

SBI - note.

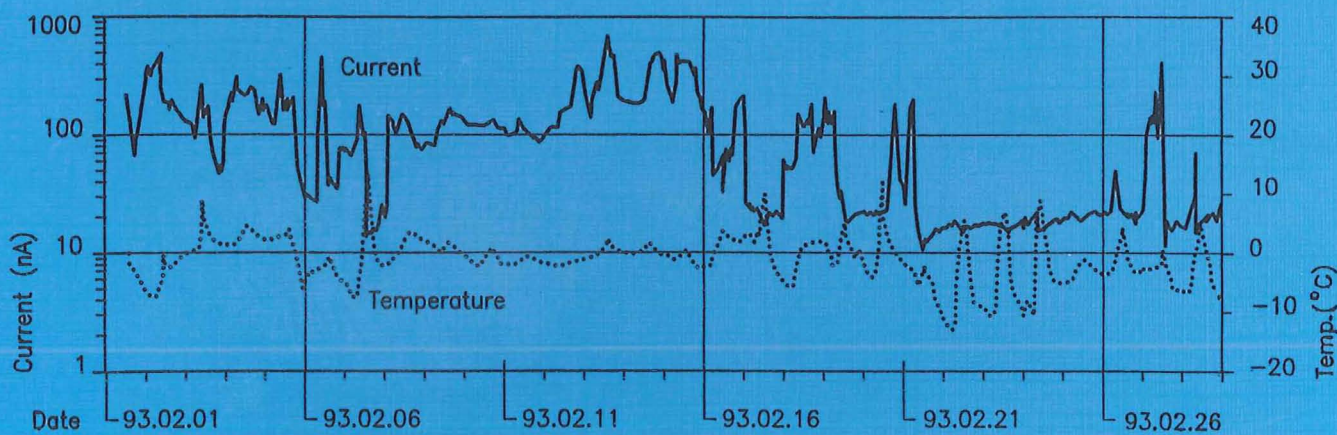
Byggematerialers frostbestandighed



Supplerende undersøgelser

Ph.d.-afhandling

SUPPLERENDE UNDERSØGELSER TIL SBI-RAPPORT 268 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1996



Byggematerialers frostbestandighed

Supplerende undersøgelser

ERNST JAN DE PLACE HANSEN

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

ex - 1
- 6 JAN. 1997

01401 P



Ph.d.-afhandling

SUPPLERENDE UNDERSØGELSER TIL SBI-RAPPORT 268 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1996

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	7
1. Forsøgsplan	9
1.1 Indledning	9
1.2 Eksposering i laboratoriet og naturen	9
1.2.1 Fugttransport	11
1.2.2 Eksposering i naturen	11
1.3 Anvendte materialer	15
2. Beskrivelse af forsøgsmetoder	16
2.1 Fugttransport	16
2.1.1 Diffusion	16
2.1.2 Beregning af fugttransport (MATCH)	18
2.1.3 Gammastråling	19
2.2 Naturlig eksposering	20
2.2.1 Vådtidsmåling (Wetcorr)	20
2.2.2 Registrering af vejrdata	21
2.2.3 Måling af ultralydhastighed	22
2.2.4 Fugtmåledyvler	24
3. Forsøgsresultater og diskussion	26
3.1 Fugttransport	26
3.1.1 Diffusion	26
3.1.2 Beregning af fugttransport (MATCH)	27
3.1.3 Gammastråling	27
3.2 Naturlig eksposering	28
3.2.1 Vådtidsmåling og vejrdata	28
3.2.2 Måling af ultralydhastighed	31
3.2.3 Fugtmåledyvler	32
4. Konklusion	35
Summary	39
Symboliste	41
Litteratur	43
Bilag A Forsøgsopstillinger - tekniske beskrivelser	47
A1 Naturlig eksposering	47
A1.1 Wetcorr - tekniske specifikationer	47
A1.2 Overførsel og behandling af data fra Wetcorr	48
A1.3 Datataker DT 100 I	51
A1.4 Databehandling - fugtmåledyvler	53
Bilag B Måleresultater	55
B1 Fugttransport	55
B1.1 Diffusionsforsøg	55

ISBN 87-563-0948-1.

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

Tryk: SBI, Hørsholm.

Statens Byggeforskningsinstitut,

Postboks 119, 2970 Hørsholm.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:

Supplerende undersøgelser til SBI-rapport 268:

Byggematerialers frostbestandighed, 1996.

B1.2	Gammastråling	58
B2	Naturlig eksponering	58
B2.1	Wetcorr	59
B2.2	Vejrdata	63
B2.3	Ultralyd	66
B2.4	Dyvler	67

Forord

Den foreliggende rapport er en del af ph.d.arbejdet "Byggematerialers frostbestandighed", der i alt består af tre dele, og er et led i opfyldelse af kravene for erhvervelse af ph.d.graden ved Danmarks Tekniske Universitet (DTU).

De to øvrige dele er arbejdets hovedrapport "*Byggematerialers frostbestandighed - Modelling af kritiske vandmætningsgrader*" (SBI-rapport 268) og "*Byggematerialers frostbestandighed - Bilag*".

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

I ph.d.arbejdet præsenteres og diskuteres en beregningsmodel til bestemmelse af kritiske vandmætningsgrader i forbindelse med frysning. En række laboratorieundersøgelser er udført for at bestemme de parametre, der indgår i beregningsmodellen.

Som supplement til disse undersøgelser er udført en række eksponeringsforsøg, der har haft til formål at underbygge laboratorieundersøgelserne. Da det kun i begrænset omfang har været muligt at foretage den ønskede kobling mellem laboratorieundersøgelser og eksponeringsforsøg, rapporteres hovedparten af sidstnævnte i den foreliggende rapport.

Det er tilstræbt, at rapporten så vidt muligt kan læses uafhængigt af projektets hovedrapport "*Byggematerialers frostbestandighed - Modelling af kritiske vandmætningsgrader*" (SBI-rapport 268). Der vil derfor være et vist overlap mellem de to rapporter.

Hørsholm, juni 1995
Ernst Jan de Place Hansen

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

Hørsholm, juli 1996
Ernst Jan de Place Hansen

Sammenfatning

Denne rapport omhandler eksponeringsforsøg, udført som supplerende undersøgelser i ph.d. projektet "Byggematerialers frostbestandighed".

I projektets hovedrapport præsenteres en beregningsmodel til bestemmelse af porøse materialers kritiske vandmætningsgrader ved frysning. Modellen diskuteres på basis af laboratorieundersøgelser.

Frivillig vandopsugning, standardiseret frostprøvning samt naturlig eksponering udføres for at sammenholde modellens forudsigelser med forskellige former for eksponering. Transportkoefficienter for damp- og væsketransport bestemmes for at kunne simulere fugttransport ved frostprøvning og naturlig eksponering.

Fugtforhold på og i naturligt eksponerede emner følges. Informationer om vejrforhold indsamles. Til at følge nedbrydning ved naturlig eksponering benyttes ultralydmåling. Fugtindhold i frostekspnede emner forsøges bestemt eksperimentelt vha gammastråling.

Forsøgene udføres på beton med vand/cementforhold på 0,3, 0,45 og 0,7 uden luftindblanding.

Frivillig vandopsugning og standardiseret frostprøvning rapporteres i projektets hovedrapport "*Byggematerialers frostbestandighed - modellering af kritiske vandmætningsgrader*" (SBI-rapport 268).

Diffusionsforsøg viser en tydelig forskel på de tre betoners evne til at transportere fugt, på såvel damp- som væskeform. Målinger med gammastråling viser, at det er muligt at skelne mellem fugtindholdet i vandmættet og tør beton med vand/cementforhold 0,3. En egentlig fugtfordeling, som den fx opnås ved frostprøvning, er ikke bestemt.

Efter to års naturlig eksponering er der ikke nogen synlig nedbrydning og ingen ændring af ultralydhastigheden. Der er overensstemmelse mellem fugtforhold ved overfladen af eksponerede emner, udtrykt ved vådtiden, samt vejrforhold, udtrykt ved den relative fugtighed. Uanset årstiden viser målinger af fugtindhold inde i emnerne, bestemt vha trædyvler placeret i borede huller, et meget højt fugtniveau, hvilket tyder på indtrængende fugt.

Eksponeringsforsøgene 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.

Det har vist sig, at fugttransportkoefficienterne er meget fugtafhængige, især for transport på væskeform. Derfor kræver simulering af fugttransport under instationære forhold - som fx standardiseret frostprøvning - et detaljeret kendskab til transportkoefficienter. Et sådant detailkendskab foreligger ikke og det har derfor ikke været muligt at foretage de ønskede beregninger af fugttransport.

Generelt viser forsøgene, at der til undersøgelse af beton med lavt fugtindhold, stilles store krav til præcision af målinger.

1. Forsøgsplan

1.1 Indledning

Det overordnede mål for projektet "Byggematerialers frostbestandighed" er ved laboratorieforsøg at verificere en beregningsmodel til bestemmelse af porøse materialers kritiske vandmætningsgrader. Modellen præsenteres og diskuteres i hovedrapporten, [de Place,96a].

Sideløbende udføres forsøg med det formål at sammenholde modellens forudsigelser med 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 diffusionsegenskaber, dvs. undersøgelser af materialets evne til at optage og transportere fugt. Til disse forsøg fremstilles beton, som beskrevet i afsnit 1.3.

Ved en kobling af laboratorie- og eksponeringsforsøg ønskes det kontrolleret, om beregningsmodellens 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. Sådanne udsagn involverer anvendelse af fugttransportberegninger under instationære forhold. Som tilnærmelse kan vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning (kapillarsugning) benyttes, jf. [Fagerlund,72b,77].

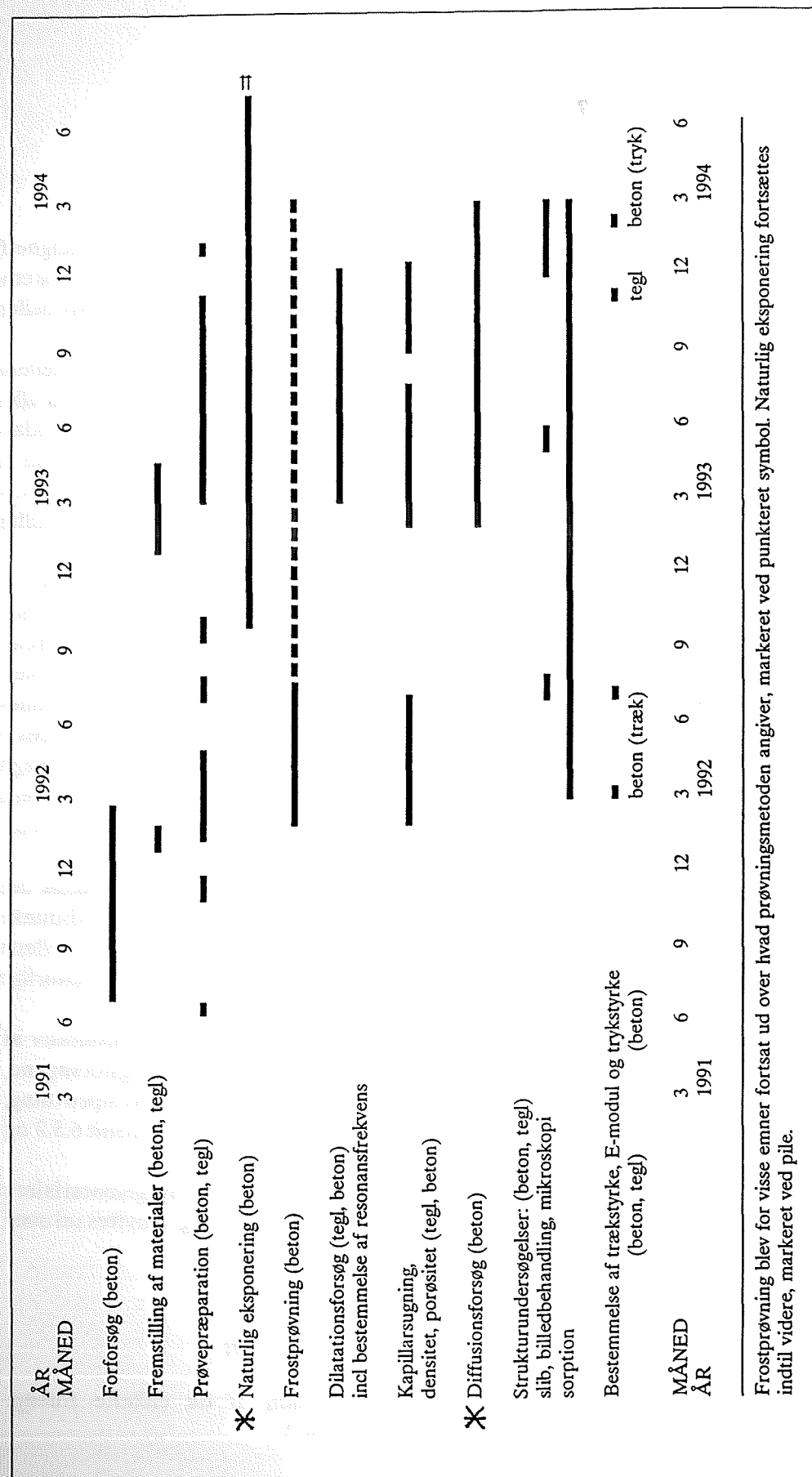
Ved at foretage beregninger af fugttransport i materialet ønskes det undersøgt, 1) om vandmætningsgraden ved frostprøvning, på det tidspunkt hvor der opstår skader i materialets overfladelag, svarer til modellens forudsigelser, 2) hvilke vandmætningsgrader, der opnås i naturligt eksponerede emner under givne eksponeringsforhold.

Det har ikke været muligt på basis af de opnåede forsøgsresultater at foretage denne kobling. Derfor rapporteres eksponeringsforsøgene, bortset fra kapillarsugningsforsøg og standardiseret frostprøvning, selvstændigt i den foreliggende rapport. I hovedrapportens afsnit 6.5.2 og 6.7 gives en sammenfatning af resultaterne, [de Place,96a].

En samlet oversigt over de udførte forsøg i projektet "Byggematerialers frostbestandighed" ses på figur 1.1. Til laboratorieforsøg benyttes ud over beton også tegl, jf. afsnit 4.4, [de Place,96a].

1.2 Eksponering i laboratoriet og naturen

I det følgende gives en kort præsentation af de enkelte forsøg. Forsøgsmetoder beskrives nærmere i afsnit 2.



Figur 1.1. Forsøgsplan. Oversigt. Forsøg mrk. "*" er omtalt i denne rapport.

1.2.1 Fugttransport

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 , jf. afsnit 2.1.1. Diffusionsforsøg udføres på 15 mm tykke skiver skåret af $\varnothing 100$ mm cylindre.

Diffusionskoefficienter skal kombineret med sorptionsisotemer og pore størrelsesfordelinger¹ danne basis for beregninger af kombineret væske-, damp- og varmetransport vha. programmet *MATCH* (*Moisture and Temperature Calculations for Constructions of Hygroscopic Materials*), [Pedersen,90], jf. afsnit 2.1.2.

Beregning af fugttransport og fugtfordelingsprofiler

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

En teoretisk bestemt fugtfordeling vha. *MATCH* skal sammenlignes med en fugtfordeling bestemt vha. *gammastrålings-fugtmåleudstyr* i forbindelse med standardiseret frostprøvning². Måling med gammastråling omtales i afsnit 2.1.3, og beskrives nærmere i [de Place,93a], [Frandsen & Jensen, 93]. Det er tanken at sammenholde fugtfordelingen under frostprøvning af et bestemt materiale 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.

1.2.2 Eksposering i naturen

På et fladt tag ved Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm anbringes $6 \times 3 \times 40 \times 200 \times 500$ mm betonfliser med en 45° hældning orienteret mod syd. Et udsnit af eksponeringsstationen ses på figur 1.2.

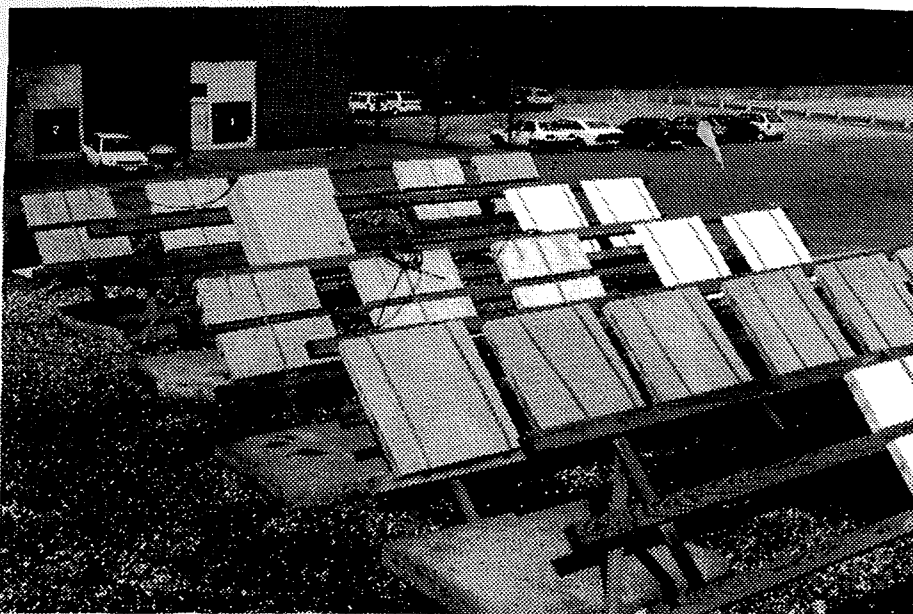
Der foretages måling af fugt- og temperaturforhold ved overfladen samt inde i fliserne. Kombineret med beregninger af fugttransport er formålet med sådanne målinger bl.a. at give oplysninger om aktuelle vandmætningsgrader. Desuden følges betonens nedbrydning vha. måling af ultralydhastighed.

På 2×3 fliser monteres en vådtidsmåler og i 4×3 fliser anbringes et termoelement og en fugtmåledyvel, som vist på figur 1.3, for at kunne registrere fugt- og temperaturforholdene ved overfladen henholdsvis inde i betonflisen.

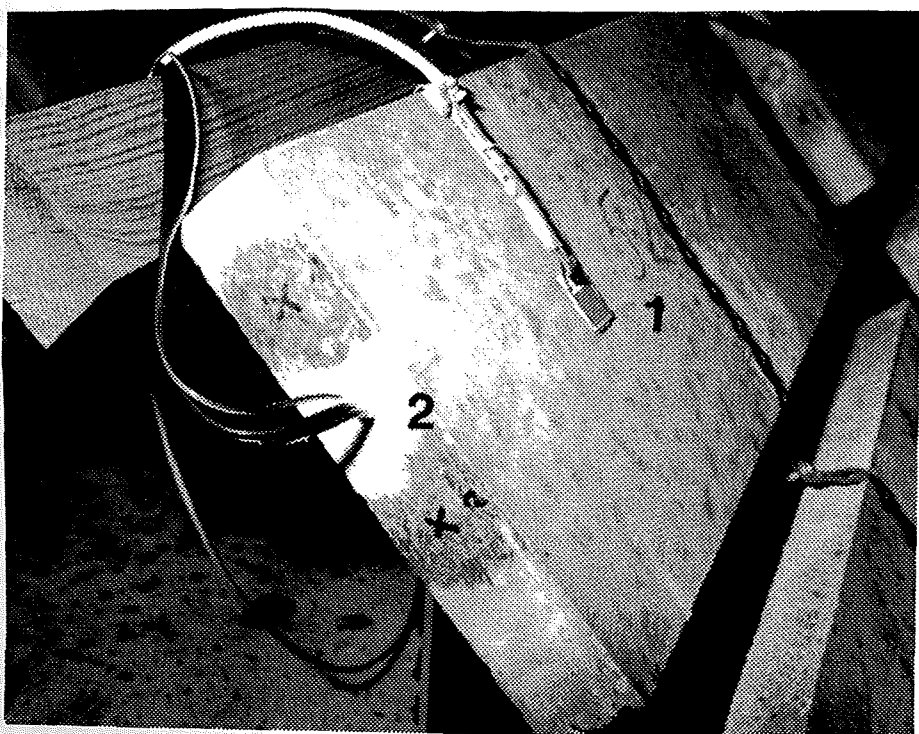
Vådtidsmålere kan fx også støbes ind i et emne, men projektets tidsplan har ikke gjort dette muligt.

¹ Bestemmelse af disse beskrives i afsnit 4.2.3 og 5.3 i hovedrapporten, [de Place,96a].

² Standardiseret frostprøvning beskrives i afsnit 4.3.2 og 5.6 i hovedrapporten.



Figur 1.2. Overblik - eksponeringsstation. Billedet er taget mod nordøst. Fliserne i det aktuelle projekt er fastholdt med ét spændebånd. Kassen på næstbageste række indeholder dataopsamlingsudstyr.



Figur 1.3. 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. Den anden anbringes på den modstående flade, jf. figur 2.5. Punkter er anbragt ca. 40 mm henholdsvis 80 mm fra overhenholdsvis underkant af flisen.

