



TEKNOLOGISK
INSTITUT

SCC Demobro

SCC-Konsortiet, Delprojekt D21

Udført for:

Innovationskonsortiet for Selvkompakterende Beton



Udført af:

Teknologisk Institut, Betoncentret

Taastrup, marts 2007



Byggeri

Titel: SCC Demobro

Forfattere: Claus V. Nielsen, Lars Nyholm Thrane, Claus Pade

Fotos er venligst
stillet til rådighed
af følgende: Tommy Bæk Hansen, Aalborg Portland A/S
Aage Poulsen, MT Højgaard A/S
Jørgen Schou, Unicon A/S
Eigil V. Sørensen, Aalborg Universitet
Gimsing & Madsen A/S

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

Indhold

1. Indledning.....	5
1.1 Generelt om broen.....	6
1.2 Specifikationer for SCC Demobro.....	10
2. Udvikling af SCC recept	15
2.1 SCC recepter	16
2.2 Bearbejdelighedsproblemer med SCC baseret på Lavalkali cement	18
2.3 SCC recept baseret på Rapid cement	21
2.3.1 Vægprøvestøbning 08-08-2006.....	21
2.3.2 Brodæksprøvestøbning 28-09-2006.....	25
3. Udførelse af brostøbning	33
3.1 Støbning af endefundamenter 29-06-2006.....	33
3.2 Støbning af endesøjler 14-08-2006	36
3.3 Støbning af brodæk 17-10-2006	36
3.3.1 Betonens friske egenskaber.....	38
3.3.2 Betonens flydeegenskaber.....	42
3.3.3 Udførelsesmæssige aspekter	44
3.3.4 Efter afforskalling	48
4. Hærdesimuleringer	51
5. Litteratur	55

Bilag

A. Forprøvninger og indledende prøvestøbninger med Lavalkali cement	14 sider
B. Prøvestøbninger med Rapid cement.....	54 sider
C. Betondokumentation fra støbning af endefundamenter 29-06-2006.....	20 sider
D. Betondokumentation fra støbning af brodæk 17-10-2006.....	16 sider
E. Registreringer af temperaturer i brodæk, MT Højgaard A/S, 24-10-2006	10 sider
F. Hærdeberegninger udført af Unicon A/S, 11-10-2006.....	15 sider



1. Indledning

SCC-konsortiet er et innovationskonsortium støttet af Ministeriet for Videnskab, Teknologi og Uddannelse over en tre-årig periode startende ultimo 2003.

Konsortiet ledes af Teknologisk Institut, Betoncentret med deltagerne fra den danske betonbranche og både danske og udenlandske forskningsinstitutioner. Mere information om konsortiets sammensætning findes på www.SCC-konsortiet.dk.

Selvkomprimerende beton forkortes SCC efter dets engelske betegnelse (Self Compacting Concrete). Andre betegnelser for denne type materiale er flydebeton og vibreringsfri beton. Som navnet antyder dækker det over et betonmateriale med særlige flydeegenskaber som gør, at betonen kan placeres i formen uden brug af mekanisk påvirkning (vibrering). SCC flyder ud og omslutter armeringen ved egen kraft og alene ved den bevægelsesenergi, som tilføres når betonen placeres via pumpe eller spand. Der vil dog være behov for en let manuel påvirkning og afretning.

Innovationskonsortiet arbejder med en række delopgaver indenfor områderne:

- P1 – Materialemodellering omkring mix design, delmaterialernes indflydelse og materialeegenskaber, herunder specielt flydeegenskaberne.
- P2 – Fremtidens betonfabrik omhandler produktionstekniske aspekter ved SCC.
- P3 – Udførelse omhandler den udførendes teknikker såsom efterbehandling og curing.
- D1 – Produktivitet og arbejdsmiljø indeholder en kvantificering af SCC's betydning for byggeriets effektivitet og arbejdsmiljø.
- D2 – Formidling og implementering indeholder rapportering, SCC portal på internettet, demonstrationsprojekter, etc. for at sikre at resultaterne kommer ud til slutbrugerne.

Delopgaverne P1-P3 omfatter udviklingsprojekter, hvor en given teknisk opgave belyses og løses i det omfang det er muligt. Delopgaverne D1 og D2 er discipliner, som ligger på tværs af udviklingsprojekterne.

Vejdirektoratet deltager i SCC-Konsortiet med det formål at demonstrere de udviklede SCC teknikker i stor skala på en vejbro. Nærværende rapport be-

skriver de erfaringer som er gjort i forbindelse med dette demonstrationsprojekt både under den indledende planlægning og under udførelsen af selve broen.

Deltagerne i D12 – SCC Demobro var foruden Teknologisk Institut, Unicon A/S som betonleverandør og MT Højgaard A/S som broentreprenør. Dertil kom Vejdirektoratets afdeling i Skanderborg som overordnet ansvarlig for broentreprisens gennemførelse og Gimsing & Madsen A/S som var bygherrens rådgiver på projektet.

1.1 Generelt om broen

Denne rapport opsamler de erfaringer som er gjort i forbindelse med opførelsen af SCC Demobro. Det gælder både erfaringer opnået under de indledende prøvestøbninger og forprøvning af betonrecepter samt erfaringer opnået under selve udstøbning af broen.

Tabel 1 indeholder historikken under SCC Demobroens tilblivelse med fokus på udviklingsarbejdet af en brugbar SCC recept.

Broens udformning

Der er tale om en traditionel betonbro med 2 fag á ca. 32 m. Broen krydser motorvejen under en vinkel på ca. 60° (nygrader). Tværsnittet består af en central del på ca. 2 m bredde og med en maksimal tværslitshøjde på 1,1 m. I denne centrale del ligger de 6 efterspændingskabler. Brotværsnittet gøres tyndere ud imod kantbjælkerne (Fig. 1-1).

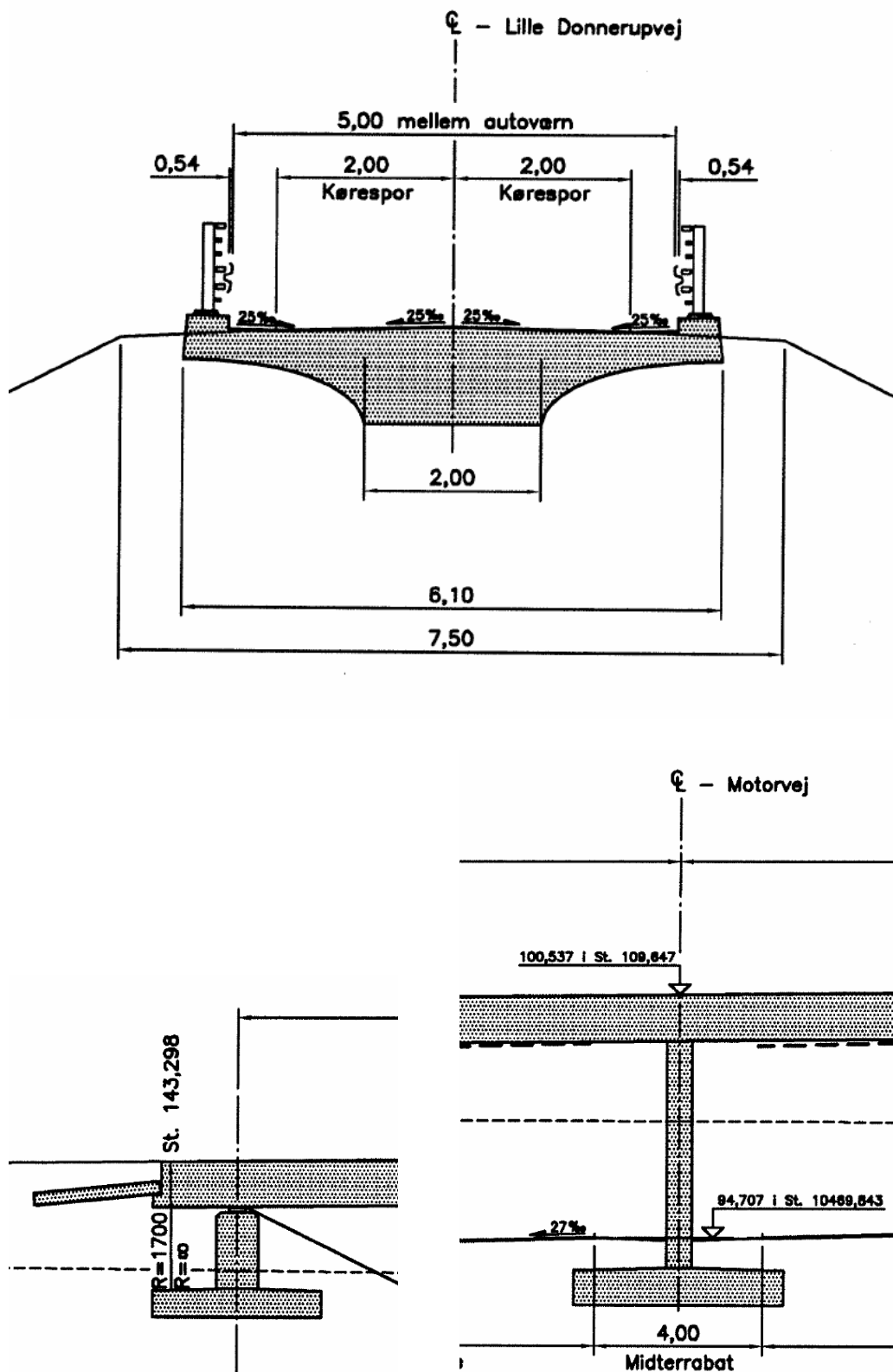
Ved broenderne etableres der sætningsplader og broens understøtninger består af

- To endesøjler, ca. 2 m høje og med et kvadratisk tværsnit 1x1 m.
- Midtersøjlen er ca. 5 m høj og har et tværsnit på 0,6 x 2,4 m.

Det skal bemærkes at midtersøjle og midterfundament ikke er udført i SCC. Broen står med kostet overflade uden fugtisolering og asfalt.

Faldforholdene er dels et ensidigt længdefald fra vest mod øst på 8 ‰ og dels et symmetrisk tværfald på følgende måde:

- 25 ‰ dobbeltsidet tværfald ud imod to dybdelinier beliggende ca. 500 mm fra kantbjælkeopspringet.
- 25 ‰ fald i kontrabanket fra kantbjælkeopspringet og ind mod dybdelinien.
- 25 ‰ indadrettet fald på hver kantbjælkes overside.



Figur 1-1: Øverst ses brotværnsnit med mål i meter. Nederst ses udsnit omkring endesøjle og midtersøjle.



Endefundamentene blev anvendt som en del af forprøvningsarbejdet i den indledende fase, hvor SCC-recepten til brodækket stadig var under udvikling.

Endefundamentene er udført i SCC E40 baseret på Lavalkali cement, som var det første udgangspunkt for en mulig SCC recept. Problemer med konsistensstab igennem pumpen gjorde imidlertid, at der blev skiftet til Rapid cement. Den nye E40 SCC recept blev efterfølgende anvendt i begge endesøjler og endeligt i brodækket.

Midterfundament og -søjle er sammen med sætningspladerne udført i traditionel beton E40 baseret på Lavalkali cement med vibrering.

Broen er udført uden fugtisolering og belægning, hvorfor kørebanearealet koster for at etablere tilstrækkelig friktion.

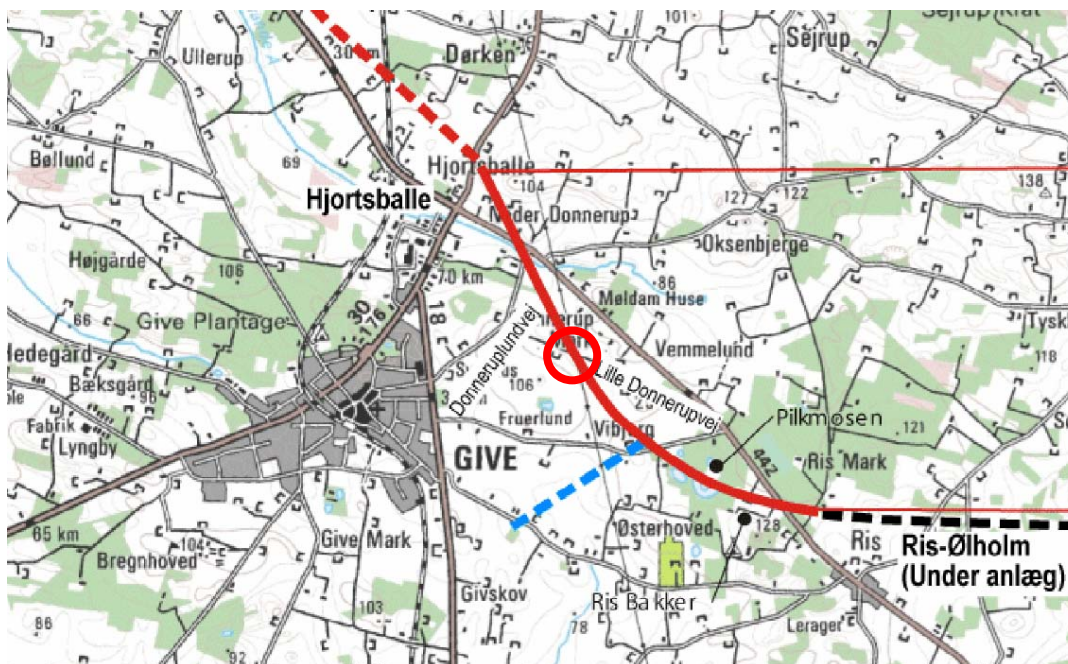


Tabel 1: Historik i forbindelse med opførelsen af SCC Demobroen.

