved analysen af den opstillede beregningsmodel, afsnit 6.8.

Resultater fra dilatationsforsøg sammenholdes sidst i afsnit 6.2 med resultater fra resonansfrekvensforsøg.

6.2 Resonansfrekvens

Resonansfrekvensforsøg er udført som supplement til dilatationsforsøgene. Relativt E-modul samt dæmpning bestemmes som beskrevet i afsnit 5.2. Ud fra sammenhørende værdier af vandmætningsgrad og relativt E-modul, E_n/E_0 , henholdsvis dæmpning, δ , bestemmes den kritiske vandmætningsgrad. Resultaterne fremgår af figur 6.8 - 6.14.

I figurerne er indlagt en ret linie svarende til en reduktion af E på 10 %, der benyttes som indikation af, om prøveemnet er skadet, jf. afsnit 5.2.1. Talværdier for resonansfrekvens, dæmpning og relativt E-modul findes i bilag F2, [de Place,96b].

6.2.1 Beton

Resonansfrekvensen for beton er i mange tilfælde bestemt på prøveemnerne både i tør og våd tilstand, dvs. både før og efter opfugtning henholdsvis udtørring fra den vandmætningsgrad, de testes med, jf. afsnit 4.2.1. Dette angives på figur 6.8, 6.9 og 6.10 ved betegnelserne "tør" og "våd".

Prøveemner testet ved flere forskellige vandmætningsgrader er ikke tørret mellem de enkelte forsøg. Resonansfrekvensen bestemt på prøveemnet i tør tilstand kobles derfor sammen med resonansfrekvensen ved den højeste værdi af vandmætningsgraden for det pågældende prøveemne.

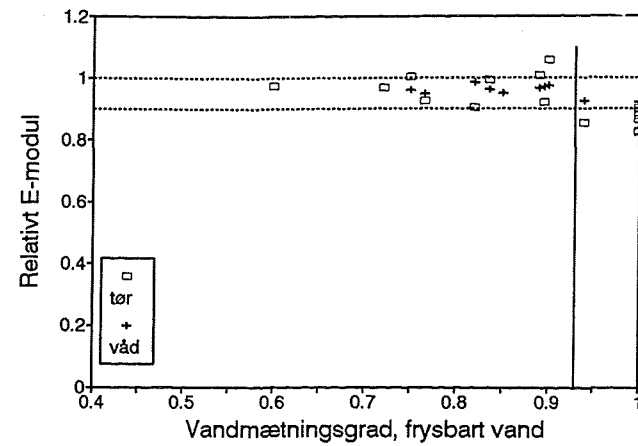
I tabel 6.3 angives værdier for $S_{f,KR}$ baseret på resultaterne i figur 6.8, 6.9 og 6.10. $S_{f,KR}$ er i figurerne markeret med en lodret linie. For beton 0.30 fås meget små ændringer af det relative E-modul, hvilket gør fastlæggelsen af $S_{f,KR}$ noget usikker.

Tabel 6.3. Kritiske vandmætningsgrader fastlagt ud fra målinger af resonansfrekvens.

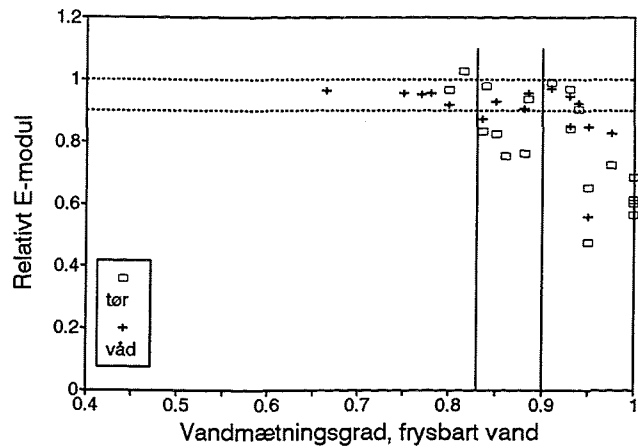
	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
$S_{f,KR}$	0,93	0,83 (0,90)	0,89

For beton 0.45 ses som i figur 6.2 en forholdsvis stor spredning af resultaterne. Værdien af $S_{f,KR}$ vil derfor afhænge af, hvor meget vægt der skal lægges på målepunkterne omkring $S_f = 0,85$. Ignorerer disse vil en værdi omkring 0,90 være et godt bud. Derfor er der vist to lodrette linier i figur 6.9, svarende til kritisk vandmætningsgrad på 0,83 og 0,9.

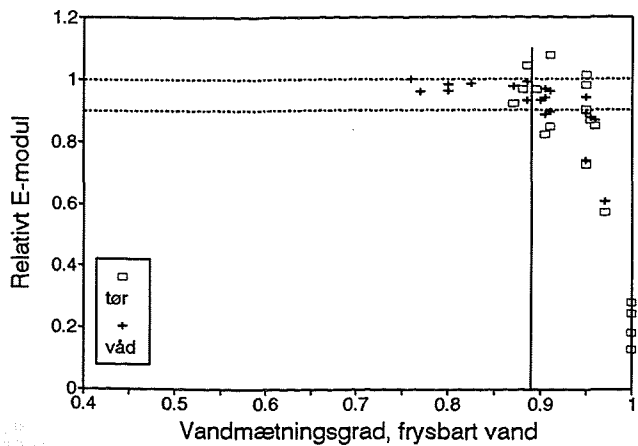
Generelt viser resultaterne, at det er muligt at registrere en reduktion af E-modulet ved at måle på prøveemner i våd tilstand, og at en fastlæggelse af $S_{f,KR}$ ud fra relativt E-modul giver omtrent samme resultat, uanset om "tør" eller "våd" benyttes. Reduktionen af E-modulet ses dog at være størst ved måling i tør tilstand.



Figur 6.8. Relativt E-modul som funktion af vandmætningsgrad bestemt ved måling før og efter frost-tø-cyklus. Beton 0.30. $\theta_{min} = -20^{\circ}\text{C}$. Kritisk vandmætningsgrad er markeret ved en lodret linie.



Figur 6.9 Relativt E-modul som funktion af vandmætningsgrad. Beton 0.45.



Figur 6.10. Relativt E-modul som funktion af vandmætningsgrad. Beton 0.70.

For vandmætningsgrader over den kritiske, angivet ved en lodret linie i figur 6.8, 6.9 og 6.10, øges reduktionen af E som ventet med vand/cementforholdet. Overskridelsen af $S_{f,KR}$ får altså de største konsekvenser for beton 0.70.

Dæmpning

Samtidig med resonansfrekvens er også dæmpningen bestemt, udtrykt ved tabsvinklen δ , jf. afsnit 5.2. Dæmpningen er kun bestemt for et begrænset antal prøveemner. Ved at bestemme dæmpningen før og efter frysning kan den relative tilvækst, forstået som ændringen i forhold til den oprindelige værdi, afbildes som funktion af vandmætningsgraden. Disse resultater kan findes i bilag F2, [de Place,96b].

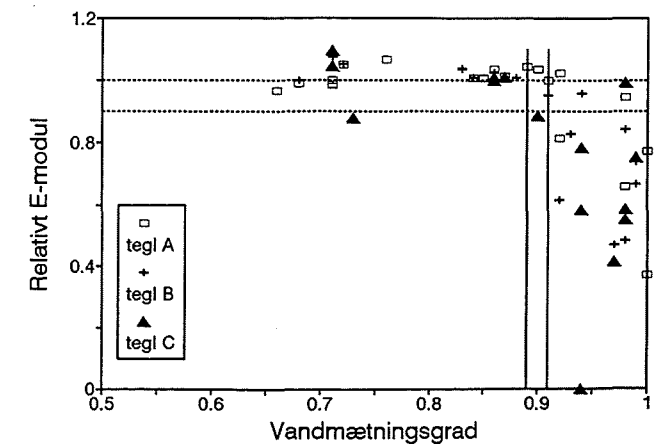
Kun for beton 0.70 fås en sammenhæng mellem vandmætningsgrad og tilvæksten i dæmpningen. Resultaterne antyder at $S_{f,KR} \approx 0,90$; dog savnes resultater for $S_f < 0,90$. Resultaterne for beton 0.30 og 0.45 udviser for stor spredning til at kunne fastlægge en værdi for $S_{f,KR}$.

6.2.2 Tegl

Bestemmelser af relativt E-modul som funktion af vandmætningsgrad vises i figur 6.11. Der er ikke foretaget målinger på tegl 0. Alle målinger af resonansfrekvens er foretaget på tørre prøveemner, jf. afsnit 4.2.1. Resonansfrekvensforsøg viser ligesom dilatationsforsøg, afsnit 6.1.2, at der tilsyneladende ikke er nogen afgørende forskel på værdien af S_{KR} for tegl A, B og C og at resultater for $S \approx 0,8$ savnes. S_{KR} vurderes lidt højere ved resonansfrekvensforsøg end ved dilatationsforsøg, jf. tabel 6.4. Værdier for S_{KR} markeres i figur 6.11 ved lodrette linier.

Tabel 6.4. Kritiske vandmætningsgrader fastlagt ud fra målinger af resonansfrekvens.

	Tegl A	Tegl B	Tegl C
S_{KR}	0,91	0,91	0,89



Figur 6.11. Relativt E-modul som funktion af vandmætningsgrad bestemt ved måling før og efter frost-tø-cyklus. Tegl. $\theta_{min} = -20^{\circ}\text{C}$.

Dæmpning

Bestemmelse af dæmpning giver et mere klart billede for tegl end det er tilfældet for beton. Dog er det svært at fastlægge en S_{KR} for tegl A. For tegl B og C synes en værdi omkring 0,85 at være det bedste bud, dvs. en lidt lavere værdi end bestemt ud fra resonansfrekvens. Resultater findes i bilag F2, [de Place,96b].

6.2.3 Resonansfrekvens - sammenfatning

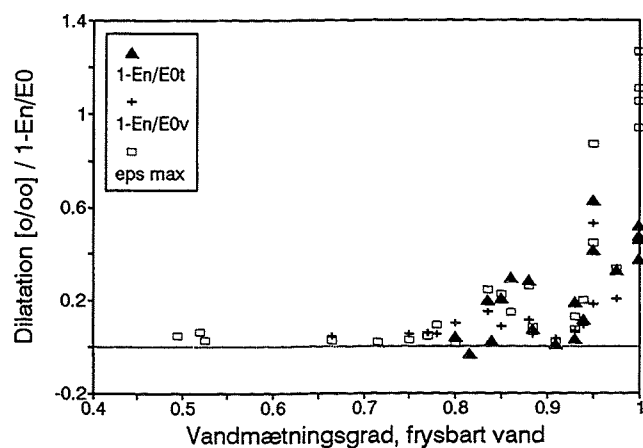
Forsøgene viser, at det er muligt at bestemme resonansfrekvens og dæmpning på våde betonprøver, hvilket har den fordel, at tørring og genopfugtning af prøveemner mellem hver måling undgås.

Generelt ses større spredning på resultaterne for dæmpning end for relativt E-modul. For de serier, hvor en der er sammenhæng mellem dæmpning og vandmætningsgrad, er der en rimelig overensstemmelse mht. værdien af S_{KR} bestemt vha. dæmpning og resonansfrekvens. Som for dilatationsforsøgene gælder, at S_{KR} næsten ikke ændres, når vand/cementforholdet eller mængden af savsmuld ændres.

6.2.4 Sammenligning af dilatations- og resonansfrekvensforsøg

Generelt fås en god overensstemmelse mellem S_{KR} bestemt ud fra dilatations- og resonansfrekvensforsøg, især for beton. For tegl er ændringen af E-modulet forholdsvis lille, sammenlignet med størrelsen af den maksimale dilatation, ϵ_{max} .

I figur 6.12 er resultater fra de to forsøg vist for beton 0.45. Af hensyn til sammenligningen er værdierne for relativt E-modul (E_n/E_0) omregnet til $1,2 \cdot (1 - E_n/E_0)$. I bilag F2 findes tilsvarende figurer for de øvrige serier.



Figur 6.12. Sammenligning af maksimal dilatation og relativt E-modul som funktion af vandmætningsgraden. Beton 0.45. Størrelsen $1 - E_n/E_0$ er ganget med 1,2. "t" og "v" angiver måling på tørre og våde prøveemner.

Fordelen ved at have benyttet to forskellige metoder at bestemme skadesgraden på viser sig i forbindelse med fastlæggelsen af $S_{f,KR}$. For beton 0.45 bevirker gruppen af forsøg med S_f omkring 0,85 og ϵ_{max} omkring 0,2 ‰, at det er vanskeligt at definere $S_{f,KR}$, jf. figur 6.2. Uden denne

gruppe af resultater ville en $S_{f,KR}$ på 0,90 være mere rimelig. Samme gruppe genfindes på figur 6.9; de to metoder understøtter således hinanden.

Fastlæggelsen af $S_{f,KR}$ for beton 0.30 ud fra figur 6.1 vanskeliggøres af, at der er ret få forsøg med S_f mellem 0,9 og 1. Ved at udnytte figur 6.8 kan en værdi på 0,93 forsvares, selv om beslutningsgrundlaget er spinkelt. Den ene metode giver altså lidt flere informationer end den anden, og gør fastlæggelsen af $S_{f,KR}$ mere præcis.

Begge metoder har sine fordele og ulemper; dilatationsmålinger giver løbende informationer om, hvordan materialet reagerer på frost-tø-forløbet. Detektering af skader kan derfor i flere tilfælde opdages hurtigere, dvs. kræver færre frost-tø-cykler, hvis dilatationsforsøg laves. I det hele taget er dilatationsmålinger langt mere følsomme pga. den store nøjagtighed som flytninger registreres med.

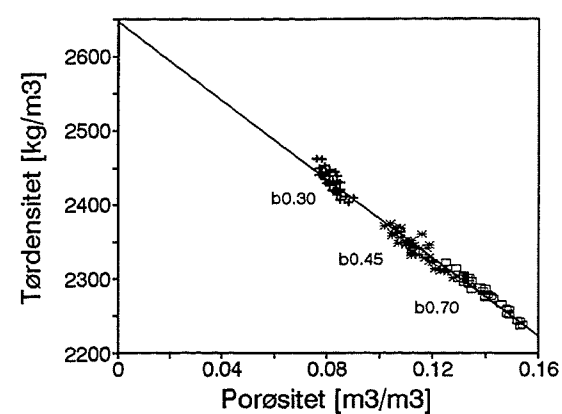
Resonansfrekvensmåling fortæller kun om situationen før og efter frost-tø-forløbet. Til gengæld er antallet af prøveemner ubegrænset, hvis resonansfrekvens benyttes, mens dilatationsmåling kræver en opstilling med flytningsmålere for hver enkelt prøveemne og i det hele taget stiller større krav til udstyr.

I det foreliggende projekt har valget været betinget af, at kun dilatationsforsøg har kunnet give de nødvendige oplysninger til bestemmelse af parameteren B . I [de Place,94] diskuteres den viste opstilling til bestemmelse af resonansfrekvens nærmere.

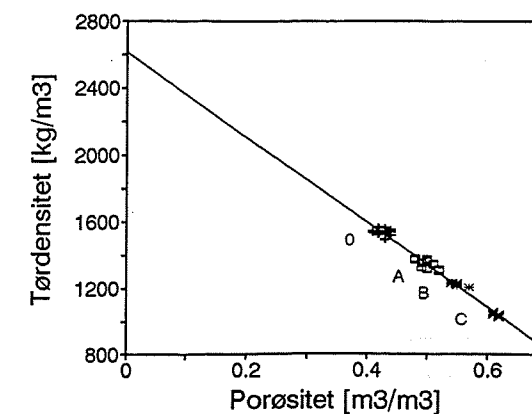
Kritisk vandmætningsgrad og frostbestandighed

Til vurdering af frostbestandighed kræves ud over kritisk vandmætningsgrad et mål for den aktuelle vandmætningsgrad, jf. afsnit 2.3. I dette projekt benyttes vandmætningsgraden ved kapillær mætning, $S_{vac,kap}$. For diskussion af dette henvises til afsnit 6.5.1 og 6.6.1.

6.3 Porestruktur



Figur 6.13. Porøsitet og tørdensitet. Beton. Enkeltresultater (37, 36 og 34 stk). Faststofdensitet 2640 kg/m³.



Figur 6.14. Porøsitet og tørdensitet. Tegl. Enkeltresultater (17, 24, 22 og 22 stk). Faststofdensitet 2612 kg/m³.

For såvel beton som tegl viser den retlinede sammenhæng mellem porøsiteten og tørdensiteten, figur 6.13 og 6.14, at det er lykkedes at fremstille serier, som det er relevant at sammenligne hvad angår strukturmæssige og mekaniske egenskaber.

Tilsætning af savsmuld til ler ses således at have opfyldt ønsket om at øge porøsiteten af tegl og dermed få en sten med en lavere densitet. Beton 0.30 synes at afvige lidt fra den retlinede sammenhæng, hvilket kan skyldes forskelle i hydratiseringsgrad, betonerne imellem.

Middelværdier for porøsitet, p_a , er angivet i tabel 6.5. Værdier for tørdensitet mv. er angivet i bilag F3.1, [de Place,96b].

Tabel 6.5. Porøsitet, p_a [m^3/m^3]. Beton og tegl. Middelværdier.

	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
	0,081	0,112	0,139
Tegl 0	Tegl A	Tegl B	Tegl C
0,42	0,50	0,55	0,62

6.3.1 Beton - porestørrelsesfordeling

På basis af porøsiteten og sorptionsisotermene samt poretællinger på fotos af slib, optegnes porestørrelsesfordelinger, figur 6.15 - 6.17, jf. afsnit 5.3. Sorptionsisotermene og udvalgte resultater fra poretællinger er vist i bilag F3.2 og F3.3.

SEM-1 og SEM-2 i figur 6.15 - 6.17 står for poretællinger på SEM-fotos med forstørrelse på 65 og 1000 gange, jf. figur 6.19 - 6.24 og bilag F3.3, des og ads står for desorption og adsorption.

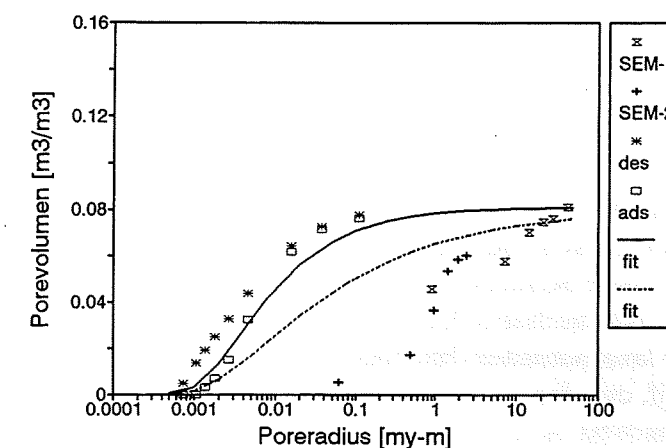
Ud over porestørrelsesfordelinger sammenstykket af resultater fra sorptionsisotermene og poretællinger er vist et bedste skøn, mærket fit. Denne kurve anvendes ved beregninger med den opstillede model og beskrives vha. fire parametre, jf. afsnit 3.2.6 og [L.F.Nielsen,93a]. I bilag F6 angives værdierne for de fire parametre svarende til de viste kurver.

Porere i beton findes primært i pastaen, hvilket der er taget hensyn til ved beregning af porevolumen ud fra resultater fra poretællingen. Pastavolumen bestemmes vha. betonrecepten. Det forudsættes, at de benyttede SEM-fotos repræsenterer materialet mht. porestørrelser.

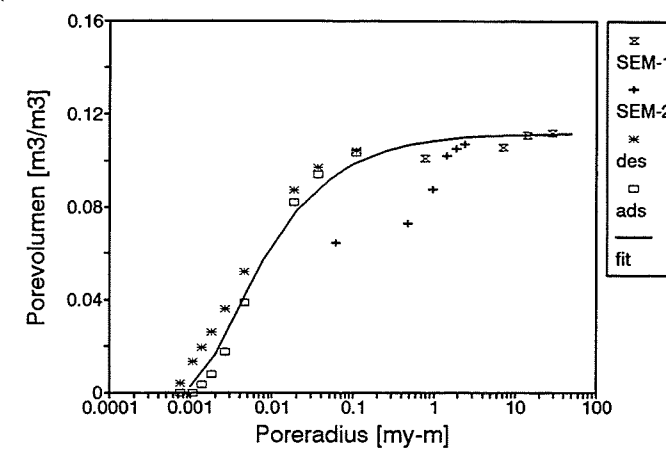
Ved indlæggelsen af et bedste skøn er der lagt vægt på, at der specielt for det finporøse område er overensstemmelse med forsøgsresultaterne. Denne overensstemmelse er afgørende for pålideligheden af beregningerne med den opstillede model, jf. koblingen mellem porestørrelse og mængden af frysbar vand. For de større porers vedkommende er det mængden fremfor størrelsesfordelingen, der er afgørende. Det vurderes derfor at være af mindre betydning, at kurven ikke er i stand til at følge alle krumninger på den samlede porestørrelsesfordeling.

Sammenligning af sorption og poretælling

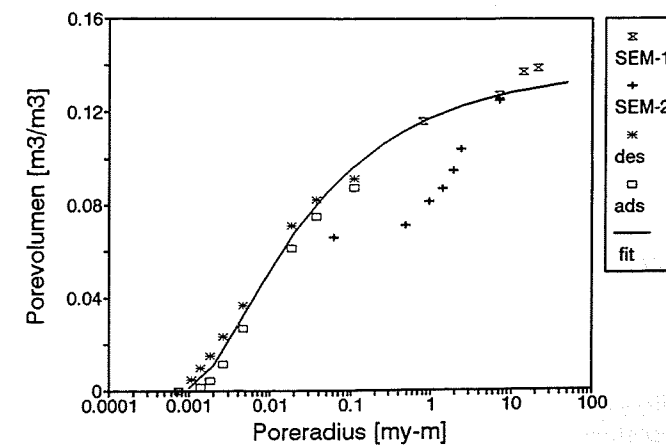
To kurver er optegnet for beton 0.30, da der er meget dårlig sammenhæng mellem sorptions- og poretællingsresultater. Den ene kurve følger sorptionsresultaterne ret tæt, den anden er lagt mellem resultaterne fra poretælling og sorption. Førstnævnte benyttes som reference.



Figur 6.15. Porestørrelsesfordeling. Beton 0.30. Forsøgsresultater (punkter) samt bedste skøn (linier mærket fit). Fed ubrudt linie har poreparametre $\phi = 0,6$, $d_I = 0,4$ nm, $d_M = 15$ nm og $z_M = 0,5$. Punkteret linie har poreparametre $\phi = 0,3$, $d_I = 0,4$ nm, $d_M = 70$ nm og $z_M = 0,5$. Se desuden teksten på foregående side.



Figur 6.16. Porestørrelsesfordeling. Beton 0.45.



Figur 6.17. Porestørrelsesfordeling. Beton 0.70.

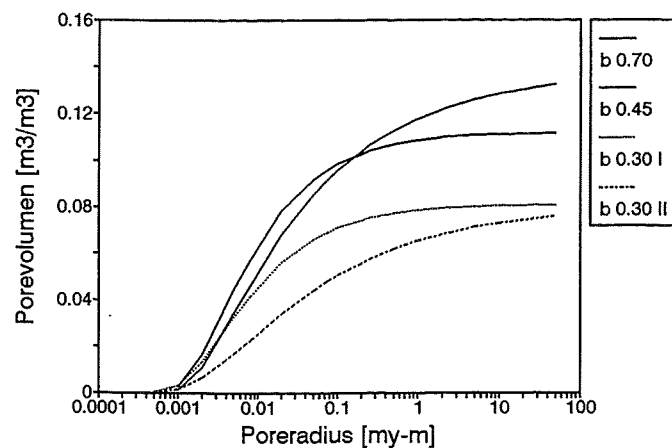
Sammenhængen mellem sorptions- og poretællingsresultater er betydelig bedre for beton 0.45 og 0.70. Dog er koblingen mellem sorptionsresultater og SEM-2 fortsat dårlig.

Pålideligheden af poretællingen afhænger af, hvor let det er at skelne mellem porer og faststof på SEM-billedet. Betonens tætte struktur, jf. figur 6.19 - 6.24, samt det faktum, at kontrasten mellem de forskellige faser af betonen er forholdsvis lille, gør fastlæggelsen af en grænse noget usikker. Erfaringsmæssigt er risikoen for at regne for meget med til porefasen større end det modsatte. Dette har særlig stor betydning for beton 0.30 pga. den lave porøsitet. Endelig har repræsentativiteten af udsnittet betydning, jf. ovenfor.

Sammenligning af betoners porestørrelsesfordeling

I figur 6.18 sammenlignes kurverne mærket *fit*. Der er fortsat vist to kurver for beton 0.30. Benyttes *b0.30I* for beton 0.30 ses denne og *b0.45* primært at adskille sig fra hinanden mht. mængden af porer med en radius mindre end 100 nm. Ingen af disse betoner indeholder ret mange porer større end denne grænse. Beton 0.70 har derimod væsentlig flere porer større end 10 à 100 nm. Lignende observationer refereres i [Hampton & Thomas,93], [Beton-Bogen,85] m.fl.

Det alternative forløb for beton 0.30, *b0.30II*, ses at følge formen på kurven for beton 0.70 og angiver bl.a. at beton 0.30 har næsten lige så mange porer med radius større end 100 nm som beton 0.70. Alene dette viser, at *b0.30II* ikke repræsenterer beton 0.30 særlig godt, da den store forskel i vand/cementforhold mellem beton 0.30 og beton 0.70 bør føre til vidt forskellige mængder af grove porer.



Figur 6.18. Poretørrelsesfordelinger, beton. Bedste skøn baseret på eksperimentelle resultater.

Generelt er bestemmelse af betons porestørrelsesfordeling ikke særlig udbredt. I stedet karakteriseres betons porestruktur ved luftindhold, specifik overflade og afstandsfaktor, hvilket gør en sammenligning med andres resultater vanskelig.

Ikke-frysbar vand

Ud fra porestørrelsesfordelinger i figur 6.18 bestemmes mængden af ikke-frysbar vand, w_{nf} . Denne størrelse benyttes ved beregning af S_p vandmætningsgraden af frysbar vand. Frysepunktet for vandet i porerne bestemmes dels af porestørrelsen, dels af en underafkøling, der skyldes, at adgangen til store porer ofte sker gennem mindre porer, jf. afsnit 2.2 og 3.2.6.

De benyttede værdier for w_{nf} angivet i tabel 6.6, er baseret på en radius på 10 nm som grænse for ikke-frysbar vand ved -20°C , jf. [Fagerlund,73d] m.fl. -20°C er den temperatur, hvor den maksimale dilatation optræder, jf. afsnit 6.1.

I tabel 6.6 angives desuden mængden af frysbar vand i forhold til materialets porøsitet, p_a . Disse værdier stemmer pænt overens med [Fagerlund,77], hvor mængden af ikke-frysbar vand bestemmes vha. cementindholdet, hydratiseringsgraden og en temperaturafhængig konstant.

Tabel 6.6. Mængden af ikke-frysbar vand ved -20°C , svarende til en poreradius på 10 nm. Beton. Middelværdier.

	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
w_{nf} [m^3/m^3]	0,045	0,066	0,053
w_{nf}/p_a	0,56	0,59	0,38

Specifik overflade

Specifik overflade kan bestemmes på tre forskellige måder vha. poreanalysen beskrevet i bilag E3.2, [de Place,96b]. I figur F24 - F29 angives samtlige værdier. Med visse undtagelser er der god overensstemmelse mellem de forskellige måder at bestemme specifik overflade på.

I tabel 6.7 angives middelværdier for specifik overflade bestemt ud fra desorptions- såvel som adsorptionsisoterm og både ud fra målte værdier og forløb baseret på bedste skøn. Værdierne for specifik overflade er størst for desorption og større for beton 0.45 end for 0.30 og 0.70 i overensstemmelse med forskelle i forløbet af sorptionsisotemer.

Tabel 6.7. Specifik overflade bestemt ud fra desorptions- og adsorptionsisoterm. Beton. Middelværdier.

[m^2/kg]	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
desorption	32650	37400	22050
adsorption	17350	20100	14300

For desorptionsisotemer er værdier for $sum-S_p$, figur F24 - F29, ikke medregnet, jf. bilag F3.2 (V-t poreanalyse), [de Place,96b].

Størrelsen af den specifikke overflade kan benyttes som udtryk for, om materialet indeholder mange små eller store porer, jf. at små porer har en større specifik overflade. Desuden vil et materiale med en mere revneformet porestruktur have en større specifik overflade. Se også nederst i afsnit 6.3.2.

6.3.2 Beton - porestruktur

Beton er fotograferet ved fire forstørrelser, jf. afsnit 5.3.3. Den største forstørrelse (1010x) viser sig ikke særlig egnet, hverken til at studere porestruktur eller til at lave poretælling. Derfor benyttes udelukkende forstørrelse på 503x og 31,4x til disse analyser. I figur 6.19 - 6.24 vises udsnit af beton ved disse forstørrelser¹, fotograferet gennem scanningelektronmikroskop og derefter digitaliseret og analyseret vha. et billedbehandlingsprogram, jf. afsnit 5.3.4. Den fjerde forstørrelse på 252x er for tæt på 503x til at give yderligere informationer.

Sammenlignes oversigtsbillederne (65 gange forstørrelse) virker beton 0.45 betydelig mere homogen og tæt end beton 0.30. Det kan skyldes forskelle i hydratiseringsgrad, samt at en beton med et vand/cementforhold på 0,3 er ekstra følsom hvad angår blanding og udstøbning. Udseendet af figur 6.19 i forhold til figur 6.21 kan desuden forklare, hvorfor der er så dårlig overensstemmelse mellem porestørrelsesfordeling for beton 0.30 bestemt vha. sorption og poretælling. Der ses bort fra muligheden af, at der er sket en ombytning af prøver ved fremstilling af slib.

Yderligere forstørrelse (1000x) viser beton 0.30 og 0.45 som meget tætte, mens beton 0.70 har en del revner.

Disse billeder illustrerer desuden vanskeligheden ved at fastlægge grænsen mellem porer og faststof i forbindelse med poretælling. Ofte vil lidt for meget af porestrukturen henregnes under porer, hvorved porestørrelsesfordelingen afbildet som vist i figur 6.15 - 6.17 vil forskydes i retning af større porer.

Derfor synes det rimeligt at lade en samlet porestørrelsesfordeling, baseret på poretælling og sorptionsisoterm, være forskudt hen mod mindre porer i forhold til resultaterne fra poretælling.

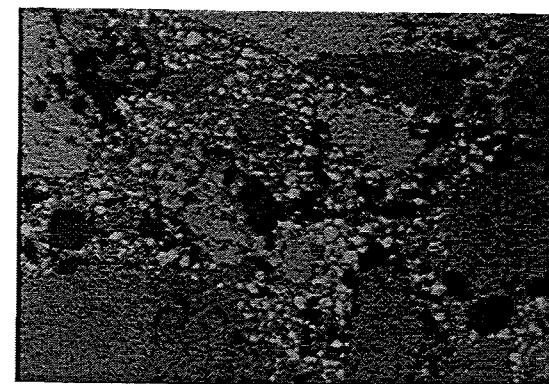
Poreform (μ_0)

Da alle tre betoner er forholdsvis tætte med et kompliceret poresystem, er det vanskeligt at karakterisere de enkelte betoner mht. poreform. På nuværende tidspunkt mangler en mere kvantitativ vurderingsmetode til at fastlægge værdier for formfaktoren μ_0 ud fra fotos.

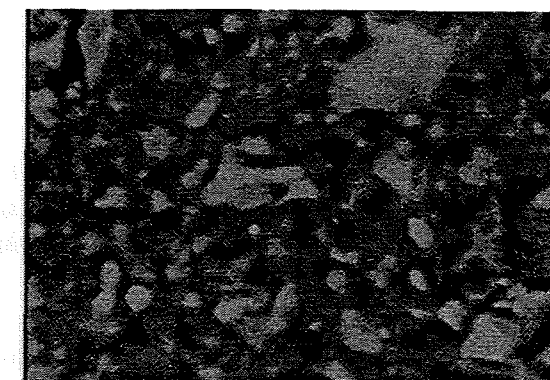
I stedet bestemmes μ_0 ud fra sammenhørende værdier af E-modul og porøsitet, jf. afsnit 6.4. Beregninger med den opstillede model viser desuden, at en vis usikkerhed ved bestemmelsen af μ_0 kan accepteres, uden at det får afgørende indflydelse på størrelsen af den kritiske vandmætningsgrad, jf. afsnit 6.8.4.

Tages der i øvrigt hensyn til, 1) at de tre betoner er fremstillet på samme måde og med de samme råmaterialer, dog med forskellig sammensætning, 2) at μ_0 betegner poreformen ved *forsvindende* porøsitet, jf. tabel 3.1, er det derfor fuldt tilstrækkeligt at benytte samme værdi for alle betoner.

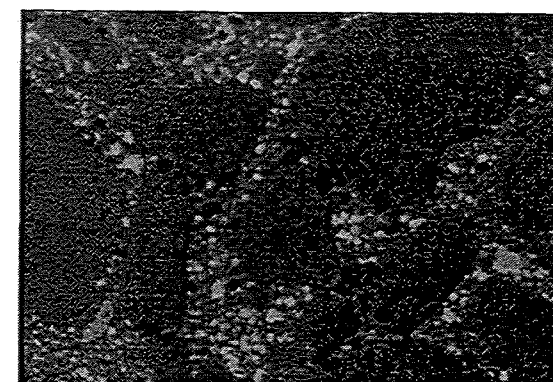
¹ Disse forstørrelser ændres flere gange undervejs, dels ved overførsel til papirkopi, dels ved selve billedbehandlingen og valget af figurstørrelse i rapporten. I figur 6.19-6.24 vises disse forstørrelser som 1000x og 65x.



