



Center for Grøn Beton

Demobro

Udført af:

Dorthe Mathiesen

Anette Berrig

Teknologisk Institut, Beton, december 2002

Titel: Demobro
Udført af: Dorthe Mathiesen
Anette Berrig
Dato: December 2002
ISBN: 87-7756-689-0

Reproduktion af dele af rapporten er tilladt, hvis kilde angives.

Indhold

1.	SAMMENFATNING	5
2.	BESKRIVELSE AF PROJEKTET	6
3.	KRAV	8
	3.1 KRAV TIL BETON	8
	3.1.1 <i>Forprøvning</i>	8
	3.1.2 <i>Prøvestøbning</i>	8
	3.1.3 <i>Produktionsprøvning</i>	9
	3.2 KRAV TIL UDFØRELSE	10
4.	GENNEMFØRELSE AF BETONSTØBNINGER	11
	4.1 UDFORDRINGER MED A1- BETONEN	13
	4.2 STØBNING AF BRODÆK	14
	4.3 SÆTNINGSPLADER MED A3 BETON	16
5.	RECEPTER	17
	5.1 PAKNINGSANALYSER	17
6.	RESULTATER	21
	6.1 FORPRØVNING	21
	6.2 PRØVESTØBNING, EKSTRA PRØVNING OG PRODUKTIONSPRØVNING	21
	6.2.1 <i>Frisk beton resultater</i>	21
	6.2.2 <i>Mekaniske egenskaber</i>	21
	6.2.3 <i>Holdbarhed</i>	26
	6.3 UDFØRELSE	30
	6.3.1 <i>Overfladestruktur</i>	30
	6.3.2 <i>Foranstaltninger</i>	31
	6.4 RESULTATER FRA SLAMASKEBETON	31
	6.4.1 <i>Frisk beton resultater</i>	31
	6.4.2 <i>Mekaniske egenskaber</i>	32
	6.4.3 <i>Holdbarhed</i>	33
	6.4.4 <i>Udførelse</i>	35
	6.5 MILJØSCREENING	35
	6.6 IMPACT ECHO MÅLING AF BRODÆK	36
7.	VURDERING	37
	7.1 BETONPRODUCENTENS VURDERING	37
	7.2 TILSYNETS VURDERING	37
	7.3 ENTREPRENØRENS VURDERING	37
8.	KONKLUSION	39
	8.1 DEMOBROEN DE NÆSTE 10 ÅR	39
9.	REFERENCER	41
	BILAG	43

Bilagsliste

1. Tegninger
2. Dokumentation forprøvning
3. Betonkontroltester
4. Byggemødereferater
5. Støberapport
6. Tilsynsnotat
7. Prøvningsrapporter
8. Temperatursimulering fundament C

1. Sammenfatning

Nærværende rapport sammenfatter det arbejde, der er gennemført i centerkontrakten ”Resourcebesparende Betonkonstruktioner” i forbindelse med opførelsen af en ”grøn” bro.

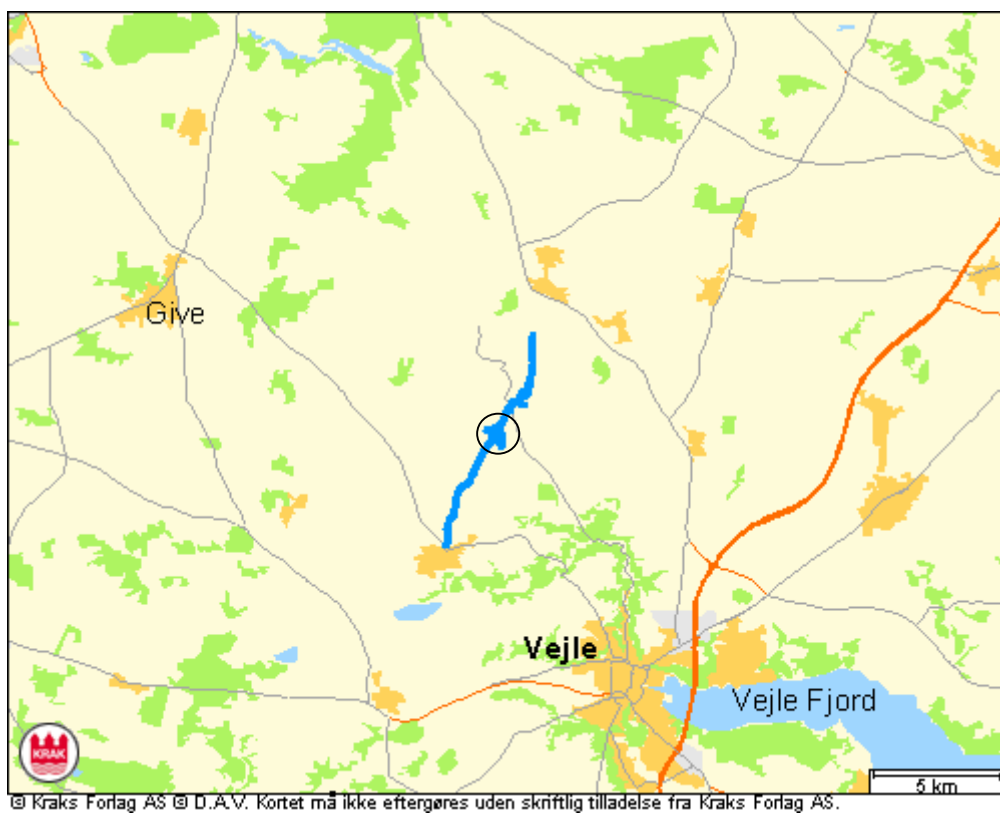
Rapporten indeholder:

- en beskrivelse af projektet,
- en sammenfatning af kravspecifikationerne for projektet,
- de gennemførte forsøg med tilhørende resultater, samt
- en vurdering af projektet foretaget af de involverede parter.

2. Beskrivelse af projektet

Et vigtigt element i centerkontrakten Ressourcebesparende Betonkonstruktioner, i daglig tale kaldet Grøn Beton, er opførelsen af en bro, hvor den teknologi, der er udviklet i projektet, afprøves i fuld skala.

Broen, Ris Ølholm, E6770.10 OF af Tørringvej, i projektet kaldet Demobroen, ligger ved Tørring nord for Vejle, og er en 50 meter lang og 7 meter bred vejbro, der skal føre en kommunevej over en kommende motortrafikvej, Figur 1.



Figur 1. Kort over Vejleområdet, hvor Demobroen er opført.

Broen er designet som en trefags bro, forberedt til en eventuel senere udbygning mod nord til overføring over motorvej. En sådan udbygning er forberedt ved, at kun den sydligste mellemsøjle er indspændt i bunden, hvorimod den anden mellemsøjle er designet som en pendulsøjle, med charnier i både top og bund.

For at få mulighed for at anvende flere forskellige betontyper samt både sort og rustfri armering i søjlerne, er hver af de to mellemsøjler designet som tre små runde søjler i stedet for en stor firkantet søjle. Herved opnås mulighed for at følge tilstanden af seks forskellige konstruktionsdele udsat for samme eksponering.

Brodækket er designet som en traditionel kassedrager med udkragede vinger og kantbjælker. Brodækkets tværsnit er endvidere designet med symmetrisk fald til begge sider, hvorimod der i længderetningen er ensidet fald mod nord.

Tegninger der illustrerer broens konstruktionsmæssige udformning fremgår af Figur 2 og Figur 3 i afsnit 4.

I Demobroen anvendes 4 forskellige betontyper – referencebeton A-REF og 3 grønne betontyper, der er udviklet og afprøvet i Grøn Beton projektet. A-REF er en traditionel anvendt beton, der opfylder kravene i AAB /1/. De tre grønne betontyper er A1 – beton med højt flyveaskeindhold og rapid cement som erstatning for lavalkali sulfatbestandig cement, A0 – beton med rapid cement og endelig A3 – beton med slammaske og rapid cement. A-REF, A1 og A0 betonerne anvendes til fundamenter, søjler og brodæk, hvorimod A3 betonen anvendes til sætningsplader i forlængelse af brodækket. A3 betonen indgår således ikke i den bærende del af konstruktionen, men vil dog alligevel blive eksponeret for næsten samme miljøpåvirkning som de øvrige betontyper.

Udover at anvende grønne betoner for at reducere miljøpåvirkningerne fra betonkonstruktioner er der, som en konstruktionsteknisk miljøvenlig løsning, anvendt rustfri armering i 3 søjler og i kantbjælkerne.

Brodækket på Demobroen skal forblive uisoleret, dvs. kørsel vil foregå direkte på betonen, hvilket stiller større krav til overfladen mht. friktion, slidstyrke osv. Der er derfor gennemført en række forsøg for at bestemme den bedst mulige afretning og efterbehandling af betonoverfladen.

COWI har projekteret broen for Vejdirektoratet. Betonen er leveret af Unicon og MT Højgaard er udførende.

3. Krav

Demobroen er opført i overensstemmelse med kravene i følgende dokumenter:

- Almindelig Arbejdsbeskrivelse (AAB); April 2001 /1/.
- Særlige Betingelser og Beskrivelser (SBB) for Ris Ølholm E 6770.10 OF af Tørringvej; 5. Oktober 2001 /2/.

De betontyper, der anvendes i Demobroen, opfylder på enkelte områder ikke de normale krav i AAB. Fravigelserne fra de normale krav er beskrevet i SBB teksten.

Denne rapport har dels til formål at redegøre for og foretage en evaluering af den prøvning, der er gennemført på betonerne til Demobroen dels at redegøre for udførelsen af betonarbejdet. Det er derfor i det efterfølgende opsummeret, hvilken prøvning der er krævet gennemført i de to nævnte dokumenter, samt hvilke krav der er stillet til udførelse.

3.1 Krav til beton

3.1.1 Forprøvning

Beton og delmaterialer til beton skal være forprøvet i henhold til kravene i AAB og dermed kravene til forprøvning i DS 481 /3/. Resultaterne fra forprøvning af delmaterialer og beto- nens sammensætning tillades at være fremkommet som en del af Grøn Beton projektets prøv- ning.

I forhold til de normale krav til forprøvning i DS 481 er der i AAB og SBB stillet følgende ekstra krav til prøvning i forbindelse med forprøvning:

Sten

Bjergartsfordeling i henhold til metode DS 405.1 (også underkorn mindre end 2 mm) skal dokumenteres.

Blandevand

Det skal dokumenteres, at de stillede krav er opfyldt.

Slamaske

Slamaskens kemiske egenskaber skal bestemmes.

Beton

De i DS 481 tabel 5.4 angivne produktionsegenskaber skal bestemmes.

3.1.2 Prøvestøbning

Der er krævet gennemført prøvestøbning for de betontyper, der indgår i den bærende del af konstruktionen dvs. for betontyperne A-REF, A0 og A1.

Prøvestøbningen blev tilladt gennemført i forbindelse med støbning af Demobroens fundamenter. Følgende prøvning blev krævet pr. betontype:

- 4 borekerner Ø100 til frostprøvning i henhold til SS 13 72 44, procedure IV A
- 3 borekerner Ø100 til luftporeanalyse i henhold til DS/EN 480-11
- 1 borekerne (samme som anvendt til luft) til tyndslibsanalyse i henhold til DS 423.41-45.
- 3 støbte cylindre Ø150 til frostprøvning i henhold til SS 13 72 44, procedure III A
- 3 støbte cylindre Ø100 til chloridmodstandsmåling i henhold til CTH Rapid Method (NT BUILD 492)
- 5 støbte cylindre til arbejds kurvemåling – ikke standardprøvning, men udføres i henhold til metoden anvendt i Grøn Beton projektets prøvning i udvidet pakke.

På betontype A1 er der endvidere krævet bestemmelse af følgende hærdeegenskaber:

- 3 støbte Ø130 cylindre til selvudtørringssvind i henhold til TI-B 102
- 3 støbte Ø130 cylindre til krybning i tidlig alder i henhold til TI-B 102
- 18 støbte cylindre Ø150 til spaltetrækstyrkeudvikling i henhold til DS 423.34
- 2 støbte cylindre Ø100 til temperaturudvidelseskoefficient i henhold til modificeret TI-B 101
- 24 støbte cylindre til trykstyrke- og E-moduludvikling i henhold til DS 423.23 og DS 423.25

Alle fire fundamenter blev anvendt til fastlæggelse af udførselsmæssige forhold herunder:

- fastlæggelse af glittetid
- fastlæggelse af afretnings- og struktureringsmetode
- bestemmelse af betonoverfladens friktion ved anvendelse af en pendulrødhedsmåler. (Dette var hensigten men blev ikke realiseret, i stedet blev der målt på en prøvebelægning udstøbt til formålet).