Aktivitet	Tid og sted	Bemærkninger
Opstartsmøde med alle parter	12-01-2006 VD, Skanderborg	Foreløbig tidsplan og præmisser for broprojektet.
Udbudsmateriale udarbejdes	Tidligt forår 2006	Foreløbigt udbudsmateriale udsendes.
1. prøvestøbning med pumpe	21-06-2006 Unicon, Herning	Problemer med SCC bearbejdelighed og konsistenstab igennem pumpe. Prøvestøbningen opgives.
Forprøvning med pumpe	26-06-2006 Unicon, Herning	Nye plastificeringsstoffer afprøves, men stadig problemer med bearbejdelighed efter pumpe.
Støbning af fundamentsklodser til endesøjler ved båndudlægning	29-06-2006 Brostedet, Give	Anvender SCC recept fra 1. prøvestøbning (recept 46538). Betonen udlægges med bånd pga. forventet konsistenstab igennem pumpe (jf. 1. prøvestøbning).
Forprøvning uden pumpe	03-07-2006 Unicon, Herning	Forprøvning på betonværket, herunder luftporeanalyser på støbte cylindre. Videreudvikling af SCC recept med Lavalkali cement af 26-06-2006.
2. prøvestøbning med pumpe	27-07-2006 Unicon, Herning	Yderligere afprøvning af recept fra 03-07-06. Bearbejdeligheden igennem pumpen er fortsat problematisk og det opgives at basere recepten på Lavalkali cement.
3. prøvestøbning med pumpe, fyldning af prøvevæg	08-08-2006 Unicon, Herning	Prøvestøbning med ny SCC-recept baseret på Rapid cement. Prøvestøbningen er succesfuld og det lykkes at fylde vægformen.
Støbning af endesøjler	14-08-2006 Brostedet, Give	Anvender SCC recept fra 3. prøvestøbning (recept 46833). Betonen udlægges med bånd.
4. prøvestøbning med pumpe, brodæk mock-up	28-09-2006 Brostedet, Give	Anvender SCC recept fra 3. prøvestøbning (recept 46833). Fylder en brodæksform i halv bredde og 8 m længde med 20 m ³ SCC.
Støbemøde	12-10-2006 Brostedet, Give	Aftaler støbningen af brodæk. Herunder nødplan, udbedring af evt. støbedefekter på broens underside, etc.
Brodæksstøbning med pumpe	17-10-2006 Brostedet, Give	Brodækket udstøbes vha. erfaringerne og recept fra 4. prøvestøbning.

Broens placering

Broen betegnes i Vejdirektoratets system som Bro 0064-0-085.00 OF af K-vej 4923, Ll. Donnerupvej. Broen fører grusvejen Ll. Donnerupvej over den kommende motorvej (M-vej 67, Holstebro – Vejle, Etape 6760 Brande - Riis) lige øst for Give (Fig. 1-2).



Figur 1-2: Kortudsnit omkring Give med angivelse af den fremtidige motorvej. Brostedet er angivet ved den røde cirkel. Taget fra www.VD.dk.

1.2 Specifikationer for SCC Demobro

Samtlige broens delelementer er henført til ekstra aggressiv miljøklasse (E40) iht. DS/EN 206-1. Kravene til betonen og delmaterialer er anført i Almindelig Arbejdsbeskrivelse (AAB) kap. 8 og opsummeret i Bilag 8-1. Dertil kommer projektspecifikke krav som er angivet i Særlige Arbejdsbeskrivelser (SAB). Nedenfor er de væsentligste specifikationer for så vidt angår betonen opsummeret:

- Cement skal være af typen Lavalkali og sulfatbestandig. Dette krav afviges efter aftale med bygherren, jf. kapitel 2.
- Ækvivalent vand-cement forhold max. 0,40.
- Styrkeklasse 40 MPa eller højere.
- Cementindhold min. 300 kg/m³.
- Luftindhold i frisk beton min. 4,5 %.
- Luftindhold i hærdnet beton min. 3,5 % og afstandsfaktor max. 0,20 mm⁻¹.
- Frost/tø bestandighed skal være *god* efter 56 cykler iht. SS 13 72 44.

- Udvikling af hærdevarme, styrke, konsistens og luftindhold skal dokumenteres.
- Betonens temperatur må højst være 60 °C under hærdeprocessen.
- Udtørningsbeskyttelse skal etableres senest 1 time efter afbindings-tidspunktet. Beskyttelsen bibeholdes indtil mindst 180 modenhedstimer.

Dertil kommer at der i SAB, pkt. 1.6 stilles krav om at betonen i den friske tilstand dokumenteres vha. 4C-Auto Slump Flow og pressure-meter samt AVA. Generelt skal disse målinger foretages på betonen som den placeres i støbeformen, dvs. efter transport og evt. pumpning.

Prøvestøbninger

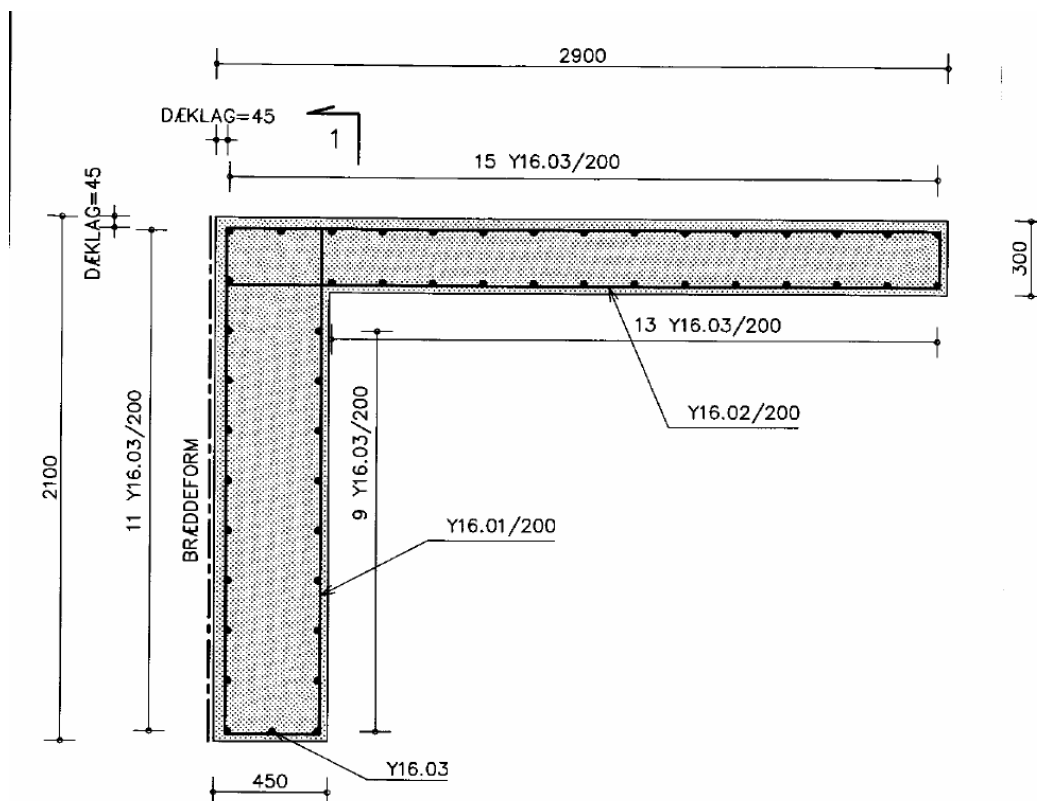
Der var stillet krav om prøvestøbninger til at dokumentere udførelsesmetoder og holdbarhedskrav.

Lodret vægstøbning til simulering af forholdene under støbning af fundamenter og søjler. Denne prøvevægstøbning skulle opfylde følgende krav (iht. SAB, pkt. 8.4.3):

- *Som prøvestøbning for fundamenter og søjler udstøbes en væg, der er mindst 2 m høj og som indeholder mindst 4 m³ beton. Der skal anvendes bræddeform på mindst en af væggenes langsider.*
- *9 stk. Ø100 mm borekerner skal udbores fra væggen, idet der vandret skal udbores 4 kerner fra væggenes øverste halve meter og 4 kerner fra væggenes nederste halve meter. Desuden udbores en kerne lodret ned fra toppen af væggen. Denne kerne anvendes til vurdering af betonens separation.*
- *Fire af borekernerne – to fra øverste del og to fra nederste del - anvendes til frostprøvning i henhold til SS 13 72 44, procedure IV A. Resultatet skal opfylde kravene til betegnelsen God.*
- *På hver af de øvrige fire vandret borede kerner skal der udføres luftporeanalyse i henhold til DS/EN 480-11.*
- *På to af de fire kerner som anvendes til luftporeanalyse – en fra øverste del og en fra nederste del - skal der endvidere udføres de prøvninger, der er anført i AAB afsnit 8.4.3, idet der skal fremstilles og analyseres et tyndslib fra både betonoverfladen og midten af hver borekerne.*

Denne prøvevægstøbning blev baseret på en L-formet væg som vist i Figur 1-3. Den ene side udførtes i lodret bræddeforskalling for at kunne vurdere

SCC's effekt på denne type overflade. De øvrige sider var støbt mod glat forskalling. Udførelsen af vægprøvestøbningen foregik 08-08-2006 (jf. afsnit 2.3).



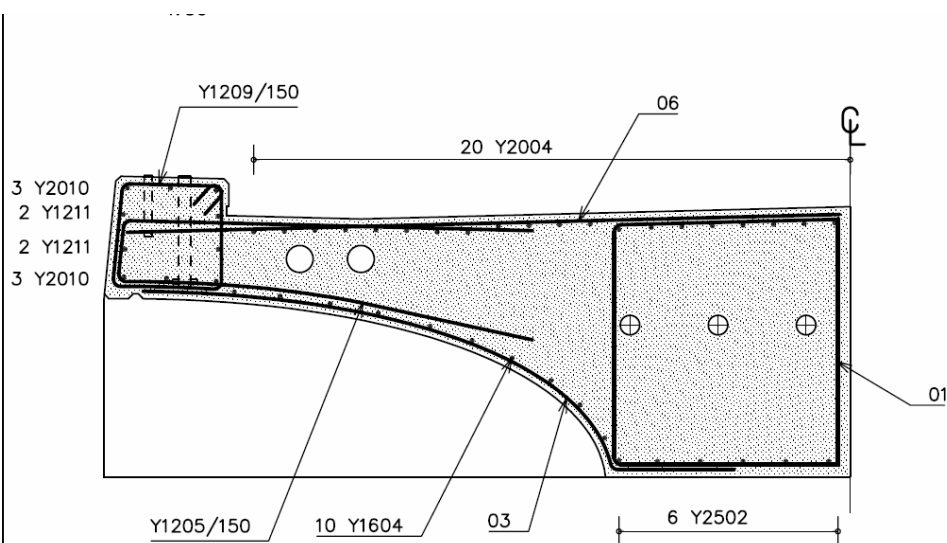
Figur 1-3: Vandret tværsnit i prøvevæg med mål i mm og angivelse af armering. Væggen er 2,5 m høj.

Brodæksprøvestøbning til simulering af fyldning af form, støbefrontens opførsel, afretning, opbygning af faldforhold, etablering af kantbjælker samt kostning af overflader. Dertil kommer eftervisning af at forankringszonerne omkring broenderne kan udfyldes af beton uden brug af vibrering.

Brodæksprøvestøbningen blev baseret på et halvt brodæk i 8 m længde med trækrør og kabelrør monteret som i det færdige brodæk samt beslag til auto-værn (Fig. 1-4). Ved den ene ende var armeringen markant tættere for at repræsentere forholdene omkring forankringszonerne.

Der var ikke stillet specifikke krav til sidstnævnte prøvestøbning, men det blev aftalt at udbore lodrette borekerner (Ø100 mm) igennem brodækket i mindst 4 positioner. Desuden blev der udført temperaturmålinger for at verificere hærdesimuleringerne.

Prøvestøbningerne foregik under realistiske omstændigheder. Det vil sige for så vidt angår transport af beton, pumpning, støbetakt, afretning, mv.



Figur 1-4: Lødret tværsnit i brodæksprøvestøbning udformet som et halvt brotværsnit. Højden af tværsnittet er 1,1 m og længden 8 m.



2. Udvikling af SCC recept

De følgende afsnit beskriver de udviklingsaktiviteter, som foregik i SCC-Konsortiet for at fremstille en SCC, som dels opfyldte Vejdirektoratets specifikationer og dels var i stand til at tilfredsstille de udførelsesmæssige krav som entreprenøren stillede.

Der var ikke betænkeligheder ved at opfylde Vejdirektoratets specifikationer som de er stillet i AAB. Styrkekrav og holdbarhedskrav frembød ingen væsentlige problemer. Derfor lå udfordringen først og fremmest i at levere en beton som entreprenøren kan placere og afrette til det ønskede faldforhold og profil.

De største udfordringer lå i:

- at fastlægge et bearbejdelighedskrav til betonen. Hvis den er for flydende optræder der separation og det er svært at opbygge faldforholdene. Hvis den er for stiv er det ikke muligt at udstøbe uden brug af vibrering.
- at fremstille en SCC som beholdt sin bearbejdelighed tilstrækkeligt længe og efterfølgende igennem pumpen. Dette var nødvendigt, da betonstationen i Herning medførte ca. 45 minutters transporttid til brostedet.
- at opnå en robust SCC recept, som kan fungere under skiftende klimabetingelser og variationer i delmaterialerne uden at bearbejdeligheden på brostedet bliver for varierende.