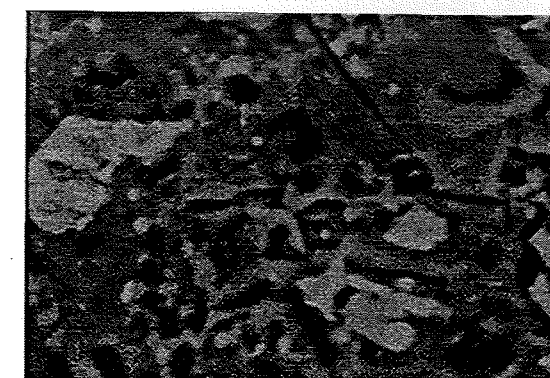
Figur 6.19. SEM-foto. Beton 0.30. Digitaliseret udsnit, forstørret 65 gange. Virkelig størrelse af udsnit: 1,1 x 0,76 mm.



Figur 6.20. SEM-foto. Beton 0.30. Digitaliseret udsnit, forstørret 1000 gange. Virkelig størrelse af udsnit: 72,5 x 49,7 μm .



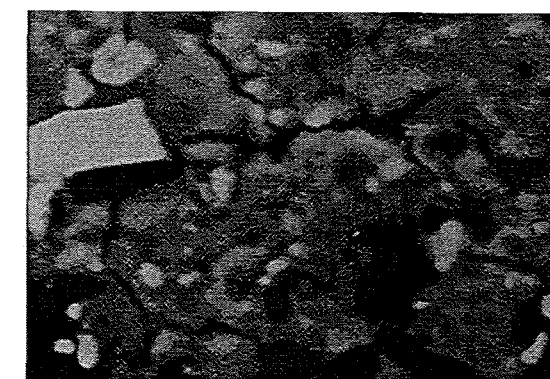
Figur 6.21. SEM-foto. Beton 0.45. Digitaliseret udsnit, forstørret 65 gange.



Figur 6.22. SEM-foto. Beton 0.45. Digitaliseret udsnit, forstørret 1000 gange.



Figur 6.23. SEM-foto. Beton 0.70. Digitaliseret udsnit, forstørret 65 gange.



Figur 6.24. SEM-foto. Beton 0.70. Digitaliseret udsnit, forstørret 1000 gange.

At dette ikke behøver at være i modstrid med, at andelen af revner synes at være større i beton 0.70 end beton 0.30, skyldes, at poreformen ved den *aktuelle* porøsitet, μ , afhænger af såvel μ_0 som porøsiteten c og den kritiske porøsitet c_d , jf. afsnit 3.2.2.

En vis sammenhæng mellem μ_0 og den specifikke overflade må forventes. Af tabel 6.7 fremgår, at den specifikke overflade er lavere for beton 0.70 end for de to øvrige serier, svarende til et mere enkelt poresystem.

Samtidig har beton 0.70 imidlertid væsentlig flere store porer, der bidrager ganske lidt til den specifikke overflade. Det er derfor vanskeligt uden videre at benytte den specifikke overflade til at fastlægge μ_0 .

6.3.3 Tegl - porestørrelsesfordeling

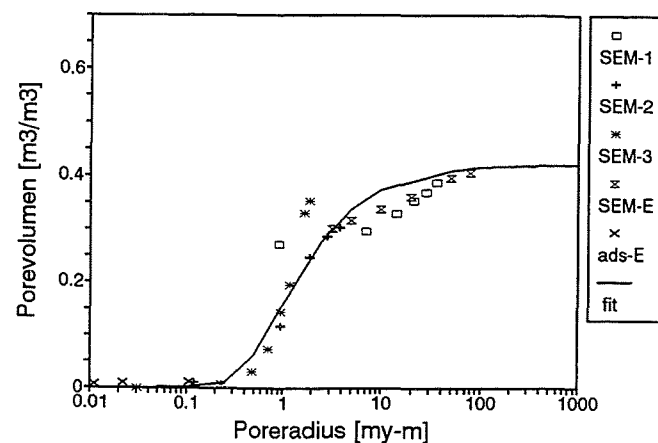
I figur 6.25 - 6.28 er vist porestørrelsesfordelinger optegnet på basis af p_a , sorptionsisoterm og poretællinger. SEM-1, SEM-2 og SEM-3 betegner poretællinger foretaget vha. billedbehandling på SEM-fotos med forstørrelse på 65, 500 og 2100 gange, jf. afsnit 6.3.4. SEM-E betegner en tilsvarende poretælling på tegl 0, jf. [Paulsen et al,93]. EP og ads-E betegner manuel poretælling og adsorption foretaget i et eksamensprojekt, [Ejsing,93].

For tegl anvendes én sorptionsisoterm for alle fire serier, da resultaterne er ret usikre. Sorptionsisotermens bidrag til porestørrelsesfordelingen vises kun i figur 6.25. Det fremgår, at tegl kun har meget få porer i det hygroskopiske område.

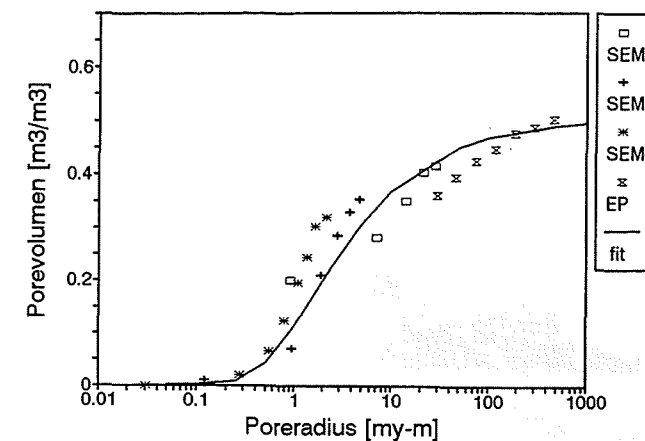
Sorptionsisoterm samt udvalgte resultater fra poretællinger findes i bilag F3.2 og F3.3, [de Place,96b].

På samme måde som for beton er angivet et bedste skøn, angivet ved *fit*, der benyttes til beregninger med den opstillede model. Kurven beskrives vha. fire parametre, jf. afsnit 3.2.6. Værdier er angivet i bilag F6.

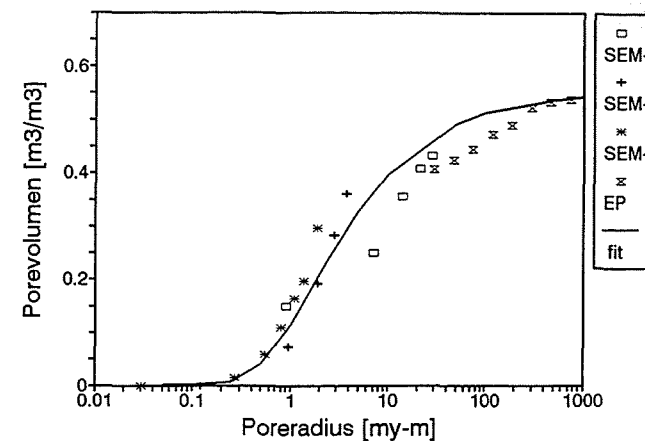
I modsætning til beton bygger porestørrelsesfordelinger for tegl primært på én målemetode (SEM). Det kan være forklaringen på, at der opnås bedre overensstemmelse mellem eksperimentelt bestemte punkter og kurven baseret på et bedste skøn.



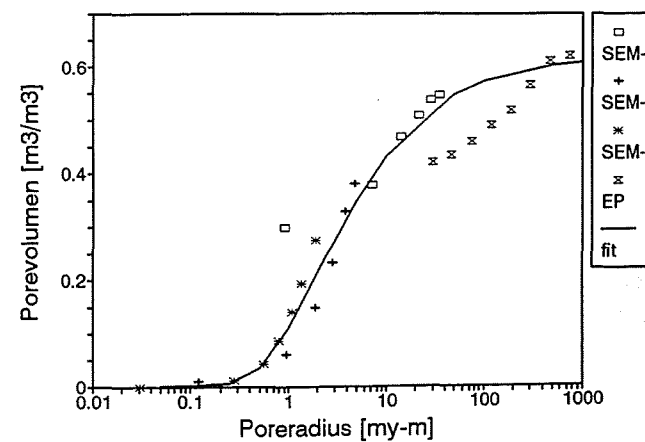
Figur 6.25. Porestørrelsesfordeling. Tegl 0. Forsøgsresultater (punkter) og bedste skøn (linje mærket fit). Symboler er forklaret i teksten ovenfor.



Figur 6.26. Porestørrelsesfordeling. Tegl A.

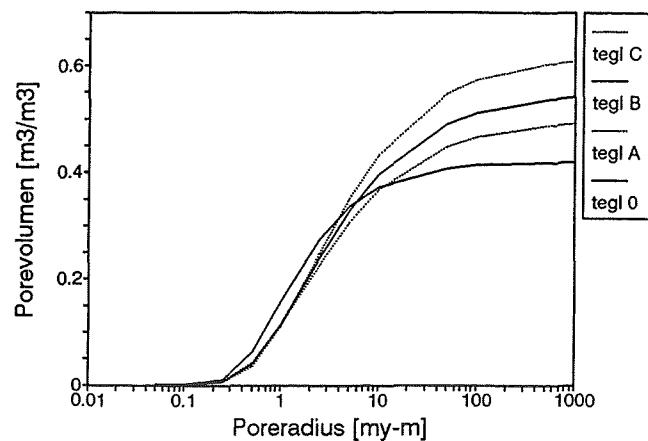


Figur 6.27. Porestørrelsesfordeling. Tegl B.



Figur 6.28. Porestørrelsesfordeling. Tegl C.

I figur 6.29 sammenlignes kurverne mærket *fit.* Tilsætningen af savsmuld ses først og fremmest at have givet en større mængde porer med en radius større end 5 à 10 μm . Desuden har de laboratoriefremstillede blandinger lidt færre porer med radius mindre end 2 à 3 μm end tegl 0.



Figur 6.29. Porestørrelsesfordeling. Tegl. Bedste skøn baseret på eksperimentelle resultater.

Specifik overflade

Specifik overflade er beregnet for tegl under ét, jf. at kun én sorptionsisoterm anvendes. Det er derfor ikke muligt at sammenholde specifik overflade med poreform, jf. afsnit 6.3.2. Som gennemsnit fås en specifik overflade på 6200 m^2/kg .

Samtlige værdier for specifik overflade er sammen de øvrige resultater af poreanalysen angivet i figur F30, [de Place,96b].

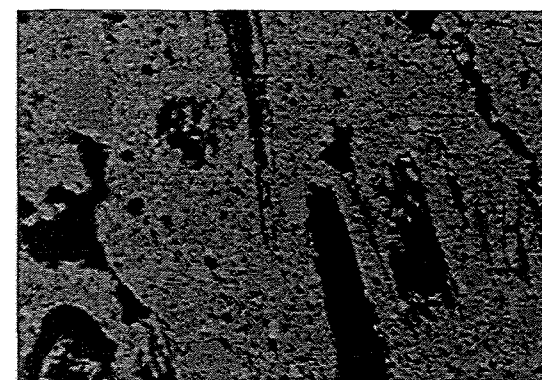
Sammenholdt med beton er værdien af den specifikke overflade væsentlig lavere, svarende til at porerne i tegl er langt større end i beton.

6.3.4 Tegl - porestruktur

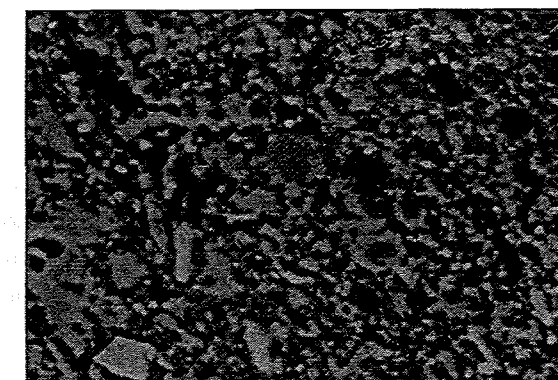
Tegl er fotograferet ved fire forstørrelser, jf. afsnit 5.3.3. Heraf benyttes alle på nær den næststørste (503x) til at studere porestruktur og til at lave poretælling. I figur 6.30 - 6.37 vises udsnit af tegl fotograferet gennem scanningelektronmikroskop og digitaliseret vha. et billedbehandlingsprogram, jf. afsnit 5.3.4.

Forstørrelserne svarer til SEM-1 og SEM-2 i figur 6.25 - 6.28. Fotos med den største forstørrelse, svarende til SEM-3 er ikke interessante i denne sammenhæng og vises derfor ikke.²

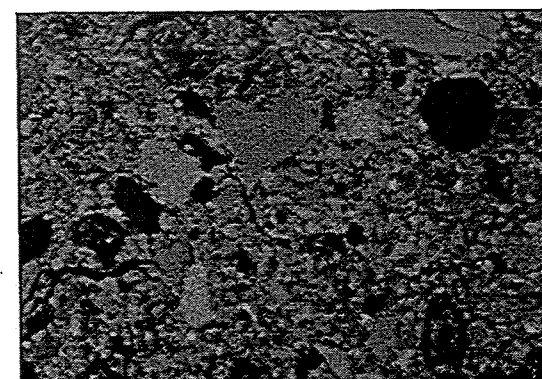
² I afsnit 5.3.4 angives, at de benyttede forstørrelser er 1010x, 503x, 252x og 31,4x. Disse værdier ændres flere gange undervejs, dels ved overførsel til papirkopi, dels ved selve billedbehandlingen og valget af figurforstørrelse i rapporten. I figur 6.30-6.37 vises forstørrelser på 31,4x og 252x som 65x og 500x.



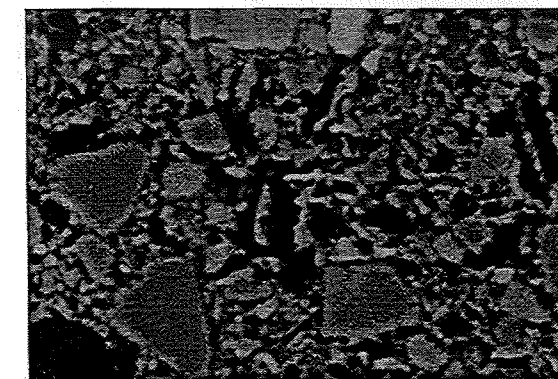
Figur 6.30. SEM-foto. Tegl 0. Digitaliseret udsnit, forstørret 65 gange. Virkelig størrelse af udsnit: 1,1 x 0,76 mm.



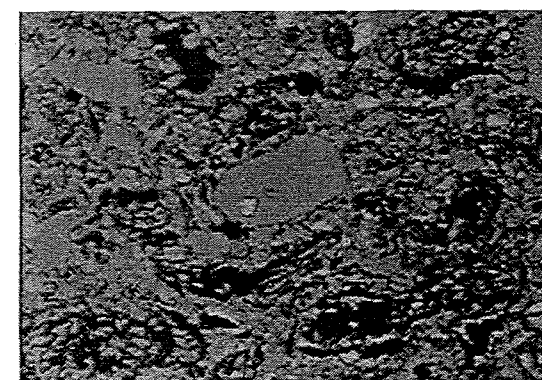
Figur 6.31. SEM-foto. Tegl 0. Digitaliseret udsnit, forstørret 500 gange. Virkelig størrelse af udsnit: 0,145 x 0,100 mm.



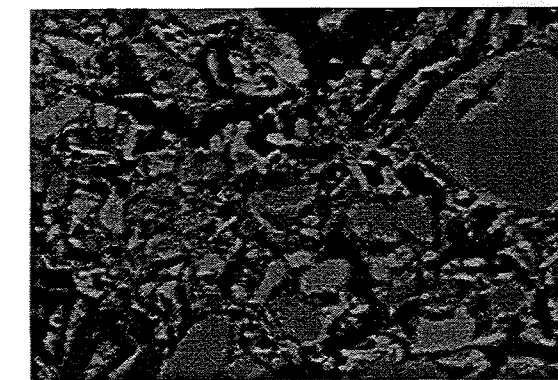
Figur 6.32. SEM-foto. Tegl A. Digitaliseret udsnit, forstørret 65 gange.



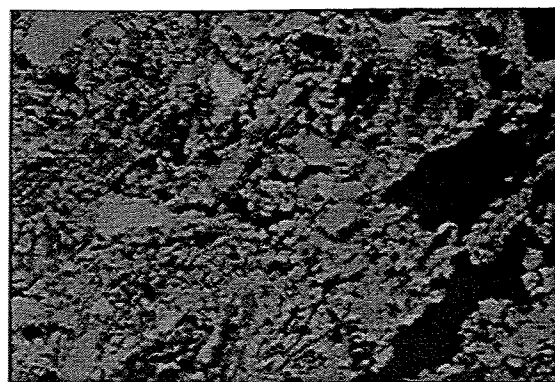
Figur 6.33. SEM-foto. Tegl A. Digitaliseret udsnit, forstørret 500 gange.



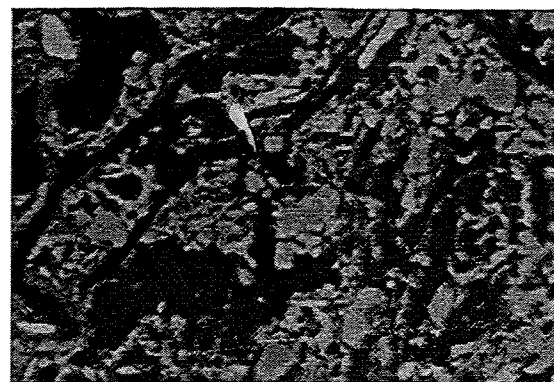
Figur 6.34. SEM-foto. Tegl B. Digitaliseret udsnit, forstørret 65 gange.



Figur 6.35. SEM-foto. Tegl B. Digitaliseret udsnit, forstørret 500 gange.



Figur 6.36. SEM-foto. Tegl C. Digitaliseret udsnit, forstørret 65 gange.



Figur 6.37. SEM-foto. Tegl C. Digitaliseret udsnit, forstørret 500 gange.

Tegl 0 er i modsætning til de øvrige serier værkfremstillet og afviger tydeligt fra disse når det gælder porestrukturen. Tegl 0 er bortset fra enkelte store porer langt mere tæt i strukturen, uanset ved hvilken forstørrelse sammenligningen sker. Det skyldes 1) det lave indhold af savsmuld, 2) at stenene er fremstillet maskinelt, med de fordele det har mht. homogenitet.

Poreform (μ_0)

Sammenlignes de tre laboratoriefremstillede serier, tegl A, B og C, hvor tegl A er fremstillet med det mindste indhold af savsmuld og tegl C det største, resulterer tilsætningen af savsmuld ikke uventet i mere revneformede porer og en mere inhomogen porestruktur.

Overraskende er det imidlertid, at de store revneformede porer, der ses på tegl 0 slet ikke ses på tegl A, der dog er fremstillet med langt mere savsmuld end tegl 0. Det kan være en tilfældighed, men er snarere et resultat af forskellen mht. fremstilling.

Ud over ekstra savsmuld har tegl A, B og C fået tilsat ekstra vand ved fremstillingen. Vandet kan have virket som smøremiddel og dermed modvirket tendens til revnedannelse. Desuden presses blandingen af ler, vand og savsmuld ned i formen ved et betydeligt mindre tryk ved laboratoriefremstillingen.

Denne analyse fører til, at der til beregning med den opstillede model som udgangspunkt benyttes to forskellige værdier for formfaktoren μ_0 . Disse værdier bestemmes ud fra sammenhørende værdier af E-modul og porøsitet, jf. afsnit 6.4.

På samme måde som for betonene kan der argumenteres for at benytte samme værdi af μ_0 for tegl A, B og C. I øvrigt gælder for tegl som for beton, at en vis usikkerhed ved bestemmelsen af μ_0 kan accepteres, uden at det får afgørende indflydelse på resultaterne, jf. afsnit 6.8.

For tegl benyttes højere værdier for μ_0 end for beton, jf. afsnit 6.4, svarende til en lavere specifik overflade.

6.3.5 Porestruktur - sammenfatning

Resultater for porøsitet og densitet viser, at ønsket om at opnå forskellige tegl henholdsvis beton med samme udgangspunkt, ved at tilsætte savsmuld henholdsvis ændre vand/cementforholdet, er opnået. Porestørrelsesfordelingen - især mængden af store porer - er som ventet afhængig af vand/cementforholdet henholdsvis mængden af savsmuld. Tegl har som ventet en lavere specifik overflade end beton.

Generelt synes betonene meget tætte, dog har beton 0.70 lidt flere revner end de øvrige. Tegl 0, der er værkfremstillet, er mere homogen og tæt end de laboratoriefremstillede serier.

Metoder til rent kvantitativt at fastlægge værdier for formfaktoren μ_0 savnes. Ud fra SEM-fotos kan det vurderes, om det er rimeligt at benytte forskellige formfaktorer for de forskellige materialeserier, og det skønnes om værdier for formfaktoren μ_0 bestemt vha. sammenhørende værdier af E-modul og porøsitet svarer til porestrukturens udseende.

Repræsentativitet af prøver

De præsenterede resultater illustrerer problematikken mht. at beskrive porestrukturen af porøse materialer, det være sig vha. porestørrelsesfordeling eller studier gennem mikroskop. Det gennemgående problem er repræsentativitet af prøver og hvor stort et antal prøver, en tilstrækkelig præcis analyse af porestrukturen kræver.

Problematikken viser sig for beton ved den dårlige kobling mellem porestørrelsesfordeling baseret på sorption og på scanningelektronmikroskopi.

Lange, Jennings & Shah [1994] undersøger, hvor mange billeder taget med elektronmikroskop, der kræves for at få en tilstrækkelig præcis bestemmelse af et materiales porøsitet. Jo mere inhomogent et materiale er, desto flere billeder kræves; et antal på 12 angives for cementpasta, og antallet skal derfor være langt større for beton.

Det skal bemærkes, at Lange et al kun arbejder med forstørrelser på 1000 gange. Kombineres sådanne forstørrelser med oversigtsbilleder bliver behovet mindre, men alligevel betydeligt større end det antal billeder, der indgår i dette projekt.

6.4 Mekaniske egenskaber

Enaksede trækforsøg er udført for at bestemme trækstyrken og det statiske E-modul af de undersøgte materialer. Forsøgene viser, at materialerne som ventet er meget sprøde, brud opstår næsten uvarslet.

Eksempler på forløbet af arbejdslinien, dvs. spænding som funktion af tøjning ses i bilag F4, [de Place, 96b]. I bilag F4 angives ligeledes samtlige værdier for E-modul, trækstyrke og trækbrudtøjning.

6.4.1 E-modul og trækstyrke - beton

I tabel 6.8 angives middelværdier for materialets E-modul E^* , trækstyrken f_p og trækbrudtøjningen ε_{m} . Trækstyrken er i modsætning til E-modulet bestemt i to omgange, efter 1 måned og efter 5 måneder, jf. afsnit 4.2.5 og bilag C1, med stort set samme resultat. Der angives derfor kun én

middelværdi. De eksperimentelt bestemte E-moduler er sammenholdt med E-modul bestemt ud fra betonens sammensætning, E_{calc} , jf. bilag B1 og [L.F.Nielsen,90b,91c].

Tabel 6.8. E-modul, trækstyrke og trækbrudtøjning. Beton. Middelværdier.

	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
E^* [GPa]	46,3	39,9	29,9
E_{calc} [GPa]	44,9	41,0	31,1
f_t [MPa]	4,5	3,4	2,3
ϵ_{tu} [%o]	0,14	0,11	0,11

Der ses at være en god overensstemmelse mellem E^* og E_{calc} , på trods af, at sidstnævnte er bestemt med en vis usikkerhed, pga. afhængigheden af hydratiseringsgraden.

Værdier for ϵ_{tu} kan sammenlignes med [Beton-Bogen,85], der opgiver denne størrelse til 0,1 à 0,2 %o for beton generelt. E^* svarer ligeledes fint til værdier i [Beton-Bogen,85].

Materialets E-modul E^* udtrykkes som funktion af porøsiteten c vha.

$$\frac{E^*}{E_s} = \frac{1-c}{1 + \frac{c}{\mu_0 \frac{c_d-c}{c_d}}} \quad (6.1)$$

jf. (4.1), hvor c_d er den kritiske porøsitet, μ_0 er formfaktoren og E_s er faststoffets E-modul. (6.1) omskrives til

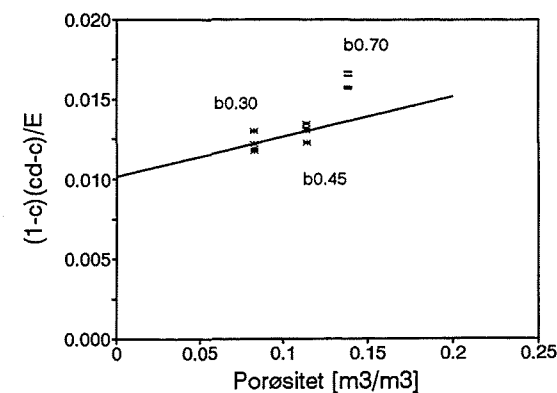
$$\frac{(1-c)(c_d-c)}{E^*} = \frac{1}{E_s} \frac{c_d - \mu_0}{\mu_0} c + \frac{c_d}{E_s} \quad (6.2)$$

Hvis alle materialeserier har samme c_d og μ_0 vil der være en lineær sammenhæng mellem størrelsen $(1-c)(c_d-c)/E^*$ og c , jf. (6.2), som kan udnyttes til at bestemme E_s og μ_0 for en given c_d .

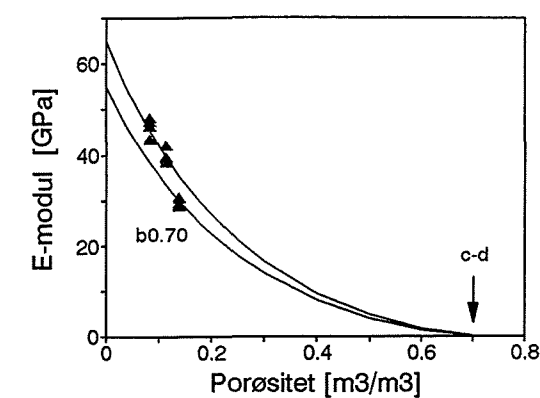
(6.2) er for beton afbildet i figur 6.38. Da porøsiteten af de testede prøveemner ikke er bestemt, benyttes middelporøsiteten, jf. tabel 6.5.

c_d kan fastlægges ved at optegne resultaterne som vist i figur 6.39. For at få en veldefineret skæring, kræves større forskel i porøsitet serierne imellem end de tre betonserier har. Værdien for c_d fastlægges derfor med en vis usikkerhed til 0,7, uden at det dog får afgørende betydning for resultatet af beregningerne med den opstillede model, jf. afsnit 6.8.4.

Det viser sig, at der er for stor forskel på de tre betoner til at samme værdi for E_s og μ_0 kan benyttes. Den rette linie og de angivne værdier for E_s og μ_0 i figur 6.38 er derfor kun baseret på resultater for beton 0.30 og beton 0.45. Inkluderes beton 0.70 fås i stedet $E_s = 114$ GPa, hvilket er en helt urealistisk værdi. Værdier for beton 0.70 er af samme grund markeret med et andet symbol i figur 6.38.



Figur 6.38. Afbildning af (6.2) til bestemmelse af faststoffets E-modul E_s og formfaktoren μ_0 . Beton. $c_d = 0,7$. Forløbet af den rette linie svarer til $E_s = 69$ GPa og $\mu_0 = 0,26$.



Figur 6.39. E-modul som funktion af porøsitet. Beton. Forsøgsdata (punkter) og sammenhæng beskrevet vha. (6.1). $E_s = 65$ GPa (øverst) og 55 GPa. $\mu_0 = 0,3$ (begge).

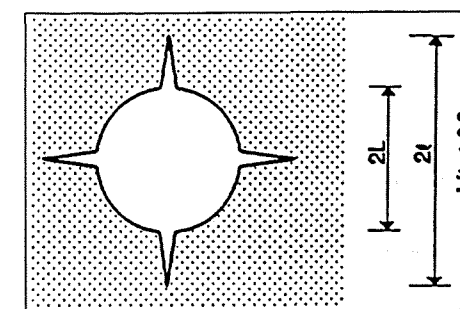
Som udgangspunkt benyttes samme værdi for μ_0 for alle tre betoner, jf. afsnit 6.3.2. Forskelle serierne imellem udtrykkes i stedet vha. E_s , jf. figur 6.39.

Med c_d og μ_0 fastlagt bestemmes E_s for beton 0.70 vha. (6.1). Til beregninger med den opstillede model benyttes de i tabel 6.9 angivne værdier som udgangspunkt. E_s og μ_0 er rundet af i forhold til figur 6.38.

Tabel 6.9. Værdier for E_s , c_d , μ_0 og f_t til beregningsmodel. Beton.

	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
E_s [GPa]	65	65	55
c_d	0,7	0,7	0,7
μ_0	0,3	0,3	0,3
f_t [MPa]	4,5	3,4	2,3

$\mu_0 = 0,3$ svarer til, at forholdet L/l er ca. 0,57, hvor L er poreradius og l er afstanden fra poremidte til revnespids, jf. figur 6.40 og afsnit 3.2.2. Jo lavere værdi af L/l , desto mere ligner revneporen en rigtig revne.



Figur 6.40. Revnepore til modellering af poresystem.

6.4.2 E-modul og trækstyrke - tegl

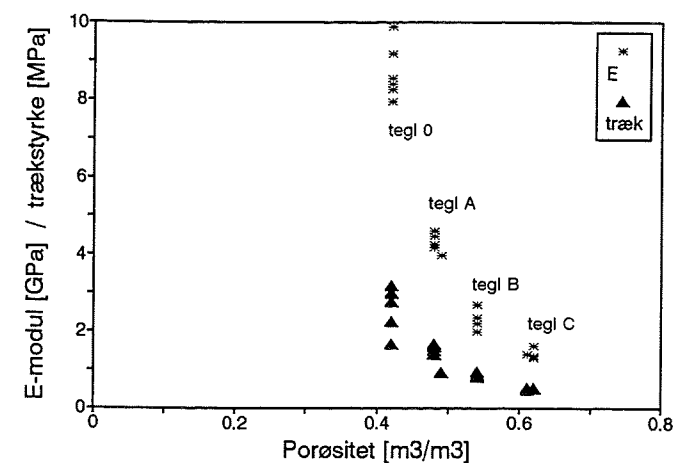
I tabel 6.10 angives middelværdier for E-modulet E^* , trækstyrken f_t og trækbrudtøjningen ϵ_{tu} . Enkeltresultater for enakset trækstyrke og E-modul afbildes som funktion af porøsitet i figur 6.41. For porøsitet benyttes middelværdier taget fra tabel 6.5.

Tabel 6.10. E-modul, trækstyrke og trækbrudtøjning. Tegl. Middelværdier.

	Tegl 0	Tegl A	Tegl B	Tegl C
E^* [GPa]	8,7	4,3	2,3	1,4
f_t [MPa]	2,6	1,4	0,9	0,5
ϵ_{tu} [‰]	0,35	0,4	0,45	0,45

Faststoffets E-modul E_s , den kritiske porøsitet c_d og formfaktoren μ_0 bestemmes som beskrevet i afsnit 6.4.1.

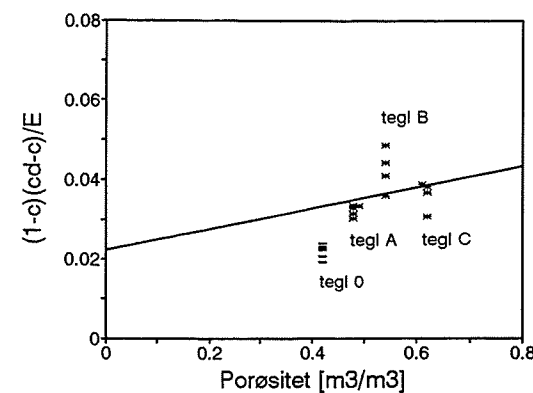
Af figur 6.41 fremgår tydeligt, at resultater for E-modul og trækstyrke følger samme hyperbolske kurveform. I begge tilfælde skønnes c_d til 0,75, som antages at gælde for alle serier. En værdi på 0,75 stemmer godt overens med erfaringer opnået i forbindelse med fremstilling af prøveblandinger. Det viste sig umuligt at fremstille noget der lignede en teglsten med en porøsitet over 70%, jf. [Ejsing,93].



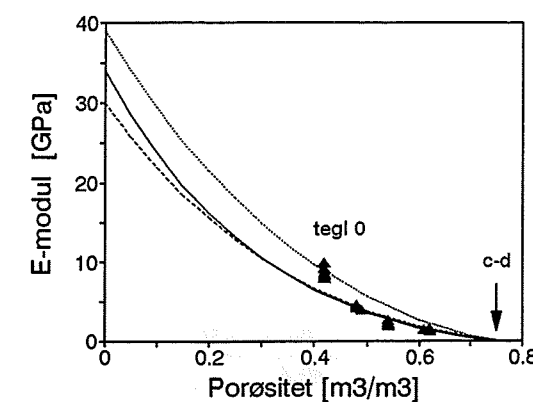
Figur 6.41. E-modul og enakset trækstyrke som funktion af porøsitet. Tegl.

Til bestemmelse af E_s og μ_0 optegnes forløbet vist i figur 6.42a. Den rette linie i figuren er baseret på de laboratoriefremstillede serier, tegl A, B og C. En lineær regression baseret på alle fire serier er meningsløs, da den resulterer i et negativt E-modul.

At tegl 0 må behandles for sig selv stemmer overens med afsnit 6.3.4, jf. forskelle i porestruktur. Tegl 0 er af samme grund markeret med et andet symbol i figur 6.42a og en særskilt kurve er optegnet for tegl 0 i figur 6.42b.



Figur 6.42a. Afbildning af (6.2) til bestemmelse af faststoffets E-modul E_s og formfaktoren μ_0 . Tegl. $c_d = 0,75$. Forløbet af den rette linie svarer til $E_s = 34$ GPa og $\mu_0 = 0,4$.



Figur 6.42b. E-modul som funktion af porøsitet. Tegl. Forsøgsdata (punkter) og sammenhæng beskrevet vha. (6.1). Regnet oppefra benyttes: $E_s = 39$ GPa og $\mu_0 = 0,6$, $E_s = 34$ GPa og $\mu_0 = 0,4$, $E_s = 30$ GPa og $\mu_0 = 0,5$.

