

Superdrænende betonbelægninger

Et InnoBYG udviklingsprojekt

Superdrænende betonbelægninger

Rapporten er en opsamling af resultaterne genereret i forbindelse med InnoBYG projektet "Superdrænende betonbelægninger". Der har i projektet været særlig fokus på dokumentation af frostbestandigheden af permeabel in-situ støbt beton baseret på danske materialer og vejrforhold. Projektet er udført som et samarbejde mellem Teknologisk Institut, Dansk Beton A/S, Unicon A/S, Betonværket Brønderslev A/S og Danmarks Tekniske Universitet.

Projektgruppen har bestået af:

- Teknologisk Institut
Gitte Norman Munch-Petersen
Katja Udbye Christensen
Martin Kaasgaard
- Dansk Beton A/S
Anne Rosenkilde Lajer
- Unicon A/S
Ib Bælum Jensen
- Brønderslev Cementstøberi A/S
Ove Skov
- Danmark Tekniske Universitet
Marianne Tange Hasholt

Projektet er udført i perioden: maj 2017-juni 2018.

Parallelt med InnoByg-projektet er der gennemført et bachelor-projekt på Danmarks Tekniske Universitet om frostbestandighed af drænbeton. Dette projekt er gennemført af studerende Anne Sofie Hyldtoft Olsen og Rune Malthé Knudsen (med Marianne Tange Hasholt som vejleder) i perioden januar-juni 2018. Der har været en udveksling af resultater mellem de to projekter. Hvor resultater fra bachelorprojektet giver supplerende viden om superdrænende betonbelægningers egenskaber, er de indarbejdet i nærværende projektrapport.

Rapporten er udarbejdet af: Katja Udbye Christensen, Teknologisk Institut & Gitte Norman Munch-Petersen, Teknologisk Institut.

Rapporten er godkendt af: Lars Nyholm Thrane, Teknologisk Institut & Marianne Tange Hasholt, Danmarks Tekniske Universitet.



Indhold

1.	Indledning.....	1
2.	Problemstilling	1
3.	Resume	2
4.	Frostbestandighed af permeabel beton	3
4.1.	Overvejelser om permeabel betons frostbestandighed.....	3
4.2.	Testmetoder til vurdering af frostbestandigheden af permeabel beton.....	4
5.	Fremgangsmåde.....	6
5.1.	Prøvningsprogram.....	6
5.2.	Recepter og materialer	7
5.3.	Støbning af prøvefelter og udtagning af borekerner	7
5.4.	Støbning af cylindere.....	8
5.5.	Trykstyrke.....	8
5.6.	Luftporeanalyse.....	8
5.7.	Frost/tø test	9
6.	Evaluering af metoder til vurdering af frostbestandigheden.....	13
6.1.	Resultater fra frost/tø prøvningen.....	13
6.2.	Sammenligning af evalueringsmetoderne.....	19
6.3.	Sammenligning mellem prøvningen udført på TI og DTU.....	22
6.4.	Opsamling	24
7.	Evaluering af frostbestandighed af permeabel beton	25
7.1.	Parametre med betydning for frostbestandigheden	25
7.2.	Opsamling	29
8.	Konklusion	30
9.	Litteraturliste.....	31
Bilag A	Fremgangsmåde	32
Bilag B	Prøvefelter og prøvemener	36
Bilag C	Resultater fra frost/tø test	42

1. Indledning

Med klimaforandringerne oplever man i Danmark flere kraftige regnskyl og skybrud, og samtidig stiger andelen af befæstede impermeable arealer i byerne. Det betyder, at der ved skybrud ledes store mængder regnvand til underdimensionerede kloaker, hvilket i sidste ende kan medføre store oversvømmelser [1].

Internationalt set har in-situ støbt drænbeton fået stor opmærksomhed, eksempelvis i England, Frankrig, Tyskland og især USA, som alle har haft gode erfaringer [2] [3]. Alligevel er in-situ støbt drænbeton endnu ikke for alvor implementeret på det danske marked. Barriererne for dansk implementering er primært, at erfaringerne fra udlandet ikke direkte kan overføres til danske forhold. Det skyldes en række forskelle, når det gælder delmaterialer til betonfremstilling, jordbundsforhold samt klimaforhold. En afgørende faktor er eksempelvis de mange frost-tø perioder, der er særlig for Danmark sammenlignet med størstedelen af Europa og USA. Samtidig er egenskaberne af den permeable beton stærkt afhængig af udlægningsmetoden, hvilket stiller spørgsmålstegn ved, hvor ansvaret for belægningens ydeevne ligger.

Implementeringen af drænbeton i Danmark vil bidrage væsentligt til at reducere gener og økonomiske omkostninger forbundet med overbelastning af kloaknettet. I forhold til en løsning med belægningssten med permeable fuger, giver in-situ støbte belægninger er række fordele, herunder bl.a. nedsivning gennem hele belægningens overflade og udlægning ude fald [1]. Derudover giver permeabel beton muligheder for at skabe nye æstetiske udtryk.

Målet med projektet er at tilgå en række af barriererne for udvikling og anvendelse af in-situ støbt permeabel beton i Danmark. En af de store bekymringer vedrørende brugen af permeabel beton er holdbarheden i forbindelse med frost/tø eksponering [4]. Der er i Danmark tradition for at salte veje, stier og pladser om vinteren for at undgå glatte overflader og potentielle ulykker. Samtidig er den danske vinter karakteriseret af vejrlig medvekslende frost og tø, som i kombination med salt er kendt for at give holdbarhedsmæssige problemer for de eksponerede betonkonstruktioner i form af afskalninger af betonens overflade. [5]. Det er essentielt at alt beton, som udsættes for frost i kombination med salte, har en tilstrækkelig frostbestandighed, så der ikke går på kompromis med levetiden. Der vil derfor i projektet være fokus på relevante metoder til test og vurdering af frostbestandigheden af permeabel beton.

2. Problemstilling

Formålet med projektet er at undersøge:

- Hvilke eksisterende prøvningsmetoder kan anvendes til måling af permeabel betons frostbestandighed under danske klimaforhold.
- Hvilken indflydelse har luftindholdet i pasta på frostbestandigheden af permeabel beton.
- Hvilken indflydelse har tilslagenes frostbestandighed på frostbestandigheden af permeabel beton.

3. Resume

Der findes i Danmark ingen metode til test af frostbestandigheden af permeabel beton. Derfor har der i projektet været fokus på at udvælge en egnet prøvningsmetode, med afsæt i hvordan permeabel beton opfugtes/vandfyldes under vintervejrlig. I projektet er det valgt at anvende en modificeret metode med afsæt i den tyske standard for test af permeabel beton, DIN 18507.

Frost/tø testene er udført på udborende cylindere fra to prøvefelter med permeabel beton og cylindere støbt på Teknologisk Instituts laboratorium. Der er sideløbende med projektet kørt et studenterprojekt, hvor der ligeledes er blevet udført frost/tø test på permeable betoncylindere støbt på laboratorium. Der er anvendt recepter der bl.a. varierer i anvendte tilslagstyper og mængde af luftindblandingsmiddel, med henblik på at undersøge betydningen af forskellige parametre på frostbestandigheden.

Frostbestandigheden af prøveemnerne er blevet vurderet ud fra de fire følgende metoder:

- Visuelvurdering
- Masseændring
- Ændring i dynamisk E-modul bestemt ud fra ultralydsmålinger
- Ændring i statisk E-modul bestemt ud fra måling af arbejdskurve

Udover metoderne til måling af frostbestandigheden, er der udført en luftporeanalyse på emnerne støbt i forbindelse med studenterprojektet.

Ud fra projektets resultater kunne det konkluderes:

- At både måling af det dynamiske- og statiske E-modul er brugbare metoder til vurdering af frostbestandigheden.
- At der er et behov for at specificere temperaturforløbet under frost/tø-prøvningen, baseret på et realistisk temperatur- og vandfyldningsforløb for danske forhold.
- At tilslagenes frostbestandighed har afgørende indflydelse på frostbestandigheden af den permeable beton.

Det lykkedes i projektet ikke, at vurdere betydningen af luftporestrukturen i pastaen på den permeable betons frostbestandighed.

4. Frostbestandighed af permeabel beton

4.1. Overvejelser om permeabel betons frostbestandighed

I Danmark har man generelt godt styr på fremstilling af beton med god frostbestandighed. Men de kravgrænser og prøvningsmetoder som anvendes i dag for beton der eksponeres for frost/tø påvirkning, bygger på erfaringer og forskning udført på konventionel beton.

Grundet den permeable betons drænende egenskaber, vil betonen både blive udsat for frost/tø påvirkning i kombination med en saltopløsning på belægningsoverflade og i belægningens hulrum. Hvor konventionel beton har en afgrænset overflade som eksponeres, er den eksponerede overflade for permeabel beton lidt mere udefinerbar. Ifølge [2], [3] og [4], kan det dog godt lade sig gøre, at producere frostbestandig permeabel beton.

4.1.1. Vandfyldning af permeabel beton

Frostbestandigheden af en permeabel belægning afhænger i høj grad af mængden af frysende vand i belægningen. Med klimaforandringerne oplever man i Danmark flere kraftige regnskyl og skybrud, som opstår når flere skyer kolliderer. Intensiteten af en enkeltstående regnbyge påvirkes ikke nødvendigvis ved stigende temperaturer, men sammenstød mellem skysystemer bliver hyppigere og derfor forekommer kraftige regnskyl og skybrud oftere om sommeren [6]. Under normale forhold vil en permeabel belægning ikke blive vandfyldt, idet vandet hurtigt drænes ned i de underliggende lag [2] [3] [7]. I særlige tilfælde kan der dog opstå en situation, hvor belægningen vandmættes, f.eks. fordi:

- Drænelagene under belægningen har en lavere permeabilitet og derfor ikke dræner vandet hurtigt nok hvilket forårsager en ophobning af vand i belægningen.
- Drænelagene under belægningen er frosne hvilket nedsætter permeabilitet og derfor drænes vandet ikke hurtigt nok.
- Et højt grundvandsspejl i kombination med kraftig regn kan betyde, at vandet ikke kan drænes fra belægningen.
- Permeabiliteten af belægningen er nedsat grundet tilstopning, enten forårsaget af grus, sand, løse tilslag mv. som presses ned i belægningens overflade af bildæk eller en kombination af tung trafik og et enskornet, permeabelt ubundet bærelag [3].

4.1.2. Luftindhold

Luftporestrukturen anses for en vigtig parameter for frostbestandigheden af konventionel beton. Luftindblandingsmiddel kan tilsættes betonen under blanding, hvilket stabiliserer luftporerene i den friske beton og derved sikrer en struktur bestående af fine luftpore fordelt jævnt i pastaen. Den optimale luftporediameter for konventionel beton ligger mellem 10 μ m – 300 μ m og det totale luftindhold bør ligge mellem 4-6%. [8].

Permeabel beton har et stort indhold af forbundne hulrum som giver betonen dets drænende egenskaber. Typisk udgør hulrummene 15-35% af den totale volumen. Hulrummene må ikke forveksles med luftindholdet i pastaen. Tilstandsvurderinger af permeable belægninger udsat for forskellige frost/tø forhold i USA har vist god holdbarhed, med få tilfælde af løse tilslag i belægningens overflade. Belægningerne er udlagt med forskellige betonsammensætninger, hvoraf en række af belægningerne ikke indeholder luftindblanding [3]. Ifølge [7] vil luftindblandet luft i pastaen dog forbedre frostbestandigheden af permeabel beton markant.

4.1.3. Tilslag

For konventionel beton udsat for frost/tø eksponering i kombination med salte, sættes der krav til frostbestandigheden af de anvendte tilslag. Tilslagene skal efterleve kravgrænserne i DS/EN 2426 og testes iht. prøvningsmetoder angivet i DS/EN 12620. Af DS/EN 12620 fremgår det, at tilslag med en absorptionsværdi lavere end 1% kan anses for at være frostbestandige. Dog kan tilslag med højere absorptionsværdier ligeledes være frostbestandige [9] [10].

I permeabel beton vil tilslagene være dækket af et tyndt pastalag, som afhængig af lagtykkelsen og tæthed kun har begrænset mulighed for at forhindre tilførsel af vand til tilslaget. Bliver tilslaget vandmættet øges tilslagets volumen ved frysning hvilket kan medføre, at der opstår revner og afskalning i pastalaget (volumen af rent vand udvides cirka 9% når det fryser). Hvor meget tilslagets volumen øges vil afhænge af tilslagets absorption. Ifølge [4] har forsøg vist, at tilslagets absorption har den største betydning for frostbestandigheden af permeabel beton. [4] Tilsætning af små mængder sand kan øge sammenhæftningsevnen mellem pasta og tilslag, og kan dermed øge frostbestandigheden af den permeable beton [2].

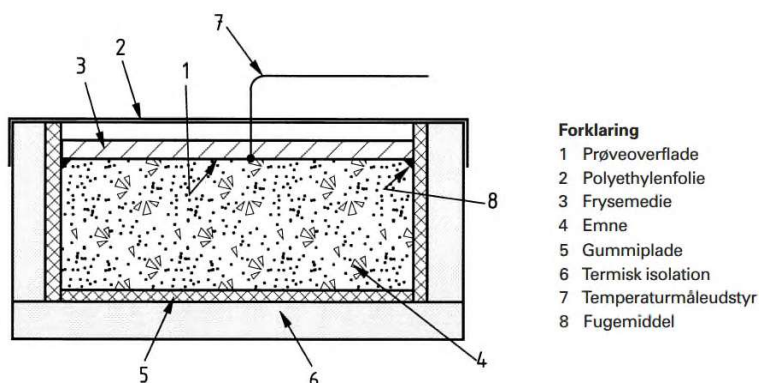
4.1.4. Udlægning af permeabel beton

Den permeable betons egenskaber er stærkt afhængig af udlægningen og graden af kompaktering. En øget kompaktering vil øge belægningens styrke men samtidig sænke permeabiliteten. Dermed vil kompakteringen indirekte påvirke belægningens frostbestandighed idet overfladearealet i hulrummet og dermed også det eksponerede overfladeareal sænkes med kompakteringsgraden.