Broens faldforhold, som de er beskrevet i afsnit 1.1 var tilpasset de erfaringer som havde i SCC-Konsortiet fra andre SCC opgaver. Der var bl.a. et reduceret fald på kontrabanketter og kantbjælkeoversider set i forhold til et traditionelt brodesign. Dette blev besluttet tidligt i processen for at undgå afrettingsproblemer.

Indledningsvist blev der i SCC-Konsortiet opstillet følgende krav til bearbejdeligheden ud fra tidligere erfaringer. Det skal tilføjes at disse erfaringer ikke omfattede E40 SCC med Lavalkali cement.:

- Til anvendelse i søjler: udbredelsesmål = 660 ± 30 mm.
- Til fundamenter og evt. brodæk: udbredelsesmål = 580 ± 30 mm

Disse udbredelsesmål svarer til betonen, når den placeres i støbeformen, dvs. efter transport og pumpning. De endelige værdier som blev anvendt i broen endte med at ligge i den lave ende af disse intervaller som det fremgår af de følgende afsnit.

De holdbarhedsmæssige aspekter såsom luftporestruktur og frostbestandighed er behandlet i en separat rapport under titlen *Luftporestruktur og frostbestandighed for SCC* (SCC-Konsortiet 2007). Nærværende rapport omhandler således primært de udførelsesmæssige aspekter, herunder den friske betons egenskaber.

2.1 SCC recepter

Tabel 3 indeholder de anvendte SCC recepter. Der er tale om beton E40 til ekstra aggressiv miljøklasse i alle tilfælde. Tabel 2 indeholder recept til traditionel E40 beton til sammenligning.

Tabel 2: Betonrecept til traditionel beton E40.

Delmateriale	kg/m ³
Lavalkali cement CEM I 42,5 N	406
Rapid cement CEM I 52,5 R	-
Flyveaske	81
Mikrosilika	18
Vand	169
Luft CP 316 1:1	0,71
Conplast 212	3,5
Structuro A1510	-
Glenium sky 525	-
Sand, 0-4 kl. E	603
Sten, 4-8 kl. E	302
Sten, 8-16 kl. E	668



Tabel 3: SCC recepter til SCC Demobroen.

	Støbedato					
	21-06-06	26-06-06	27-07-06	08-08-06	14-08-06	28-09-06 og 17-10-06
Reference	Bilag A	Bilag A	Bilag A	Bilag B	Bilag B	Bilag D
	1. prøvestøbning	Forprøvning	2. prøvestøbning	3. prøvestøbning	Endesøjler	4. prøvestøbning og brodæk
Delmateriale	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Lavalkali cement CEM I 42,5 N	360	360	360	-	-	
Rapid cement CEM I 52,5 R	-	-	-	371	381	380
Flyveaske	82	82	82	84	86	87
Mikrosilika	12	12	12	12	12	12
Vand	152	156,4	155	174	176	166
Luft CP 316 1:1	0,09	0,11	0,08	0,06	0,06	0,34
Conplast 212	-	1,81	1,81	2,34	2,88	3,4
Structuro A1510	-	3,860	3,86	3,98	4,56	5,7
Glenium sky 525	0,95	-	-	-		-
Sand, 0-4 kl. E	718	719	686	671	626	618
Sten, 4-8 kl. E	290	291	288	278	277	274
Sten, 8-16 kl. E	691	690	687	672	697	700
Betonleverancer (m ³)	3 læs (6+6+6)	3 læs (å 3)	3 læs (2+6+2)	4 læs (2+2+2+6)	2 læs (2+5)	^{A)} ^{B)} 33 læs (ca. 9)
Luftporeanalyse på hærdnet beton ^{C)}	3 støbte cylindre og 2 borekerner	-	10 støbte cylindre	4 støbte cylindre og 4 borekerner	-	5 borekerner
Frostbestandighed efter SS 13 72 44 ^{B)}	-	-	-	4 borekerner	-	-
Flydemålsbestemmelse iht. DS/EN 206-1, anneks U:						
På fabrik?	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Før/efter pumpe?	Ja	Ja	Ja	Ja	Nej	Ja

Noter: ^{A)} 4. prøvestøbning 28-09-06 leveres 7 læs, heraf kasseres de tre første pga. for højt udbredelsesmål (jf. afsnit 2.3.2).
Ved brodækstøbning 17-10-2006 blev der målt på de friske betonegenskaber ved ca. hver tredje læs beton (Bilag D).

^{B)} Se resultater i *Luftporestruktur og frostbestandighed for SCC* (SCC-Konsortiet 2007).

2.2 Bearbejdelighedsproblemer med SCC baseret på Lavalkali cement

Udgangspunktet var en SCC recept baseret på Lavalkali cement fra Aalborg Portland A/S, da dette er krævet i Vejreglernes AAB. Lavalkali cement benyttes typisk til anlægskonstruktioner pga. sulfatbestandigheden og dertil kommer, at Lavalkali cement udvikler hærdevarme i en langsommere takt end Rapid cement, hvilket medvirker til at holde temperaturudviklingen i brodækkets indre på et moderat niveau. Mere herom i kapitel 4.

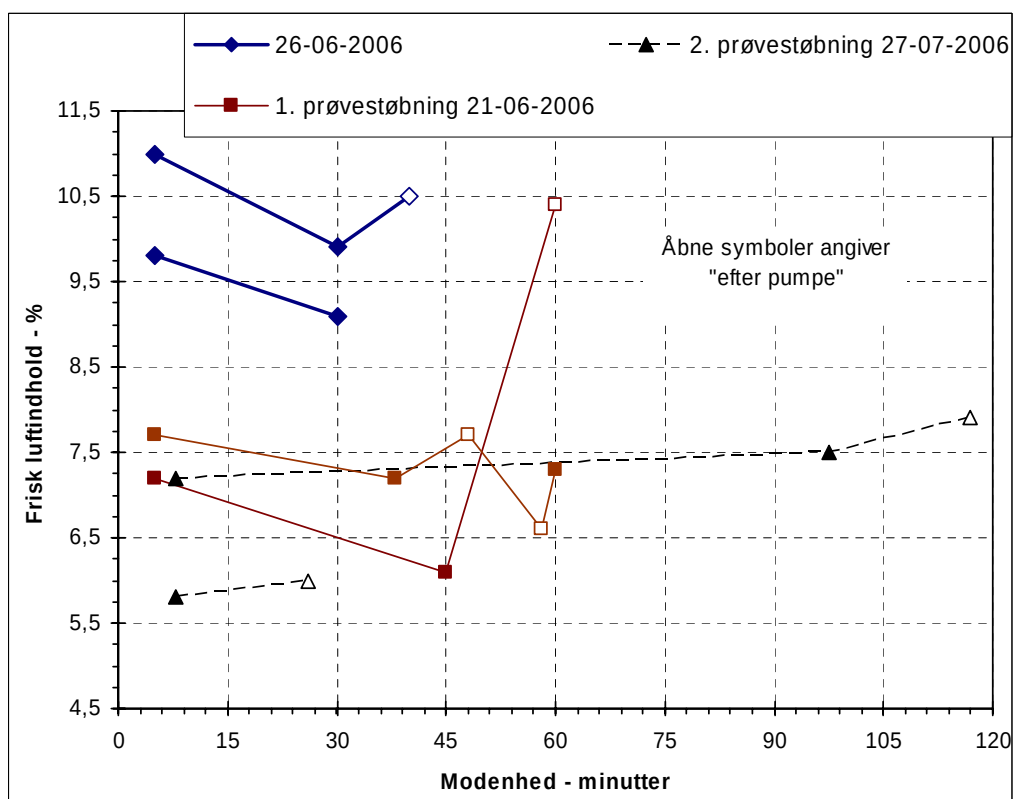
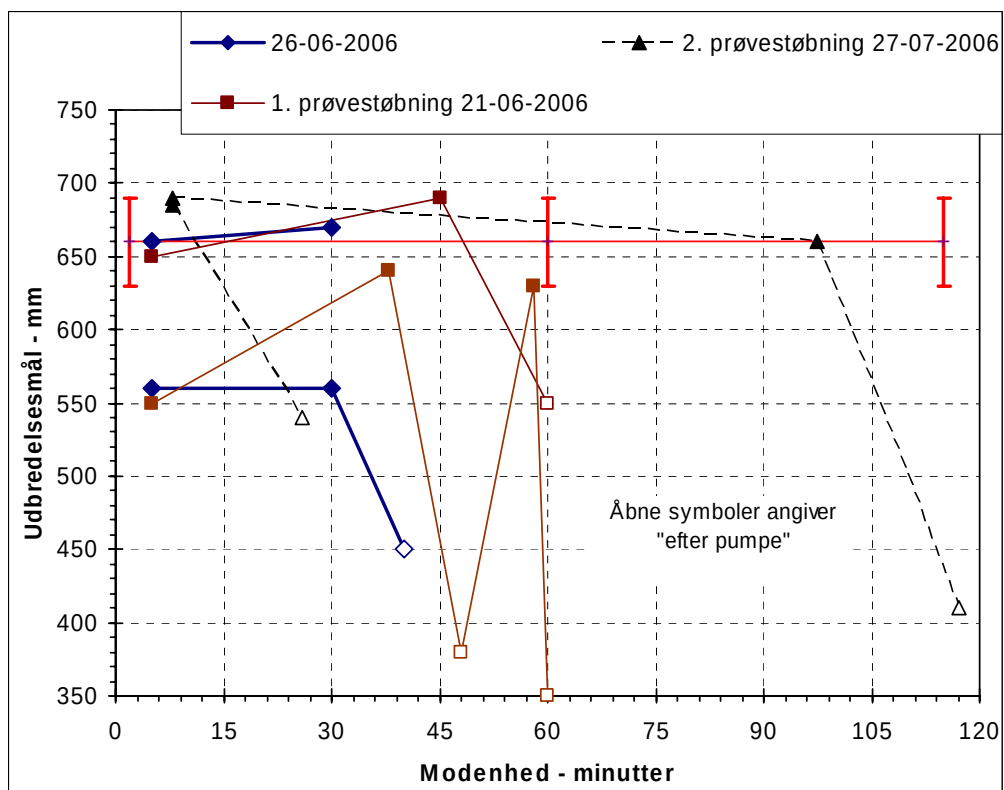
På den 1. prøvestøbning 21-06-2006 var der allerede udført forprøvning af den påtænkte SCC recept på Unicon's fabrik i Herning med de aktuelle tilslagsmaterialer.

På baggrund af disse forprøvninger var det påvist, at betonen kunne produceres med den rette bearbejdelighed i forhold til lodret støbning (vægge/søjler), hvor kravet til udbredelsesmål var fastlagt til 660 ± 30 mm. Prøvestøbningen skulle således vise, at betonen ydermere kunne udstøbes i en vægform med bræddeforskalling og give de rette overflader.

Bilag A indeholder resultater opnået under de indledende forprøvninger og prøvestøbninger med Lavalkali cement.

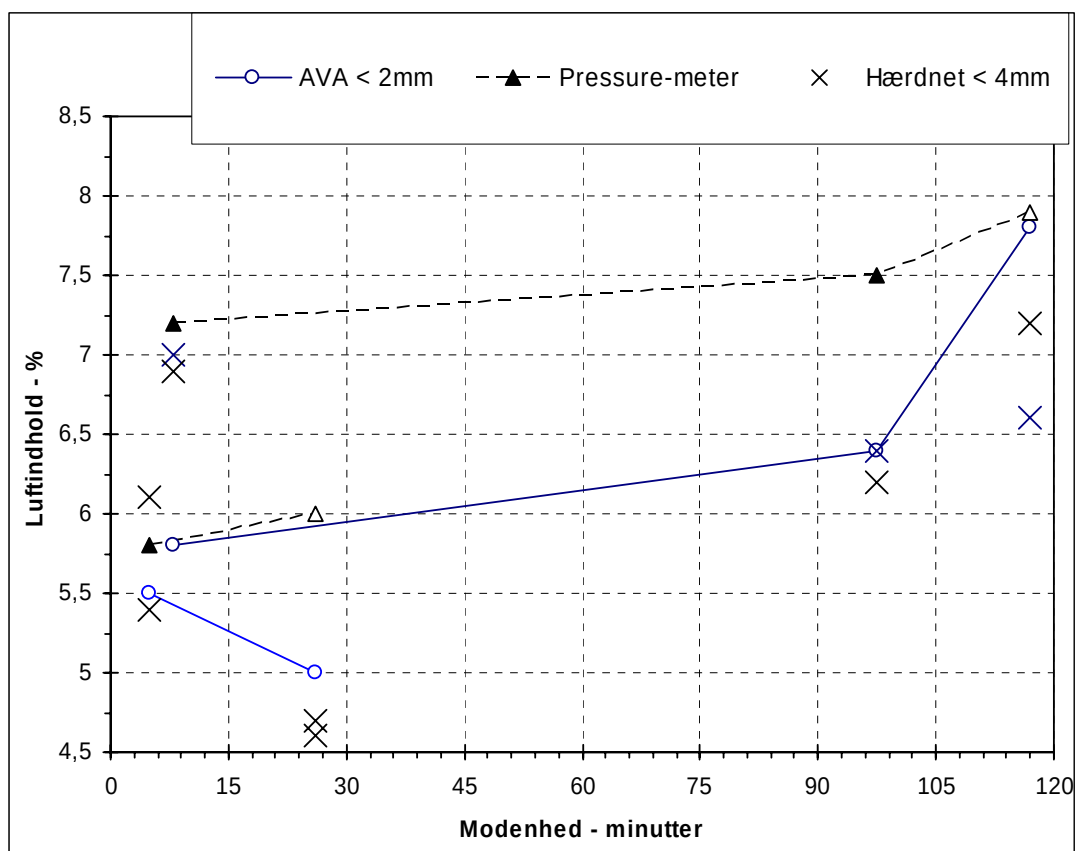
Figur 2-1 viser hvordan bearbejdeligheden varierer med tiden (omregnet til ækvivalent modenhed ved 20 °C). De viste målinger er udført af Unicon på fabrikken i Herning. Det ses tydeligt at pumpning af betonen forårsager et konsistenstab på 100-200 mm i udbredelsesmål. Ved den 1. prøvestøbning blev der tillige observeret en markant forøgelse af luftindholdet igennem pumpen. Dette var ikke tidligere erfaret og det blev konkluderet at ændringen i luftindholdet måtte bære en del af forklaringen på konsistenstabet. Der blev på den baggrund ændret på plastificeringsstofferne i løbet af sommerferien og den 2. prøvestøbning 27-07-2006 skulle dokumentere at ændringerne i SCC recepten havde den rette virkning.