1.2 Eksponering i laboratoriet og naturen

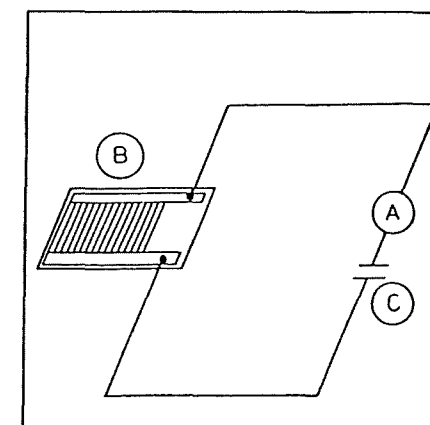
Data fra vådtidsmålerne samt fra halvdelen af termoelementerne og dyvlerne registreres automatisk vha. dataloggere, der er anbragt i en fugttæt kasse på eksponeringsstationen, jf. figur 1.2 og bilag A1.3. Data opsamles månedsvis. De resterende dyvler og termoelementer benyttes til manuel måling.

Den naturlige eksponering fortsætter ud over dette projekt, jf. figur 1.1, dog uden den automatiske dataopsamling.

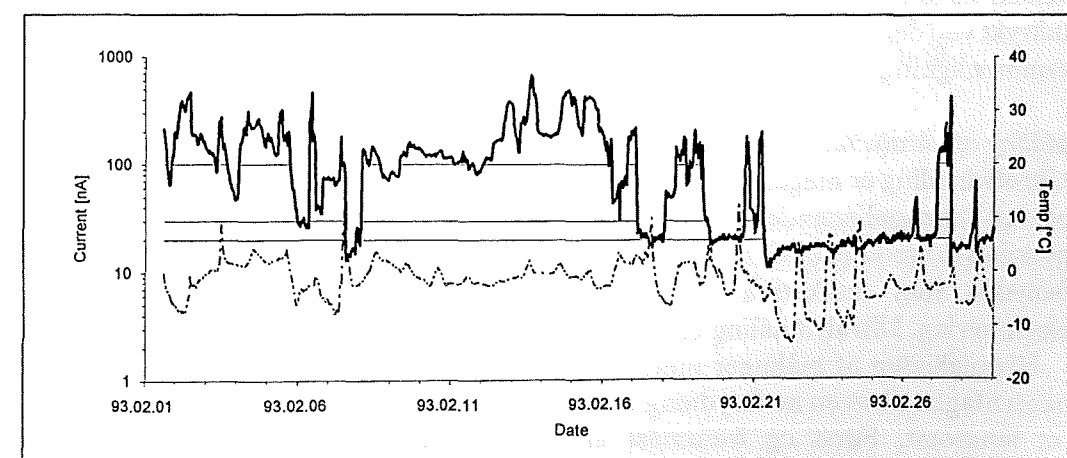
Vådtidsmåling (Wetcorr)

Til måling ved overfladen benyttes et norsk udviklet måleudstyr kaldet Wetcorr. Wetcorr består af måleceller, der fastgøres til materialets overflade, jf. figur 1.3, og dataopsamlingsenheder, jf. afsnit 2.2.1.

Ved at lægge en spænding over målecellen kan overfladefugten registreres, jf. figur 1.4. 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 1.4. Måleprincip til registrering af fugtbelastning, [Svennerstedt,89]. A er amperemeter, B er målecelle, C er spændingskilde. Strømstyrken afhænger af fugtbelastningen.



Figur 1.5. Resultat af måling med Wetcorr. Overfladetemperatur og strøm gennem målecelle som funktion af tiden. Punkteret 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 1.5 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 1.3.

Ved at måle den elektriske modstand mellem to stifter boret ind i dyvlens ene ende, bestemmes fugtindholdet i trædyvlen, som beskrevet i afsnit 2.2.4.

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. Et eksempel på et program til beregning af fugt- og varmetransport er *MATCH*, der kort er beskrevet i afsnit 2.1.2.

Mikroklimaet kan i flere tilfælde afvige væsentligt fra makroklimaet fx under et tagudhæng. I sådanne tilfælde vil data opsamlet vha. vådtidsmålere være et værdifuldt supplement.

I dette projekt udsættes fliserne for fri eksponering, jf. figur 1.2, 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-modulet udvikler sig. Ændringer i det dynamiske E-modul kan benyttes som indikation af, om betonen nedbrydes ved naturlig eksponering. Ultralydmåling er beskrevet i afsnit 2.2.3.

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 1.3.

1.3 Anvendte materialer

Referenceemner

4x3 40x200x500 mm betonfliser samt tre betonprismer opbevares som reference for de eksponerede prøveemner ved 23 °C og 65% *RF*. Der er ikke monteret vådtidsmålere. I alle betonprismer samt i tre fliser er anbragt fugtmåledyvlere. Måling af ultralydhastighed foregår på alle prøveemner. Temperatur aflæses på termohydrograf. Måling foregår manuelt i forbindelse med måling udendørs.

1.3 Anvendte materialer

Til eksponerings- og diffusionsforsøg fremstilles tre betonblandinger med et vand/cementforhold, *w/c*, på 0,3, 0,45 og 0,7 hos AEC Rådgivende Ingeniører A/S i Trørød. Betonserierne benævnes gennemgående ved deres vand/cementforhold, dvs. beton 0.30 osv.

For at opnå en så simpel sammensætning som muligt tilsættes hverken luftindblandingsmidler, flyveaske eller mikrosilica, primært aht. anvendelsen af beregningsmodellen, præsenteret i [de Place,96a]. 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. Betonrecepter er vist i tabel 1.1.

Tabel 1.1. 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 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].

2. Beskrivelse af forsøgsmetoder

2.1 Fugttransport

Porøse materialers evne til at optage, fastholde og transportere fugt, det være sig på væske- eller dampform, og de begreber der er forbundet hermed, er beskrevet i mange forskellige sammenhænge, fx [Gregg & Sing,67], [Ahlgren,72], [Fukthandbok,81], [van der Velden,83], [Beton-Bogen,85], [Hagemann,91].

Dette afsnit vil derfor fokusere på, hvordan de aktuelle fugttransportparametre er bestemt. De omtalte forsøg er kun udført på prøveemner af beton, jf. figur 1.1.

2.1.1 Diffusion

Transport af fugt kan foregå på damp- eller væskeform, kaldet dampdiffusion og kapillarsugning. Drivkraften er en forskel i damptryk, dvs. forskelle i relativ fugtighed, eller væsketryk, fx et hydraulisk undertryk, [Beton-Bogen,85] m.fl. Ydre fugtforhold samt materialets porestruktur afgør, hvilken form transporten foregår på, ofte er der dog tale om en kombination.

Mængden af fugt, der passerer gennem et tværsnit af materialet som følge af diffusion beregnes som

$$\text{flux} = \text{transportkoefficient} \frac{\text{potentialeforskel}}{\text{skivetykkelse}} \quad (2.1)$$

Med en kendt potentialeforskel, dvs. forskel i damp- eller væsketryk, kan transportkoefficienten beregnes ved løbende at måle fluxen.

Opstilling

Diffusionskoefficienter (transportkoefficienter) for porøse materialer kan bestemmes vha. den såkaldte *kop-metode*, [Thorsen,88], [Schou,83] m.fl. Koppen består i de aktuelle forsøg af et 100 mm højt cylindrisk gummirør med en indvendig diameter på 100 mm samt en petriskål, der lukker røret af i den ene ende. Koppen kan benyttes både som "omvendt kop" og "retvendt kop".

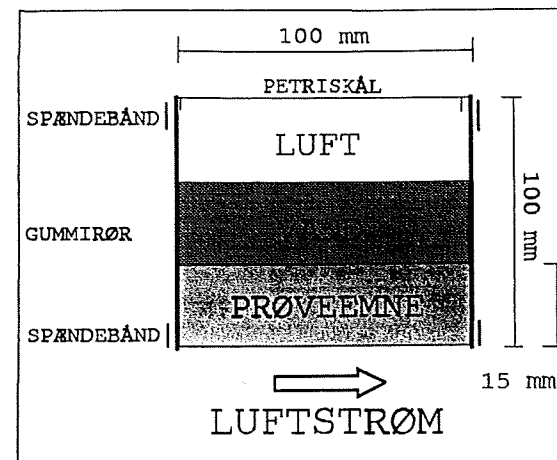
I en *omvendt kop* - eller mere korrekt omvendt våd-kop - spændes en ca. 15 mm tyk skive af materialet fast nederst i røret, hvorefter vand hældes på, til koppen er næsten fyldt, jf. figur 2.1. En petriskål spændes fast øverst for at undgå fordampning.

I en *retvendt kop* spændes materialet fast øverst i koppen. Nederst i koppen placeres fx en petriskål. Petriskålen indeholder en mættet saltopløsning eller silicagel, afhængig af, hvilken situation der ønskes etableret ved undersiden af materialet.

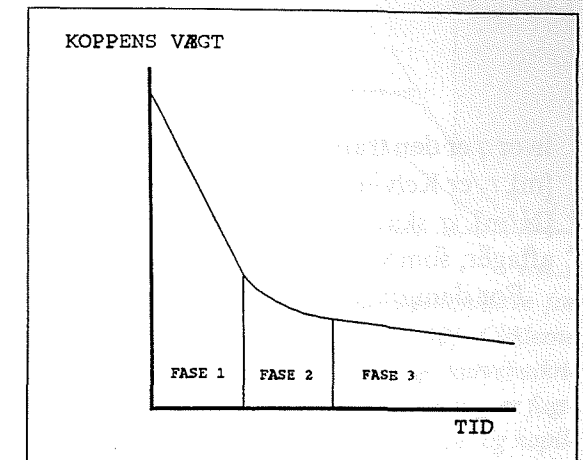
Koppen placeres derefter i et kammer med fastholdt RF og temperatur, fx 50 % og 20°C. Skivens yderside skal ventileres. Vægten af kop incl. skive vejes løbende indtil en stationær tilstand opnås, dvs. konstant

2.1 Fugttransport

vægtændring pr tidsenhed, jf. fase 3 i figur 2.2. Vægtændringen er et udtryk for størrelsen af den transporterede væskemængde, q [kg/m²s].



Figur 2.1. Opstilling til omvendt kop-forsøg med cylindrisk gummirør og prøveemne.



Figur 2.2. Typisk forløb af vægtændring ved forsøg med omvendt kop. Fase 3 markerer at diffusionsforløbet har nået en stationær tilstand med en stabil "fugtfront".

Bestemmelse af diffusionskoefficienter

Med en *omvendt våd-kop* er det muligt at bestemme transportkoefficienter for såvel damp- som væskefase under stationære forhold med visse forudsætninger. Vacuumvandmættede prøveemner benyttes og monteres som beskrevet ovenfor.

En fugtfront dannes momentant ved undersiden af materialet. Det antages, at denne front vil adskille en zone, hvor fugten primært transporteres ved kapillarsugning (øverst i skiven) fra en zone, hvor fugten primært transporteres ved dampdiffusion (nederst i skiven). Fugtfronten flytter sig efterhånden ind i materialet indtil en stationær tilstand er nået, jf. fase 3 i figur 2.2. Forløbet er beskrevet nærmere i [Schou,83].

Derefter skilles koppen ad, prøveemnet vejes (m_{slut}), tørres ved 105°C og vejes atter (m_{105}). Fugtfrontens afstand fra undersiden, x , kan herefter bestemmes som

$$x = t \frac{m_{slut} - m_{ssd}}{u m_{105} - (m_{ssd} - m_{105})} \quad (2.2)$$

forudsat, at koppen står i et kammer med konstant RF og temperatur, samt at fugtstrømmen gennem materialet er stationær, jf. ovenfor.

m_{ssd} er vægten af skiven i vacuumvandmættet tilstand, dvs. ved forsøgets start. u er ligevægtsfugtindholdet ved fugtfronten [kg/kg] og bestemmes ud fra en desorptionsisoterm ved at antage, at RF ved fugtfronten er 90 à 98 %, [Thorsen,88], [Schou,83].

t er skivens tykkelse [mm eller m]. Tykkelsen af prøveemnerne skal bestemmes præcist. For meget tætte materialer er diffusionskoefficienten afhængig af tykkelsen, jf. erfaringer på Lab f. Bygningsmaterialer, DTU.

Ud fra antagelsen om beliggenheden af fugtfronten kan transportkoefficienter for væske- og damptransport bestemmes, [Schou,83],

[Thorsen,88], [Waldstrøm & Rosenbom,91]. Disse størrelser betegnes henholdsvis K og k_d og har enheden $[\text{kg}/(\text{Pa m s})]$.

For væskefasen fås

$$K = \frac{(t-x)(-q)r_k}{2\sigma} \quad (2.3)$$

hvor q er den transporterede fugtmængde $[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$, t er skivens tykkelse $[\text{m}]$, r_k er Kelvinradius $[\text{m}]$ og σ er overfladespænding mellem vand og luft $[\text{N/m}]$. q skal regnes med fortegn, dvs. $q < 0$, hvis vægten af koppen aftager, som vist på figur 2.2.

For dampfasen fås

$$k_d = - \frac{x q}{p_s (RF_{ff} - RF_{kk})} \quad (2.4)$$

hvor p_s er mætningsdamptrykket ved den pågældende temperatur $[\text{Pa}]$, RF_{ff} og RF_{kk} er relativ fugtighed i fugtfronten henholdsvis i klimakammeret.

I forsøg med *retvendt kop* antages ren dampdiffusion gennem materialet. Diffusionskoefficienten δ_p fås derfor direkte af (2.1). Ligesom for omvendt kop skal en ligevægtssituation opnås, inden forsøget kan afsluttes. Prøveemner til retvendt kop bør ved forsøgets start have et fugtindhold, der er mindre end svarende til RF uden for koppen.

Bestemmelse af diffusionskoefficienter vha. (2.1) - (2.4) har visse begrænsninger, der betyder at resultaterne ikke kan benyttes vilkårligt som udtryk for materialets evne til at transportere fugt. (2.1) og (2.4) forudsætter, at diffusionskoefficienten er uafhængig af potentialeforskellen (damptryksforskellen). (2.2), (2.3) og (2.4) forudsætter, at der eksisterer en skarp fugtfront mellem damp- og væsketransport, samt at transporten i væskefasen kan udtrykkes ved én koefficient K . Problematikken diskuteres nærmere i afsnit 3.1.2.

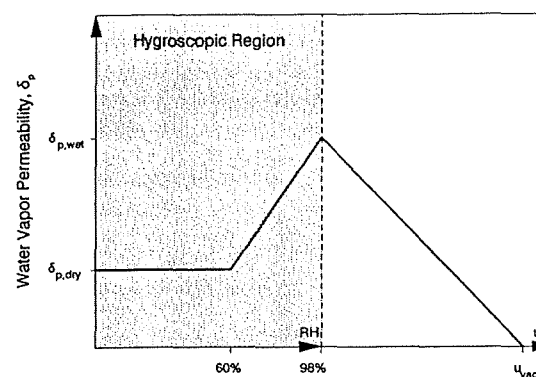
2.1.2 Beregning af fugttransport (MATCH)

MATCH er en én-dimensional computerbaseret model, der regner på kombineret varme-, væske- og damptransport, [Pedersen,90,92]. Modellen er baseret på Fourier's lov for varmetransport, Fick's lov for damptransport samt D'Arcy's lov for væsketransport, der alle er bygget op på samme måde som (2.1). Kapillarkræfter antages at være den drivende kraft for væsketransporten. Der er set bort fra energi- og massetransport vha. konvektion.

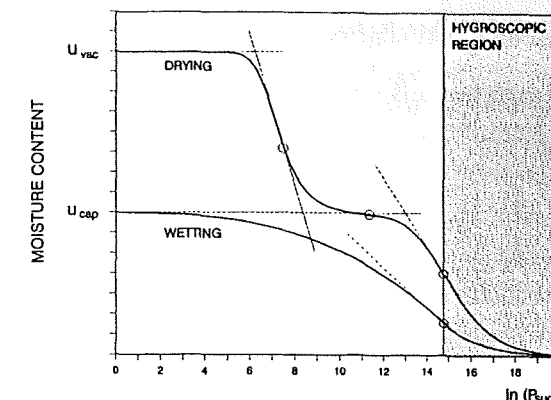
Der benyttes en simplificeret sammenhæng mellem relativ fugtighed (relativt damptryk) og transportkoefficienten for dampfase, idet der antages lineære sammenhænge mellem transportkoefficienten og relativ fugtighed med et knæk ved en relativ fugtighed på 60 %, [Pedersen,90], [Garrecht,92], jf. figur 2.3.

Materialets specifikke varmekapacitet korrigeres for fugtindholdet, ligesom der tages hensyn til vands smeltevarme. Kobling mellem transport på væske- og dampform sker vha. en suction kurve, der beskriver fugtindholdet som funktion af det hydrauliske tryk (regnet positivt), jf. figur 2.4.

2.1 Fugttransport



Figur 2.3. Skematisk forløb af diffusionskoefficienten for vanddamp (vanddamppermeabiliteten), δ_p $[\text{kg}/(\text{Pa m s})]$, som funktion af fugtindholdet, [Pedersen,90]. Abscisseaksen er lineær med RF som variabel op til 98 % RF og med u $[\text{kg}/\text{kg}]$ som variabel over denne grænse. u_{vac} er fugtindholdet i vandmættet tilstand.



Figur 2.4. Skematisk forløb af suctionkurve for opfugtning og udtørring, [Pedersen,90]. Cirklerne markerer de steder, hvor forskellige kurvebeskrivelser tager over fra hinanden. u_{vac} og u_{cap} er fugtindholdet $[\text{kg}/\text{kg}]$ i vacuumvandmættet og kapillært mættet tilstand. P_{suc} er det hydrauliske tryk $[\text{Pa}]$, regnet positivt.

Det hydrauliske tryk fås af

$$\ln P_{suc} = \ln \frac{2\sigma}{r_k} \quad (2.5)$$

hvor σ er overfladespænding mellem vand og luft $[\text{N/m}]$ og r_k er Kelvinradius $[\text{m}]$. Suctionkurven dækker til forskel fra en sorptionsisoterm *samtlig*e porestørrelser, jf. figur 2.4.

MATCH kan i princippet benyttes til beregning af fugtprofiler på basis af følgende oplysninger: 1) transportkoefficienter for væske- og damptransport, der kan bestemmes vha. kopforsøg, 2) en suction kurve, der kan bestemmes ud fra en porestørrelsesfordeling, jf. ovenfor, 3) en sorptionsisoterm, gerne såvel desorption som adsorption. Et tilfredsstillende resultat afhænger af, hvilke fugtforhold der skal simuleres, og om de indsamlede oplysninger i tilstrækkelig grad karakteriserer disse fugtforhold, hvilket diskuteres nærmere i afsnit 3.1.2.

2.1.3 Gammastråling

Gammastråling kan benyttes til at bestemme fugtindhold i porøse materialer. Teknikken bygger på, at intensiteten af en gammastråle, der sendes gennem et materiale, vil dæmpes som funktion af materialets tykkelse og densitet samt en materialeafhængig konstant. Ændringer i det dæmpede signal vil da skyldes en ændret densitet. Idet faststoffet antages at have uændret densitet, vil ændringen i det dæmpede signal relatere til det ændrede fugtindhold.

Måling af fugtprofiler i beton vha. gammastråling vanskeliggøres af betons tætte struktur og lave fugtindhold. For en nærmere beskrivelse af forsøgsoptstillingen henvises til [Frandsen & Jensen,93], [de Place,93a], da målemetoden kun har været anvendt i begrænset omfang, og ikke til det oprindelige formål.

2.2 Naturlig eksponering

I forbindelse med naturlig eksponering foretages registrering af fugt- og temperaturforhold ved overflade og inde i materialet vha. Wetcorr og trædyvler, jf. afsnit 1.2. Der indsamles vejrdata. Nedbrydning følges vha. måling af ultralydhastighed.

2.2.1 Vådtidsmåling (Wetcorr)

Baggrund

Overfladefugten er en af de vigtigste faktorer af betydning for nedbrydningen af bygningsmaterialer og konstruktioner. Forholdene ved et materiales overflade påvirkes ikke kun af rent meteorologiske parametre (nedbør, relativ fugtighed, lufttemperatur, vindretning etc.) men også af bygningens udformning, orientering, overfladetemperatur og sidst men ikke mindst af materialet selv. Overfladefugt skal derfor kunne måles på netop det sted og under de forhold, hvor nedbrydningen studeres.

I et samarbejde mellem Norsk Institut for Luftforskning (NILU) og ABB Energi i Norge samt Statens Institut for Byggeforskning og Korrosionsinstituttet i Sverige er udviklet et måleudstyr kaldet Wetcorr (*Wetness and Corrosion Rate Recorder*) til måling og registrering af overfladefugt og overfladetemperatur i et mikromiljø, [Støre,92], [Haagenrud, Henriksen & Støre,93]. Udstyret bygger på et princip, udviklet ved National Research Council i Ottawa, Canada med henblik på studier af atmosfærisk korrosion af metaller, [Sereda,58], [Sereda, Croll & Slade, 82].

Opbygning af udstyr

Udstyret består i sin nuværende form af en system controller (SC), samt et antal (max 16) serielt koblede sensor adaptere (SA). Til hver SA kan kobles 4 måleceller (sensorer). SCen er udstyrets centralenhed, mens SAernes funktion er dels at omforme de analoge målinger fra sensorerne til digitale signaler, dels at midle signalerne over den valgte samplingsperiode. Se i øvrigt bilag A1.1.