Eftersom vand- og pastainholdet i permeabel beton er relativt lavt og porøsiteten høj, er belægningen ekstra udsat overfor udtørring. Derfor skal det ved udlægningen sikres at belægningen ikke udtørre for tidligt. Der findes flere støbeteknikker som kan anvendes og tilpasses den enkelte udlægning [7]. Udtørre den permeable belægning ved udlægningen, kan det sænke frostbestandigheden af belægningen, bl.a. fordi udtørningsrevner og øget porøsitet gør betonen mere modtagelig overfor fugtindtrængning.

4.2. Testmetoder til vurdering af frostbestandigheden af permeabel beton

Frostbestandigheden af konventionel konstruktionsbeton og belægningssten bestemmes iht. DS/CEN/TS 12390-9 og DS/EN 1338/AC henholdsvis. Overordnet foregår prøvningsmetoderne ved, at et prøveemne udsættes for et givent antal frost/tø cyklusser som angivet i prøvningsstandard, mens emnets overflade er dækket af et cirka 3mm tykt lag 3% saltopløsning (frysemediet). Forsøgsopstillingen fremgår af Figur 1. Frostbestandigheden vurderes efterfølgende ud fra mængden af det afskallede materiale [11] [12].



Figur 1 - Forsøgsopstilling for prøveemne testet for frostbestandigheden iht. DS/EN 1338/AC [12].

Der findes ingen dansk metode til test af frostbestandigheden af permeabel beton. Anvendes prøvningsmetoden beskrevet i DS/CEN/TS 12390-9 eller DS/EN 1338/AC, vil hulrummene i den permeable beton være vandfyldte under hele prøvningen, hvilket nødvendigvis må forårsage skader når frysemediet fryser i hulrummene og volumen af væske øges. Eftersom kraftige regnskyl ikke forekommer så ofte om vinteren, vil et scenarie med en kombination af en vandfyldt belægning og frost være usandsynligt, såfremt den permeable belægning er blevet vedligeholdt og belægningsopbygningen er designet fornuftigt. Frostprøvning med fuld nedsænkning af de permeable prøveemner i væske, som prøvningsmetoderne DS/CEN/TS 12390-9 og DS/EN 1338/AC ville indebære, vurderes derfor ikke til at give et retvisende billede af frostbestandigheden.

Der findes flere forslag til metoder til test af frostbestandigheden af permeabel beton, som ofte tager udgangspunkt i eksisterende standarder. I Tyskland er der udarbejdet en standard for prøvning af permeabel beton, hvori prøvningsmetoden tager højde for den drænende egenskab af den permeable beton. Prøvningen består af 28 frost/tø cyklusser, hvor hver cyklus består af 6 timers frysning i luft og 6 timers tø i en saltopløsning, med mulighed for at forlænge tø perioden i op til 18 timer. Frostbestandigheden vurderes efter prøvningens afslutning som massetabet i procent [13].

5. Fremgangsmåde

5.1. Prøvningsprogram

Der er i projektet udviklet 3 recepter af permeabel beton med forskellige stenklasser, pastaindhold, v/c-forhold og luftindhold, med det formål at teste frostbestandigheden vha. en modificeret metode med afsæt i den tyske standard for test af permeabel beton, DIN 18507 [13]. Sideløbende har der kørt et studenterprojekt, hvor de studerende har udviklet 2 andre recepter med udgangspunkt i de 3 recepter udviklet i forbindelse med projektet. Relevante resultater fra studenterprojekterne, vil indgå i rapporten.

Der er i projektet støbt følgende betoner:

- Betonproducenterne har udviklet og støbt to prøvefelter med recepterne P32 og E16. Den overordnede forskel på de to recepter er tilslagsklassen (henholdsvis passiv og ekstra aggressiv) og maksimal tilslagsstørrelse på henholdsvis 32 og 16 mm. Fra hver af prøvefelterne er der udboret seks cylindere til test på Teknologisk Institut.
- Teknologisk Institut har støbt cylindere af recepterne P32 og E25. Recept E25 er tilsvarende recept P32, men hvor P-stenen er udskiftet med E-sten, med det formål at undersøge betydningen af tilslagsklassen på den permeable betons frostbestandighed. P32 er støbt for at undersøge forskellen mellem egenskaberne for permeabel beton støbt i felten og på laboratorie.
- Danmarks Tekniske Universitet har støbt cylindere af recepterne E16-UL (uden luft) og E16-ML (med luft). Recept E16-UL og E16-ML er en videreudvikling af recept E16 foretaget af Danmarks Tekniske Universitet. Formålet med recepterne er at undersøge luftindholdets betydning for frostbestandigheden.

Recepterne fremgår af Bilag A.

Der er i projektet udført følgende prøvning med henblik på at vurdere frostbestandigheden af de udviklede og støbte betoner, jf. Tabel 1 for forsøgsprogrammet:

- Trykprøvning af cylindere er udført iht. DS/EN 12390-3 + AC [14]. Metoden er beskrevet i afsnit 5.5.
- Luftporeanalysen er udført iht. EN 480-11 [7]. Metoden er beskrevet i afsnit 5.6.
- Frost/tø testen er udført med udgangspunkt i den tyske standard, DIN 18507 [13]. Metoden er beskrevet i afsnit 5.7 og frostbestandigheden evalueret ud fra følgende fire metoder:
 - Visuel vurdering af cylindere før og efter frost/tø testen. Metoden er beskrevet i afsnit 5.7.1.
 - Bestemmelse af massetabet. Metoden er beskrevet i afsnit 5.7.2.
 - Måling af ultralydshastigheder til bestemmelse af betonens dynamiske E-modul til vurdering af ændringer i betonens tæthed. Metoden er beskrevet i afsnit 5.7.3.
 - Måling af arbejdskurve til bestemmelse af betonens statiske E-modul til vurdering af ændringer i betonens stivhed. Metoden er beskrevet i afsnit 5.7.4.

Prøvningerne er enten udført på Teknologisk Institut eller på Danmarks Tekniske Universitet. I Tabel 1 ses en oversigt over forsøgsprogrammet og placering for prøvningerne.

Tabel 1 - Forsøgsprogram. TI = Teknologisk Institut. DTU = Danmark Tekniske Universitet.

Forsøg	Beton ID					
	P32-U	E16	P32-S	E25	E16-UL	E16-ML
Trykstyrke	TI	TI	TI	TI	-	-
Luftporeanalyse	-	-	-	-	TI*	TI*
Frost/tø test	TI	TI	TI	TI	DTU	DTU
Visuelvurdering	TI	TI	TI	TI	DTU	DTU
Måling af massetab	TI	TI	TI	TI	DTU	DTU
Måling af ultralyd	TI	TI	TI	TI	DTU	DTU
Måling af arbejdskurver	TI	TI	TI	TI	-	-

*Luftporeanalysen er udført på Teknologisk Institut af Teknologisk Institut og Danmarks Tekniske Universitet.

Det første bogstav i beton ID'et angiver miljøklassen for stentilslaget og tallet angiver største stenstørrelse. Derudover angiver:

- U: udboret cylinder
 - S: Støbt cylinder
 - UL: Uden luft
 - ML: Med luft
- } anvendt for recept P32, idet der både er udborede og støbte cylindere

5.2. Recepter og materialer

Anvendte materialer og de tilhørende egenskaber, samt recepter fremgår af Bilag A.

5.3. Støbning af prøvelfelter og udtagning af borekerner

Der er anlagt to prøvelfelter i Klarup, det ene med recept P32 og det anden med recept E16. Der er valgt et underlag med høje drænegenskaber, så belægningen ikke vandmættes. De tilstødende konstruktionsdele er vandet inden udstøbning og udtørningsbeskyttelsen er etableret kort efter støbning, for at fastholde vandet i betonblandingen. Der er tilstræbt en højde på prøvelfelterne svarende til 250 mm. Betonen er udlagt med en lille overhøjde på omkring 15-20 mm. Kompakteringen af prøvelfelterne er udført ved vibrering med en pladevibrator, se Figur 2, hvilket giver en tættere beton opadtil og dermed mindsker risikoen for vandmætning.



Figur 2 - Støbning af prøvelfelter med recept P32 og E16.

Der er udtaget 6 Ø150 borekerner fra hvert prøvefelt efter betonen blev vurderet at have opnået en tilstrækkelig styrke. Borekernerne er anvendt til:

- 1 kerne er anvendt til permeabilitetsmålinger på Danmarks Tekniske Universitet. Resultaterne er ikke inkluderet i denne rapport.
- 2 kerner er anvendt til trykprøvning, jf. afsnit 5.5.
- 3 kerner er anvendt til frost/tø-test, jf. afsnit 5.7.

5.4. Støbning af cylindere

Al fremstilling af laboratoriestøbt beton er foregået på Teknologisk Institut inkl. beton støbt af Danmarks Tekniske Universitet. Teknologisk Institut støbte 6 Ø150 cylindere af recept P32-S og E25 og Danmarks Tekniske Universitet støbte 7 Ø150 cylindere af recept E16-UL og E16-ML. Fremgangsmåden fremgår af Bilag A.

Cylindere støbt af Teknologisk Institut er anvendt til:

- 2 cylindere er anvendt til trykprøvning, jf. afsnit 5.5.
- 3 cylindere er anvendt til frost/tø test, jf. afsnit 5.7.
- 1 cylinder er anvendt til frost/tø test på Danmarks Tekniske Universitet, jf. afsnit 5.7.

Cylindere støbt af Danmarks Tekniske Universitet er anvendt til:

- 1 cylinder er anvendt til luftporeanalyse, jf. afsnit 5.6.
- 6 cylindere er anvendt til frost/tø test, jf. afsnit 5.7.

5.5. Trykstyrke

Trykstyrken er bestemt iht. DS/EN 12390-3 + AC [14] på to cylindere skåret til i hver ende til en højde på 200mm +/- 3 mm. Diameteren for de udborede og støbte cylindere var 143mm +/- 2mm og 150mm +/- 2mm henholdsvis.

5.6. Luftporeanalyse

Luftporeanalysen er udført iht. EN 480-11:2005 [7] med RapidAir Image Analysis System på et præparat med dimensionerne 100x100 mm. For at undgå at makroporøsiteten i betonen blev tolket som luftporer, er prøveemnerne blevet indstøbt i epoxy inden de efterfølgende er blevet planet og poleret, se Figur 3. Efter poleringen er emnerne farvet sorte og luftporerne er blevet fyldt med et hvidt pulver. En tynd, sort tus er anvendt til at dække eventuelle defekter, se Figur 4.



Figur 3 - E16-UL (til venstre) og E16-ML (til højre) indstøbt i epoxy, planet og poleret.



Figur 4 - E16-UL (til venstre) og E16-ML (til højre) klargjort til luftporeanalyse.

5.7. Frost/tø test

Til bestemmelse af frostbestandigheden, er der taget udgangspunkt i den tyske standard, DIN 18507 [13], som foreskriver 28 frost/tø cyklusser og et krav til et maksimalt gennemsnitlig massetab på 0,5%, med ingen enkeltværdier over 0,8%. For prøvningsmetoden henviser den tyske standard til teknologitesten anvendt til frost/tø test af natursten beskrevet i EN 12371 [16]. Iht. standarden skal cylindrene udsættes for 6 timer fryseperioder i luft, efterfulgt af 6 timer tø-perioder, hvor cylinderen er nedsænket i en saltopløsning. Temperaturen i cylinderen skal ligge inden for et givent interval specificeret i EN 12371.

På Teknologisk Institut har cylindrene været nedsænket i en 3% saltopløsning uden for fryseren, mens de på Danmarks Tekniske Universitet har været nedsænket i enten rent vand eller en 3% saltopløsning, der blev opbevaret i fryseren. I begge tilfælde var temperaturforløbene designet, med henblik på at følge kravene i EN 12371 [16]. For yderligere beskrivelse af prøvningsmetoderne, henvises der til Bilag A.

Frostbestandigheden af de testede cylindere blev vurderet ud fra fire forskellige metoder:

- Visuel vurdering, jf. afsnit 5.7.1.
- Massetabet, jf. afsnit 5.7.2.
- Ændring i målt ultralydsagtigheder og dynamisk E-modul, jf. afsnit 5.7.3
- Ændring i målt arbejdskurve og statisk E-modul, jf. afsnit 5.7.4.

5.7.1. Visuel vurdering

Den visuelle tilstand af cylindrene før og efter frost/tø-testen er vurderet på makroniveau, med henblik på at registrere synligt massetab og revnedannelser.

5.7.2. Massetab

Massetabet er bestemt på:

- Teknologisk Institut som forskellen i cylindernes masse inden og efter frosteksposeringen. Afskalningen kan forekomme på hele den eksponerede overflade, derfor skylles cylindrene grundigt efter endt frost/tø test hvorefter de tørres ved 40 °C i 24 timer og til sidst rulles på et viskestykke, for at få det sidste afskalning ud af cylindrene. Fremgangsmetoden er valgt på baggrund af, at cylindrene flyttes mellem vandkar og frostskaab, hvilke betyder at afskalning kan forsvinde i processen. Det skal dog bemærkes, at fugtindholdet i revnet beton typisk er højere end fugtindholdet i intakt beton. Dermed kan massen af cylinderen efter frost/tø-testen fremstå højere end den reelle masse. Tørring af cylinderen efter frost/tø testen har til formål at mindske denne usikkerhed.
- Danmarks Tekniske Universitet som den tørre masse af det afskallede materiale, som opsamles fra kassen hvori cylindrene har stået under frost/tø-testen.