Af Fig. 2-1 fremgår det imidlertid at disse ændringer ikke havde den forventede effekt, idet der påny blev konstateret en reduktion af udbredelsesmålet på næsten 250 mm igennem pumpen. Der blev også lavet et forsøg, hvor betonen blev pumpet straks efter blanding i stedet for efter en halv times transport for at vurdere om konsistenstabet var modenhedsafhængigt. Dette viste sig ikke at være tilfældet (Fig. 2-1).



Figur 2-1: Øverst: Udbredelsesmål målt på betonfabrikken i Herning, som en funktion af modenhedsalder.

Nederst: Tilhørende frisk luftindhold bestemt ved pressure-meter.



Figur 2-2: Luftindhold målt på frisk beton (pressure-meter og AVA) sammenlignet med luftporestrukturmålinger på hærdnet beton. Udført ved 2. prøvestøbning 27-07-2006. Se også SCC-Konsortiet (2007).

Pumpningens effekt på luftindholdet er bl.a. undersøgt ved 2. prøvestøbning 27-07-2006 (Fig. 2-2). Pressure-metret ses at måle ca. 1 %-point højere end AVA på den friske beton. Der ses en svag tendens til at luftindholdet øges igennem pumpen, men den er hverken særlig markant eller entydig. Der kan således ikke gives nogen fornuftig forklaring på konsistenstab og det må formodes at have adskillige årsager (både fysiske og kemiske).

På den baggrund blev det besluttet at stoppe udviklingen af E40 SCC recept baseret på Lavalkali cement, idet der ikke var tiltro til at en egnet recept kunne etableres i tide inden støbningen af brodækket.

Det skal afslutningsvist siges, at der blev leveret SCC baseret på Lavalkali cement til broens endefundamenter 29-06-2006. Dette arbejde er beskrevet i afsnit 3.1, hvor der også findes dokumentation for den anvendte betons egenskaber.

2.3 SCC recept baseret på Rapid cement

En ny SCC recept blev udviklet mellem 2. og 3. prøvestøbning (Tabel 3) baseret på Rapid cement. De indledende blandinger der blev udført om formiddagen 08-08-2006 viste et noget mindre konsistenstab end hvad der var oplevet med Lavalkali cementen.

Bearbejdelighedens tidsmæssige udvikling ses i Fig. 2-3. Under transporten som typisk andrager 1 til 1½ modenhedstime reduceres udbredelsesmålet med ca. 75 mm og igennem pumpen tabes yderligere 50 mm. Disse konsistenstab var acceptable for betonentreprenøren og det blev besluttet at støbe brodækket med udgangspunkt i denne SCC recept.

Efterfølgende blev det godkendt af bygherren at benytte Rapid cement i stedet for en Lavalkali cement til brodækket. Denne beslutning byggede dels på tidligere erfaringer med Rapid cement til anlægskonstruktioner fra ”Grøn beton” og dels på, at de udtagne borekerner ikke udviste nogen holdbarhedsmæssige problemer.

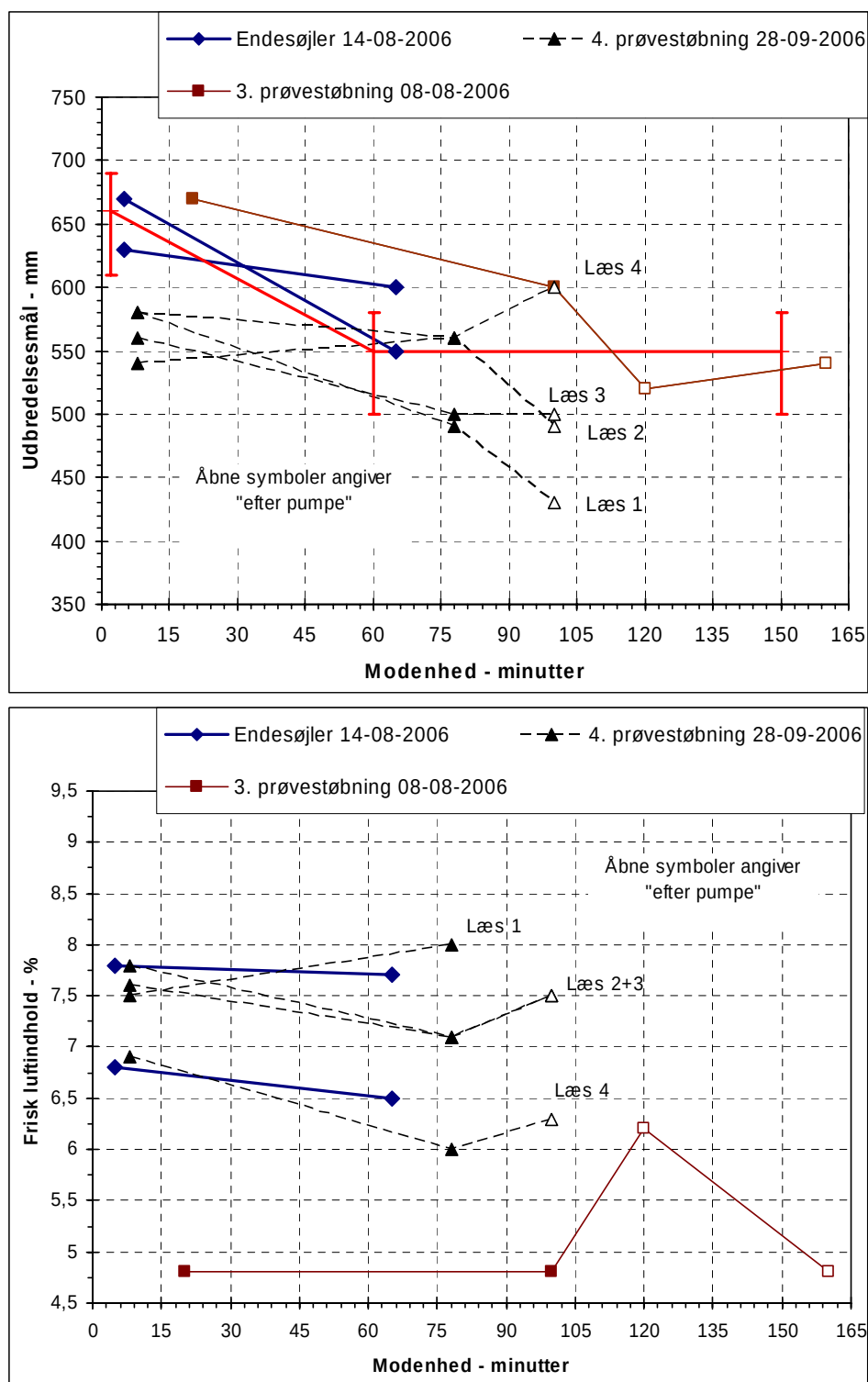
Figur 2-3 indeholder desuden en angivelse af det bearbejdelighedsområde som blev formuleret forud for selve brodæksstøbningen. Dette område var defineret som 550 mm (+30/-50 mm) og det blev fastlagt ud fra erfaringerne opnået under prøvestøbningerne.

2.3.1 Vægprøvestøbning 08-08-2006

Den 3. prøvestøbning 08-08-2006 bestod af en 2,5 m høj væg opstillet ved betonfabrikken i Herning. (Fig. 1-3). Udbredelsesmålet bestemt efter ca. 45 minutters køretur i 25 °C og efter pumpning var 520 mm og luftindholdet øgedes igennem pumpen fra 4,8 til 6,2 % (Fig. 2-3). Disse registreringer skal tages med et vist forbehold, da det var uklart om prøveematerialet indeholdt rester af det pudsmateriale som pumpen smøres med forud for pumpning af beton.

Det blev besluttet at fylde vægformen og efter fyldning blev betonen igen prøvet med det resultat, at luftindholdet blev bestemt til 4,8 %, som lyder mere plausibelt (Fig. 2-3 nederst).

Selve fyldningen af vægformen foregik vha. en stiv pumpe slang og ikke en blød ”brandslange” som det ellers var specificeret iht. SAB pkt. 8.3.7. Dette skyldes faren for overtryk og eksplosion af den bløde slang i tilfælde af fastklemning ved armering eller lignende. Fyldningen foregik i vægformens hjørne med pumpe slangen holdt konstant ca. 20 cm over betonen. Betonen skulle således flyde 2,1 m i den ene retning og 2,9 m i den anden.



Figur 2-3: Øverst: Udbredelsesmål for SCC baseret på Rapid cement. Nederst: Tilhørende frisk luftindhold bestemt ved pressure-meter. For støbning af endesøjler 14-08-2006 blev der ikke anvendt pumpe. Data findes i Bilag B.

På trods af at betonen havde et betydeligt lavere udbredelsesmål end hvad der indledningsvist var forventet til sådanne vægstøbninger flød betonen uden problemer omkring armeringen og der var ingen tegn på separation på noget tidspunkt.

Støbetakten lå på ca. 10 m pr. time ligesom det tidligere er anvendt for SCC vægstøbninger til DR-Byen i SCC-Konsortiets regi. Vægformen var dermed fyldt på ca. 15 minutter. Undervejs i fyldningen og til slut, da betonoverfladen i påfyldningshjørnet nåede formens overkant, stod betonen med et naturligt fald på 5-7 % ud imod formens ender (Fig. 2-4). Dette fald er mere end tilstrækkeligt til at opbygge tværprofilet i brodækket (afsnit 1.1). Til slut fyldes formen op og overfladen pudses let før der afdækkes med plastik.

Efter afformning blev der konstateret luftblærer i moderat omfang på de dele af formen som var beklædt med støbeplade. På den bræddebeklædte del var der stort set ingen luftblærer og overfladen var fuldt ud acceptabel til en midtersøjle eller lignende.

Der er udboret i alt 9 borekerner fra væggen for at dokumentere betonkvalitet og holdbarhedsegenskaber (afsnit 1.2). Resultaterne af luftporeanalyser og frost/tø prøvning er rapporteret i *Luftporestruktur og frostbestandighed for SCC* (SCC-Konsortiet 2006), mens strukturanalyser på borekernerne er vedlagt i Bilag B. Der er ikke nogen bemærkninger til hverken indre stabilitet, revnedannelse eller betonsammensætning på de undersøgte kerner. Der er en homogen fordeling af tilslag og der er ikke tegn på separation eller pastalag på væggens top.



Betonooverfladen set under fyldning af SCC.



Pumpeslangen placeret i væghjørnet. Den følger med betonooverfladen opad mod væggen top.



Til slut stod betonooverfladen med et naturligt fald på 5-7 % bort fra påfyldningshjørnet.

Figur 2-4: Fyldning af vægform under 3. prøvestøbning 08-08-2006. Bemærk tydeligt tilslag i overfladen.

2.3.2 Brodæksprøvestøbning 28-09-2006

Den 4. prøvestøbning 28-09-2006 bestod af en 20 m³ støbning af et halvt brodæk i 8 m længde (Fig. 1-4 og Fig. 2-5). Prøveformen var opbygget på brostedet og der var ilagt armering, kabelrør og trækrør ligesom i det rigtige brodæk. En beskrivelse af de udførelsesmæssige aspekter ved 4. prøvestøbning er givet i afsnit 3.3 sammen med den rigtige brodæksstøbning. I det følgende er materialeegenskaberne beskrevet (Tabel 5) og kvaliteten af det udførte arbejde er vurderet.



Armering af prøvestøbning 28-09-2006. Til højre langs kantbjælken ligger trækrør og nederst til venstre ses korrugerede blikrør for spændkabler.

Efter afformning



Figur 2-5: Brodæksprøvestøbning 28-09-2006 på brostedet ved Give.

Betonen til 4. prøvestøbning blev leveret i 4 læs. Arbejdet startede 28-09-2006 kl. 12, men de første 3 læs, som ankom til brostedet mellem kl. 12 og 13 havde alle udbredelsesmål udenfor de aftalte tolerancer ved ankomsten og blev derfor kasseret af tilsynet. Kl. 14:30 ankom et læs med tilfredsstillende konsistens. Udbredelsesmål og frisk luftindhold ses i Fig. 2-3 med angivelse af læs 1 til 4. I Bilag B er måledata gengivet. Udbredelsesmålet efter pumpe for læs 4 lå højere end de aftalte kassationsgrænser (Fig. 2-3), men dette skyldtes primært et begyndende regnvejr og det blev besluttet at færdiggøre støbningen på trods af dette.

Støbningen forløb over to timer, hvor det første beton blev placeret kl. 15:10 og det sidste kl. 17:10. Kl. 17:30 var de sidste overflader pudset og kostet og

klargjort til plastikafdækning (Tabel 4). Støbetakten lå på omkring 15 m³ pr. time, hvilket svarer til halvdelen af hvad der forventes på den rigtige bro-dæksstøbning, som indeholder dobbelt så meget beton pr. løbende meter. Der forekom ca. en halv times utilsigtet pause mellem læs 2 og 3, og det var uklart om denne pause medførte et koldt støbeskel. På trods af dette blev der ikke vibreret i støbefronten.