3.1.3 Produktionsprøvning

Den krævede produktionsprøvning i henhold til kravene i AAB er følgende:

Luftindholdet samt konsistensen af den friske beton skal kontrolleres på betonfabrik på de tre første læs og derefter 1 gang pr. 25 m³ leveret beton. Ved levering udtages prøver på pladsen i samme omfang.

Til styrkebestemmelse udføres for hvert støbeafsnit mindst 3 prøvninger og i gennemsnit mindst 2 prøvninger pr. 50 m³ leveret beton.

3.2 Krav til udførelse

Kravene til udførelse er angivet i AAB afsnit 8.3 og i SBB afsnit 8.3. Efterfølgende gives uddrag af SBB teksten, som vurderes relevant at præsentere i denne rapport.

Afsnit 8.3.7 angiver ”Støbning af brodækket med tre forskellige betontyper skal ske vådt i vådt, dvs. uden støbeskel”.

Afsnit 8.3.8 angiver ” Den under prøvestøbningen fastlagte glittetid skal anvendes. Den under prøvestøbningen fastlagte afretnings- og struktureringsmetode skal anvendes”

Afsnit 8.3.9 angiver bl.a. ”Entreprenørens dokumentation for sikring af de krævede hærdebetingelser skal foreligge i form af beregninger af de forventede temperaturforhold. Der kræves ikke udført spændingsberegning.

Der skal i forbindelse med prøvestøbningen bestemmes hærdeegenskaber på betontype A1.

Dokumentation af temperaturforhold skal baseres på måling af temperaturer i mindst tre punkter i henholdsvis nystøbt og tidligere støbt betondel. Dog skal temperaturforhold i brodækket dokumenteres for hver af de tre betontyper ved måling i mindst 10 punkter per betontype fordelt over brodækkets tværsnit.

B. Foranstaltninger

På hele brodækket skal der umiddelbart efter færdiggørelse af betonoverfladen påsprøjtes ikke-voksbasebet betonforseglingsmiddel, som Ferma Emulcure 27 fra Castrol.

Plastfolie skal udlægges på betonoverfladen, så snart dette kan foretages uden at skade overfladestrukturen, eller ved regn.

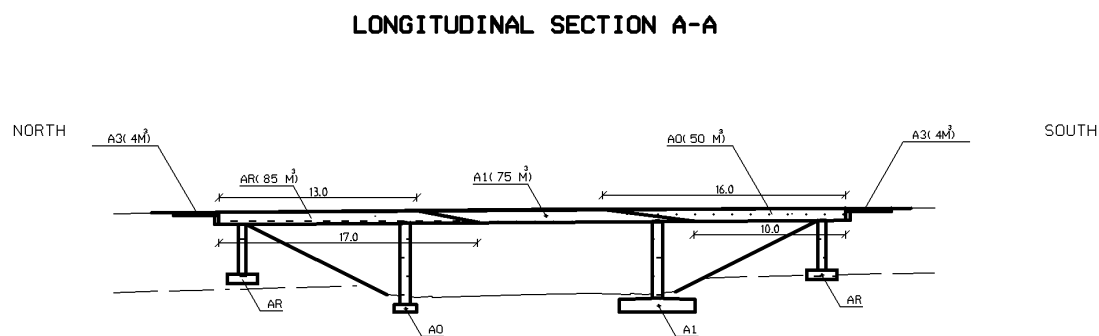
Plastfolien skal forblive på indtil alle tre betontyper har opnået 120 modenhedstimer.”

Afsnit 8.3.10 angiver ”Krav til brodækoverfladesns jævnhed og friktion fastlægges i samråd med tilsynet på baggrund af resultaterne fra prøvestøbningerne.”

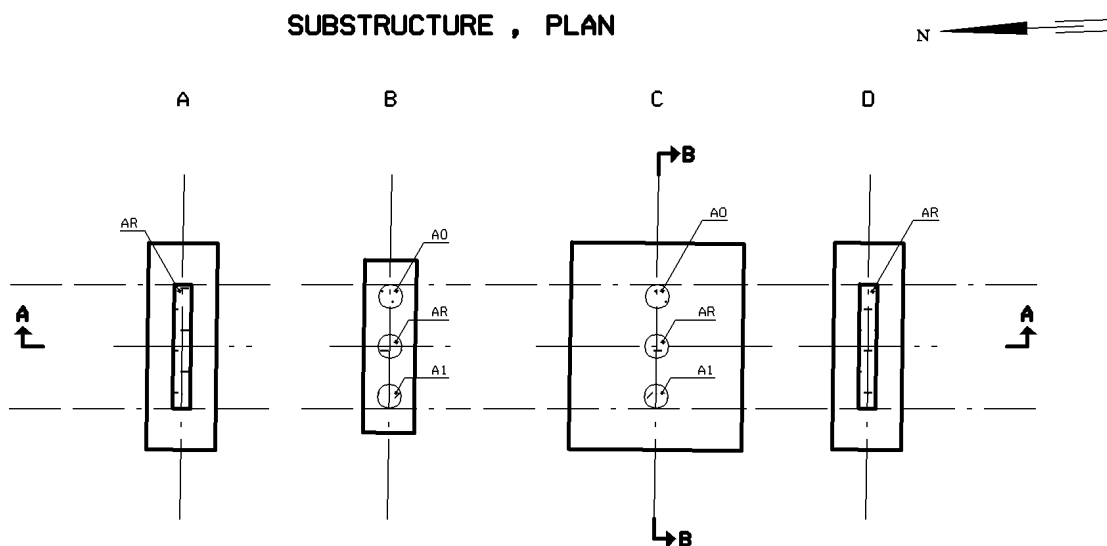
4. Gennemførelse af betonstøbninger

I dette afsnit er der udarbejdet en oversigt over de betonstøbninger, der er gennemført i forbindelse med Demobroen. Tabel 1 indeholder en oversigt over datoer for de enkelte støbninger.

Figur 2 viser et længdesnit af broen, hvorpå det er indtegnet, hvorledes de forskellige betontyper er fordelt i broen. Figur 3 viser fundamenter og søjler set oppefra, der ligeledes illustrerer, hvorledes de forskellige betontyper er fordelt på søjlerne.



Figur 2. Længdesnit af Demobro.



Figur 3. Plantegning af Demobro - fundamenter og søjler.

Tabel 1. Oversigt over betonstøbninger i forbindelse med Demobroen.

Dato	Støbning
19. november 2001	A1 beton støbt i Horsens kørt til Teknologisk Institut til måling af hærdeegenskaber
20. december 2001	Fundament C udstøbt med A1 beton – prøvestøbning
3. januar 2002	Fundament B udstøbt med A0 beton – prøvestøbning
4. januar 2002	Fundament A udstøbt med A-REF beton – delvis prøvestøbning
4. januar 2002	Søjle i linje C udstøbt med A1 beton
7. januar 2002	Søjle i linje C udstøbt med A-REF beton
8. januar 2002	Fundament D udstøbt med A-REF beton – delvis prøvestøbning
9. januar 2002	Søjle i linje C udstøbt med A0 beton
9. januar 2002	Søjle i linje A udstøbt med A-REF beton
11. januar 2002	Søjle i linje B udstøbt med A1 beton
14. januar 2002	Søjle i linje B udstøbt med A-REF beton
15. januar 2002	Søjle i linje D udstøbt med A-REF beton
16. januar 2002	Søjle i linje B udstøbt med A0 beton
6. februar 2002	Udstøbning af krybeemner med A1 beton. Luftindholdet i recepten er øget.
13. februar 2002	Støbning af prøvebelægninger af A1, A0 og A-REF beton til bestemmelse af afkostningsmetode.
5. marts 2002	Prøvestøbning af revideret A1 beton. Maksimalt vandindhold er sat til 140 liter, max v/c-tal er sat til 0,41, og flyveaskeindholdet reduceret til 35 %.
20. marts 2002	Brodækstøbning med beton A-REF, A1 og A0 beton.
28. juni 2002	Prøvestøbning med A3 beton ved Unicon i Horsens.
1. november 2002	Udstøbning af sætningsplader til broen med A3 beton.

4.1 Udfordringer med A1- betonen

Det fremgår af Tabel 1, at det første fundament, der blev støbt d. 20. december 2001 med A1 betonen (højt indhold af flyveaske), var fundamentet i linje C. Borekernerne fra dette fundament udsat for frostprøvning i henhold til SS 13 72 44 viste allerede ved 7 døgn (823 g/m^2), at kravet til afskalningen ikke kunne overholdes. Resultaterne fra frostprøvningen af de støbte cylindre viste ligeledes tendens til, at der ville blive problemer med at overholde kravet.

Resultaterne fra luftporeanalysen af borekernerne opfyldte heller ikke de stillede krav. Der blev foretaget følgende aktioner for at løse problemet med manglende frostbestandighed i A1 betonen:

- Der blev foretaget en luftporeanalyse på en cylinder fra d. 20. december 2001, der skulle have været anvendt til styrkemåling på fabrikken, for at se hvorledes luftporestrukturen så ud i de støbte cylindre. Resultatet fra denne analyse viste, at heller ikke de støbte prøveemner kunne overholde kravene til luftporestrukturen.
- Inden resultaterne fra prøvestøbningen afslørede manglende frostbestandighed var søjlerne i linje B og C blevet støbt med samme betontype. Der blev derfor gennemført en luftporeanalyse på betonen anvendt til søjlen i linje B, på en af de cylindre der skulle have været anvendt til styrkemåling. Denne prøve viste at resultaterne lå lige på grænsen til at opfylde kravet i DS 481.
- D. 6. februar 2002 var der planlagt udstøbning af prøveemner af A1 beton til krybeforsøg i forbindelse med udvidet pakke afprøvning. Recepten blev som følge af de konstaterede problemer med manglende luft og utilstrækkelig frostbestandighed justeret op i indhold af luftindblandingsmiddel, således at luftindholdet i den friske beton blev signifikant højere (9,6 %) end i de blandinger der blev brugt til fundament C.

Samtidig med udstøbning af krybeemner blev der udstøbt 2 cylindre til luftporeanalyser. Resultaterne herfra viste at luftporestrukturen var betydelig bedre, og at kravene nu kunne opfyldes.

I takt med at luftindholdet blev øget i betonen konstateredes et fald i styrken ved 7 døgn, men det blev vurderet at kravet til 28 døgnstyrken stadig ville kunne overholdes.

- Den. 13. februar 2002 blev der gennemført prøvestøbning af alle betontyper for at udstøbe prøvebelægninger, hvorpå der kunne gennemføres friktionmåling. A1 betonen anvendt til disse prøvebelægninger var den recept, der blev anvendt til udstøbning af krybeemner. Det viste sig, at styrken faldt yderligere, og det kunne allerede ved 7 døgn terminen konstateres, at kravet til 28 døgnstyrken ikke ville kunne overholdes.
- Det blev på telefonmøde mellem projektets involverede partnere besluttet at ændre recepten for A1 betonen med det formål dels at opretholde den gode luftporestruktur dels at øge styrken. Recepten blev tilrettet således at $v/c\text{-max} = 0,41$, maksimale effektive vandind-

hold = 140 liter, flyveaskeindhold = 135 kg (svarende til 35 % af den samlede pulvermængde. Den oprindelige A1 betonindeholdt 38 % flyveaske).

Derudover blev det besluttet at gennemføre endnu en prøveblanding d. 5. marts 2002 med udstøbning af cylindre til frost, luftporeanalyse, accelereret styrkemåling, almindelig styrkeudvikling samt udstøbning af prøvebelægning og måling af frisk betonegenskaber på fabrik og på plads før og efter pumpe. Udfaldet af denne prøvning skulle danne grundlag for at beslutte, hvorvidt A1 betonen skulle indgå i brodækstøbningen eller ej.