5.7.3. Ultralydsmåling

Målingen er foretaget med en ultralydsmåler, som måler mellem to punkter placeret med 150 mm afstand. Der blev markeret 3 målområder på hver cylinder, som vist på Figur 5. Måleområderne blev fordelt jævnt rundt om cylindrene.



Figur 5 – Permeabel betoncylinder med markerede målepunkter og udstyr brugt til måling af ultralyd.

Ultralydsmålingerne blev foretaget med følgende udstyr og målefrekvens:

- På Teknologisk Institut blev en måler fra Acoustic Control Systems af typen UK1401 anvendt. Ultralyden blev målt 3 gange, herunder 2 gange før frost/tø testen (før og efter første måling af arbejdskurven) og efter endt frost/tø test. Målingerne blev foretaget på tørre cylindere.
- På Danmarks Tekniske Universitet blev en måler fra Germann Instruments af typen GI Surfer anvendt. Ultralyden blev målt før frost og efter 6, 14, 20, 27 og 28 frost/tø cyklusser. Målingen blev foretaget på våde cylindere.

Ifølge [17] kan de primære lydbølger i et materiale udtrykkes som en funktion af det dynamiske E-modul som vist i (5.1).

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 - 2\nu) \cdot (1 + \nu)}} \quad (5.1)$$

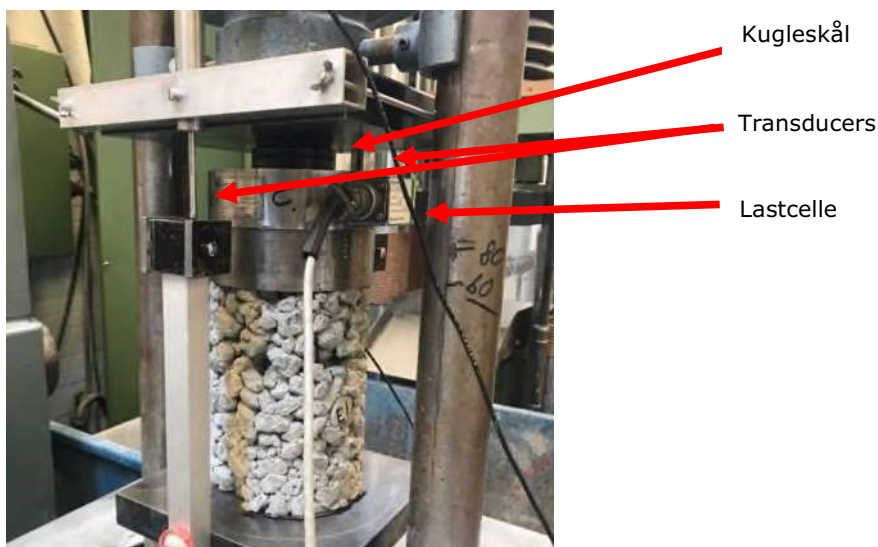
De primære lydbølger svarer til de målte ultralydshastigheder og kan dermed bruges til at bestemme det dynamiske E-modul. Omstruktureres udtrykket i (5.1) fås udtrykket i (5.2).

$$E_d = \frac{V_p^2 \cdot \rho \cdot \nu \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \cdot (1 + \nu)}{1 - \nu} \quad (5.2)$$

Hvor E_d er det dynamiske E-modul [Pa], V_p er de primære lydbølger [m/s], ρ er densitet [kg/m^3], ν er Poissons ratio som for beton ofte er 0,2 [-].

5.7.4. Arbejdskurve

Arbejdskurven blev målt inden og efter frosteksposeringen på alle cylindere testet for frostbestandigheden på Teknologisk Institut. Deformationen blev målt med 2 transducere placeret mellem de to lastflader og lasten blev målt på en lastcelle placeret mellem den ene lastflade og cylinderen, se Figur 6.



Figur 6 – Forsøgsopstilling anvendt til måling af arbejdskurven for permeable cylindere.

SUPERDRÆNENDE BETONBELÆGNINGER

For at undgå revnedannelser i emnerne som følge af målingen, blev der kun lastet op til 30% af den gennemsnitlige målte brudlast, jf. afsnit 5.5. Lasten blev påført emnerne over 3,5 minutter.

Ud fra de målte deformationer og den målte last, blev tøjning og spænding i emnet udregnet iht. (5.3) og (5.4).

$$\tau = \frac{\Delta L}{L} \quad (5.3)$$

Hvor τ er tøjningen [-], ΔL er deformationen [mm] og L er højden af cylinderen [mm].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.4)$$

Hvor σ er spændingen [MPa], F er lasten [N] og A er overfladearealet [mm²].

6. Evaluering af metoder til vurdering af frostbestandigheden

Resultatafsnittet er opdelt i to dele. Det pågældende kapitel omhandler metoden til vurdering af frostbestandigheden af permeabel beton, og det næste kapitel omhandler faktorer med indflydelse på den permeable betons frostbestandighed.

Der er udført en række frost/tø test, hvor forskellige metoder til vurdering af frostbestandigheden er afprøvet, herunder:

- Visuel vurdering
- Massetab
- Måling af ultralydshastighed
- Måling af arbejdskurve

Metoderne vil blive gennemgået og sammenlignet i de efterfølgende afsnit. Der vil ligeledes være en vurdering af prøvningsmetodens egnethed.

6.1. Resultater fra frost/tø prøvningen

6.1.1. Visuel vurdering

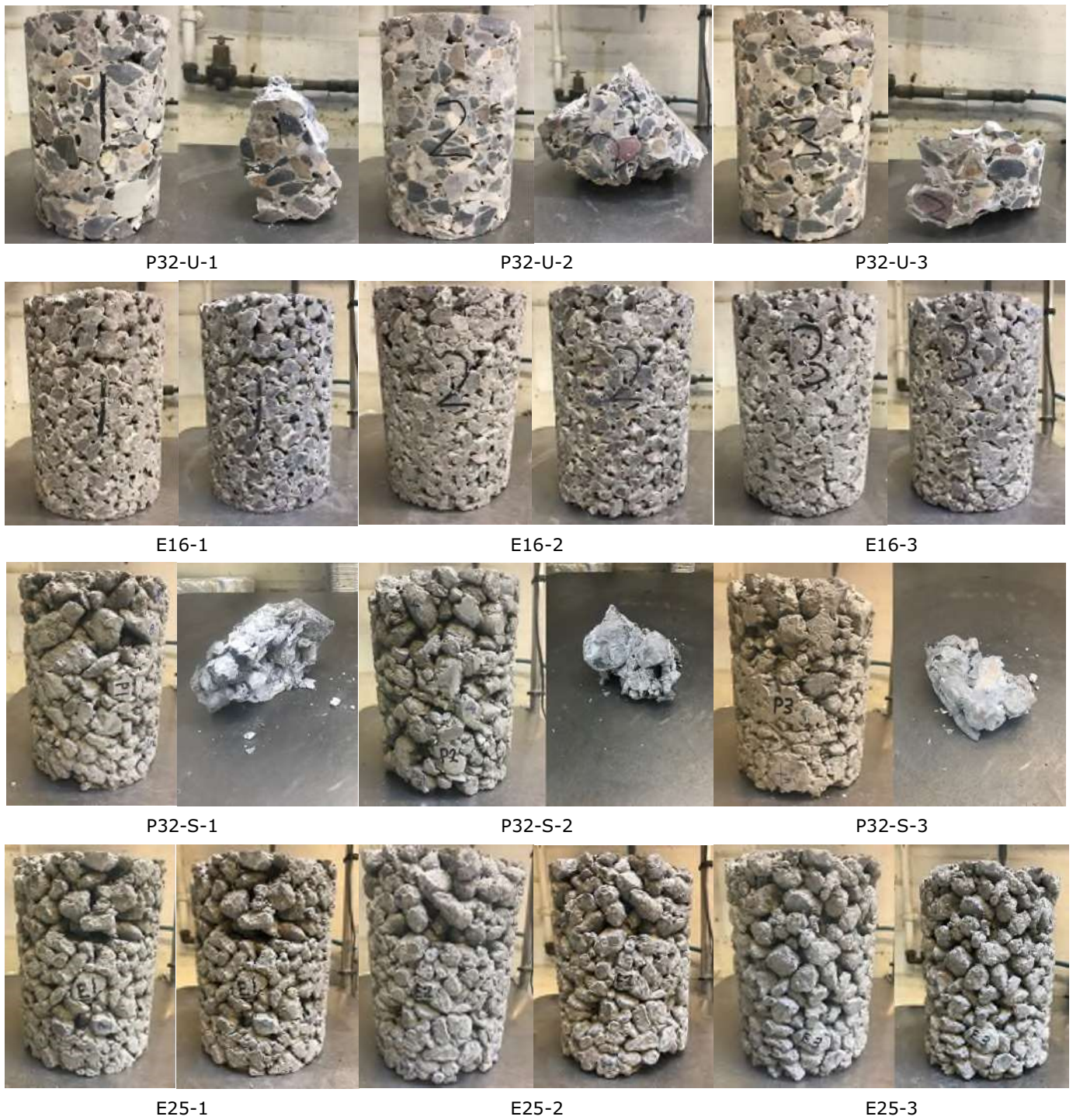
Den visuelle vurdering bruges til at vurdere frost/tø skader i de permeable emner såsom revnedannelser, tab af tilslag og afskalning af pastaflager. Vurderingen kan bruges til at skabe et overordnet overblik over tilstanden af prøvningsemnerne.

Billederne af de testede emner før og efter frost/tø testen fremgår af Figur 7, Figur 8 og Figur 9. Af Figur 10 og Figur 11 ses et nærbillede af henholdsvis en E25 cylinder og cylinderne testet på Danmarks Tekniske Universitet i rent vand.

Visuelt fremgår det at:

- P32-U cylindererne er delvist smuldret.
- E16 cylindererne fremstår i god tilstand uden tegn på afskalninger, revnedannelser eller tab af tilslag.
- E32-S cylinderen er smuldret.
- E25 cylinderen fremstår overordnet i god tilstand, med enkelte revnedannelser i bunden og tab af enkelte tilslag.
- E16 ML/UL udsat for frost/tø prøvning i rent vand fremstår overordnet i god tilstand, med enkelte revnedannelser og tab af enkelte tilslag.
- E16 ML/UL udsat for frost/tø prøvning i saltopløsning er smuldret.

SUPERDRÆENDE BETONBELÆGNINGER



Figur 7 - Cylindere før (til venstre) og efter (til højre) frost/tø test udført på Teknologisk Institut.



E16-UL-1

E16-UL-3

E16-UL-5



E16-ML-2

E16-ML-4

Figur 8 - Cylindere før (til venstre) og efter (til højre) frost/tø test med rent vand udført på Danmarks Tekniske Universitet.



Figur 9 - E16-ML og E16-UL efter frost/tø test med saltopløsning på Danmarks Tekniske Universitet.



Figur 10 - Revnedannelse i bunden af en E25 cylinder efter endt frost/tø test.



Figur 11 - Revnedannelse og tab af tilslag i E16-ML og E16-UL cylindere efter endt frost/tø test i rent vand.

6.1.2. Massetab

Når beton eksponeres for frost/tø i kombination med en saltopløsning, kan det forårsage skader i tilslag og pasta. Ved traditionelle frost/tø test, som f.eks. DS/EN 12390-9, ses skaderne ofte som afskalninger af pastafasen i betons overflade og derfor vurderes frostbestandigheden ud fra massen af det afskallede materiale. For DIN 18507 må det gennemsnitlige massetab ikke overstige 0,5% og ingen enkeltværdier må overstige 0,8%.

De målte massetab er opsummeret i Tabel 2, for de fulde resultater henvises til Bilag C. Eftersom cylinderen eksponeret i saltopløsningen smuldrede under frost/tø testen, angives massetabet her som 100%.

Tabel 2 - Massetab efter endt frost/tø test udført på Teknologisk Institut og Danmarks Tekniske Universitet.

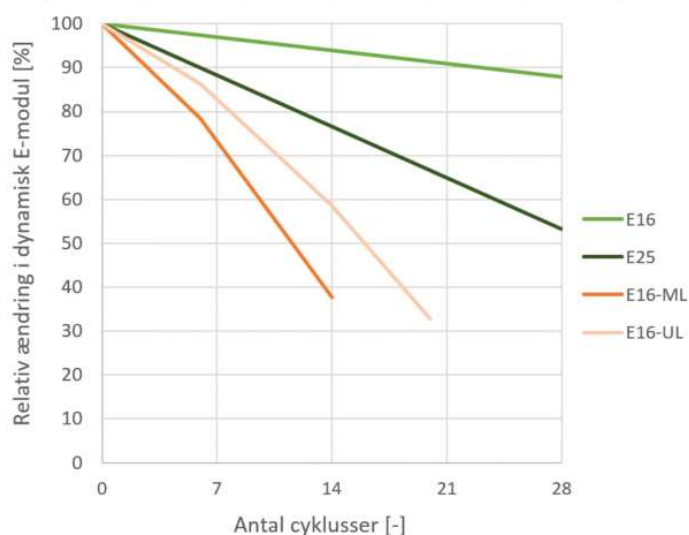
Beton ID	Spredning [-]	Massetab [%]
P32-U	15	82
E16	0,23	2,4
P32-S	0,72	96
E25	0,20	0,3
E16-UL/ML i vand	-	0,2
E16-UL/ML i saltopløsning	-	100

Af massetabet fremgår det, at E25 cylindrene og E16-ML/UL cylindrene i vand er de eneste som overholder kravene til massetabet angivet i DIN 18507.