Til beregninger med den opstillede model benyttes de i tabel 6.11 angivne værdier som udgangspunkt. Af analysen i afsnit 6.8 fremgår, at det ikke har afgørende betydning, om $E_s = 30$ GPa og $\mu_0 = 0,5$ eller $E_s = 34$ GPa og $\mu_0 = 0,4$ anvendes for tegl A, B og C, hvilket er en følge af at de to kurver nærmest er sammenfaldende for $c > 0,3$, jf. figur 6.42b.

Af figur 6.42a ses, at en ret linie ikke er en særlig god repræsentant for tegl A, B og C under ét. Figur 6.42b viser da også, at tegl B falder lidt udenfor de optegnede forløb, beskrevet vha. (6.1). På nuværende tidspunkt skelnes dog ikke yderligere mellem disse serier.

For tegl 0 sættes μ_0 til 0,6, hvorefter E_s bestemmes til 39 GPa vha. (6.1). Disse værdier svarer til en tættere, stærkere tegl i forhold til de laboratoriefremstillede tegl.

Tabel 6.11. Værdier for E_s , c_d , μ_0 og f_t til beregningsmodel. Tegl.

	Tegl 0	Tegl A	Tegl B	Tegl C
E_s [GPa]	39	30 à 34	30 à 34	30 à 34
c_d	0,75	0,75	0,75	0,75
μ_0	0,6	0,5 à 0,4	0,5 à 0,4	0,5 à 0,4
f_t [MPa]	2,6	1,4	0,9	0,5

$\mu_0 = 0,5$ eller $\mu_0 = 0,4$ svarer til $L/l = 0,4$ à $0,5$ for tegl A, B og C, hvor L er poreradius og l er afstand fra poremidte til revnespids i en revnepore, jf. figur 6.40. For tegl 0 fås $L/l = 0,6$ svarende til værdien for beton, jf. afsnit 6.4.1.

At L/l ikke er højere for tegl end for beton skyldes teglstenenes store porøsitet sammenlignet med beton. Det betyder også, at porestrukturen i de undersøgte tegl og beton med de angivne værdier for μ_0 og c_d skal opfattes som værende omtrent lige revneformet. For at opnå væsentlig

højere værdier af L/l (0,6 à 0,7) skal μ_0 forhøjes til 0,9. Det bevirker til gengæld, at E_s kun bliver 18 GPa, hvilket er urealistisk lavt, jf. figur 6.42b.

6.4.3 Trykstyrke - beton

For hver beton er trykstyrken bestemt ved at belaste to $\varnothing 100$ mm cylindre til brud. Resultatet er vist i tabel 6.12.

Tabel 6.12. Trykstyrke. Beton. Enkeltresultater.

f_c [MPa]	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
I	89,8	67,6	32,6
II	94,9	68,4	27,7

Sammenholdes træk- og trykstyrke fås, at trækstyrken er henholdsvis 5, 5 og 8 % af trykstyrken for beton 0.30, 0.45 og 0.70. Det er ikke overraskende, at brøkdelen er lavere end de 10 % der normalt regnes med, 1) fordi beton 0.45 og 0.30 har en forholdsvis høj styrke og forholdet mellem træk- og trykstyrke aftager med stigende trykstyrke, [Neville,81], [DS 411] m.fl., 2) fordi træk- og trykstyrke ikke er bestemt ved samme alder af betonen.

6.4.4 Mekaniske egenskaber - sammenfatning

Der synes at være en hyperbolsk sammenhæng mellem E-modul / trækstyrke og porøsitet for såvel tegl som beton (ikke vist for styrke).

Det viste udtryk til beskrivelse af E-modulets afhængighed af porøsiteten kan derfor anvendes på begge materialer til at fastlægge værdier for faststoffets E-modul, den kritiske porøsitet og formfaktoren μ_0 . Disse størrelser er bestemt med en vis usikkerhed, da forskellen i porøsitet mellem de enkelte serier er forholdsvis lille. Dette får dog ikke afgørende betydning for beregninger med den opstillede model.

Trykstyrken af beton er som ventet stærkt afhængig af porøsiteten og dermed af vand/cementforholdet (w/c).

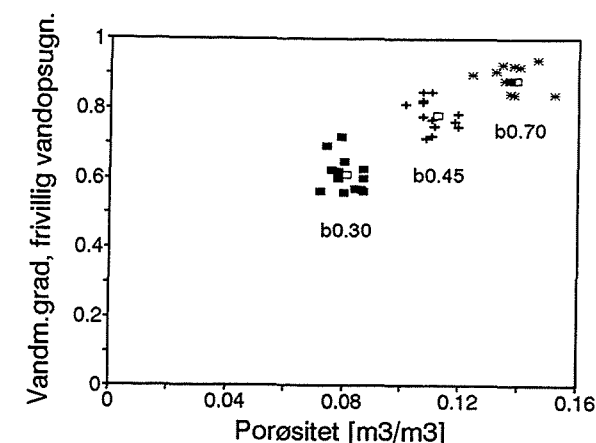
6.5 Fugttransport

Af de udførte forsøg præsenteres kun resultater fra kapillarsugning nedenfor, da resultaterne af de øvrige forsøg - der beskrives i afsnit 4.3.1 - ikke blev anvendt til det ønskede formål. En kort sammenfatning af disse forsøg gives, med henvisning til særskilt rapportering, [de Place,96c].

6.5.1 Kapillarsugning

For såvel beton som tegl er vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning, $S_{f,vac,kap}$, bestemt ved ophør af vandopsugningen, dvs. efter at knækpunktet i figur 5.8 er passeret. Indeks vac,kap angiver, at vandmætningsgraden regnes ud i forhold til, hvor meget vand materialet kan indeholde ved vacuumvandmætning. f angiver, at der for beton er taget hensyn til mængden af ikke-frysbar vand, jf. afsnit 6.3.1.

6.5 Fugttransport



Figur 6.43. Vandmætningsgrad ved frivillig vandopsugning, korrigeret for mængden af ikke-frysbar vand, som funktion af porøsitet. Beton. Enkeltresultater. \square markerer middelværdier.

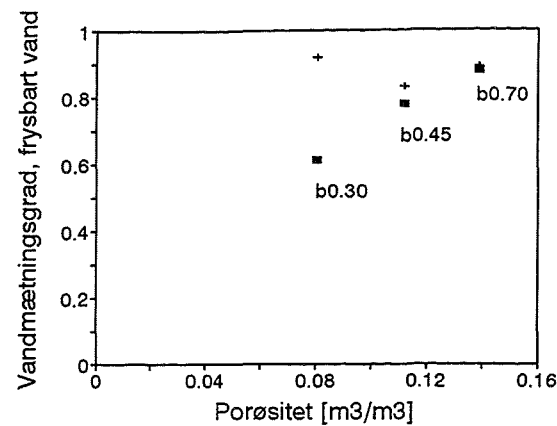
Figur 6.43 viser tydeligt, at der som ventet er stor forskel på de tre betonserier mht. fugtoptagelse ved frivillig vandopsugning. Det var én af kriterierne for valget af betonsammensætninger. Se også tabel F10, [de Place,96b].

En sammenligning af $S_{f,vac,kap}$ og $S_{f,KR}$ for beton viser, hvor stor virkning det har at benytte et vand/cementforhold på 0,3 i stedet for 0,45, jf. figur 6.44. Vurderes frostbestandigheden ud fra figur 6.44, er der ingen tvivl om, at beton 0.30 er frostbestandig, mens hverken 0.45 og 0.70 kan regnes som frostbestandige. For beton 0.45 gælder dog, at vurderingen afhænger af om $S_{f,KR} = 0,83$ benyttes - som vist på figur 6.44 - eller $S_{f,KR} = 0,90$, jf. afsnit 6.1.

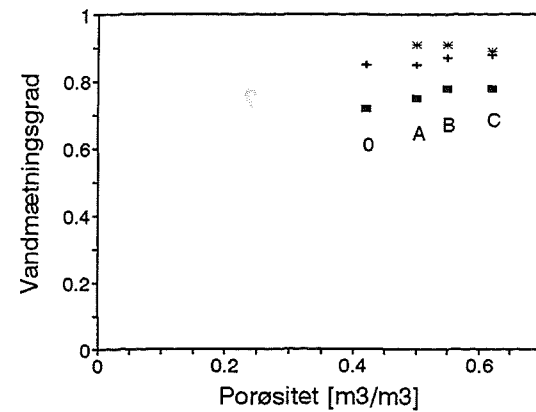
Bemærk at der er tale om frostbestandighed uden tilstedeværelse af tørsalte. Er der tørsalte til stede kan frostbestandigheden vise sig at være væsentlig dårligere. Således er afskalningen ved frost-tørsalt prøvning af beton 0.30 ti gange større end ved ren frostprøvning, jf. tabel 6.14, afsnit 6.6. Det kan derfor ikke uden videre sluttes, at beton 0.30 gør luftindblanding overflødig.

For tegl er $S_{vac,kap}$ kun bestemt på få prøveemner, jf. [Ejsing,93] og tabel F11. For alle serier er S_{KR} tilsyneladende større end $S_{vac,kap}$ og tilsætningen af savsmuld synes ikke at have påvirket dette forhold væsentligt, jf. figur 6.45. Alle tegl skulle derfor være frostbestandige i følge denne sammenligning. Tegl 0 får dog et lille plus, ikke mindst fordi en lidt højere værdi af S_{KR} skal benyttes hvis en reel sammenligning af tegl 0 og tegl A, B og C skal foretages, jf. afsnit 6.1.2.

At der for tegl - i modsætning til beton - ikke er nogen afhængighed af porøsiteten kan forklares ved forskelle i porestørrelsesfordeling mellem tegl og beton. Andelen af kapillarporer i beton - til forskel fra tegl - aftager markant med aftagende porøsitet (figur 6.15 - 6.17).



Figur 6.44. Eksperimentelt bestemt kritisk vandmætningsgrad (+) og vandmætningsgrad ved frivillig vandopsugning (■) som funktion af porøsitet. Beton. Middelværdier.



Figur 6.45. Eksperimentelt bestemt kritisk vandmætningsgrad (+: dilatation, *: resonans) og vandmætningsgrad ved frivillig vandopsugning (■) som funktion af porøsitet. Tegl. Middelværdier.

I tabel 6.13 angives middelværdier for kapillaritetstallet k for beton og tegl. Se også tabel F10 og F11.

Som ventet er der meget stor forskel på k for de tre betoner, hvilket er et udtryk for, at de er meget forskellige mht. tæthed og mængden af kapillarporer. Det skal dog nævnes, at der ikke er foretaget nogen form for udtørring af prøveemnerne inden kapillarsugning. Det betyder, at prøveemnerne har indeholdt en del fugt fra start. Omregnet til vandmætningsgrad har udgangspunktet været henholdsvis 0,42, 0,22 og 0,12 for beton 0.30, 0.45 og 0.70, jf. figur F19. At serierne ikke har haft samme udgangspunkt mht. fugtindhold betyder, at forskellen serierne imellem mht. k bliver ekstra stor.

Tabel 6.13. Kapillaritetstal, k [$\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{s})$]. Beton og tegl. Middelværdier.

	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
	0,0043	0,012	0,024
Tegl 0	Tegl A	Tegl B	Tegl C
0,364	0,378	0,544	0,591

Værdier for k viser, at tegl B og C har en væsentlig større kapillarsugningsevne end tegl 0 og A. At der ikke er nogen forskel mellem tegl 0 og A henholdsvis mellem tegl B og C kan skyldes, at talmaterialet er ret spinkelt og spredningen specielt for tegl 0 og tegl C tilsvarende stor. k er langt større for tegl end beton, jf. at tegl er langt mere porøst og har en mere åben porestruktur.

6.5.2 Øvrige forsøg - sammenfatning

Resultater fra diffusionsforsøgene stemmer overens med kapillarsugningen, idet der opnås markant forskellige værdier for betonernes fugttransportkoefficienter, uanset om fugten transporteres på damp- eller

væskeform. Forskellen er særlig tydelig mellem beton 0.30 og 0.45, jf. [de Place,96c].

Diffusionskoefficienter bestemt ved stationære forhold som det er tilfældet i dette projekt, giver ikke tilstrækkelig information om materialets fugttransportmæssige egenskaber til at simulere fugttransport vha. MATCH under forhold svarende til naturlig eksponering eller standardiseret frostprøvning, jf. [de Place,96c].

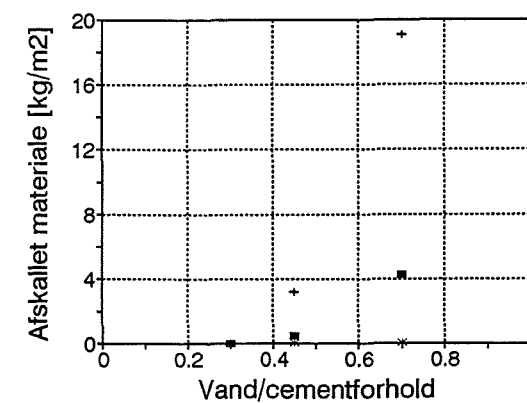
Det skyldes, at transportkoefficienter bestemt ved diffusionsforsøg (kopforsøg) forudsætter, 1) en skelnen mellem ren væske- og ren damptransport, 2) at én transportkoefficient kan repræsentere væsketransport under alle forhold. Tidsmæssigt har det ikke været muligt at udføre yderligere forsøg for at afhjælpe dette.

Ved hjælp af gammastråling har det vist sig muligt at skelne mellem fugtindholdet i en tør og en vandmættet prøve af beton med $w/c = 0,3$. Hvorvidt det er muligt at bestemme en egentlig fugtfordeling er fortsat usikkert, da der er tale om små fugtmængder. En afklaring vil kræve yderligere forsøg. Gammastrålingsforsøg er rapporteret i [de Place,93a].

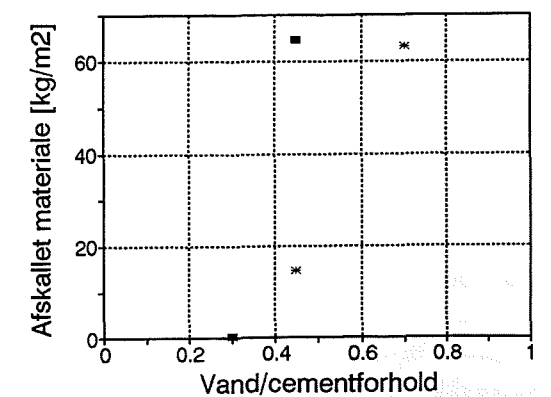
6.6 Frostprøvning

Figur 6.46 og 6.47 samt tabel 6.14 viser resultatet af frostprøvning af beton efter den svenske frostprøvningsstandard [SS 13 72 44] med rent vand henholdsvis med 3% NaCl-opløsning.

Prøvningen resulterer som ventet i en tydelig differentiering af de tre betonerier, samt en differentiering mellem påvirkning med og uden salt. Hverken beton 0.45 med saltopløsning eller beton 0.70 generelt opfylder standardens krav til en "acceptabel" frostbestandighed, og kun beton 0.30 påvirket med rent vand kan regnes som "meget god", jf. [SS 13 72 44].



Figur 6.46. Frostprøvning. Beton. Påvirkning med rent vand, efter [SS 13 72 44]. Afskallet materiale efter 28 (*), 56 (■) og 90 (+) frost-tø-cykler. Middelværdier.



Figur 6.47. Frostprøvning. Beton. Påvirkning med 3% NaCl-opløsning. Afskallet materiale efter 28 (*) og 42 (■) frost-tø-cykler. Ingen resultater for beton 0.70 efter 42 cykler. Middelværdier.

Tabel 6.14. Frostprøvning. Beton. Afskallet materiale [kg/m²], middelværdier.

	28 døgn	42 døgn	56 døgn	90 døgn	158 døgn
Rent vand					
b0.30	0,017	0,018	0,022	0,036	0,053 *
b0.45	0,051	0,18	0,49	3,2	59 **
b0.70	0,074	0,75	4,3	19	70 *
3 % salt					
b0.30	0,24	0,33	0,43	0,61	0,99 *
b0.45	15	65	NA	NA	NA
b0.70	63	NA	NA	NA	NA

*: middel af fem prøver, **: middel af fire prøver. Øvrige resultater er middel af seks prøver.

For beton 0.45 og 0.70 forløb afskalningen meget hurtigt, især for påvirkning med salt, hvor forsøget allerede måtte afsluttes efter 42 henholdsvis 28 cykler. Betonen kunne da graves ud af indpakningen, jf. figur F50, [de Place,96b]. Figur 6.46 og 6.47 viser en tydelig acceleration af mængden af afskallet materiale, svarende til, at tilslag efterhånden løsnes. I bilag F5 er samtlige resultater angivet i skemaform. Desuden er forløbet for beton 0.30 vist mere detaljeret end det fremgår af figur 6.46 og 6.47.

Selv om det ikke er overraskende at beton 0.45 og 0.70 nedbrydes hurtigt, tyder erfaringerne med indpakningen af prøveemner på, at denne ikke har været tilfredsstillende. Fastgørelsen af isolering til prøveemnerne har ikke været udført godt nok. Det har formentlig bevirket, at prøveemnerne udsat for kombineret frost-tøsalt-påvirkning ret hurtigt er blevet påvirket ikke alene fra toppen, men også fra kanter og sider. På disse prøveemner er der en ganske tydelig randeffekt, jf. figur F50.

Enkelte prøveemner af beton 0.30 fortsætter til 675 cykler er gennemløbet og endnu efter 300 cykler er prøveemner udsat for frost-tøsalt så godt som upåvirket, jf. tabel F14 og tabel F17. Forløbet af afskallet mængde som funktion af tiden flader ud, figur F47, hvilket udtrykker, at betonen i sig selv er af god kvalitet, kun overfladelaget skaller af. For et prøveemne testet med rent vand er den samlede afskalning efter 675 cykler mindre end 0,1 kg/m², svarende til klassifikationen "meget god", jf. figur 5.10.

Frostprøvning af eksponerede emner

Der er ikke foretaget frostprøvning af naturligt eksponerede emner. Til gengæld er trækstyrken og E-modulet bestemt på en enkelt cylinder (beton 0.30), der forinden har været opbevaret 4 måneder i frost-tø-klimakammer, kun omviklet PE-folie. Mens E-modulet er ca. 8% lavere end for de øvrige cylindre, er trækstyrken mindsket med hele 40%, jf. tabel F12a. Tilsyneladende er trækstyrken altså mere følsom end E-modulet som skadesindikator; dog er kun denne ene cylinder testet. Til gengæld kan E-modulet bestemmes ikke-destruktivt.

6.6.1 Frostprøvning og kritisk vandmætningsgrad

Der er god overensstemmelse mellem resultater fra frostprøvning med rent vand og frostbestandigheden bestemt ud fra kritisk vandmætningsgrad, $S_{f,KR}$, og vandmætningsgrad ved frivillig vandopsugning, $S_{f,vac,kap}$. I begge tilfælde karakteriseres beton 0.30 med stor sikkerhed som frostbestandig, mens det ikke er tilfældet for beton 0.45 og 0.70, jf. tabel 6.15.

Tabel 6.15. Frostbestandighed (F) i følge Fagerlund [1972b] og mængden af afskallet materiale efter 56 døgn frostprøvning med rent vand i følge [SS 13 72 44]. Beton. Middelværdier.

	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
F	0,32	0,05 (0,12)	0,01
Afsk. mat. [kg/m ²]	0,022	0,49	4,3

$F \approx S_{f,KR} - S_{f,vac,kap}(t)$. t angiver, at $S_{f,vac,kap}$ er en funktion af tiden, jf. afsnit 2.3.5.

Fordelen ved at benytte $S_{f,KR}$ til at vurdere frostbestandigheden er: 1) at et egentligt tal for frostbestandigheden, $F = S_{f,KR} - S_{f,vac,kap}(t)$, opnås, 2) at tidsafhængigheden kommer ind, 3) at der skelnes mellem materiale- og miljøbetingede faktorer. Til gengæld kræver det et stort antal forsøg at bestemme $S_{f,KR}$ præcist, jf. afsnit 2.4. Benyttes en frostprøvning som [SS 13 72 44] til at vurdere frostbestandigheden, kræver det, at der opstilles krav til, hvor store skader der kan accepteres. Disse krav skal så kunne kobles til praktiske forhold.

Det er endnu ikke eftervist eksperimentelt, om kritisk vandmætningsgrad kan benyttes til at forklare, hvorfor en NaCl-koncentration på ca. 3 % giver de største skader, jf. afsnit 2.4.1. Der er derfor ikke bestemt kritiske vandmætningsgrader i saltholdigt miljø, og en sammenligning mellem frostprøvning og vandmætningsgrader i sådanne tilfælde er således ikke mulig.

6.6.2 Frostmodstandstal og frostbestandighed

I afsnit 2.1.3 og bilag B3 [de Place,96b], er omtalt, hvordan frostbestandigheden kan udtrykkes vha. såkaldte frostmodstandstal som alternativ til en direkte frostprøvning. Konkrete eksempler på sådanne beregninger vises i tabel 6.16 - 6.20.

Tabel 6.16 viser tydeligt, at frostbestandigheden udtrykt som *Scale Code* er stærkt afhængig af vand/cementforholdet i overensstemmelse med frostprøvningen, jf. tabel 6.15. Det fremgår desuden, at rangordningen af betonerne ikke vil ændres uanset værdien af parameteren VR .

Af tabel 6.17 ses, at den kritiske vandmætningsgrad i følge Fagerlund [1973a] er ret ens for de tre betonere, mens den aftager svagt med stigende vand/cementforhold i følge Vesikari [1985]. Beregningerne med Fagerlund's udtryk er forbundet med en vis usikkerhed, da hydratiseringsgraden må skønnes.

Tabel 6.16. Scale code (SC) i følge Whiting & Schmitt [1989]. Beton.

Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
0,07 + 0,37 VR	1,42 + 0,37 VR	3,65 + 0,37 VR

Scale Code (SC) = $-4,187 + 7,183 \bar{L} + 8,939 w/c + 0,372 VR$, hvor \bar{L} er Powers' afstandsfaktor [mm], w/c er vand/cementforholdet [kg/kg] og VR er en parameter, der angiver, i hvor høj grad luftporer er fjernet fra overfladelaget under efterbehandling. VR kan antage værdier fra 1 til 5. \bar{L} er for nemheds skyld sat til 0,22 mm for alle betoner (frostbestandig beton jf. [Basisbetonbeskrivelsen,87]), uanset at ingen af de undersøgte betoner er luftindblandede.

Tabel 6.17. Kritisk vandmætningsgrad (S_{KR}) i følge Fagerlund [1973a], kritisk vandmætningsgrad (S_{KR}) og frostbestandighed (F) i følge Vesikari [1985], samt eksperimentelt bestemt kritisk vandmætningsgrad. Beton.

	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
S_{KR} (Fagerlund)	0,896	0,901	0,907
S_{KR} (Vesikari)	0,923	0,915	0,896
F (Vesikari)	0,049	0,053	0,068
$S_{f,KR}$ forsøg	0,93	0,83 (0,90)	0,89

Fagerlund:

$S_{KR} = f(\text{vand/cementforhold, hydratiseringsgrad, mængden af ikke-frysbar vand i forhold til mængden af ikke-fordampeligt vand, cementindholdet [kg/m}^3\text{], luftindholdet ved blanding [m}^3\text{/m}^3\text{] jf. afsnit 2.3.6. Cement- og luftindholdet findes i betonrecepten, afsnit 4.4. Hydratiseringsgraden er skønnet til 0,3, 0,5 og 0,8. Mængden af ikke-frysbar vand findes i afsnit 6.3.}$

Vesikari:

$S_{KR} = -0,0889 w/c - 0,253 a/w + 0,979$, $F = 0,0846 w/c + 0,405 a/w - 0,0239$
 w/c er vand/cementforhold [kg/kg], a/w er luft/vandforhold [m³/m³], der hentes fra betonrecepten, afsnit 4.4.

I begge tilfælde fås værdier der ligner de eksperimentelt bestemte, dog er værdierne for beton 0.45 i overkanten sammenlignet med en eksperimentelt bestemt værdi på 0,83. Fagerlund's udtryk giver en lidt for lav værdi for beton 0.30.

Frostbestandigheden vil i følge Vesikari øges svagt med stigende vand/cementforhold, i stærk modstrid med de øvrige resultater. Til det skal blot bemærkes, at Vesikari's udtryk for F er udviklet til luftindblandede betoner. Kun for beton 0.45 er der overensstemmelse med resultaterne i tabel 6.15 mht. størrelsen af F.

Tabel 6.18 viser, at frostbestandigheden af tegl udtrykt vha. porøsitet og mængden af porer større end en vis grænse, rangordner teglene, således at større porøsitet giver større frostbestandighed, uanset, om en porediameter $d = 3 \mu\text{m}$ eller $d = 10 \mu\text{m}$ benyttes som grænse.

Frostbestandigheden udtrykt som differensen mellem kritisk vandmætningsgrad og vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning (Fagerlund) er derimod næsten ens for de fire tegl. Se også figur 6.45.

6.6 Frostprøvning

Tabel 6.18. Frostbestandighed (F) i følge Maage [1980,84] og Fagerlund [1972b]. Tegl.

	Tegl 0	Tegl A	Tegl B	Tegl C
Porevolumen [cm ³ /g]	0,267	0,348	0,417	0,559
Frostbestandighed				
$d = 3 \mu\text{m}$	130	159	165	174
$d = 10 \mu\text{m}$	59	86	95	102
F (Fagerlund)	0,13	0,13	0,11	0,11

Maage:

$F = 3,2/PV + 2,4 Pd$, hvor PV er porevolumen [cm³/g] og Pd er andel af porer med diameter større end $d \mu\text{m}$ [% af PV]. Krav: Frostbestandig tegl: $F > 70$, ikke frostbestandig: $F < 55$, baseret på $d = 3 \mu\text{m}$.

Fagerlund:

$F = S_{KR} - S_{vac,kap}$. For S_{KR} benyttes gennemsnit af værdier fra tabel 6.2 og 6.4.

Uoverensstemmelsen kan være et udtryk for, at Maage's udtryk, der er tilpasset resultater for en række værkfremstillede sten, ikke uden videre kan overføres til de laboratoriefremstillede sten, tegl A, B og C.

Frostbestandighed udtrykt som Frost security factor i følge Studer, jf. tabel 6.19, svarer til resultater af frostprøvning og kapillarsugning. Det følger bl.a. af koblingen til Fagerlund's udtryk for frostbestandighed, (2.7) eller tabel 6.18.

Der ses en tydelig rangordning af betonerne og kun lille forskel mellem teglene. Beton 0.30 samt alle tegl regnes frostbestandige.

Tabel 6.19. Frost security factor (FS) i følge Studer [1984,92] og Vesikari [1985].

Materiale	FS (Studer)	FS (Vesikari)
Beton 0.30	1,95	1,26
Beton 0.45	1,38	1,30
Beton 0.70	1,17	1,41
Tegl 0	1,79	-
Tegl A	1,71	-
Tegl B	1,63	-
Tegl C	1,61	-

FS (Studer):

$FS \approx (1 - S_{vac,kap}) / (1 - S_{KR})$, hvor $S_{vac,kap}$ er vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning regnet i forhold til vacuumvandmætning, og S_{KR} er den kritiske vandmætningsgrad. $S_{KR} = 0,94 - 0,37 a/P_d + 0,003/P_d$, hvor a er luftindhold [m³/m³] og P_d er porøsitet [m³/m³]. a fås af betonrecepten.

Krav til frostbestandig beton: $FS > 1,5$.

FS (Vesikari):

$FS = 0,553 w/c + 2,052 a/w + 0,855$, hvor w/c er vand/cementforhold [kg/kg] og a/w er luft/vandforhold [m³/m³].

Derimod rangordnes betonerne modsat, når Vesikari's udtryk benyttes, svarende til resultaterne i tabel 6.17. Af betoner kan kun beton 0.30 regnes som frostbestandig i følge Studer, svarende til resultaterne af frostprøvningen. Samtlige tegl kan regnes frostbestandige.

En tilsvarende rangordning fås, når frostbestandigheden udtrykkes vha. Vuorinen's porebeskyttelsesfaktor, jf. tabel 6.20. Forskellen mellem teglserier er dog mere udpræget end i tabel 6.19.

Tabel 6.20. Porebeskyttelsesfaktor (p_r) og effektiv porebeskyttelsesfaktor (p_f) i følge Vuorinen [1970,85] samt porebeskyttelsesfaktor i følge Vesikari [1985].

Materiale	p_r	p_f	p_r (Vesikari)
Beton 0.30	0,162	0,390	0,162
Beton 0.45	0,093	0,218	0,164
Beton 0.70	0,079	0,110	0,176
Tegl 0	0,283	-	-
Tegl A	0,253	-	-
Tegl B	0,223	-	-
Tegl C	0,217	-	-

Vuorinen:

$p_r \approx 1 - S_{vac,kap}$, $p_f \approx 1 - S_{f,vac,kap}$, hvor $S_{vac,kap}$ og $S_{f,vac,kap}$ er vandmætningsgrad ved frivillig vandopsugning regnet i forhold til vacuumvandmætning, henholdsvis uden og med hensyntagen til mængden af ikke-frysbar vand. Krav til frostbestandig beton: $p_r > 0,20$ à $0,25$, $p_f > 0,30$ à $0,35$.

Vesikari:

$p_r = 0,081 w/c + 0,523 a/w + 0,077$, hvor w/c er vand/cementforhold [kg/kg] og a/w er luft/vandforhold [m³/m³].

6.6.3 Frostprøvning - sammenfatning

Frostprøvningen resulterer i en tydelig rangordning af betonerne; dog kan kun beton 0.30 frostprøvet med rent vand klassificeres som "meget god". Isoleringen af prøvemnerne har ikke fungeret tilfredsstillende, hvilket har ført til større forskelle mellem gode og dårlige betoner mht. mængden af afskallet materiale, end der reelt er. Dette har dog ikke været afgørende for klassificeringen af de dårlige betoner mht. frostbestandighed.

Der er god overensstemmelse mellem resultater af frostprøvning og frostbestandighed udtrykt som $F = S_{KR} - S_{vac,kap}$.

Generelt er der overensstemmelse mellem frostbestandighed, bestemt vha. direkte frostprøvning eller som $F = S_{KR} - S_{vac,kap}$, og frostbestandighed udtrykt vha. frostmodstandstal. Det gælder både hvad angår den enkelte materialeserie og rangordningen serierne imellem.

Overensstemmelsen forudsætter, at der benyttes udtryk for frostmodstandstal, der er relevante for de undersøgte materialer. Således er udtryk for luftindblandede betoner ikke egnet i denne sammenhæng. Desuden synes et empirisk bestemt udtryk for værkfremstillede tegl ikke uden videre at kunne anvendes på de laboratoriefremstillede tegl.

6.7 Naturlig eksponering

Siden oktober 1992 har et antal betonfliser været udsat for naturlig eksponering. En række data til beskrivelse af denne eksponering er løbende indsamlet, jf. afsnit 4.3.3. Et væsentligt formål med dataindsamlingen var at skaffe oplysninger om virkelige fugtpåvirkninger til brug for beregninger med MATCH-programmet. Da det pga. utilstrækkelige materialedata ikke var muligt at foretage de ønskede beregninger, jf. afsnit 6.5.2, har det heller ikke været muligt at koble resultater fra den naturlige eksponering sammen med laboratorieundersøgelser.

Resultaterne fra den naturlige eksponering rapporteres derfor selvstændigt i [de Place,96c]. I stedet for en kobling med laboratorieforsøg, sker der en sammenligning af de indsamlede data fra den naturlige eksponering, for at undersøge, i hvor høj grad der er overensstemmelse mellem de forskellige måder at karakterisere den naturlige eksponering på. I det følgende gives en kort sammenfatning af resultaterne.

To års eksponering giver som ventet ikke nogen synlig nedbrydning af fliserne eller ændring af overfladens udseende. Der er heller ikke sket nogen afgørende ændring mht. lydastigheden bestemt vha. ultralyd i løbet af eksponeringsperioden.

Der er ikke foretaget undersøgelser af eksponerede fliser, fx bestemmelse af frostbestandighed, kapillarsugning, etc. Sådanne undersøgelser vil i øvrigt først være relevante flere år efter afslutningen af dette projekt.

En sammenligning af resultater fra vådtidsmåling med de indsamlede vejrdata viser, at der er en rimelig sammenhæng mellem tykkelsen af vandfilmen på målecellen - udtrykt ved styrken af den strøm, der løber gennem målecellen - samt en kombination af niveauet for relativ fugtighed (RF), temperatur og mængden af solskin.

Derimod er der ikke umiddelbart nogen sammenhæng mellem nedbørsmængden og strømstyrken gennem målecellen. På en kurve, der viser strømstyrken gennem målecellen som funktion af tiden, kan antallet af strømstyrke"peaks" og højden på disse peaks dog sige noget om nedbørsmængden.

Måling af fugtindhold vha. trædyvler i naturlig eksponeret beton viser sig være behæftet med problemer. Uanset årstiden og vejret registreres meget høje fugtniveauer, svarende til at træet skulle være i kontakt med frit vand, hvilket underbygges ved frilægning af en dyvel. Den umiddelbare forklaring er, at de huller i fliserne, hvori dyvlerne er anbragt, ikke er tilstrækkelig godt forseglet.

Dyvler anbragt i referenceemner viser resultater i overensstemmelse med, at der sker en gradvis, men langsom udtørring af betonen. Resultaterne viser dermed, at det er muligt at lave en fugttæt stopning af hullet, hvori dyvlen anbringes.

6.8 Analyse og diskussion af beregningsmodel

6.8.1 Indledning

For at kunne analysere den opstillede beregningsmodel til bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader er foretaget en række beregninger på basis af resultater præsenteret i afsnit 6.1 - 6.4. Kritisk vandmætningsgrad defineres i denne sammenhæng som den største vandmætningsgrad, hvor materialet stadig har sin oprindelige trækstyrke, jf. afsnit 3.4. Alternativt kan relativt E-modul benyttes som parameter, som i afsnit 6.2.

Der sker ingen direkte kobling til naturligt eksponerede emner, da der ikke er foretaget beregninger af fugttransport, jf. afsnit 6.5.2.