Tabel 4: Støbejournal for 4. prøvestøbning 28-09-2006.

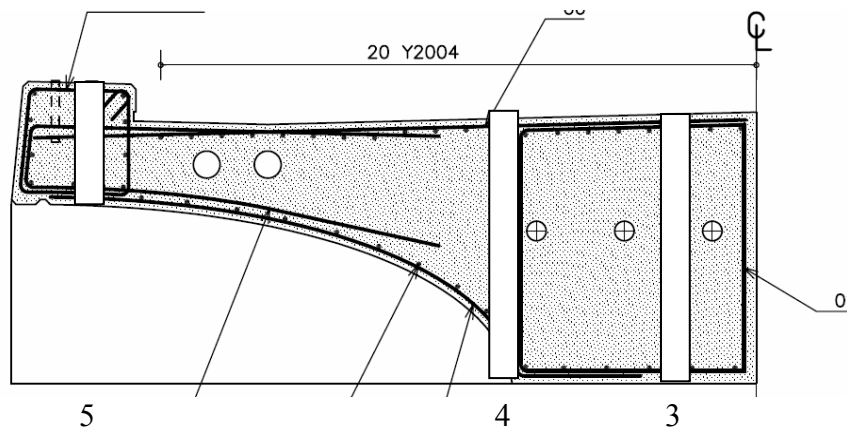
Tidspunkter 28-09-2006	Aktivitet(er)	Bemærkning
15:10 – 15:30	1. læs placeres i brodækkets centrale del startende fra den laveste ende i broens længderetning.	
15:30 – 15:45	2. læs placeres, hvorefter formen er næsten halv fyldt.	Støbetakt for læs 1+2 = 8 m ³ / 35 minutter = 14 m ³ /time
	Ventetid mellem læs 2 og 3	
16:25 – 16:45	3. læs placeres og der fyldes op så der kan afrettes.	
16:40	Afretning med stålbjælke påbegyndes.	
16:50 – 17:10	4. læs placeres og formen fyldes op. Pudsnings af kantbjælke foregår.	Støbetakt for læs 3+4 = 12 m ³ / 45 minutter = 16 m ³ /time
17:05	Kostning af overflader påbegyndes.	Betonen er på dette tidspunkt omtrent 1,5 time gammel siden blanding.
17:20	Afretning færdiggøres og efterfølgende pudsnings.	Det er begyndt at regne, hvilket vanskeliggør den sidste del af arbejdet.

Prøvestøbningen blev afførskallet i den efterfølgende uge og der blev udtaget lodrette 5 borekerner (ø100 mm), se Fig. 2-6:

- 2 kerner (nr. 1 og 2) blev udtaget i den ene ende igennem den tætarmerede forankringszone.
- 3 kerner (nr. 3-5) blev udtaget ca. 2,5 m fra prøvestøbningens startende. Denne placering svarer til det støbeskel som fremkom ved leveringspausen mellem læs 2 og 3.

Kernernes placering i tværsnittet fremgår af Fig. 2-6. Alle kerner blev underkastet en visuel gennemgang og der var ingen bemærkninger i den forbindelse. Tilslaget var fordelt ligeligt og der var fin omstøbning af de gennembore-

de armeringsjern også i den tætarmerede zone (Fig. 2-7). Der var ingen tegn på separation og heller ikke synlige tegn på støbeskal mellem læs 2 og 3. Se også Bilag B.



Kerne nr.

Figur 2-6: Borekerner udtaget fra 4. prøvestøbning. Kerne 1 og 2 er udtaget principielt som kerne 3 og 4 blot i den tætarmerede forankringszone. Borekerner på foto er placeret med toppen mod venstre. Bruddet i kernerne skyldes prøveudtagningen alene og er ikke et tegn på støbeskal.

Tabel 5: Prøveresultater for 4. prøvestøbning af brodæk 28-09-2006 (Bilag B).

	Læs 1	Læs 2	Læs 3	Læs 4
	Vestligt fundament		Østligt fundament	
Størrelse (m ³)	4	4	6	6
Attest nr. (Bilag A)	5702	5703	5704	5705
På betonfabrikken i Herning				
Blandetidspunkt	13:41	14:11	15:21	15:42
Luft (%)	7,5	7,8	7,6	6,9
Densitet (kg/m ³)	2242	2237	2240	2249
Udbredelsesmål (mm)	580	540	560	580
Temp (°C)	26	26	26	26
AVA Luft: < 2mm	-	6,7	-	-
Luft: < 0,35 mm	-	6,0	-	-
Specifik overfl. (mm ⁻¹)	-	37,7	-	-
Afstandsfaktor (mm)	-	0,12	-	-
På brostedet ved Teknologisk Institut før pumpe				
Luft (%)	8,0	7,1	7,1	6,0
Udbredelsesmål ASF (mm)	490	560	500	560
På brostedet ved Teknologisk Institut efter pumpe				
Luft (%)	ej målt	7,5	7,5	6,3
Udbredelsesmål ASF (mm)	430	490	500	600 (usikker pga. regn)
Luftporeanalyse på lodrette borekerner (middelværdier af 4 prøver)				
Kerne mærket	Kerne 3 og 5 og top og bund		-	
Total luft ≤ 4mm (%)	5,1		-	
Specifik overfl. (mm ⁻¹)	46		-	
Afstandsfaktor (mm)	0,11		-	



Figur 2-7: Borekerner 1-3 med synlig armering. Der ses ingen tegn på separation.

Borekerne 3 og 5 er underkastet nærmere undersøgelser med planslib og tyndslib. Resultaterne heraf ses i Bilag B.

Efter afforskalling var der følgende bemærkninger til overfladernes beskaffenhed (Fig. 2-8 og 2-9):

- Synlige støbespor på broens underside. Der blev udboret kerner lokalt i disse støbespor og det konstateredes at sporene kun er overfladiske.
- Synlige afstandsklodser, hvor cementpastaen ikke er løbet ind i mellemrummet mellem afstandsklod og bræddeform.

Begge defekter kan henføres til det faktum at der ikke anvendes vibrering. Under traditionel støbning bringes form, armering og afstandsklodser i bevægelse via vibreringsudstyret og derved masseres cementpastaen ind i alle hulrum og omstøber afstandsklodserne fuldstændigt med et tyndt pastalag. Ved SCC mangler den mekaniske påvirkning og betonen er mindre tilbøjelig til at omstøbe afstandsklodserne fuldstændigt. Desuden er dæklagszonen vanskelig at påvirke, idet betonen typisk placeres i det indre af formen og flyder ud i dæklagszonen ved egen kraft.

I kantbjælkerne er det anderledes, da formen fyldes mere direkte og den tilførte bevægelsesenergi er tilstrækkelig. Støbefejlene optræder derfor også primært på de store skrå og vandrette flader.

Løsningen på problemet kan være en type afstandsklods, som kun har punktberøring med formen. Problemet blev imidlertid indset for sent til at det kunne modvirkes på det rigtige brodæk, hvor armeringen allerede var på plads.

Der var enighed om at problemet primært er æstetisk og at det ikke påvirker broens holdbarhed. Det er desuden tvivlsomt om overfladedefekterne overhovedet kan ses på den færdige bros underside, når man står på den fremtidige motorvej.



Synligt støbespor, hvor den skrå støbefront har ligget mellem læs 2 og 3.



Synligt støbespor på den skrå underside af brodækket,

Figur 2-8: Observationer efter afforskalling.



Afstandsklods med dårlig omstøbning. Grov støbefejl (kun et par tilfælde).

To tilfælde af synlige afstandsklodser (adskillige eksempler)



Afstandsklods under støbearbejdet.

Figur 2-9: Observationer efter afforskalling.



3. Udførelse af brostøbning

3.1 Støbning af endefundamenter 29-06-2006

Det blev besluttet at udstøbe de to endefundamenter med SCC recept baseret på Lavalkali cement (Bilag C) på trods af de bearbejdelighedsproblemer, som er beskrevet i afsnit 2.2. Grunden var, at fundamentsklodserne kunne udstøbes med båndudlægning og uden pumpe. Arbejdet blev udført 29-06-2006 og erfaringerne herfra blev vigtige for den senere brodæksstøbning.

Endefundamentet indeholder ca. 11 m³ beton og oversiden skal afrettes til 25 ‰ fald til alle sider. Det er planlagt to læs beton til hvert fundament. Den tilstræbte konsistens ved fyldningsstedet er 580±30 mm i udbredelsesmål. En oversigt over egenskaber registreret for de 4 læs SCC er givet i Tabel 6.

Båndudlægningen foregår via en sliske som ender i en ståltragt med ca. 3 m lodrethængende stålrør, hvorfra betonen falder det sidste stykke ned i formens bund (Fig. 3-1 øverst).

Det første læs beton blev hældt i det vestlige fundament på ca. 10 minutter. Derefter gik der 60 minutter inden det næste læs ankom og det blev besluttet at vibrere de to læs sammen med stavvibrator for at undgå et koldt støbeskel. Dette skete på følgende måde. Først blev der udlagt ca. 100 mm beton som blev vibreret, hvorefter formen fyldes uden yderligere vibrering. Skellet mellem de to læs beton ligger ca. 300 mm under fundamentsoverkanten.

Som det fremgår af Tabel 6 var der ret stor variation på de 4 læs. Læs 1 og 4 havde tilpas konsistens, mens læs 2 var alt for flydende med tendens til separation og læs 3 var sætmålsbeton som skulle vibreres for at omstøbe armeringen. Det vil sige at de to endefundamenter kan ikke betegnes som SCC, men de tjente til at opnå fuldskalaerfaring forud for brodæksstøbningen.

Der blev efterfølgende udboret en kerne (ø100 mm) fra hvert fundament til luftporeanalyse (Tabel 6) sammen med tre støbte cylindre. Der er ikke noget i luftporestrukturen som indikerer problemer med den anvendte beton og borekernerne viste heller ingen tegn på støbeskel på trods af den lange ventetid mellem læssene.

Af Tabel 6 og Bilag C fremgår det desuden at kravene til luftporestruktur og luftindhold er opfyldt i alle tilfælde, jf. krav i afsnit 1.2.



Tabel 6: Støbning af endefundamenter 29-06-2006.

	Læs 1	Læs 2	Læs 3	Læs 4
	Vestligt fundament		Østligt fundament	
Størrelse (m ³)	6	6	10	8
Attest nr. (Bilag A)	5702	5703	5704	5705
På betonfabrikken i Herning				
Blandetidspunkt	9:34	10:57	12:40	13:14
Luft (%)	6,0	6,2	8,3	8,3
Densitet (kg/m ³)	2324	2271	2254	2241
Udbredelsesmål (mm)	550	700	550	590
Temp (°C)	22	21	23	23
AVA Luft: < 2mm	5,7	4,5	7,8	8,5
Luft: < 0,35 mm	3,9	3,2	6,1	6,0
Specifik overfl. (mm ⁻¹)	34,2	32,1	31,9	30,0
Afstandsfaktor (mm)	0,140	0,167	0,123	0,120
På brostedet ved Teknologisk Institut				
Måletidspunkt	10:47	12:28	14:14	14:38
Luft (%)	6,5	6,3	8,3	8,0
Udbredelsesmål ASF (mm)	490	700	350	490
ASF flydespænding (Pa)	99	17	-	99
ASF viskositet (Pa*sek)	218	110	-	187
Luftporeanalyse på 3 støbte cylindre af læs 1 – middelværdier (Bilag C)				
Total luft ≤ 4mm (%)	6,0			
Specifik overfl. (mm ⁻¹)	35			
Afstandsfaktor (mm)	0,140			
Luftporeanalyse på lodret borekerne fra hvert fundament (Bilag C)				
Kerne mærket	MTH-1		MTH-2	
Total luft ≤ 4mm (%)	7,1		5,7	
Specifik overfl. (mm ⁻¹)	26		24	
Afstandsfaktor (mm)	0,16		0,20	



Figur 3-1: Øverst: Fyldning af fundament for endevederlag vha. båndudlægning. Fra båndet styres betonen de 3 m ned i formen via en ståltragt og stålrør.

Nederst: Afretning og opbygning af fald.

På grund af den flydende konsistens af læs 2 var det ikke muligt at afrette det vestlige fundaments overside lige efter udlægningen. Det besluttedes derfor at vente indtil betonen begyndte at afbinde. Dette skete imidlertid ganske pludseligt, hvorefter det gjaldt om hurtig at komme på. Afretningen af det vestlige fundament foregik således ca. 2 timer efter at læs 2 betonens blandingstidspunkt. Der blev afrettet med en tilpasset træskinne som kørte på de afsatte ledere. Overskydende beton blev skovlet væk og endeligt blev overfladen glattet med et pudsebræt (Fig. 3-1 nederst).

For det østlige fundament er tidsrummet mellem læssene kun ca. en halv time og der vibreres kun svagt i støbeskellet mellem læs 3 og 4. Konsisten-

sen af læs 4 er perfekt og der kan opbygges fald umiddelbart efter udlægning. Det er dog tungt at trække overfladerne af med træskinnen ved håndkraft pga. den relativt høje viskositet.

Erfaringerne mht. til opbygning af fald på endefundamenternes overside og afretning af disse blev efterfølgende benyttet til at fastlægge kravene til udbredelsesmål for den 4. prøvestøbning og den endelige brodæksstøbning.