6.1.3. Ultralydshastigheder og dynamisk E-modul

Ultralydsmåleren måler den tid, det tager den udsendte lyd at komme fra det ene målepunkt til det andet i et materiale og beregner derudfra hastigheden, idet det antages, at afstanden svarer til den kortest mulige afstand mellem de to punkter. Lyden kan ikke "hoppe" over revner, men må i stedet tage en omvej. En reduktion i hastigheden er således et tegn på en revnedannelse i materialet, idet lyden skal en længere vej.

På baggrund af de målte ultralydshastigheder er det dynamiske E-modul bestemt ud fra ligning (5.2). De relative ændringer i det dynamiske E-modul fremgår af Figur 12. For de målte ultralydshastigheder, henvises der til Bilag C.



Figur 12 – Relativ ændring i dynamisk E-modul [%] som funktion af antallet af frost/tø cyklusser.

Alle testede betonserier viser en reduktion i det dynamiske E-modul efter frost/tø eksponering, hvor den største ændring er at finde ved emnerne eksponeret i rent vand på Danmarks Tekniske Universitet.

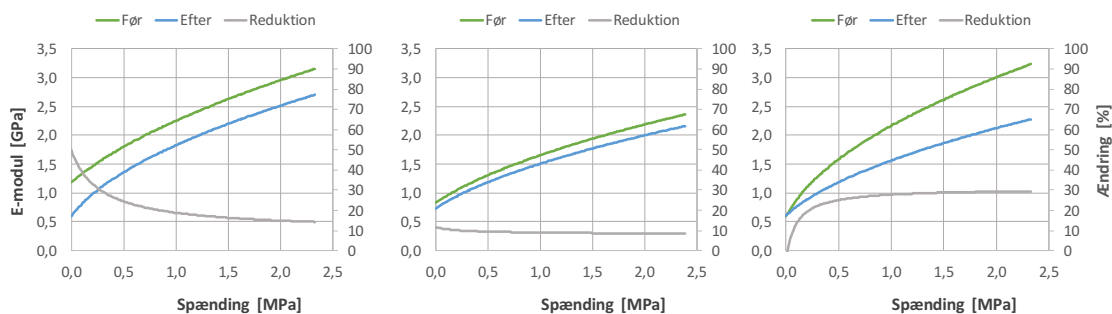
6.1.4. Arbejdskurver og E-modul

Måling af arbejdskurverne før og efter frosteksposering, kan bruges til at vurdere omfanget af revnedannelser og massetab i hele cylinderen. En arbejdskurve viser forholdet mellem tøjning og spænding og giver information om hvor meget et materiale deformerer ved en given belastning. Hældningen på arbejdskurven er E-modulet, som er et mål for materialets stivhed. E-modulet kan dermed bruges til at vurdere en reduktionen i stivheden efter frost/tø testen. Der skelnes typisk mellem følgende typer E-modul:

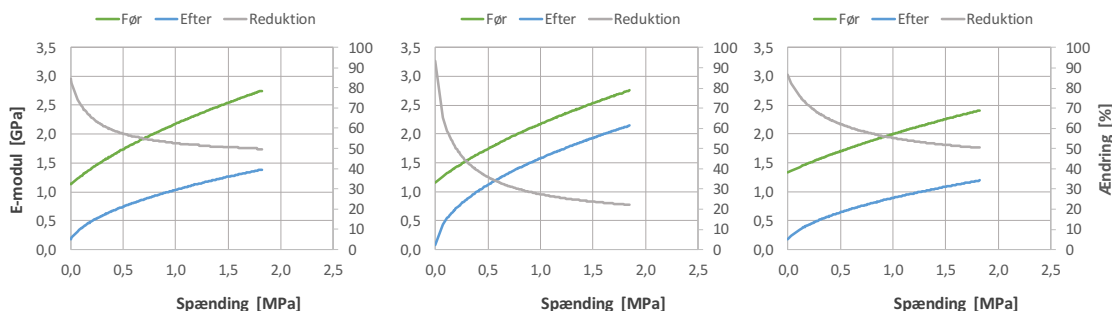
1. Initial E-modulet: hældningen ved kurvens nulpunkt.
2. Sekant E-modulet: hældningen mellem nulpunktet og et andet punkt på kurven.
3. Tangens E-modulet: hældningen af en tangens i et vilkårligt punkt på kurven. [18]

Der er i dette projekt valgt at udregne E-modulet på baggrund af tangens E-modulet. De målte arbejdskurver og databehandlingen fremgår af Bilag C.

E-modulerne som funktion af spændingen er illustreret i Figur 13 og Figur 14, sammen med reduktionen i E-modulet i procent som funktion af spændingen. Det har ikke været muligt at måle arbejdskurverne efter frost på alle eksponerede emner grundet store skader under frost/tø testen.



Figur 13 - E-modul som funktion af spændingen for E16 1-3 henholdsvis.



Figur 14 - Det statiske E-modul som funktion af spændingen for E25 1-3 henholdsvis.

Der er for alle målinger en reduktion i E-modulet efter frost/tø eksponeringen, hvor reduktionen er størst for E25 cylinderne. Omfanget af reduktionen afhænger af til hvilken spænding E-modulet bestemmes. I Tabel 3 fremgår de minimale og maksimale reduktioner i E-modulerne.

Tabel 3 - Maksimal og minimal reduktion i E-modul før og efter frost/tø test.

Receipt ID	Nr.	Mindste reduktion [%]	Største reduktion [%]
E16	1	14,3	49,5
	2	8,6	11,4
	3	-4,2	29,5
	Middel	6,2	30,1
E25	1	49,7	84,5
	2	22,1	93,5
	3	50,4	86,5
	Middel	40,7	88,2

6.2. Sammenligning af evalueringsmetoderne

Resultaterne for de 4 evalueringsmetoder er opsummeret i Tabel 4.

Tabel 4 - Opsummering af resultater fra frost/tø test for de udførte evalueringsmetoder.

Metode	P32-U	E16	P32-S	E25	E16-UL/ML i vand	E16-UL/ML i NaCl
Visuelvurdering	Delvist smuldrede cylindere	Ingen synlige skader	Smuldrede cylindere	Enkelte skader	Enkelte skader	Smuldrede cylindere
Reduktion i masse [%]	82	2,4	96	0,3	0,2	100
Reduktion i dynamisk E-modul [%]	*	12	*	47	86	*
Reduktion i statisk E-modul (min/max) [%]	*	6,2/30,1	*	40,7/88,2	**	**

* Ikke muligt at måle grundet cylindernes tilstand

** Ikke omfattet af forsøgsplanen

De overordnede overensstemmelser og forskelle mellem resultaterne fra de forskellige evalueringsmetoder er opsummeret nedenfor:

- Den visuelle vurdering og massetabet stemmer fint overens for cylindrene med de største skader. For cylindrene med en lavere grad af skader, er der derimod ikke overensstemmelse mellem den visuelle tilstand og de registrerede masseændringer. E16 prøveemnerne har som de eneste cylindere ingen visuelle skader, men efterlever alligevel ikke kravet til massetabet iht. DIN 18507.
- E25 og E16-ML/UL har samme omfang af visuelle skader og massetab, men reduktionen i det dynamiske E-modul for E16-ML/UL efter kun 21 frost/tø cyklusser er markant større end reduktionen for E25 efter 28 frost/tø cyklusser.
- Der er fin overensstemmelse mellem reduktionen i dynamisk E-modul og det statiske E-modul bestemt fra arbejdskurven for den mindste reduktion på kurven.

I de efterfølgende afsnit, vil de forskellige evalueringsmetoder og de tilhørende udfordringer og fordele blive gransket.

6.2.1. Visuel vurdering

Den visuelle vurdering er hurtig at udføre og kan skabe et godt overordnet overblik. Men metoden har sine begrænsninger i forhold til vurdering af revnedannelser, som ikke er synlige med det blotte øje, samt vurdering af tilstanden af overfladerne inden i prøvernes hulrum. Den visuelle vurdering bør derfor ikke stå alene som eneste vurderingsmetode.

6.2.2. Masseændring

Af Tabel 4 fremgår det, at der ikke er overensstemmelse mellem reduktionen i masse for de prøveemner med lav afskalning og de resterende prøvningsmetoder.

For konventionel beton sættes massen af afskallet materiale efter frost/tø test i relation til testfladens areal. Jo større areal, jo større afskalning må der også forventes. For drænbeton er testfladens areal ikke veldefineret. For en meget permeabel beton vil der være et stort indre areal, hvor beton og væske mødes. Alene af den grund kan der forekomme mere afskalning fra en meget permeabel beton end en drænbeton, der er mindre permeabel.

Af resultaterne ses desuden et større massetab for E16 sammenlignet med E25, på trods af at E16 i resterende vurderingsmetoder klarer sig bedst. Det kan skyldes, at de udborede cylindere indeholder en del borestøv, som dannes ved udboringen. Støvet lagres i hulrummet, se Figur 15, og selvom cylindrene skylles inden prøvningen startes, kan det være svært at få alt borestøvet ud. Som frost/tø testen skrider fremad, kan noget af borestøvet blive vasket ud og vil dermed blive registeret som et massetab. Derudover kan der side løse sand og stenkorn i cylinderens hulrum, som kan falde ud under prøvningen. Ved prøvningen udført på Teknologisk Institut, flyttes cylindrene manuelt fra frostskalet til vandkarret hvilket øger sandsynligheden for, at løst sand eller sten forsvinder i processen. En del af skaden må også forventes at opstå i prøveemnernes hulrum, hvor det ikke altid vil være tilgængeligt at opsamle.



Figur 15 - Cylinder E16-4 med tydeligt indhold af borestøv i hulrummet.

Metoden til bestemmelse af massetabet har ligeledes en betydning for massetabets størrelse, idet:

- For metoden anvendt på Teknologisk Institut bruges massen af cylinderen før og efter frost/tø eksponering. Revnet beton indeholder ofte mere fugt end urevnet beton, og derfor kan masseændringen fremstå mindre ved denne metode.

- For metoden anvendt på Danmarks Tekniske Universitet opsamles det afskallede materiale som tørres og vejes. Denne metode har mindre usikkerheder, men idet emnerne står i samme kar, er det ikke muligt at bestemme enkeltværdierne for afskalningen, som maksimalt må være 0,8% af massen iht. DIN 18507.

På baggrund af resultaterne og de mange usikkerheder ved måling af massetabet for permeabel beton, vurderes det ikke at være en passende metode, særligt taget i betragtning af, at det acceptable massetab er forholdsvis lavt.

6.2.3. Ultralydshastigheder og dynamisk E-modul

Resultaterne fra de målte ultralydshastigheder og de beregnede dynamiske E-moduler virker generelt pålidelige og i god overensstemmelse med den visuelle vurdering og målingerne af arbejdskurver og de statiske E-moduler.

Metoden forudsætter at prøveemnet har en længde eller højde på over 150 mm, idet afstanden mellem de to målepunkter på udstyret er 150 mm. Det kan være en udfordring at finde passende målepunkter med god kontakt, særligt for de støbte emner. Målingen kan bruges til at vurdere tilstanden i overfladen mellem de to målepunkter, men kan ikke anvendes til vurdering af tilstanden i emnernes midte eller yderpunkter eller overflade der ikke har en side på over 150 mm.

Det er generelt en simpel metode, som ikke er særligt udstyrskrævende og samtidig er let at udføre. Metoden kan anbefales til vurdering af tilstanden, men bør kombineres med en visuel vurdering, da måleområdet er begrænset til en mindre del af prøveemnet.

6.2.4. Arbejdskurver og statisk E-modul

De målte arbejdskurver og udregnede statiske E-moduler virker generelt pålidelige og i god overensstemmelse med den visuelle vurdering og målingerne af ultralydshastigheder. Det er dog ikke uvæsentlig, hvor på kurven E-modulet bestemmes eftersom det har stor betydning for reduktionen i E-modul. Det gælder for alle målinger, at reduktionen i E-modulet går mod en konstant værdi ved øget spænding indenfor det målte spændingsinterval. For E16 cylindrene er den mindste reduktion 6,2% hvorimod den største er 30,1%. Ligeledes er den mindste reduktion for E25 på 40,7% og den største på 88,2%. Reduktionen i målt ultralyd indikerer, at den mindste værdi er mest retvisende.

Forskellen i E-modulet før og efter frost falder med stigende spænding for alle målinger på nær målingerne udført på E16-3. Det skyldes formegentlig en målefejl der er opstået pga. små sandkorn på cylindernes ender der knuses under målingen eller ujævnheder i cylinderens ender. Normalt måles deformationen af en Ø150 cylinder mellem to punkter på cylinderens overflade placeret med 150 mm afstand. Transducerne brugt til målingen fæstnes på cylindernes sider med en specialudviklet holder. Grundet den permeable betons grove og ujævne overflade, er det ikke muligt at bruge samme metode og derfor er det nødvendigt i stedet at måle mellem de to trykflader. Det gør prøvningsmetoden mere følsom overfor cylindernes planhed og urenheder på cylindernes ender. Hvis enderne af en cylinder ikke er plane, kan de indstøbes i mørtel. Det er i midlertidig ikke muligt for de permeable cylindere, eftersom det vil påvirke permeabiliteten og dermed også frost/tø testen.