- Resultaterne fra prøveblandingen d. 5. marts 2002 viste, at styrken var øget og luftporestrukturen tilstrækkelig god, og der blev derfor taget beslutning om at anvende A1 betonen i form af den nye recept til brodækstøbningen som planlagt.
- På centerkontraktledelsesmøde d. 30. april 2002 blev det besluttet at udbore 2 Ø50 kerner fra søjlerne med A1 beton for at vurdere luftporestrukturen ud fra tyndslibsanalyser.

Resultaterne fra den ekstra prøvning, der blev gennemført for at justere A1 betonen på plads fremgår af afsnit 6.2.

4.2 Støbning af brodæk

Den mest krævende støbning i forbindelse med Demobroen var udstøbning af brodækket, dels pga. støbningens omfang, dels pga. at der skulle anvendes tre forskellige betontyper, dels fordi der var særlig skrappe krav til den færdige overflade, da den skal fremstå uisoleret.

Efterfølgende gives en kort redegørelse for hvorledes brodækstøbningen blev gennemført. Der henvises i øvrigt til Tilsynsnotat fra d. 20. marts 2002, se bilag 6.

Brodækstøbningen foregik d. 20. marts 2002. Der var frisk vind og tørvejr, og temperaturen var + 3,0 °C kl. 6.30.

Omfanget af støbningen var 210 m³ beton. Støbningen startede kl. 7.15 og var slut kl. 18.25. Profilerings/afkostningen var slut kl. 19.30.

Brodækket blev afrettet med bjælkevibrator og efterfølgende profileret med kost.

Støbning med A-REF

Der blev udstøbt 85 m³ placeret i den nordlige ende af brodækket. Top og bund af støbeskel var placeret ca. 13 m hhv. 17 m fra nordlige broende.

Brodækket blev afrettet med bjælkevibrator og efterfølgende profileret med maskinkost. Ved profileringen af betontype A-REF blev betonslam siddende i maskinkosten trods rengøring efter hvert strøg. Herved blev der dannet små slamkugler på betonoverfladen. Støbningen forløb planmæssigt.

Støbning med A1

Der var som beskrevet i afsnit 0 meget fokus på A1 betonen, idet denne beton tidligere i projektet viste svaghedstegn i forbindelse med frostbestandigheden. Der var derfor for A1 betonen krævet totalkontrol af frisk beton egenskaber på fabrikken. Der blev derfor målt luftindhold og sætmål på samtlige læs på fabrik. Der var stillet følgende krav til A1 betonen på fabrikken:

Min luftindhold:	9 %
Maks. luftindhold:	10,5 %
Sætmål:	Tilstræbt værdi: 120 mm
	Beton med sætmål i intervallet (110-150 mm) sendes af sted til plads.
	Beton med sætmål i intervallet (90 – 110 mm) efterdoseres op til 1,0 % af pulverbemængden og sendes herefter af sted til plads.
	Beton med sætmål udenfor intervallet (90-150 mm) kasseres.

Der blev stillet følgende krav til frisk betonegenskaber på pladsen:

Min luftindhold:	7,5 % før pumpe
Maks. luftindhold:	10,5 % efter pumpe
Sætmål:	100 mm ± 30 mm

Der blev udstøbt 75 m³ placeret i den midterste del af brodækket. Top og bund af støbeskel var placeret ca. 16 m hhv. 10 m fra sydlig broende.

Der var problemer med indkøring af recepten mht. sætmål og luftindhold, hvorfor støbningen blev forsinket ca. 2 timer ved skiftet fra betontype A-REF til type A1. For at holde støbefronten levende, blev der leveret et ekstra læs med betontype A-REF. Der blev således i alt leveret 85 m³ A-REF beton.

Første læs på pladsen havde sætmål på 60 mm mod de ønskede 100 mm. Det blev forsøgt at øge sætmålet ved at tilsætte 1,9 l superplast i betonkanonen på pladsen. Herved øgedes sætmålet dog kun til 70 mm, hvorfor læsset blev kasseret.

Selv med det ønskede sætmål for betontype A1 var denne beton langt mere besværlig at arbejde med. Betonen opførte sig mere plastisk (tyggegummiagtig) end A-REF og A0. Der opstod hurtigt en tør hinde på overfladen (skorpedannelse). For at kunne afrette og profilere betonoverfladen var det nødvendigt at påføre curing. Det var endvidere nødvendigt at skifte til en grov kost for at opnå samme profilering som på den foregående del med betontype A-REF.

Brodækket blev afrettet med bjælkevibrator og efterfølgende profileret med grov kost. Ved profileringen af betontype A1 blev betonslam siddende i den grove kost trods rengøring efter hvert strøg. Herved blev der dannet små slamkugler på betonoverfladen.

Støbning med betontype A0

Der blev udstøbt 50 m³ placeret frem til den sydligste ende af brodækket. Brodækket blev afrettet med bjælkevibrator og efterfølgende profileret med maskinkost. I modsætning til profileringen af betontype A-REF og A1 blev betonslammet ikke siddende i maskinkosten ved profilering af betontype A0, dvs. at der ikke blev dannet slamkugler. Støbningen forløb planmæssigt.

Efterbehandling generelt

Profilering/afkostning af betonoverflade blev efter aftale med entreprenøren ført helt ud til dybdelinierne.

Da der fra Danmarks Meteorologiske Institut, DMI, ikke var meldt om risiko for nattefrost blev brodækket ikke afdækket med plast, idet afdækning ville resultere i trykmærker i profileringen på betonoverfladen.

Brodækket og kantbjælker blev næste morgen afdækket med vintermætter og plast hhv. bobleplast.

4.3 Sætningsplader med A3 beton

Der var ikke i kontraktmaterialet stillet krav om gennemførelse af prøvestøbning på A3 betonen til sætningspladerne, idet betonen ikke indgår som en bærende del af konstruktionen og nemt vil kunne skiftes ud i tilfælde af nedbrydning. Dog bliver denne beton eksponeret for næsten samme miljø som brodækket, og Demobrogruppen vurderede derfor, at der skulle gennemføres en delvis prøvestøbning med A3 betonen forud for udstøbning af sætningspladerne.

Prøvestøbningen blev gennemført i forbindelse med udstøbning af beton til prøvning i Udvidet pakke på Unicons fabrik i Horsens. Der blev udstøbt en prøvebelægning, der blev vibreret med stavvibrator og efterfølgende afrevet og afkostet med maskinkost. Fra denne belægning blev der udboret kerner til holdbarhedsforsøg. Vibreringsmetoden afviger dermed fra den metode, der er anvendt til brodækket.

Resultaterne fra prøvestøbningen med A3 betonen er rapporteret i særskilt afsnit, se afsnit 6.4.

5. Recepter

Betonen til Demobroen er blandet hos Unicon i Horsens. Recepterne fremgår af Tabel 2, se endvidere betonblanketterne der fremgår af bilag 2.

Tabel 2. Recepter for betoner, der indgår i Demobroen.

Sammensætning	Materialenavn	A-REF kg/m ³ i VOT	A0 kg/m ³ i VOT	A1 kg/m ³ i VOT	A1 kg/m ³ i VOT	A3 kg/m ³ i VOT
Cement	Lavalkali CEM I Rapid CEM I	317	317	210	238	303
Flyveaske	Emineral B5	32	32	142	135	-
Slamaske	Avedøre					31
Mikrosilica	Mikrosilica 104	18	18	18	18	17
Vand	Postevand	153	153	125	133	98
Plastificering	Conplast 212	1,0	1,0	2,2	2,7	3,2
Luftiblanding	Conplast AEA 316 1:5	2,6	2,6	2,6	2,3	0,53
Super- plastificering	Structuro BA1			3,7	4,3	3,5
Sand	A0002 NCC Vestbirk	636	633	658	579	610
Sten	E0408 OPS Eikefet	232	232	232	232	226
Sten	E0816 OPS Eikefet	348	348	348	347	328
Sten	E1632 OPS Eikefet	580	580	580	581	563
v/c-forhold		0,42	0,42	0,41	0,41	0,39
Flyveaskeindhold i % af pulver		9	9	38	35	-
Slamaskeindhold i % af pulver						9
Proportioneret sætmål i mm		120	120	120	120	120
CO ₂ -besparelse i forhold til A-REF i %		-	26,5	51,3	44,8	-
Anvendt i konstruktionsdel		Funda- menter, søjler og brodæk	Funda- menter, søjler og brodæk	Funda- menter, søjler	Brodæk	Sætnings- plader

5.1 Pakningsanalyser

Der er foretaget en undersøgelse af pakningen af de tilslag der indgår i betonerne til broen.

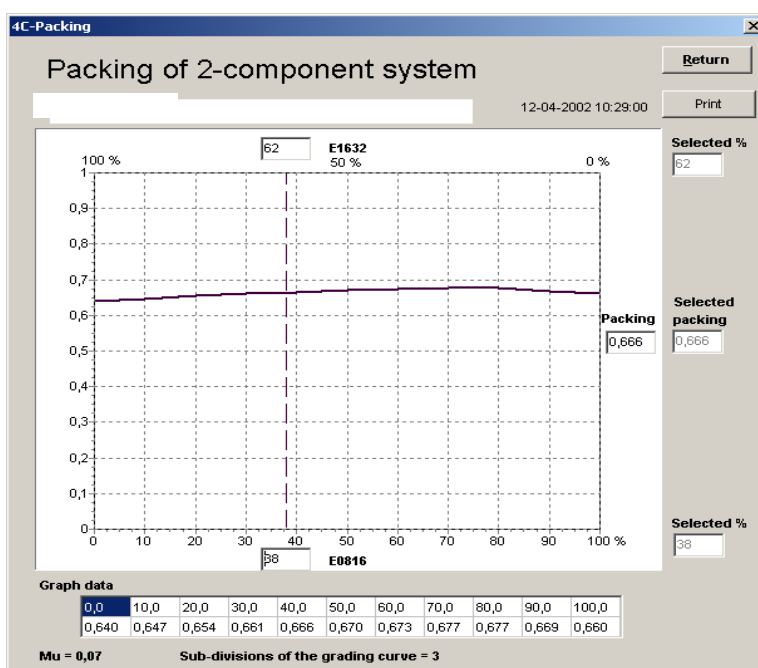
Der anvendes 4 forskellige fraktioner tilslag, som det fremgår af Tabel 2.

Egenpakningen, densiteten og kornkurverne for de anvendte tilslag, værdier der anvendes som input til pakningsberegningerne fremgår af Tabel 3.

Tabel 3. Inputværdier til pakningsberegninger.

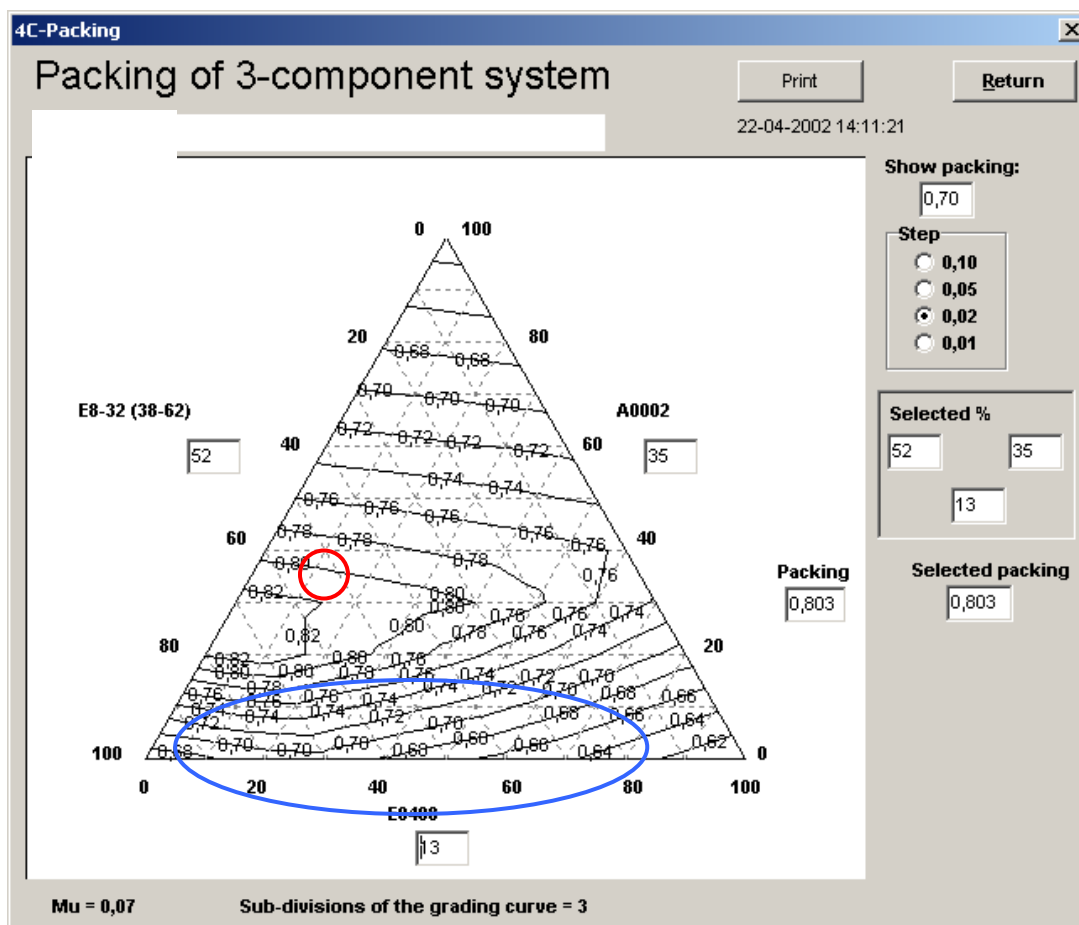
	A0002	E0408	E0816	E1632
Densitet i kg/m ³	2615	2732	2732	2726
Egenpakning	0,63	0,60	0,66	0,64
Kornkurve Gennemfald i %				
0,075	1	2	1	1
0,125	2	2	1	1
0,25	19	2	1	1
0,50	56	2	1	1
1	82	3	1	1
2	95	3	1	2
4	100	15	1	2
8	100	95	4	2
16	100	100	93	6
32	100	100	100	100