Den resulterende strøm gennem målecellen måles hvert sekund og midles over en på forhånd valgt periode. Der er altså tale om midlede målinger og *ikke* om øjebliksværdier. Strømmen måles i nA (10^{-9} A). Målecellen er beskrevet nærmere i bilag A1.1.

Filhåndtering

AI kommunikation med system controlleren styres via en computer. I bilag A1.2 beskrives, hvordan det foregår.

Bearbejdning af de overførte data sker via et databehandlingsprogram kaldet RINGSYS udviklet på NILU. Vha. RINGSYS samles måledata i en række databaser, hvorfra de kan hentes i forbindelse med optegning i grafer samt statistisk behandling. RINGSYS beregner således minimum og maximumværdi for den strøm, der løber gennem målecellen samt gennemsnit for den valgte periode. Desuden er det muligt at få beregnet hvor stor en procentdel af tiden strømmen overstiger en eller flere valgte værdier, fx 20 nA og 100 nA.

2.2 Naturlig eksponering

Installering samt brug af RINGSYS skal ikke gennemgås her. I stedet henvises til [Støre & Marsteen,92], samt de egentlige manualer, [Marsteen,91,92]. Manualerne er ikke ført up-to-date, hvorfor der vil være visse uoverensstemmelser i forhold til den version af RINGSYS som SBI råder over, [RINGSYS,92].

Tolkning af resultater

Wetcorr bygger på det princip, at dannelsen af en fugtfilm på sensorens overflade øger ledningsevnen og derfor kan registreres som en øget strøm gennem målekredsen. En våd celle vil give et stort udslag, mens en tør celle vil give et meget lille udslag, i teorien 0 A, jf. [Henriksen & Haagenrud,94]. Spørgsmålet er så, hvilke krav der bør stilles til en våd/tør celle - med andre ord hvordan vådtid forholder sig til størrelser som relativ fugtighed og nedbørsmængde.

De hidtidige erfaringer tyder på, at pludselige ændringer i strømstyrke typisk kan relateres til nedbør, mens det generelle niveau for strømstyrken er et udtryk for størrelsen af den relative fugtighed, [Norberg,91] m.fl.

For at oversætte vådtid til fugtbelastning af et porøst materiale som beton skal der laves en omregning. Der skal således tages hensyn til, at det i forhold til en metallisk overflade tager længere tid at opnå en fugtig betonoverflade, og at det tilsvarende tager længere tid, før fladen er tør igen, fordi kapillaregenskaber trækker vand ind henholdsvis "sender" fugt ud til overfladen. Jo dårligere materialet er til at opsuge fugt og jo kraftigere regn, desto kortere tid er filmen om at dannes, [Svennerstedt, 89], [Hall & Kalimeris,82].

Svennerstedt [1989] har opstillet et udtryk, således at der kan tages højde for disse forhold:

$$t_{fugt} = \sum [\Delta t_{slagregn} + \Delta t_{slagregn}^{filmavvikling} - \Delta t_{slagregn}^{filmopbygning}] + \sum [\Delta t_{kondens} + \Delta t_{kondens}^{filmavvikling} - \Delta t_{kondens}^{filmopbygning}] \quad (2.6)$$

$\Delta t_{slagregn}$ og $\Delta t_{kondens}$ betegner en tidsperiode med slagregn, dvs. kombineret nedbør og vindpåvirkning, henholdsvis overfladekondensation på konstruktionen, $\Delta t_{filmopbygning}$ og $\Delta t_{filmavvikling}$ betegner den tid det tager at danne henholdsvis afvikle en fugtfilm af en vis tykkelse, jf. ovenfor.

Svennerstedt har foretaget målinger på nord- og østvendte facader af beton. Han finder frem til, at det har minimal betydning for vådtiden om der tages hensyn til, at det tager tid at opbygge og afvikle fugtfilmen. Hvorvidt det også gør sig gældende for syd- og vestvendte facader, der er langt mere slagregnsbelastet vides ikke. I det foreliggende projekt er der ikke taget højde for, at vådtiden kan afvige for beton i forhold til en metaloverflade.

For yderligere oplysninger om Wetcorr kan henvises til [Henriksen & Haagenrud,94], [Henriksen, Haagenrud & Støre,93], [Norberg,91,93], [Støre,92], [Svennerstedt,89].

2.2.2 Registrering af vejrdata

Til at beskrive makroklimaet benyttes en række oplysninger som indsamles på SBI's fugthus, der står i umiddelbar nærhed af eksponeringsstationen:

- *udendørs lufttemperatur*; bestemt som en øjebliksværdi hver time.
- *mm nedbør pr time*; den samlede nedbørsmængde opgøres hver time.
- *antal solskinsminutter pr time*; en føler registrerer intensiteten af den indkommende stråling [W/m^2] som gennemsnit for et minut. Som grænseværdi for solskin benyttes $200 W/m^2$. Det samlede antal minutter med solskin opgøres hver time.
- *relativ luftfugtighed*; bestemt som en øjebliksværdi hver time. Målingen er ikke helt pålidelig.

Desuden indsamles oplysninger om vindretning, der er relevant til vurdering af slagregnsmængden. Målingerne er ikke tilstrækkelig pålidelige og er derfor ikke benyttet. Værdier for nedbør og solskin kan let omregnes, således at de summeres fx over en måned.

Data indsamlet i perioden 3. november 1992 til 29. juli 1993 er anvendt i dette projekt. Dataindsamlingen har ikke fungeret tilfredsstillende resten af 1993. Der er ikke anvendt data for 1994, da de indsamlede data gav tilstrækkeligt grundlag for at kunne sammenholde vejrdata med resultater af vådtidsmålingerne (Wetcorr, afsnit 2.2.1).

Som erstatning for de manglende data for 1993 er følgende data indhentet fra Lab f Varmeisolering's solmålestation på taget af bygning 119 på Danmarks Tekniske Universitet, ca. 12 km syd for SBI, for perioden 1. juli til 27. september 1993:

- *udendørs lufttemperatur og dugpunktstemperatur*; middelværdi for hver halve time. Ved at sammenholde dugpunkts- og lufttemperatur og benytte et vanddampdiagram kan relativ luftfugtighed, *RF*, bestemmes. Et vanddampdiagram afbilder mængden af vand [g/m^3 luft] som funktion af lufttemperaturen ved forskellige *RF*.
- *dugføler*; angiver modstand som en øjebliksværdi ved det pågældende tidspunkt. $1000 k\Omega$ svarer til en tør føler, $50 - 100 k\Omega$ til en meget våd føler.
- *direkte normalstråling* [W/m^2]. Middelværdi for hver halve time, som kan bruges til at udlede solskinstid med tilnærmelse. LfV bruger $130 W/m^2$ som grænse for solskin, altså lavere end SBI's grænseværdi. Da data angives i W/m^2 er det let at korrigere for denne forskel ved simpelthen at benytte $200 W/m^2$ som tærskelværdi i stedet.

2.2.3 Måling af ultralydhastighed

Ultralydmåling er baseret på, at der sendes kortvarige, højfrekvente lydimpulser gennem materialet fra en sender til en modtager. Den tid, *t*, lyden er om at nå fra sender til modtager, kaldet *gennemløbstiden*, registreres af en tidsmåleenhed og kan aflæses på et display. Ud fra gennemløbstiden kan lyd hastigheden og det dynamiske E-modul bestemmes.

Princippet er alment kendt og vil ikke blive beskrevet nærmere i denne sammenhæng. Der kan fx henvises til [Beton-Bogen,85] eller [Naik & Malhotra,91], der også beskriver forskellige anvendelsesmuligheder ved måling på beton og hvilke faktorer, som fx sammensætningen af materialet, der har betydning for den målte ultralydhastighed.

2.2 Naturlig eksponering

Dimension af prøveemner og valg af frekvens

Lydimpulsen sendes igennem materialet ved en for sender og modtager karakteristisk frekvens. Hvilken frekvens, der skal bruges i det aktuelle tilfælde, afhænger først og fremmest af dimensionerne af det, der måles på. I [DS 423.33] stilles en række krav angående dimensioner for at opnå en pålidelig måling, dels til lydvejen gennem betonen, dvs. afstanden mellem sender og modtager, dels til dimensionerne af de flader, hvor sender og modtager anbringes.

Betons inhomogenitet bevirker, at lydbølgerne spredes langt mere end i metaller. For at undgå unødigt stor dæmpning af lydbølgerne er det nødvendigt at benytte frekvenser af størrelsen 20-250 kHz, i stedet for 2-6 MHz som for metaller, selv om målingen bliver mindre følsom. Frekvensen bør desuden vælges således, at lydimpulsens bølgelængde, λ , ikke er større end den mindste tværsnitsdimension. λ [mm] bestemmes som c/f , hvor *c* er lyd hastigheden [m/s] og *f* er lydbølgens frekvens [kHz].

Følsomhed overfor temperatur- og fugtforhold

Ved en sammenligning af målinger under forskellige vejrforhold skal der tages hensyn til, at gennemløbstiden og dermed lyd hastigheden er afhængig af temperatur og fugtforhold, jf. tabel 2.1.

Tabel 2.1. Temperaturen og fugtindholdets betydning for lyd hastigheden (*c*) ved ultralydmåling på beton, [RILEM,72].

temperatur [°C]	korrektion på <i>c</i> [%]	
	lufttør beton	vandmættet beton
60	+ 5	+ 4
40	+ 2	+ 1,7
20	0	0
0	- 0,5	- 1
under -4	- 1,5	- 7,5

Det fremgår, at afhængigheden er uden betydning ved temperaturer mellem 0° og $+40^\circ C$, samt at fugtindholdet primært har betydning for lyd hastigheden ved temperaturer under 0° . Derfor vil en kraftig forøgelse af gennemløbstiden kunne relateres til en egentlig nedbrydning af materialet, fx en kraftig revnedannelse.

Forsøgsopstilling

Der benyttes et ultralydapparat, fabrikat *PUNDIT* fra firmaet C.N.S. Electronics i England (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester). *PUNDIT* kan benyttes både med og uden ledning. Betjening og kalibrering af apparatet er beskrevet i [PUNDIT,91].

For at få bestemt lyd hastigheden så nøjagtigt som muligt, er en god kontakt mellem transducere og materiale vigtig. Ved måling på beton og andre materialer med en forholdsvis ru overflade kan kontakten forbedres vha. konsistensfedt.



Figur 2.5. Udførelse af ultralydmåling på eksponeringsstation.

Der måles på fliser med dimensioner 40x200x500 mm, jf. afsnit 1.2. Sender og modtager placeres på modstående flader, hvilket giver den mest præcise måling. Målingen foregår på langs af flisen, jf. figur 2.5, for at få en tilstrækkelig længde på lydvejen. Der måles to steder på hver flise, jf. figur 1.3.

Måling foregår med 82 kHz transducere aht. transducernes størrelse. Det bevirker desuden, at der er en rimelig overensstemmelse mellem bølgelængde og flisens tykkelse. Tykkelsen af flisen opfylder dog ikke kravet i [DS 423.33] om at der skal være mindst 30 mm fra transducerne til nærmeste kant.

Resultater for fliser placeret udendørs sammenholdes med målinger på fliser placeret ved konstant klima (23°C og 65 % RF), jf. afsnit 1.2.

2.2.4 Fugtmåledyvler

For at undersøge, hvordan fugtforholdene inde i betonen påvirkes ved naturlig eksponering, anbringes fugtmåledyvler og termoelementer i borede huller i fliserne, jf. figur 1.3.

I projektet afprøves mulighederne for at anvende trædyvler som en ikke-destruktiv fugtmåler i beton, deraf navnet fugtmåledyvler. Dyvlerne er oprindeligt udviklet med henblik på at registrere fugtforhold i trækonstruktioner (Uwe Lohse, SBI, ikke-publicerede resultater). Dyvlerne er fremstillet af bøgetræ og har en diameter på 10 mm og en længde på 22 mm. To stifter er boret ind i dyvlernes ene ende. Til stifterne er forbundet to ledninger med længden 2 m, således at der kan måles på dyvlerne, mens de sidder inde i prøveemnet.

Fugtindholdet i dyvlerne måles som elektrisk modstand mellem stifterne vha. et logMΩ-meter (T 301 COW) eller via en datalogger. Fugtmåledyvler er beskrevet nærmere i [Munch-Petersen,90].

2.2 Naturlig eksponering

Fugtmåling med dyvler

Det har vist sig, at der findes en retlinet sammenhæng mellem $\log u$ og $\log M\Omega$, [Munch-Petersen,90]. u er træfugten [kg/kg] og $M\Omega$ betegner den elektriske modstand mellem stifterne. Resultatet ($\log M\Omega$) skal korrigeres for temperaturen.

Via en sorptionsisoterm for den pågældende træart kan træfugten omregnes til relativ fugtighed (RF) i hulrummet, hvor dyvlen er anbragt. RF i hulrummet antages at være i ligevægt med RF i en vis zone af det omgivende materiale.

Da sorptionsisotermen giver sammenhængen mellem RF og træfugt under ligevægtsforhold, skal omregningen tages med et vist forbehold, idet en ligevægtssituation sjældent opnås i praksis. Således er forholdet mellem RF og træfugt afhængig af, om der sker en udtørring eller en opfugtning. Til gengæld konkluderer Munch-Petersen [1990], at den retlinede sammenhæng mellem $\log M\Omega$ og $\log u$ gælder, uanset om der er ligevægt mellem træfugt og RF eller ej.

Følgende udtryk benyttes til omregning mellem elektrisk modstand og træfugt

$$\log u = \frac{12,63 - \log M\Omega_{\text{kor}}}{9,196} \quad (2.7)$$

med følgende udtryk for temperaturkorrektion

$$\log M\Omega_{\text{kor}} = \log M\Omega_{\text{mål}} - (0,029 + \log M\Omega_{\text{mål}} \cdot 0,005) \cdot (20 - \theta) \quad (2.8)$$

hvor θ angiver den målte temperatur [°C].

Munch-Petersen [1990] angiver andre eksempler fra litteraturen, der dog kun afviger lidt fra (2.7) - (2.8).

Montering og dataopsamling

Temperaturen måles med kobber-konstantan termoelementer, der vikles rundt om ledningerne til dyvlerne inden disse stoppes ind i huller boret i betonfliserne, jf. figur 1.3. Hullerne lukkes med en stopning bestående af isoleringsmateriale og fugemasse. Isoleringsmaterialet skal forhindre kontakt mellem dyvel og fugemasse, mens fugemassen skal forhindre fugt i at trænge ind i hullet udefra.

Halvdelen af dyvlerne kobles til en datalogger (Datataker DT100I), jf. afsnit 1.2, således at dataopsamling kan ske kontinuerligt. Dataloggeren er anbragt i en fugttæt kasse på eksponeringsstationen. Foto og datablad er vedlagt som bilag A1.3. Dataoverførsel fra datalogger til PC/diskette foregår vha. programmet Decipher. I bilag A1.4 beskrives hvordan det foregår.

De øvrige dyvler er tilgængelige for manuel måling vha. et logMΩ-meter.

3. Forsøgsresultater og diskussion

3.1 Fugttransport

3.1.1 Diffusion

Diffusionskoefficienter er bestemt ud fra forløbet af vægtændringer for betonskiver under veldefinerede forhold, som beskrevet i afsnit 2.1.2. Resultaterne er angivet i tabel 3.1.

k_d og K er diffusionskoefficienter for damp- og væsketransport bestemt vha. omvendt kop. Værdien af disse koefficienter afhænger af, hvilken RF der benyttes til at repræsentere fugtfronten. δ_p er diffusionskoefficienten for ren damptransport bestemt vha. retvendt kop. Forløbet af de enkelte kopforsøg er vist i bilag B1.1.

Tabel 3.1. Diffusionskoefficienter bestemt ved kopforsøg. Beton. Middelværdier.

[kg/(Pa m s)]	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
$k_{d,90}$ [10^{-13}]	1,6	12	22
$k_{d,98}$	2,7	20	25
K_{90} [10^{-17}]	2,7	22	92
K_{98}	7,7	66	447
δ_p [10^{-13}]	1,7	4,1	10

Diffusionskoefficienter er temperaturafhængige, [Garrecht,92] m.fl., hvilket har betydning, når koefficienter bestemt ved stuetemperatur benyttes til beregninger ved 0°C eller lavere temperaturer. Det får ingen konsekvenser i det foreliggende projekt, da det ikke har været muligt at foretage de ønskede fugttransportberegninger, jf. afsnit 3.1.2.

Forsøgenes varighed - over 8000 timer eller ca. 1 år - er et resultat af, at fugttransporten foregår meget langsomt, og at opnåelsen af en stationær tilstand derfor er meget tidskrævende. Specielt for beton 0.30 er der tale om små vægtændringer med de usikkerheder, det giver anledning til.

Resultaterne viser, at der er stor forskel på de tre betoner, når det handler om at transportere fugt, især på væskeform, udtrykt ved K . Der er således overensstemmelse med resultaterne af kapillarsugning, jf. [de Place,96a], afsnit 6.5.1. Betydningen af, om $RF = 90\%$ eller 98% benyttes som grænse for damp- og væsketransport ses som ventet at være størst for K , der beskriver væsketransporten.

Niveauet for δ_p og k_d stemmer overens med værdier angivet i [Beton-Bogen,85]. For δ_p og $k_{d,90}$ er opnået samme værdi for beton 0.30, hvilket skulle betyde, at fugttransporten er stort set uafhængig af RF så længe der er tale om damptransport. For beton 0.45 og 0.70 er $k_{d,90}$ derimod væsentlig højere end δ_p . Det stemmer overens med Pedersen [1990], der opstiller en model, hvor diffusionskoefficienten antages at være uaf-

3.1 Fugttransport

hængig af RF så længe $RF < 60\%$, hvorefter den øges kraftigt, som vist i afsnit 2.1.2. Sammenhængen bekræftes af undersøgelser foretaget af [Garrecht,92], [Hedenblad,93] m.fl.

3.1.2 Beregning af fugttransport (MATCH)

Beregningsprogrammet *MATCH* er udviklet til beregninger af kombineret fugt- og varmetransport under givne forhold, fx under forhold svarende til standardiseret frostprøvning samt naturlig eksponering. Diffusionskoefficienter for væske- og damptransport samt porestørrelsesfordelinger skulle danne baggrund for disse beregninger.

Problemet er imidlertid, at de diffusionskoefficienter, K og k_d , der kan bestemmes vha. omvendt kop, er baseret på to antagelser, der gør dem vanskelige at anvende til de ønskede simuleringer, 1) at der kan skelnes skarpt mellem damp- og væsketransport, 2) at én diffusionskoefficient kan repræsentere væsketransport under *alle* forhold. Desuden foregår målinger under stationære forhold.

I praksis vil *kombineret* damp- og væsketransport være af stor betydning, når virkelige, instationære forhold skal simuleres, da porer af alle størrelser er blandet mellem hinanden. Desuden er diffusionskoefficienten for væsketransport *meget* afhængig af fugtindholdet.

På den ene side ønskes en beregning af fugttransport ved kombineret damp- og væsketransport i forbindelse med frostprøvning. På den anden side haves gennemsnitsværdier for transportkoefficienter for separat damp- og væsketransport under stationære forhold. Det vil være alt for usikkert at basere en beregning på dette grundlag. Som minimum kræves en mere detaljeret beskrivelse af fugttransporten på væskeform.

En søgning i litteraturen efter undersøgelser, hvor målinger af fugtindhold eller fugtfordelinger er bestemt sideløbende med diffusionskoefficienter, har ikke givet noget resultat. Hedenblad [1993] har således udført et meget stort antal diffusionsforsøg, bl.a. på beton, men har primært studeret transport i dampfase.

En række andre forfattere har undersøgt fugtprofiler, men ikke diffusionskoefficienter [Terril et al,86], eller også er undersøgelserne foregået på andre materialer, [Hall,89], [Carpenter et al,93], [Krischer,78], [Garrecht,92] m.fl. Kiessl [1983] har arbejdet med et antal betoner, men disse afviger meget fra betonerne i det foreliggende projekt, specielt hvad porøsitet angår.

Til gengæld findes mange artikler der handler om permeabilitetsmålinger, hvor det registreres, hvor meget vand der kan *presses* gennem materialet, dvs. en situation, der ikke kan overføres til de foreliggende forsøg.

3.1.3 Gammastråling

Gammastråling er ikke anvendt til det ønskede formål, da det viste sig vanskeligt at detektere forskelle i betons fugtindhold - usikkerheden på målingerne var alt for stor.

Senere er udstyrets præcision forbedret, men det skete på et tidspunkt i projektet, hvor det ikke længere kunne nås at benytte det i forbindelse med frostprøvning, som omtalt i afsnit 1.2.1. Der er dog foretaget et par

supplerende målinger foretaget for at undersøge, om den forbedrede præcision kan udnyttes til at måle på beton 0.30.

Resultatet af disse målinger er præsenteret i [de Place,93a]. Det viser sig muligt at skelne mellem et tørt og et opfugtet prøvemne. 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. På den anden side viser målingerne, at selv en beton med vand/cementforhold på 0,3 kan studeres vha. gammastråling. Resultaterne og metoden præsenteres og diskuteres i [de Place,93a], hvorfra en enkelt figur vises i bilag B1.2.

3.2 Naturlig eksponering

Siden oktober 1992 har et antal betonfliser været udsat for naturlig eksponering, som beskrevet i afsnit 2.2. Datamateriale til beskrivelse af fugt- og klimaforhold er indsamlet, og der er foretaget målinger af ultralydhastighed. Et væsentligt formål med dataindsamlingen var at skaffe oplysninger om virkelige fugtpåvirkninger til brug for beregninger med MATCH-programmet. Sådanne beregninger er imidlertid ikke foretaget, jf. afsnit 3.1.2.