3.2 Støbning af endesøjler 14-08-2006

Støbningen af endesøjler 14-08-2006 foregik med anvendelse af den nyudviklede SCC recept baseret på Rapid cement. Det var planlagt at benytte den samme beton til alle tre søjler samt midterfundamentet, men af praktiske årsager var det kun muligt at benytte SCC i endesøjlerne. Midterfundament og søjle blev efterfølgende udstøbt vha. traditionel E40 beton.

De to endesøjler indeholder hver ca. 2 m^3 så selve udstøbningen blev foretaget vha. båndudlægning og et enkelt læs på 5 m^3 var tilstrækkeligt. Den simple prismeform gjorde selve fyldningen meget nem. Bearbejdéligheden og luftindholdet opførte sig som det var erfaret under 3. prøvestøbning 08-08-2006 (Bilag B).

3.3 Støbning af brodæk 17-10-2006

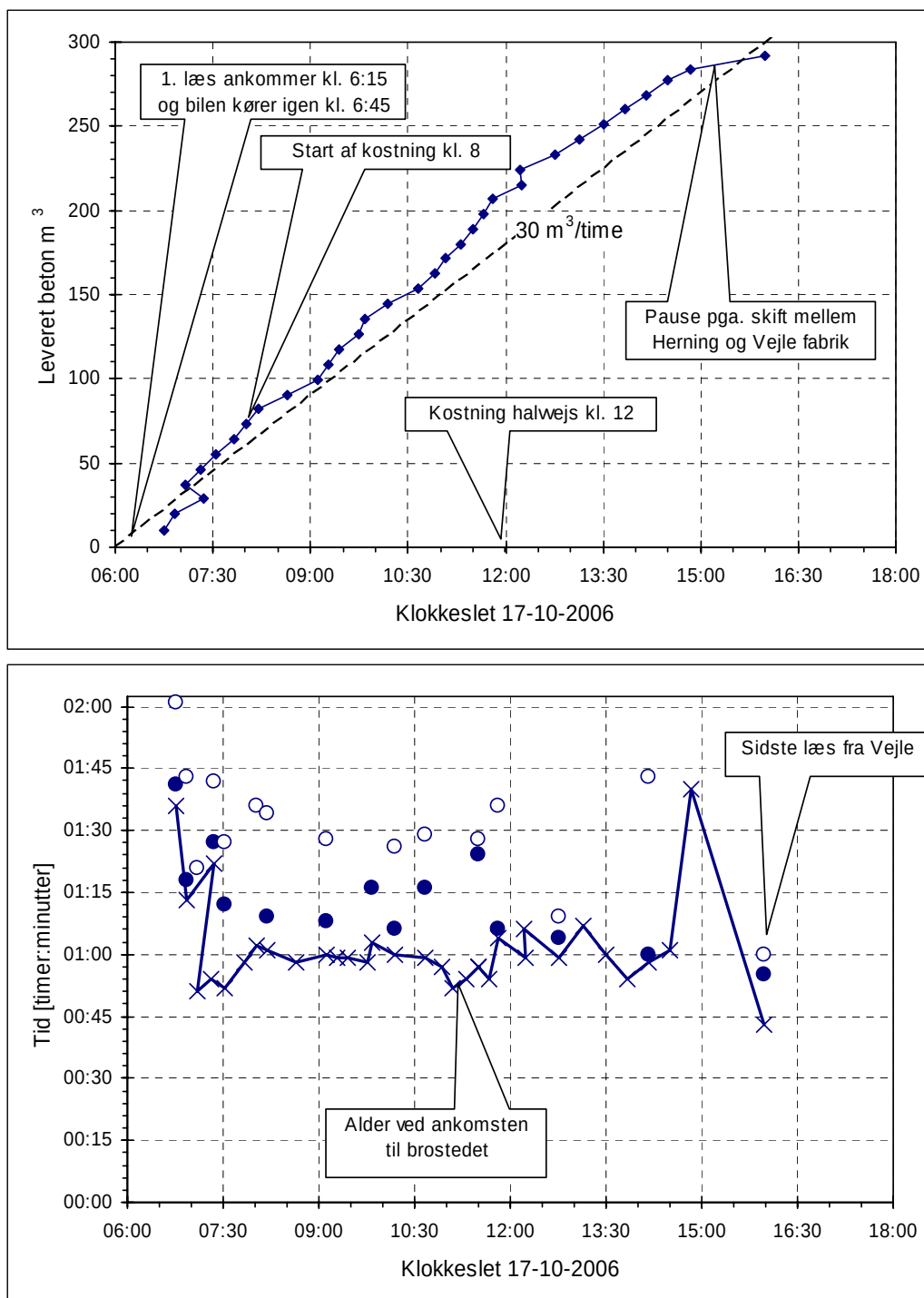
Brodækket blev støbt på en næsten vindstille dag med skyfri himmel. Støbestart var kl. 6:15, hvor første læs beton ankom til brostedet. Det sidste læs ankom kl. 15:40. Se støbetakten på Fig. 3-2. Støbningen foregik fra øst mod vest.

Det sidste læs beton måtte rekvireres hos Unicons fabrik i Vejle pga. en defekt doseringsenhed i Herning. Dette medførte en forsinkelse i leveringen på næsten en time. For at sikre, at broenden med forankringer for kabler blev korrekte udstøbt var det nødvendigt at anvende stavvibratorer i forbindelse med, at det sidste læs beton blev placeret.

Først udlægges betonen i den centrale del af tværsnittet og senere efterfyldes der via kantbjælkerne og tværsnittets vinger. Derefter afrettes overfladen ved at trække en traditionel vibratorbjælke med den korrekte faldopbygning. Det skal bemærkes, at vibratorbjælken benyttes som afretter uden vibrering.

Dette sker indenfor en time efter at betonen er udlagt. Betonen lægger sig i en skrå støbefront med et fald på ca. 1:10. Det vil sige at der opstår en ca. 10 m lang støbefront fra det område, hvor betonen er i færdigt niveau.

Støbetakten fremgår af Fig. 3-2 og den ses at ligge på ca. $30 \text{ m}^3/\text{time}$ svarende til en fremdrift på ca. 6 m/time.



Figur 3-2: Øverst: Støbetakt for brodæk. I alt leveres 33 læs beton à ca. 9 m³ i løbet af ca. 10 timer. Nederst: Betonens alder i klokkeslæt ved ankomst til brostedet. Åbne symboler er alder ved prøveudtagning fra rotérbil og åbne symboler er alder ved prøveudtagning efter pumpe. Hvert datapunkt svarer til et læs beton og tidspunktet langs x-aksen svarer til, at bilen forlader brostedet igen.

Hvert læs beton var ca. en time fra blanding til ankomsten på byggepladsen (Fig. 3-2 nederst). Dette gælder dog ikke de første par læs samt det næstsidste som tog mere end 90 minutter. Ved det næstsidste læs opstod der tekniske problemer på betonværket i Herning og der blev skiftet til Vejlefabrikken. Det betød at næstsidste læs blev næsten to timer inden det blev placeret i broenden. Der blev anvendt stavvibrators til dette læs. Der findes ingen bestemmelse af flydeegenskaberne for det næstsidste læs, hverken på fabrikken eller på brostedet.

Det sidste læs (fra Vejle) var 45 minutter fra blanding til ankomsten på brostedet. På grund af problemer i Vejle opstod der en times støbestop mellem de to sidste læs, hvilket gjorde at også det sidste læs blev vibreret for at undgå støbeskel i spændkablernes forankringszone.

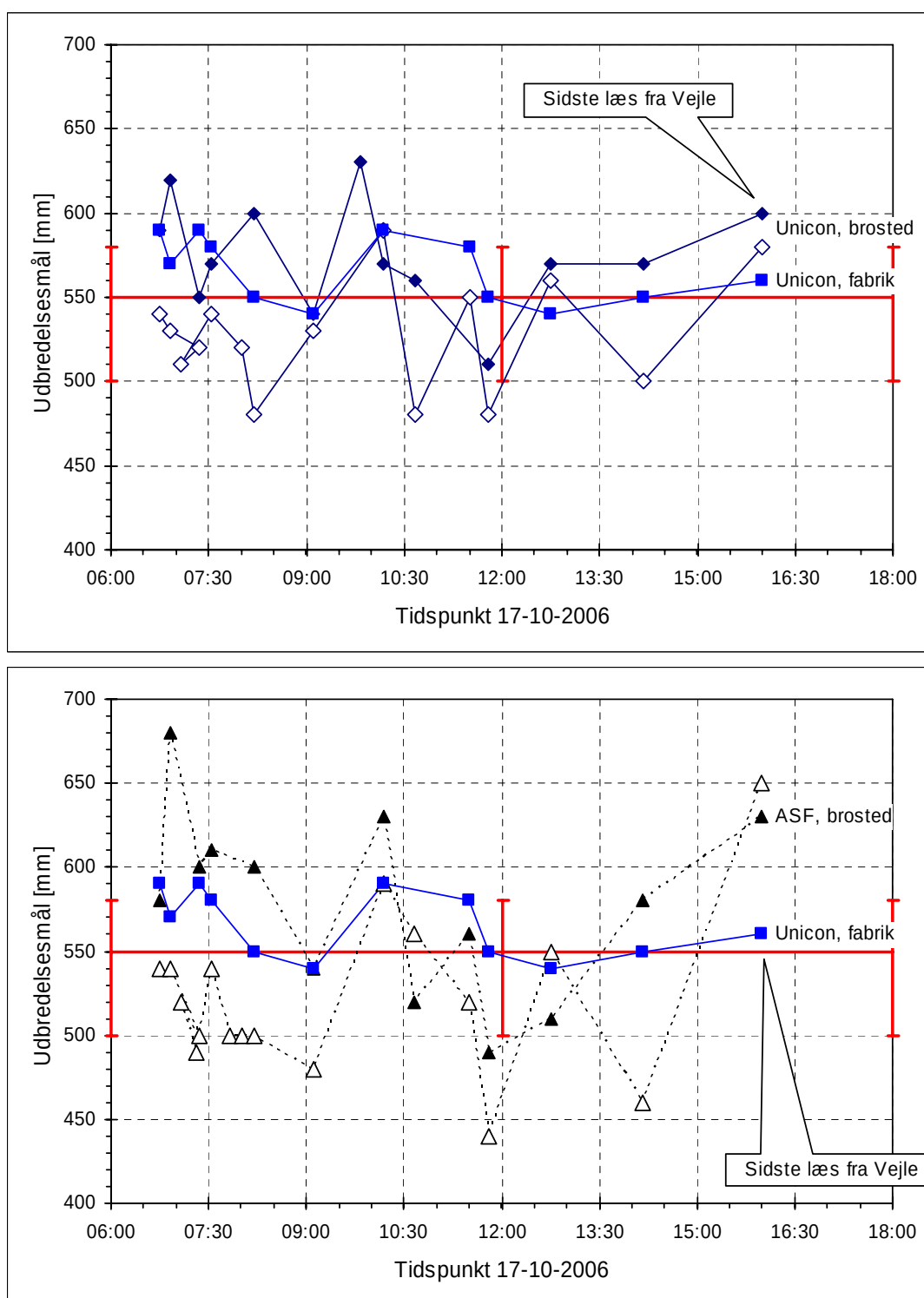
Udtagning af frisk beton fra rotérbilen foregik typisk indenfor 5-10 minutter efter ankomsten til brostedet (Fig. 3-2 nederst). Prøveudtagning efter pumpe foregik typisk ca. 15 minutter senere undtaget ved to lejligheder hvor der gik en halv time og derover mellem de to prøveudtagninger.

Der er ikke skelnet mellem klokketimer og modenhedstimer i det følgende. Registreringer af betonens temperatur gennem hele dagen viser betontemperaturer på 18-22 °C og der er ikke nogen grund til at medtage disse ubetydelige variationer i vurderingerne (Bilag D).

3.3.1 Betonens friske egenskaber

Der blev målt konsistens i form af udbredelsesmål på betonfabrikken såvel som på brostedet. Udbredelsesmålet målt på brostedet af Unicon's laborant og samtidigt af Teknologisk Institut vha. Auto Slump Flow (ASF). Målingerne fremgår af Fig. 3-3. Der er udtaget af hvert 3. læs undtaget under de første timer af støbningen, hvor prøvningsfrekvensen var noget højere. Det ses, at målinger af udbredelsen varierer stærkt hen over dagen og det viste sig svært at bevare udbredelsesmålet indenfor 500 og 580 mm som det var aftalt forud for støbningen. Fabrikkens målinger ligger pænt indenfor dette acceptbånd, men der er eksempler på, at udbredelsesmålet efter transport og pumpe falder udenfor båndet til begge sider. Der findes ikke umiddelbart nogen fornuftig forklaring på dette ud over den variation, som findes i målemetoden for udbredelsesmålet. Der er således ingen åbenbar korrelation mellem det målte udbredelsesmål og betonens alder ved målingen. De to laveste udbredelsesmål angivet i Fig. 3-3 nederst ses dog at hænge sammen med en alder på over 90 minutter på prøvningstidspunktet (jf. Fig. 3-2), hvilket kan være årsagen til udbredelsesmål helt ned til 450 mm. Samtidig ligger disse målinger midt på dagen, hvor temperaturen var højest.

Ved målinger udenfor acceptkravet blev der taget stilling til evt. kassation i hvert enkelt tilfælde. Der blev ikke foretaget kassationer af betonlæs under støbningen.