For at beregne pakningen af de aktuelle sammensætninger er pakningen af de 2 største fraktioner beregnet E0816 og E1632 og sammensat som et tilslag kaldet E08-32, se Figur 4. De to fraktioner er indbyrdes fordelt med 32 % E0816 og 68 % E1632.



Figur 4. Pakning af Eikefet E0816 og Eikefet E1632.

Derefter er der gennemført en pakningsberegning på materialerne A0002, E0408 og E0832. Pakningsdiagrammet fremgår af Figur 5.



Figur 5. Pakning af materialerne A0002, E0408 og E0832. Betonernes tilslagskombinationer befinder sig i den angivne cirkel (den røde). Den store cirkel (den blå) på figuren illustrer det følsomme område, der hvor niveaukurverne ligger tæt og dermed det område, hvor små variationer i tilslagssegenskaber kan betyde ændring i pakningsgrad.

Tabel 4 er pakningsgraden svarende til tilslagssammensætningen i de enkelte betoner, dog ikke for A3 betonen, sammenholdt med pasta volumen og pastaoverskud.

Tabel 4. Parametre fra pakningsanalyse.

	A-REF kg/m ³ i VOT	A0 kg/m ³ i VOT	A1 kg/m ³ i VOT	A1 kg/m ³ i VOT
Pakningsgrad [%]	80,3	80,3	80,0	81,0
Pastaindhold inkl. luft [liter]	332	333	323	353
Pastaoverskud [liter]	135	136	123	163

Det fremgår af Tabel 4, at de 2 forskellige A1 recepter afviger i pastaoverskud i forhold til referencebetonen A-REF. Den første A1 har et lavere pastaoverskud, hvilket kan forklare ved, at vandindholdet bliver væsentligt lavere pr. m³ beton, idet flyveasken indregnes med aktivitetetsfaktor på 0,5 i beregningen af v/c-tal, dvs. pastamængden bliver mindre. Pga. dette

lave vandindhold havde denne beton et meget stort behov for superplastificerende tilsætningsstof for at blive tilstrækkelig bearbejdelig, hvilket var en medvirkende årsag til at recepten skulle justeres. A1 betonen, der blev anvendt i brodækket, havde således et noget større pastaoverskud sammenlignet med referencebetonen. CtO publikationen "Pakningsberegninger som hjælpemiddel ved betonproportionering" /15/ angiver et omtrentligt pastaoverskud inkl. luft ved sætmål 120 mm og v/c-tal = 0,40 på ca. 128 liter, hvilket er lavere end det registrerede pastaoverskud i brobetonerne.

Alle 4 betoner ligger nogenlunde på samme niveau pakningsmæssigt. Det kan dog registreres, at den reducerede mængde sand i den justerede A1 beton forbedrer pakningen lidt.

I A3 er det eneste tiltag at flyveasken er erstattet af slammaske, dvs. pakningsmæssigt afviger denne beton ikke fra referencebetonen, hvorfor den ikke er medtaget i ovenstående beregninger.

6. Resultater

6.1 Forprøvning

Dokumentation fra forprøvningen fremgår af bilag 2.

6.2 Prøvestøbning, ekstra prøvning og produktionsprøvning

6.2.1 Frisk beton resultater

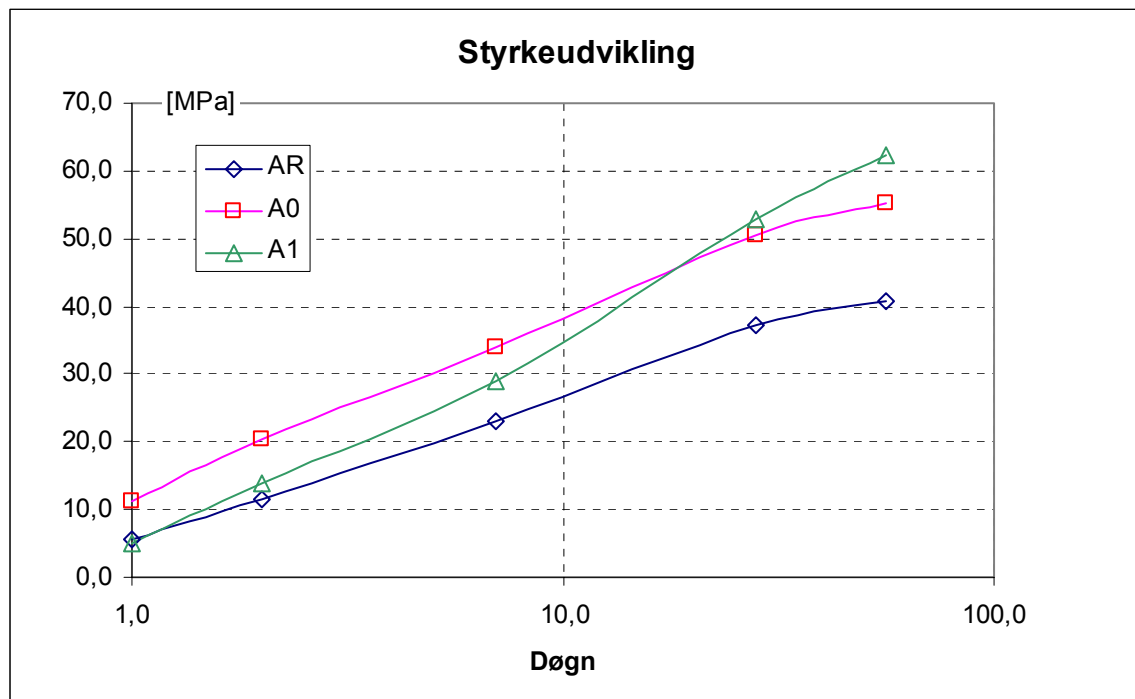
Der blev styret efter sætmål 100 ved nogle støbninger og sætmål 120 ved andre støbninger lidt afhængig af vejrforhold, efterbehandling, betontype osv. Resultaterne fra sætmålsmålingerne ligger inden for de tilladelige afvigelser (± 30 mm) og præsenteres derfor ikke i detaljer i denne rapport. Målingerne af sætmål fremgår af betonkontrolattesterne, se bilag 3.

Indholdet af luft i den friske beton blev styret forskelligt for de forskellige betontyper. A-REF og A0 havde et bør luftindhold på 5,5 %, hvorimod A1 betonen ved brodækstøbningen blev proportioneret med et bør luftindhold på 7,0 % for at opnå tilstrækkelige frostbestandighed. Der blev som nævnt stillet krav om totalkontrol af A1 betonen ved brodækstøbningen, og strenge krav til luftindholdet i den friske beton målt både på fabrik og på plads før og efter pumpe. I Afsnit 4.2 er kravene til luftindholdet i den friske beton for A1 betonen angivet.

6.2.2 Mekaniske egenskaber

Styrkeresultater

Der er krævet fastlæggelse af styrkeudviklingen for de tre betontyper som en del af forprøvningen. Styrkeudviklingen fremgår af Figur 6.

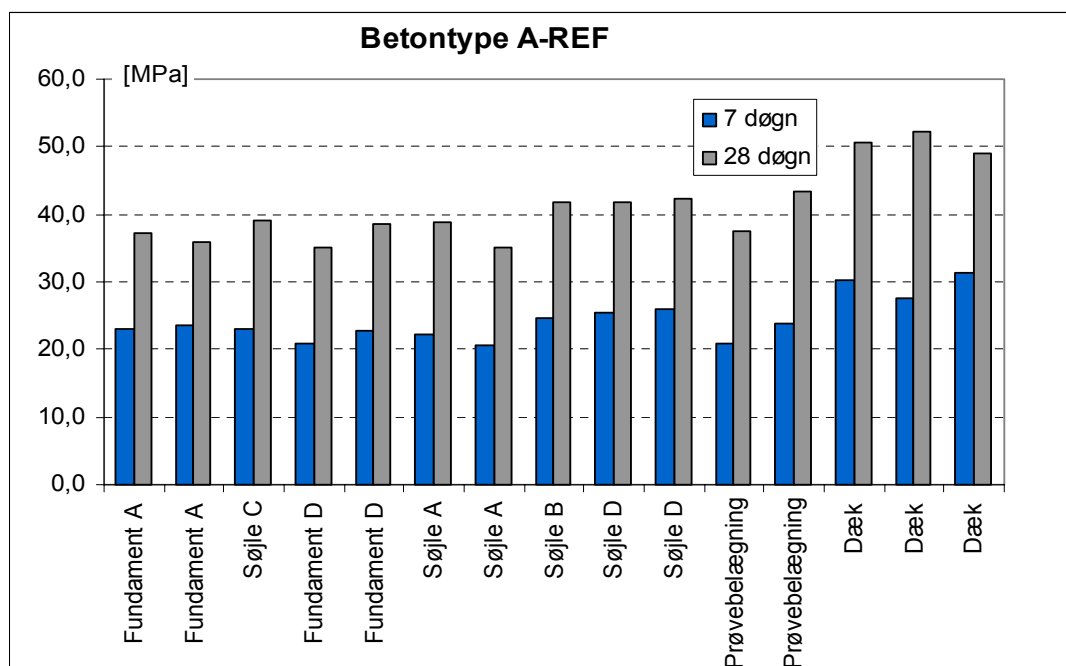


Figur 6. Styrkeudvikling for de tre betontyper anvendt til Demobroen.

Styrkeudviklingen viser et næsten parallelt forløb mellem AR og A0 med et ikke overraskende højere niveau ved anvendelse af Rapid cement i stedet for Lavalkali cement.

Den store mængde flyveaske i A1 giver i forhold til A0 et lavere styrkeniveau indtil 7-14 døgn, hvorefter flyveaskens effekt bliver markant og bidrager til en højere slutstyrke.