I stedet er der fokuseret på sammenligning af de indsamlede data, dvs. traditionelle informationer om vejret (*RF*, temperatur, solskin, nedbør) samt måling af overfladefugtforhold (*Wetcorr*) og fugtindhold inde i materialet samt ultralydhastighed. Kun udvalgte dele af det omfattende datamateriale vil blive præsenteret. Anvendelsen af de benyttede metoder diskuteres.

Efter to års eksponering er der som ventet ikke nogen synlig nedbrydning af fliserne. Ved eksponeringens start har beton 0.30 en tydelig mønstret overflade til forskel fra de andre, en forskel som ikke ændrer sig væsentligt i løbet af to års eksponering. Figur 3.1 - 3.3 viser udseendet efter to års eksponering. Der er ikke foretaget nærmere undersøgelser af eksponerede emner, fx bestemmelse af porøsitet, frostbestandighed m.m.

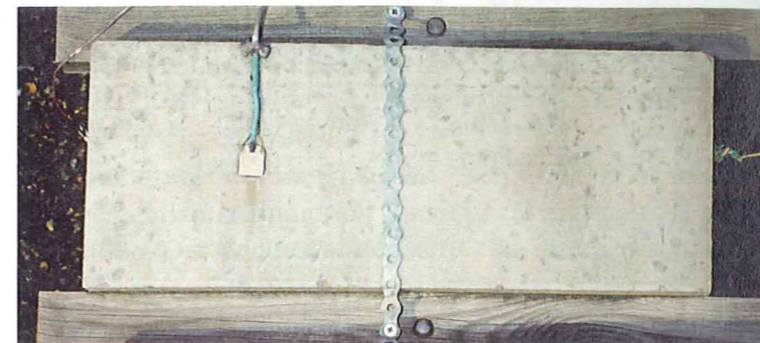
3.2.1 Vådtdismåling og vejrdata

Wetcorr er benyttet til indsamling af oplysninger om mikroklimaet, dvs. temperatur- og fugtforhold ved materialets overflade, sideløbende med lignende målinger i det øvrige Norden samt i Irland, jf. [Henriksen & Haagenrud,94].

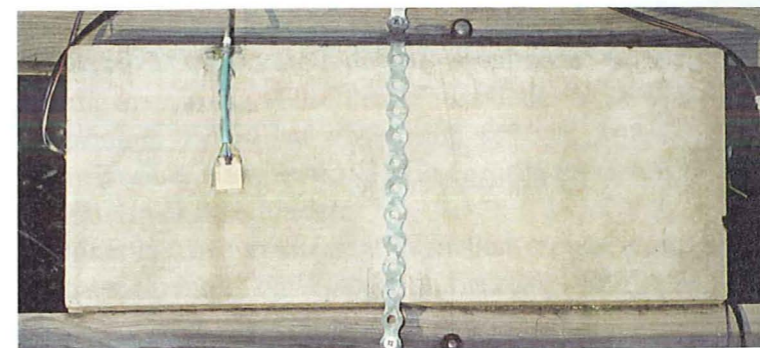
I tabel 3.2 er resultater fra disse målinger sammenlignet med indsamlede vejrdata.

Wetcorr-resultater udtrykkes ved den såkaldte vådtid (*Time of Wetness*). *TOW* angiver den del af en tidsperiode, hvor strømmen gennem målecellen er over et vist niveau, svarende til at der er en vandfilm af en vis tykkelse på cellen, [Henriksen & Haagenrud,94]. Desuden angives det gennemsnitlige niveau samt absolut minimum og maksimum for strømmen gennem cellen. Til beregning af *TOW* benyttes grænserne 20 nA og 100 nA, jf. erfaringer fra Norge og Sverige.

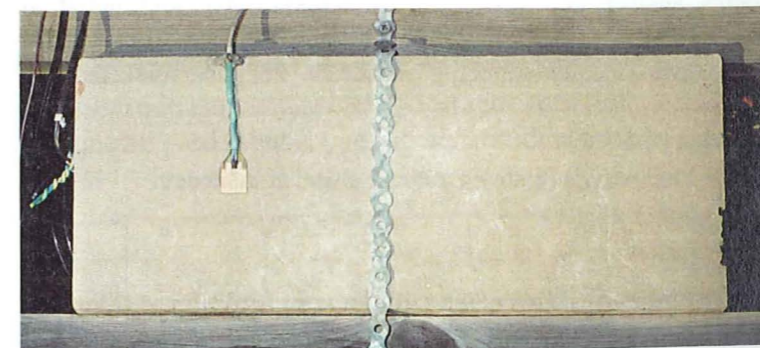
3.2 Naturlig eksponering



Figur 3.1. Eksponeret flise, beton 0.30. Udseende efter to års eksponering. Flisen er anbragt på et fladt tag og er orienteret mod syd med en 45° hældning.



Figur 3.2. Eksponeret flise, beton 0.45. Udseende efter to års eksponering. Hakket til højre stammer fra støbningen.



Figur 3.3. Eksponeret flise, beton 0.70. Udseende efter to års eksponering. Hakket til højre stammer fra støbningen.

Vejrdata angives som middeltemperatur, mm nedbør, antal solskinstimer og gennemsnitlig relativ fugtighed, alle indsamlet på SBIs målestation. Antallet af solskinstimer er sammenholdt med de officielle tal fra Meteorologisk Institut. Visse af resultaterne har tidligere været præsenteret i [Henriksen & Haagenrud,94].

Tabel 3.2. WetCorr-resultater og vejrdata, udvalgte måneder.

	Februar 1993	April 1993	Juli 1993
Beskrivelse af vejret	mildt, fattig på nedbør	tørt og varmt	vådt og koldt
Middeltemperatur [°C]	0,2	7,1 12,7 *	14,5
Nedbør [mm]	29	12	110
Solskinstimer ^	30 (50)	170 (220)	120 (200)
Gennemsnitlig RF [%]	85 92 / 79 **	62 52 *	70
<i>WetCorr</i>			
TOW [%]; grænse for vådtid 20 nA	73 97 / 50 **	83 85 *	30
TOW [%]; grænse for vådtid 100 nA	46 72 / 21 **	3 2 *	0
Gennemsnit [nA]	111 160 / 64 **	29	22
Min [nA]	11	15	1
Max [nA]	665	281	116

^ : tal i parentes angiver det officielle antal solskinstimer som oplyst af Meteorologisk Institut. Afvigelser i forhold til egne målinger kan bl.a. skyldes definitionen af, hvornår solen skinner, jf. afsnit 2.2.3. For juli er forskellen dog uforklarlig stor.

* : dækker perioden 20-30/4.

** : tallene dækker henholdsvis første og anden halvdel af måneden.

I bilag B2.1 er ovennævnte størrelser afbildet som funktion af tiden for de pågældende måneder. Desuden angives $TOW > 20$ henholdsvis 100 nA samt det gennemsnitlige niveau måned for måned for perioden fra november 1992 til december 1994 (tabel B1 og B2).

Sammenligningen af tallene i tabel 3.2 viser, at der er en rimelig sammenhæng mellem niveauet for TOW samt en kombination af niveauet for relativ fugtighed (RF), temperatur og mængden af solskin.

Derimod er der ikke umiddelbart nogen sammenhæng mellem nedbørsmængden og niveauet for TOW . Nedbørsmængden i juli 1993 er ca. ni gange større end i april 1993, mens $TOW > 100$ nA for begge måneder er meget lille. I februar 1993 er RF og TOW høj i forhold til juli 1993, mens nedbørsmængden blot er 1/4 af juli's. Derimod kan antallet af og højden på "toppe" på kurven sige noget om nedbørsmængden, sammenlign fx april og juli 1993, figur B10 og B11.

Teoretisk set svarer 20-30 nA til dugpunktet, mens 100 nA svarer til en egentlig vandfilm som følge af regnvej. I praksis må grænserne dog vurderes efter omstændighederne i det aktuelle tilfælde, fx forureningsniveauet, jf. [Henriksen & Haagenrud,94]. Således fås sjældent udslag under 20 nA i dette projekt.

Resultaterne i tabel B1 og B2 viser, at TOW er væsentlig højere om vinteren end om sommeren, men også, at niveauet for strømstyrken øges med tiden. Det skyldes, at der sætter sig urenheder på cellens overflade, som virker fremmende for ledningsevnen.

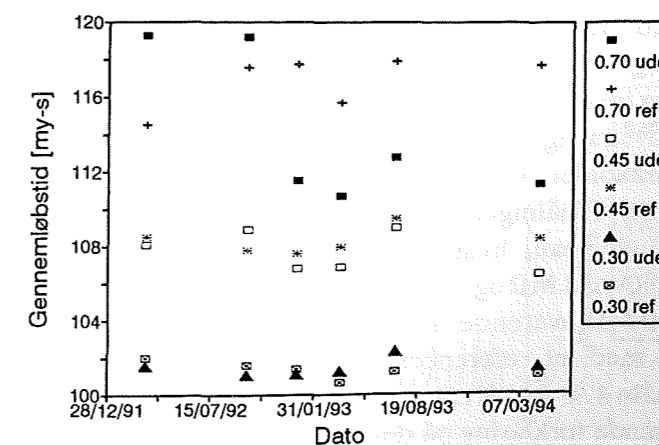
Et godt eksempel på dette fås ved at sammenligne juli 1993 med juli 1994. Juli 1993 var våd og kold, mens juli 1994 var usædvanlig varm og tør. Alligevel er $TOW > 20$ nA 29,5% i 1993 og 99,6% i 1994 og gennemsnittet er øget fra 22,1 til 32,5 nA.

Derimod er det overraskende, at niveauet allerede fra målingernes start i november 1992, figur B8, sjældent kommer under 20 nA. Da cellerne er ubeskyttede og dermed direkte eksponeret for nedbør, forventes en jævnlig afvaskning af urenhederne, således at niveauet for strømstyrken nedbringes. En sådan afvaskning ses ved andre lignende målinger, [Henriksen & Haagenrud,94]. En egentlig forklaring på denne uoverensstemmelse er ikke fundet.

Der er god overensstemmelse mellem temperaturmålinger fra vejrdata (termoelementer) og Wetcorr, jf. figur B8 - B21. Specielt om sommeren registreres som ventet større temperaturudsving med Wetcorr-følere end med termoelementer, hvilket skyldes at Wetcorr-følere i modsætning til termoelementerne er udsat for direkte sol.

3.2.2 Måling af ultralydhastighed

Ved inspektioner af eksponeringsstationen er der foretaget bestemmelse af gennemløbstid for ultralyd. Resultatet af disse målinger er afbildet i figur 3.4 og tabelleret i bilag B2.3 i form af middelværdier for henholdsvis eksponerede emner og referenceemner som funktion af tiden. I overensstemmelse med tabel 2.1 ses en vis årstidsvariation.



Figur 3.4. Gennemløbstid for ultralyd gennem beton som funktion af tiden. Middelværdier. "ude" angiver naturlig eksponeret beton, "ref" angiver beton opbevaret ved konstant klima. Naturlig eksponering påbegyndt 8. oktober 1992.

Bortset fra, at gennemløbstiden *aftager* for beton 0.70, når den kommer udendørs, ses ikke nogen afgørende ændring af gennemløbstiden i måleperioden. Det er ikke overraskende, når den korte eksponeringstid - mindre end to år - tages i betragtning. Den registrerede mindskning af gennemløbstiden for beton 0.70 kan ikke forklares med, at betonen flyttes udendørs - faktisk er det i direkte modstrid, jf. tabel 2.1. En egentlig forklaring på dette "hop" i gennemløbstid er ikke fundet.

Betonserierne rangordnes som forventet efter lyd hastigheden *c*, jf. tabel 3.3. Den højeste lyd hastighed måles for beton 0.30, svarende til, at den er tættest. Som følge af forløbet i figur 3.4 ses for beton 0.30 og 0.45 ingen forskel på lyd hastigheden for eksponerede emner og referenceemner, jf. at gennemløbstid og lyd hastighed er omvendt proportionale.

Tabel 3.3. Ultralydshastighed, eksponeret og ueksponeret beton. Middelværdier.

Emner	Ultralydshastighed, <i>c</i> [m/s]		
	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70
Eksponerede	4927	4643	4481
Reference	4935	4617	4279

For beton 0.70 eksponeret er der ved beregningen af *c* set bort fra de to første målinger, der foregik inden beton blev eksponeret, jf. bilag B2.3.

3.2.3 Fugtmåledyvler

Udendørs målinger

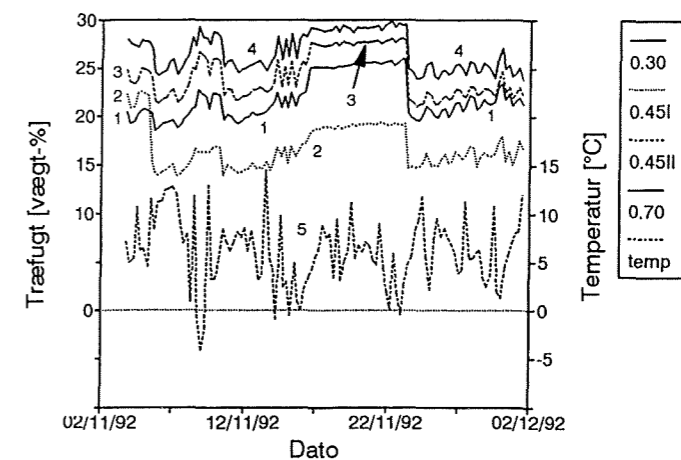
Måling af fugtforhold i beton vha. fugtmåledyvler af træ viste sig ret hurtigt at være forbundet med problemer. Figur 3.5 viser, at allerede efter kort tids eksponering registreres fugtindhold i træet omkring fiber mætningspunktet (ca. 30 vægt%), dvs. svarende til at træet skulle være i kontakt med frit vand. Dette høje niveau bibeholdes gennem det meste af måleperioden, jf. bilag B2.4.

Når fugtindholdet allerede fra eksponeringens start er så højt som vist i figur 3.5, er det ikke overraskende, at der skal meget til, før der vil ske en mærkbar udtørring. Juli og første halvdel af august 1994 var præget af usædvanligt varmt og tørt vejr. I denne periode ses først et aftagende og derefter stabilt fugtniveau, figur 3.6 og 3.7. Resten af august var mere kølig og regnfuld og fugtindholdet i dyvlerne stiger atter.

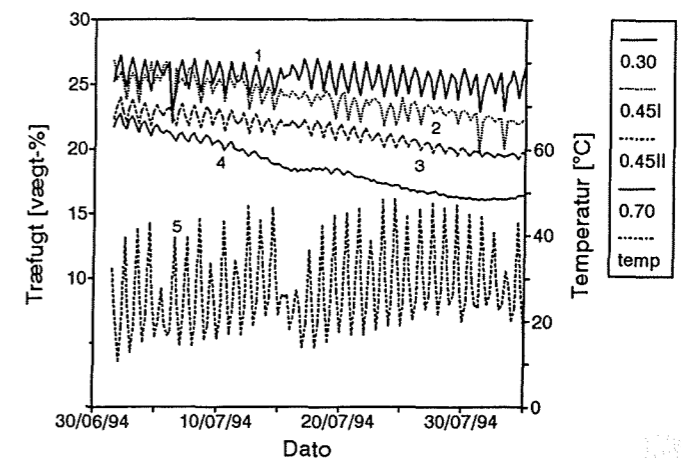
Usikkerheden på selve målingen er ikke tilstrækkelig stor til at kunne forklare det høje fugtniveau, hvilket kontrolleres vha. to referencemodstande på henholdsvis 1 M Ω og 1 G Ω . Generelt registreres modstande i dyvlerne på 0,5 à 10 M Ω , svarende til fugtindhold på 20 à 28 vol%. Det skal sammenholdes med, at referencemodstanden på 1 M Ω viser sig gennemgående at måle 4 % forkert.

Den mest nærliggende forklaring på det høje fugtniveau er, at monteringen af dyvler ikke er udført godt nok, således at der trænger fugt ind til dyvlen via det borede hul. Det skulle så betyde, at *samtlig*e dyvler i naturligt eksponerede emner er monteret uden tilstrækkelig stopning. At dette er en mulig forklaring ses af, at fugtindholdet tilsyneladende kan stige ret pludseligt, se fx figur B23.

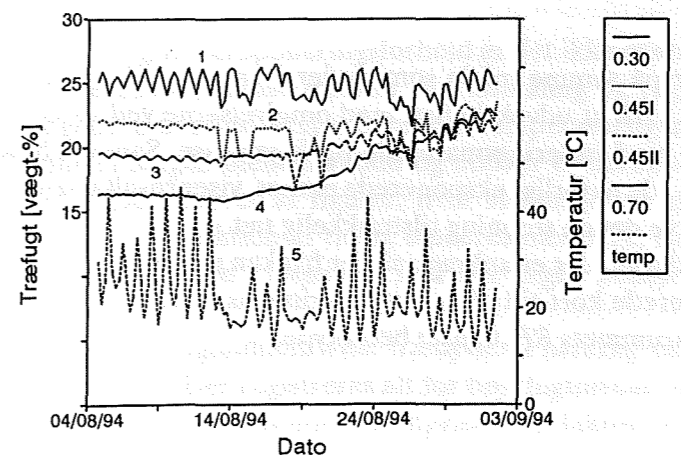
3.2 Naturlig eksponering



Figur 3.5. Fugtindhold og temperatur i beton målt med fugtmåledyvler og termoelement. November 1992. Signalerne ikke var "jordet" i dagene 15-23/11. Tal ved kurverne svarer til rækkefølgen i signaturforklaringen. For beton 0.45 angives træfugten i to dyvler (I og II). Naturlig eksponering påbegyndt 8. oktober 1992.



Figur 3.6. Fugtindhold og temperatur i beton målt med fugtmåledyvler og termoelement. Juli 1994.



Figur 3.7. Fugtindhold og temperatur i beton målt med fugtmåledyvler og termoelement. August 1994.

Ved at skære en flise op og frilægge dyvlen konstateres, at dyvlerne rent faktisk er blevet udsat for fugt. Det er dog ikke muligt at eftervise, hvordan fugten er trængt ind. Umiddelbart virker stopningen af hullet upåvirket af eksponeringen.

Dyvler monteret efter ca. et halvt års eksponering registrerer ligeledes et meget højt fugtniveau kort tid efter montering. For senere at kunne fjerne dyvlerne igen - hvilket ikke viste sig muligt, formentlig pga. udvidelse af dyvlerne - er disse huller kun forseglet med isoleringsmateriale og ikke med fugemasse. For disse dyvler er indtrængende fugt derfor en mere nærliggende forklaring.

Referencemålinger

Sammenholdt med målinger på udendørs eksponerede emner, viser målinger på referenceemner placeret i klimarum, som ventet stor stabilitet, jf. tabel 3.4.

Typisk er niveauet for træfugten 13 à 15 vægt%, svarende til ca. 70% RF, der skal sammenlignes med en referencedyvel ophængt i klimarummet, der har et fugtindhold på 12 à 13 vægt%. Det er ikke overraskende, at fugtniveauet i beton er lidt højere end klimarummets, da udtørring af beton er en langsommelig affære.

Tabel 3.4. Fugtighed i betonemner udtrykt ved træfugt [vægt%] af fugtmåledyvler.

Dato	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70	Klimarum
22/05/92	15,5	15,8	14,9	13,0
22/09/92	16,0	15,5	14,6	13,0
28/12/92	15,8	15,0	14,2	13,0
26/03/93	16,2	15,1	14,2	12,8
26/11/93	15,4	13,8	13,2	11,8
25/04/94	15,5	13,9	13,3	11,8
	vægt%	vægt%	vægt%	vægt%

Måling er foregået i klimarum med 23°C +/- 2° og 65% +/- 5% RF. I sommeren 1993 var temperaturen i klimarummet typisk 26° à 27°C. Det kunne tænkes at være forklaringen på, at der registreres lavere værdier for træfugt 26/11 end 26/03/93, selv om det ikke forklarer, hvorfor værdien for klimarummet er uændret 25/04/94.

Disse dyvler er på samme måde som dyvler i naturligt eksponerede emner forhindret i frit at udveksle fugt med omgivelserne ved at stoppe hullet i emnet til med isoleringsmateriale og fugemasse. Sammenholdt med fugtniveauet i de naturligt eksponerede emner, viser resultaterne, at det er muligt at lave denne stopning tilstrækkelig tæt.

Samtidig viser dyvler, der er anbragt, så der frit kan udveksles fugt med omgivelserne, allerede kort tid efter eksponeringens start et fugtniveau svarende til klimarummets RF, uanset betontype.

4. Konklusion

Frostbestandighed for et givet materiale under givne forhold, udtrykt vha. vandmætningsgrader, kræver dels en bestemmelse af det pågældende materiales kritiske vandmætningsgrad, dels en bestemmelse af aktuelle vandmætningsgrader som funktion af tiden, [Fagerlund,72b]. Som tilnærmelse til sidstnævnte kan benyttes vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning.