Metoden er generelt mere udstyrstung og mere kompliceret at udføre end måling af ultralydshastighederne. Men metoden tillader samtidig prøvemener i alle størrelser og former, så længe der er to parallelle og plane overflader. Derudover giver resultaterne fra målingerne information om hele prøveemnets tilstand samt emnets bæreevne i forhold til udbøjning. Anvendes metoden til vurdering af frostbestandigheden, bør der være opmærksomhed på udførelsen.

6.3. Sammenligning mellem prøvningen udført på TI og DTU

Sammenlignes resultaterne opnået på Teknologisk Institut med resultaterne opnået på Danmarks Tekniske Universitet, er det tydeligt, at der er stor forskel i tilstanden af emnerne efter end frost/tø test. Cylinderne eksponeret i saltopløsning under frost/tø testen på Danmarks Tekniske Universitet, var efter endt prøvning helt smuldret, hvorimod der ingen eller få synlige skader var på cylinderne med E-sten testet på Teknologisk Institut. Forskellen mellem tilstanden, kan enten skyldes forholdene under prøvningen eller frostbestandigheden af de udviklede recepter.

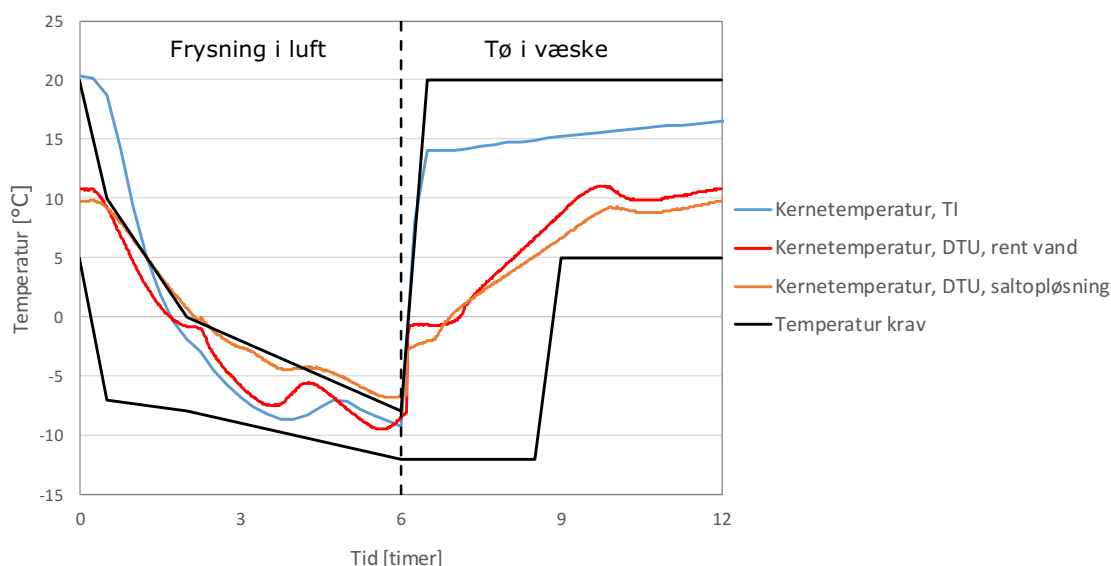
Normalt ses der ingen eller meget lidt skade i pastafasen, hvis det anvendte frysemedium er rent vand. Den store reduktion i ultralyd på E16-ML og E16-UL, indikerer dermed, at der har været isdannelse i cylinderne mens de har været nedsænket i vand. Resultaterne peger således i retning af, at frost/tø testen udført på Danmarks Tekniske Universitet har været aggressiv end den udført på Teknologisk Institut.

For at udelukke, at de store skader på E16-UL og E16-ML skyldes en utilfredsstillende frostbestandighed, blev en cylinder af P32-U, E16, P32-S og E25 frost/tø testet på Danmark Tekniske Universitet. Cylinderne blev udsat for i alt 14 cyklusser hvorefter forsøget blev stoppet grundet problemer med sten og pastarester i pumpens slange. I Figur 16 ses et billede af emnerne efter frosteksposeringen. Det fremgår tydeligt, at cylinderne er helt eller delvist smuldrede.



Figur 16 - P32-U, E16, P32-S og E25 efter frost/tø test i 3% saltopløsning på Danmarks Tekniske Universitet.

Hvor E16 og E25 blev eksponeret for 28 frost/tø cyklusser på Teknologisk Institut uden eller med få visuelle skader, smuldrede cylindere fra samme betonbatch efter kun 14 frost/tø cyklusser på Danmarks Tekniske Universitet. På baggrund af de visuelle resultater fra frost/tø testene udført på Teknologisk Institut og Danmarks Tekniske Universitet, blev det besluttet at kigge på temperaturkurven for prøvningerne. Kurverne fremgår af Figur 17.



Figur 17 - Temperaturkurver målt på Teknologisk Institut og Danmarks Tekniske Universitet.

Af de registrerede temperaturer fremgår det, at begge testmetoder i store træk overholder kravene til temperaturforløbet beskrevet i standarden. Temperaturen i prøveemnerne på Teknologisk Institut er ved frostcyklussens start højere end grænsen. Her skal det dog bemærkes, at det er inden temperaturerne i emner testet på Danmarks Tekniske Universitet når frysepunktet og derfor anses det for at være irrelevant for prøvningens resultater. Derudover overstiger temperaturen i prøveemnerne i saltopløsning på DTU temperaturkravet flere steder under frysning. Men eftersom de pågældende emnerne også er dem med de største skader, anses det ligeledes at være uden betydning.

Efter 6 timers frysning, vandmættes prøverne igen og temperaturen øges. Her er det interessant at bemærke, at emnerne testet på Danmarks Tekniske Universitet har en kernetemperatur under frysemediets frysepunkt i 1 og 0,5 time for henholdsvis emnerne i rent vand og emnerne i saltopløsningen mens de er nedsænket i væsken. Frysemediet har formegentlig en temperatur omkring frysepunktet når det pumpes op til prøveemnerne. Når væsken, der balancerer lige på frysepunktet, så bliver pumpet op til beton, der er koldere, så falder dens temperatur til under frysepunktet, og så vil den være utrolig villig til at fryse hurtigt.

Når den nedkølede beton kommer i kontakt med væsken, er væsketemperaturen altså betragteligt lavere i forsøgene foretaget på Danmarks Tekniske Universitet end i forsøgene foretaget på Teknologisk Institut, og det har tilsyneladende en stor betydning for hvor skadet, betonen bliver. På baggrund af de visuelle vurderinger og de målte temperaturkurver, synes der at være behov for at få konkretiseret kravene til temperaturforløbene anvendt til prøvningen, eftersom det er muligt at få vidt forskellige resultater for prøvninger som begge overholder kravene i standarden. At der kan forekomme så stor variation, kan skyldes, at temperaturkurverne oprindeligt er tiltænkt frost/tø prøvning af natursten og ikke permeabel beton.

6.4. Opsamling

Der er i projektet afprøvet en accelereret frost/tø-prøvningsmetode, der følger de overordnede principper i en tysk standard for drænbeton (DIN 18507), hvor betonen først fryses i luft og derefter tøs op i 3% NaCl saltopløsning. Prøvning blev både gennemført på Teknologisk Institut og på Danmarks Tekniske Universitet. Forsøgsopstillingerne de to steder var ikke identiske, men overholdt begge kravene stillet i DIN 18507, herunder krav til temperaturkurven. Afprøvningen foretaget på Danmarks Tekniske Universitet gav anledning til markant højere grad af skade end den afprøvning, der blev gennemført på Teknologisk Institut. Det formodes, at forskellene skyldes forskelle i temperaturforløb inden for tolerancerne i standarden. Det er ikke acceptabelt, at to laboratorier kan komme frem til meget forskellige resultater ved anvendelse af den samme standardiserede prøvningsmetode. Der er derfor behov for yderligere undersøgelse af temperaturforløbets betydningen for udvikling af frostskafer i drænbeton, så der kan specificeres en temperaturkurve, hvor forskellige laboratorier vil nå frem til samme prøvningsresultat. Det er derudover essentielt, at metoden svarer til forholdene i felten, og derfor bør der udføres fleres feltstudier, hvor temperaturen i luften og belægningen monitoreres, med henblik på at skabe det bedste grundlag for en videreudvikling af prøvningsmetoden, herunder fastsættelse af acceptkriterier.

I projektet blev der anvendt forskellige metoder til registrering af frostskafer i drænbeton:

- Visuel observation
- Måling af massetab
- Måling af dynamisk E-modul vha. ultralyd
- Måling af statisk E-modul vha. arbejdskurver

For konventionel beton sættes massetabet ved frost/tø-test i relation til arealet af en testflade, men testfladens areal er ikke veldefineret ved test af permeabel beton. Prøveemner, der viste tydelige tegn på revnedannelse, havde et lille (og dermed acceptabelt) massetab, så det var ikke alle skader, der blev detekteret med massetabet, og derfor er denne metode på den usikre side. Derimod viste både ultralydsmålingerne og måling af arbejdskurverne sig at være brugbare metoder. Fordelen ved ultralydsmålingerne er, at det er en simpel metode, som udelukkende kræver en ultralydsmåler i form af et simpelt, håndholdt apparat. Metoden er dog begrænset af det forholdsvise lille prøvningsområde og bør derfor altid kombineres med en visuel vurdering. Måling af arbejdskurverne er til sammenligning en mere omfattende prøvningsmetode, hvor der desuden er risiko for at skade prøveemnet ved referencemålingen, der foretages inden prøveemnet frost/tø-eksponeres. Til gengæld giver prøvningsmetoden information om hele prøveemnets tilstand og tillader mindre prøveemner eller prøveemner med alternative former.

7. Evaluering af frostbestandighed af permeabel beton

Resultatafsnittet er opdelt i to dele. Det pågældende kapitel omhandler faktorer med indflydelse på den permeable betons frostbestandighed. Det forrige kapitel omhandlede metoder til vurdering af frostbestandigheden af permeabel beton.

Der vil i de følgende afsnit blive set på betydningen af luftindhold i pastafasen og de anvendte tilslag. Derudover vil andre parametre, som kan have betydning for frostbestandigheden blive gransket.

7.1. Parametre med betydning for frostbestandigheden

7.1.1. Luftindhold i pastafasen

Luftporestrukturen i konventionel beton har stor indflydelse på betonens frostbestandighed. Der er udført en luftporeanalyse på to hærdede emner med henblik på at evaluere behovet for luftindblanding i permeabel beton. Præparaterne anvendt til luftporeanalysen er vist i Figur 18 og resultaterne fra målingen fremgår af Tabel 5.



Figur 18 - Farvede planslib af E16-UL (til venstre) og E16-ML (til højre).

Fra et visuelt perspektiv er der et lavt indhold af luftporer i begge prøveemner, hvor der er lidt flere luftporer i E16-ML end E16-UL. Der er udført to prøvninger på hvert testpræparat, ved første måling er eventuelle huller i epoxyen målt med som store luftporer og ved anden måling er hullerne forsøgt dækket med en sort tusch.

Tabel 5 - Resultater fra luftporeanalysen.

Beton ID	Totalt luftindhold [%]	Specifik overflade [mm^{-1}]	Afstandsfaktor [mm]
E16-UL, måling 1	0,34	27,62	0,450
E16-UL, måling 2	0,05	138,0	0,189
E16-ML, måling 1	0,19	36,60	0,428
E16-ML, måling 2	0,08	109,1	0,200

Det højeste luftindhold er målt for E16-UL, måling 1. Det skyldes formentlig, at huller og ujævnheder i epoxyen er medregnet som luft. På måling 2, er luftindholdet reduceret markant. Fælles for alle målinger er, at luftindholdet er meget lavt og grænser til ikke eksisterende. Grænseværdien for afstandsfaktoren er 0,200 mm for beton udsat for frost/tø påvirkning iht. DS/EN 2426. Er afstandsfaktoren lavere end 0,200 mm, vurderes betonen til at have en tilstrækkelig fordeling af luftpore, til at være frostbestandig. Den lave afstandsfaktor for E16-UL måling 2, er ikke et udtryk for, at luftporestrukturen for emnet er acceptabelt, idet resultatet skal vurderes sammen med det totale luftindhold.

Der er ikke anvendt luftindblandingsmiddel i E16-UL, men det er der derimod i recept E16-ML. At begge prøver har så lavt et luftindhold kan skyldes:

1. Der er næsten ikke noget sand i recepterne, og det kan være svært at iblande luft i ren pasta.
2. Pasta/mørtel laget rundt om stenene er meget tyndt (mellem 0-3 mm). Luftporene skal altså ikke flytte sig ret meget i den friske beton, før de rammer en fri overflade og forsvinder ud af pastafasen. Samtidig sætter det også en begrænsning for luftporernes størrelse.

For at få iblandet mere luft i den permeable beton, kan det være en løsning af sænke v/c-forholdet, så pastaen bliver mindre tyndtflydende og den iblandende luft dermed bliver mere stabil. Det kan ligeledes være en mulighed at optimere blandeproceduren, så der iblandes mere luft under blandingen.

Eftersom luftindholdet for begge emner er meget lavt, er det ikke muligt at bruge resultaterne til at vurdere betydningen af luftporestrukturen i pastafasen for den permeable betons frostbestandighed, idet det ikke er muligt at sammenligne resultater fra en permeabel beton med henholdsvis lavt og højt luftindhold. Resultaterne kan ligeledes ikke bruges til at vurdere de resterende cylinders luftindhold og luftporestruktur, da små ændringer i pastasammensætning og støbeteknik kan have påvirket luftindblandingen.