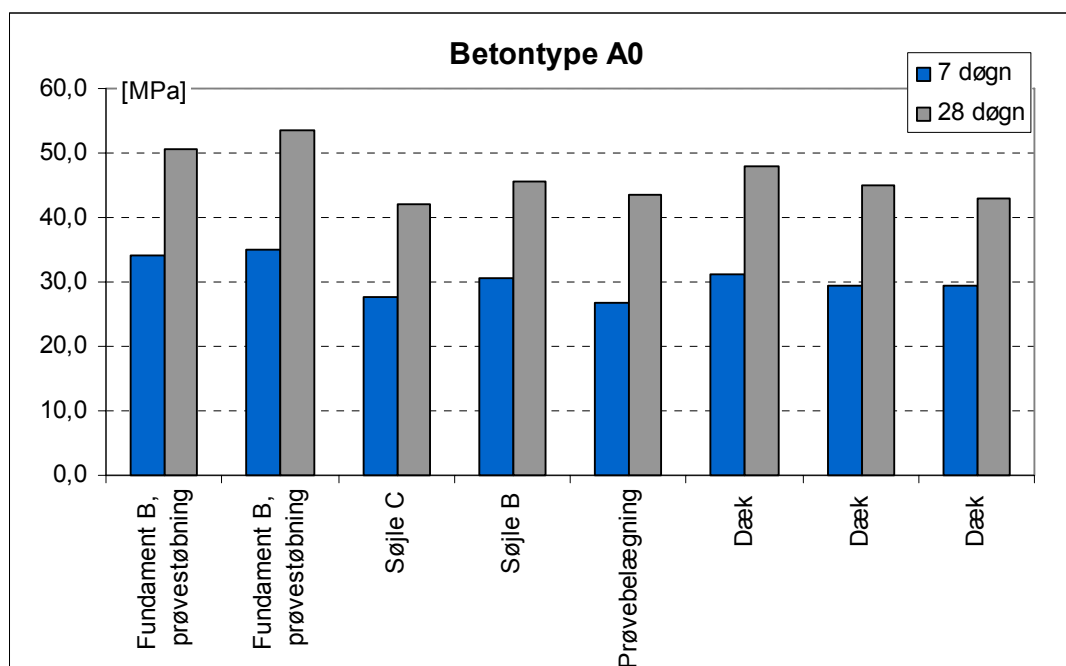
Der er målt styrke til henholdsvis 7 døgn og 28 døgn som en del af produktionsprøvningen for de tre betontyper. Disse målinger fremgår af Figur 7, Figur 8 og Figur 9.



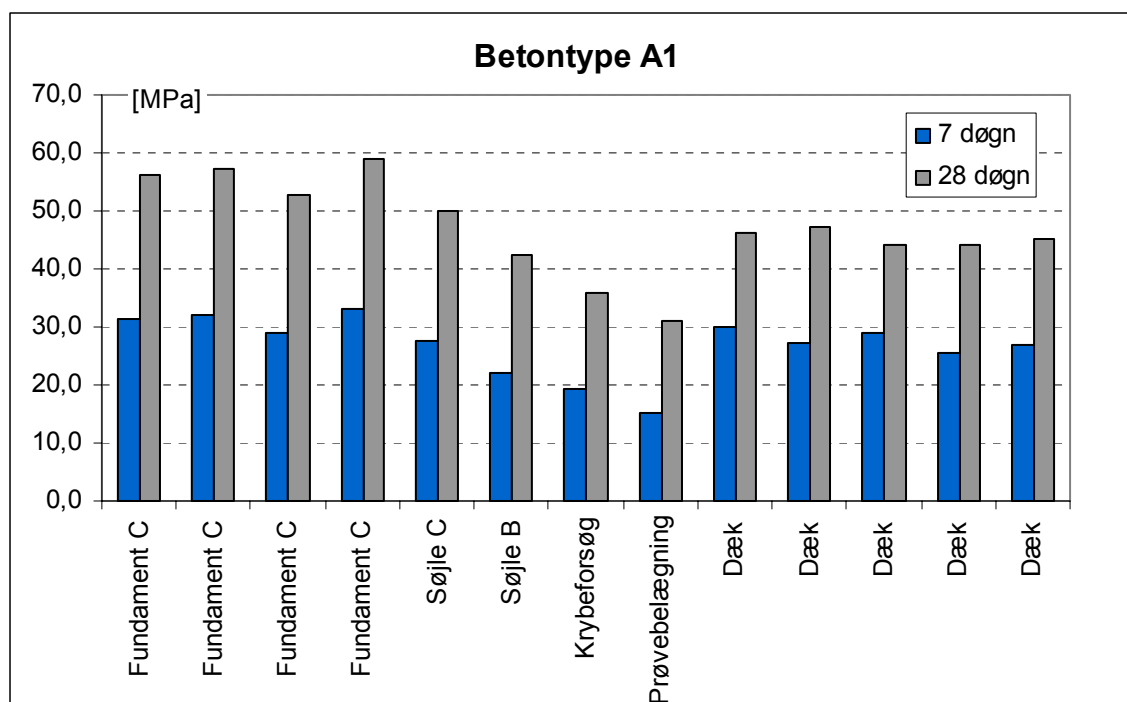
Figur 7. Styrkeresultater for betontype A-REF.

Betontype A-REF ligger rimelig konstant i trykstyrker ved alle støbninger, dog med en tendens til et lidt højere styrkeniveau ved brodækstøbningen.

Ligeledes er der heller ikke de store udsving i trykstyrker for A0 betonen ved støbning af de forskellige konstruktionsdele, dog med tendens til lidt højere styrkeniveau ved udstøbning af fundamenterne.



Figur 8. Styrkeresultater for betontype A0.

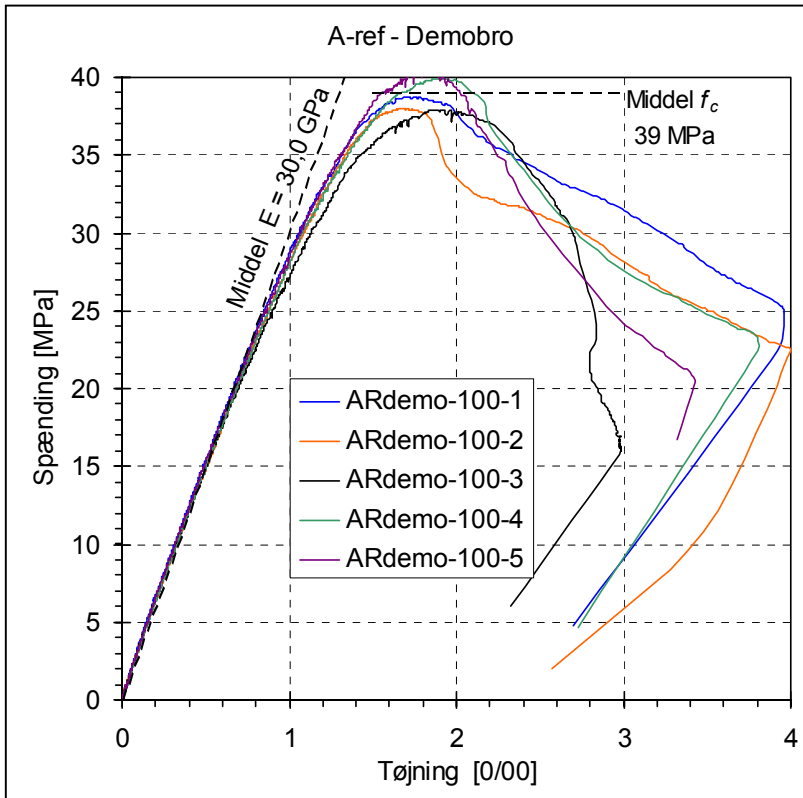


Figur 9. Styrkeresultater for betontype A1.

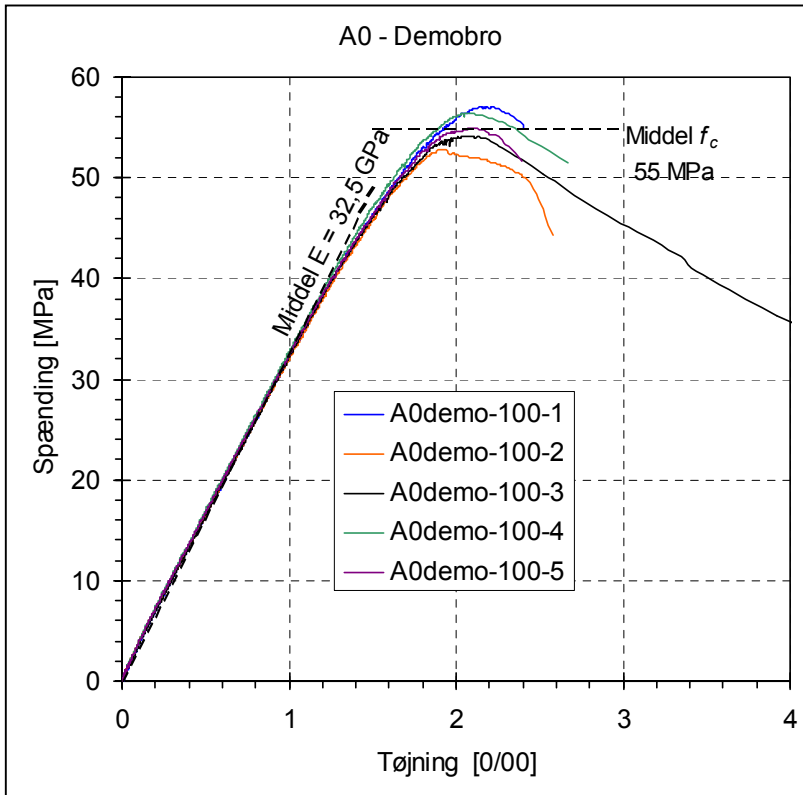
Der ses væsentlige variationer i trykstyrken for A1 betonen. Betonen anvendt til fundamentet ligger meget ensartet i trykstyrker, hvorefter styrkerne begynder at falde. Betonrecepten for A1 blev justeret ved krybeforsøget for at få mere luft i betonen, og igen inden brodækstøbning for at bringe styrkerne op i et tilstrækkeligt niveau. Det ses, at styrkerne er pænt ensartede ved brodækstøbningen.

Arbejdskurver

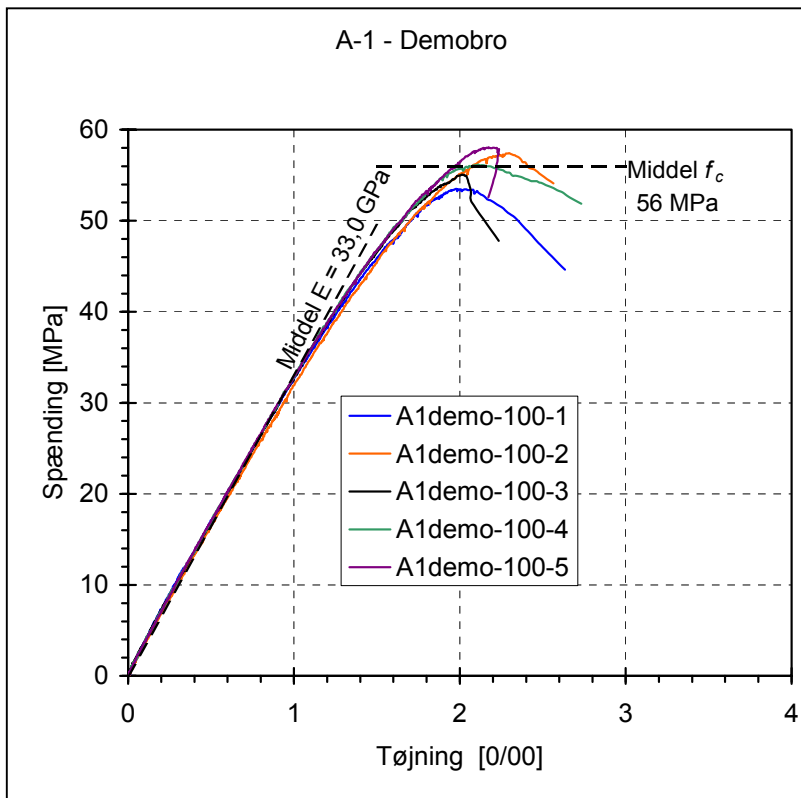
Der er gennemført arbejds kurvemålinger på betonerne til Demobroen som en del af prøve- støbningen. Formålet var at sandsynliggøre at de mekaniske egenskaber ikke adskiller sig fra de målinger, der blev gennemført i forbindelse med udvidet pakke. På Figur 10, Figur 11 og Figur 12 er målingerne på prøveemner fra Demobroen angivet. I Tabel 5 er værdierne for Middel f_c , Middel E samt den omtrentlige værdi for tøjningen svarende til toppunktet for kurverne angivet sammenholdt med tilsvarende værdier fra udvidet pakke. Der henvises i øvrigt til BK1 rapporten for udvidet pakke /6/, der redegør for disse egenskaber i detaljer.



Figur 10. Arbejdskurver for betontype A-REF.



Figur 11. Arbejdskurver for betontype A0.