Nærværende rapport illustrerer nogle af de problemer, der er forbundet med at bestemme praktisk forekommende aktuelle vandmætningsgrader. Dels kræver det en bestemmelse af den aktuelle fugtbelastning ved eksponeringsforsøg og konsekvenserne af fugtbelastningen for materialets fugtindhold, dels bestemmelse af størrelser, der udtrykker materialets evne til at opsuge og transportere fugt.

Umiddelbart synes disse anstrengelser ikke at stå i rimeligt forhold til, hvor enkelt det er at bestemme vandmætningsgraden ved frivillig vandopsugning. Til gengæld giver eksponeringsforsøg et mere detaljeret billede af, hvordan materialet reelt påvirkes og hvordan det reagerer på denne påvirkning. Det kan give en dybere forståelse af materialets fugtmæssige egenskaber.

Eksponeringsforsøg

Eksponeringsforsøg viser, at det er muligt at karakterisere fugtbelastningen vha. den såkaldte vådtidsmåler. Problemet er at oversætte målingerne til mere anvendelige størrelser, ikke mindst at definere koblingen mellem registreret strømstyrke gennem målecellen og fugtbelastningen.

Vådtidsmåling har den fordel, at det giver mulighed for løbende at registrere fugtforhold lokalt ved overfladen af et materiale, hvilket ofte kan vise sig at være mere relevant end at måle fugtindholdet i den omgivende luft. En anden fordel er, at målecellen er ganske lille og derfor kan placeres næsten hvor som helst, også inde i et emne / en konstruktion.

Med de givne eksponeringsforhold er det ikke overraskende, at der er god overensstemmelse mellem vådtidsmåling og registrering af relativ fugtighed, især når der tages hensyn til temperatur og mængden af solskin. Sammenhængen mellem vådtid og nedbør er derimod mindre gennemskuelig. Det kræver at figurere, hvor strømstyrken gennem målecellen afbildes som funktion af tiden, studeres nærmere, især mht. antallet af strømstyrke"toppe". Desuden skal der tages hensyn til forurening af cellerne.

Måling af fugtindhold vha. trædyvler i naturlig eksponeret beton er problematisk. Der registreres alt for højt fugtniveau, uanset årstiden. At det høje fugtniveau skyldes, at dyvlen rent faktisk har været udsat for fugt, snarere end at den har målt forkert, bekræftes ved frilægning af en dyvel.

Måling på referenceemner viser et fugtindhold på niveau med klimarummets relative fugtighed, uanset at dyvler i referenceemner er monteret på *nøjagtig* samme måde som i naturligt eksponerede emner. Spørgsmålet er så, hvorfra fugten i de naturlige eksponerede emner kommer, hvilket fortsat er uafklaret. Umiddelbart må det forklares ved utætte stopninger af de huller, hvori dyvlerne er anbragt, selvom det ikke uden videre kan bekræftes. Det kunne være interessant at koble målinger med dyvler sammen med vådtidsmålere, begge indstøbt eller boret ind i beton, for at følge op på dette.

Eksponeringsforsøg viser tydeligt, hvor stor forskel der er på forløbet af nedbrydning under naturlige forhold og nedbrydning ved standardiseret frostprøvning, jf. [de Place, 96a]. Mens det for to af tre betoner er tilstrækkeligt med nogle måneders frostprøvning uden salt for at opnå en voldsom nedbrydning af materialet, viser der sig ikke nogen som helst nedbrydning efter to års naturlig eksponering. Det ses såvel rent visuelt som ved løbende bestemmelser af det dynamiske E-modul, udtrykt som ultralydhastighed.

Fugttransport

For at kunne foretage beregninger af fugttransport kræves ud over viden om aktuel belastning også tal for materialets evne til at transportere fugt under givne forhold.

Parametre, der beskriver fugttransport kan bestemmes under stationære forhold, selv om det kræver stor omhyggelighed, jf. at der kun transporteres ganske små fugtmængder i de undersøgte betoner. Problemet opstår ved, at det ikke er uden problemer at gå fra stationære forhold i laboratoriet til praktiske, instationære forhold.

Ved instationære forhold er det ikke realistisk at skelne skarpt mellem ren damp- og væsketransport, hvilket beregningen af transportkoefficienter med den benyttede metode forudsætter. Desuden er fugttransportkoefficienter ved væsketransport stærkt afhængige af fugtindholdet. En tilfredsstillende beskrivelse af fugttransportegenskaber kræver derfor en lang række diffusionsmålinger ved forskellige fugtforhold.

På samme måde viser målinger med gammastråling vanskelighederne ved at måle fugtindhold i tætte betoner. Dels der er tale om meget små fugtmængder, dels er beton et inhomogent materiale, hvor fugtindholdet derfor varierer fra punkt til punkt. Stor præcision mht. fastlæggelse af målepunkter kræves derfor for at kunne opnå pålidelige målinger. På den anden side viser målingerne, at gammastråling er anvendelig selv på så tæt et materiale som beton med vand/cementforhold på 0,3.

Videre perspektiver

De udførte undersøgelser viser, at der må arbejdes mere med de anvendte metoder for at udnytte de muligheder der ligger i dem:

- der skal arbejdes mere med hvordan registreret vådtid kan udnyttes til beregninger af fugttransport

- mulighederne for at indstøbe vådtidsmåleceller i beton som alternativ til fugtmåledyvler bør undersøges
- det skal afklares, hvor detaljeret et kendskab til fugttransportkoefficienter der kræves for at kunne foretage pålidelige simuleringer af fugttransport fx ved frostprøvning
- mulighederne for at anvende gammastråling eller tilsvarende måleprincipper til fugtmålinger i beton skal undersøges nærmere.

Summary

Frost resistance of building materials - additional tests

This report describes exposure tests made as additional investigations in the ph.d. project "Frost resistance of building materials".

A theoretical model for determination of critical degrees of saturation of porous building materials is presented in the main report of the project. The model is discussed on basis of laboratory tests.

Capillary water uptake, standardized freeze-thaw tests and outdoor exposure are made to compare the predictions of the theoretical model to the results obtained at different kinds of exposure. Coefficients of vapour and liquid transfer are determined in order to be able to simulate the moisture transfer which takes place at outdoor or freeze-thaw exposure.

Moisture conditions on the inside as well as on the surface of outdoor exposed specimens are followed. Information about weather conditions is collected. The degradation at outdoor exposure is characterized using the ultrasonic pulse velocity method. Further it was tried to determine the moisture content using gamma ray attenuation as an experiment.

The tests are made on concrete without air entrainment with water/cement ratio 0,3, 0,45 and 0,7.

Capillary water uptake and standardized freeze-thaw tests are described in the main report "*Frost resistance of building materials - modelling of critical degrees of saturation*" (SBI-report 268, in Danish).

Diffusion tests show a significant difference in the ability of the three materials in transporting moisture in the form of vapour as well as in the form of liquid. An actual moisture distribution, as obtained during freeze-thaw tests, is not determined.

Two years of exposure show no degradation of the specimens and no change in ultrasonic pulse velocity. There is agreement between the moisture content on the surface of the exposed specimens expressed by the time of wetness and the weather conditions expressed by the relative humidity. Measurements of moisture content inside the specimens determined by means of wooden dowels placed in drilled holes show a very high level at all seasons, which indicates penetrating moisture.

The exposure tests show the difficulty in collecting the data which are necessary in order to simulate moisture transfer and thereby determining actual degrees of saturation, established at real conditions. Compared to this, a determination of the degree of saturation by capillary water uptake is easy.

The coefficients of moisture transfer, especially in the form of liquid, have proven to be very dependent on the moisture content. Therefore simulation of moisture transfer at instationary conditions, such as standardized freeze-thaw testing, demands detailed knowledge about transport coefficients. Such knowledge does not exist, and therefore it has not been possible to make the desired simulations of moisture transfer.

Generally, tests show that for concretes with a low moisture content, e.g. the concretes investigated, great precision of the measurements is demanded.

Symbolliste

K	transportkoefficient for vand på væskeform ved kombineret damp- og væsketransport	[kg/(Pa m s)]
K_{90}	do.; hvor det antages, at der kan skelnes skarpt mellem de to transportformer vha. en fugtfront, og hvor væsketransport dominerer for $RF > 90 \%$	[kg/(Pa m s)]
K_{98}	do.; for $RF > 98 \%$	[kg/(Pa m s)]
P_{suc}	hydraulisk tryk	[N/m ²]
R_f	elektrisk modstand i fugtmåledyvel, formel (A.1)	[MΩ]
RF	relativ fugtighed	[%]
RF_{ff}	RF ved fugtfront	[%]
RF_{kk}	RF i klimakammer	[%]
TOW	vådtid (time of wetness). Den (relative) tid, hvor strømmen gennem målecellen ved måling med Wetcorr-udstyr er større end en given værdi	
V	spænding mellem stifter i fugtmåledyvel, (A.1)	[V]
V_{ref}	spænding over kortsluttet modstand, (A.1)	[V]
V_0	spænding over afbrudt modstand, (A.1)	[V]
c	lydhastighed	[m/s]
f	frekvens ved måling af ultralydhastighed	[kHz]
k_d	transportkoefficient for vanddamp ved kombineret damp- og væsketransport	[kg/(Pa m s)]
$k_{d,90}$	do., hvor det antages, at der kan skelnes skarpt mellem de to transportformer vha. en fugtfront, og hvor damptransport dominerer ved $RF < 90 \%$	[kg/(Pa m s)]
$k_{d,98}$	do.; $RF < 98 \%$	[kg/(Pa m s)]
m_{slut}	masse ved afslutning af diffusionsforsøg	[kg]
m_{ssd}	masse i vacuumvandmættet, overfladetør tilstand	[kg]
m_{105}	masse efter tørring til konstant vægt ved 105°C	[kg]
p_s	mætningsdamptryk ved en given temperatur	[Pa]
q	transporteret fugtmængde (flow)	[kg/(s m ²)]
r_k	Kelvinradius	[m], [nm]
t	gennemløbstid	[s], [μs]

t	tykkelse af emne	[mm], [m]
t_{fugt}	vådtid	[s]
u	materialets ligevægtsfugtindhold ved en given RF	[kg/kg]
u	træfugt	[kg/kg]
u_{cap}	fugtindhold i kapillært mættet tilstand	[kg/kg]
u_{vac}	fugtindhold i vacuumvandmættet tilstand	[kg/kg]
x	fugtfrontens beliggenhed regnet fra den eksponerede overflade (prøvens underside) ved diffusionsforsøg, afsnit 2.1.1	[mm], [m]
$\Delta t_{film\ afvikling}$	den tid det tager af afvikle en fugtfilm af en vis tykkelse	[s]
$\Delta t_{film\ opbygning}$	den tid det tager at danne en fugtfilm af en vis tykkelse	[s]
$\Delta t_{kondens}$	tidsperiode med overfladekondensation på en konstruktion	[s]
$\Delta t_{slagregn}$	tidsperiode med slagregn, dvs kombineret nedbør og vindpåvirkning på en konstruktion	[s]
δ_p	transportkoefficient for vanddamp ved ren damptransport (permeabilitet)	[kg/(Pa m s)]
$\delta_{p,dry}$	transportkoefficient for vanddamp (permeabilitet) for $RF < 60\%$	[kg/(Pa m s)]
$\delta_{p,wet}$	do. for $RF \approx 98\%$	[kg/(Pa m s)]
θ	temperatur	[°C]
λ	bølgelængde	[m]
σ	overfladespænding mellem væske og luft For vand i luft ved 20°C: $\sigma = 0,07275$ N/m, jf. [CRC Handbook]	[N/m]

Litteratur

I tilfælde af, at en forfatter optræder med flere referencer fra samme år, angives det ved a,b, osv efter årstallet. Litteraturlisten er udarbejdet fælles med lister i [de Place,96a,96b].

Ahlgren L.: *Moisture fixation in porous building materials*. Rapport 36, Institutionen för Byggnadsteknik, Lunds tekniska Högskola. Lund, 1972.

Beton-Bogen. Redigeret af A.D.Herholdt et al. CtO, Aalborg Portland, 2.udg. 1985.

Carpenter, T.A.; Davies, E.S.; Hall, C.; Hall, L.D.; Hoff, W.D. & Wilson, M.A.: *Capillary water migration in rock: process and material properties examined by IMR imaging*. Materials and Structures, vol.26, no.159, pp.286-292, 1993.

CRC Handbook of Chemistry and Physics. 64th Edition, 1983-84, CRC Press Inc., Florida, 1984.

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.: *Byggematerialers frostbestandighed - Modellering 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.

DS 423.33: *Betonprøvning. Hærdnet beton. Ultralydhastighed*. DS 423.33. Dansk Standardiseringsråd. 1.udg. marts 1984.

Fagerlund G.: *Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material*. Thesis. Rapport 34, Inst f Byggnadsteknik, Lunds Tekniska Högskola. Lund, 1972b.

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.

Frandsen T. & Jensen, H.S.: *Vejledning i brug af gammastrålings-fugtmåleudstyr med to kilder*. Lab f. Bygningsmaterialer, Danmarks Tekniske Højskole, Lyngby, jan 1993.¹

Fukthandbok. L.E.Nevander, B.Elmarsson. Svensk Byggtjänst, Stockholm 1981.

Garrecht H.: *Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk*. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Hefte 15. Karlsruhe, 1992.

Gregg, S.J. & Sing, K.S.W.: *Adsorption, Surface Area and Porosity*. Academic Press, London & New York, 1967.

Hagemann E.: *Byggematerialer, Grundbog*. Polyteknisk Forlag, 5.udgave, 2.oplag, 1991.

Hall C.: *Water sorptivity of mortars and concretes, a review*. Magazine of Concrete Research, vol.41, no.146, pp.51-61, 1989.

Hall C. & Kalimeris, A.N.: *Water movement in porous building materials - V. Absorption and shedding of rain by building surfaces*. Building and Environment, vol.17, no.4, pp.257-262, 1982.

Hedenblad G.: *Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste*. Thesis. Report TVBM-1014, Div. of Building Materials, Lund Institute of Technology. Lund, 1993.

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.

Henriksen, J.F.; Haagenrud, S.E. & Støre M.: *Monitoring of the wetness impact on buildings by means of a new instrument for continuous recordings (EUREKA EU615 EURO CARE WETCORR)* Nilu Report: NILU F1/93, nov 92, Norsk Institut for Luftforskning, Lillestrøm, Norge. Submitted to: UNESCO/RILEM Congress on the Conservation of Stone and Other Materials, Paris, 29 June-1 July 1993.

Haagenrud, S.E.; Henriksen, J.F. & Støre M.: *Uttesting av WETCORR-instrumentet. NBS-MK Våttidsseminar i Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 28. april 1993*. NILU Rapport: NILU OR 44/93, Lillestrøm, Norge. Oktober 1993.

¹ Senere udkommet som: Teknisk Rapport 315/94, Lab f Bygningsmaterialer, DTU.

Kiessl K.: *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen*. Dissertation. Universität-Gesamthochschule Essen, Fachbereiches Bauwesen. Essen, 1983.

Krischer O.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Trocknungstechnik, Erster Band. Dritte neubearbeitete Auflage von W.Kast. Springer Verlag, 1978.

Marsteen L.: *RingSys Basic Module USER's GUIDE*. Udkast. NILU, Lillestrøm, Norge. Dec 1991. 40p.

Marsteen L.: *RingSys WetCorr Module USER's GUIDE*. Manual til WetCorr Modul version 3.8 920901. NILU, Lillestrøm, Norge. Jan 1992. 23p.

do: *RingSys Statistical Module USER's GUIDE*. Manual til Stat modul version 3.3 920430. NILU, Lillestrøm, Norge. Jan 1992. 19p.

do: Publishing: *RingSys version 3.5 920430 Basic Module, WetCorr version 3.3 920430, Stat version 3.3 920430*. Opdatering af manualer, udkast. NILU, Lillestrøm, Norge. Maj 1992. 17p.

do: *RingSys - WetCorr Installation Guide*. Part of the RingSys - WetCorr User's Guide. Draft copy. NILU, Lillestrøm, Norge. Sep 1992. 8p.

Munch-Petersen, J.F.: *Fugtmåledybler*. Rapport no.198, Inst.f.Husbygning, Den Polytekniske Læreanstalt, Danm. tekniske Højskole. Lyngby, 1990.

Naik, T.R. & Malhotra, V.M.: *The ultrasonic pulse velocity method*. pp.169-188 in: *CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. (V.M.Malhotra, N.J.Carino: editors). CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, Boston, 1991.

Norberg P.: *Monitoring of surface moisture by miniature moisture sensors*. pp.539-550 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.

Norberg P.: *Evaluation of a new surface moisture monitoring system*. pp.637-646 in: *Proc. 6th Int. Conf. on Durability of Building Materials and Components*. Omiya, Japan, 26-29 Oct 1993, Nagataki, Nireki & Tomosawa (editors). Chapman & Hall, London 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.

Pedersen, C.R.: *Prediction of moisture transfer in building constructions*. Building and Environment, vol.27, no.3, pp.387-397, 1992.

PUNDIT: Pundit manual for use with the Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester. Mark V. C.N.S.Electronics Ltd. 61-63 Holmes Road, London, NW5 3AL. July 1991.

RILEM Recommendation NDT 1. Testing of concrete by the ultrasonic method. Paris, dec 1972.

RINGSYS. Databehandlingsprogram indeholdende RINGSYS version 4.5 920915, STAT version 3.8 920901 og WETCORR version 3.8 920901. 3½" 1.44 MB diskette. NILU, Lillestrøm, Norge. Sep 1992.

Schou J.: *Måling af betons vandtæthed*. pp.23-37 i: Proportionering af holdbar beton. DBF-Publikation nr.19. Dansk Betonforening, København, 1983.

Sereda, P.J.: *Measurement of surface moisture*. ASTM Bulletin no.228, pp.53-55, 1958.

Sereda, P.J.; Croll, S.G. & Slade, H.F.: *Measurement of the time-of-wetness by moisture sensors and their calibration*. pp.267-285 in: Atmospheric corrosion of metals. ASTM STP 767. American Society for Testing and Materials, 1982 (S.W.Dean Jr, E.C.Rhea, editors).

SS 13 72 44: *Betongprovning - Hårdnad betong - Frostresistens*. SS 13 72 44, 1.udgave. Standardiseringskommissionen i Sverige. jan 1988.

Støre M.: *WETCORR - Et instrument for registrering af vådtid*. NILU Rapport: NILU OR 76/92. NILU, Lillestrøm, Norge. okt 1992.

Støre M. & Marsteen L.: *Users manual for the 0-serial WetCorr instrument*. First edition. NILU TR 8/92. NILU, Lillestrøm, Norge. aug 1992.

Svennerstedt B.: *Ytfukt på byggnadsmaterial*. Forskningsrapport TN:16, Statens Inst f Byggnadsforskning. Gävle, Sverige, 1989.

Terrill, J.M.; Richardson M. & Selby, A.R.: *Non-linear moisture profiles and shrinkage in concrete members*. Magazine of Concrete Research, vol.38, no.137, pp.220-225, 1986.

Thorsen T.: *"Inverted-cup" method*. pp.380-385 in: Building Physics in the Nordic Countries. Symposium and day of Building Physics in Lund, Sweden, August 24-27, 1987. Document D13:1988, Swed. Council of Build. Res., Stockholm, 1988.

van der Velden, J.H.: *Weathering and frost testing of structural ceramics*. Ziegelinstitut International, no.1, pp.18-26, 1983.

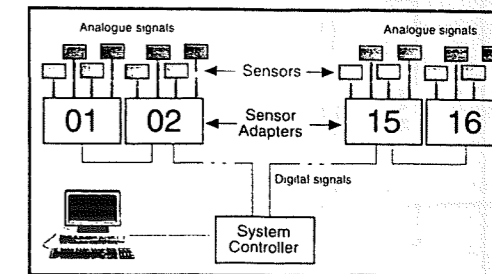
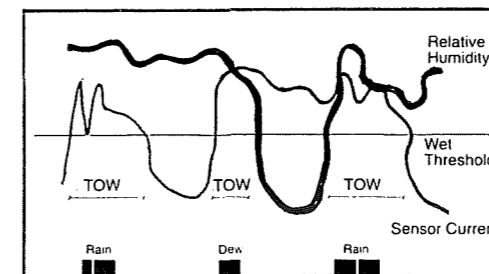
Waldstrøm M. & Rosenbom K.: *Praktisk og teoretisk udførelse af omvendt-kop metoden*. Teknisk Rapport 254/91, Lab f. Bygningsmaterialer, Danmarks Tekniske Højskole. Lyngby, 1991.

Bilag A Forsøgsopstillinger - tekniske beskrivelser

A1 Naturlig eksponering

A1.1 Wetcorr - tekniske specifikationer

I det følgende gengives tekniske specifikationer fra brochuren: "Wetcorr™ Environmental Impact Measuring System". ABB Energi AS, Økern, Oslo.