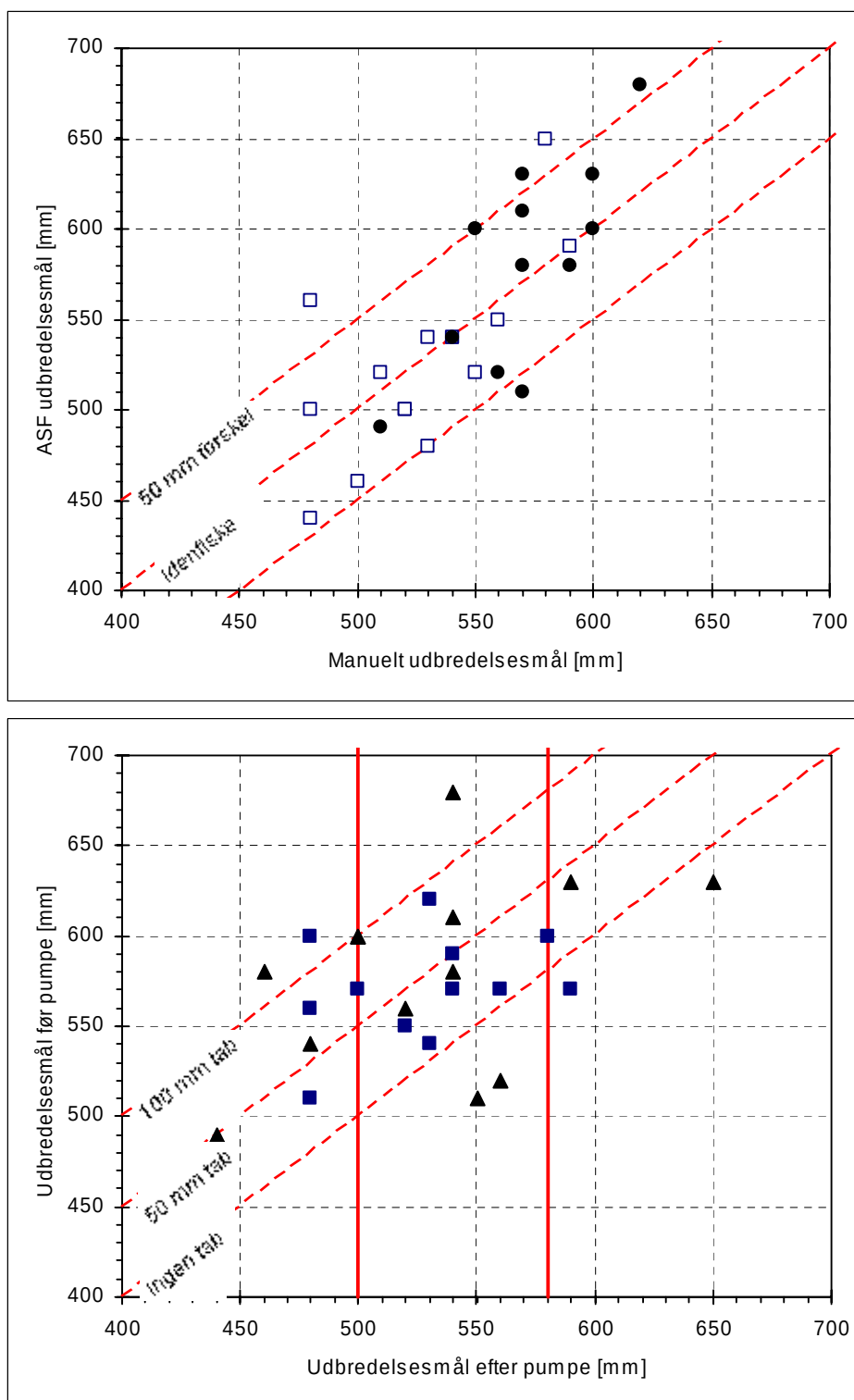
Figur 3-3: Udbredelsesmål bestemt på fabrik samt på brostedet før og efter pumpe (Bilag D). Målinger efter pumpe er vist med åbne symboler.
Øverst: Målinger foretaget af Unicon på fabrik hhv. på brostedet.
Nederst: ASF målinger foretaget på brostedet af Teknologisk Institut.

Det ses endvidere af Fig. 3-3, at også ASF, som er en automatiseret operatøruafhængig måling, udviser en relativ høj variation fra læs til læs. Figur 3-4

øverst viser, hvordan ASF og de manuelle målinger, udført af Unicon på brostedet, passer sammen. Det ser ud til at man må forvente op til omkring 50 mm forskel i målinger på tilsyneladende ens betoner. I omtrent halvdelen af målingerne ligger forskellen på under 25 mm.

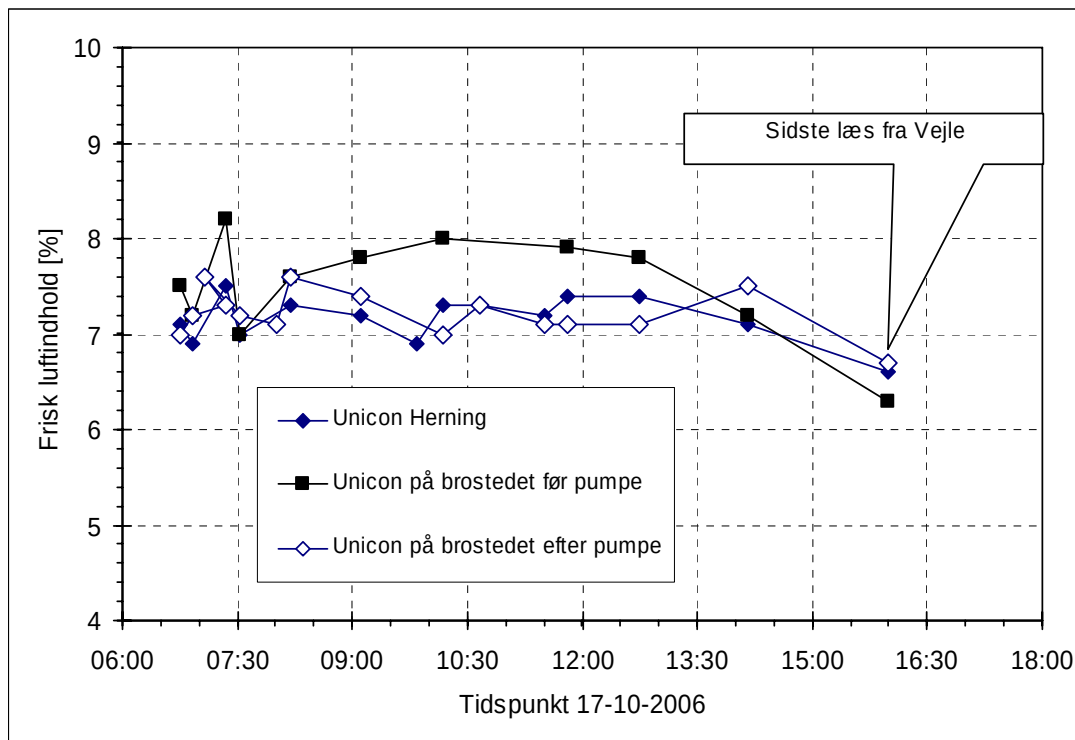
Det generelle billede af målingerne viser dog et pumpetab på op til godt 100 mm (Fig. 3-4 nederst). Der er desuden enkelte observationer af tilvækst igennem pumpen.

Konsistenstabet igennem pumpen er yderligere illustreret i Fig. 3-4 nederst. Der blev konstateret konsistensforøgelser på op til 50 mm i 4 målinger, i 9 målinger var der op til 50 mm konsistenstab og de resterende 12 målinger lå over 50 mm.



Figur 3-4: Øverst: Udbredelsesmål manuelt vs. ASF. Lukkede symboler = før pumpe og åbne symboler = efter pumpe. Nederst: Konsistenstab registreret igennem pumpen. Under diagonalen er der tale om en tilvækst igennem pumpen. De lodrette røde linier angiver acceptbåndet. Trekanten = ASF. Firkanten = Unicon.

Betontemperatur, densitet og luftindhold blev ligeledes bestemt af Unicon på brostedet. sidstnævnte fremgår af Fig. 3-5. Det ses at der på intet tidspunkt var problemer med at holde luftindholdet over det krævede niveau på 4,5 %.



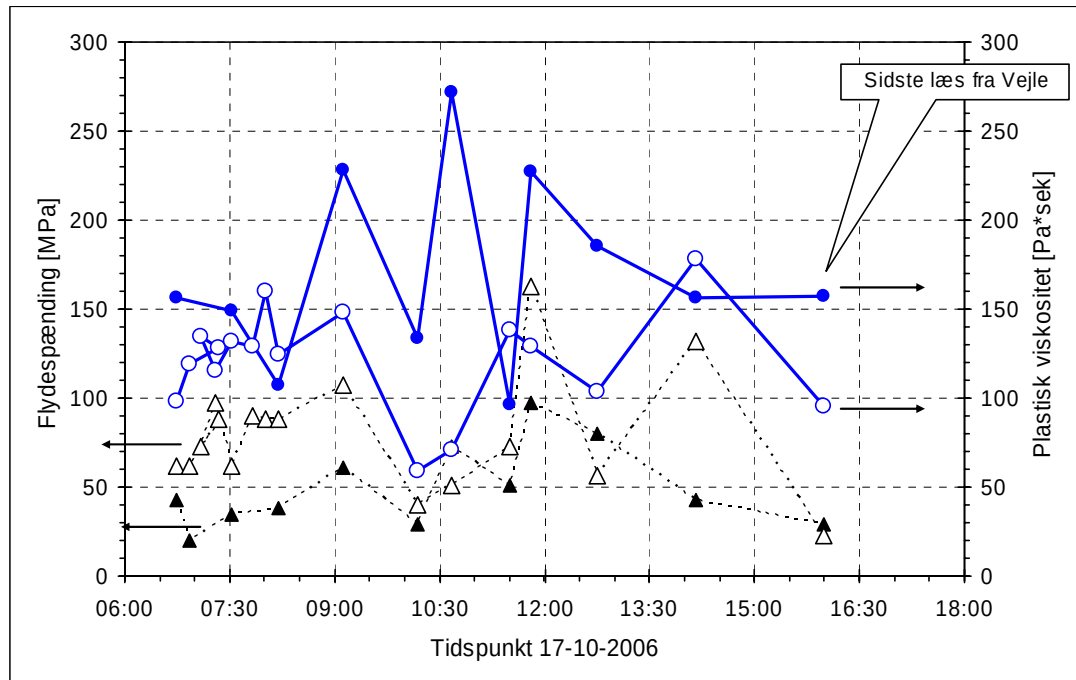
Figur 3-5: Luftindhold bestemt på fabrik samt på brostedet før og efter pumpe vha. pressure-meter.

3.3.2 Betonens flydeegenskaber

Flydeegenskaberne for SCC beskrives oftest vha. flydespændingen og den plastiske viskositet. En høj flydespænding giver en stiv beton, som er i stand til at stå med en given hældning. En høj viskositet giver en sej langsomtflydende beton, som er svær at trække i og flytte på. Det halvautomatiske måleprincip 4C-uto Slump Flow, som er udviklet i SCC-Konsortiet, er i stand til at estimere disse to parametre foruden bestemmelse af udbredelsesmålet. Figur 3-6 viser 4C-ASF målingerne svarende til de udbredelsesmål som er angivet i Fig. 3-3.

Variationerne i udbredelsesmålet er til dels afspejlet i forskydningsspændingen således at et stort udbredelsesmål resulterer i en lille flydespænding. Variationerne i Fig. 3-3 nederst slå derfor igennem på flydespændingerne i Fig. 3-6. Billedet nuanceres desuden, når kendskabet til viskositeten anvendes. Det ses fx, at de relativt høje udbredelsesmål som blev registreret (efter pumpe) omkring kl. 10:30 var fulgt af en lav viskositet. Samtidig var der meldinger fra støbefolkene om, at netop disse læs havde tendens til at løbe og, at støbefronten var meget levende og svær at holde under kontrol. Dette var et udtryk for en øget risiko for separation og pasta-afblanding langs støbefronten. Det samme var tilfældet med det sidste læs fra Vejle, men pga. ende-

forskallingen var det ikke svært at kontrollere støbefronten på dette tidspunkt.



Figur 3-6: Flydeegenskaber bestemt på brostedet før og efter pumpe vha. 4C-ASF. De stiplede linier med trekanter er flydespænding og de fede linier er plastisk viskositet. Målinger efter pumpe er vist med åbne symboler.

3.3.3 Udførelsesmæssige aspekter

Under selve støbearbejdet blev der ikke observeret nogen tendens til egentlig separation, men der var et par læs som udgjorde en risiko som nævnt i forrige afsnit omkring flydeegenskaberne. Der var dog tendens til at armeringsbøjlerne, som definerer tværsnittets kerne udgjorde en hindring for at betonen kunne flyde frit fra den centrale del af tværsnittet og ud i vingerne (Fig. 3-7).

Derfor blev der først fyldt op i den centrale del indtil omkring den halve tværsnitshøjde, hvorefter der blev pumpet beton i vingerne, som flød ud imod den centrale del (Fig. 3-8 og 3-9). Endeligt blev der jævnlige pumpet lag af beton på den skrå støbefront så der ikke opstod tendens til kolde støbeskel. Ved at fylde beton på hele støbefronten blev det samtidig sikret, at der var tilstrækkelig bevægelse i betonen til at omstøbe armering og afstandsklodser.



Tværsnittets kerne,
ca. 1x2 m

Væg af bøjler

Vinge med aftagen-
de tværsnitshøjde.

Figur 3-7: Foto taget på tværs af broen ved skrå støbefront. Brotværsnittet er fyldt over halvvejs op.

Figur 3-8 viser vibratorbjælken, som er monteret på meder med den korrekte dæklagstykkelse. Vibratorbjælken trækkes således frem manuelt ovenpå armeringen for at afrette betonen mellem kantsbjælkeopspringene til de foreskrevne faldforhold. Det skal bemærkes, at vibratorbjælken ikke var tændt under afretning og at der således ikke foregik nogen vibrering i overfladen.