I litteraturen kan findes omtale af eksperimentelle bestemmelser af kritiske vandmætningsgrader, jf. afsnit 2.3. Der er ikke foretaget beregninger på disse, da der ikke foreligger tilstrækkeligt med data, ikke mindst hvad porestrukturen angår.

Beregningsalgoritmer

Tre versioner af beregningsalgoritmen er undersøgt, jf. tabel 6.21.

Tabel 6.21. Beregningsalgoritmer. Princip.

Algoritme	Princip
<i>Dilation</i>	Vandmætningsgrad $\beta_{f, tot} = \beta_w - z(d)$. Temperaturen varieres. Porefyldningsgrad, β_w , fastholdes. En gennemregning svarer til ét dilatationsforsøg.
<i>Dilation - revideret</i>	Vandmætningsgrad $\beta_{wf} = (\beta_w - z(d))/(1 - z(d))$. I øvrigt som <i>Dilation</i> .
<i>Crit Sat</i>	Vandmætningsgrad β_{wf} . Temperatur fastholdes. Porefyldningsgrad varieres. En gennemregning svarer til, at et stort antal prøver med forskellige vandmætningsgrader studeres før og efter frysning til en bestemt temperatur.

$z(d)$ er den relative mængde af ikke-frysbart vand, jf. afsnit 3.2.6. β_w er porefyldningsgraden, dvs. den totale vandmængde regnet i forhold til det totale porevolumen.

Dilation er den oprindelige beregningsalgoritme, som den præsenteres i afsnit 3.4. *Dilation* benytter $\beta_{f, tot}$ som udtryk for vandmætningsgraden af frysbart vand, hvilket viser sig at være uegnet ved fastlæggelse af parameteren B for beton, jf. figur 3.23, afsnit 3.5. Det skyldes, at beton indeholder en stor mængde ikke-frysbart vand ved en temperatur på -20°C , svarende til minimumtemperaturen i dilatationsforsøgene, afsnit 6.1 og 6.3.1.

For at afhjælpe dette indføres algoritmen *Dilation - revideret*, hvor vandmætningsgraden udtrykkes i overensstemmelse med Fagerlunds definition (S_f), jf. afsnit 2.3.2.

Algoritmen *Crit Sat* er indført for at kunne foretage beregninger med en vilkårlig vandmætningsgrad ved én bestemt temperatur.

Selve forløbet af beregningerne er fuldstændig ens i de tre algoritmer; det er udelukkende den styrende parameter, der er forskellig, jf. afsnit 3.5.5.

Endelig er det i forbindelse med *Crit Sat* undersøgt, hvilke konsekvenser det har for den kritiske vandmætningsgrad at operere med to forskellige definitioner på vandmætningsgraden, henholdsvis ved beregning af materialets E-modul, E^* , og parameteren B , jf. diskussionen i afsnit 3.5.

Algoritmerne *Dilation - revideret* og *Crit Sat* er indført på et forholdsvis sent tidspunkt i projektet og er derfor ikke undersøgt i samme omfang som *Dilation*. Analysen har primært bestået i at ændre porefyldningsgraden β_w (*Dilation - revideret*) eller parameteren B (*Crit Sat*). Ligeledes er der kun udført enkelte beregninger med *Crit Sat*, hvor to forskellige definitioner af vandmætningsgraden benyttes.

De fleste beregninger med *Dilation* er foretaget med $\beta_w = 1$, svarende til et dilatationsforsøg med et fuldstændig vandmættet prøveemne. I en sådan situation skal materialet selvfølgelig fryse i stykker ved normalt forekommende temperaturer, hvilket resultaterne i afsnit 6.1 viser. Ved at benytte $\beta_w = 1$ er det lettere at undersøge, hvilken relativ betydning de forskellige parametre har for resultatet af beregningerne for såvel beton som tegl.

For tegl er der ikke forskel på at benytte *Dilation* og *Dilation - revideret*, jf. at tegl stort set ikke indeholder ikke-frysbart vand.

Kritisk vandmætningsgrad og beregningsalgoritmer

I forbindelse med diskussionen af algoritmen *Dilation* angives kritiske vandmætningsgrader vha. " ". Det skyldes, at den kritiske vandmætningsgrad ikke uden videre kan sammenlignes med definitionen i afsnit 2.3 fordi *Dilation* benytter *temperaturen* og ikke *vandmætningsgraden* som variabel. I princippet er det derfor udelukkende et spørgsmål om at fortsætte beregningerne til en tilstrækkelig lav temperatur, før frysning af vand fører til revneudvidelser og styrketab, jf. diskussionen i afsnit 3.4.2 og 3.5.5. Kun hvis den pågældende temperatur opnås i praksis, opstår der skader med det givne (fastholdte) vandindhold. Problematikken illustreres i afsnit 6.8.6.

En anden grund til at benytte " " hænger sammen med fastlæggelsen af parameteren B , der bygger på sammenhørende værdier af vandmætningsgrad, β , og ikke-lineær volumentøjning, ϵ_{kk}^* , jf. (3.17). Sammenhængen mellem β og ϵ_{kk}^* kan etableres på to måder, 1) ud fra ét dilatationsforsøg, hvor forløbet vil afhænge af den aktuelle porefyldningsgrad, β_w (*Dilation*, *Dilation - revideret*), 2) ud fra en række dilatationsforsøg, hvor forløbet vil afhænge af, hvilken temperatur der betragtes (*Crit Sat*). Sidstnævnte er den gængse måde - se fx figur 2.11 - og benyttes i dette projekt; temperaturen er -20°C (beton) henholdsvis -10°C (tegl).

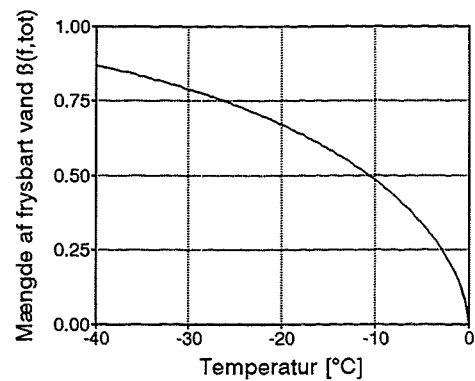
De to måder at fastlægge B kan ikke umiddelbart sammenlignes. Analysen af *Dilation* vil derfor fokusere på *kvalitative* sammenhænge og i

mindre grad hæfte sig ved de absolutte værdier, der opnås for den kritiske vandmætningsgrad.

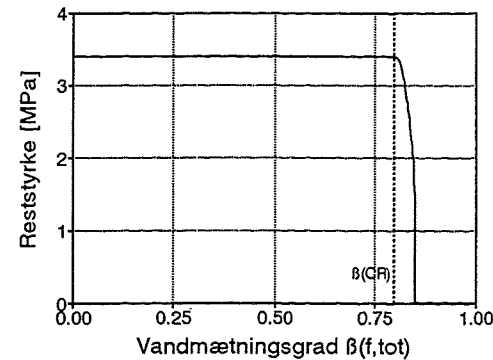
Præsentation af analyse

Uanset hvilken algoritme der benyttes, genereres en række figurer til brug for analysen. Eksempler er vist som figur 6.48 - 6.51, svarende til figurer i afsnit 3.4.2. Benyttes algoritmen *Crit Sat* er figur 6.48 og 6.50 ikke relevante, da beregningen foregår ved en fastholdt temperatur.

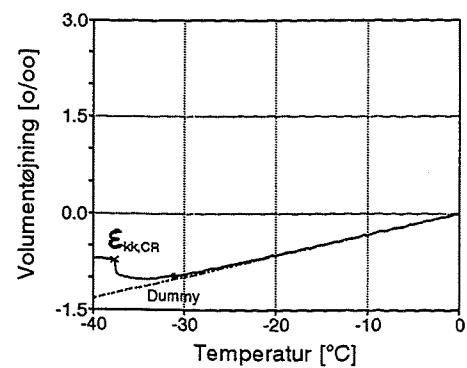
Forløbet af kurven i figur 6.48 er kun afhængig af porestørrelsesfordelingen og η , mens forløbet af de øvrige kurver er afhængige af samtlige parametre i beregningsmodellen. $\epsilon_{kk,CR}$ markeret ved "x" i figur 6.50 og 6.51 angiver volumenuddvidelsen på det tidspunkt, hvor materialet har mistet al trækstyrke og stivhed. Indeks *kk* angiver, at der er tale om volumentøjninger, jf. symbollisten. "+" angiver det tidspunkt, hvor begyndende revneudvidelse fører til, at trækstyrke og stivhed så småt aftager, dvs. svarende til β_{CR} i figur 6.49. Se i øvrigt afsnit 3.4.2.



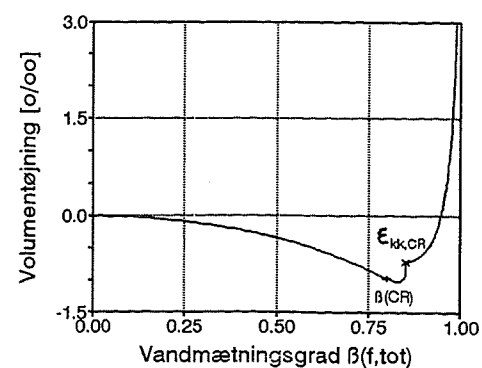
Figur 6.48. Mængden af frysbart vand i forhold til det totale porevolumen som funktion af temperaturen. Algoritme *Dilation*.



Figur 6.49. Trækstyrke som funktion af vandmætningsgrad. β_{CR} er kritisk vandmætningsgrad.



Figur 6.50. Volumentøjning som funktion af temperatur. *Dummy* angiver materialets lineære, temperaturbestemte tøjning.



Figur 6.51. Volumentøjning som funktion af vandmætningsgrad.

Analyse af beregningsmodellen - anvendte værdier

Formålet med analysen er: 1) at bestemme værdier for den kritiske vandmætningsgrad, som skal sammenholdes med de eksperimentelt bestemte

værdier, 2) at undersøge, hvor følsom modellen er over for ændringer af parametrenes værdier, for derved at vurdere, a) hvor præcist de skal bestemmes, b) om de forskellige parametres betydning svarer til, hvad der kan forventes i praksis. Analysen er som nævnt primært foretaget med algoritmen *Dilation*.

For hver enkelt beton- og teglserie er basisværdier for de forskellige parametre fastlagt ud fra forsøgsresultaterne. Ud fra disse basisværdier foretages beregninger, hvor værdien af én eller flere af parametrene ændres. En oversigt gives i tabel 6.22.

Tabel 6.22. Oversigt. Analyse med algoritme *Dilation*.

Parameter	Bemærkninger
porestørrelsesfordeling (d_p, d_M, z_M og ϕ)	værdier fastholdes *
porøsitet (c)	}
trækstyrke (f_t)	} værdier fastholdes
E-modul for faststof (E_s)	} forskellige kombinationer testes.
kritisk porøsitet (c_d)	} Kombinationerne er afpasset eksperi-
formfaktor (μ_0)	} mentelt bestemte værdier for mate-
	} rialets E-modul (E') og porøsitet (c).
B	varieres
fordeling af is i pore-systemet (A)	varieres
E-modul for is (E_I)	}
udvidelseskoefficienter ($\Delta\alpha_{s,T}, \Delta\alpha_{p,T}, \Gamma_p$)	} fastholdes
	# }
$fract\ fr$	\$ = 1 svarende til at alt vand der kan fryse ved en given temperatur er frosset.
β_w	□ = 1 svarende til fuldstændig mætning.
η	^ = 1,5 svarende til at vand i porer med radius mindre 10 nm ikke fryser før temperaturen kommer ned på -20°C.

*: For beton 0.30 anvendt to sæt af værdier, jf. afsnit 6.3, figur 6.15.
 #: $\Delta\alpha_{s,T}$ er bestemt eksperimentelt til $3,3 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (beton) og $2,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (tegl). For $\Delta\alpha_{p,T}, \Gamma_p$ og E_I benyttes $15 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 0,09 og 10 GPa. $\Delta\alpha$ angiver volumetriske udvidelseskoefficienter.
 \$: Værdien 1 benyttes, idet dilatationsforsøg, hvor temperaturen -20°C blev fastholdt i længere tid, ikke gav anledning til yderligere længdeændringer.
 □: Ved analyse af *Dilation - revideret*, hvor vandmætningsgraden af frysbart vand udtrykkes ved β_w i stedet for $\beta_{f,tot}$, er benyttet værdier af β_w ned til 0,75 (beton) og 0,65 (tegl), jf. tabel F26 [de Place, 96b].

^: For beton er $\eta = 0,5$ benyttet i begrænset omfang. $\eta = 0,5$ svarer til at vand i porer mindre end 4 nm ikke fryser før temperaturen kommer ned på -20°C . Se i øvrigt afsnit 6.8.6.

Parameteren B 's betydning undersøges særlig grundigt, da det er en central parameter for modellen. Samtidig viser afsnit 6.1, at B må bestemmes med en vis usikkerhed. Ud over værdier for B , der kan relateres til forsøgsresultaterne, er der derfor foretaget beregninger med særlig store og små værdier af B , jf. bilag F6, [de Place,96b].

Ved analysen benyttes med få undtagelser udelukkende værdier for B baseret på, at vandmætningsgraden udtrykkes vha. β_{wf} , uanset hvilken algoritme, der analyseres. Det skyldes, at det for beton ikke giver mening at benytte $\beta_{f, tot}$, jf. figur 3.23, afsnit 3.5 og figur 6.58 - 6.60, afsnit 6.8.3.

Analysen af *Dilation*, der benytter $\beta_{f, tot}$ som udtryk for vandmætningsgraden, vil derfor som nævnt fokusere på kvalitative sammenhænge. Forskellen på $\beta_{f, tot}$ og β_{wf} illustreres i figur 3.20.

Beregningsmodellen testes med forskellige værdier af formfaktorerne μ_0 og A , den kritiske porøsitet c_d , faststoffets E-modul E_s samt parameteren η . η kobler pore størrelse og frysepunktstemperatur. At netop disse parametre har interesse skyldes, at de ikke bestemmes direkte ved forsøg, men bygger på antagede sammenhænge mellem eksperimentelt bestemte størrelser eller på kvalitative vurderinger ud fra fotos mv.

Hver gang en parameter tillægges en anden værdi, er værdien af B samtidig ændret for at bevare koblingen til forsøgsresultaterne. En ændring af værdien for η vil desuden betyde, at vandmætningsgraden af frysbart vand skal ændres, jf. definitionen på η , afsnit 3.2.6.

Et stort antal beregninger er foretaget. Af disse er de vigtigste kombinationer af parameterværdier med tilhørende resultater tabelleret i bilag F6 for hver enkelt forsøgsserie.

6.8.2 Kritisk vandmætningsgrad

Sammenligninger af beregnede og eksperimentelt bestemte værdier for den kritiske vandmætningsgrad bygger på beregninger med algoritmen *Crit Sat*, jf. tabel 6.21. Hvor intet andet er angivet benyttes basisværdier for parametre, jf. tabel F20 og F23, [de Place,96b].

For såvel beton som tegl vil fastlæggelsen af kritisk vandmætningsgrad, S_{KR} , baseret på dilatationsforsøg afhænge af, hvilket kriterium, der anvendes, jf. figur 6.1-6.7. Der tages derfor hensyn til resultaterne af resonansfrekvensmålingerne, der giver en mere entydig fastlæggelse af S_{KR} , jf. afsnit 6.2.

Beton

Beregningerne resulterer i kritiske vandmætningsgrader der er lavere end de eksperimentelt bestemte, jf. tabel 6.23. Beregningerne viser desuden, at værdien af B har stor betydning for størrelsen af den kritiske vandmætningsgrad for beton 0.45. For beton 0.30 og beton 0.70 er afhængigheden mindre udpræget.

Erstattes β_{wf} af $\beta_{f, tot}$ ved bestemmelse af materialets E-modul, E^* , bliver der bedre overensstemmelse mellem eksperimentelt bestemte og beregnede værdier, angivet ved *. Det er ret interessant, idet $\beta_{f, tot}$ bør

6.8 Analyse og diskussion af beregningsmodel

foretrækkes fremfor β_{wf} ved beregning af E^* , mens $\beta_{f, tot}$ ikke er egnet ved fastlæggelse af B , jf. afsnit 3.5.

Tabel 6.23. Kritisk vandmætningsgrad, beton. Beregnede og eksperimentelt bestemte værdier. Algoritme *Crit Sat*.

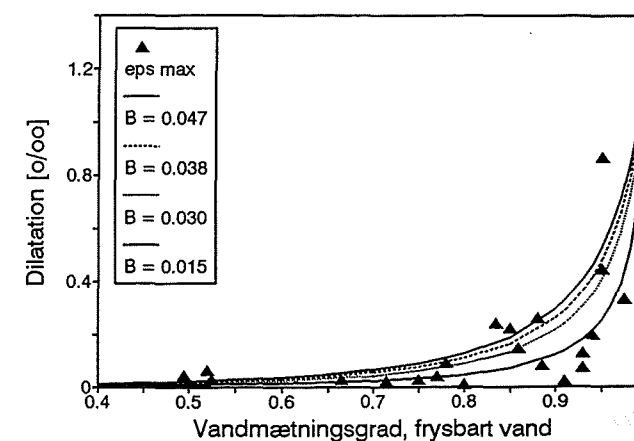
	B	$S_{f, KR}$ <i>Crit Sat</i>	$S_{f, KR}$ *	$S_{f, KR}$ forsøg
Beton 0.30	0,015	0,79	0,88	0,93
	0,009	0,85	0,92	
Beton 0.45	0,047	0,58	0,71	0,83 (0,90)
	0,038	0,615	0,74	
	0,03	0,65	0,78	
	0,015	0,765	0,86	
Beton 0.70	0,016	0,73	0,78	0,89
	0,013	0,77	0,81	

Beregninger er foretaget ved temperaturen -20°C , der er den temperatur, hvor den maksimale dilatation opnås, jf. figur F1-F3, [de Place,96b].

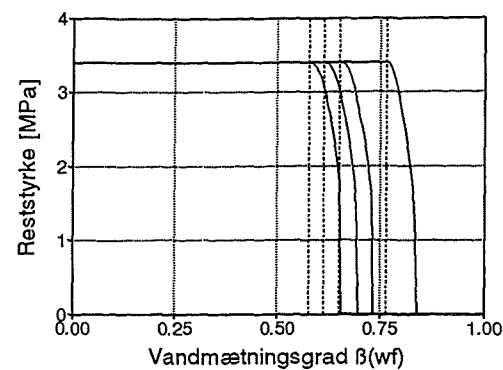
*: Beregninger foretaget med *Crit Sat*, hvor $\beta_{f, tot}$ benyttes ved beregning af materialets E-modul, E^* , og β_{wf} ved beregning af parameteren B .

Ændringen har mindst betydning for beton 0.70, formentlig pga. at denne har et lavere indhold af ikke-frysbart vand, jf. afsnit 6.3.1.

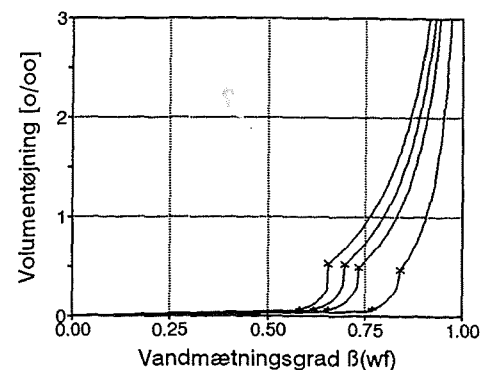
For alle betoner angives resultatet for de to værdier af B , der er benyttet i figur 6.1 - 6.3. For beton 0.45 angives resultatet for yderligere to værdier af B , da spredningen på resultatet af dilatationsforsøgene er forholdsvis stor, jf. figur 6.2.



Figur 6.52. Maksimal dilatation (ikke-lineær længdeændring) som funktion af vandmætningsgrad af frysbart vand ved -20°C . Beton 0.45. $B = 0,047$ og $B = 0,038$ (øverste kurver) er beregnet som middelværdier ud fra forsøgsresultater (*eps max*). $B = 0,047$ opnås, hvis forsøgsresultater med en vandmætningsgrad på 1 ikke medregnes. $B = 0,03$ og $B = 0,015$ er valgt som alternative repræsentanter for forsøgsresultaterne.



Figur 6.53. Trækstyrke som funktion af vandmætningsgrad (β_{wf}) og B . Beton 0.45. Algoritme Crit Sat. $\theta = -20^\circ\text{C}$. Regnet fra venstre mod højre: $B = 0,047$, $B = 0,038$, $B = 0,03$, $B = 0,015$, jf. tabel 6.23.



Figur 6.54. Volumetøjning som funktion af vandmætningsgrad (β_{wf}) og B . Beton 0.45. Volumetøjningen er renset for lineære temperaturbevægelser. "x" angiver brudtøjningen, $\epsilon_{kk,CR}$. Fra venstre mod højre: $B = 0,047$, $B = 0,038$, $B = 0,03$, $B = 0,015$.

Tre af de fire værdier af B benyttet for beton 0.45 kan med rimelighed siges at repræsentere forsøgsresultaterne, jf. figur 6.52. $B = 0,038$ og $0,047$ fører til en kritisk vandmætningsgrad langt under den eksperimentelt bestemte. Sammenhængen er langt bedre med $B = 0,015$, der dog synes at være for lav til at kunne repræsentere forsøgsresultaterne som helhed.

Overgangen fra oprindelig styrke til den situation, hvor der ingen styrke er tilbage, er uafhængig af værdien af B , jf. figur 6.53, der viser resultatet af beregninger på beton 0.45, svarende til de kritiske vandmætningsgrader mærket Crit Sat i tabel 6.23.

Figur 6.53 viser, at betonen i følge beregningerne ikke mister styrken øjeblikkeligt - den har en vis sejhed. Uanset om den kritiske vandmætningsgrad fastlægges ud fra den største vandmætningsgrad, hvor materialet har sin oprindelige styrke, som angivet i figur 6.53, eller om et styrketab på fx 10% accepteres, vil den beregnede værdi blive stort set den samme. Den kritiske vandmætningsgrad vil højst øges med 0,03 à 0,04 og vil fortsat være lavere end den eksperimentelt bestemte. Tilsvarende betragtninger kan gøres for kritiske vandmætningsgrader mærket * i tabel 6.23.

Tegl

Der gælder for de undersøgte tegl som for beton, at beregnede kritiske vandmætningsgrader er lavere end eksperimentelt bestemte, jf. tabel 6.24. I modsætning til beton viser det sig at være uden betydning for den kritiske vandmætningsgrad at erstatte β_{wf} med $\beta_{f,tot}$ ved beregning af E-modulet, E^* . Det stemmer overens med, at stort set al vand i tegl er frysbart.

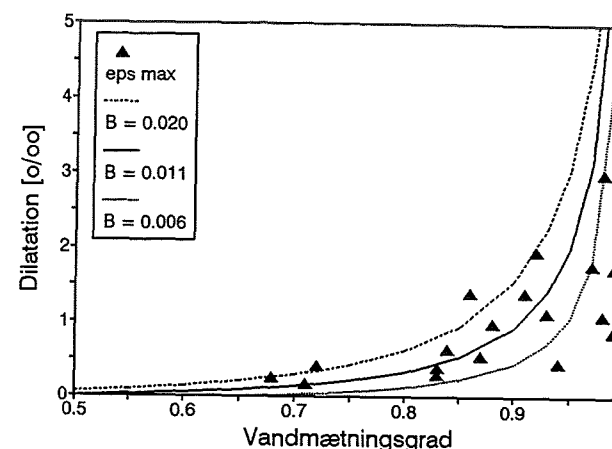
Der er forholdsvis stor spredning på resultatet af dilatationsforsøgene for tegl, jf. figur 6.4 - 6.7. For tegl B angives derfor beregnede kritiske vandmætningsgrader for tre værdier af B , svarende til basisværdien, samt en ekstra høj og ekstra lav værdi af B . De beregnede værdier er tydeligt afhængige af værdien af B , jf. tabel 6.24 og figur 6.55. For de øvrige tegl henvises til tabel F24 - F25, [de Place,96b].

6.8 Analyse og diskussion af beregningsmodel

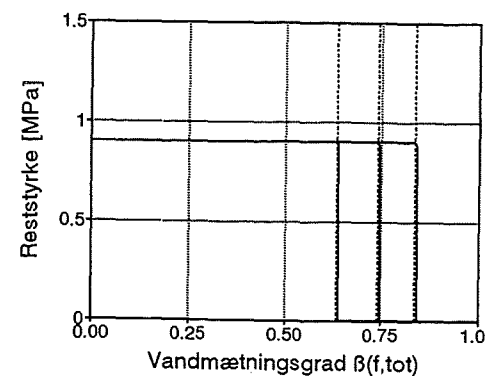
Tabel 6.24. Kritisk vandmætningsgrad, tegl. Beregnede og eksperimentelt bestemte værdier, algoritme Crit Sat.

	B	S_{KR} Crit Sat	S_{KR} forsøg Dilatation	Resonans
Tegl 0	0,013	0,76	0,85	-
Tegl A	0,017	0,69	0,85	0,91
Tegl B	0,011	0,74	0,87	0,91
	0,006	0,84		
	0,02	0,64		
Tegl C	0,009	0,77	0,88	0,89

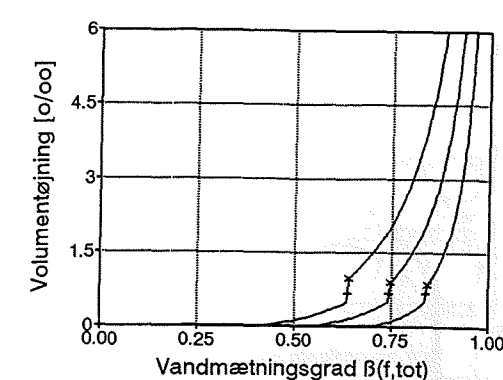
Beregning ved temperaturen -10°C , hvor maksimal dilatation opnås, jf [Ejsing,93].



Figur 6.55. Maksimal dilatation (ikke-lineær længdeændring) som funktion af vandmætningsgrad. Tegl B. $\theta = -10^\circ\text{C}$. $B = 0,011$ (fed kurve) er en middelværdi beregnet ud fra forsøgsresultater ($\epsilon_{ps\ max}$). $B = 0,006$ og $B = 0,02$ (øverst) er valgt, så de tre værdier tilsammen repræsenterer forsøgsdata.



Figur 6.56. Trækstyrke som funktion af vandmætningsgrad og B . Tegl B. Algoritme Crit Sat. $\theta = -10^\circ\text{C}$. Fra venstre mod højre: $B = 0,006$, $B = 0,011$, $B = 0,02$, jf. tabel 6.24.



Figur 6.57. Volumetøjning som funktion af vandmætningsgrad og B . Tegl B. $\theta = -10^\circ\text{C}$. "x" angiver brudtøjningen, $\epsilon_{kk,CR}$. Volumetøjningen er renset for lineære temperaturbevægelser. Regnet oppefra: $B = 0,02$, $B = 0,011$, $B = 0,006$.

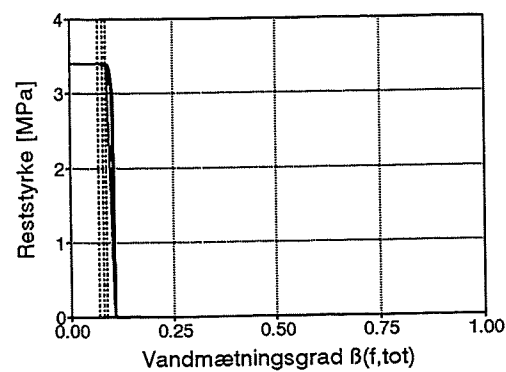
De beregnede værdier for den kritiske vandmætningsgrad ligger ligesom de eksperimentelt bestemte værdier tæt på hinanden. Den beregnede værdi er lavest for tegl A, der samtidig har den største værdi af B .

Sammenholdt med beton er overgangen fra uskadt til skadet materiale meget brat, uanset værdien af B , jf. figur 6.53 og figur 6.56. Forløbet påvirkes ikke ved at ændre andre parametre.

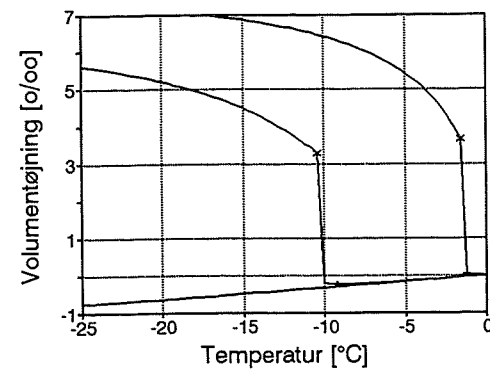
Der er flere grunde til denne forskel på resultater for tegl og beton: 1) forholdet mellem porøsitet, c , og kritisk porøsitet, c_d , er langt højere for tegl end for beton, hvorved revneudvidelser er mere kritiske, 2) tegl har et meget større porevolumen og kan dermed rumme væsentlig mere vand, 3) frysning af vand i tegls poresystem sker med en relativ lille frysepunktssænkning.

6.8.3 Afhængighed af parameteren B

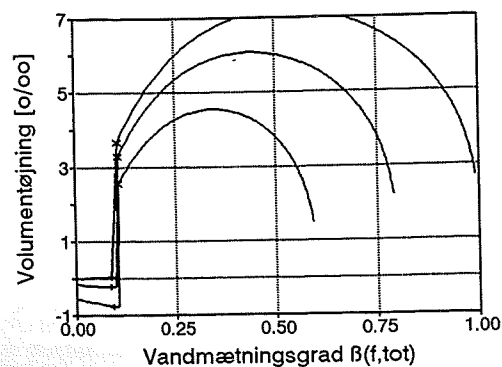
Parameteren B er indført for at tage hensyn til, at ujævnheder og indsnævring i poresystemet har betydning for spændingsopbygningen i materialet i forbindelse med frysning. I den oprindelige beregningsalgoritme (*Dilation*) benyttes $\beta_{f,tot}$ som udtryk for vandmætningsgraden af frysbar vand, jf. tabel 6.21.



Figur 6.58. Trækstyrke som funktion af vandmætningsgrad ($\beta_{f,tot}$). Beton 0.45. Algoritme *Dilation*. $B = -1,25$, jf. figur 3.23. Fra venstre mod højre: $\beta_w = 1$ og " $S_{f,KR}$ " = 0,075, $\beta_w = 0,8$ og " $S_{f,KR}$ " = 0,085, $\beta_w = 0,6$ og " $S_{f,KR}$ " = 0,095.



Figur 6.59. Volumetøjning som funktion af temperatur. Beton 0.45. $B = -1,25$. Volumetøjningen er ikke rensset for lineære temperaturbevægelser. Oppefra og ned: $\beta_w = 1$, $\beta_w = 0,8$, $\beta_w = 0,6$.



Figur 6.60. Volumetøjning som funktion af vandmætningsgrad. Beton 0.45. $B = -1,25$. Oppefra og ned: $\beta_w = 1$, $\beta_w = 0,8$, $\beta_w = 0,6$.

Afsnit 3.5.3 viser, at B i så fald ikke er særlig egnet til at beskrive sammenhængen mellem vandmætningsgrad og volumetøjning for beton. En B -værdi på $-1,25$ blev bestemt. I figur 6.58 - 6.60 vises resultater af beregninger med denne værdi.

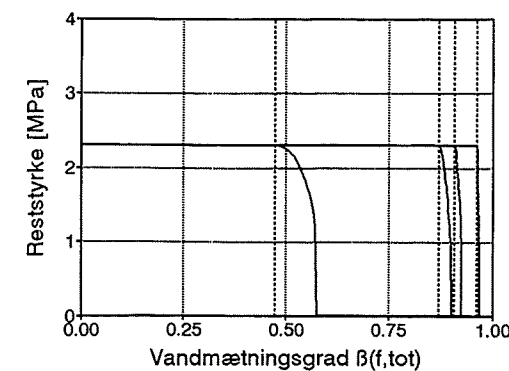
Beregning er foretaget for tre situationer, hvor porevolumenet er 100 %, 80% og 60 % fyldt med vand, dvs. $\beta_w = 1$, $\beta_w = 0,8$ og $\beta_w = 0,6$. $\beta_w = 0,6$ og $0,8$ svarer til $\beta_{wf} = 0,03$ og $0,51$ ved en temperatur på -20°C for beton 0.45. Ikke desto mindre er forløbet af reststyrken som funktion af mængden af frysbar vand næsten uafhængig af værdien af β_w . Selv med $\beta_w = 0,6$ skal kun en brøkdel af vandet fryse, før en kritisk situation opnås.

Den temperatur, hvor materialet begynder at ekspandere, er helt som ventet afhængig af β_w , men ikke i overensstemmelse med dilatationsforsøgene. Med $\beta_w = 0,6$ sker frostskafer ved -25°C , mens et fuldstændig vandmættet prøveemne i følge beregningerne allerede fryser i stykker ved en temperatur på -1°C , jf. figur 6.59. Ved dilatationsforsøgene registreres ikke afvigelser fra et lineært forløb før temperaturen er -5°C , jf. bilag F1, [de Place,96b].

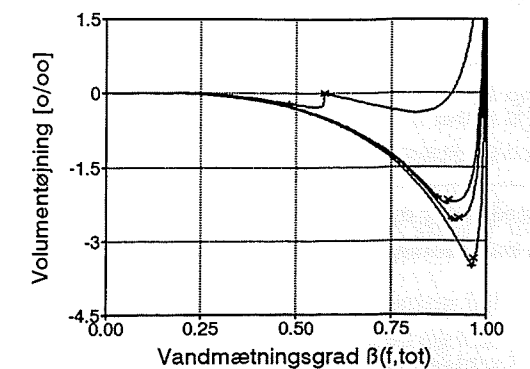
Figur 6.60 viser et højst interessant forløb af volumetøjningen som funktion af vandmætningsgraden. På et tidspunkt begynder tøjningen at aftage, uanset at det punkt er passeret, hvor materialet har mistet sin sammenhæng og styrke, markeret ved "x". Dette forløb er formentlig et resultat af, at $B < 0$.