Sensor Current Response
A sensor in real atmospheric exposure through a precipitation period and TOW is recorded by the Wetcorr instrument

Sensorstrøm
Sensorstrøm under eksponering i atmosfæren i nedbørsperioder. TOW beregnes i Wetcorr-instrumentet

Measuring Sensor: (Measures current (TOW) and temperature)
Sensor (Måler strøm (TOW) og temperatur)

Sensor

- **TOW**
 - Size 17 x 14 mm
 - Gold thickness 1,5 µm ± 0,25 µm
 - Insulation gap 127 µm ± 2 µm
- **Temperature**
 - Type AD-592 AN (glued to the TOW-sensor)
 - Type AD-592 AN (limt til TOW-sensoren)
 - Temperature range -25°C - +105°C
 - Accuracy ±1,5°C
 - Non linearity ±0,15°C

Sensor Adapter (SA)

- Adapter unit for max. 4 sensors
- Measures temperature and current as an average over the sampling period.
- Adapter for max. 4 sensors
- Måler temperatur og strøm som et gennemsnit over samplingsperioden.
- Size 170 x 120 x 30 mm
- Capacity 4 sensors each SA
- Max length of cables 2 m
- Measuring range
 - 0 - 1 µA
 - 1 - 10 µA
 - 10 - 100 µA
 - 100 µA - 1 mA
- Resolution 0,5% of measured value
- Precision 1% or better
- Data speed 1200 bit/s
- Power supply 9 - 15V, ca. 30 mA
- Operation condition Rainproof and temp -25 - +85°C

System Controller

- Controller unit for communication between the SA, SC and PC
- Gives power to the sensors and SA
- Sampling unit and storage for all measuring data
- Kontrollenhet mellom SA, SC og PC
- Forgyer SA og sensorene med strøm
- Lagringsenhet for alle måledata
- Size Ca. 220 x 143 x 55 mm
- Capacity Max 16 SA, equivalent with 164 sensors
- Max length of cables 250 m
- Working supply 12V DC
- Communication PC/PC-MODEM
- Memory size 4 Mbyte
- Selectable sample intervals +1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30 og 60 min
- Applied sensor voltage 0 - 2 V

Communication with SC is established by means of a PC and communication SW.
Data is presented in a plot program by means of WINDOWS and EXCEL.
Kommunikasjon mot SC ved hjelp av PC og kommunikasjonsprogram.
Data presenteres i et eget plotteprogram ved bruk av WINDOWS og EXCEL.

Wetcorr - principal outline
Wetcorr - prinsippskisse

Størrelse
Gulltykkelse
Isolasjonstetthet

Temperaturområde
Nøyaktighet
Ikke lineart

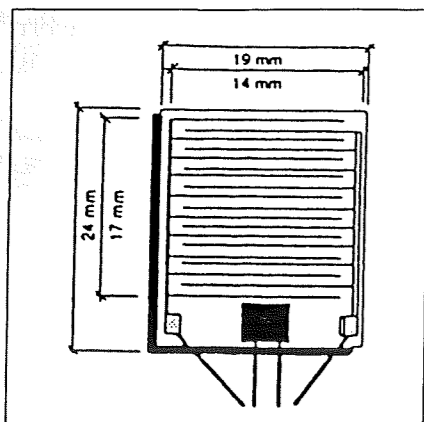
Størrelse
Kapasitet
Max. kabellengde
Måleområde

Opplysing
Nøyaktighet
Datahastighet
Strømforsyning
Driftsbetingelser

Størrelse
Kapasitet
Max. kabellengde
Arbeids strømforsyning
Kommunikasjon
Minne
Valgbare registreringsintervaller
Valgbare sensorspenning

Måleceller

Målecellen (fugtsensoren), der ses i figur A1, er en elektrolytisk celle som består af en tynd guldbelægning, der er ætset på en 0,7 mm tyk keramisk plade af aluminiumoxid. Pladen måler 19x24 mm, mens fugtsensoren måler 14x17 mm. Guld benyttes som ledende materiale, da det er mere holdbart end fx zink eller kobber, når det udsættes for atmosfæriske forhold.



Figur A1. Aktuell målecelle med fugt- og temperatursensor, [Henriksen, Haagenrud & Støre, 93]. Temperatursensoren ses som det mørke felt nederst i midten.

Overfladetemperaturen registreres vha. en temperaturtransducer som beskrevet i de Tekniske Specifikationer. Udgangspunktet for udformningen af cellen har været, at fugt- og temperatursensor skal være i så nær kontakt som muligt med det materiale, der måles på, dog således at cellen har en tilstrækkelig robusthed.

Målecellens fugtsensor drives med en konstant spænding, hvis polaritet vendes hvert 30. sekund for at undgå polarisering af elektroderne.

A1.2 Overførsel og behandling af data fra Wetcorr

AI kommunikation med Wetcorr's System Controller (SC), herunder dataoverførsel, er seriel interface (RS 232) kommunikation og styres via et terminalprogram fra en PC, fx PCPLUS eller PROCOMM+. PC'en behøver kun at være tilsluttet, når data overføres fra System Controller til PC/diskette.

Overførsel af data

Benyttes PCPLUS eller PROCOMM+ til dataoverførsel sker det på følgende vis:

- start programmet fra DOS
- sørg for at kommunikationsparametre nederst i vinduet er: 9600 baud, no parity, 8 data bits og 1 stop bit på COM 1 (9600, N, 8, 1)
- system controller kobles til PC
- hvis kobling er korrekt vil der nu på skærmen stå:
PASSWORD:
- indtast Password (fra start er det Wetcorr, benyt store bogstaver) og tryk <ENTER>

- på skærmen ses nu følgende hovedmenu:

```
*****
***      MAIN MENU  2970 WETCORR SBI - EJP      TIME: 931125 1530      ***
*****
```

```
LIST      : LIST SENSOR ADAPTERS
DISP      : DISPLAY 1 MINUTE DATA FROM SELECTED SENSOR
LCON      : LIST SENSOR ADAPTERS CONNECTED
```

```
CONFIG    : SYSTEM CONFIGURATION
SITE      : EDIT SITE
TIME      : SET DATE AND TIME
HELP      : RETURN TO THIS MENU
```

>

Kommandoerne har følgende funktion:

LIST: benyttes når indsamlede data skal ses og/eller overføres fra den valgte sensor adapter SA (01 til 16) for den valgte tidsperiode. Det er muligt at se data side for side eller blot lade dem rulle hen over skærmen. Ved at vælge at se data side for side (STOP ON FULL PAGE ? Y/N; vælg Y) fås den følgende side frem ved at skrive N for NEXT eller trykke på mellemrumstasten.

DISP: viser on-line data fra den valgte sensor adapter hvert minut.

LCON: viser hvilke sensor adaptere der er tilkoblet system controlleren samt de valgte værdier for celledspænding og tidsinterval for indsamling af data.

CONFIG: CONFIG skal benyttes, hvis værdier for tidsinterval og celledspænding skal ændres eller hvis flere sensor adaptere (SA) ønskes tilsluttet. Mulige tidsintervaller: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 30 eller 60 min. Celledspænding kan vælges mellem 0 og 2 V. Det anbefales at benytte 100 - 200 mV. Værdierne vælges individuelt for hver enkelt SA. CONFIG finder selv ud af, om den pågældende SA er tilsluttet eller ej. I sidstnævnte tilfælde går programmet selv videre til næste SA. Funktionen CONFIG afsluttes med en liste over de tilsluttede SA'er, svarende til den liste der kommer frem når LCON vælges.

Bemærk: Inden CONFIG vælges skal de indsamlede data overføres, da de ellers vil blive slettet (programmet spørger om data må slettes hvis CONFIG vælges).

SITE: benyttes, når målestationen skal navngives (her: 2970 WETCORR SBI - EJP) eller ændres til et andet navn samt når Password ønskes ændret.

TIME: benyttes til indstilling af korrekt dato og tid.

HELP: der returneres til hovedmenuen. Alternativt trykkes to gange på <ESC>.

De enkelte kommandoer aktiveres ved at skrive kommandoen (eller blot de første to bogstaver) efterfulgt af <ENTER>. Efterfølgende stilles brugeren over for en række valg - fx valg af sensor adapter, som data skal overføres fra - eller ja/nej spørgsmål - fx om tidspunktet er korrekt. Vælges en forkert menu kan <ESC> normalt benyttes til at komme tilbage igen.

Når data skal overføres fra system controller til PC eller diskette, startes i hovedmenuen. For hver tilsluttet sensor adapter udføres følgende:

- skriv LI (LIST) og tryk <ENTER>
- vælg sensor adapter (01-16) og tryk <ENTER>
- vælg tidsperiode som data skal overføres fra og tryk <ENTER>
- på skærmen står nu:

STOP ON FULL PAGE ? Y/N

Vælg N og tryk <ALT + F1> (dvs. de to taster trykkes ned samtidig) for at kunne overføre data til PC.

- programmet spørger om filnavn. Filnavn skal skrives på følgende måde: ssssSAaa.SYM, hvor ssss står for stationsnummer (fx 2970) og aa for nummer på sensor adapter (01-16). De øvrige tegn er tvungne.

Husk at angive diskettedrev foran filnavnet, hvis data skal overføres til diskette.

- tryk <ENTER> og programmet svarer med LOG OPEN i statuslinien nederst på skærmen
- tryk <ENTER> igen og dataoverførslen går igang samtidig med at data ruller hen over skærmen med filnavnet øverst
- dataoverførslen afsluttes med at trykke <ALT + F1> hvorefter LOG OPEN skifter til LOG CLOSED
- proceduren gentages for de øvrige sensor adaptere.

Når data fra samtlige sensor adaptere er overført:

- tøm system controlleren for data ved at taste CO (CONFIG) og svare ja (Y) til at data må slettes.

Derefter fortsætter dataopsamlingen automatisk. Se i øvrigt under CONFIG ovenfor.

Afslutning af programmet:

- gå til hovedmenuen og tryk <ALT + X> (trykkes ned samtidig). PCen spørger: "Exit to DOS ?" Svar med et Y (ja).

Se i øvrigt [Støre & Marsteen,92].

Bearbejdning af data

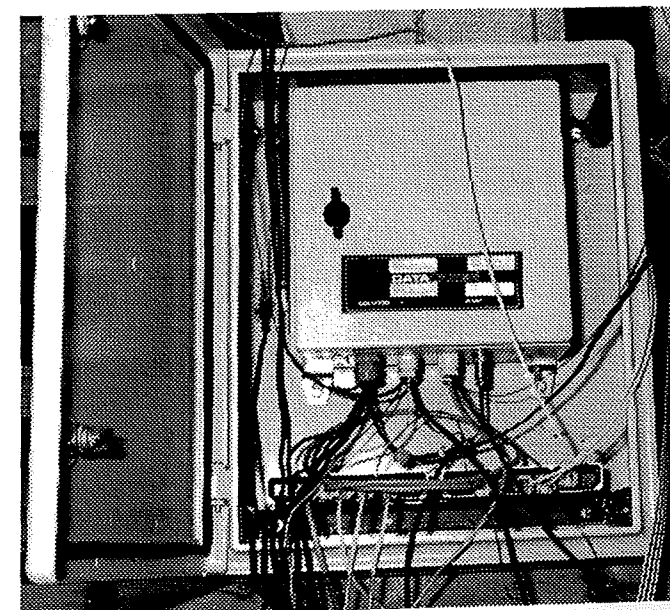
Bearbejdning af de overførte data sker via et databehandlingsprogram kaldet RINGSYS udviklet på Norsk Insitut for Luftforskning (NILU). RINGSYS kører under Microsoft's regneark Excel og kræver som minimum en 80386SX PC med 4 MB RAM med mus og VGA monitor samt DOS 3.3, MS Windows 3.0 og MS Excel 3.0.

I en fil under RINGSYS med navnet WCSETUP.XLS angives en række oplysninger til brug for opsætning og behandling af data, bl.a. skal korrektionen for hver enkelt temperatursensor angives, ligesom akseinddelinger, aksetekster etc. kan vælges. I filen angives ligeledes navne på samtlige målestationer. Der er mulighed for at automatisere oprettelsen/opdateringen af databaser, udvælgelse af data samt optegning og udskrivning af grafer.

Se i øvrigt [Marsteen,91,92].

A1.3 Datataker DT 100 I

Figur A2 viser dataloggeren til opsamling af data fra termolemter og fugtmåledyvlere, anbragt i en fugttæt kasse på eksponeringsstationen sammen med dataloggere til vådtidsmålinger.



Figur A2. Dataopsamling. Øverst ses Datataker DT 100 I, der benyttes til opsamling af temperatur- og fugtmålinger. Nederst er anbragt System Adaptere til vådtidsmålinger.

Datablad for Datataker DT 100 I

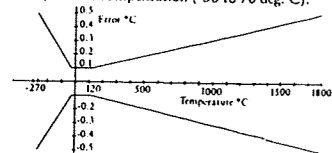
Specifications

Input Channels
 Analog: 23 differential or 46 single-ended or mix
 Auto-ranging 6 to 30 samples per second.
 Resolution 15 bit (1uV), 13 bit stored data.
 Accuracy 0.15% voltage. Linearity <0.05%
 Input resistance >100 M Ohms
 Common Mode Range ±4V, rejection >80db
 Series Mode Line Rejection >35db
 Digital: 9 TTL and CMOS compatible lines for state, counter, event and conditional scanning.
 State input: bit or byte addressing.
 Count input: 16 bit presettable, zero events, 8 slow (130 Hz), 1 fast (2 MHz).

Ranges:

Input Type	Range Limits	Units
Voltage	±2500.0 ±250.00 ±25.000	mV
Current	±250.00 ±25.000 ±2.5000	mA
Loop 4-20 mA	±32767 ±3276.7 ±327.76	Percent Span User defined
Loop 10-50 mA	±32767 ±3276.7 ±327.76	Percent Span User defined
Resistance	25000 2500.0 250.00	Ohms
Frequency	20000 3276.7 327.67	Hz
Period	25000 3276.7 327.67	uSec
Temperature	1800.0 ±327.67 ±327.67	Deg C
	3276.7 ±327.67 ±327.67	Deg F
Strain	±32767 ±3276.7 ±327.67	ppm
Digital	0, 1	Digital
Digital Average	100.00	Digital Ave
Digital Byte	0-255	Digital
Count	±32767	Counts
Count Average	±32767 ±3276.7 ±327.67	Counts Ave
Polynomial	±32767 ±3276.7 ±327.67	User defined

Temperature Measurement
 Thermocouple: B E J K N R S & T types, linearization and cold junction compensation (-30 to 70 deg. C).



RTD: Platinum types (α = 0.391) of any value.
 Semiconductor: AD590, LM335, LM35 types.

Time
 Resolution: 1 sec., 2 sec. for output time
 Format: time hh:mm:ss, day dddd
 Accuracy: 2 sec. per day.

Output Channels
 Analog: 1 expandable to 2.
 12 bit, 4 quadrant multiplying (±5V max)
 For chart recorder, meter, setpoint and sensor support.
 Digital: 8 open collector lines, +30V 200mA. For control, alarm, sensor support and general purpose output.
 Relay output: 3 sets, 5A 240VAC

Scanning
 Single channel, one or two repetitive multiple channel, computer requested multiple channel.
 Interval Range: 1 sec. to 1000 days, external digital or counter event.
 Conditional Scan: while digital input high.

Data Manipulation
 Averaging, Maximum, Minimum, Time of Max/Min.
 Current Loop Scaling: 5, with user defined span limits and units text.
 Polynomial: 5, up to fourth order with user defined constants and units text.

Data Storage
 Battery backed CMOS RAM, 11000 readings. Over-write and stop-when-full modes. Unload with or without checksum protocol.

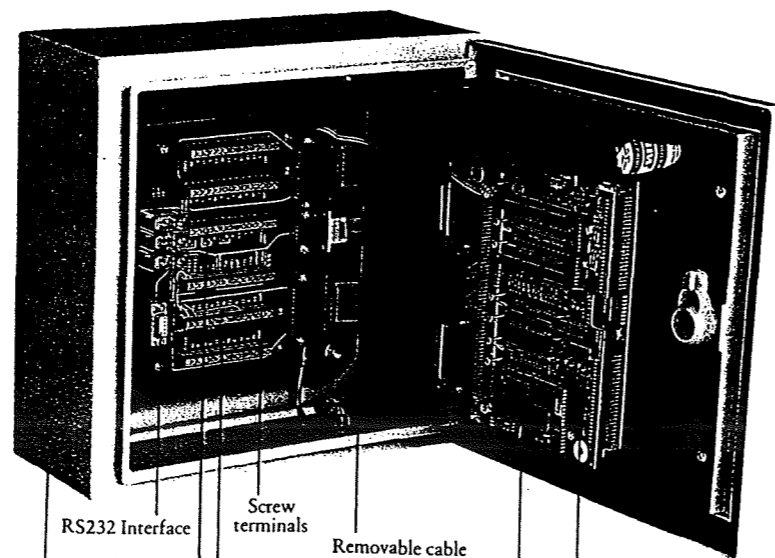
Programming
 By simple descriptive command lines of ASCII characters, entered via the computer interface.

Communications Interface
 RS232/RS423 full duplex, isolated. 75 150 300 600 1200 & 4800 baud. XON/XOFF (DCI/DC3) handshake.

Power Supply
 Voltage: 9-15VAC, 11-18VDC via line adaptor.
 Current Draw: 40mA, <20mA in low power mode.
 Battery backup: NiCd 4Ah, 7 days operation, charge 400mA, maintenance 40mA.

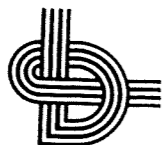
Dimensions
 300mm W x 300mm H x 150mm D, 7.0kg

Accessories
 110/240VAC adaptor, wire-wrap kit, RS232 cable, I/O plugs, temperature probe, batteries, users manual.



Labels for the device image:
 RS232 Interface
 Relay outputs
 Screw terminals
 Removable cable entry panel
 Thermocouple reference junction sensor
 Full-featured data logger
 Steel case (IP55)
 7 day battery backup

The Datataker DT100I withstands the harsh physical conditions, electrical noise, vibration and temperature extremes that have been problems in the past. Shock and vibration resistant with an operating range of -20°C to +65°C, DT100I can be mounted right at the point of measurement.



Designed and manufactured by
 DATA ELECTRONICS (Aust.) Pty Ltd.
 42 Rutland Road,
 Box Hill 3128, Australia
 Tel. (03) 890 2422 Tlx 38615

A1.4 Databehandling - fugtmåledyvlér

Dataopsamling med programmet Decipher¹

- forbind kabel fra datalogger til PC
- start Decipher (fx fra DOS)
- på skærmen ses en menu (kaldet hovedmenu) med følgende punkter:

FncKeys Retrieve Plots Reports Comms Auto

Et menupunkt vælges vha. piletaster og <ENTER>. For oven til højre på skærmen står: "Port open - no Datataker", hvilket fortæller at programmet endnu ikke har kontakt til en datalogger.

- tryk på <F7> (terminalmenu)

Et statusvindue dukker op. Til de kommandoer der skrives i dette vindue benyttes versaler (store bogstaver). Tast STATUS, og programmet svarer bl.a. med nogle koder, der viser, hvordan dataloggeren er sat op. Desuden kan aflæses, hvor mange data der er opsamlet siden sidste tømning.

På en ny linie skrives P10= 10, hvilket er nødvendigt for at få adgang til dataloggeren. Kontrollér evt. at P10 er skiftet til værdien 10 ved at skrive P10 på en ny linie. Terminalmenuen forlades vha. <ESC> (eller F2 - EXIT) og hovedmenuen dukker op igen.

- vælg COMMS for at skabe forbindelse til dataloggeren. En undermenu dukker op. "Default DT Type" skal svare til typen på den benyttede datalogger; her "DT 100"
- flyt cursor til "Look for Datataker" og tryk <ENTER>. Dataloggeren kobles nu ind. For oven til højre på skærbilledet står nu "DT100 online", som tegn på, at der er kontakt til dataloggeren
- gå ud af COMMS ved at trykke <ESC>
- vælg RETRIEVE. "DT logged" under "Get data from" skal stå på "logged data"
- skriv en tekst til beskrivelse af måleserien i "Desc." (fx fugtmåledyvlér i beton nov 93)
- "Data" sættes til "File", hvis data skal overføres til diskette. Programmet beder om et filnavn. Vælges et nyt filnavn, spørger programmet om det er OK, at data overføres til en ny fil
- flyt cursor til "Start retrieve" og tryk <ENTER>. Data ruller nu over skærmen og overføres samtidig til diskette. Efter overførsel af data lukkes filen automatisk
- kontrollér at data er overført (fx vha. Norton Commander)
- vælg <F7> (terminalmenu) og sæt P10 til 2000 (P10=2000)

¹ Decipher, The Datatakers Companion, version 3.22. Copyright © Data Electronics (Aust) 1987-90.

- skriv CLAST (ny linie) og dataloggeren tømmes. At dataloggeren er tømt kan kontrolleres ved at vælge F7 og skrive STATUS i terminalmenuen
- *afslut programmet*: Gå til hovedmenuen, afslut med <ESC> og vælg "Exit the program".

Data ligger nu på en kommasepareret fil (extension DTU), der kan importeres til regnearksprogram, fx Quattro Pro. Filen vil da automatisk fremstå med data opdelt i kolonner, lige til at regne på.

I dette projekt indeholder en datafil følgende kolonner:

1. kolonne : dato
2. kolonne : klokkeslet (evt. i sekunder)
- 3.-8.kolonne : temperatur i seks termoelementer
9. kolonne : spænding over 1 MΩ referencemodstand
- 10.-15. kolonne : spænding over seks fugtmåledyvlere
16. kolonne : spænding over 1 GΩ referencemodstand
- 17.-18. kolonne : spænding over kortsluttet henholdsvis afbrudt modstand (V_{ref} henholdsvis V_0)

Den elektriske modstand (R_f) i en fugtmåledyvel bestemmes herefter vha.

$$R_f = \frac{V_{ref} - V}{V - V_0} \cdot 1 \text{ M}\Omega \quad (\text{A.1})$$

Referencemodstande indgår for at kontrollere kvaliteten af målekredsen. Ud fra data fra kolonne 9 og 16 beregnes referencemodstanden vha. (A.1). Jo tættere disse resultater ligger på 1 MΩ henholdsvis 1 GΩ desto mere pålidelige er de indsamlede data.