Dette område er
kostet.

Dette område er
afrettet.

Dette område
afventer afret-
ning.



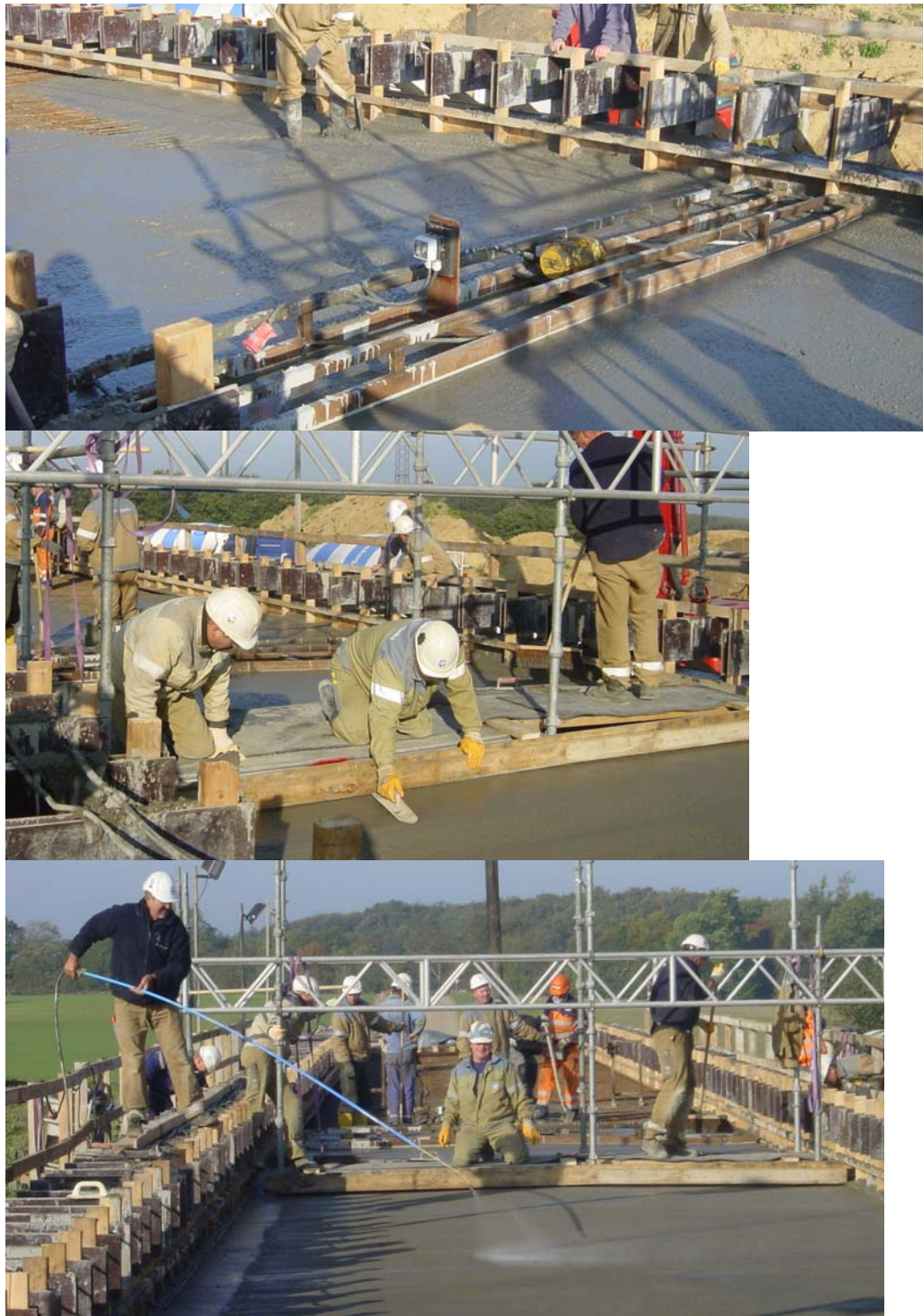
Figur 3-8: Øverst: Forrest foregår fyldning af beton og grovafretning. Bagved manden med skovlen ses vibratorbjælken, som definerer brodækkets tværfald. Derefter ses en arbejdsplatform som benyttes til pudsearbejdet Nederst ses vibratorbjælken og detaljen omkring dybdelinien.



Figur 3-9: Fyldning af beton i tværsnittets centrale del. Øverst til højre ses den trillebør, som blev anvendt til at fragte betonprøver fra pumpen til kontrollanterne på jorden.

Efter afretning er der tydelige sten i overfladen og der foretages manuelt pudsearbejde fra en flytbar arbejdsplatform umiddelbart efter afretningen (Fig. 3-10). Pudsearbejdet var nødvendigt for at opnå en tilstrækkelig jævn overflade til kostning. Kantbjælkernes overside pudses ligeledes i hånden. Der blev fra betonarbejdernes side bemærket, at pudsearbejdet var hårdere end ved traditionel beton pga. en sejere og mere tyggegummiagtig konsistens. Dermed udgjorde pudsearbejdet af såvel brodæk som kantbjælker flæskenhalsen mht. støbningens fremdrift.

Til slut påføres curing compound og endeligt plastikafdækning efter nogle timer (Fig. 3-11).



Figur 3-10: Øverst: vibratorbjælke som benyttes til afretning uden vibrering.
Midterst: pudsearbejdet efter afretning.
Nederst: påføring af curing compound (Brocure) på det kostede areal.



Figur 3-11: Afdækning med plastik foregår bagerst i billedet.

3.3.4 Efter afforskalling

Der er registreret eksempler på utilstrækkelig omstøbning af afstandsklodser ligesom det var tilfældet ved 4. prøvestøbning 28-09-2006 (afsnit 2.3.2 og Fig. 3-13). Der er efterfølgende foretaget en reparation af de mest synlige defekter og det forventes ikke at der vil være nogen synlig forskel på SCC Demobroen og tilsvarende konventionelle betonbroer.

Broens overside med kostet overflade og kantbjælker er generelt konstateret at være af høj kvalitet (Fig. 3-12).



Figur 3-12: Færdig overside med kantbjælkeopspring og kostet overflade.



Figur 3-13: Eksempler på støbefejl på brounderside.



4. Hærdesimuleringer

Unicon A/S udførte temperatursimuleringer på brodækstøbningen forud for støbemødet 12-10-2006. Beregningerne er udført vha. 4C-Temp. Beregningen og den forudsætninger fremgår af Bilag F.

Der påføres curing compound straks efter håndglitningen som udtørningsbeskyttelse og senere afdækkes der med et lag plast, når betonoverfladen kan bære dette. Denne afdækning etableres ca. 3 timer efter støbning. Samtidig afdækkes med presenning for at sikre imod underafkøling i den første nat. Dagen efter støbningen afdækkes med yderligere en presenning.

Støbningen foregik på en klar efterårsdag med sol og temperaturen varierede fra omkring 5 °C ved støbningen start kl. 6 til 12-15 °C midt på dagen. Der var stort set vindstille på støbedagen 17-10-2006.

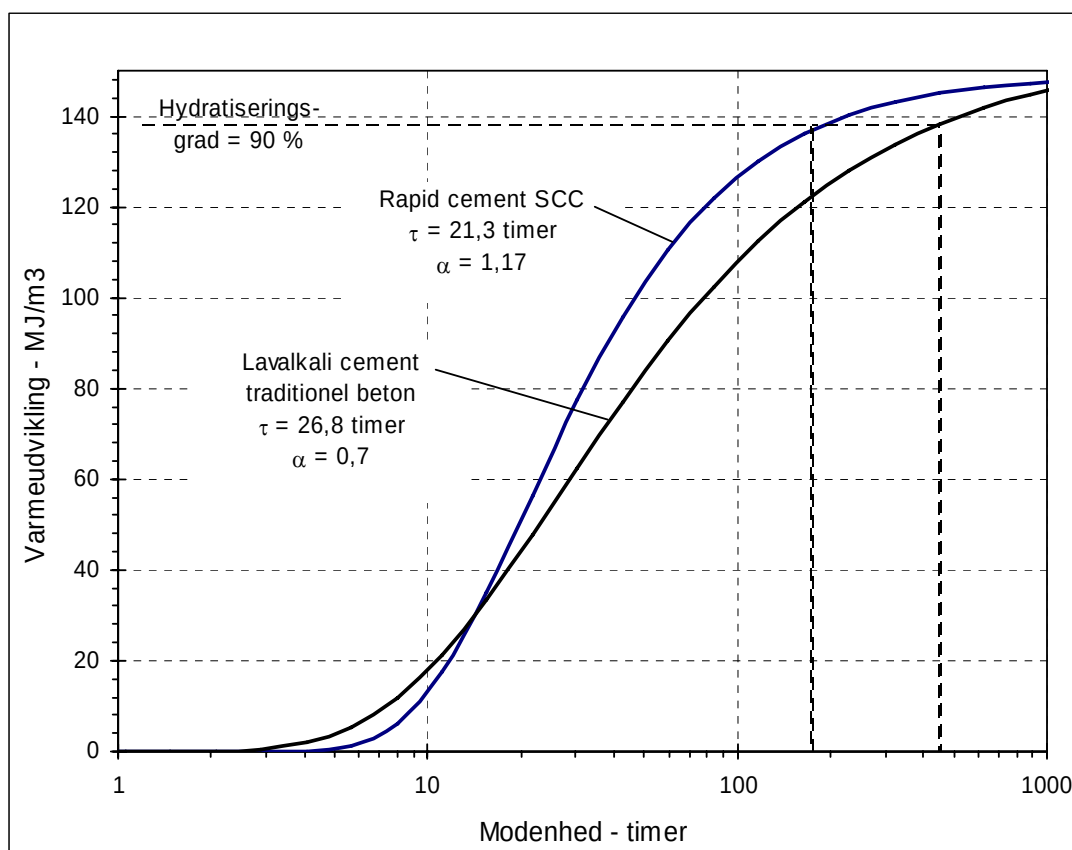
Som en del af forprøvningsarbejdet blev der målt varmeudvikling i hokasse på den anvendte SCC fra 3. prøvestøbning 08-08-2006. Figur 4-1 viser varmeudviklingen i form af det analytiske tre-parameter-udtryk:

$$Q = Q_{\infty} \exp\left(-\left(\frac{\tau}{M}\right)^{\alpha}\right)$$

Den totale varmeudvikling er omsat til en m³ beton ud fra recepterne i Tabel 2 og Tabel 3. Slutniveauet omkring 150 MJ/m³ er ens for de to betonrecepter.

Det ses tydeligt, hvordan Rapid cement får varmeudviklingen til at foregå i et betydeligt hurtigere tempo end Lavalkali cement. Dette udmønter sig bl.a. i, at tidsforbruget til at opnå en hydratiseringsgrad på 90 % reduceres fra ca. 450 til 175 modenhetstimer. En hydratiseringsgrad på 90 % er det niveau som kræves i DS 482 inden udtørningsbeskyttelsen fjernes. I AAB er krævet, at udtørningsbeskyttelsen bibeholdes indtil mindst 180 modenhetstimer, hvilket igen modsvarer ca. 90 % hydratisering.

Modenheden på 180 modenhetstimer opnås overalt i brotværsnittet ca. 8 døgn efter støbning (Bilag F).



Figur 4-1: Varmeudvikling målt på SCC baseret på Rapid cement (måling 08-08-2006 på betonfabrikken i Herning). Til sammenligning er der angivet en varmeudvikling på basis af traditionel E40 beton, som den er benyttet til midtersøjle og midterfundament (recept ses i Tabel 2).

Hærdeberegningerne i Bilag E er baseret på Rapid cement SCC med parametre som angivet i Fig. 4-1. Nedenfor er givet en opsummering af de væsentligste resultater. Der henvises til Bilag F for yderligere detaljer.

Den maksimale temperatur i tværsnittets midte er bestemt til 68 °C efter ca. 1½-2 døgn. Den maksimale temperaturforskel mellem brotværsnittets middeltemperatur og overfladetemperaturen udgør 14,5 °C. Begge disse temperaturer er i overensstemmelse med kravene i DS 482.

Der målt temperaturer under og efter støbningen af brodæk 17-10-200 vha. indstøbte temperaturfølere. Disse registreringer findes i Bilag E med angivelse af placering af følerne. Registreringerne starter 17-10-2006 kl. 06:00 og slutter 6 dage senere 23-10-2006 kl. 12:00.

Der er målt i to tværsnit samt i den vestlige broende omkring forankringszonen af spændkablerne. Sidstnævnte anvendtes til at fastslå tidspunktet for kabelopspænding under hensyntagen til betonens modenheds og styrkeud-

vikling. Bemærk at den målte styrkeudvikling for den anvendte SCC recept findes på sidste side i Bilag E.

Temperaturregistreringerne i de to tværsnit viser følgende:

- Maksimum temperatur registreres i brotværsnittets indre til næsten 68 °C. Dette temperaturniveau optræder efter godt et døgn, hvorefter afkølingen starter.
- Temperaturer i det indre af brotværsnittet bibeholdes over 60 °C i ca. 1½ døgn.
- I tidsrummet for den maksimale temperatur i tværsnittets indre er temperaturen omkring armeringen i brodækkets overside 16-17 °C lavere, hvilket er i overensstemmelse med temperatursimuleringerne.





5. Litteratur

Vejregler, *Almindelige Arbejdsbeskrivelser AAB Betonbroer, Betonarbejde*, Vejdirektoratet, December 2004.

SCC-konsortiet, *Luftporestruktur og frostbestandighed for SCC*, Teknologisk Institut, marts 2007.