I afsnit 6.8.2 er det vist, at den kritiske vandmætningsgrad beregnet vha. algoritmen *Crit Sat* er afhængig af B . Denne afhængighed ses også ved beregninger med den oprindelige algoritme *Dilation*, uanset, at B ikke kan siges at repræsentere data, når vandmætningsgrad udtrykkes som $\beta_{f,tot}$.

I figur 6.61 og 6.62 illustreres betydningen af B for den kritiske vandmætningsgrad, " $S_{f,KR}$ ", og volumetøjningen for beton 0.70, når algoritmen *Dilation* benyttes. $B = 0,048$ svarer til at medregne samtlige forsøgsdata, jf. figur F4, [de Place,96b]. $B = 0,016$ og $0,013$ er hentet fra figur 6.3. B opfylder sin funktion i beregningsmodellen, jf. afsnit 3.2, i og med at " $S_{f,KR}$ " aftager, når B øges.



Figur 6.61. Trækstyrke som funktion af vandmætningsgrad og B . Beton 0.70. Algoritme *Dilation*. $\beta_w = 1$. Fra venstre mod højre: $B = 0,048$, $B = 0,016$, $B = 0,013$, $B = 0,007$. Fra venstre mod højre fås følgende værdier for " $S_{f,KR}$ ": 0,485, 0,87, 0,91, 0,96.



Figur 6.62. Volumetøjning som funktion af vandmætningsgrad og B . Beton 0.70. Tøjningen er ikke rensset for lineære temperaturbevægelser. Regnet oppefra: $B = 0,048$, $B = 0,016$, $B = 0,013$, $B = 0,007$.

I modsætning til figur 6.53 viser figur 6.61 og 6.62, at forløbet for vandmætningsgrader større end den kritiske *ikke* er uafhængig af *B*.

Forklaringen er formentlig følgende: Algoritmen *Dilation* benytter temperaturen som variabel, mens *Crit Sat* benytter porefyldningsgraden, β_w , jf. tabel 6.21. En høj værdi af *B* betyder generelt et mere "blødt" forløb af sammenhængen mellem vandmætningsgrad og volumetøjning, se fx figur 6.52 og figur 6.55. For beregninger med algoritmen *Dilation* vil en lavere værdi af *B* derfor bevirke, at frysning af vand i poresystemet fører til revneudvidelser og styrketab ved en lavere temperatur, og at skader, når de først opstår, udvikles desto hurtigere.

For beton 0.30 og 0.45 gør tilsvarende sammenhænge sig gældende. For tegl er forløbet af reststyrken for vandmætningsgrader større end den kritiske derimod uafhængig af, hvilken algoritme der benyttes. Her spiller det ind, at det for tegl ikke er nødvendigt at skelne mellem β_{vf} og $\beta_{f, tot}$, da tegl stort set ikke indeholder ikke-frysbart vand.

6.8.4 Afhængighed af porestruktur i øvrigt

Afhængighed af formfaktor *A*

Ved at mindske værdien af formfaktoren *A*, aftager den kritiske vandmætningsgrad for beton, mens den øges for tegl ved beregning med algoritmen *Dilation*, jf. tabel 6.25.

Tabel 6.25. Kritisk vandmætningsgrad som funktion af parametrene *A* og *B*. Beregnet med algoritme *Dilation*.

Parameter	<i>A</i>	<i>B</i>	" $S_{f, KR}$ "
Beton 0.30	0,35	0,015	0,935
	0,1	0,023	0,90
Beton 0.45	0,35	0,038	0,76
	0,1	0,099	0,585
	0,8	0,031	0,815
Tegl 0	0,35	0,013	0,695
	0,1	0,02	0,71
Tegl B	0,35	0,011	0,63
	0,1	0,014	0,655
	0,8	0,011	0,61

Værdier for øvrige parametre fremgår af bilag F6, der også angiver resultater for de andre forsøgsserier. *B* ændres aht. koblingen til forsøgsresultater, jf. afsnit 6.8.1.

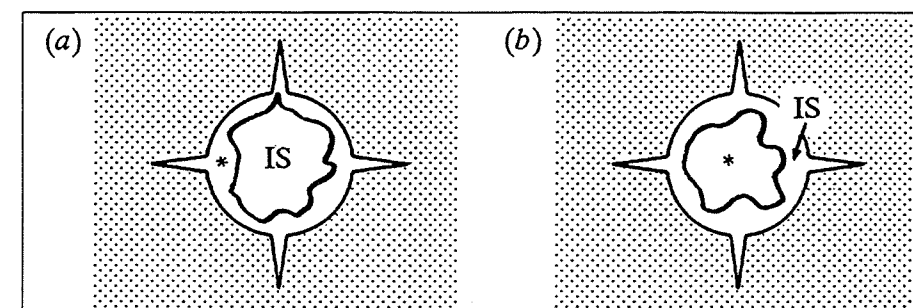
Forklaringen er formentlig, at en ændring af *A* fra 0,35 til 0,1 har større konsekvenser for tegls *E*-modul, E^* , end for betons, jf. tabel 6.26. En mindskning af *A* resulterer i en tegl, hvor det poretryk, der skyldes isdannelsen i mindre grad omsættes til spændinger i teglen, og dermed fører til færre revneudvidelser.

Af resultaterne for beton 0.45 ses, at det har langt større betydning at ændre *A* fra 0,35 til 0,1 end fra 0,35 til 0,8, jf. tabel 6.25. Dette er ikke uden betydning, idet det netop er lave værdier af *A*, der er interessante for beton. En høj værdi af *A* svarer nemlig til, at ikke-frosset vand + luft samles i meget kugleformede områder. Isen vil af samme grund danne et spinkelt skelet snarere end en samlet klump, jf. figur 6.63, hvilket ikke beskriver situationen særlig godt.

Tabel 6.26. *E*-modul som funktion af formfaktoren *A*. Beton 0.45 og tegl *A*. Eksempler.

	Beton 0.45		Tegl <i>A</i>	
<i>c</i>	0,11	-	0,5	-
c_d	0,7	-	0,75	-
μ_0	0,3	-	0,5	-
<i>A</i>	0,1	0,35	0,1	0,35
$\beta_{f, tot}$	0,4	-	0,9	-
E^*/E_s	0,65	0,68	0,39	0,48

Værdier for porøsitet *c*, den kritiske porøsitet c_d , formfaktoren μ_0 og faststoffets *E*-modul E_s er hentet fra bilag F6, [de Place, 96b]. E^*/E_s fås af (3.21), afsnit 3.2.5. For beton 0.45 regnes med en porefyldningsgrad (β_w) på 1 og en frysepunkts-temperatur på -18°C , hvilket giver $\beta_{f, tot} = 0,4$ med den fundne porestørrelsesfordeling.



Figur 6.63. Fordeling af is i revnepore ved lav (a) og høj (b) værdi af *A*. Principskitse. * betegner den del af revneporen, der indeholder ikke-frosset vand samt luft.

Hvis isen danner et spinkelt skelet i stedet for en klump, vil isens tryk på porevæggene ikke være særlig effektivt. Resultatet vil være lavere spændinger i faststoffet.

For tegl har en ændring af *A* fra 0,35 til 0,8 ligeledes relativ lille betydning.

En ændring af *A* fra 0,35 til 0,1 har størst betydning for beton 0.45 og mindst for beton 0.30, hvilket formentlig skyldes, at beton 0.45 og 0.30 har den mindste henholdsvis den største kritiske vandmætningsgrad af de tre betoner, både eksperimentelt og teoretisk bestemt, jf. tabel 6.23. Samtidig ses den afledte ændring af *B* at være langt større for beton 0.45 end for beton 0.30 og 0.70.

Afhængighed af formfaktor μ_0 , kritisk porøsitet c_d og E-modul E_s

Den kritiske vandmætningsgrad for beton bestemt vha. algoritme *Dilation* er ikke særlig følsom overfor selv store ændringer af den kritiske porøsitet, c_d , jf. tabel 6.27, hvilket umiddelbart kan virke overraskende. Faktisk øges den kritiske vandmætningsgrad, når c_d mindskes. Forklaringen er, at formfaktoren μ_0 samtidig øges fra 0,3 til 0,5 for at sikre, at beregningerne kan relateres til forsøgsresultaterne.

En højere værdi af μ_0 svarer til mere kugleformede porer. At gøre værdien af μ_0 højere har altså større betydning end at gøre c_d mindre, selv om ændringen af c_d er størst. Ændringen har størst betydning for beton 0.70. μ_0 's betydning ses også af, at $S_{f,KR}$ ikke ændres nævneværdigt ved at ændre E_s og c_d , når μ_0 samtidig fastholdes.

Tabel 6.27. Kritisk vandmætningsgrad. Afhængighed af kritisk porøsitet (c_d), formfaktor (μ_0) og faststoffets E-modul (E_s). Algoritme *Dilation*.

Parameter	c_d	μ_0	E_s [GPa]	B	" $S_{f,KR}$ "
Beton 0.45	0,7	0,3	65	0,038	0,76
	0,22	0,5	65	0,0355	0,78
Beton 0.70	0,7	0,3	55	0,016	0,87
	0,9	0,3	41	0,016	0,88
	0,27	0,5	55	0,014	0,90
Tegl B	0,75	0,5	30	0,011	0,63
	0,75	0,5	25	0,011	0,64
	0,8	0,4	34	0,012	0,62
	0,75	0,9	18	0,010	0,77

B ændres aht. kobling til forsøgsresultater, jf. afsnit 6.8.1.

For tegl B har ændringer af c_d , E_s og μ_0 ret begrænset betydning, med mindre der er tale om store ændringer. I så fald ses som for beton, at mere kugleformede porer eller en mere blød matrix - lavere E_s - resulterer i en højere kritisk vandmætningsgrad. Tilsvarende sammenhænge gælder for øvrige tegl, jf. bilag F6, [de Place, 96b].

En større værdi af μ_0 fører på samme måde som en lavere værdi af B - figur 6.61 - til en mere brat overgang fra fuld styrke til ingen styrke for beton, jf. bilag F6. Det er i øvrigt også tilfældet, når algoritmen *Crit Sat* benyttes, jf. tabel F27. For tegl er overgangen generelt meget brat og påvirkes ikke af ændrede værdier for porestrukturen.

Afhængighed af porestørrelsesfordelingen

For beton 0.30 er foretaget beregninger med to forskellige porestørrelsesfordelinger, jf. tabel 6.22. Benyttes basisfordelingen - angivet som fed optrukket kurve i figur 6.15, afsnit 6.3 - fås " $S_{f,KR}$ " = 0,937, mens den alternative fordeling giver " $S_{f,KR}$ " = 0,893, jf. tabel F21. Det svarer til, at den alternative porestørrelsesfordeling rummer en større andel af grove porer, dvs. at mere vand er frysbart ved en given temperatur.

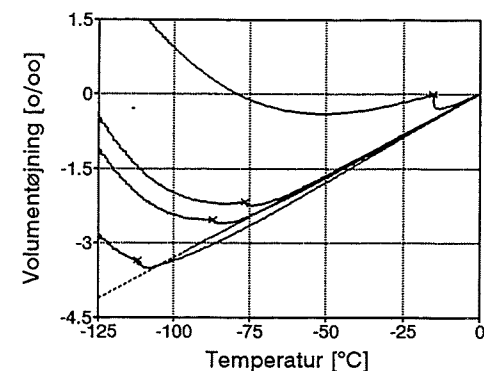
6.8.5 Beregnede og eksperimentelt bestemte tøjninger

Hvor store volumenændringer opererer beregningsmodellen med og stemmer de overens med de eksperimentelt bestemte bevægelser?

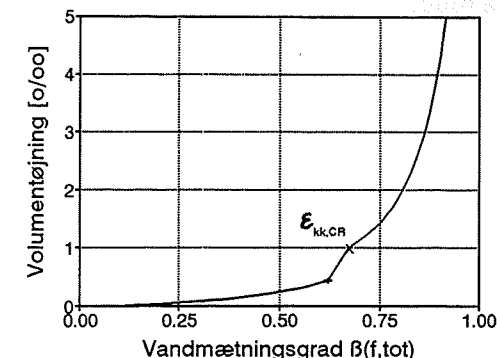
Der er på dette punkt ingen forskel på at anvende *Dilation* eller *Crit Sat*. For såvel tegl som beton er der god overensstemmelse mellem den beregnede brudtøjning $\epsilon_{kk,CR}$ (volumentøjning) og den eksperimentelt bestemte trækbrudtøjning ϵ_{tu} (længdetøjning).

Figur 6.64, hvor det er afvigelsen fra den punkterede linie der er interessant, og figur 6.54 viser, at $\epsilon_{kk,CR}$ - angivet ved "x" - er i størrelsesordenen 0,35 à 0,5 ‰ for beton. $\epsilon_{kk,CR}$ svarer til, at materialet har mistet al styrke og stivhed. Indeks kk angiver, at der er tale om volumentøjninger, jf. symbollisten. Trækbrudtøjningen, ϵ_{tu} , kan sammenlignes med $\epsilon_{kk,CR}$ og er bestemt til ca. 0,12 ‰, jf. afsnit 6.4, svarende til en volumentøjning på 0,35 ‰.

Beregninger på tegl fører til, at $\epsilon_{kk,CR}$ typisk er af størrelsesordenen 1 à 1,2 ‰, se fx figur 6.57 og 6.65. Trækbrudtøjningen er bestemt til 0,4 ‰, svarende til en volumentøjning på 1,2 ‰.



Figur 6.64. Volumentøjning som funktion af temperatur og B . Beton 0.70. Algoritme *Dilation*. $\beta_w = 1$. Dilatation udtrykkes som afvigelse fra punkteret linie. Samme beregningstilfælde som figur 6.61 og 6.62. Regnet oppefra: $B = 0,048$, $B = 0,016$, $B = 0,013$, $B = 0,007$.



Figur 6.65. Volumentøjning som funktion af vandmætningsgrad. Tegl C. Algoritme *Dilation*. $\beta_w = 1$. $B = 0,009$. " S_{KR} " = 0,645.

Ved at koble $\epsilon_{kk,CR}$ sammen med trækbrudtøjningen antydes, at den kritiske vandmætningsgrad bestemt ved dilatationsforsøg skal bygge på en tøjning, der er lavere end trækbrudtøjningen, idet $\epsilon_{kk,CR}$ svarer til, at materialet har mistet al styrke og stivhed, jf. afsnit 3.4.1. I stedet skal kritisk vandmætningsgrad så kobles sammen med et begyndende styrketab, på figur 6.54 og 6.64 markeret ved "+". Se også figur 2.11.

Disse betragtninger ændrer dog ikke ved, at der er tydelig forskel på eksperimentelt bestemte og beregnede værdier for den kritiske vandmætningsgrad, når værdierne fastlagt ud fra målinger af resonansfrekvens inddrages. Til gengæld er resonansfrekvensmetoden mindre følsom end dilatationsmetoden mht. at detektere ændringer, og den kan derfor overvurdere den kritiske vandmætningsgrad. Forskellen på eksperimentelt bestemte og beregnede værdier synes dog at være for stor til udelukkende at kunne forklares ved dette.

Tøjninger for vandmætningsgrader større end den kritiske

For størrelsen af tøjninger, når den kritiske vandmætningsgrad er overskredet, er der langt bedre overensstemmelse mellem forsøgsdata og beregnet forløb for beton end for tegl. Forskellen er især tydelig for vandmætningsgrader større end 0,95, jf. figur 6.52 og 6.55.

Beregningsmodellen regner med en grænseværdi for volumetøjningen på $c \cdot \Gamma_p$, hvor c er porøsiteten og $\Gamma_p = 0,09$. For beton svarer det til ca. 10 ‰, mens det for tegl er 45 à 55 ‰. Det skal sammenlignes med længdeændringer for beton på op til 0,6 à 2 ‰, svarende til volumenændringer på 1,8 à 6 ‰, og længdeændringer for tegl på op til 1,2 à 3 ‰, svarende til volumenændringer på 3,5 à 9 ‰. Se også figur F52 - F53, [de Place, 96b].

Modellen opererer med, at materialet kan være 1) uskadt, 2) på et delvis skadet stadie, eller 3) fuldstændig skadet. I sidstnævnte tilfælde har det ikke længere nogen styrke og stivhed og faststoffasen hænger ikke længere sammen. Det betyder, at isen faktisk kan udvide sig frit, hvilket kan forklare de store tøjninger. I praksis er forholdene ikke så ideelle. En teglsten vil sjældent falde helt fra hinanden pga. frost, selv om kraftige afskalninger kan iagttages. En fri udvidelse af isen er derfor ikke mulig.

Beregningsmodellen simplificerer altså situationen, især hvad angår størrelsen af tøjningerne for vandmætningsgrader større end den kritiske. Til gengæld bør det ikke få afgørende betydning for selve størrelsen af den kritiske vandmætningsgrad.

6.8.6 Frysepunktstemperatur og porefyldningsgrad

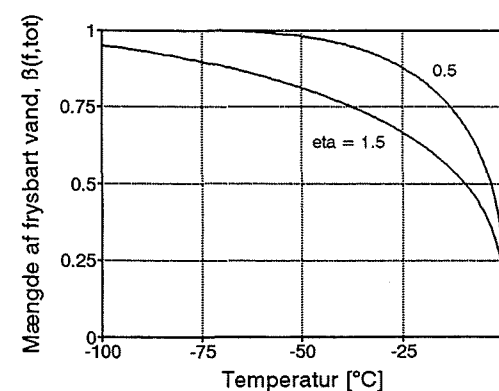
Frysepunktstemperatur og η

Til at udtrykke sammenhængen mellem porestørrelse og frysepunktstemperatur er primært benyttet $\eta = 1,5$, jf. tabel 6.22. For beton fører disse beregninger typisk til, at skader som følger af for store spændinger først sker ved temperaturer på -60°C eller lavere, når algoritmen *Dilation* benyttes, jf. figur 6.68. De udførte forsøg viser, at der sker skader ved $\theta = -20^\circ\text{C}$ eller højere, jf. afsnit 6.1. Det er ikke overraskende, at beregninger med *Dilation* fører til, at skader pga. for store spændinger først opnås ved urealistisk lave temperaturer, jf. at der benyttes B -værdier, der ikke repræsenterer forsøgsdata særlig godt, jf. afsnit 6.8.3.

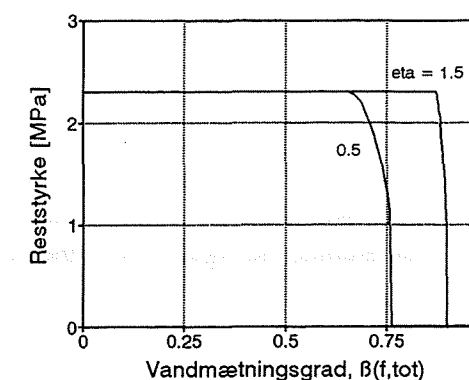
Benyttes $\eta = 0,5$ i stedet for 1,5, svarende til, at den øvre grænse for porer med frysbar vand ændres fra $r_p = 10$ nm til $r_p = 4$ nm, hvor r_p er poreradius, ses skader at opstå ved mere normale temperaturer, jf. figur 6.68.

Det kan synes som om det har en voldsom betydning for beregningerne at ændre η fra 1,5 til 0,5, jf. figur 6.66 - 6.69. I praksis er betydningen ikke så stor. Det skyldes, at B og vandmætningsgraderne skal tilpasses den aktuelle værdi af η , jf. afsnit 6.8.1, hvilket ikke er sket. Det kan dog konstateres, at beregningsmodellen korrekt giver lavere værdi for den kritiske vandmætningsgrad, når η bliver mindre, jf. at der er mere frysbar vand.

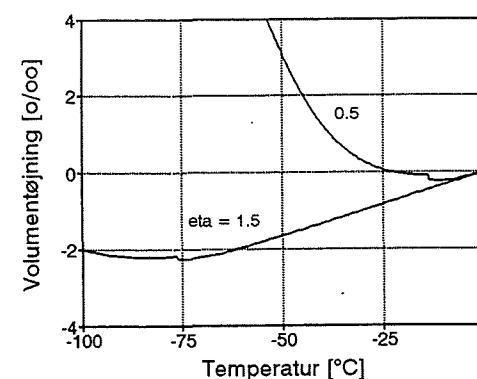
En sammenligning af figur 6.68 og 6.70 viser, at frysepunktssænkningen i følge beregningerne som ventet er langt mindre i tegl end i beton, jf. forskelle i porestørrelsesfordelingen.



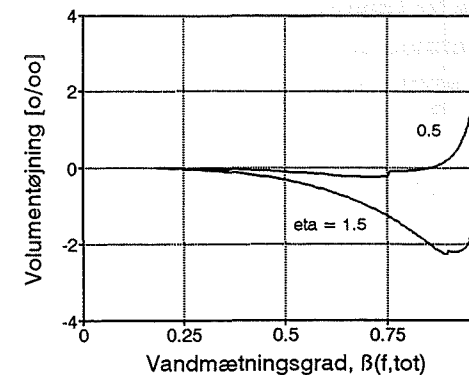
Figur 6.66. Mængden af frysbar vand som funktion af temperatur og η . Beton 0.70. Algoritme *Dilation*. $\beta_w = 1$, $B = 0,016$ (basis). $\eta = 1,5$ og $\eta = 0,5$ (øverst).



Figur 6.67. Trækstyrke som funktion af vandmætningsgrad og η . Beton 0.70. $\eta = 0,5$ (til venstre) og $\eta = 1,5$.

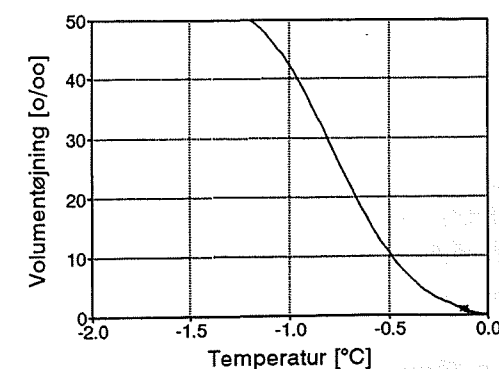


Figur 6.68. Volumetøjning som funktion af temperatur og η . Beton 0.70. $\eta = 0,5$ (øverst) og $\eta = 1,5$.



Figur 6.69. Volumetøjning som funktion af vandmætningsgrad og η . Beton 0.70. $\eta = 0,5$ (øverst) og $\eta = 1,5$.

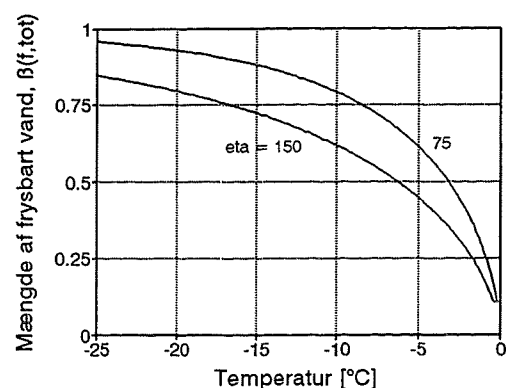
Figur 6.70. Volumetøjning som funktion af temperatur. Tegl C. Algoritme *Dilation*. $\beta_w = 1$, $B = 0,009$. $\eta = 1,5$. Samme beregningstilfælde som figur 6.65.



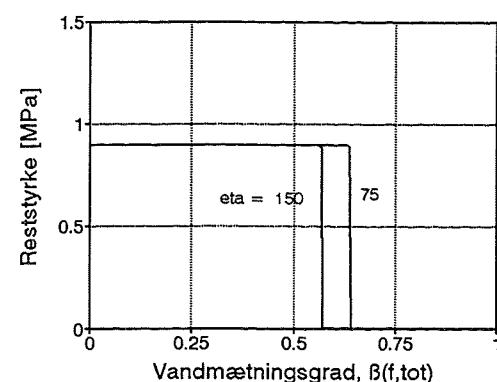
Imidlertid sker spændingsopbygningen og de afledte frostskaer i tegl i følge beregningsmodellen ved temperaturer meget tæt på 0°C . Et tilsvarende eksperimentelt bestemt forløb viser en underafkøling på 3 à 5°C , og at maksimal dilatation først nås ved temperaturer på -10 à -12°C , [Ejsing, 93].

Spændingsudviklingen forløber altså for hurtigt i følge beregningsmodellen. For at undersøge, hvor stor betydning det har for størrelsen af

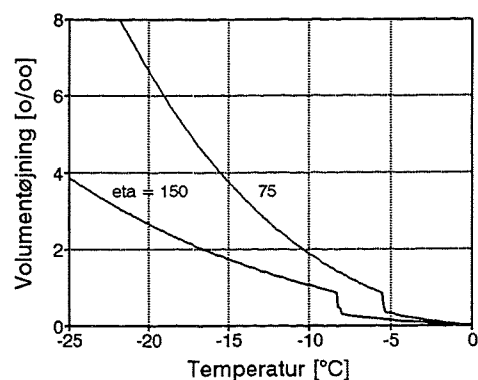
den kritiske vandmætningsgrad, er der foretaget nogle få beregninger med *Dilation* og *Crit Sat* på tegl B, hvor η ændres fra basisværdien på 1,5 til 75 eller 150, svarende til at 20% henholdsvis 40% af porevolumenet indeholder ikke-frysbart vand ved en temperatur -10°C . Det er da ikke længere ligegyldigt for beregningerne, hvordan vandmætningsgraden defineres, hvilket der er taget højde for ved fastlæggelsen af B . Resultaterne fremgår af figur 6.71 - 6.74 samt tabel F28, [de Place, 96b].



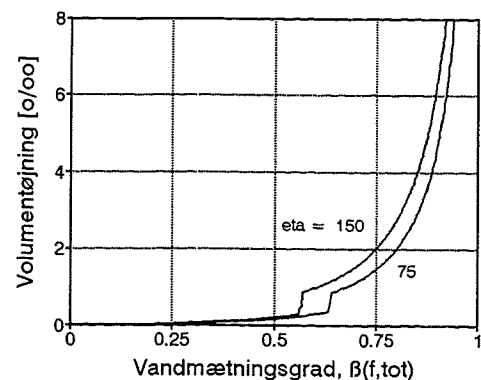
Figur 6.71. Mængden af frysbart vand som funktion af temperatur og η . Tegl B. Algoritme *Dilation*. $\beta_w = 1$. B er fastlagt ud fra $\beta = \beta_{wf}$, jf. tabel F28. $\eta = 75$ (øverst) og $\eta = 150$.



Figur 6.72. Trækstyrke som funktion af vandmætningsgrad og η . Tegl B. $\eta = 75$ (til højre) og $\eta = 150$. " S_{KR} " = 0,56 og 0,63.



Figur 6.73. Volumetøjning som funktion af temperatur og η . Tegl B. $\eta = 75$ (øverst) og $\eta = 150$.



Figur 6.74. Tegl B. Volumetøjning som funktion af vandmætningsgrad og η . Tegl B. $\eta = 75$ (til højre) og $\eta = 150$.

Beregningerne viser, at det ved brug af algoritmen *Dilation* er muligt at sænke den temperatur, hvor der sker frostskafer fra ca. $-0,1^\circ\text{C}$ (figur 6.70) til -5° à -8°C (figur 6.73), dvs. η opfylder sin funktion. Til gengæld er den kritiske vandmætningsgrad enten uændret eller lavere end den oprindelige værdi, hvilket hænger sammen med, at B samtidig er forhøjet, jf. tabel F28, [de Place, 96b]. En isoleret ændring af η fra 1,5 til 150 giver ingen ændring af $S_{f, KR}$ ved brug af algoritmen *Crit Sat*, hvilket understreger nødvendigheden af at tilpasse B til den nye værdi af η .

Ved at benytte $\eta = 75$ à 150 kan B ikke længere beskrive sammenhængen mellem volumetøjning og vandmætningsgraden, når vandmætningsgraden udtrykkes vha. $\beta_{f, \text{tot}}$ (algoritme *Dilation*). Der opstår samme problematik som beskrevet i afsnit 6.8.3. Ved at benytte $\eta = 150$ fås $B = 0,267$, der er 20 gange større end basisværdien (0,011). Da en forøgelse af B har den modsatte effekt af en forhøjelse af η mht. kritisk temperatur og vandmætningsgrad kan det forklare, hvorfor den kritiske temperatur kun ændres fra $-0,1^\circ$ til $-1,1^\circ\text{C}$, jf. tabel F28.

Porefyldningsgrad

Det er nævnt flere gange, at det for beton har stor betydning for resultatet, om $\beta_{f, \text{tot}}$ eller β_{wf} benyttes som udtryk for vandmætningsgraden af frysbart vand, dvs. om mængden af frysbart regnes i forhold til det totale porevolumen eller om porevolumenet fraregnes den del der er fyldt med ikke-frysbart vand. Den konkrete betydning illustreres med nogle eksempler i tabel F26, [de Place, 96b]. Benyttes $\beta_{f, \text{tot}}$ (algoritme *Dilation*) vil selv en fuldstændig vandmættet beton ikke fryse i stykker før temperaturen er -63°C . Benyttes i stedet β_{wf} (algoritme *Dilation - revideret*) fryser den i stykker med det samme.

Tabellen viser helt som ventet, at jo lavere porefyldningsgrad, β_w , der benyttes ved beregningerne, desto lavere temperatur - og dermed højere vandmætningsgrad - kræves før frysning fører til revneudvidelser og styrketab (*Dilation*, *Dilation - revideret*). For tegl har størrelsen af β_w forsvindende betydning, hvilket skyldes at isdannelsen sker meget pludseligt.

For algoritmen *Crit Sat* er temperaturen og ikke porefyldningsgraden den styrende parameter, jf. tabel 6.21. Parameteren B er fastlagt ud fra sammenhørende værdier af vandmætningsgrad og dilatation (ikke-lineær volumetøjning) ved -20°C (beton) henholdsvis -10°C (tegl). Det er derfor ikke reelt at udføre beregninger med algoritmen *Crit Sat* ved andre temperaturer uden at tage hensyn til dette. Sådanne beregninger er ikke foretaget.

6.8.7 Analyse og diskussion af model - sammenfatning

Forudsætninger

Den opstillede beregningsmodel er analyseret på basis af eksperimentelt bestemte sammenhørende værdier af vandmætningsgrad og maksimal dilatation (ikke-lineær længdeændring) henholdsvis relativt E-modul på emner udsat for frost-tø, samt mekaniske egenskaber, porøsitet, porestruktur og -størrelsesfordeling.

Der er indført nye beregningsalgoritmer, 1) for at tage hensyn til, at den kritiske vandmætningsgrad ($S_{f, KR}$) for beton er afhængig af, om vandmætningsgraden defineres i forhold til det totale porevolumen ($\beta_{f, \text{tot}}$) eller fraregnet den del der indeholder ikke-frysbart vand (β_{wf}), 2) for at opnå bedre overensstemmelse med den gængse måde at fastlægge S_{KR} på rent eksperimentelt, 3) for at tage hensyn til, at parameteren B ikke kan beskrive sammenhængen mellem dilatation og vandmætningsgrad, hvis sidstnævnte defineres som $\beta_{f, \text{tot}}$.

Model og forsøgsresultater

Analysen viser, at det er muligt at opnå kvalitativt korrekte værdier for $S_{f,KR}$, sammenholdt med eksperimentelt bestemte værdier, dog typisk 0,1 à 0,15 lavere. Rangordning af beton efter størrelsen af den kritiske vandmætningsgrad giver samme resultat uanset om eksperimentelle eller beregnede værdier benyttes.

Ved at benytte $\beta_{f,tot}$ som udtryk for vandmætningsgraden ved beregning af materialets E-modul, *samtidig* med at β_{wf} benyttes ved beregning af B , fås en bedre overensstemmelse med eksperimentelt bestemte værdier. En sådan skelnen er pt. aktuelt, men det kan diskuteres om det er en heldig løsning.

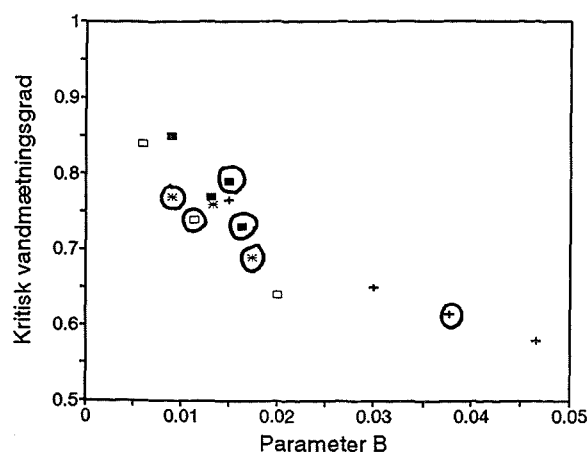
For tegl er denne problematik ikke aktuel, jf. at al vand er frysbar. Såvel eksperimentelt bestemte som beregnede værdier af den kritiske vandmætningsgrad er næsten uafhængige af porøsiteten.

Parameter B

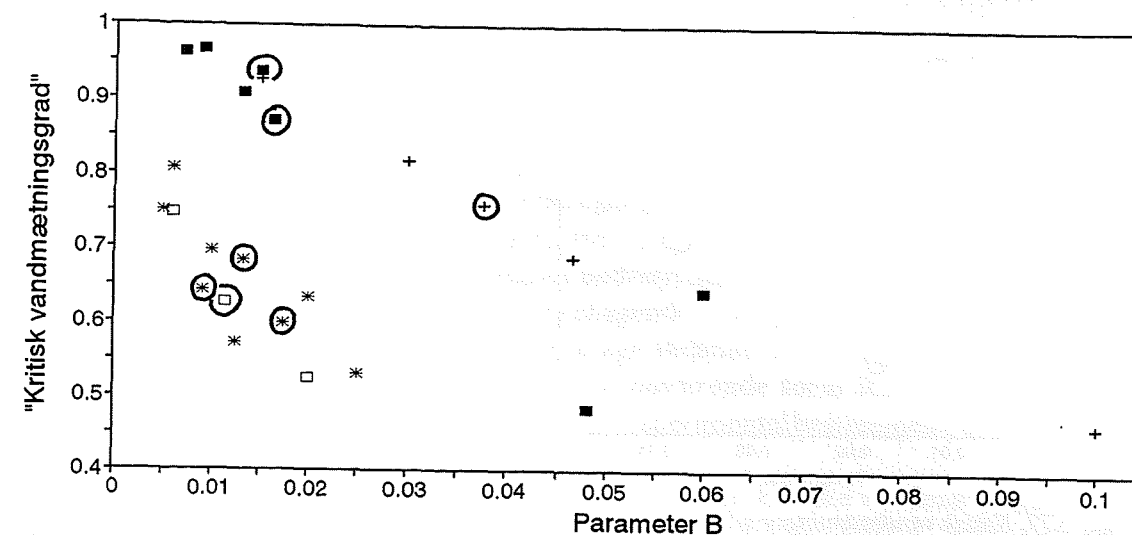
Den centrale parameter i modellen er B , der skal udtrykke i hvor høj grad udvidelsen som følge af vands frysning effektivt bidrager til spændingsopbygningen, dvs. i hvor høj grad porestrukturen indeholder indsnævninger (flaskehalse) og hvor ujævn overfladen af porevæggene er.