7.1.2. Tilslagsklassen

Ses der på resultaterne fra frost/tø testen opsummeret i kapitel 6, ses det at cylindere med P-sten er delvist eller helt smuldrede, hvorimod alle cylindere med E-sten testet på Teknologisk Institut har ingen eller få synlige skader.

De store skader i cylindere med P-sten kan forklares af tilslagslets dårlige frostbestandighed. En del af stenene synes at have en høj porøsitet, hvilket får stenene til at absorbere en masse vand. Når vand fryser udvides det cirka 9%, hvilket både kan skabe frostsprængninger i tilslaget og i den omkringliggende beton. Samme tendens er observeret i prøvefelterne, hvor prøvefeltet med P-sten har frostsprængte tilslag, hvorimod der ingen synlig skade er i prøvefeltet med E-sten, se Figur 19 og Figur 20. Det anbefales således, at der til permeabel beton udelukkende anvendes frostbestandige tilslagsmaterialer.



Figur 19 - Prøvefeltet med P-sten (til venstre) med synlige frostsprængninger i tilslaget og prøvefeltet med E-sten (til højre) uden synlige skader.



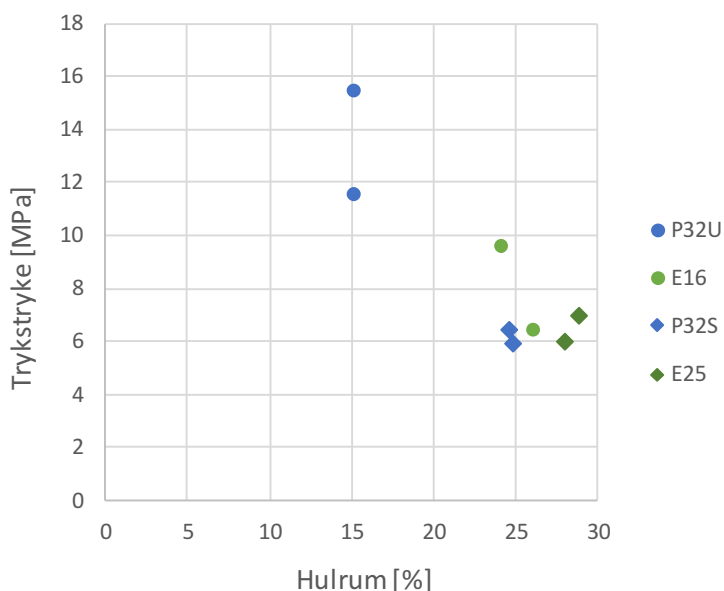
Figur 20 - Frostsprængning i en P-sten og omkring liggende pasta efter 9 frost/tø cyklusser på Teknologisk Institut.

7.1.3. Øvrige parametre med betydning for frostbestandigheden

Udover luftindholdet i pastafasen og tilslagsklassen, kan andre parametre potentielt påvirke frostbestandigheden, som f.eks.:

- Pastasammensætningen, herunder v/c-tal og bindertyper.
- Styrken
- Permeabiliteten

Af resultaterne opsummeret i kapitel 6, ses det at frostbestandigheden af P32-U er bedre end frostbestandigheden af P32-S. At de udborede cylindere har klaret frost/tø testen bedre end de støbte, kan skyldes, at de udborede cylindere har en højere kompakteringsgrad og dermed også en højere styrke og flere kontaktoverflader mellem tilslagene. Når der opstår tryk og spændinger i cylindrene som funktion af de ekspandere, porøse tilslag under frost, vil en cylinder med en højere styrke bedre kunne modstand lasterne. Styrken hænger i stor grad af hulrumsvolumen, se Figur 21.



Figur 21 – Trykstyrken som funktion af hulrummet i cylindrene.

Ses der på frostbestandigheden af E16 sammenlignet med E25, er den største reduktion i dynamisk og statisk E-modul at finde hos E25. Der er anvendt sammen tilslagsklasse til de to serier og styrkerne er sammenlignelige, se Figur 21. Forskellen i frostbestandigheden kan i stedet skyldes:

1. at E16 har en højere dosering af luftindblandingsmiddel end E25 og derfor også potentielt en bedre luftporestruktur. Der blev ved luftporeanalysen af E16-ML og E16-UL, ikke registreret nogen mærkbar forskel i luftindhold og luftporestruktur, men det udelukker ikke, at der kan være en forskel mellem E16 og E25.
2. at E16 har et højere pastaindhold end E25 og derfor også potentielt et tykkere pastalag om tilslagene. E16 er derfor mindre sårbar overfor afskalninger af pastaen.

7.2. Opsamling

Det er muligt at udføre en luftporeanalyse på den permeable beton ved at indstøbe et emne i epoxy og derefter plane og polere det. Der var i midlertidig meget begrænsede mængder indblandet luft i de testede betonblandinger. Der er derfor stadig et behov at undersøge betydningen af luftporestrukturen for permeabel betons frostbestandighed. Det forventes, at mængden af indblandet luft kan optimeres ved at justere recepten samt blande- og støbemetoden.

Fra frost/tø prøvningen kunne det konkluderes, at de anvendte P-tilslag ikke har tilstrækkelig frostbestandighed til at blive anvendt i permeable belægninger. Drænbeton er ikke omfattet af DS/EN 206 (det står i standardens kapitel 1 vedr. anvendelsesområde, at den ikke dækker "beton med åben struktur ("no-fines" beton)"). Det må alligevel anbefales, at drænbetonens delmaterialer, herunder tilslag, opfylder de krav, der stilles i EN 206 til relevante eksponeringsklasser.

Andre parametre som f.eks. styrke, permeabilitet og pastasammensætning kan ligeledes forventes at have en effekt på frostbestandigheden, men kræver yderligere undersøgelser.

8. Konklusion

Den anvendte prøvningsmetode til måling af permeabel betons frostbestandighed, er meget følsom for hvilket temperaturforløb cylinderen gennemløber indenfor kravgrænserne. Der er behov for at fastlægge hvilket temperaturinterval der svarer til danske klimaforhold, med henblik på at justere metoden. Det er muligt at vurdere frostbestandigheden af prøveemnerne vha. måling med ultralyd eller måling af arbejdskurver.

Det lykkede ikke at få iblandet luft i E16-ML og derfor var det ligeledes ikke muligt at vurdere betydningen af luftporestukturen for frostbestandigheden af permeabel beton. Fremadrettet bør det undersøges om det er muligt at tilføre et luftindhold i pastaen, eller om man må arbejde med andre parametre for at sikre frostbestandigheden af pastaen.

Forsøgene viste, at tilslagets frostbestandighed har afgørende indflydelse på frostbestandigheden af den permeable beton, idet tilslagene fryser i stykker, når de udsættes for frost i opfugtet tilstand.

9. Litteraturliste

- [1] Cowi, » Permeable belægninger – viden og dokumentation,« Vejdirektoratet, 2015.
- [2] V. R. Schaefer og J. T. Kevern, »An Intergrated Study of Pervious Concrete Mixture Design for Wearing Course Applications,« Iowa State Univeristy, 2011.
- [3] NRMCA, »Freeze Thaw Resistance of Pervious Concrete,« National Ready Mixed Concrete Association, 2004.
- [4] J. T. Kevern, V. R. Schaefer og K. Wang, »Effect of Coarse Aggregate on the Freeze-Thaw Durability of Pervious Concrete,« *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010.
- [5] J. J. V. II og G. W. Scherer, »A review of salt scaling: I Phenomenolgy,« *Cement and Concrete Research*, 2007.
- [6] J. O. Haerter, »Københavns Univeristet,« Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, 2016. [Online]. Available: <https://www.science.ku.dk/presse/nyhedsarkiv/2016/forskere-opklarer-proces-til-dannelse-af-skybrud/>. [Senest hentet eller vist den Juni 2018].
- [7] P. D. Tennis, M. L. Leming og D. J. Akers, »Pervious Concrete Pavements,« Portland Cement Association, 2004.
- [8] E. Yde, »Kapitel 3.4 Tilsætningstoffer,« i *Betonhåndbogen*, 2015.
- [9] *DS 2426:2011 Beton – Materialer – Regler for anvendelse af EN 206-1 i Danmark.*
- [10] *DS/EN 12620 + A1:2008 - Tilslag i beton.*
- [11] *DS/CEN/TS 12390-9:2006 Prøvning af hærdnet beton del:9 Fryse-tø-modstand – materialetab.*
- [12] *DS/EN 1338/AC:2006 Belægningssten af beton - Krav og prøvningsmetoder.*
- [13] *DIN 18507:2012 Plastersteine aus haufwerksporingen Beton – Begriffe, Anforderun-gen, Prüfunge, Überwachung.*
- [14] *DS/EN 12390-3 + AC:2012 Prøvning af hærdnet beton – Del 3: prøvelegemers tryk-styrke.*
- [15] *EN 480-11:2008 Tilsætningsstoffer til beton, mørtel og injektionsmørtel – Prøv-ningsmetoder – Del 11: Bestemmelse af luftporestruktur i hærdnet beton.*
- [16] *DS/EN 12371:2010 Prøvningsmetoder til natursten – Bestemmelse af frostmodstand.*
- [17] P. K. Mehta og P. J. M. Monteriro, *Concrete: Microstructure, properties, and materials*, Mc Graw Hill Education, Fourth edition, ISBN: 978-0-07-179787-0.
- [18] J. O. Frederiksen og G. N. Munch-Petersen, »kapitel 10.3 E-modul,« i *Betonhåndbogen*, 2015.

Bilag A Fremgangsmåde

A 1. Materialer og recepter

De anvendte materialer og recepter er opsummeret i Tabel 6 og Tabel 7.

Tabel 6 - Oversigt over anvendte materialer.

Materiale	Type	Mærke	Densitet [kg/m ³]	Absorption [%]	Vandindhold [%]
Cement	CEM I 52,5N (NS/LA≤2)	Aalborg Portland Rapid Cement	3160		
Flyveaske	B4	EmiFlyveAske	2300		
AEA 1	Vinsol resin og tensid	Conplast 316 AEA 1:5	1003		98,2
AEA 2	Tensid	MasterAir SB 1:3	1010		95,0
Sand	0/1 klasse E		2650	0,3	
E sten, 8/16	Knust granit, kl. E		2720	0,3	
E sten, 16/25	Knust granit, kl. E		2730	0,2	
P sten, 8/16	Bakkemateriale, kl. P		2500	2,7	
P sten, 16/32	Bakkemateriale, kl. P		2460	2,2	
Vand	Drikkevand		1000		100

Tabel 7 - Recepter. UL = uden luft og ML = med luft.

Materiale	Beton ID	Indhold [kg/m ³]				
		P32	E16	E25	E16-UL	E16-ML
Cement		172	240	172	211	211
Flyveaske		17,2	24,0	17,2	21,1	21,1
Vand		69,9	98,0	69,9	88,1	86,1
Sand		167	27,6	167	24,3	24,3
E sten 8/16			1688	535	1484	1484
E sten 16/25				1252		
P sten 8/16		491				
P sten 16/32		1128				
AEA 1		0,19		0,19		
AEA 2			2,4			2,1
v/c forhold [-]		0,388	0,398	0,388	0,398	0,398
Hulrum [%]		15	18	15	28	28
Densitet [kg/m ³]		2045	2080	2213	1829	1829

A 2. Støbning af cylindere

Al fremstilling af laboratoriestøbt beton er foregået på Teknologisk Institut. Der er blandet 40L beton af hver recept i en betonblender, se Figur 22. Der er anvendt tørre tilslag til blandingen og følgende blandeprocedure:

00s	Blanding af tørre materialer i 30 sekunder
30s	Vand tilføjes, der blandes i 15 sekunder
45s	Luftindblanding tilføjes
60s	Der blandes i yderligere 90 sekunder



Figur 22 – Betonblender anvendt til blanding på Teknologisk Institut.

Efter blanding har Teknologisk Institut støbt 6 Ø150 cylindere og Danmarks Tekniske Universitet har støbt 7 Ø150 cylindere. Cylindrene er fyldt i tre lag, som hver er kompakteret med en muggert, der er ladet falde 20 gange fra en højde svarende til omkring 10 cm. Teknologisk Institut har en ICT tester til støbning og kompaktering af Ø100 cylindere med tørbeton, men grundet den store stenstørrelse har det ikke været muligt at bruge ICT testeren til støbning af den permeable beton. Det er desuden fravalgt at vibrere betonen, idet pastaen ved kraftig vibrering potentielt vibreres ned i bunden af cylinderen og lukker hulrummene. Den anvendte metode er valgt ud fra en vurdering af hvilke metoder, der er mulige og samtidigt så repeterbare som muligt.

Cylindrene støbt af Teknologisk Institut blev afformet et døgn efter støbningen, og placeret i et klimakammer ved 20°C med en relativ luftfugtighed på 60%. Cylindrene er anvendt til:

- 2 cylindere er anvendt til trykprøvning, jf. afsnit 5.5
- 3 cylindere er anvendt til frost/tø test, jf. afsnit 5.7.
- 1 cylinder er anvendt til frost/tø test på Danmarks Tekniske Universitet, jf. afsnit 5.7.

Cylindrene støbt af Danmarks Tekniske Universitet blev afformet et døgn efter støbning og placeret i vandkar ved 20 °C i 7 døgn, inden de blev placeret i et klimakammer ved 20°C med en relativ luftfugtighed på 60%.

Cylinderne er anvendt til:

- 1 cylinder er anvendt til luftporeanalyse, jf. afsnit 5.6.
- 6 cylindere er anvendt til frost/tø test, jf. afsnit 5.7.