Figur 12. Arbejdskurver for betontype A1.

Tabel 5. Nøgletal for arbejdskurvemålinger

	Middel f_c	Middel E	Tøjning
A-REF udvidet (30 dg)	38 MPa	28,9 GPa	ca. 2,0 0/00
A-REF demo(32 dg)	39 MPa	30,0 GPa	ca. 1,8 0/00
A1 udvidet	58 MPa	32,6 GPa	ca. 2,4 0/00
A1 demo	56 MPa	33,0 GPa	ca. 2,2 0/0

Der er ikke gennemført måling af arbejdskurver af A0 betonen i forbindelse med udvidet pakke.

Det fremgår af Tabel 5, at egenskaberne fra målingerne i forbindelse med Demobroen er sammenlignelige med målingerne gennemført i udvidet pakke.

6.2.3 Holdbarhed

Luftporeanalyser

Tabel 6 indeholder resultaterne fra de luftporeanalyser, der er gennemført i overensstemmelse med det, der var krævet samt ekstra prøvninger gennemført som led i at opnå en frostbestandig A1 beton. Tabellen indeholder ligeledes de resultater, der er fremkommet ved vurdering af luftporestrukturen ud fra tyndslib fremstillet på borekerner fra søjle B og C med A1 beton.

Værdierne i Tabel 6 er fremkommet som et gennemsnit af resultaterne, hvis prøvningen er gennemført på mere end et prøveemne fra samme beton.

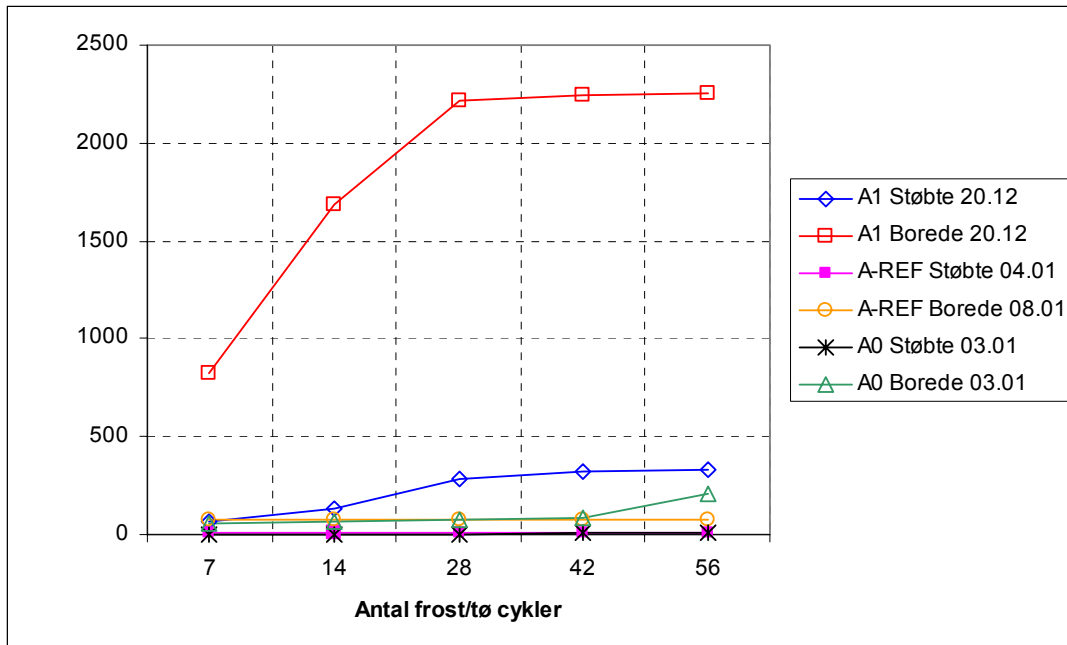
Det ses af tabellen, at resultaterne fra borekernerne udtaget fra søjlerne og vurderet i tyndslib har et lavt indhold af luft, og afstandsfaktoren er større end 0,20. Analyserne bekræfter det faktum, at der er et lavt luftindhold og en kritisk luftporestruktur med risiko for forringet frostbestandighed.

Tabel 6. Nøgletal for luftporeanalyser fra prøvestøbning samt fra ekstra prøvning af A1 betonen.

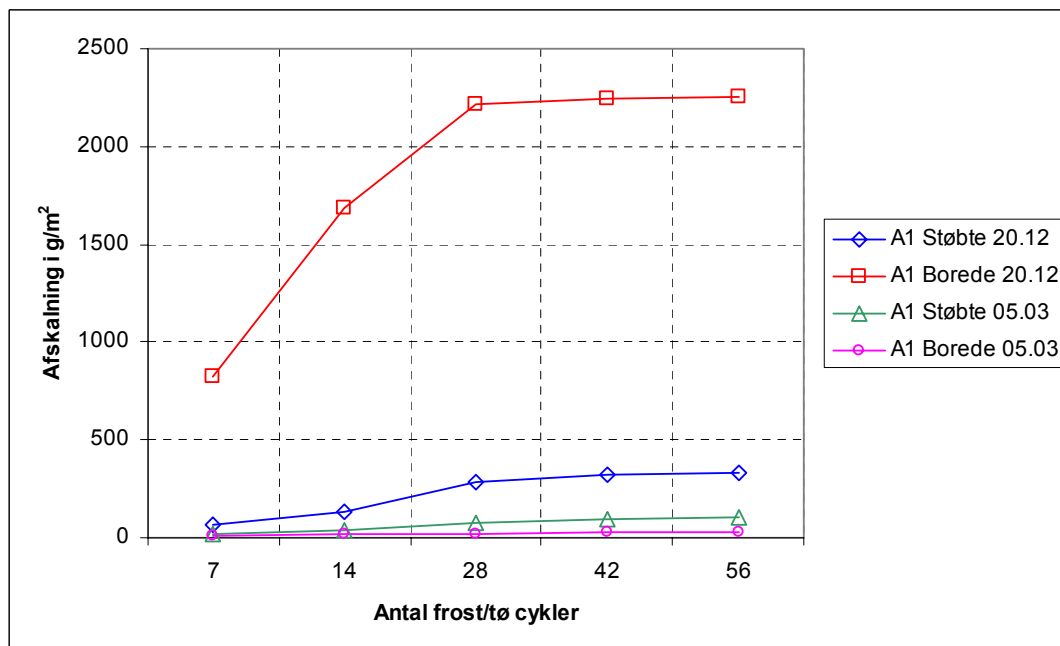
Prøveemne	Støbedato	Luftindhold i hærnet beton	Afstandsfaktor	Specifik Overflade	Mikroluftindhold (< 300 µm)	Overholdelse af krav i DS 481	Bemærkninger
		[vol-%]	[mm]	[mm ⁻¹]	[vol-%]		
A1 støbte cylindre (beton til hærderegenskaber før transport)	19.11.01	5,31	0,18	24	2,13	OK	Lav specifik o.fl.
A1 støbte cylindre (beton til hærderegenskaber efter transport)	19.11.01	3,06	0,41	14	0,61	Ej OK	
A1 borede kerner (prøvestøbning)	20.12.01	3,52	0,31	17	0,91	Ej OK	
A1 støbt cylindre (ekstra)	20.12.01	4,02	0,22	24	1,17	Ej OK	
A-REF borede kerner (prøvestøbning)	08.01.02	5,82	0,10	42	4,42	OK	
A0 borede kerner (prøvestøbning)	08.01.02	3,98	0,15	35	2,30	OK	
A1 støbte cylindre (søjle B)	11.01.02	5,14	0,19	24	2,44	OK	Lav specifik o.fl.
A1 støbte cylindre (krybeemner)	06.02.02	5,32	0,13	36	3,15	OK	
A1 støbte cylindre (prøvebelægning)	05.03.02	5,41	0,17	28	2,33	OK	
A1 borede kerner (prøvebelægning)	05.03.02	6,30	0,12	33	3,39	OK	
A1 støbte cylindre (brodæk)	20.03.02	5,77	0,13	34	3,64	OK	
A1 borede kerner (søjle B) tyndslib	11.01.02	1,25	0,21	44	-	Ej OK	tyndslib
A1 borede kerner (søjle C) tyndslib	04.01.02	1,81	0,23	34	-	Ej OK	tyndslib

Frostbestandighed

Afskalningen er optegnet på Figur 13 og Figur 14.



Figur 13. Afskalning af de tre betontyper A-REF, A0 og A1 målt i forbindelse med prøvestøbning.



Figur 14. Afskalningen af betontype A1 ved den normale prøvestøbning (20/12-01) og efter receptjustering (05/03-02).

Det ses af Figur 13, at A1 betonen har den ringeste frostbestandighed. Kravet til frostbestandighed på de borede kerner fra prøvestøbningen d. 20. december opfyldte langt fra kravet i DS 481, hvilket som beskrevet i afsnit 4.1 bevirkede, at der blev igangsat en række prøvninger og receptjusteringer med henblik på at forbedre frostbestandigheden af A1 betonen til brodækstøbningen. Det ses på Figur 14, at det lykkedes at producere en A1 beton (prøvestøbning fra d. 5. marts 2002), der er frostbestandig. Denne beton er anvendt til brodækket.

De øvrige betoner opfylder kravet til frostbestandighed, dog med undtagelse af A0, hvor de borede kerner ikke opfylder accelerationskravet, der siger, at forholdet mellem den afskallede mængde ved 56 døgn og 28 døgn skal være mindre end 2, hvis ikke kravet til den maksimalt tilladelige afskallede mængde kan overholdes. Den samlede afskallede mængde er ikke kritisk og ligger meget tæt på $0,2 \text{ kg/m}^3$, som er kravet for at få betegnelsen god. Det er målingen til 56 cykler på et enkelt emne, der "ødelægger" det samlede resultat.

Resultatet fra de støbte cylindre fra samme betontype fik betegnelsen meget god, den målte afskalning var mindre end 10 g/m^2 ved 56 cykler og faktoren var mindre end 2.

Der ses en tendens til, at de støbte cylindre har bedre modstandsevne overfor frost/tø påvirkning sammenlignet med de borede kerner. Dette skyldes sandsynligvis, at på de borede kerner er eksponeringen af saltvandet i frostprøvningen foretaget direkte på den kostede overflade, der sammenlignet med en skåret flade er mere porøs og derfor mere udsat for vandindtrængning i overfladen. Endvidere er der mere pasta i overfladen på en afkostet overflade sammenlignet med en skåret flade, hvor noget af fladen er tilslag. Sidst men ikke mindst er luftporestrukturen i en afkostet overflade formentlig ringere sammenlignet med en skåret flade.

Chloridmodstandsevne

Der findes ikke i de danske normer (DS 481) krav til betonens modstand mod chloridindtrængning, men CTH-metodens ophavsmand Tang Luping har angivet følgende vejledende værdier for chloriddiffusionskoefficienten målt 28 døgn efter støbning:

- $D < 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$: *meget god* modstand mod chloridindtrængning
- $D < 8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$: *god* modstand mod chloridindtrængning
- $D < 16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$: *moderat* modstand mod chloridindtrængning
- $D > 20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$: *ikke egnet* i aggressivt miljø

Tabel 7. Chloriddiffusionskoefficienter som gennemsnit af tre prøveemner

	A-REF	A0	A1
Diff. koefficient [m ² /s]	$6,9 \times 10^{-12}$	$6,0 \times 10^{-12}$	$5,6 \times 10^{-12}$

Det ses af Tabel 7, at alle betoner har god modstand overfor chloridindtrængning. De grønne betoner har en anelse bedre modstand end referencebetonen, og flyveaskebetonen viser den bedste modstandsevne overfor chlorid.

De grønne betoners bedre modstand overfor chloridindtrængning kan forklares dels ved at cementtypen NRC har et højere indhold af C₃A (6%) end Lavalkalicerment (4%), dels ved øget flyveaskeindhold, der ligesom C₃A ligeledes har en evne til at binde chloriderne.

Tyndslibs- og planslibsanalyser

Der er gennemført tyndslibs- og planslibsanalyser som en del af den krævede prøvning ved prøvestøbning. Resultaterne fremgår af Tabel 8.