Uanset hvilken algoritme der benyttes, øges $S_{f,KR}$ med aftagende B , jf. figur 6.75 og 6.76, svarende til et mere "glat" poresystem. Forskellen på niveau af vandmætningsgraden i de to figurer, skyldes forskelle i de to algoritmer, jf. afsnit 6.8.1, hvilket også forklarer brugen af " ".

Den store afhængighed af B er et minus ved modellen, idet B må fastlægges med nogen usikkerhed ud fra forsøgsresultater. For at få glæde af modellen som erstatning for en eksperimentel bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader, må B derfor bestemmes på anden vis, helst direkte ud fra porestrukturen.



Figur 6.75. Kritisk vandmætningsgrad som funktion af parameteren B . Beton 0,45 (+), øvrige betoner (■), tegl B (□), øvrige tegl (*). Algoritme Crit Sat, vandmætningsgrad udtrykkes ved β_{wf} . $\theta = -20^\circ\text{C}$ (beton), -10°C (tegl). Punkter indrammet med en cirkel svarer til basisværdier for B .



Figur 6.76. "Kritisk vandmætningsgrad" som funktion af parameteren B . Beton 0,45 (+), øvrige betoner (■), tegl B (□), øvrige tegl (*). Algoritme Dilatation, vandmætningsgrad udtrykkes ved $\beta_{f,tot} \cdot \beta_w = 1$. Punkter indrammet med en cirkel svarer til basisværdier for B .

Den store spredning af punkter på figurerne er ikke udtryk for den reelle usikkerhed på bestemmelsen af B . Det skyldes at flere punkter refererer til værdier af B , der bevidst er valgt særlig store eller små, uden at skele til om de repræsenterer de undersøgte materialer, jf. afsnit 6.8.1 - 6.8.3. Det gælder således de tre punkter nederst til højre i figur 6.76.

Øvrige parametre

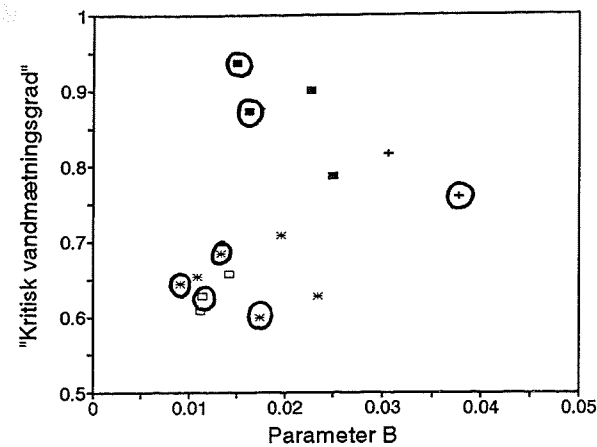
Ved analysen af øvrige parametres betydning, der er foretaget med den oprindelige algoritme, er der fokuseret på *kvalitative* sammenhænge. Det skyldes, at det har været nødvendigt at fastlægge værdier for B ud fra eksperimentelle resultater ved at benytte β_{wf} som udtryk for vandmætningsgraden, *uanset* hvordan vandmætningsgraden defineres i beregningsalgoritmen.

$S_{f,KR}$ øges som ventet hvis η øges eller porestørrelsesfordelingen forskydes i retning af flere små porer, svarende til en større andel af ikke-frysbar vand ved en given temperatur.

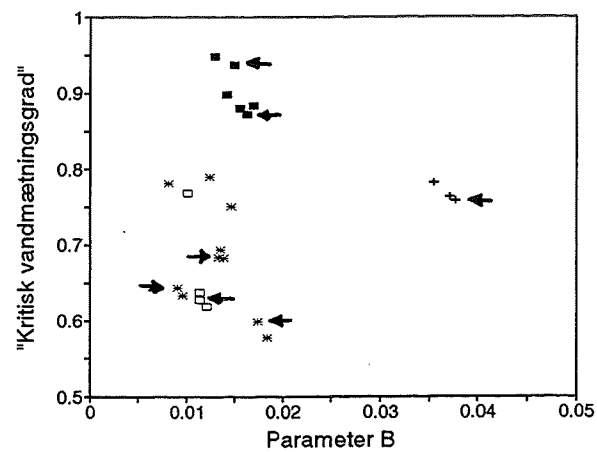
Værdien af den kritiske porøsitet, c_d , har forholdsvis begrænset betydning, mens $S_{f,KR}$ korrekt øges, når formfaktoren, μ_0 , øges eller faststoffets E-modul, E_s , mindskes, svarende til et materiale med mere kugleformede porer og/eller lavere E-modul.

En vis usikkerhed kan accepteres ved fastlæggelsen af formfaktoren A , der beskriver hvordan is er placeret i poresystemet i forhold til luft og ikke-frysbar vand, forudsat at der ikke benyttes værdier tæt på 0 eller 1. Sådanne værdier er ikke aktuelle, jf. viden om, hvordan isen forventes at befinde sig i poresystemet.

Samtidig med at fx A eller c_d ændres, bestemmes også en ny værdi for B aht. koblingen til forsøgsresultaterne. I figur 6.77 og 6.78 optegnes "kritisk vandmætningsgrad" som funktion af B , når der *samtidig* sker ændring af A henholdsvis c_d , E_s og μ_0 .



Figur 6.77. Kritisk vandmætningsgrad som funktion af B , når A ændres. Beton 0.45 (+), øvrige betoner (■), tegl B (□), øvrige tegl (*). Algoritme Dilation. $\beta_w = 1$. Punkter indrammet med en cirkel svarer til basisværdier for B .



Figur 6.78. Kritisk vandmætningsgrad som funktion af B , når c_d , μ_0 og/eller E_s ændres. Beton 0.45 (+), øvrige betoner (■), tegl B (□), øvrige tegl (*). Algoritme Dilation. $\beta_w = 1$. Punkter angivet ved pile svarer til basisværdier for B .

Sammenholdt med figur 6.76 viser der sig fortsat en klar sammenhæng mellem kritisk vandmætningsgrad og B for beton, mens sammenhængen er mere uklar for teglene set under ét. Det understreger nødvendigheden af en præcis bestemmelse af B .

Beregningsmodellen forenkler forløbet af frostnedbrydningen for vandmætningsgrader større end den kritiske, således at dilatationen bliver urealistisk stor, især for tegl. Det anses ikke at få betydning for størrelsen af den kritiske vandmætningsgrad.

Tilsvarende bliver overgangen fra oprindelig trækstyrke til nul styrke som funktion af vandmætningsgraden for brat for tegl. Samtidig viser beregninger på beton, at modellen er i stand til at tage hensyn til en vis sejhed af materialet, i overensstemmelse med beskrivelsen i afsnit 3.1.

Frysepunktssænkningen for tegl undervurderes. Dette kan kun delvis forklare, hvorfor beregnede værdier af S_{KR} er lavere end eksperimentelt

bestemte. Ved en tilstrækkelig stor forhøjelse af η er det dog muligt at opnå mere realistiske frysepunktstemperaturer.

Muligheder for beregningsmodellen

Ideen med at udvikle en beregningsmodel er med tiden at overflødiggøre det store forsøgsarbejde, som en eksperimentel bestemmelse af den kritiske vandmætningsgrad nødvendiggør.

Analysen af den foreliggende beregningsmodel viser, hvilke perspektiver der er i at foretage sådanne beregninger, selv om det må konstateres, at modellen i sin nuværende form ikke uden videre kan anvendes som erstatning for en eksperimentel bestemmelse af den kritiske vandmætningsgrad.

Først og fremmest er størrelsen af den kritiske vandmætningsgrad er meget afhængig af, hvor præcist B er bestemt. I hvor høj grad afhængigheden af B skyldes, at der er foretaget forenklinger, fx i form af det benyttede ligningssystem til spændingsberegninger (afsnit 3.2.5) eller modelleringen af frostnedbrydning (afsnit 3.1), skal undersøges nærmere.

Det er uholdbart at operere med to forskellige definitioner af vandmætningsgraden ved bestemmelse af henholdsvis B og E -modul.

Det vil være ønskeligt at der bliver en kobling mellem spændingsberegninger og fysiske forklaringer på frysning af vand i porøse materialer.

I fremtiden skal B kunne fastlægges direkte ud fra porestrukturen. Det kræver bedre metoder til kvantitativt at beskrive porestrukturen.

Det skal undersøges, hvorvidt det er rimeligt at regne med, at revnerne er fuldt virksomme ved opbygning af poretryk, hvilket har været anvendt indtil videre. Dette har betydning for koblingen mellem porestyrke, dvs. det største poretryk der kan modstås, og materialets trækstyrke, jf. (3.24), afsnit 3.2.5. Problemet er også på dette punkt, at det må skønnes hvordan de faktiske forhold er. Dog finder Setzer, at der kan være is til stede i selv ganske små porer, jf. afsnit 2.2.3 og [Setzer,77] m.fl.

I [L.F.Nielsen,89] angives, hvordan der kan tages højde for, at revnerne kun er delvist virksomme, dvs. at der ikke i fuldt omfang opstår tryk i revnerne som følge af frysningen. Ved at regne med, at revnerne kun er 50% virksomme, øges den kritiske vandmætningsgrad således med 0,06, 0,05 og 0,04 for beton 0.45, tegl B og beton 0.30, sammenlignet med værdierne angivet i tabel 6.23 og 6.24.

Modellen er udviklet til beregning på homogene, isotrope materialer uden luftindblanding eller grove revner og udsat for ren frostpåvirkning. Der må forventes visse ændringer af modellen for at kunne regne på andre tilfælde, hvilket omtales nærmere under "Videre perspektiver" i konklusionen.

7. Konklusion

Til karakterisering af porøse materialers frostbestandighed findes i dag et stort udvalg af prøvningsmetoder, der udtrykker materialets modstandsevne overfor en standardiseret påvirkning. Da sådanne prøvninger er tidskrævende og ikke altid tilstrækkelig reproducerbare, er de problematiske som redskab i forbindelse med udvikling af nye materialer og til løbende kontrol.

Fagerlund har eksperimentelt påvist eksistensen af kritiske vandmætningsgrader, S_{KR} , ved frysning af porøse materialer og påvist at vandmætningsgrader kan benyttes til at udtrykke et materiales frostbestandighed, [Fagerlund,72b].

Metoden har den fordel fremfor standardiseret frostprøvning, at der skelnes mellem frostbestandighedens afhængighed af materialets egenskaber og af omgivelsernes påvirkning. En sådan skelnen er yderst relevant for at kunne forklare og forstå, *hvorfor* porøse materialer fryser i stykker eller ej. Det kan give nyttige oplysninger i forbindelse med udvikling af nye materialer og materialesammensætninger.

Ulempen ved metoden er, at der kræves et stort antal forsøg for at kunne bestemme S_{KR} tilstrækkelig præcist. I øvrigt er det pt. ikke eftervist, om metoden kan anvendes i forbindelse med kombineret frost-tøsalt påvirkning, [Fagerlund,92a].

Alternativet til en eksperimentel bestemmelse af S_{KR} er at opstille en beregningsmodel. Med en operationel og velfunderet model til rådighed vil det være betydelig mere enkelt at designe sit materiale til en given situation.

Problemet ved at opstille en beregningsmodel er, at forholdene omkring frysning af vand i porøse materialer ikke er fuldt klarlagt. Der eksisterer således flere forskellige forklaringer på, hvad der sker rent fysisk, og en nærmere matematisk beskrivelse af disse mangler. Det betyder samtidigt, at beskrivelsen af koblingen mellem porestruktur og frostbestandighed kompliceres.

Beregningsmodel og forudsætninger

For på nuværende tidspunkt at kunne opstille en model, må der foretages en række forenklinger for at kunne beregne spændingsudviklingen og for at kunne beskrive porestrukturen kvantitativt.

Frostnedbrydning af (delvist) vandmættede porøse materialer modeleres som værende en direkte følge af, at porefasen og faststoffasen ikke kan bevæge sig frit i forhold til hinanden under frysning. Dette fører til spændingskoncentrationer og revneudvidelse.

Litteraturstudier viser, at andre modeller, der på flere punkter er mere simple, benytter samme forenkledte udgangspunkt. I følge de gængse fysiske forklaringer er frostnedbrydning ganske vist afledt af isdannelsen, men ikke en *direkte* følge af denne. Sellevold et al [1993] afviser, at egentøjningsforskelle mellem pasta og tilslag har afgørende betydning for frostnedbrydning af højstyrkebeton ved frostprøvning efter [ASTM C666].

Konklusion

Bemærk at Sellevold ser på tilslag kontra pasta og ikke porer kontra faststof, som i det foreliggende projekt.

Til spændingsberegninger benyttes et ligningssystem baseret på lineær elasticitetsteori. Fordelen ved et sådant system er, at der kan regnes på det, og at det er et forholdsvis enkelt basissystem, der kan udvides, når det nødvendige grundlag er til stede. Ulempen er, at der ikke umiddelbart sker nogen kobling til frysemekanismer. Det må dog nævnes, at modellen opererer med en parameter, der gør det muligt at tage hensyn til, at isdannelse kan være langsommelig, jf. mikroskopisk islinsevækst, afsnit 2.2.2.

Porestrukturen beskrives 1) vha. en formfaktor, der angiver i hvor høj grad poresystemet indeholder revner, hvilket har betydning for styrken, 2) vha. en parameter, der skal udtrykke, i hvilket omfang poresystemet indeholder indsnævring (flaskehalse) samt hvor ujævn porernes overflade er. Dette har betydning for, hvor stor modstand der er i poresystemet overfor materialetransport, og dermed hvor effektivt tøjningsforskelle mellem pore- og faststoffase overføres som spændinger.

Der mangler pt. metoder til at bestemme parametrene direkte ud fra porestrukturen, omend der kan gøres visse kvalitative betragtninger. I stedet fastlægges parametrene ud fra forventede sammenhænge mellem E-modul, poreform og porøsitet henholdsvis vandmætningsgrad og volumenudvidelse.

Ved beregning af E-modul og spændinger i materialet tages der hensyn til, at porefasen har en vis stivhed pga. dannelsen af is, ligesom porestørrelsesfordelingens betydning for mængden af frysbar vand indgår i modellen. Der tages også hensyn til, at frostnedbrydningen ikke nødvendigvis sker øjeblikkeligt, men at materialet evt. kan leve videre ved en reduceret styrke.

For ikke at gøre beregningsgangen unødigt kompliceret forudsætter modellen pt. isotrope, homogene materialer *uden* kunstig luftindblanding eller grove revner og udsat for *ren* frostpåvirkning. Desuden forudsættes en begrænset temperaturgradient, et krav der også stilles ved en eksperimentel bestemmelse af kritisk vandmætningsgrad, [Fagerlund,72b,77].

Disse krav har været udgangspunktet for valget af materialer til de forskellige undersøgelser. Det har vist sig muligt fremstille tegl og ikke-luftindblandet beton med en sådan sammensætning, at det er relevant at udtale sig om afhængighed af vand/cementforhold, porøsitet etc.

Forsøgsresultater

Måling af længdeændring under frysning af forseglede prøveemner med forskellige vandmætningsgrader viser, at en større porøsitet øger den blivende og den maksimale dilatation (ikke-lineær længdeændring) som funktion af vandmætningsgraden.

For de undersøgte tegl og beton er der generelt god overensstemmelse mellem kritisk vandmætningsgrad, S_{KR} , bestemt ud fra sådanne forsøg og ved bestemmelse af resonansfrekvens. Samtidig konstateres, at S_{KR} må fastlægges med en vis usikkerhed, jf. spredning på resultaterne.

Materialernes træk- og trykstyrke samt E-modul er som ventet stærkt afhængige af porøsiteten.

Mængden af grove porer øges med et øget vand/cementforhold (beton) henholdsvis en øget porøsitet (tegl), mens mængden af fine porer er ret uforandret. Desuden mindskes den specifikke overflade. Grove porer betyder i denne sammenhæng kapillarporer (beton) henholdsvis porer med radius større end 5 à 10 μm (tegl).

Generelt synes betonerne meget tætte og forskelle i porestruktur er vanskelige at iagttage ud fra mikroskopiundersøgelser. Der er dog en tendens til lidt flere revner med revnevidde på 1 à 2 μm med stigende vand/cementforhold. Der ses forskel på værkfremstillet og laboratoriefremstillede teglsten, idet førstnævnte er mere tæt og homogen, hvilket forklares med de mere automatiserede produktionsforhold på et teglværk.

Sammenholdes eksperimentelt bestemte kritiske vandmætningsgrader med vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning ses tydeligt, at et lavere vand/cementforhold har en gunstig indvirkning på frostbestandigheden.

Samme afhængighed opnås såvel ved standardiseret frostprøvning som vha. såkaldte frostmodstandstal, hvor frostbestandigheden udtrykkes indirekte vha. vand/cementforhold, styrke, porøsitet etc., på basis af empiriske sammenhænge. Det bemærkes at frostbestandigheden bestemt ved direkte frostprøvning forværres markant ved kombineret frost-tøsalt-påvirkning.

For de undersøgte tegl er der ingen afhængighed af porøsiteten, uanset hvordan frostbestandigheden udtrykkes. Det skyldes, at den øgede porøsitet kommer til udtryk ved en øget mængde af porer større end 5 à 10 μm , der kun vanskeligt fyldes ved frivillig vandopsugning.

Aktuelle vandmætningsgrader, beregninger af fugttransport

Vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning er et tilnærmet udtryk for praktisk forekommende vandmætningsgrader. Sidstnævnte kan bestemmes ved at foretage beregninger af fugttransport eller ved at bestemme fugtfordelinger eksperimentelt.

I det foreliggende arbejde er sådanne undersøgelser udført som et supplement til det overordnede formål; at efterprøve ovennævnte beregningsmodel til bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader. Undersøgelserne er nærmere beskrevet i "Byggematerialers frostbestandighed - supplerende undersøgelser", [de Place,96c]. Der kan konkluderes følgende:

Beregninger af fugttransport kræver et detaljeret kendskab til diffusionskoefficienter, da disse er ret afhængige af det aktuelle fugtindhold. Det gælder først og fremmest koefficienter for transport på væskeform. Et sådant kendskab foreligger ikke, men diffusionsforsøg viser på linie med frivillig vandopsugning, at betons fugttransportegenskaber som ventet er meget afhængige af vand/cementforholdet.

Eksperimentel bestemmelse af fugtfordeling i beton vha. gammastråling vanskeliggøres af betonens inhomogenitet og et lavt fugtindhold. Dog er det muligt at skelne mellem fugtindhold i vandmættet og tør beton med vand/cementforhold på 0,3.

For at kunne foretage beregninger af fugttransport kræves ud over viden om materialets fugttransportegenskaber informationer om en given påvirkning, fx opnået ved eksponeringsforsøg.

Da den aktuelle påvirkning kan være betinget af lokale forhold er det vigtigt at foretage registreringer så tæt på materialet som muligt. Det benyttede udstyr til registrering af fugt- og temperaturforhold lokalt ved materialets overflade ved udendørs eksponering har vist sig egnet til dette formål.

Med de givne eksponeringsforhold på et fritliggende fladt tag er der som ventet overensstemmelse med målinger af relativ fugtighed, når der samtidig tages hensyn til lufttemperatur og indkommende solstråling.

Forsøgene viser vanskeligheden ved at indsamle de data som er nødvendige for at kunne simulere fugttransport og derved kunne bestemme aktuelle vandmætningsgrader, opnået under virkelige forhold. Sammenlignet hermed er bestemmelsen af vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning let.

Analyse af beregningsmodel

Det overordnede mål med laboratorieforsøg er nået, nemlig at skabe grundlag for fastlæggelse af værdier for parametrene i den opstillede model. Samtidig er der foretaget en eksperimentel bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader til sammenligning med værdier bestemt vha. modellen.

I analysen er fokuseret på kvalitative sammenhænge, dvs. undersøgelser af de enkelte parametres betydning. Det skyldes at beregningsalgoritmen, som beskrevet i [L.F.Nielsen,93a], ikke uden videre kan sammenlignes med den gængse måde at bestemme kritiske vandmætningsgrader på eksperimentelt, jf. [Fagerlund,77] m.fl. Siden er algoritmen justeret så en sammenligning er mulig. Denne justerede version er af tidsmæssige grunde kun undersøgt i mindre omfang.

Model kontra forsøgsresultater

Generelt giver beregningsmodellen lavere værdier for den kritiske vandmætningsgrad end eksperimentelt bestemte, typisk 0,1 à 0,15 lavere. En sådan afvigelse er acceptabel i betragtning af de forenklinger der er foretaget ved beregningerne.

I øvrigt viser det sig, at overensstemmelsen for beton forbedres med 0,03 à 0,04, hvis en reduktion af materialets trækstyrke på 10% accepteres før en kritisk situation er nået. Et tilsvarende kriterium for ændringen af det dynamiske E-modul benyttes ved eksperimentel bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader, jf. afsnit 5.2 og [Warris,64].

For såvel tegl som beton forbedres overensstemmelsen tilsvarende, hvis der regnes med, at revnerne kun er delvist virksomme ved opbygningen af poretryk.

Det er muligt at udtrykke betydningen af indsnævring i poresystemet og ujævnhed af poreoverflader for den kritiske vandmætningsgrad matematisk vha. parameteren B . B bestemmes pt. indirekte ud fra sammenhørende værdier af vandmætningsgrad og volumenuddvidelse og med en vis usikkerhed.

Definition af vandmætningsgrad

Beregninger på beton viser, at det er nødvendigt at tage hensyn til, at en del af porevolumenet optages af ikke-frysbar vand, når sammenhængen

mellem vandmætningsgrad og volumenudvidelse skal udtrykkes. Modellen underbygger dermed Fagerlunds definition på vandmætningsgraden af frysbart vand, jf. afsnit 2.3.2.

I forbindelse med beregning af materialets E-modul under frysningsudnytter modellen en analogi mellem et porøst materiale og den frosne porefase opfattet som et porøst materiale med is som faststof. Denne analogi kræver imidlertid, at mængden af frysbart vand relateres til det totale porevolumen.

Ved at tage hensyn til dette mindskes forskellen mellem beregnet og eksperimentelt bestemt kritisk vandmætningsgrad med 0,05 à 0,1, men i længden synes det ikke holdbart at operere med to forskellige definitioner af vandmætningsgraden på én gang.

Betydning af parameter B

Analysen viser, at de kritiske vandmætningsgrader beregnet vha. modellen er følsomme overfor, hvor præcist parameteren B er bestemt. Det er et udtryk for den stærke forbindelse mellem porestruktur (udseende af porers overflade, mængden af flaskehalse) og kritisk vandmætningsgrad.

Hvorvidt betydningen af B reelt overvurderes pga. de forenklinger der gøres på andre felter, først og fremmest mht. beregning af spændinger i materialet, er ikke undersøgt nærmere.

Den nuværende måde at bestemme B på involverer *netop* det forsøg, som beregningsmodellen skulle overflødig gøre. Det aktualiserer behovet for at kunne foretage en kvantitativ bestemmelse af B direkte ud fra porestrukturen, hvis modellen skal være til nogen hjælp, ikke mindst fordi B pt. bestemmes med en vis usikkerhed. Se også afsnit 8 (Efterskrift).

Øvrige parametres betydning

Mens analysen viser, at B skal bestemmes ret præcist kan en vis usikkerhed accepteres ved bestemmelsen af de øvrige parametre, forudsat at der foreligger et fornuftigt grundlag at bestemme værdierne på. Det er ret vigtigt, da flere af parametrene må bestemmes indirekte ud fra forsøg eller viden i øvrigt. Disse parametre er listet op i tabel 7.1, hvoraf det fremgår, at parametrene opfylder deres funktion i modellen som beskrevet i afsnit 3.3.

Placering af is i poresystemet i forhold til luft og ikke-frysbart vand, udtrykt ved parameteren A , har en vis betydning, men primært hvis ekstreme værdier benyttes. Det er muligt at give kvalificerede skøn på A , som forventes at kunne anvendes generelt. Dog må en revideret definition af A forudses for at kunne anvende modellen på luftindblandede materialer, jf. "Videre perspektiver" nedenfor.

Øvrige forhold

Frysepunktssænkningen i tegl undervurderes af modellen, hvilket kun delvis kan forklare, hvorfor beregnede kritiske vandmætningsgrader er lavere end eksperimentelt bestemte.

Specielt for tegl forenkler modellen forholdene, når den kritiske vandmætningsgrad er overskredet. Der opnås for store deformationer i forhold til de målte. Tilsvarende ses typisk en forbrat overgang fra fuld styrke til nul styrke for stigende vandmætningsgrad.

Tabel 7.1. Sammenhæng mellem kritisk vandmætningsgrad og parametre i beregningsmodel.

Kritisk vandmætningsgrad mindskes med	hvilket skyldes
større værdi af B	mindre "glat" poresystem
mindre værdi af η	større mængde frysbart vand ved en given temperatur
mindre værdi af c_d	lavere kritisk porøsitet, dvs materialet er mere følsomt overfor revneudvidelse
mindre værdi af μ_0	mere revneformet poresystem
større værdi af E_s	sprødere faststof
mindre værdi af A	isen er i højere grad samlet i klumper i porerne og bidrager mere effektivt til spændingsopbygning
øget andel af store porer (ændring af parametre der beskriver porestørrelsesfordelingen matematisk)	større mængde frysbart vand ved en given temperatur

For øvrige parametre fastholdes de eksperimentelt bestemte eller tabellerede værdier, jf. tabel 6.23.

Såvel de store deformationer som forløbet af styrkereduktion kan skyldes at revners betydning for styrken udtrykkes vha. en simpel revne-model, jf. bilag A [de Place, 96b], samt at spændingsberegninger foregår vha. et ligningssystem uden kobling til frysemekanismer. Betydningen af dette er ikke undersøgt nærmere. Beregninger på beton viser samtidig, at modellen er i stand til at tage hensyn til en vis sejhed af materialet.

Videre perspektiver

På trods af uoverensstemmelser mellem beregnede og eksperimentelt bestemte kritiske vandmætningsgrader viser analysen perspektiverne ved at benytte en beregningsmodel. Modellen underbygger således Fagerlunds definition af vandmætningsgraden samt eksistensen af kritiske vandmætningsgrader.

Samtidig konstateres behovet for en kvantitativ beskrivelse af sammenhængen mellem porestruktur og vandmætningsgrad.

Hvad selve modellen angår må det undersøges hvorvidt

- der er behov for at opstille et ligningssystem til spændingsberegning, der i højere grad er koblet til frysemekanismer
- den benyttede model for revneudbredelse (Griffith) er tilstrækkelig præcis
- det er realistisk at regne med fuldt poretryk i revnerne

- E-modulet af det frosne porøse materiale kan beregnes på en sådan måde, at det ikke bliver nødvendigt at operere med to forskellige definitioner af vandmætningsgraden, da det kan skabe unødigt forvirring

Beregningsmodellen er analyseret på basis af resultater for homogene materialer uden luftindblanding og udsat for *ren* frostpåvirkning, da det forenkler beregningerne. Der kan på det foreliggende grundlag knyttes følgende kommentarer til anvendelsen af modellen i andre tilfælde:

Luftindblandede materialer

Modellen tager korrekt hensyn til, at luftindblandede materialer indeholder flere kugleformede porer og evt. har et lavere E-modul og samtidig har en højere kritisk vandmætningsgrad. Et sådant materiale er bedre i stand til at optage spændingerne der er opstået pga. frysning af vand.

Disse beregninger er foretaget uden at ændre den samlede porøsitet, dvs. der er ikke taget hensyn til, at luftindblanding øger porøsiteten. På den anden side er der tale om et helt nyt system af isolerede porer, der ikke uden videre fyldes med vand.

For at kunne foretage reelle beregninger på sådanne materialer må der derfor gøres op med opfattelsen af poresystemet som et sammenhængende system, uanset porøsiteten. Muligvis må der indføres en *poreformfordeling* svarende til den *porestørrelsesfordeling*, der i forvejen indgår.

Samtidig kan det komme på tale at revurdere definitionen af parameteren A , der udtrykker hvor i poresystemet isen befinder sig. Det viser sig nemlig, at isen i luftboblerne i første omgang dannes langs porevæggene, [Grasenick & Soretz,92], [Monteiro et al,89]. Behovet for at revurdere A afhænger dog af, på hvilken måde luftboblerne skal indgå i den samlede porøsitet.

Kombineret frost-tøsalt påvirkning

Der skal tages hensyn til saltets frysepunktssænkende virkning, hvilket klares ved at ændre parameteren η , der rent matematisk udtrykker sammenhængen mellem porestørrelse og frysepunktstemperatur.

Samtidig skal der givetvis ske en ændring af den måde spændingsudviklingen beregnes på. Der gælder således, at frost-tøsalt påvirkning til forskel fra ren frostpåvirkning primært er et overfladefænomen, [Fagerlund,94], samt at frost-tøsalt-påvirkning normalt giver langt større skader. Der foregår i øjeblikket et større arbejde i RILEM-regi, [RILEM TC-117,92,93], der bl.a. har til formål at øge forståelsen af, hvilken mekanisme der kan forklare salts betydning for frostnedbrydning.

Inhomogene materialer

I sin nuværende udformning benyttes kun ét Poissontal i modellen, der antages at repræsentere såvel faststof som is. For inhomogene materialer, herunder materialer med grove revner, må der formentlig opereres med forskellige Poissontal, for at få en tilstrækkelig præcis beskrivelse af materialet, specielt hvis egenskaberne er meget retningsbestemte. Modellen er forberedt til at operere med flere Poissontal. Til gengæld bliver beregningerne mere indviklede, jf. [L.F.Nielsen,90d].

Frostbestandighed og porestruktur

Et generelt problem ved beregning af frostbestandighed ud fra kritiske vandmætningsgrader og praktisk forekommende vandmætningsgrader er, at det er svært at beskrive porestrukturen og dens betydning for fugttransport og kritiske vandmætningsgrader på en enkel måde. Det er også grunden til, at parametre der beskriver porestrukturen pt. bestemmes indirekte.

I disse år udvikles metoder til en mere detaljeret beskrivelse af porestrukturen ud fra todimensionale billeder, samt metoder, der bl.a. gør det muligt at give en tredimensional beskrivelse af overflader, som refereret i bilag B2, [de Place,96b]. I USA er der udviklet en tredimensional computermodel til simulering af cements hydratisering og dannelsen af cementpasta og - specielt vigtigt i denne forbindelse - dannelsen af et system af kapillarporer (percolationsteori). Med modellen er det muligt at følge hvordan poresystemets konnektivitet (sammenhæng) udvikles.

Der er ingen tvivl om, at sådanne systemer skal inddrages fremover for at få en mere præcis beskrivelse af koblingen mellem porestruktur, fugttransport, kritiske vandmætningsgrader og aktuelle vandmætningsgrader.

Beregningsmodeller og eksperimentelle undersøgelser

I forhold til en eksperimentel bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader kan det virke voldsomt at indføre en beregningsmodel med så mange parametre som præsenteret i afsnit 3. Ud over at afklare de punkter der er nævnt side 171-172, vil det derfor være relevant at arbejde videre med betydningen af de enkelte parametre, med det formål at begrænse antallet af parametre der skal bestemmes for hvert nyt materiale. Et sådant arbejde vil samtidig kunne øge forståelsen for, hvordan porøse materialers frostbestandighed kan forbedres.

8. Efterskrift

Definition af vandmætningsgrad

I den foreliggende afhandling opereres med forskellige definitioner af vandmætningsgraden, jf. figur 3.20. Der tales både om vandmætningsgrad af frysbart vand og af det samlede vandindhold (porefyldningsgrad). Vandmætningsgraden relateres dels til *hele* poresystemet dels til poresystemet *fraregnet* den del der indeholder ikke-frysbart vand.

Dette kan godt virke forvirrende fordi det interessante er, hvor meget vand der totalt set må være i poresystemet før der er risiko for frostskader. Til praktisk brug er det derfor den såkaldte porefyldningsgrad, kaldet β_w , der udtrykker den *samlede* mængde vand - frysbart såvel som ikke-frysbart - i forhold til det *totale* porevolumen, der er den mest relevante. Denne størrelse kan let bestemmes og det kan umiddelbart konstateres om denne størrelse har opnået en kritisk værdi eller ej.

Den kritiske værdi vil naturligvis stadig være afhængig af materialets porestruktur og de klimatiske påvirkninger, som materialet udsættes for, men det kan løses i laboratoriet. Resultater af frostprøvning bør derfor afbildes som funktion af β_w .

Modellering af porøst, delvist frosset materiale

En del af uklarheden omkring vandmætningsgraden skyldes, at der ved opstilling af udtryk for E-modul af et delvist frosset materiale, indføres et homogent, ækvivalent materiale som erstatning for blanding af vand, is og luft. Dette ækvivalente materiale udfylder *hele* poresystemet, og de parametre der beskriver materialet refererer derfor til hele poresystemet. Det gælder også vandmætningsgraden (koncentrationen af frysbart vand),

$\beta_{f, tot}$

Der arbejdes for tiden med ændrede udtryk til bestemmelse af E-modul mv. for dette ækvivalente materiale, som det er antydnet i [de Place, 96d]. Fx vil parameteren A der beskriver, hvordan isen er placeret i poresystemet, gøres afhængig af mængden af is i forhold til mængden af vand og luft. Flere resultater fra dette arbejde forventes at kunne præsenteres i internationale tidsskrifter på et senere tidspunkt.