Resultatbehandling

Bearbejdning af data foregår vha. makroer som forfatteren har opstillet i regnearksprogrammet Quattro Pro. Der foretages omregninger af spændingsforskelle til modstande vha. (A.1) og derfra videre til træfugt vha. (2.7) og (2.8). Der er også forberedt omregninger til relativ fugtighed, som dog ikke er anvendt.

Makroer anvendes desuden til at optegne figurer som vist i afsnit 3.2.3 og bilag B2.4.

Bilag B Måleresultater

B1 Fugttransport

B1.1 Diffusionsforsøg

Resultater fra diffusionsforsøg (kopforsøg) vises som vægt af kop som funktion af tiden. For hver beton er benyttet tre prøver til retvendt kop og tre prøver til omvendt kop, skåret ud af samme cylinder.

Retvendt kop

I retvendt kop opretholdes i princippet $RF = 0\%$ i koppen vha. silicagel, mens der er $RF \approx 50\%$ i rummet udenfor. Resultaterne afbildes således at serierne umiddelbart kan sammenlignes mht. transporteret fugtmængde, jf. figur B1 - B3.

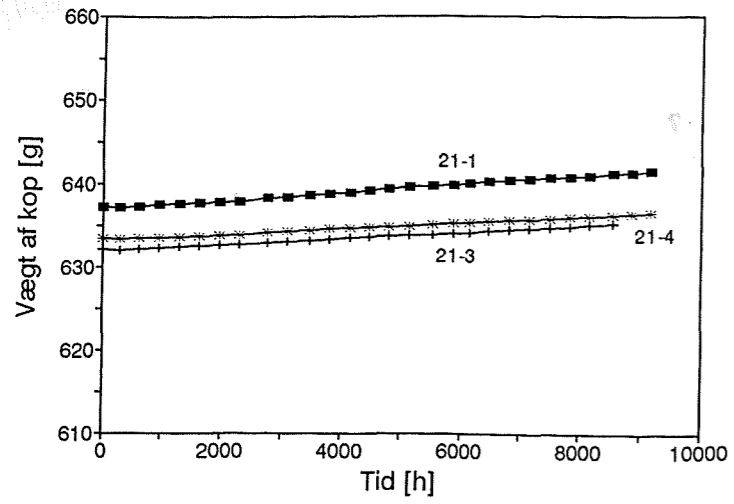
Vægtændringerne er meget små for beton 0.30, hvilket har vanskeliggjort en præcis bestemmelse af diffusionskoefficienter.

For at opretholde forsøgsomstændighederne har det været nødvendigt at skifte silicagel ud undervejs. Dette ses som flade pukler på kurverne.

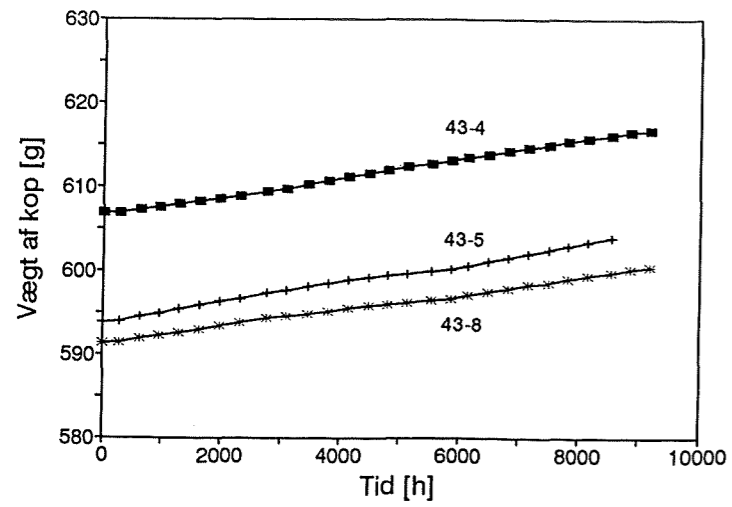
Omvendt kop

For omvendt kop, hvor der er vand i koppen, kan hældningen af kurverne i figur B4, B5 og B6 ikke uden videre sammenlignes, jf. inddelingen af y-akser. Inddelingen af y-akser er foretaget for at illustrere det karakteristiske forløb af vægtændringen.

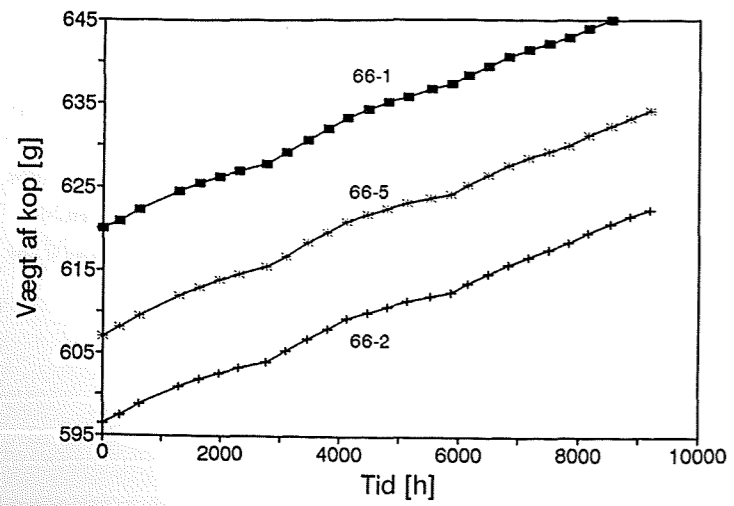
For at opretholde forsøgsomstændighederne har det været nødvendigt undervejs at fylde ekstra vand på, hvilket ses som små knæk på kurverne.



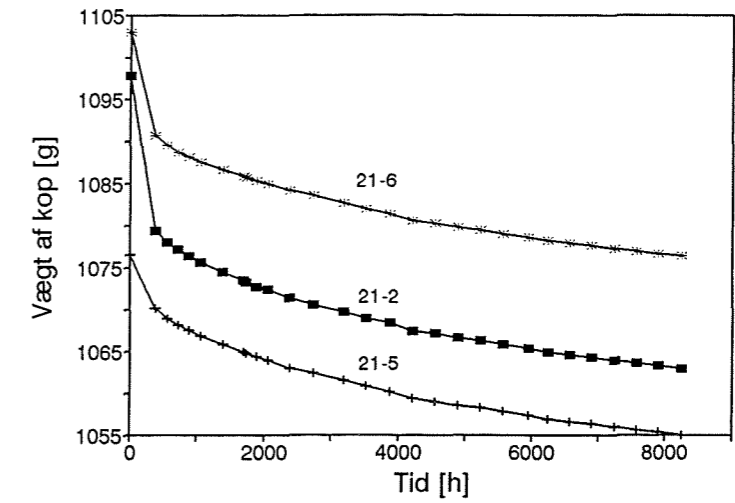
Figur B1. Diffusionsforsøg. Beton 0.30. Retvendt kop.



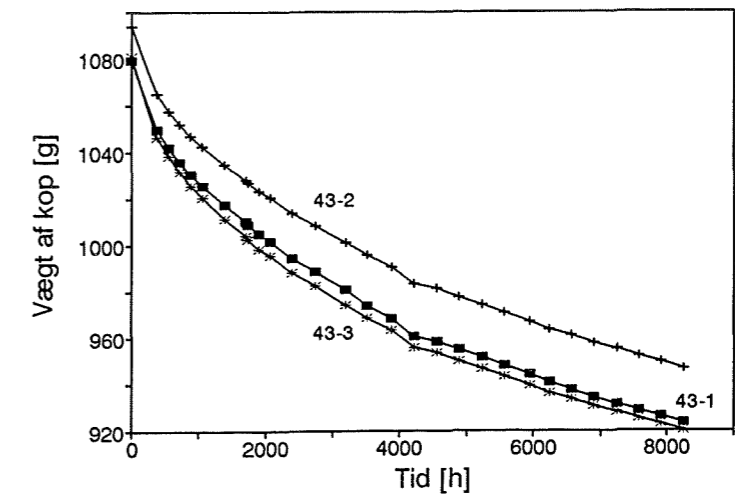
Figur B2. Diffusionsforsøg. Beton 0.45. Retvendt kop.



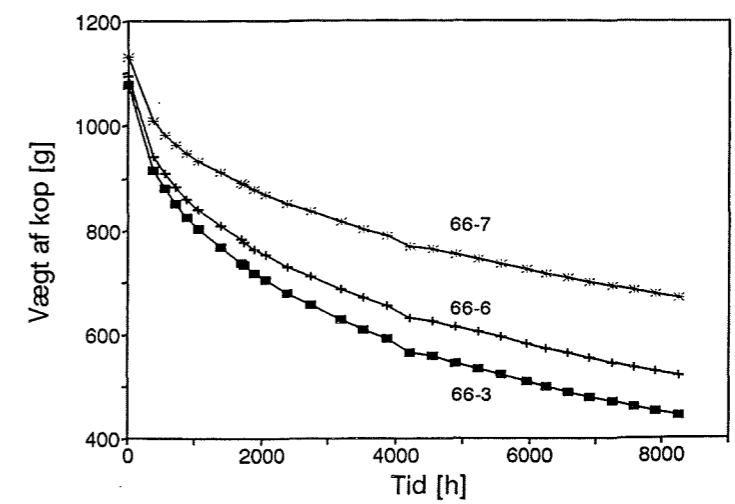
Figur B3. Diffusionsforsøg. Beton 0.70. Retvendt kop.



Figur B4. Diffusionsforsøg. Beton 0.30. Omvendt kop.



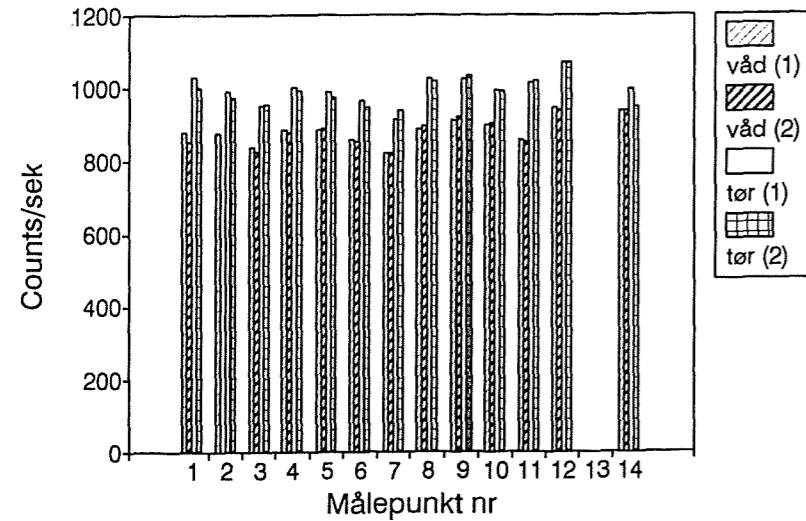
Figur B5. Diffusionsforsøg. Beton 0.45. Omvendt kop.



Figur B6. Diffusionsforsøg. Beton 0.70. Omvendt kop.

B1.2 Gammastråling

Figur B7 er hentet fra [de Place,93a] og viser, hvor kraftigt et signal, (counts/sek), der passerer en prøve af beton 0.30 i våd henholdsvis tør tilstand. Våd tilstand betyder i denne sammenhæng fugtindholdet efter 370 frost-tø-cykler efter [SS 13 72 44] efterfulgt af 2 måneders vandlagring. Derefter er prøven tørret i 13 døgn ved 105°, hvorefter måling i tør tilstand er foretaget.



Figur B7. Gammastråling. Beton 0.30. (1) og (2) angiver, at der er målt to gange i henholdsvis våd og tør tilstand.

Konklusionen i [de Place,93a] er, at det er muligt at skelne mellem resultater i våd og tør tilstand, men at flere undersøgelser er nødvendige for at vurdere mulighederne for at bestemme en egentlig fugtfordeling. Resultaterne illustrerer desuden, at det er vigtigt at måle i *samme* punkter hver gang, da der ikke eksisterer ét bestemt niveau for stråling i tør henholdsvis våd tilstand for målepunkterne under ét.

B2 Naturlig eksponering

Til sammenligning af målinger vha. Wetcorrudstyr og dyvler samt vejrdata vises figurer med resultater fra en række udvalgte måneder i dette bilag. November 1992 er den første måned, hvor der indsamles data udendørs. Februar, april og juli 1993 illustrerer, hvordan Wetcorr-målinger kan relateres til vejrdata. Februar 1994 var kold og snerig med solskin koncentreret i månedens midte og nedbør i begyndelsen og slutningen. Juli 1994 usædvanlig varm og tør.

Desuden vises en samlet oversigt over Wetcorr-målinger opgjort på månedsbasis, tabel B1 og B2, samt resultater fra måling med ultralyd-udstyr, tabel B3.

B2.1 Wetcorr

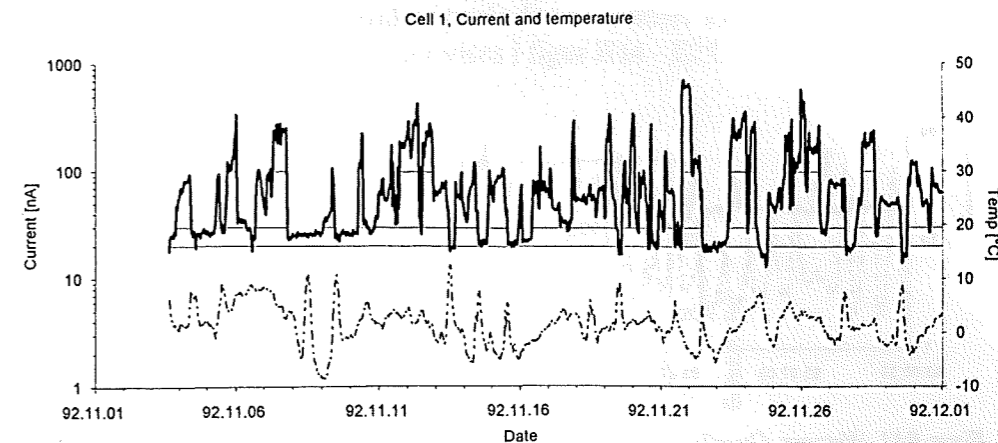
Tabel B1. Resultater af vådtidsmåling, 1992-1993. Time of Wetness (TOW) [%] og gennemsnitlig niveau for strøm i måleceller [nA]. Månedsværdier.

Periode	TOW (20 nA)	TOW (100 nA)	gennemsnit	bemærkninger
1992				
03/11-01/12	92,7	22,5	83,5	
01/12-29/12	84,2	22,4	66,9	
1993				
29/12-01/02	86,5	30,4	89,7	
01/02-01/03	73,0	46,1	111	
01/03-06/04	95,8	7,4	49,4	
06/04-05/05	82,8	3,0	28,7	
05/05-02/06	34,1	3,0	30,8	
02/06-30/06	35,9	0,5	24,9	
30/06-03/08	29,5	0,2	22,1	
03/08-06/09	49,1 *	0,5	22,7	*: > 15 nA
06/09-20/09	43,8 *	1,2	30,4	ingen målinger 20-27/09 *: > 15 nA
27/09-14/10	49,3	22,2	58,2	data gået tabt 14-29/10
29/10-30/11	88,3	38,1	120	
30/11-28/12	87,6	50,4	129	
	% > 20 nA	% > 100 nA	[nA]	

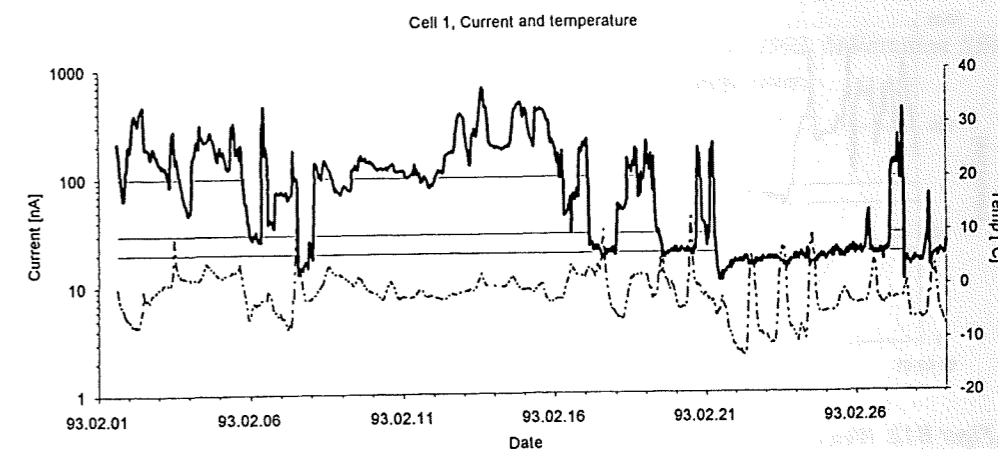
Tabel B2. Resultater af vådtidsmåling, 1994. Time of Wetness (TOW) [%] og gennemsnitlig niveau for strøm i måleceller [nA]. Månedsværdier.

Periode	TOW (20 nA)	TOW (100 nA)	gennemsnit [nA]	bemærkninger
1994				
28/12-31/01	88,3	56,6	133	
31/01-01/03	95,4	33,6	105	
01/03-30/03	87,5	34,5	100	
30/03-02/05	98,6	9,1	43,4	
02/05-01/06	99,0	5,0	37,4	
01/06-01/07	99,0 55,6 *	7,2	44,6	*: > 30 nA
01/07-04/08	99,6 45,0 *	0,7	32,5	*: > 30 nA
04/08-01/09	92,2 43,4 *	6,0	39,9	*: > 30 nA
01/09-03/10	80,1	22,7	66,5	
03/10-02/11	89,9	21,1	68,3	
02/11-02/12	66,6	33,8	90,9	
	% > 20 nA	% > 100 nA	[nA]	

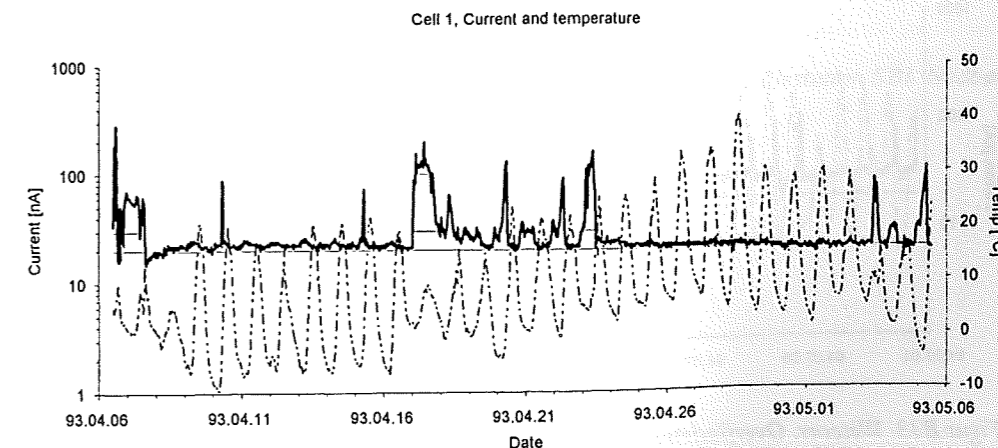
Generelt har målecellerne en god reproducerbarhed mht. vådtid. For at undgå uoverskuelighed angives derfor kun resultater for 1 af 6 måleceller, såvel i tabel B1 og B2 som figur B8 - B13, hvor måledata for udvalgte måneder er afbildet, jf. ovenfor.



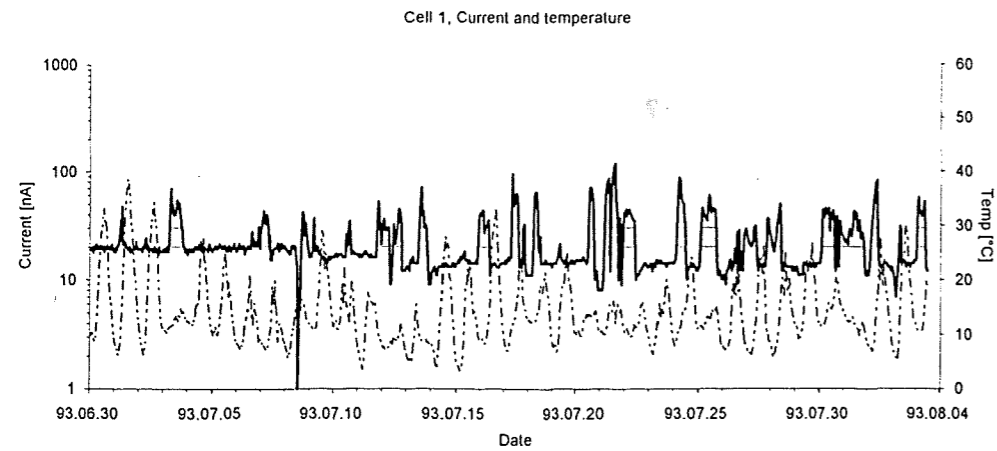
Figur B8. Wetcorr. Overfladetemperatur og strøm gennem målecelle som funktion af tiden. November 1992. Punkteret linie angiver temperaturen.