Tabel 8. Sammenfatning af resultater fra tyndslibsanalyser

		A-REF	A0	A1	Krav
Indre stabilitet DS 423.41	[karakter]**	1	1	0	Maks 1
Pastahomogenitet DS 423.43	[karakter]	0	0	0	Maks 1
Pastarevner DS 423.44	[antal/mm ²]	0	0,1	<0,1	Maks 1
Vedhæftningsrevner DS 423.44	[antal/mm ²] *	0,1	0,2	<0,1	Maks 1
Komprimeringsgrad DS 423.45	[vol.%]**	1,0	0,6	1,6	
Dispergering af MS DS 423.36					
Karakteristisk øvre værdi 90% fraktil	[%]	8	8	5	Maks 15

*) Værdi svarer til målingen i tyndslib fra toppen af kernen

***) Bestemmes på planslib

Betonsammensætningen er vurderet i tyndslib i henhold til DS 423.42. Nedenfor angives de væsentligste bemærkninger fra disse analyser:

A-REF: Det ækvivalente v/c-tal er vurderet til 0,40 – 0,45. Der ses enkelte, små klumper a udispergeret mikrosilica.

A0: Det ækvivalente v/c-tal er vurderet til $0,40 \pm 0,03$. Der ses enkelte, små klumper a udispergeret mikrosilica.

A1: Det ækvivalente v/c-tal er vurderet til $0,40 \pm 0,03$. Der ses enkelte, små klumper a udispergeret mikrosilica.

De gennemførte tyndslibs- og planslibsanalyser viste tilfredsstillende resultater i overensstemmelse med kravene i AAB.

6.3 Udførelse

6.3.1 Overfladestruktur

Det var i SBB teksten krævet, at betonoverfladens friktion skulle bestemmes ved anvendelse af en pendulruhedsmåler. Målingen skulle gennemføres på hver af de afprøvede afretnings- og struktureringsmetoder.

Prøvningen skulle være gennemført på fundamentene, der blev anvendt til prøvestøbninger, men da prøvningen ikke kunne gennemføres ved temperaturer under 10 °C og det skulle foregå i februar måned, blev det besluttet i stedet at udstøbe belægninger til formålet, hvorfra der blev udsavet klodser for hver af de forskellige overfladestrukturer. Disse klodser blev sendt til Vejteknisk Institut, hvor prøvning kunne gennemføres under ideelle temperaturforhold. Det blev endvidere besluttet at udføre sandpletmåling til vurdering af overfladens dræningsevne.

Prøverne var mærket som følger:

A1/1	Maskinkost (værkstedskost)
A1/2	Disavakost (liggende på ryggen)
A1/3	Disavakost (alm. stående)
A0	Maskinkost (værkstedskost)
AR	Maskinkost (værkstedskost)

Vejteknisk Institut gennemførte sandpletmåling i henhold til SV 90.1-97 og pendulruhedsmåling iht. SV A16-68. Resultaterne fremgår af Tabel 9.

Tabel 9. Resultater fra sandpletmåling og pendulruhedsmåling.

	Teksturdybde (sandpletmåling) [mm]	Friktionsindex, Langs kostespor	Friktionsindex På tværs af kostespor
A1/1	0,9	85	90
A1/2	1,4	83	102
A1/3	1,7	78	102
A0	1,1	77	83
AR	0,8	83	98

Teksturdybden er et udtryk for overfladens dræningsevne. For nye overflader på betonveje tilstræbes normalt værdier på 0,8-1,0 mm. Det ses, at de overflader hvor der er anvendt maskinkost ligger tættest på dette interval.

Der tilstræbes normalt et friktionsindex større end 65 som vurderingskriterium for gode bremseegenskaber. Det ses, at alle målinger overholder dette krav.

Konklusionen på denne prøvning var, at der skulle anvendes maskinkost til afkostning af brodækket.

6.3.2 Foranstaltninger

Der blev forud for udstøbning af fundamentet i linje C (udstøbt med A1 beton) gennemført en temperatursimulering for fundamentet. Simuleringen er vedlagt i bilag 8.

Endvidere er der bestemt tidlige egenskaber på betontype A1, se ref /12/. Disse egenskaber er anvendt til hærdeberegninger af brodækket. Disse undersøgelser er rapporteret i /3/.

6.4 Resultater fra slamaskebeton

6.4.1 Frisk beton resultater

Der blev styret efter et sætmål på 120 mm og et luftindhold på 6 %. Ved prøvestøbningen blev luftindholdet i den friske beton målt til 10,5 % umiddelbart efter blanding, hvilket er for

højt i forhold til kravene i DS 481. Det blev dog besluttet at gennemføre prøvestøbningen med denne blanding. Under forudsætning af at styrken på trods af det høje luftindhold er tilstrækkelig, er det høje luftindhold med til at sikre en tilstrækkelig frostbestandighed.

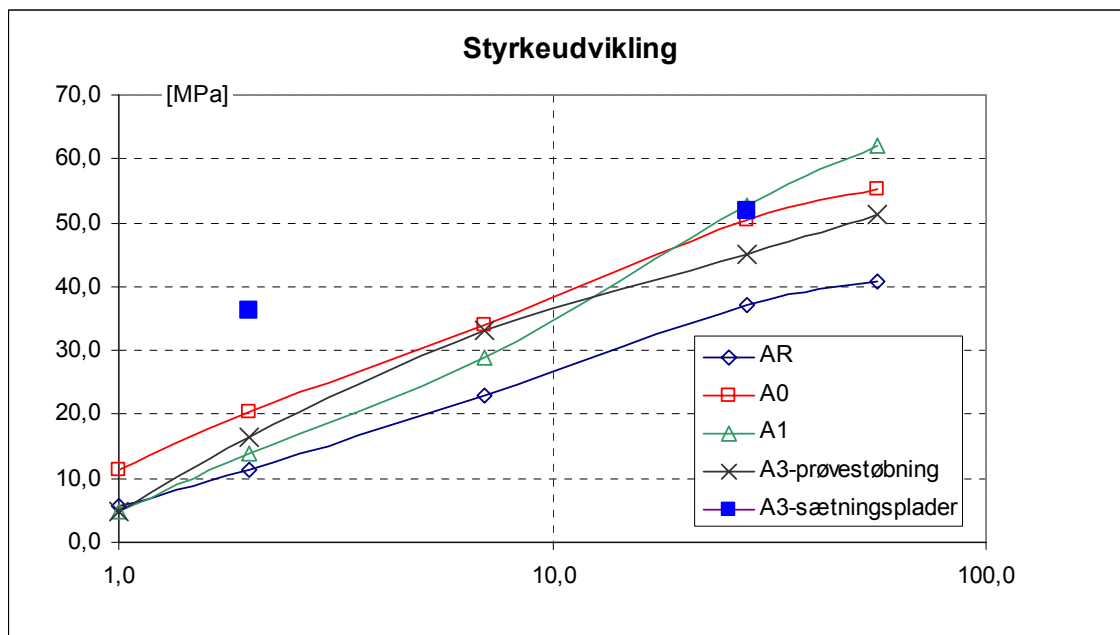
Der blev leveret 2 gange 5 m³ beton til sætningspladerne, der blev støbt d. 1. november 2002. Sætmålet på fabrikken blev målt til henholdsvis 110 og 120 mm og luftindholdet til 6 og 8 % på de to vognlæs.

6.4.2 Mekaniske egenskaber

Styrkeresultater

Der er målt styrkeudvikling i forbindelse med prøvestøbningen. Resultaterne for slamaskebetonen er indtegnet sammen med styrkeudviklingen for de øvrige betontyper anvendt i broen, se Figur 15. Endvidere er styrkeresultaterne bestemt som produktionsprøvning ligeledes indtegnet på figuren

Det ses, at A3 betonen ved forprøvningen har højere styrker end A-REF, på trods af det høje luftindhold i den friske beton. Derudover er der målt meget høje tidlige styrker for A3 betonen ved produktionsprøvningen, mens resultatet til 28 døgn ender på samme niveau som målt ved forprøvningen.

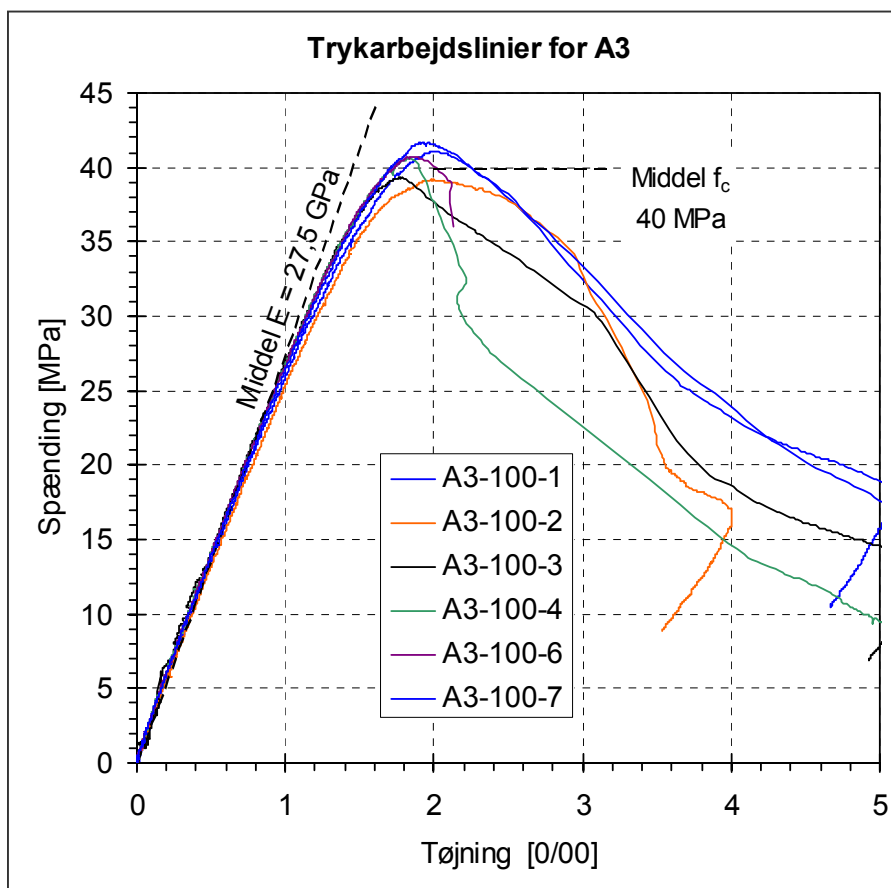


Figur 15. Styrkeudvikling

Arbejdskurver

Sætningspladerne er som nævnt ikke en bærende konstruktionsdel, hvorfor omfanget af mekanisk prøvning i forbindelse med prøvestøbningen er begrænset til styrkeudvikling og måling af arbejdskurver. Resultaterne fra arbejds kurvemålingen fremgår af Figur 16. Som det fremgår af figuren er middel E-modulet målt til 27,5 GPa (A-REF blev målt til 30 GPa). Mid-

deltrykstyrken ved brud blev målt til 40 MPa (A-REF blev målt til 37 MPa), og tøjningen ved brud blev målt til ca. 1,9-2,0 0/00 (A-REF blev målt til 1,8 0/00). Resultaterne fra arbejdskurvemålingerne er sammenlignelige med referencebetonen og der er dermed ikke noget der tyder på, at beton med slamaske opfører sig anderledes mht. mekaniske egenskaber.