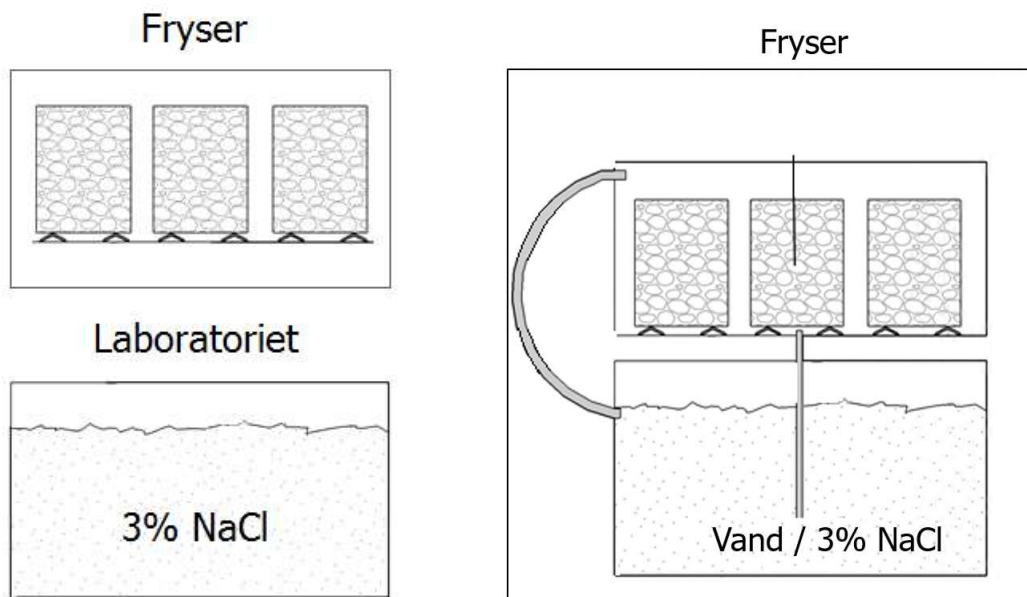
A 3. Frost/tø test

Til bestemmelse af frostbestandigheden, er der taget udgangspunkt i den tyske standard, DIN 18507 [13], som foreskriver 28 frost/tø cyklusser og et krav til et maksimalt gennemsnitlig massetab på 0,5%, med ingen enkeltværdier over 0,8%. For prøvningsmetoden henviser den tyske standard til teknologitesten anvendt til frost/tø test af natursten beskrevet i EN 12371 [16]. Iht. standarden skal cylinderne udsættes for 6 timer fryseperioder i luft, efterfulgt af 6 timer tø-perioder, hvor cylinderen er nedsænket i en saltopløsning. Temperaturen i cylinderen skal ligge inden for et givent interval specificeret i EN 12371.

På Teknologisk Institut har cylinderne været nedsænket i vand uden for fryseren, mens de på Danmarks Tekniske Universitet har været nedsænket i vand der blev opbevaret i fryseren, se Figur 23. I begge tilfælde var temperaturforløbene designet, så kravene i EN 12371 [16] blev overholdt.

Prøvningsmetoden er udført i to variationer, beskrevet som nedenfor:

- På Teknologisk Institut er prøvningen udført på 3 cylindere pr. serie. Cylinderne er skåret til i begge ender, så en højde på 200mm +/- 3 mm er opnået. De udborede cylindere havde en diameter 143mm +/- 2mm og de støbte havde en diameter på 150mm +/- 2mm. Hver frost/tø cyklus bestod af 18 timers tø i en saltopløsning på 3% og 6 timers frysning i luft. Karet med saltopløsningen stod i laboratoriet og havde en temperatur på 18 °C +/- 2 °C. Temperaturen i fryseren styres automatisk og et indstøbt temperaturføler i et dummyemne kontrollerede, at kernetemperaturen følger kravene i EN 12371:2010. Emnerne er flyttet manuelt mellem karet og fryseren. De udborede cylindere var minimum 31 døgn ved prøvningsstart og de støbte var 31 døgn. 3 dage inden start af frost/tø testen blev emnerne vandlagret, for at sikre at de var vandmættede ved prøvestart.
- På Danmarks Tekniske Universitet er prøvningen udført på 6 cylindere pr. serie med en højde på 190mm +/- 3mm og en diameter på 150mm +/- 2mm. Hver frost/tø cyklus bestod af 6 timers tø i enten en 3% saltopløsning eller rent vand og 6 timers frysning i luft. Halvdelen af cylinderne i hver serie, blev udsat for saltopløsningen og den anden halvdel for rent vand. Temperaturen i fryseren blev styret automatisk og der var indstøbt en temperaturføler i et af emnerne til kontrol af kernetemperaturen under prøvningen. Væsken blev automatisk pumpet til og fra emnerne.



Figur 23 - Forsøgsopstilling til frost/tø test anvendt på Teknologisk Institut (til venstre) og Danmarks Tekniske Universitet (til højre).

Bilag B Prøvefelter og prøvemener

B 1. Prøvefelter og udborede cylindere

Udlægningsmetoden anvendt til permeabel beton har stor betydning for belægningens egenskaber. Der er derfor i projektet støbt to prøvefelter i Nordjylland, hvorfra der er udtaget seks cylindere til prøvning i laboratoriet. De støbte prøvefelter og udborede kerner er vist på Figur 24 og Figur 25.

Densiteten af kernerne er bestemt ud fra kernernes masse og den gennemsnitlige højde og diameter, baseret på 3 målinger fordelt jævnt på cylinderne. Densiteterne fremgår af Tabel 8.

Tabel 8 - Densitet af udborede cylindere.

Beton ID	Nr.	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]
P32-U	1	8752	2025
	2	9000	2081
	3	8876	2014
	4	8717	1949
	5	8832	1988
	6	9086	2015
	Spredning	143	43
	Middel	8877	2012
E16	1	8393	1817
	2	8180	1814
	3	8181	1818
	4	8598	1910
	5	8000	1834
	6	8075	1770
	Spredning	221	46
	Middel	8238	1827

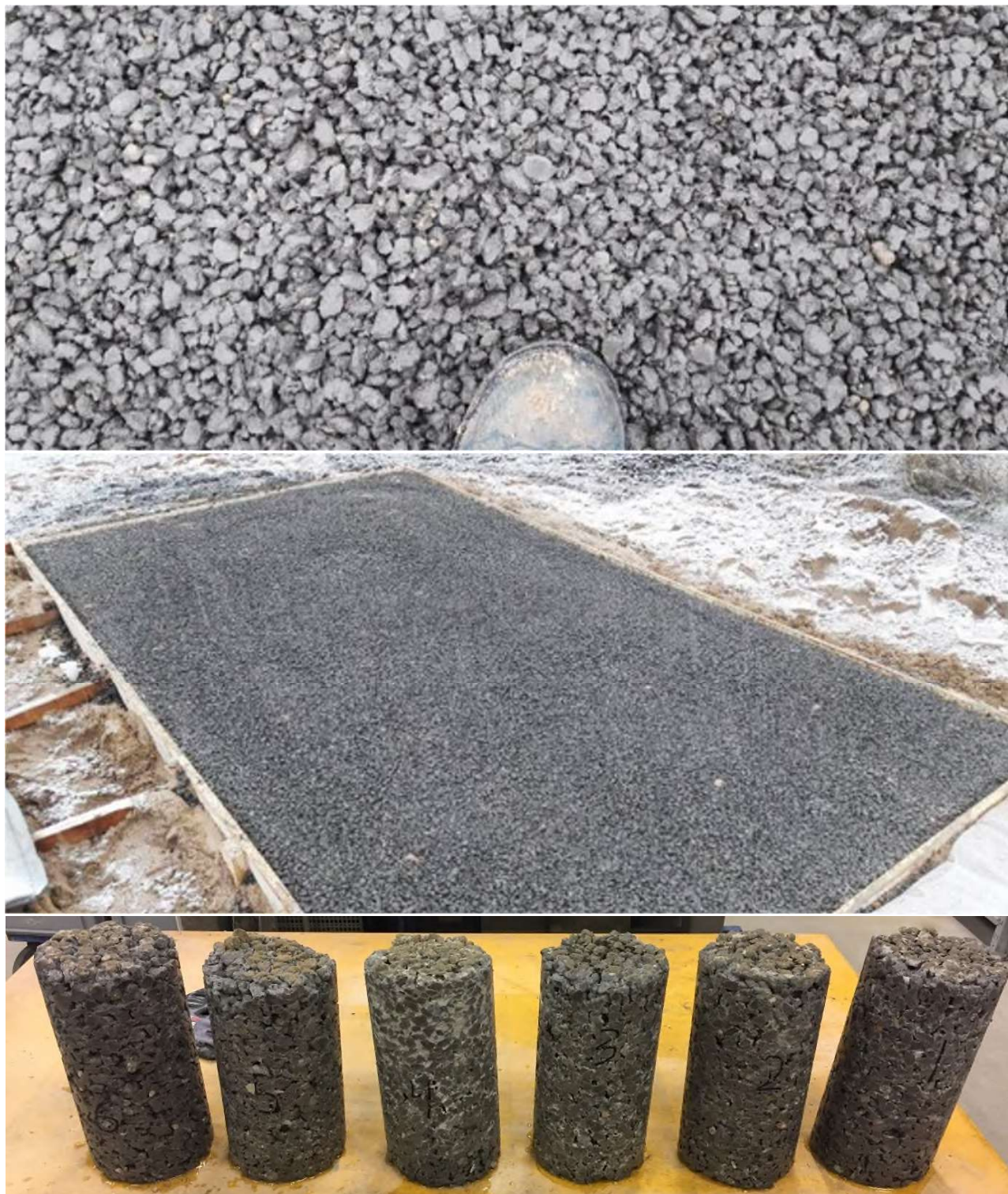
Den tilsigtede densitet for recept P32 er 2045 kg/m³ og 2080 kg/m³ for E16, jf. Tabel 7. Den gennemsnitlige densitet for P32-U er kun 1,7% lavere end den tilsigtede densitet, hvorimod densiteten for E16 er 12% lavere. Det kan skyldes:

1. Densiteten på 2080 kg/m³ for E16 er en forventet densitet, i praksis er det måske ikke muligt at kompaktere betonen nok til at opnå den forventede densitet.
2. Prøvefeltet er blevet kompakteret indtil betonens overflade flugter med kanten på formen. Har betonen ikke være udlagt med en tilstrækkelig overhøjde, bliver densiteten for lav.
3. Det er ikke nødvendigvis muligt at kompaktere betonen tilstrækkeligt med den valgte udlægningsmetode.



Figur 24 - Prøvefelt og udborede kerne for P32-U.

SUPERDRÆENDE BETONBELÆGNINGER



Figur 25 - Prøvefelt og udborede kerner for E16.

B 2. Cylindere støbt i laboratoriet

Ligesom med fuldskalastøbning af permeabel beton, har støbeteknikken anvendt i laboratoriet også en stor indflydelse på egenskaber for betonen. Densiteterne fremgår af Tabel 9. Densiteten er bestemt ud fra massen og en gennemsnitlig højde og diameter baseret på henholdsvis 3 og 6 målinger fordelt jævnt på cylinderen.

Tabel 9 - Densitet af støbte cylindere.

Beton ID	Nr.	Vægt [g]	Densitet [kg/m ³]
P32-S	1	9547	1801
	2	9545	1800
	3	9532	1798
	4	9576	1806
	5	9496	1791
	6	9473	1787
	Spredning	37,5	7,1
	Middel	9528	1797
E25	1	9484	1789
	2	9774	1844
	3	9508	1793
	4	9714	1832
	5	9715	1833
	6	9645	1819
	Spredning	119	22,5
	Middel	9640	1818

Den tilsigtede densitet for recept P32 er 2045 kg/m³ og 2213 kg/m³ for recept E25, jf. Tabel 7. Den gennemsnitlige densitet for P32-S er 12% lavere end den tilsigtede densitet og densiteten for E25 er 18% lavere. De lave densiteter kan forklares ved:

1. Det er ikke nødvendigvis muligt at opnå den tilsigtede densitet på grund af randeffekten ved cylinderens kant, som gør det umuligt at kompaktere betonen ordentligt langs hele dens overflade.
2. Kompakteringsmetoden er ikke optimal, og der opnås ikke en jævn kompaktering af cylinderen, jf. Figur 26 hvor støbelagene tydeligt fremgår.



Figur 26 - Støbte cylindere set fra siden hvor støbelagene tydeligt fremgår.

B 3. Trykstyrke af cylindere

Trykstyrken i permeabel beton afhænger især af antallet og placeringen af kontaktpunkter mellem tilslagene. De målte trykstyrker fremgår af Tabel 10. Bemærk at densiteten er for de skårede cylindere, derfor vil værdierne variere fra dem i Tabel 8 og Tabel 9 som er for de intakte cylindere. Hulrummet er udregnet som forholdet mellem den målte- og den tilsigtede densitet, iht. det tilsigtede hulrum angivet i Tabel 7.

Tabel 10 - Trykstyrke af udborede og støbte cylindere.

Beton ID	Nr.	Densitet [kg/m ³]	Hulrum [%]	Brudlast [kN]	Trykstyrke [MPa]
P32-U	4	2042	15,2	187	11,5
	5	2041	15,2	250	15,5
	Middel	2042	15,2	219	13,5
E16	4	1934	24,1	155	9,5
	5	1885	26,1	104	6,5
	Middel	1910	25,1	130	8,0
P32-S	4	1814	24,6	114	6,5
	5	1807	24,9	104	5,9
	Middel	1811	24,8	109	6,2
E25	4	1875	28,0	106	6,0
	5	1851	28,9	125	7,0
	Middel	1863	28,5	115	6,5

På trods af, at der er anvendt samme recept til P32-U og P32-S, er trykstyrken for de udborede cylindere mere end dobbelt så stor som for de støbte. Det kan bl.a. forklares af forskellen i kompakteringsgrad og illustrerer hvor følsom permeabel beton er overfor udlægnings- og støbemetoden. Samtidig kan kvaliteten af kontaktfladen ved prøvning have en betydning for resultaterne.