Betydning af parameteren B

Ved analysen af den opstillede beregningsmodel synes der at være sket en vis overfortolkning af parameteren B 's betydning, idet der er lagt for stor vægt på resultater for vandmætningsgrader over den kritiske. På grundlag heraf konkluderes i afhandlingen, at de forsøg beregningsmodellen skal erstatte (dilatationsforsøg) er nødvendige for at bestemme B .

At det reelt ikke forholder sig helt således skyldes, at der vil være langt større spredning på resultaterne, når den kritiske vandmætningsgrad er overskredet. Det vil give større usikkerhed ved indlæggelsen af en kurve til beskrivelse af sammenhæng mellem tøjning og vandmætningsgrad. I det fortsatte arbejde vil det derfor også blive undersøgt om ovennævnte udsagn om B og dilatationsforsøg er fuldt korrekt.

Summary

SBI Report 268: Frost resistance of building materials - modelling of critical degrees of saturation

This report deals with frost resistance of porous building materials. The primary objective is to describe and to test a new theoretical model for determination of critical degrees of saturation, including a discussion of the assumptions and the mode of operation.

In a literature survey it is stated that none of the existing theories fully describe what happens physically, when (partly) saturated porous materials are subjected to freeze-thaw. Besides, the theories cannot be used directly for calculations. Therefore a large number of freeze-thaw test methods exist.

The critical degree of saturation is defined. The advantages and drawbacks in characterizing the frost resistance by this method compared to traditional freeze-thaw testing are discussed.

It is pointed out that an experimental determination of the critical degree of saturation is very laborious and that a computer model based on 1) the existence of critical degrees of saturation, 2) the fact that porous materials are materials with cracks may have many perspectives.

Frost degradation is modelled as being caused by different eigenstrains between pore and solid phase when freezing, leading to stress concentrations and crack propagation.

A method for a quantitative description that is sufficiently detailed is lacking. Instead the pore structure is characterized based on expected relations between porosity, pore shape and E-modulus and by expressing mathematically an experimentally determined relationship between volumetric expansion and the degree of saturation.

A test program is set up to determine values of the parameters, which appear in the computer model. The model is analyzed on basis of these values. The tests are made on concrete without air entrainment with different water/cement ratios and tile bricks with different porosities.

To verify the calculations, critical degrees of saturation are determined experimentally using dilation tests and measurement of resonance frequencies before and after freezing. Generally, there is agreement between the critical degrees of saturation determined by these two methods.

As expected, the porosity, the pore size distribution and the mechanical properties depend on the amount of saw dust (tile), the water/cement ratio (concrete), respectively.

The result of the freeze-thaw test on concrete using the Swedish standard test method SS 13 72 44 agrees with the frost resistance expressed as the difference between the critical degree of saturation and the degree of saturation by capillary water uptake. The results clearly show a dependence of the water/cement ratio.

To support the calculations using the model, additional tests are carried out on concrete. Coefficients of moisture transfer are determined and data about moisture conditions at different kinds of exposure are collected in order to estimate which degrees of saturation may be expected in

practice. It has only to a limited extent been possible to make the intended comparisons between laboratory investigations and exposure tests.

Two years of exposure show no degradation of the exposed specimens and no change in ultrasonic pulse velocity. Generally, there is agreement between the moisture content at the surface of the exposed specimens expressed by the time of wetness and the weather conditions expressed by the relative humidity.

Diffusion tests show a significant dependence of the water/cement ratio on the ability of transporting moisture in the form of vapour as well as in the form of liquid. Gamma ray attenuation can be used for an experimental determination of moisture content in concrete but requires a great precision of the measurements.

For further details reference is made to a separate report "Frost resistance of building materials - additional tests", [de Place,96c] (in Danish).

Dilation tests show that it is possible to describe the relation between degree of saturation and volumetric expansion on a simple mathematical form, based on the parameter B , although B is determined with some uncertainty because of the spread on the test results.

Generally, calculated critical degrees of saturation are lower than experimentally determined values. In cement-based materials, it is necessary to consider that a great amount of the pore volume is occupied by non-freezable water. This supports the definition of the degree of saturation made by Fagerlund.

The model correctly takes into consideration to which extent cracks are dominating the pore structure, and also the dependence of the pore size on the freezing point depression.

The model assumes that the materials are isotropic and homogeneous, without air entrainment or coarse cracks and without presence of deicing salt. These assumptions simplify the calculations.

The possibilities of using the model on air entrained materials are suggested. The assumption of the pore system as a continuous system, no matter how small a porosity, has to be reevaluated. Experimental data based on air entrained concretes are necessary to confirm this.

Use of the model in connection with combined freeze-thaw deicing action has not been investigated but will certainly demand a change in the calculation of the development of stresses. Also a greater freezing point depression must be included.

The analysis of the presented model shows the perspectives in using computer models to determine critical degrees of saturation. To describe the influence of the pore structure to the critical degree of saturation the existing computer model necessitates just those tests (dilation) which it should replace. Exactly this part of the conclusion is questioned in a postscript. The development of methods to describe the pore structure, e.g. based on computer simulation, must be utilized to make the model a real alternative to an experimental determination of the critical degree of saturation.

The model is subjected to some uncertainty because the modelling of frost degradation (differences in eigenstrains) and the calculation of stresses give a simplified description of the real conditions as expressed by the existing physical theories of frost degradation.

Symbolliste

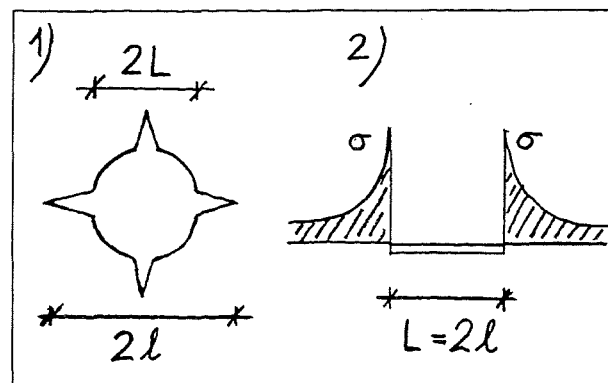
Bemærk at symbollisten dækker såvel denne rapport som den tilhørende bilagsrapport, [de Place,96b].

A	formfaktor. Konstant der udtrykker hvordan is samt ikke-frosset vand og luft er fordelt i poresystemet. Har betydning for porefasens E-modul E_p^*	
A	(tværsnits)areal (af eksponeret flade)	[m ²]
A	hældning ved afbildning af formel (E.3)	
B	effektivitetsfaktor der tager hensyn til indsnævninger og ujævnheder i poresystemet. Matematisk udtrykker den sammenhængen mellem vandmætningsgrad og effektiv volumetøjning, $\Gamma_{p\text{ eff}}$	
B	bøjningstrækstyrke, bilag B3	[MPa]
B	konstant, bilag B1	
C	cementindhold	[kg/m ³]
C	konstant, der udtrykker adsorptionsenergien af vandmolekyler, jf. formel (E.2)	
D_{KR}	kritisk tykkelse af et porøst materiale. Den største tykkelse af materialet, hvorved det kan modstå frost i vandmættet tilstand	[mm]
E^*	elasticitetsmodel (E-modul, stivhed) af materiale bestående af flere faser	[GPa]
E_{calc}	E-modul beregnet ud fra betonrecept	[GPa]
E_i	E-modul af fase i ; $i = P, S$	[GPa]
E_n	(dynamisk) E-modul efter n frost-tø-cykler	[GPa]
E_{DYN}	dynamisk E-modul	[GPa]
E_p^*	E-modul af porefasen opfattet som kompositmateriale, jf. formel (3.13)	[GPa]
E_0	(dynamisk) E-modul inden frysning	[GPa]
E_0^*	porøst materiales E-modul ($n = 0$)	[GPa]
F	frostbestandighed, funktion af tiden t ($F(t)$)	
F	interaktionsfaktor, afsnit 3.2	
F	frostmodstandstal, bilag B og afsnit 6.6	
FS	frostbestandighedstal ("frost security factor")	

I	skæring med ordinataksen ved afbildning af formel (E.3)	
K	$K = w_{nf}/P_a$	[m ³ /m ³]
K	spændingsintensitetsfaktor; $K = \sqrt{(E \cdot \Gamma)}$. Udtrykker størrelsen af spændingsintensiteten foran revnespidsen	[MPa√m]
K	porevolumen af kapillarporer, bilag B3	[vol%]
K_i	kompansionsmodul (bulk modulus)	[GPa]

$$K_i = \frac{E_i}{3(1-2\nu)}$$

L	poreradius i revnepore. $L \leq 0,8l$, jf. afsnit 3.2.2. Se også figur 1 nedenfor	[m]
L	revnelængde i enkeltrevnemodel. $L = 2l$, jf. bilag A1. Se også figur 1 nedenfor	[m]



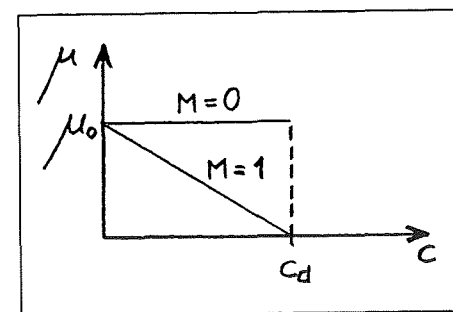
Figur 1. Illustration af L i betydningen poreradius (1), hvor $L \leq 0,8l$, og revnelængde (2).

L	omkreds af pore, bilag B3	[m]
\bar{L}	Powers' afstandsfaktor. Forudsætter, at alle luftporer forbliver luftfyldte	[mm]
\bar{L}_{CR}	kritisk værdi af Powers' afstandsfaktor	[mm]
L_{300}	mængde af indblandede luftporer med diameter mindre end 0,3 mm, bilag B3	[vol%]
LP_0	mængde af luftporer, bilag B3	[vol%]
M	molvægt. $M_{H_2O} = 18,02$ kg/kmol	[kg/kmol]
M	parameter der benyttes til matematisk beskrivelse af sorptionsisotermen, jf. modificeret BET-teori, bilag E3.2	

M kobler porøsitet og poreform via

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(1 - \frac{c}{c_d}\right)^M$$

M kan antage værdier fra 0 til 1. $M = 1$ svarende til lineær sammenhæng mellem μ og c - jf. figur 2 nedenfor - benyttes pt. M gør det muligt at tilpasse modellen til ikke-lineære sammenhænge, hvis det viser sig relevant



Figur 2. Illustration af M - sammenhæng mellem porøsitet og poreform.

N	antal lastcykler	
N	frostmodstandstal, bilag B3	
N	Avogadros tal = $6,02 \cdot 10^{23}$ molekyler pr. mol materiale	
P	parameter der benyttes til matematisk beskrivelse af sorptionsisotermen, jf. modificeret BET-teori, bilag E3.2	
P_a	porevolumen der ikke fyldes ved kapillarsugning, men fyldes ved trykmætning, bilag B3	[m ³ /m ³]
P_w	porevolumen der fyldes med vand ved kapillarsugning, når prøven vandlagres ved atmosfærisk tryk, bilag B3	[m ³ /m ³]
P_a	total, åben porøsitet	[m ³ /m ³]
PV	porevolumen	[cm ³ /g]
Pd	mængden af porer med diameter større end d μm	[% af PV]
Q	parameter der benyttes til matematisk beskrivelse af sorptionsisotermen, jf. modificeret BET-teori, bilag E3.2	
R	længde af flydezone, bilag A1	[m]
R	poreradius, figur 3.6 og bilag B1	[m]
R	gaskonstanten = 8314 J/(kmol K)	
R_a	dilatationsfaktor, afsnit 2.2.5	[μm/m]
RF	relativ fugtighed	[%]
S	vandmætningsgrad	
S	formfaktor, bilag B2	

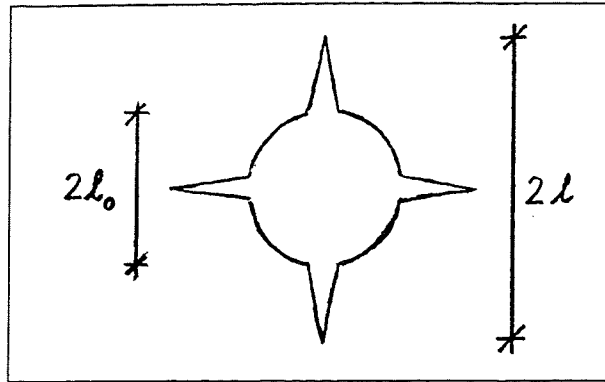
Symbolliste

S_{AKT}	aktuel vandmætningsgrad, funktion af tiden t	
S_{BET}	specifik overflade bestemt vha. BET-teorien	[m ² /kg]
S_{KR}	kritisk vandmætningsgrad	
S_e	porefyldningsgrad, vandmætningsgrad af fordampeligt vand	
S_f	vandmætningsgraden af frysbart vand	
S_{test}	den vandmætningsgrad prøven testes med	
$S_{vac,kap}$	vandmætningsgrad ved frivillig vandopsugning	
SC	tal for graden af frostnedbrydning, ("scale code")	
$S(Vt)$	materialets specifikke overflade bestemt vha. et Vt-plot	[m ² /kg]
T	temperatur, frysepunktstemperatur	[°C]
T	absolut temperatur	[K]
V	volumen af materiale incl. porer	[m ³]
V_m	mængden af adsorberet masse, der skal til for at danne et enkelt lag adsorberede molekyler på materialets overflade	[kg/kg]
$V_p, V_{p\grave{a}}$	porevolumen	[m ³]
VR	tal for, i hvor høj grad luftporer er fjernet fra betonens overfladelag pga. vibrering ("void removal parameter")	
W_B	frostmodstandstal, bilag B3	[MPa]
a	luftindhold, volumen af luftfyldte (dvs. <i>ikke vandfyldte</i>) porer	[m ³]
a	atomafstand, bilag A1	[nm]
a	arealet dækket af et enkelt molekyle, bilag E3.2	[m ²]
a/w	luft/vandforhold	[m ³ /m ³]
b	halv afstand fra midte til midte af revne/revnepore, jf. figur 3.5 og 3.7	[m]
c	(kapillar)porøsitet, volumenkonzentration af porefase	[m ³ /m ³]
c_d	kritisk porøsitet. $c > c_d \Rightarrow$ diskontinuert faststoffase (fase 1). Specielt for porøse materialer: materialet har ingen styrke og ingen stivhed (E-modul) for $c \geq c_d$	[m ³ /m ³]
c_D	kritisk porøsitet. $c < c_D \Rightarrow$ diskontinuert porefase (fase 2)	[m ³ /m ³]
d	poreafstand, figur 3.7 og bilag B1	[m]
d	porediameter	[m]
d	indre dæmpning, $d = \tan \delta$	
$d(T)$	mindste porediameter for porer med frysbart vand. Funktion af frysepunktstemperaturen	[nm]

Symbolliste

d_f	mindste porediameter i materialet	[nm]
d_M	karakteristisk porediameter. Beskriver sammen med z_M et karakteristisk punkt på porestørrelsesfordelingskurven	[nm]
f	faktor, der udtrykker forholdet mellem styrken lokalt i materialet under frysning, $\sigma_{p,cr}$ (porestyrken), og materialets trækstyrke i optøet tilstand, σ_{cr} . Dette forhold afhænger af poreformen. Jo mere porerne ligner revner, desto større f . Der regnes med fuldt poretryk i revnerne i forbindelse med frysning. Der gælder tilnærmet, jf. [L.F.Nielsen,93a], at:	
	$f = (1 - (L/l)^{3.9})^{0.44} \approx \sqrt{1 - \mu_0^2}$	
f_c	trykstyrke	[MPa]
f_e	resonansfrekvens	[kHz]
f_n	resonansfrekvens efter n frost-tø-cykler	[kHz]
f_t	enakset trækstyrke	[MPa]
f_N	udmattelsesstyrke, styrke efter N lastcykler	[MPa]
f_0	resonansfrekvens før forsøg	[kHz]
f_1	statisk styrke	[MPa]
f_1, f_2	frekvenser. f_1 og f_2 har en amplitude på $\sqrt{2}/2$ af amplituden for resonansfrekvensen f_e (mindskning af amplitudesignalet med 3 dB) og indgår i beregningen af tabsvinklen δ	[kHz]
$fract\ fr$	angiver, hvor stor en del af det vand der <i>kan</i> fryse ved en given temperatur, der rent faktisk <i>er</i> frosset	
k	$k = w_{nf}/w_{ne}$	[m ³ /m ³]
k	kapillaritetstal	[kg/(m ² √s)]
k	konstant, der kobler resonansfrekvens og dynamisk E-modul, jf. formel (5.1). Størrelsen af k afhænger af emnets geometri, hvilken type svingninger emnet sættes i, hvilken resonansfrekvens der er tale om, samt af ν . Enheden [m ⁻¹] gælder, når SI-enheder benyttes for de øvrige størrelser i formel (5.1)	[m ⁻¹]
k^*	stivhedstal, relativt bulk modulus $k^* = K^*/K_S$	
l	halv revnelængde ved styrken σ_{cr} , jf. figur 1 ovenfor. I porøst materiale: afstand fra poremidte til revnespids, jf. figur 3 nedenfor	[m]
l	længde af prøveemne	[m]
l_0	luftindhold af frisk beton	[m ³ /m ³]

l_0 halv revnelængde ved styrken $\sigma_{cr,0}$ (karakteristisk længde).
I porøst materiale: en typisk poreradius jf figur 3 nedenfor [m]



Figur 3. Illustration af revnelængde l og karakteristisk længde l_0 i et porøst materiale.

m	masse af emnet	[kg]
m_{kap}	masse ved kapillær mætning	[kg]
m_{kp}	masse ved knækpunkt på kapillarsugningskurve	[kg]
m_n	masse af afskallet materiale efter n frost-tø-cykler, efter tørring til ligevægt ved 105°C	[kg]
m_{ssd}	masse i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand	[kg]
m_{sv}	masse ved vejning under vand	[kg]
m_{test}	den vægt en prøve skal have for at opnå en vandmætningsgrad S_{test}	[kg]
m_0	masse ved start af kapillarsugning	[kg]
m_{50}	masse efter tørring til konstant vægt ved 50°C	[kg]
m_{105}	masse efter tørring til konstant vægt ved 105°C	[kg]
n	antal frost-tø-cykler	
n	stivhedstal: $n = E_2/E_1 = E_p/E_s$. $n = 0$, hvis porefasen kun indholder materiale med $E = 0$	
n_{eff}	stivhedstal for en porefase delvist fyldt med faststof, fx is, jf. formel (3.14)	
P	cementpastaindhold i beton, bilag B3	[vol%]
P	damptryk	[Pa]
P_f	effektiv porebeskyttelsesfaktor ("skyddsportal")	

$$P_f = \frac{P_a}{P_a + w_f}$$

P_r porebeskyttelsesfaktor ("skyddsportal")

$$P_r = \frac{P_a}{P_a + P_w}$$

P_s	mætningsdamptryk ved en given temperatur	[Pa]
P_a	åben porøsitet	[m ³ /m ³]
r_k	Kelvinradius	[m], [nm]
r_p	poreradius	[m], [nm]
$sum-Sp$	materialets specifikke overflade bestemt vha. en Vt-pore-analyse	[m ² /kg]
t	tid	[s]
t	tykkelse af t-lag, der er en funktion af RF , [Gregg & Sing,67]	[nm]
t_{kp}	tid til knækpunkt nås på kapillarsugningskurve	[s]
u	materialets ligevægtsfugtindhold ved en given RF	[kg/kg]
u_{fit}	værdi af ligevægtsfugtindholdet bestemt vha. bedste skøn for en sorptionsisoterm	[kg/kg]
u_{ssd}	fugtindhold i vacuumvandmættet tilstand	[kg/kg]
w_e	mængden af fordampeligt vand	[m ³ /m ³]
w_f	mængden af frysbart vand	[m ³ /m ³]
w_{ne}	mængden af ikke-fordampeligt vand	[m ³ /m ³]
w_{nf}	mængden af ikke-frysbart vand	[m ³ /m ³]
w_0	vandindhold i frisk beton, bilag B3	[kg/m ³]
w/c	vand/cementforhold	[kg/kg]
$z(d)$	relativt porevolumen som funktion af porediameter, jf. formel (3.27)	
z_M	karakteristisk relativt porevolumen. Beskriver sammen med d_M et karakteristisk punkt på porestørrelsesfordelingskurven	
α	hydratiseringsgrad	
$\alpha_{i,T}$	temperaturudvidelse af fase i ; $i = P, S$. $\alpha_{i,T} = \Delta\alpha_{i,T} \cdot \Delta T$	
$\alpha_{P,eff}$	effektiv, fri volumetøjning (egentøjning) af porefasen $\alpha_{P,eff} = \alpha_{P,T} + \Gamma_{P,eff}$	
α_S	fri volumetøjning (egentøjning) af faststoffasen. $\alpha_S = \alpha_{S,T}$	
β_{cr}	kritisk vandmætningsgrad	

$\beta_{f, tot}$	vandmætningsgrad af frysbar vand regnet i forhold til det totale porevolumen	
β_w	vandmætningsgrad, porefyldningsgrad (vand)	
β_{wf}	vandmætningsgrad af frysbar vand, regnet som	
	$\beta_{wf} = \frac{w_f}{w_f + a}$	
β_I	porefyldningsgrad (is); andel af porevolumen fyldt med is $\beta_I = 1.09 \cdot \beta_{f, tot}$	
Γ	normeret formfunktion, $\Gamma = \mu/\mu_0$, jf. afsnit 3.2.2	
Γ	tøjningsenergi hastighed, bilag A1. Frigjort energi pr. fladeenhedsudvidelse af en revne i en skive med tykkelsen 1 ("strain energy release rate")	[J/m ²]
Γ_P	volumenudvidelseskoefficient for vand (= 0,09)	
$\Gamma_{P, eff}$	effektiv volumenudvidelse ved frysning, jf. formel (3.15). Den del af volumenudvidelsen, der bidrager til spændingsopbygning	
Γ_{cr}	kritisk tøjningsenergi hastighed	[J/m ²]
$\Delta L/L$	relativ længdeændring	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
ΔT	temperaturændring, temperaturforskul	[°C]
$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha = \varepsilon_{kk}^* - \alpha_S$	
$\Delta\alpha_{i,T}$	specifik temperaturudvidelseskoefficient af fase i ; $i = P, S$	[°C ⁻¹]
δ	tabsvinkel. Optræder i tabel F8 og F9 som d	
	$\delta = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \pi$	
δ	revnespidsåbning, bilag A1	[mm]
δ_{cr}	kritisk revnespidsåbning	[mm]
ε	(volumen)tøjning	
$\varepsilon_{i, kk}$	gennemsnitlig volumentøjning for fase i ; $i = P, S$ $kk = 11 + 22 + 33$, dvs. summen af længdetøjninger i de tre hovedretninger (tensornotation)	
ε_{kk}^*	kompositmaterialets volumentøjning. Indeks kk : se $\varepsilon_{i, kk}$	
$\varepsilon_{kk, cr}$	kritisk volumentøjning, svarende til at materialets faststoffase har mistet sin sammenhæng og styrken er nul	
ε_{max}	maksimal dilatation (afvigelse fra lineær temperaturbestemt længdeændring)	[‰]

ε_{perm}	blivende (permanent) dilatation	[‰]
$\varepsilon_{tw}, \varepsilon_B$	trækbrudtøjning	[‰]
η	afkølingsfaktor. Kobler porediameter og frysepunkts-temperatur vha. formel (3.25)	
θ	kontaktvinklen mellem væske og materialets overflade	[°]
θ	temperatur	[°C]
$\underline{\theta}$	geometrifunktion	
	$\underline{\theta} = 0,5[\mu + n\mu' + \sqrt{(\mu + n\mu')^2 + 4n(1 - \mu - \mu')}]$	
	Parameter der udtrykker fasegeometriens betydning for kompositmaterialets stivhed. For et porøst materiale ($n = 0$) reduceres $\underline{\theta}$ til μ (s.d.)	
μ	formfunktion for fase 2 (porefasen)	
	$\mu = \mu_0 \frac{c_d - c}{c_d}$	
	Karakteriserer poreformen ved porøsiteten c . Lineær sammenhæng mellem μ og c forudsættes. Se også M	
μ_0	formfaktor for fase 2 (porer); karakteriserer poreformen ved forsvindende porøsitet. Jo mere kompliceret poregeometri, desto lavere μ_0 . Kan antage værdier fra 0 til 1	
μ'	formfunktionen for fase 1 (faststoffase)	
	$\mu' = \mu'_0 \frac{c - c_D}{1 - c_D}$	
	Lineær sammenhæng mellem μ' og c forudsættes. For tilnærmet fasesymmetriske materialer gælder, jf bilag A2, at $\mu'(c) = \mu(c_D + c_D - c)$. Parenteser betyder "funktion af"	
μ'_0	formfaktor for fase 1 (faststof); karakteriserer formen af faststoffasen ved forsvindende mængde af faststof. Jo mere kompliceret geometri af faststoffasen, desto lavere μ'_0 . Kan antage værdier fra 0 til 1. For tilnærmet fasesymmetriske materialer gælder, jf bilag A2, at $\mu'_0 = \mu_0 (1 - c_D)/c_d$	
ν	Poisson-tallet (Poissons forhold); der regnes med $\nu = 0,2$ for alle faser	
ρ	densitet	[kg/m ³]
ρ_d	tørdensitet	[kg/m ³]

ρ_v	væskens densitet. $\rho_{H_2O} \approx 1000 \text{ kg/m}^3$	[kg/m ³]
σ	overfladespænding mellem væske og luft For vand i luft ved 20°C: $\sigma = 0,07275 \text{ N/m}$, jf. [CRC Handbook]	[N/m]
σ	styrke - hvis <i>max</i> eller <i>cr</i> er (en del af) indices; benyttes mest i forbindelse med omtale af revnemodeller	[MPa]
σ	spænding - øvrige tilfælde	[MPa]
$\sigma_{P,cr}$	porestyrke; det største poretryk materialet kan modstå lokalt uden at der sker revneforlængelse	[MPa]
σ_{cr}	praktisk brudstyrke, Griffith-styrke, jf. formel (A.2)	[MPa]
$\sigma_{cr,0}$	teoretisk styrke af materialer. Benyttes i afsnit 3.2 om model for frostødelæggelse. $\sigma_{cr,0}$ svarer til σ_{max} for "praktiske" materialer	[MPa]
$\underline{\sigma}_{i,kk}$	gennemsnitlig volumetrisk spænding for fase <i>i</i> ; $i = P, S$ $kk = 11 + 22 + 33$, dvs. summen af spændinger i de tre hovedretninger (tensornotation)	[MPa]
$\underline{\sigma}_{kk}^*$	gennemsnitlig volumetrisk spænding for kompositmateriale	[MPa]
σ_{max}	teoretisk styrke af materialer (styrke af faststof uden fejl), jf. bilag A1. For skøre, krystallinske materialer betegner σ_{max} den største adskillelæsspænding mellem atomlag. For "praktiske" materialer (ikke-krystallinske materialer), herunder bygningsmaterialer, betegner σ_{max} den størst opnåelige (flyde)spænding ved forsvindende revnestørrelse	[MPa]
σ_y	spænding lokalt i materialet, jf. figur A4	[MPa]
σ'	spænding ved revnespids, figur 3.6	[MPa]
ϕ	fordelingsparameter; indgår i den matematiske beskrivelse af porestørrelsesfordelingen. Størrelsen af ϕ afgør, hvilken krumning porestørrelsesfordelingskurven får	
φ	relativt damptryk, p/p_s . $\varphi = RF$	
Ω	overfladeenergi; der medgår $2 \cdot \Omega$ til at skabe to nye overflader ved revneudvidelse	[J/m ²]

Indices

Indices optræder hyppigt i kombinationer med hinanden. Hvor intet andet er anført gælder:

<i>CR</i>	kritisk værdi
<i>I</i>	is (faststof i porefase)
<i>KR</i>	kritisk værdi
<i>P</i>	porefase
<i>S</i>	faststoffase
<i>T</i>	temperatur(afhængig)
<i>cr</i>	kritisk værdi
<i>e, ne</i>	fordampeligt, ikke fordampeligt
<i>eff</i>	effektiv (tøjning)
<i>f, nf</i>	frysbart, ikke frysbart
<i>i</i>	$i = P, S$
<i>kk</i>	volumetrisk, benyttes i forbindelse med volumetrisk spænding og volumetøjning. $kk = 11 + 22 + 33$, dvs. summen af spændinger eller længdetøjninger i de tre hovedretninger (tensornotation)
<i>min</i>	minimum
<i>n</i>	efter <i>n</i> frost-tø-cykler
<i>t</i>	træk
<i>v</i>	våd (opfugtet)
<i>0</i>	reference, fx referencestykke
<i>0</i>	porøst materiale ($n = 0$)
<i>1</i>	fase 1 (faststof)
<i>2</i>	fase 2 (porer)
<i>-</i>	gennemsnitsværdi (understreget symbol)
<i>*</i>	kompositmateriale, dvs. sammensat materiale

Litteratur

Den følgende litteraturliste dækker SBI-rapport 268 samt bilag C-F i bilag til SBI-rapport 268 [de Place,96b]. Normer, standarder, tekniske beskrivelser og manualer er listet særskilt, bagest i litteraturlisten. For bilag A og B i [de Place,96b] er udarbejdet særskilte litteraturlister (s.d.).

I tilfælde af, at en forfatter optræder med flere referencer fra samme år, angives det ved a,b, osv efter årstallet. Bemærk i den forbindelse, at litteraturlisten er udarbejdet fælles med listen i den supplerende rapport, [de Place,96c], samt lister i bilag A og B, [de Place,96b].

Ahlgren L.: *Moisture fixation in porous building materials*. Rapport 36, Institutionen för Byggnadsteknik, Lunds tekniska Högskola. Lund, 1972.

Bache, H.H.: *Beton - frost - fysik*. Dansk Beton, vol.8, no.2, pp.10-13 & no.3, pp.38-41, 1991.

Bager, D.H.: *Ice formation in hardened cement paste*. PhD-thesis. Technical Report 141/84, Laboratoriet for Bygningsmaterialer (LBM), DTH, Lyngby, 1984.

Bager, D.H. & Sellevold, E.J.: *Fugthistories indflydelse på isdannelse i hærdnet cementpasta*. Teknisk Rapport 121/82, LBM, DTH. Lyngby, 1982.

Basisbetonbeskrivelsen for bygningskonstruktioner. Publikation nr.89. Udsendt af Byggestyrelsen, marts 1987.

Beaudoin, J.J. & MacInnis C.: *The mechanism of frost damage in hardened cement paste*. Cement and Concrete Research, vol.4, no.2, pp.139-147, 1974.

Bentz, D.P. & Garboczi, E.J.: *Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model*. Cement and Concrete Research, vol.21, nos.2/3, pp.325-344, 1991a.

Beton & frost. Nordisk Workshop okt 1984. DBF-publikation nr.22. Redigeret af Dirch H. Bager. Dansk Betonforening, København, 1985.

Beton-Bogen. Redigeret af A.D.Herholdt et al. CtO, Aalborg Portland, 2.udg. 1985.

Brunauer S.; Emmet, P.H. & Teller E.: *Adsorption of gases in multimolecular layers*. Journal of the American Chemical Society, vol.60, pp.309-319, 1938.

Litteratur

Brüning H.: *Über die Frostwiderstandsfähigkeit von keramischen Baustoffen - ein neues Prüfverfahren*. Ziegelindustrie International heft 3, pp.138-150, 1977.

Brüning H.: *Frost resistance of masonry bricks*. Ziegelindustrie International heft 10, pp. 502-503 & heft 11, pp.570-575, 1987.

Buck, A.D.: *Evaluation of the frost resistance of concrete using critical dilation*. Cement, Concrete and Aggregates, vol.10, no.1, pp.48-50, 1988.

Carlsson T.: *Frostprovning av tegel, BM-metoden*. Lägesrapport. Rapport TVBH-7116, Avd.f. Byggnadsfysik, LTH. Lund, 1989.

Chandra S. & Xu A.: *Influence of presaturation and freeze-thaw test conditions on length changes of Portland cement mortar*. Cement and Concrete Research, vol.22, no.4, pp.515-524, 1992.

Cohen, M.D.; Zhou Y. & Dolch, W.L.: *Non-air-entrained high-strength concrete - is it frostresistant ?* ACI Materials Journal, vol.89, no.4, pp.406-415, 1992.

CRC Handbook of Chemistry and Physics, 64th Edition, 1983-84, CRC Press Inc., Florida, 1984.

Damgård Jensen, A.: *Indirekte kontrolmetoder*. pp.275-280 i: *Beton & frost*. Nordisk Workshop okt 1984. DBF-publikation nr.22. Redigeret af Dirch H. Bager. Dansk Betonforening, København, 1985.