Figur 16. Arbejdskurver for A3

6.4.3 Holdbarhed

Luftporeanalyser

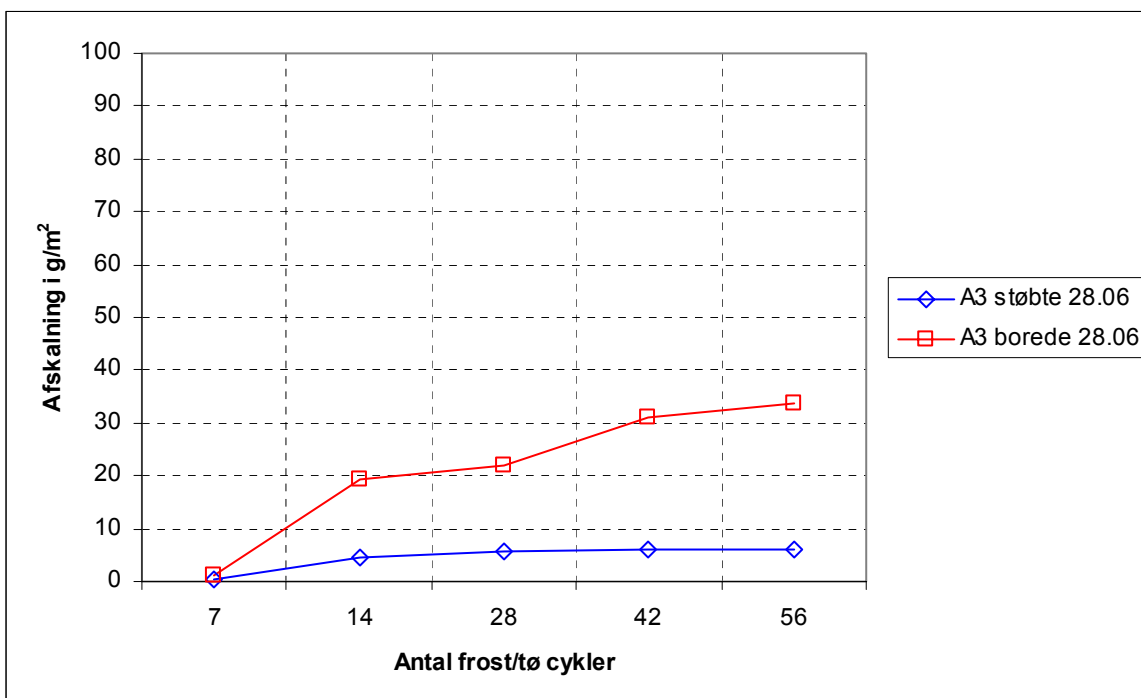
Der er gennemført luftporeanalyse på 3 stk. udborede kerner. Gennemsnittet af de tre målinger er angivet i Tabel 10. Det ses, at det totale luftindhold er reduceret noget i forhold til det, der blev målt i den friske beton (10,5 %). Luftporestrukturen er meget fin og opfylder kravene i DS 481.

Tabel 10. Nøgletal for luftporeanalyser for A3

Prøveemne	Støbe- dato	Luftind- hold i hærdnet beton	Afstands faktor	Specifik Overflade	Mikroluft- indhold (< 300 µm)	Overhol- delse af krav i DS 481
		[vol-%]	[mm]	[mm ⁻¹]	[vol-%]	
A3 udborede kerner	28.06.02	7,0	0,12	28	3,71	Ok

Frostbestandighed

Den målte afskalning er optegnet på Figur 17. Der er målt både på borede kerner og på støbte cylindre. Borekernerne er eksponeret direkte på den kostede overflade, hvilket er begrundelsen for at afskalningen er lidt større på borekerner sammenlignet med afskalningen målt på de støbte cylindre. Ellers er den målte afskalning meget lav og frostbestandigheden kan i henhold til metoden betegnes som meget god.



Figur 17. Afskalningen af betontype A3

Chloridmodstandsevne

Diffusionskoefficienten blev målt til $3,6 \times 10^{-12}$, hvilket er væsentligt lavere end hvad der blev målt på de øvrige betoner til broen. Dvs. slamasken har ligeledes en god modstand overfor chloridindtægning.

Tyndslibs- og planslibsanalyser

Resultaterne fra analyser af tyndslib og imprægneret planslib fremgår af Tabel 11.

Tabel 11. Sammenfatning af resultater fra strukturanalyser for A3

		A3 top	A3 midt	Krav
Indre stabilitet DS 423.41	[karakter]*	0		Maks 1
Pastahomogenitet DS 423.43	[karakter]	1	1	Maks 1
Pastarevner DS 423.44	[antal/mm ²]	0,3	0,5	Maks 1
Vedhæftningsrevner DS 423.44	[antal/mm ²]	0,2	0,3	Maks 1
Komprimeringsgrad DS 423.45	[vol.%]*	1,2		
Dispergering af MS DS 423.36				
Karakteristisk øvre værdi 90% fraktil	[%]		8	Maks 15

*) Bestemmes på planslib

Betonsammensætningen er vurderet i tyndslib i henhold til DS 423.42. Nedenfor angives de væsentligste bemærkninger fra disse analyser:

A3: Det ækvivalente v/c-tal er vurderet til 0,40 – 0,45. Der ses enkelte, små klumper af udispergeret mikrosilica.

De gennemførte tyndslibs- og planslibsanalyser viste tilfredsstillende resultater i overensstemmelse med kravene i AAB.

6.4.4 Udførelse

Der var ikke noget specielt at bemærke i forbindelse med udstøbningen af sætningspladerne.

6.5 Miljøscreening

Der er gennemført en miljøscreening på Demobroen for at få en indikation af, hvor miljøvenlig den aktuelle bro er dels i forhold til en referencebro opført i normal aggressiv beton svarende til betontype A-REF, dels i forhold til de miljømål der er opstillet for projektet. En mere detaljeret beskrivelse af de gennemførte miljøberegninger fremgår af /11/.

Beregningerne viste, at Demobroen beregnet til en samlet levetid på 74 år har en reduceret CO₂-emission på ca. 25 % sammenlignet med den samme bro opført på traditionel vis.

Med hensyn til projektets øvrige miljømål, er der en væsentlig reduktion i støv og støjgener, idet materialeforbruget er mindre for Demobroen. Der er ikke anvendt membraner og asfaltbelægning.

Der er inddraget et nyt restprodukt, slamasken, der ikke tidligere har været anvendt til betonproduktion.

6.6 Impact Echo måling af brodæk

Som følge af budgetomlægninger i projektet blev der midler til at foretage en undersøgelse af udstøbningskvaliteten ved hjælp af en relativ ny og ikke destruktiv måleteknik kaldet Impact Echo måling. Resultaterne er rapporteret i /11/.

Konklusionen fra målingerne er, at de felter af brodækket der er opmålt, generelt er uden væsentlige støbefejl. Der er dog konstateret tegn på mindre defekter i enkelte områder. Rapporten giver et forslag til, hvor det vil være interessant at udbore kerner til kvalitetskontrol som et led i D&V planen for broen .

7. Vurdering

Arbejdet med Demobroen blev fremlagt på Grøn Beton seminar i Vejle d. 24. maj 2002. På dette seminar blev de involverede parter bedt om at give deres vurdering af arbejdet med den grønne teknologi anvendt til Demobroen.

7.1 Betonproducentens vurdering

Unicon fremlagde deres synspunkter på seminaret, der kortfattet kan opsummeres til følgende:

Blanding og levering af betontyperne A-REF og A0 gav ikke anledning til problemer.

Blanding og levering af A1 betonen var forbundet med nogle problemer. For det første var der som udgangspunkt krævet totalkontrol på fabrik og på plads, hvilket stiller større krav til bemanding, og der går længere tid fra blandetidspunkt til at betonen leveres på pladsen.

For det andet var der problemer med at justere frisk betonegenskaberne på plads i forhold til de tilstræbte værdier, men da først recepten var justeret ind var den efterfølgende produktion meget ensartet.

Beton med så højt indhold af flyveaske er meget følsom overfor variationer i flyveaskens glødetab, der derved er årsag til at betonens egenskaber varierer fra dag til dag.

7.2 Tilsynets vurdering

På seminaret d. 24. maj 2002 var der ekskursion til Demobroen, hvor tilsynet viste rundt på den næsten færdige bro. Tilsynet havde ligeledes bemærkninger til betontype A1, hvor det fremgår af det færdige brodæk, at det var vanskeligt at afkoste overfladen og det er da også tydeligt at overfladen ikke har samme kvalitet som overfladen med betontype A-REF og A0.

7.3 Entreprenørens vurdering

MT Højgaard fremlagde deres synspunkter på seminaret og var enige med producenten om, at det var betontype A1, der voldte de største problemer. Der var et 2 timer langt ophold i brodækstøbningen ved overgangen fra A-REF betonen til A1 betonen. Dette gav problemer med at holde støbeskellet levende, og det var begrundelsen for, at der blev leveret et ekstra læs af referencebetonen.

Endvidere var det vanskeligt at afrette og afkoste betontype A1. Betonen dannede meget hurtigt skorpe i overfladen og det var nødvendigt at påføre curing for at kunne afkoste overfladen, selvom dette ikke er tilladt.

Det skal nævnes, at vejrforholdene ikke var ideelle, idet der blæste en kraftig vind samtidig med lave temperaturer.

8. Konklusion

8.1 Demobroen de næste 10 år

Vejdirektoratet har besluttet sig for, at følge Demobroen de næste 10 år ved gennemførelse af et opfølgingsprogram. Formålet er:

- at følge broens generelle tilstand og
- at medvirke til at generere erfaringsdata for den grønne bro.

Det planlagte forsøgsprogram fremgår af Tabel 12.

Tabel 12. Forsøgsprogram for Demobroen frem til 2012.

	2002	2003	2004	2007	2012
Visuel inspektion	Gennemføres hvert år i forbindelse med generaleftersyn				
Trykstyrke in-situ		AR, A0, A1, A3	AR, A0, A1, A3	AR, A0, A1, A3	AR, A0, A1, A3
Trykstyrke laboratorieforsøg		A1	A1	A1	A1
Chloridprofiler				AR, A0, A1, A3	AR, A0, A1, A3
Chloridindtrængning		AR, A0, A1, A3		AR, A0, A1, A3	
Tyndslibsanalyser		AR, A0, A1, A3	AR, A0, A1, A3	AR, A0, A1, A3	AR, A0, A1, A3
Revne/fejl detektering ved "Impact Echo" måling	AR, A0, A1				

Styrkeudvikling in-situ bestemmes på udborede kerner (3 stk. pr. termin pr. betontype), der bores fra brodækkets overside.

Styrkeudvikling i laboratoriet på betontype A1 gennemføres på cylindre udstøbt i forbindelse med brodækstøbning d. 20. marst 2002. Cylindrene vandlagres ved 20 °C indtil prøvning.

Der bestemmes chloridprofiler efter 5 og 10 års eksponering på udborede kerner, og derudover bestemmes chloridindtrængningsdybden/diffusionskoefficienten på støbte cylindre ved hjælp af CTH metoden.

Udborede kerner anvendes endvidere til bestemmelse af karbonatisering og til vurdering af betonens mikrostruktur ud fra tyndslibsanalyser til forskellige terminer.

Endelig er der som refereret i afsnit 6.6 gennemført en opmåling af brodækket, hvor revner, støbefejl, støbeskel, osv. er forsøgt kortlagt ved hjælp af ”Impact Echo” målinger. Målingerne skal bl.a. danne baggrund for, hvorfra der skal udbores kerner til kvalitetskontrol i fremtiden.

9. Referencer

- [1] ”Almindelig Arbejdsbeskrivelse (AAB)”; Udbuds- og anlægfsforskrifter; Betonbroer; Vejregler; April 2001.
- [2] ”Ris Ølholm E6770.10 OF af Tørringvej”; Særlige Betingelser og Beskrivelser; Vejdirektoratet, Anlægsområdet; 5. Oktober 2001.
- [3] ”DS 481 – Beton Materialer”; 1. udgave; Dansk Standard; 1999-07-16.
- [4] ”DS 482 – Beton Udførelse”; 1. udgave; Dansk Standard;
- [5] ”Pakningsberegninger som hjælpemiddel ved betonproportionering”; CtO publikation; 1999
- [6a] ”Arbejdskurver, spaltetrækstyrke og udmattelsesundersøgelse”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [6b] ”Bøjning af armerede bjælker. Instabilitet af søjler”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [6c] ”Forskydningsbæreevne af bjælker. Forankring af gevindstænger”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [6d] ”Fugttransport, svind- og temperaturdeformationer samt krybning”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [7a] ”Mekaniske egenskaber under brand”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [7b] ”Ekspllosiv afskalning af beton – nyudviklet prøvningsmetode”, Center for Grøn Beton, DTU, Februar 2003.
- [8] ”Udførelse. Hovedrapport”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [9] ”Holdbarhed. Hovedrapport”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [10] ”Miljøscreening af Demobro”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [11] Grøn betonbro – Tørring, Impact-Echo måling; A.Haumann & L.B. Leth; Teknologisk Institut; 3. oktober 2002.

- [12] ”Betonegenskaber i tidlig alder for beton med højt flyveaskeindhold”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Maj 2002.
- [13] ”Udførelse. Hærdesimuleringer for Demobro”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.

Bilag

Bilag 1 – 8 kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.