B 4. Opsamling

Forprøvning vil oftest involvere laboratoriestøbt beton frem for in-situ støbt beton. For konventionel beton foretages meget af den løbende kvalitetskontrol også på laboratoriestøbte prøveemner. På grund af den store afhængighed af kompaktering, bør der arbejdes på en mere standardiseret støbe metode til laboratoriet eller alternativt bør det overvejes, om kvalitetskontrol af drænende belægninger i stedet bør udføres på udborede cylindre.

Resultaterne fra udlægning af prøvefelter og støbning af cylindre har illustreret, hvor følsom egenskaberne for permeabel beton er overfor udlægnings- og støbemetoden. Lagene i de støbte cylindre var visuelt synlige, hvor bunden af hvert lag tydeligt var mindre kompakteret end toppen. Både styrken og frostbestandigheden viste sig at være afhængig af kompakteringsgraden, hvor P32-U cylindrene var mere kompakteret og samtidig havde en højere styrke og bedre frostbestandighed end P32-S. Modsat kan en øget kompaktering dog også sænke frostbestandigheden, hvis regnvandet ikke drænes tilstrækkeligt fra belægningen.

Bilag C Resultater fra frost/tø test

C 1. Massetab

De registrerede masser før og efter frost/tø testen er opsummeret i Tabel 11 og Tabel 12. For emnerne testet på Danmarks Tekniske Universitet, er det samlede massetab for cylinderne eksponeret i vand bestemt ud fra det afskallede materiale fra alle cylinderne og derfor er der kun en middelværdi.

Tabel 11 - Ændringer i masser efter frost/tø-test på Teknologisk Institut.

Beton ID	Nr.	Masse før [g]	Masse efter [g]	Massetab [%]
P32-U	1	6726	578	91
	2	6894	2446	66
	3	6606	604	91
	Middel	6742	1209	82
E16	1	5957	5800	2,6
	2	5941	5811	2,2
	3	5951	5802	2,5
	Middel	5950	5804	2,4
P32-S	1	6377	257	96
	2	6377	287	96
	3	6417	198	97
	Middel	6390	247	96
E25	1	6442	6435	0,1
	2	6549	6527	0,3
	3	6346	6314	0,5
	Middel	6446	6425	0,3

Tabel 12 - Ændringer i masser efter frost/tø test i vand på Danmarks Tekniske Universitet.

Beton ID	Nr.	Masse før [g]	Masse efter [g]	Massetab [%]
E16-ML/UL	Middel	5767	5754	0,2

C 2. Måling af ultralydshastigheder

De målte ultralydshastigheder fremgår af Tabel 13 og Tabel 14.

Tabel 13 - Målt hastighed af ultralyd før og efter frost/tø test på Teknologisk Institut.

Beton ID	Nr.	Ultralyd [m/s]		
		Før arbejdskurve	Efter arbejdskurve	Efter frost
E16	1	3165	3138	2957
	2	3194	3147	2928
	3	3138	3083	2905
	Middel	3166	3123	2930
E25	1	3368	3280	2925
	2	3195	3122	1823
	3	3320	3117	1995
	Middel	3294	3173	2234

Tabel 14 - Målt hastighed af ultralyd før og efter frost/tø test med rent vand på Danmarks Tekniske Universitet.

Beton ID	Nr.	Ultralyd [m/s]				
		Før frost	6 cyklusser	14 cyklusser	20 cyklusser	27 cyklusser
E16-ML	2	3140	2788	2043	< 1200*	< 1200*
	4	3353	2952	1753	< 1200*	< 1200*
	Middel	3247	2870	1898	< 1200*	< 1200*
E16-UL	1	3140	3018	2635	1763	< 1200*
	3	3552	3250	2703	1738	< 1200*
	5	3145	2863	2105	1937	< 1200*
	Middel	3279	3044	2481	1813	< 1200*

* Måleren anvendt på Danmark Tekniske Universitet kan ikke måle værdier under 1200 m/s. Derfor var det ikke muligt at få de sidste målinger med for E16-ML og E16-UL eksponeret i rent vand, på trods af at cylindrene visuelt kun havde små skader.

De udregnede dynamiske E-modul er opsummeret Tabel 15 og Tabel 16. For E16 og E25 er ultralydsmålingen efter måling af første arbejdskurve anvendt til udregningerne, da målingen af arbejdskurver har sænket hastigheden af ultralyden. Det indikerer, at måling af arbejdskurverne har forårsaget en mindre skade i cylindrene.

Tabel 15 - Dynamisk E-modul før og efter frost/tø test på Teknologisk Institut.

Beton ID	Nr.	Dynamisk E-modul [GPa]	
		Efter arbejdskurve	Efter frost
E16	1	15,0	13,3
	2	15,0	13,0
	3	14,4	12,8
	Middel	14,8	13,1
E25	1	17,7	14,2
	2	16,3	6,2
	3	15,7	6,6
	Middel	16,6	9,0

Tabel 16 - Dynamisk E-modul før og efter frost/tø test på Danmarks Tekniske Universitet.

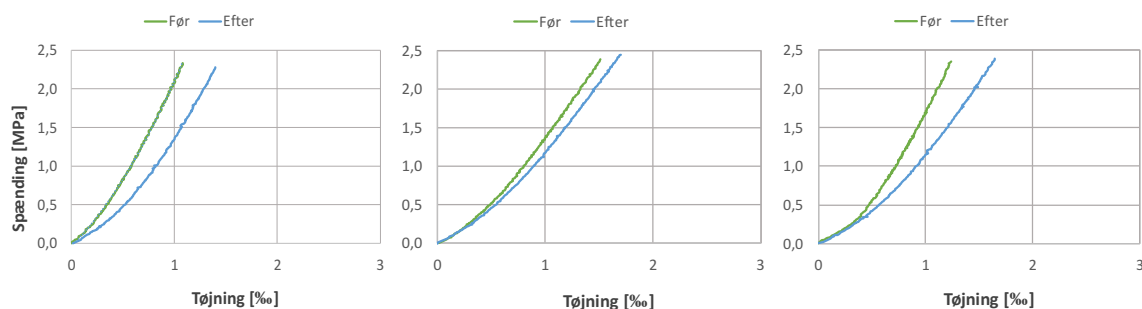
Beton ID	Nr.	Dynamisk E-modul [GPa]				
		Før frost	6 cyklusser	14 cyklusser	20 cyklusser	27 cyklusser
E16-ML	2	15,0	11,9	6,8	-	-
	4	17,2	13,3	5,1	-	-
	Middel	16,1	12,6	6,0	-	-
E16-UL	1	14,6	13,5	10,3	4,9	-
	3	19,3	16,2	11,2	5,0	-
	5	12,8	10,7	6,3	5,2	-
	Middel	15,6	13,4	9,2	5,0	-

C 3. Måling af arbejdskurver

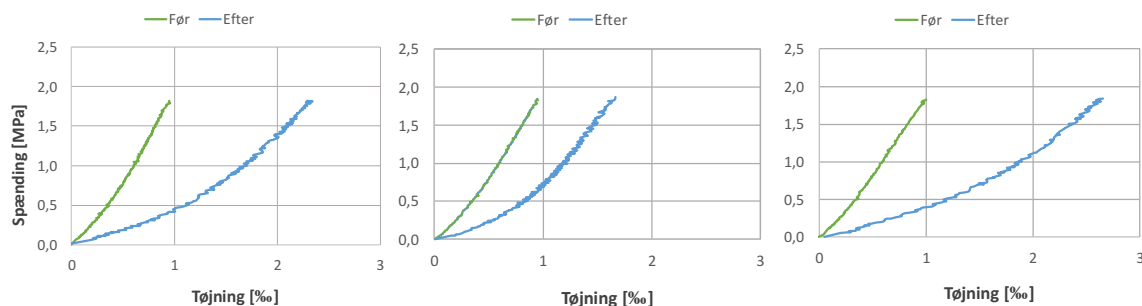
Til målingen af arbejdskurverne, er der lastet op til 30% af den målte trykstyrke. De anvendte lasthastigheder fremgår af Tabel 17 og er bestemt ud fra den målte trykstyrke, jf. afsnit B 3. De målte arbejdskurver fremgår af Figur 27 og Figur 28.

Tabel 17 - Last og last hastighed anvendt til måling af arbejdskurven.

Beton ID	Brudlast [kN]	Maks last [kN]	Last hastighed [kN/s]
E16	130	38,9	0,19
E25	115	34,6	0,16



Figur 27 - Målt arbejdskurve for E16 1-3 henholdsvis før og efter frost/tø testen.



Figur 28 - Målt arbejdskurve for E25 1-3 henholdsvis før og efter frost/tø testen.

Målingerne efter frost/tø testen på E25 cylindrene fluktuerer en smule. Det skyldes formegentlig at cylindernes bund er blevet ujævn som følge af revnedannelserne. For alle testede cylindere gælder det, at deformationen ved samme belastning er højere efter frost/tø testen end før, hvilket svarer til en reduktion af cylinderens stivhed.

I dette bilag fremgår de udregninger som er foretaget på de målte arbejdskurver med henblik på at finde ændringerne i E-modulet efter frost/tø testen.

Der er i databehandlingen valgt at udregne tangens E-modulet for de målte kurver. Det er også muligt, i stedet at udregnet sekant E-modulet for alle målte værdier, hvilket vil have været en mere simpel udregning. Dette er dog fravalgt, da de små fluktuationer ligeledes giver fluktuationer i de udregnede værdier for E-modulet.

Sammenhængen mellem de målte tøjninger og spændinger, kan for de målte kurver beskrives ved et andengradspolynomium. Idet E-modulet svarer til kurvens hældning, er det muligt at få et udtryk for tangens E-modulet for hele lastområdet som funktion af spændingen ved at:

1. differentiere udtrykket for spændingen, hvilket giver et udtryk for E-modulet som funktion af tøjningen. Men da tøjningen er en relativ værdi udelukkende gældende for det pågældende prøveemne, beskrives E-modulet i stedet som en funktion af spændingen. Derfor udføres punkt 2 og 3.
2. løse udtrykket for spændingen, så det i stedet bliver til et udtryk for tøjningen som en funktion af spændingen.
3. indsætte udtrykket for tøjningen i udtrykket for E-modulet fundet i punkt 1.

Følges ovenstående 3 punkter for de målte arbejdskurver, fås udtrykkene for E-modulet vist i ligning (9.1)-(9.12) sammen med udtrykket for spændingen.

$$E16-1 \quad \text{Før frost} \quad \sigma = 914404 \cdot \tau^2 + 1188 \cdot \tau \quad R^2 = 0,9990 \quad (9.1)$$

$$E = \sqrt{1411284 \cdot \sigma + 3657618}$$

$$\text{Efter frost} \quad \sigma = 744830 \cdot \tau^2 + 600 \cdot \tau \quad R^2 = 0,9996 \quad (9.2)$$

$$E = \sqrt{359500 \cdot \sigma + 2979319}$$

$$E16-2 \quad \text{Før frost} \quad \sigma = 512561 \cdot \tau^2 + 828 \cdot \tau \quad R^2 = 0,9987 \quad (9.3)$$

$$E = \sqrt{685360 \cdot \sigma + 2050242}$$

$$\text{Efter frost} \quad \sigma = 432074 \cdot \tau^2 + 734 \cdot \tau \quad R^2 = 0,9994 \quad (9.4)$$

$$E = \sqrt{538328 \cdot \sigma + 1728297}$$

$$E16-3 \quad \text{Før frost} \quad \sigma = 10851333 \cdot \tau^2 + 590 \cdot \tau \quad R^2 = 0,9990 \quad (9.5)$$

$$E = \sqrt{347613 \cdot \sigma + 4340534}$$

$$\text{Efter frost} \quad \sigma = 516919 \cdot \tau^2 + 615 \cdot \tau \quad R^2 = 0,9995 \quad (9.6)$$

$$E = \sqrt{377646 \cdot \sigma + 2067675}$$

$$E25-1 \quad \text{Før frost} \quad \sigma = 862125 \cdot \tau^2 + 1132 \cdot \tau \quad R^2 = 0,9988 \quad (9.7)$$

$$E = \sqrt{1282488 \cdot \sigma + 344850}$$

$$\text{Efter frost} \quad \sigma = 258707 \cdot \tau^2 + 176 \cdot \tau \quad R^2 = 0,9973 \quad (9.8)$$

$$E = \sqrt{30905 \cdot \sigma + 1034830}$$

E25-2 Før frost $\sigma = 844107 \cdot \tau^2 + 1168 \cdot \tau$ $R^2 = 0,9989$ (9.9)

$$E = \sqrt{1363337 \cdot \sigma + 3376429}$$

Efter frost $\sigma = 621943 \cdot \tau^2 + 108 \cdot \tau$ $R^2 = 0,9961$ (9.10)

$$E = \sqrt{11644 \cdot \sigma + 2487774}$$

E25-3 Før frost $\sigma = 550741 \cdot \tau^2 + 1343 \cdot \tau$ $R^2 = 0,9978$ (9.11)

$$E = \sqrt{1803211 \cdot \sigma + 2202966}$$

Efter frost $\sigma = 191860 \cdot \tau^2 + 181 \cdot \tau$ $R^2 = 0,9973$ (9.12)

$$E = \sqrt{32900 \cdot \sigma + 767440}$$