Damgård Jensen, A.: *Analysis of air pore distribution in concrete*. pp.33-35 in: *Frost resistance of building materials*. Proc. Nordic Seminar in Borås. 29-30 Oct 1991. SP-Report 1991:32, Building Technology, Swedish National Testing and Research Institute, Borås, 1991.

de Fontenay, C. le Sage: *Isdannelse i hærdnet cementpasta*. Lic.afhandling. Teknisk Rapport 101/82, Laboratoriet for Bygningsmaterialer (LBM), DTH. Lyngby, 1982.

de Place Hansen, E.J.: *Moisture content measurement on concrete using gamma ray attenuation*. pp.753-760 in: Proc. 3rd Symposium on Building Physics in the Nordic Countries: Building Physics '93 (Bjarne Saxhof, editor). Thermal Insulation Laboratory, Lyngby, Denmark, 1993a.

de Place Hansen, E.J.: *Brudmekanisk model for frostødelæggelse. Projekt 1: Frostbestandighed af høj kvalitetsbetoner. Rapport 1.2 Brudmekanisk model*. Arbejdsdokument. Det materialeteknologiske Udviklingsprogram: Høj kvalitetsbetoner i 90'erne. AEC Rådgivende Ingeniører A/S, Trørød, 1993b.

de Place Hansen, E.J.: *Bestemmelse af resonansfrekvens vha Brüel & Kjær frekvensgenerator og signalanalysator*. Teknisk Rapport 319/1994, Lab f Bygningsmaterialer (LBM), DTU. Lyngby, 1994.

de Place Hansen, E.J.: *Byggematerialers frostbestandighed - Modelling af kritiske vandmætningsgrader*. Ph.d.afhandling. SBI-rapport 268. Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm, 1996a.

de Place Hansen, E.J.: *Byggematerialers frostbestandighed - Bilag til SBI-rapport 268*. Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm, 1996b.

de Place Hansen, E.J.: *Byggematerialers frostbestandighed - Supplerende undersøgelser til SBI-rapport 268*. Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm, 1996c.

de Place Hansen, E.J.: *Modelling critical degrees of saturation of porous building materials subjected to freezing*. pp. 127-140 in: Frost resistance of building materials. Proc. Nordic Research Seminar in Lund, April 16-17, 1996 (S. Lindmark, editor). Report TVBM-3072). Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, 1996d.

de Place Hansen, E.J.: *Testing a model for the critical degree of saturation at freezing of porous building materials*. pp.615-624 in: Proc. 7th Int. Conf. on the Durability of Building Materials and Components. Stockholm, Sweden, May 19-23, 1996e.

de Place Hansen, E.J. & Mullit P.: *Brugervejledning til billedbehandlingsprogrammet PIPPIN*. Teknisk rapport 317/94. LBM, DTU. Lyngby 1994.

de Place Hansen, E.J. & Schmidt L.: *Tegls frostbestandighed*. Teknisk Rapport 203/1989, LBM, DTH. Lyngby, 1989.

Detwiler, R.J.; Dagleish, B.J. & Williamson, R.B.: *Assessing the durability of concrete in freezing and thawing*. ACI Materials Journal, vol.86, no.1, pp.29-35, 1989.

Dobrolubov G. & Romer B.: *Richtlinien zur Bestimmung und Prüfung der Frost-Tausalzbeständigkeit von Zementbeton*. Strasse und Verkehr vol.63, heft 10 pp.405-411 & heft 11 pp.432-436, 1977.

Ejsing S.: *Frostbestandighed. Eksperimentel bestemmelse af kritisk vandmætningsgrad for porøse bygningsmaterialer*. Eksamensprojekt. Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH. Lyngby, 1993.

Egelund, S. dir. Wewers Teglværker A/S, Pibe Mølle, Helsingør. Mundtlig kommunikation, dec 1992.

Everett, D.H. & Haynes, J.M.: *Capillary properties of some model pore systems with special reference to frost damage*. Bulletin RILEM, no.27, pp.31-38, 1965.

Fagerlund G.: *Samband mellan porositet och materials mekaniska egenskaper*. Rapport 26, Institutionen för Byggnadsteknik, Lunds tekniska Högskola. Lund, 1972a.

Fagerlund G.: *Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material*. Thesis. Rapport 34, Inst.f.Byggnadsteknik, LTH. Lund, 1972b.

Fagerlund G.: *Significance of critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials*. Rapport 40, Inst.f.Byggnadsteknik, LTH. Lund, 1973a. (Also: ACI SP-47, pp.13-65, 1975).

Fagerlund G.: *Methods of characterization of pore structure*. Rapport 41, Inst.f.Byggnadsteknik, LTH. Lund, 1973b.

Fagerlund G.: *Determination of pore-size distribution from freezing-point depression*. Materials and Structures, vol.6, no.33, pp.215-225, 1973d.

Fagerlund G.: *Non-freezable water contents of porous building materials*. Rapport 42, Inst.f.Byggnadsteknik, LTH. Lund, 1974.

Fagerlund G.: *Studies of the destruction mechanism at freezing of porous materials*. CBIra 1:76, Cement och Betonginstitutet (CBI), Stockholm, 1976.

Fagerlund G.: *The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete*. Materials and Structures, vol.10, no.58, pp.217-253, 1977.

Fagerlund G.: *Prediction to service life of concrete exposed to frost action*. pp.249-276 in: Studies on Concrete technology. Dedicated to professor S.G.Bergström on his 60th anniversary, December 14, 1979. Cement och Betonginstitutet, Stockholm, 1979.

Fagerlund G.: *Testing of frost resistance*. General report. pp.69-87ff in: Int. colloquium on Frost Resistance of Concrete. Wien, June 1980. Mitteilungen Forschungsinst. Ver. Österr. Zementfabr., heft 33, 1980.

Fagerlund G.: *Principer för betongs frostbestandighet*. Nordisk betong, no.2, pp.5-13, 1981.

Fagerlund G.: *Inverkan av lufthalt, luftporstruktur, konsistens, vattencementtal och komprimeringsätt på betongens beständighet*. pp.39-69 i: Betongs frostbestandighet. Nordiskt forskningsseminarium, 23.okt 1982. CBIra 2:83, CBI, Stockholm, 1984.

Fagerlund G.: *Effect of air-entraining and other admixtures on the salt-scaling resistance of concrete*. CM Rapport T 86055, CEMENTA AB, Sverige, 1986.

Fagerlund G.: *The potential service life of concrete exposed to action*. CM Rapport T 87007, CEMENTA AB, Sverige, 1987.

Fagerlund G.: *Frysprovnig - varför och hur ?* Dansk Beton, vol.8, no.2, pp.14-17, 1991.

Fagerlund G.: *Studies of the scaling, the water uptake and the dilation of mortar specimens exposed to freezing and thawing in NaCl-solution*. pp.35-66 in: [RILEM TC-117,92]. 1992a.

Fagerlund G.: *Effect of freezing rate on the frost resistance of concrete*. Nordic Concrete Research, vol.11, no.1, pp.20-36, 1992. Oslo, Nordic Concrete Fed., 1992b.

Fagerlund G.: *On the service life of concrete exposed to frost action*. pp.49-73 in: [RILEM TC-117,93]. 1993a.

Fagerlund G.: *Frost resistance of high performance concrete - some theoretical considerations*. Report TVBM-3056, Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology. Lund, 1993b.

Fagerlund G.: *Influence of the environmental factors on the frost resistance of concrete*. Report TVBM-3059, Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology. Lund, 1994.

Falk, C.: *Tekstur i tegltagsten*. Tegl. Tidsskrift for det murede byggeri, nr.4, 1989.

Frandsen T. & Jensen, H.S.: *Vejledning i brug af gammastrålings-fugtmåle-udstyr med to kilder*. LBM, DTH, jan 1993.¹

Garrecht H.: *Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbehaftung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk*. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Heft 15. Karlsruhe, 1992.

Geiker M. & Andersen, O.V.: *Luft i beton - fup eller fakta ?* Dansk Beton, vol.8, no.2, pp.8-9, 1991.

Grasenick F. & Soretz S.: *Beitrag der Elektronenmikroskopie zur Frost- und Frost-Tausalz-Forschung*. Zement und Beton, vol.27, no.3, pp.120-122, 1982.

Gregg, S.J. & Sing, K.S.W.: *Adsorption, Surface Area and Porosity*. Academic Press, London & New York, 1967.

¹ Senere udkommet som: Teknisk Rapport 315/94, Lab f Bygningsmaterialer, DTU.

Gutmann, P.F.: *Bubble characteristics as they pertain to compressive strength and freeze-thaw-durability*. ACI Materials Journal, vol.85, no.5, pp.361-366, 1988.

Hagemann E.: *Byggematerialer, Grundbog*. Polyteknisk Forlag, 5.udgave, 2.oplag, 1991.

Hampton, J.H.D. & Thomas, M.D.A.: *Modelling relationships between permeability and cement paste pore microstructures*. Cement and Concrete Research, vol.23, no.6, pp.1317-1330, 1993.

Hansen, M.H.: *Vurdering af krav i BBB til strukturanalyse og luftporemåling*. Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknisk Institut, marts 1992.

Harris, D.J. & Saunders, J.D.: *Frost resistance of calcium silicate bricks: A comparison of exposure test and winter weather records*. Masonry International, vol.3, no.3, pp.89-92, 1990.

Haynes, J.M.: *Frost action as a capillary effect*. Trans. Brit. Ceram. Soc., vol.63, pp.697-703, 1964.

Helmuth, R.A.: *Capillary size restrictions on ice formation in hardened Portland cement pastes*. Paper VI-S2, pp.855-869, 4th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Washington D.C., 1960.

Henriksen, J.F. & Haagenrud, S.E.: *The EUREKA project EU 615 EURO CARE WETCORR*. Report from the NBS-MK Seminar at ABB Conference Center, Billingstad. 24 November 1993. NILU Report OR 37/94, Kjeller, Norway. July 1994.

Hill R.: *Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles*. Journ. Mech. Phys. Solids, vol.11, pp.357-372, 1963.

Hillerborg A.: *Brottmekanik tillämpad på betong*. Nordisk betong, no.6, pp.5-12, 1978b.

Jungwirth D., Beyer E. & Grübl P.: *Dauerhafte Betonbauwerke. Substanzerhaltung und Schadensvermeidung in Forschung und Praxis*. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1986.

Kjær U.: *Styring er ikke mulig*. pp.45-60 i: Luftporestruktur. Møde 22.1.86. DBF-publikation nr.28. Dansk Betonforening, København, 1986.

Klamrowski G. & Neustupny P.: *Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand*. Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin. Forschungsbericht no.100, 1984.

Kralj B., Middleton J. & Pande, G.N.: *A numerical model for the prediction of frost damage to brickwork*. Masonry International, vol.4, no.3, pp.89-93, 1991.

Kralj B.; Pande, G.N. & Middleton J.: *On the mechanics of frost damage to brick masonry*. Computers & Structures, vol.41, no.1, pp.53-66, 1991.

Kreijger, P.C.: *The skin of concrete. Composition and properties*. Materials and Structures, vol.17, no.100, pp.275-283, 1984.

Kukko H. & Paroll H. (editors): *Nordiskt ringtest rörande provningsmetoder för betongs frostbeständighet - referensprovning med fyra testmetoder*. NORDTEST Projekt nr 1053-92 Frostbeständighet - Provningsmetoder. Lab f Byggnadsmaterial, VTT, Espoo, Finland, juni 1993.

Kung J.: *Frost durability study on Canadian clay bricks. Part I: Introduction and sampling. Part II: Thermal gradient and quality of burnt bricks in kilns. Part III: Characterization of raw materials and burnt bricks*. Durability of Building Materials, vol.5, no.2, pp.103-143, 1987.

Lange, D.A.; Jennings, H.M. & Shah, S.P.: *Image analysis techniques for characterization of pore structure of cement-based materials*. Cement and Concrete Research, vol.24, no.5, pp.841-853, 1994.

Litvan, G.G.: *Phase transitions of adsorbates: III, Heat effects and dimensional changes in nonequilibrium temperature cycles*. Journ. Colloid Interface Science, vol.38, no.1, pp.75-83, 1972a.

Litvan, G.G.: *Phase transitions of adsorbates: IV, Mechanism of frost action in hardened cement paste*. Journal of the American Ceramic Society, vol.55, no.1, pp.38-42, 1972b.

MacInnis C. & Beaudoin, J.J.: *Effect of degree of saturation on the frost resistance of mortar mixes*. Journ. ACI, Proc. vol.65, pp.203-207, 1968.

Manns W.: *Bemerkungen zum Abstandsfaktor als Kennwert für den Frostwiderstand von beton*. Beton, vol.20, no.6, pp.253-255, 1970. Betontechnische Berichte, Forschungsinstitut der Zementindustrie.

Mielenz, R.C. et al: *Origin, evolution and effects of the air void system in concrete*. Part 1: Entrained air in unhardened concrete, pp.95-121. Part 2: Influence of type and amount of air-entraining agent, pp.261-272. Part 3: Influence of w-c ratio and compaction, pp.359-375. Part 4: The air-void system in job concrete, pp.507-517 + discussion pp.1353-1362. Journ. ACI, Proc. vol.55, July 1958 - June 1959.

Monteiro, P.J.M.; Rashed I.; Bastacky J. & Hayes, T.L.: *Ice in cement paste as analyzed in the low-temperature scanning electron microscope*. Cement and Concrete Research, vol.19, no.2, pp.306-314, 1989.

Munch-Petersen, J.F.: *Fugtmåledybler*. Rapport no.198, Inst.f.Husbygning, Den Polytekniske Lærestalt, Danm. tekniske Højskole. Lyngby, 1990.

Maage M.: *Frost resistance and pore size distribution in bricks*. Rapport BML 80.201, Institutt for Bygningmateriale, Norges tekniske Høyskole. Trondheim, 1980.

Maage M.: *Frost resistance and pore size distribution in bricks*. Materials and Structures, vol.17 no.101, pp.345-350, 1984.

Nerenst P.: *Frost action in concrete*. Paper VI-2, 4th Int.Symp. on Chemistry of Cement, Washington D.C., pp.807-833, 1960.

Neville, A.M.: *Properties of concrete*. 3rd edition. Longman Scientific & Technical, UK. 1981.

Nielsen, C.B.: *Salts in porous building materials*. PhD-thesis. Teknisk Rapport 243/1991, Laboratoriet for Bygningmaterialer (LBM), DTH. Lyngby, 1991.

Nielsen, C.B.: *Brugervejledning til SKANFRYS*. Teknisk Rapport 258/1992, LBM, DTH. Lyngby, 1992.

Nielsen, L.Fuglsang: *Interne Spanninger sowie Schwind- und Temperaturdeformationen des Betons*. Cement and Concrete Research, vol.4, no.1, pp.31-44, 1974.

Nielsen, L.Fuglsang: *Revnebevægelse i lineær-viskoelastiske materialer*. Bygningstatistiske Meddelelser, vol.49, no.1, pp.1-45, 1978.

Nielsen, L.Fuglsang: *Elastic Properties of Two-Phase Materials*. Materials Science and Engineering, vol.52, no.1, pp.39-62, 1982a.

Nielsen, L.Fuglsang: *On the mechanical behavior of materials with interacting cracks*. pp.141-149 in: IUFRO-Engineering Group Meeting, Borås, Sweden, 1982. Proc. IUFRO S5.02, Chalmers University of Technology, Department of Civil Engineering, Göteborg, 1982. Also: Technical Report 106/82, Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark. Lyngby, 1982b.

Nielsen, L.Fuglsang: *Elasticity and damping of porous materials and impregnated materials*. Journal of the American Ceramic Society, vol.67, no.2, pp.93-98, 1984.

Nielsen, L.Fuglsang: *Materiale mekanik*. Forelæsningsnoter. Teknisk Rapport 169-A/1986, Laboratoriet for Bygningmaterialer (LBM), DTH. Lyngby, 1986.

Nielsen, L.Fuglsang: *Stiffness and strength of porous materials*. Teknisk Rapport 174/1987, LBM, DTH. Lyngby, 1987.

Nielsen, L.Fuglsang: *Strength and stiffness of porous materials*. Teknisk Rapport 187/1988, LBM, DTH. Lyngby, 1988a.²

Nielsen, L.Fuglsang: *Materialemechanik II. Rheologi, brud, kompositmaterialer og levetid*. Forelæsningsnoter. Teknisk Rapport 189/1988, LBM, DTH. Lyngby, 1988b.

Nielsen, L.Fuglsang: *Selvødelæggelse af imprægnerede porøse materialer*. Teknisk Rapport 192/1988, LBM, DTH. Lyngby, 1988c.

Nielsen, L.Fuglsang: *Frostødelæggelse i porøse materialer - en beregningsprocedure*. Teknisk Rapport 197/1989, LBM, DTH. Lyngby, 1989.

Nielsen, L.Fuglsang: *Strength and stiffness of porous materials*. Journal of the American Ceramic Society, vol.73, no.9, pp.2684-2689, 1990a.

Nielsen, L. Fuglsang: *Beton og lignende materials stivhed - en ny rationel prediktionsmetode*. Teknisk Rapport 208/1990, LBM, DTH. Lyngby, 1990b.

Nielsen, L.Fuglsang: *Shrinkage and swelling of composites - strain and stress caused by hygro-thermal action and solidification or freezing of liquid impregnant*. Teknisk Rapport 220-A/1990, LBM, DTH. Lyngby, 1990d.

Nielsen, L.Fuglsang: *Shrinkage and swelling of composites - strain and stress caused by hygro-thermal action and solidification or freezing of liquid impregnant*. Bygningsstatistiske Meddelelser, vol.62, no.3, pp.47-78, 1991a.³

Nielsen, L.Fuglsang: *Sorption, pore size distribution and shrinkage of porous building materials*. Teknisk Rapport 245/91, LBM, DTH. Lyngby, 1991b.

Nielsen, L. Fuglsang: *Betons krybning og stivhed - en rationel prediktionsmetode*. FYM-DIA rapport, Fysik- og Materialesektionen, Danmarks Ingeniør Akademi. Lyngby, 1991c.

Nielsen, L.Fuglsang: *Mechanics of composite material subjected to eigenstress. With special reference to frost resistance of porous brittle material*. SBI Bulletin 96. Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm, 1993a.

Nielsen, L.Fuglsang: *Strength development in hardened cement paste: examination of some empirical equations*. Materials and Structures, vol.26, no.159, pp.255-260, 1993b.

Nielsen, A.M. & Markussen, J.S.: *Vejledning i brug af datalogger til temperaturmåling*. Teknisk Rapport 224/91, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH. Lyngby, 1991.

² Revideret udgave af [L.F.Nielsen,87]

³ Med visse afvigelser tidligere udgivet som [L.F.Nielsen,1990d]

Nieminen P. & Romu M.: *Porosity and frost resistance of clay bricks*. pp.103-117 in: Proc. 8th Int. Brick and Block Masonry Conference, 19-21 Sep 1988 (J.W. de Courcy: editor). Trinity College, Dublin, Rep. of Ireland. 1988.

Olsen, M.P.J.: *Mathematical model of the freezing process of concrete and aggregates*. Cement and Concrete Research, vol.14, pp.113-122, 1984.

Paulsen J., Weismann C. & Tranbjerg M.: *Tegl fremstillet med savsmuld. En analyse af tegls styrke- og porestrukturforandringer ved varierende indhold af savsmuld*. Rapport. Kursus i Porøse bygningsmaterialer, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH. Lyngby, 1993.

Pedersen, C.R.: *Combined heat and moisture transfer in building constructions*. PhD-thesis. Report no.214, Thermal Insulation Laboratory, Technical Univ. of Denmark. 2nd edition, Lyngby, 1990.

Penttala, V.E.: *Effects of microporosity on the compression strength and freezing durability of high-strength concretes*. Magazine of Concrete Research, vol.41, no.148, pp.171-181, 1989.

Petersson, P.-E.: *Inverkan av salthaldiga miljöer på betongs frostbeständighet*. Tekniskrapport, SP-Rapp 1984:34, Statens Provningsanstalt, Borås, 1984.

Petersson, P.-E.: *The influence of silica fume on the salt frost resistance of concrete*. Technical report, SP-Rapp 1986:32, SP, Borås. 1986.

Petersson, P.-E.: *The use of air-entraining and plasticizing admixtures for producing concrete with good salt-frost resistance*. SP-Rapp 1989:37, Statens Provningsanstalt, Borås, 1989.

Pickett G.: *Equations for computing elastic constants from flexural and torsional resonant frequencies of vibration of prisms and cylinders*. PCA Bulletin no. 7, Chicago 1945. Reprint from Proc. ASTM, vol.45, Philadelphia, 1945.

Pickett G.: *Flow of moisture in hardened cement during freezing*. Proc. Highway Res. Board, vol.32, pp.276-284, 1953.

Pigeon M., Plante P. & Plante M.: *Air-void stability, Part I: Influence of silica fume and other parameters*. ACI Materials Journal, vol.86, no.5, pp.482-490, 1989.

Pigeon M., Saucier F. & Plante P.: *Air-void stability, Part IV: Retempering*. ACI Materials Journal, vol.87, no.3, pp.252-259, 1990.

Pigeon M., Gagné R., Aitcin P.-C. & Banthia N.: *Freezing and thawing tests of high-strength concrete*. Cement and Concrete Research, vol.21, no.5, pp.844-852, 1991.

Plante P., Pigeon M. & Foy C.: *The influence of water-reducers on the production and stability of the air-void system in concrete*. Cement and Concrete Research, vol.19, pp.621-633, 1989.

Plähn J. & Golz W.: *Vergleichungs-untersuchungen an vier Prüfverfahren für den Frost-Tausalz-widerstand von Beton*. Strasse und Autobahn, vol.35, no.1, pp.14-21, 1984.

Podvalnyi, A.M.: *Phenomenological aspect of concrete durability theory*. Materials and Structures, vol.9, no.51, pp.151-162, 1976.

Poulsen E., AEC Rådgivende Ingeniører A/S, Trørød. Mundtlig kommunikation, jan 1993.

Powers, T.C.: *A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete*. ACI Journal, Proc. vol. 41, pp.245-272, 1945.

Powers, T.C.: *The air requirement of frost-resistant concrete*. Proc. Highw. Res. Board, pp.184-211, vol.29, 1949.

Powers, T.C.: *Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests*. Proc. ASTM, vol.55, pp.1132-1155, 1955.

Powers, T.C.: *Resistance of concrete to frost at early ages*. Proc. RILEM Symp. Winter Concreting - Theory and Practice. Session C. The Danish National Institute of Building Research, Special Report. København, 1956.

Powers, T.C. & Brownyard, T.L.: *Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste*. ACI Journal, Proc. vol.43, okt 1946 - apr 1947.

Powers, T.C. & Helmuth, R.A.: *Theory of volume changes in hydrated Portland cement paste during freezing*. Proc. Highway Research Board, vol.32, pp.285-297, 1953.

Prout W. & Hoff, W.D.: *Fundamental studies of frost damage in clay brick*. pp.39-51 in: Proc. 5th Int. Conf. on Durability of Building Materials and Components. Brighton, UK, 7-9 Nov 1990. Baker, Nixon, Majumbar & Davies (editors). Chapman & Hall, London 1991.

Quenard D. & Sallee H.: *Water vapour adsorption and transfer in cement-based materials: a network simulation*. Materials and Structures, vol.25, no.153, pp.515-522, nov 1992.

RILEM TC-117: *Freeze-thaw resistance of concrete*. Research seminar held in Lund, June 17, 1991. RILEM Committee TC-117 FDC (G.Fagerlund, M.J.Setzer: editors). Report TVBM-3048, Division of Building Materials, Lund Inst. of Technology. Lund 1992.

RILEM TC-117: *International workshop on the resistance of concrete to scaling due to freezing in the presence of deicing salts*. 30-31 August 1993. RILEM Committee TC 117. Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB). Sherbrooke - Laval, Canada, 1993.

Robinson, G.C.: *The relationship between pore structure and durability of brick*. American Ceram. Soc. Bull. (Ceramic Bull.), vol.63, no.2, pp.295-300, 1984.

Robinson, G.C. & Borchelt, J.G.: *Factors influencing clay brick durability*. pp.1295-1304 in: Proc. 10th Int. Brick and Block Masonry Conference, July 5-7, 1994. Masonry Council of Canada, The University of Calgary, Canada, 1994.

Rombén L.: *Accelererad provning av beständighet*. pp.19-20 in: Årsberättelse 1972/73. CBI, Stockholm, 1973.

Sanderson, T.J.O.: *Ice mechanics - Risks to offshore structures*. Graham & Trotman, 1988.

Sandin K.: *Fuktilstånd och frostpåverkan i skalmurar*. Bygg & Teknik, 4/89, pp.32-34.

Sandin K.: *Skalmurskonstruktionens fukt- och temperaturbetingelser*. Rapport R43:1991, Statens råd for byggnadsforskning. Stockholm, 1991.

Sandin K.: *Fuktsäker skalmur med träregelstomme*. AMA-nytt Informationsdel AF Mark Hus, no.1, pp.45-48, 1992.

Sandström M.: *Frostprovning av tegel*. Nordtestprojekt nr 898-90. Arbetsrapport SP-AR 1991:63, Byggnadsteknik, Statens Provningsanstalt, Borås 1991.

Sauzier F., Pigeon M. & Plante P.: *Air-Void Stability, Part III: Field tests of superplasticized concrete*. ACI Mat. Journal, vol.87, no.1, pp.3-11, 1990.

Sauzier F., Pigeon M. & Cameron G.: *Air-Void Stability, Part V: Temperature, general analysis and performance index*. ACI Mat. Journal, vol.88, no.1, pp.25-36, 1991.

Sellevoid, E.J.: *Betongens funksjonsdyktighet. Delrapport nr.26: Frostbestandighet: Ringforsøk - salt/frost avskalling*. Rapport STF65 A88089, SINTEF. Trondheim, 1988a.

Sellevoid, E.J.: *Betongens funksjonsdyktighet. Delrapport nr.27: Frostbestandighet: Salt/Frost-avskalling. Effekt av prøvebetingelser og betonsammensetning*. Rapport STF65 A88090, SINTEF. Trondheim, 1988b.

Sellevoid, E.J.: *Condensed silica fume in concrete*. FIP - State of the art Report. Thomas Telford, London, 1988c.

Sellevoid, E.J. & Farstad T.: *Frost/salt-testing of concrete. Effect of test parameters and concrete moisture history.* Nordic Concrete Research, vol.10, pp.121-138, 1991.

Sellevoid, E.J.; Jacobsen S. & Bakke, J.A.: *High-strength concrete without air entrainment: effect of rapid temperature cycling above and below 0°C.* pp.153-164 in: [RILEM TC-117,93], 1993.

Sellevoid, E.J.; Gran, H.C.; Maage M.; Nilsen T. & Skjeggerud K.: *Betongens funksjonsdyktighet. Delrapport nr.2: Frostbestandighet.* Rapport STF65 A86051, SINTEF. Trondheim, 1986.

Setzer, M.J.: *Einfluss des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons.* Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, heft 280, Berlin, 1977.

Setzer, M.J.: *Interaction of water with hardened cement paste.* pp.415-439 in: Proc. Conference on Advances in Cementitious Materials. Nat. Bureau of Standard, Gaithersburg, Maryland. 1990.

Setzer, M.J.: *Basic phenomena of frost action.* pp.5-17 in: [RILEM TC-117,92], 1992.

Setzer, M.J.: *On the abnormal freezing of pore water and testing of freeze-thaw and deicing salt resistance.* pp.3-20 in: [RILEM TC-117,93], 1993.

Setzer, M.J. & Hartmann V.: *Verbesserung der Frost-Tausalz-Widerstands-Prüfung.* Betonwerk + Fertigteil-Technik, vol.57, no.9, pp.73-82, 1991a.

Setzer, M.J. & Hartmann V.: *CDF-Test - Prüfvorschrift.* Betonwerk + Fertigteil-Technik, vol.57, no.9, pp.83-86, 1991b.

Setzer, M.J. & Schrage I.: *Prüfung der Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonpflastersteinen.* Betonwerk + Fertigteil-Technik, vol.57, no.6, pp.58-69, 1991.

Sidebottom, E.W. & Litvan, G.G.: *Phase transition of adsorbates. Part 2 - Vapour pressure and extension isotherms of the porous-glass + water system below 0°C.* Trans. Faraday Soc., vol.67, pp.2726-2736, 1971.

Siebel E. & Retschke T.: *Three different methods for testing the freeze-thaw resistance of concrete with and without salt - European round robin test.* pp.75-91 in: [RILEM TC 117,93], 1993.

Soroka I.: *Portland cement paste and concrete.* The MacMillan Press Ltd., London, 1979.

Springenschmid R.: *Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton.* Zement und Beton, vol.14, pp.19-25, 1969.

Springenschmid R.: *Erfahrungen bei der Verwendung von Luftporenbildern im Strassenbau.* Betonwerk + Fertigteil-Technik, vol.38, no.8, pp.587-593, 1972.

Studer W.: *Testing of frost resistance on fresh concrete,* pp.160-171ff in: RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under normal outdoor exposure. Hannover, 26.-29. marts 1984.

Studer W.: *Experiences with the critical degree of saturation method to measure frost resistance of concrete.* pp.129-135 in: [RILEM TC-117,92], 1992.

Stupart, A.W.: *A survey of literature relating to frost damage in bricks.* Masonry International, vol.3, no.2, pp.42-50, 1989.

Svennerstedt B.: *Ytfukt på byggnadsmaterial.* Forskningsrapport TN:16, Statens Inst.f.Byggnadsforskning. Gävle, 1989.

Taber S.: *Frost heaving.* Journal of Geology, vol.37, pp.428-461, 1929.

Taber S.: *Freezing and thawing of soils as factors in the destruction of road pavements.* Public Roads, vol.11, pp.113ff, 1930.

Tegl 1. *Teglfremstilling.* Kalk- og Teglinformation, Hasselager. 2.udgave, 1991.

van der Klugt, L.J.A.R.: *Frost testing by uni-directional freezing.* Br. Ceram. Trans. Journ., vol. 87, pp. 8-12, 1988.

Verbeck, G.J. & Klieger P.: *Studies of "salt" scaling of concrete.* Highway Research Board Bulletin 150, pp.1-13, Washington D.C., 1957.

Vesikari E.: *The influence of capillary and air porosity on the frost-salt resistance of concrete.* pp.193-216 in: Beton & frost. Nordisk Workshop okt 1984. DBF-publikation nr.22. Redigeret af Dirch H. Bager. Dansk Betonforening, København, 1985.

Villadsen J.: *Pore structure in cement based materials.* PhD-thesis. Teknisk Rapport 277/1992, Lab f Bygningmaterialer, DTH. Lyngby, 1992.

Vinkeloe R.: *Prüfverfahren zur Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls von Betonprismen.* Tonindustrie Zeitung, vol.86, heft 10, pp.272-276, 1962.

Vuorinen J.: *On the use of Dilation Factor and degree of saturation in testing of concrete for frost resistance.* Nordisk Betong 1970:1, pp.37-64.

Vuorinen J.: *Om skyddsporforholdet hos betong.* pp.283-292 i: Beton & frost. Nordisk Workshop okt 1984. DBF-publikation nr.22. Redigeret af Dirch H. Bager. Dansk Betonforening, København, 1985.

Wang, J.A., Lubliner J. & Monteiro, P.J.M.: *Effect of ice formation on the elastic moduli of cementpaste and mortar*. Cement and Concrete Research, vol.18, pp.874-885, 1988.

Warris B.: *The influence of air-entrainment on the frost resistance of concrete. Part A: Void distribution*. Cement och Betoninstitutet (CBI), Proc. no.35, Stockholm, 1963.

Warris B.: *The influence of air-entrainment on the frost resistance of concrete. Part B: Hypothesis and freezing experiments*. CBI, Proc. no.36, Stockholm, 1964.

West, H.W.H., Ford, R.W. & Peake F.: *A panel freezing test for brickwork*. Br. Ceram. Trans. Journ., vol. 83, pp. 112-115, 1984.

Whiting D. & Schmitt J.: *A model for deicer scaling resistance of field concretes containing high-range water reducers*. ACI SP-119, pp.343-359, 1989.

Ylä-Mattila R.: *Frost stress on and frost damage to cavity wall with good thermal insulation and frost resistance tests*. pp.970-980 in: Proc. 8th Int. Brick and Block Masonry Conference, 19-21 Sep 1988 (J.W. de Courcy: editor). Trinity College, Dublin, Rep. of Ireland. 1988.

Zech B. & Setzer, M.J.: *The dynamic elastic modulus of hardened cement paste. Part I: A new statistical model - water and ice filled pores*. Materials and Structures, vol.21, pp.323-328, 1988.

Zech B. & Setzer, M.J.: *The dynamic elastic modulus of hardened cement paste. Part 2: Ice formation, drying and pore size distribution*. Materials and Structures, vol.22, pp.125-132, 1989.

Enkelte ældre referencer er ikke studeret i originalversionen.

Normer, standarder, tekniske beskrivelser, manualer

ASTM C 215: *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Frequencies of Concrete Specimens*. ASTM C 215-91, dec 1991. American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards, vol.04.02.

ASTM C 666: *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. ASTM C 666-90, dec 1990. American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards, vol.04.02.

ASTM C 671: *Standard Test Method for Critical Dilation of Concrete Specimens Subjected to Freezing*. ASTM C 671-86, nov 1986. American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards, vol.04.02.

ASTM C 672: *Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*. ASTM C 672-91a, jan 1992. American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards, vol.04.02.

B & K Manual: *Technical documentation. Multichannel Analysis System Type 3550*. Vol.1: Guided Tours. Vol.2: Operation, Reference & Hardware (2 dele). Vol.3: User-Definable Functions. Vol.4: IEEE/IEC Interface. Brüel & Kjær, dec 1992.

DIN 52 252: *Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit von Vormauerziegeln und Klinkern*. Allseitige Befrostung von Einzelziegeln, DIN 52 252 teil 1. Befrostung von Ziegeln in Prüfblöcken, DIN 52 252 teil 2. Einseitige Befrostung von Prüfwänden, DIN 52 252 teil 3. DIN Deutsches Institut für Normung, dec 1986.

DS 411: *Norm for Betonkonstruktioner*. DS 411. 3. udgave 1984. Dansk Ingeniørforening, Normpublikation NP-169-N, Teknisk Forlag, København.

DS 423.24: *Betonprøvning. Hærdnet beton. Trækstyrke*. DS 423.24. Dansk Standardiseringsråd. 2.udg. marts 1984.

NT Build 419: *Masonry units. Frost resistance*. NT-Build 419. Approved 1993-05. NORDTEST, Helsinki, Finland.

SS 13 72 44: *Betongprovning - Hårdnad betong - Frostresistens*. SS 13 72 44, 1.udgave. Standardiseringskommisionen i Sverige. jan 1988.

I denne ph.d.-afhandling vises, at begrebet kritisk vandmætningsgrad er velegnet til at udtrykke frostfastheden af porøse byggematerialer. Der præsenteres en beregningsmodel til bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader baseret på revnemekanik og fasegeometri af to-fase materialer, herunder porøse materialer. Specielt fokuseres på, at porestrukturen har betydning for spændingsudviklingen i materialet under frysning. Der er vist resultater fra eksperimentelle undersøgelser til verifikation af modellen foretaget på ikke-luftindblandede betoner og tegl. – Beregning af kritisk vandmætningsgrad sammenholdes med eksperimentelt bestemte værdier samt med resultater af standardiseret frost-tø-prøvning. På basis heraf analyseres og diskuteres modellen, dens virkemåde og dens forudsætninger.