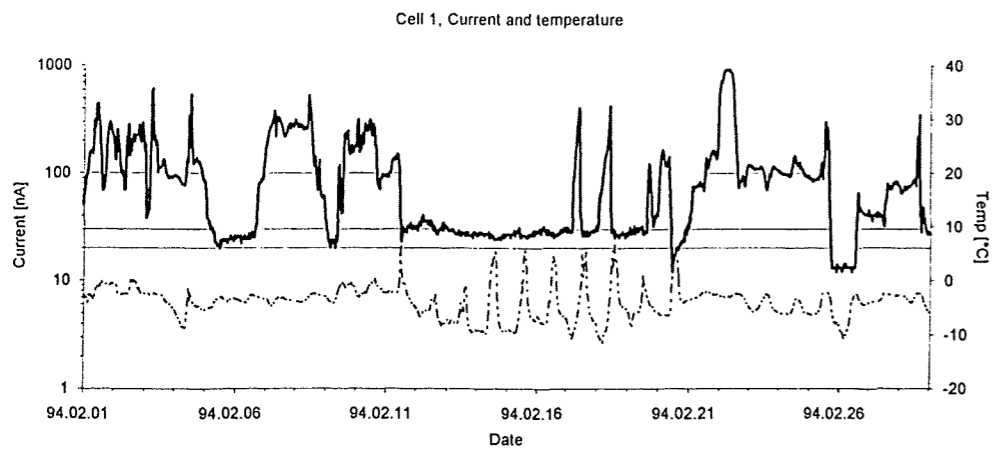
Figur B9. Wetcorr. Overfladetemperatur og strøm gennem målecelle som funktion af tiden. Februar 1993. Punkteret linie angiver temperaturen.



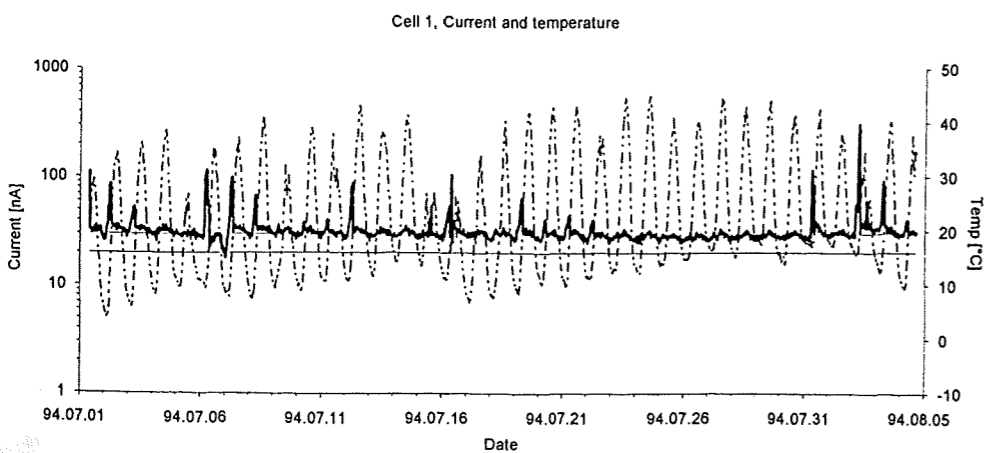
Figur B10. Wetcorr. Overfladetemperatur og strøm gennem målecelle som funktion af tiden. April 1993. Punkteret linie angiver temperaturen.



Figur B11. Wetcorr. Overfladetemperatur og strøm gennem målecelle som funktion af tiden. Juli 1993. Punkteret linie angiver temperaturen.



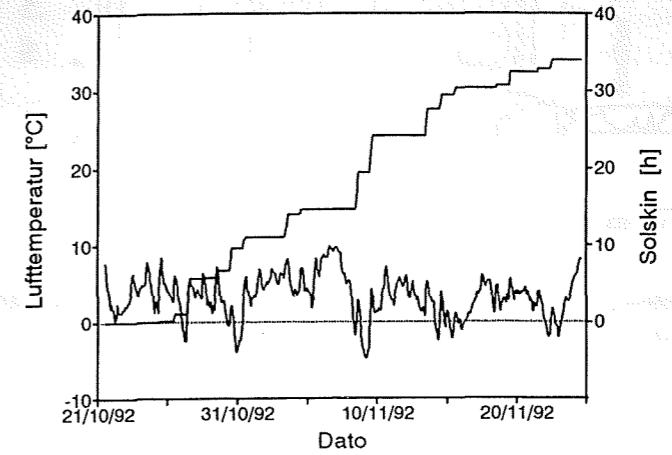
Figur B12. Wetcorr. Overfladetemperatur og strøm gennem målecelle som funktion af tiden. Februar 1994. Punkteret linie angiver temperaturen.



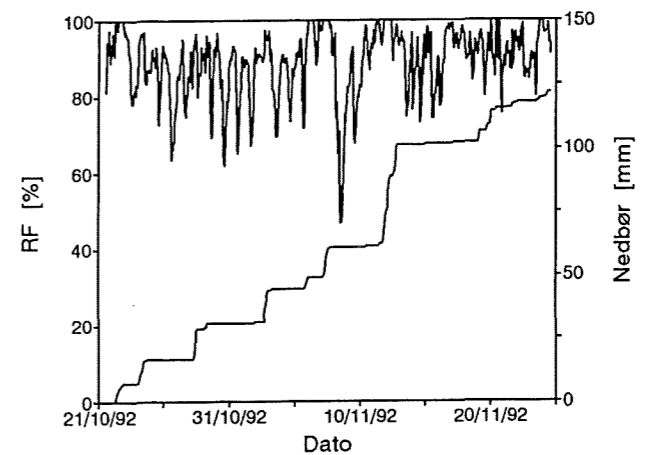
Figur B13. Wetcorr. Overfladetemperatur og strøm gennem målecelle som funktion af tiden. Juli 1994. Punkteret linie angiver temperaturen.

B2.2 Vejrdata

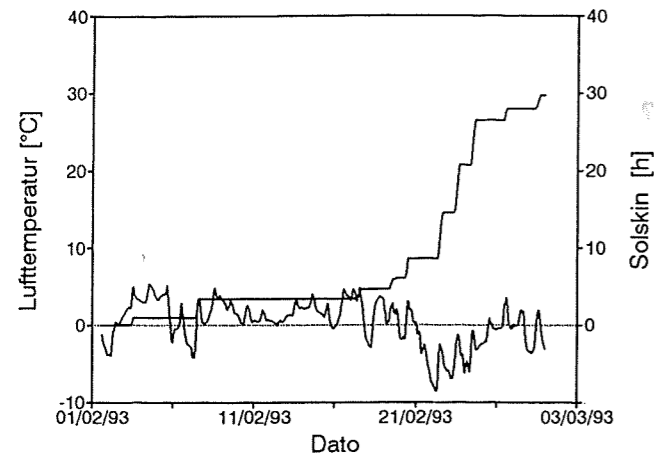
Vejrdata er kun indsamlet i perioden november 1992 til september 1993. Data for udvalgte måneder vises i figur B14 - B21.



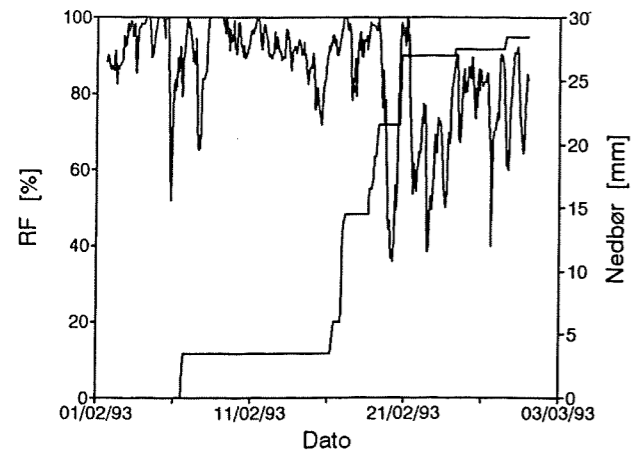
Figur B14. Lufttemperatur og antal solskinstimer, november 1992. Målestation SBI. Solskin er vist som sumkurve, lufttemperatur som øjebliksværdier.



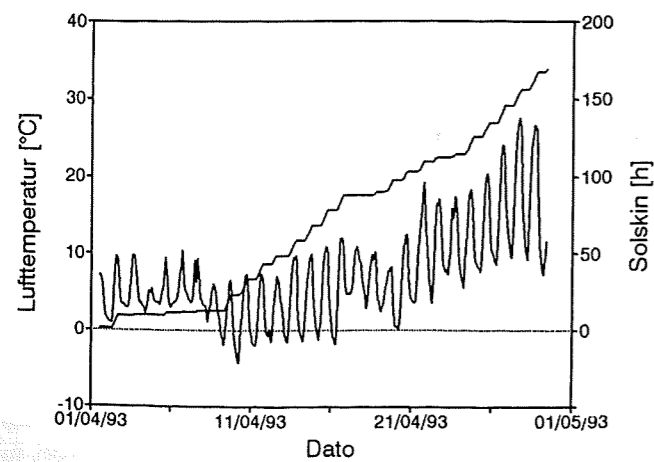
Figur B15. Relativ fugtighed og mm nedbør, november 1992. Målestation SBI. Nedbør er vist som sumkurve, RF som øjebliksværdier.



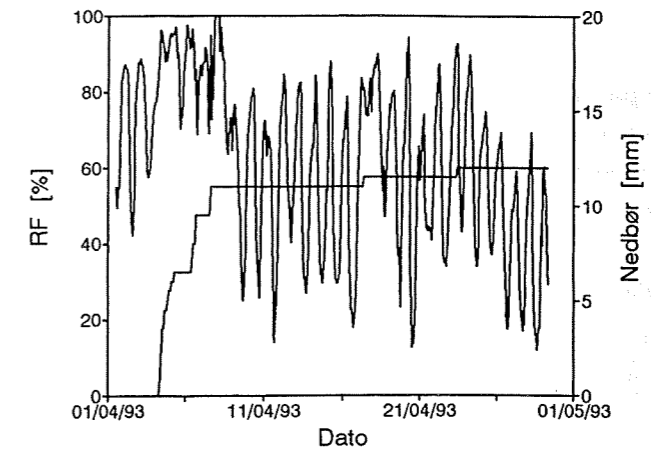
Figur B16. Lufttemperatur og antal solskinstimer, februar 1993. Målestation SBI. Solskin er vist som sumkurve, lufttemperatur som øjebliksværdier.



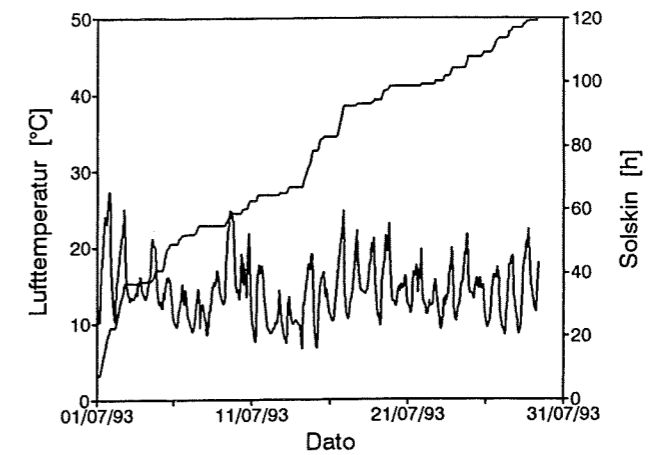
Figur B17. Relativ fugtighed og mm nedbør, februar 1993. Målestation SBI. Nedbør er vist som sumkurve, RF som øjebliksværdier.



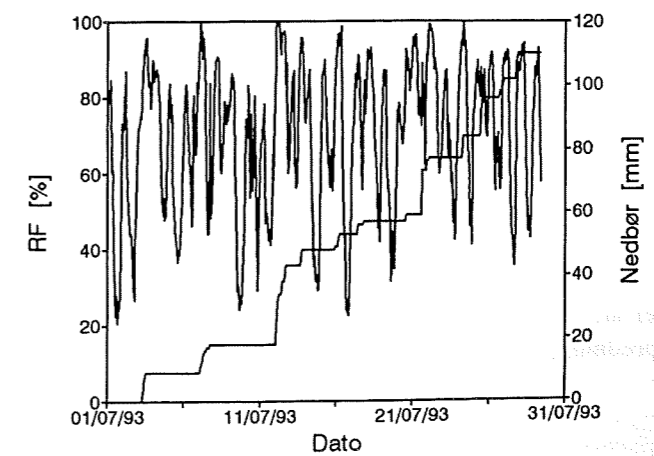
Figur B18. Lufttemperatur og antal solskinstimer, april 1993. Målestation SBI. Solskin er vist som sumkurve, lufttemperatur som øjebliksværdier.



Figur B19. Relativ fugtighed og mm nedbør, april 1993. Målestation SBI. Nedbør er vist som sumkurve, RF som øjebliksværdier.



Figur B20. Lufttemperatur og antal solskinstimer, juli 1993. Målestation SBI. Solskin er vist som sumkurve, lufttemperatur som øjebliksværdier.



Figur B21. Relativ fugtighed og mm nedbør, juli 1993. Målestation SBI. Nedbør er vist som sumkurve, RF som øjebliksværdier.

B2.3 Ultralyd

I tabel B3 er angivet middelværdier af gennemløbstider bestemt ved måling med ultralyd på eksponerede betonfliser samt referenceprøver. For referencebeton er målinger på emner med en lydvej på 100 mm (ét emne pr. serie) medregnet i middelværdien. Hver middelværdi er baseret på 10 à 12 målinger.

Tabel B3. Måling med ultralyd. Beton. Gennemløbstid og lydshastighed, middelværdier.

Dato	Gennemløbstid [μ s]			Lufttemperatur [$^{\circ}$ C]	Bemærkn.
	Beton 0.30	Beton 0.45	Beton 0.70		
Eksponerede emner					
12/03/92	101,6	108,1	119,3	23 $^{\circ}$ C	indendørs
24/09/92	101,1	108,9	119,2	65 % RF	
29/12/92	101,1	106,8	111,5	-0,5	frost, fugtigt
23/03/93	101,3	106,9	110,7	13	sol, tørt
08/07/93	102,3	109,0	112,8	20	do.
13/04/94	101,5	106,5	111,3	12	overskyet, tørt
gennemsnit	101,5 (0,45)	107,7 (1,11)	111,6 * (0,88)		
Referenceemner					
12/03/92	102,0	108,5	114,5	23 $^{\circ}$ C,	indendørs
24/09/92	101,6	107,8	117,6	65 % RF	
29/12/92	101,4	107,6	117,7		
23/03/93	100,7	108,0	115,7		
08/07/93	101,2	109,5	117,9		
13/04/94	101,0	108,4	117,7		
gennemsnit	101,3 (0,46)	108,3 (0,68)	116,9 (1,41)		
Ultralydhastighed [m/s]					
				Lydvej = 500 mm	
Eksponerede	4927	4643	4481 *		
Reference	4935	4617	4279		

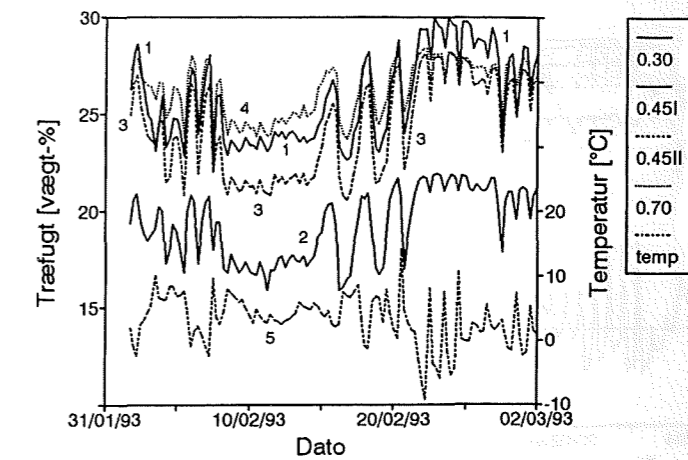
*: kun udendørs målinger medregnet.
Tal i parentes angiver spredning.

B2.4 Dyvler

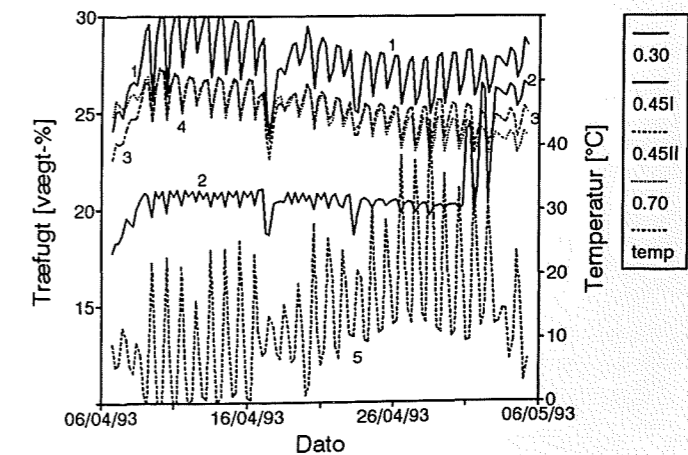
Figur B22 - B25 viser for udvalgte måneder træfugten i fugtmåledyvlere angivet i vægt% samt temperaturen registreret vha. termoelement. Figurerne supplerer resultaterne i afsnit 3.2.3.

For hver betonserie er data fra to fugtmåledyvlere opsamlet løbende vha. datalogger. For beton 0.30 og 0.70 ses ingen forskel mellem de to dyvler, mens resultaterne for dyvler i beton 0.45 er vidt forskellige. Derfor vises i hver figur fire forløb af træfugt; to for beton 0.45, en for 0.30 og en for 0.70.

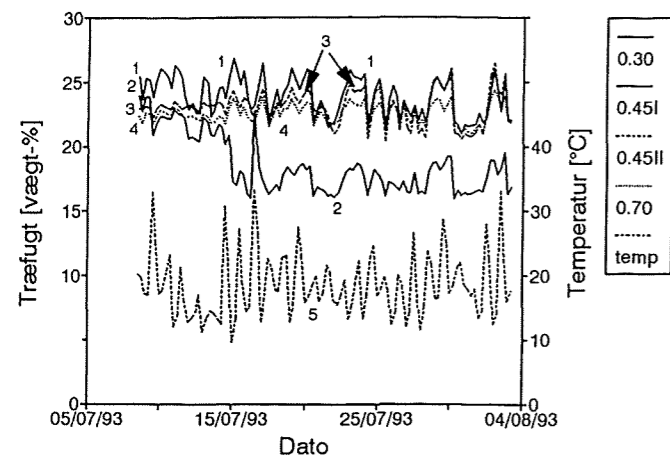
Der er kun vist ét temperaturforløb, der repræsenterer samtlige emner, idet der typisk er mindre end 1 $^{\circ}$ forskel mellem termoelementernes visning. Forskellen kan dog være større; typisk klokken 12 samt om sommeren i dagtimer, hvor temperaturen kan nå op på 50 $^{\circ}$ C.



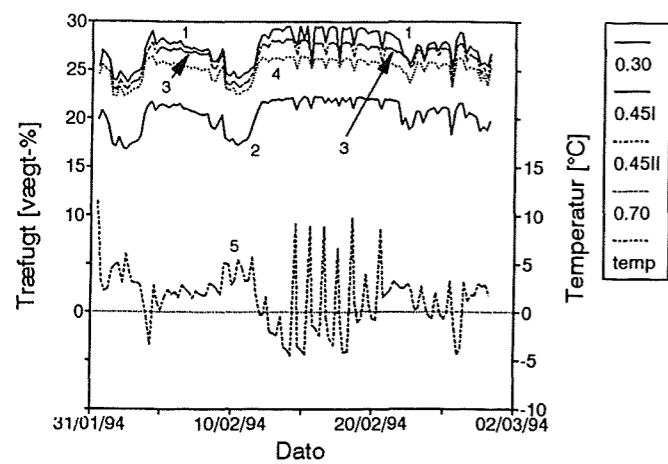
Figur B22. Måling med fugtmåledyvlere. Februar 1993. Tal i grafen svarer til rækkefølgen i signaturforklaringen til højre.



Figur B23. Måling med fugtmåledyvlere. April 1993.



Figur B24. Måling med fugtmåledyvlér. Juli 1993.



Figur B25. Måling med fugtmåledyvlér. Februar 1994.

I denne rapport beskrives en række supplerende undersøgelser udført på ikke-luftindblandet beton som en del af ph.d.-arbejdet, beskrevet i SBI-rapport 268, »Byggematerialers frostbestandighed – Modellering af kritiske vandmætningsgrader«. Undersøgelserne omfatter bestemmelse af vanddampdiffusion samt bestemmelse af fugtindhold ved hjælp af gammastråling. Endvidere beskrives forsøg med naturlig eksponering af beton. Påvirkningen af de naturligt eksponerede emner karakteriseres ved hjælp af indsamlede oplysninger om temperatur, nedbør, relativ fugtighed og solstråling, den såkaldte vådtid for materialets overflade. Endvidere er lyd hastigheden gennem materialet bestemt, og der er foretaget måling af fugtindholdet lokalt i betonen. De forskellige metoder til vurdering af betonen er sammenlignet og diskuteret.