

CENTER FOR GRØN BETON

CENTER FOR GRØN BETON

center for ressourcebesparende betonkonstruktioner

center for ressourcebesparende betonkonstruktioner

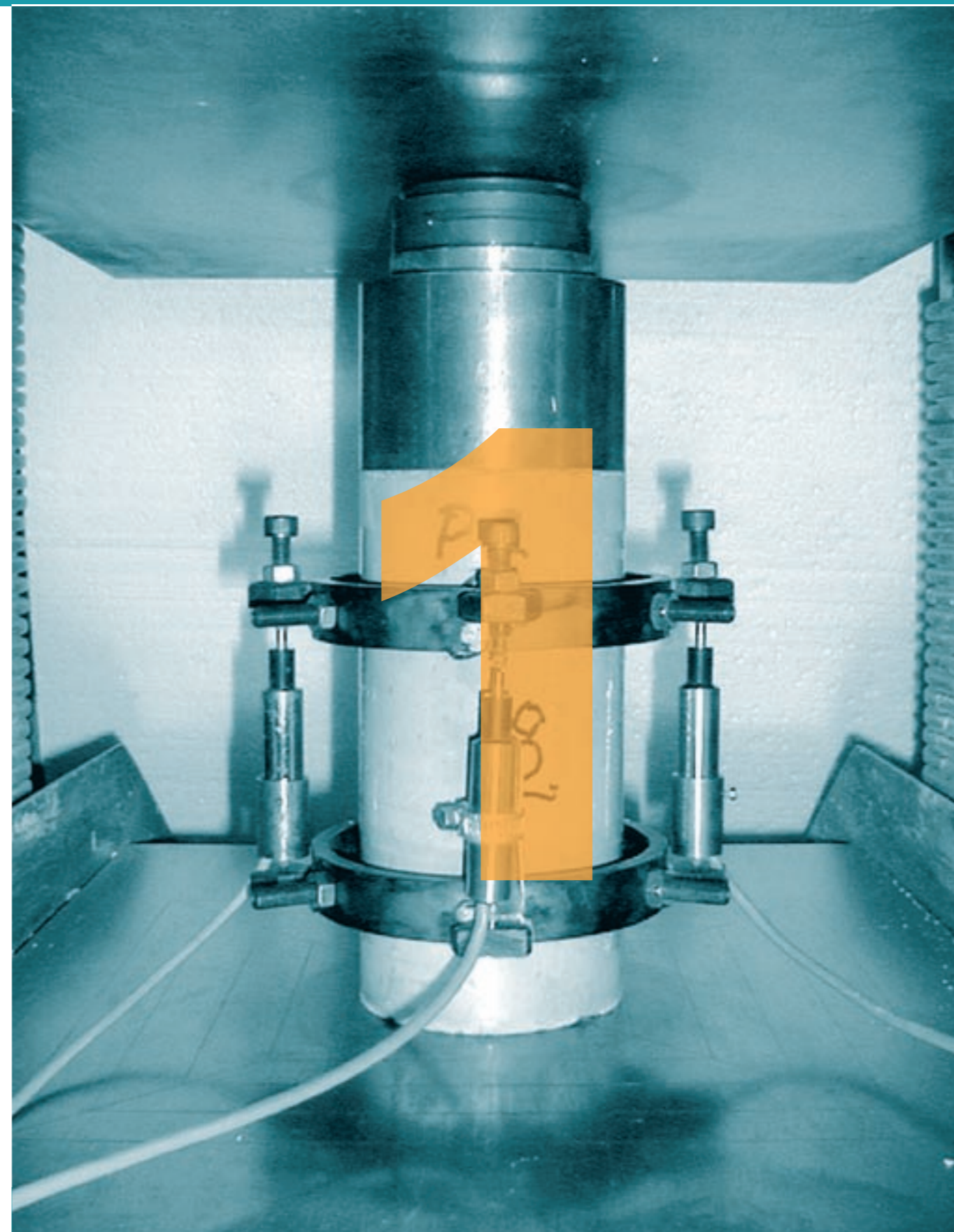
Karsten Tølløse
Teknologisk Institut
December 2002

MILJØSCREENING AF BETONBRO

MILJØSCREENING AF BETONBRO



1	Indledning	1
1.1	Baggrund og formål	2
1.2	Centerkontraktens miljømål og miljøbetingelser	2
1.3	Evaluering af miljømål og miljøbetingelser	4
2	Beskrivelse af konstruktionsløsninger for bro 34	5
3	Generelle forudsætninger	9
3.1	Generelle afgrænsninger	10
3.2	Levetid og holdbarhed	10
3.3	Råmaterialer og opførelse	11
3.4	Drift, vedligehold og reparation	11
4	Vurdering af opfyldelse af miljøbetingelser	13
5	Vurdering af opfyldelse af miljømål	17
5.1	CO ₂ -emission til luften	18
5.2	Brug af nye restprodukter	21
5.3	Reducere brugen af ikke fornyelige brændsler til cementproduktion	22
6	Øvrige forhold - knappe ressourcer	25
7	Konklusion	27
8	Referencer	30
A	Anneks A	31
B	Anneks B	32
	Trykrensning af kantbjælker	
	Trykrensning af mellemsøjler	
	Udskiftning af bløde fuger	
	Udskiftning af stenfyldte fuger	
	Overfladebehandling af søjler og kantbjælker	
	Udskiftning af asfaltslidlag, brobelægning og fugtisoleringslag	
	Udskiftning af betonbelægning	
	Behugning og udskiftning af dæklag på mellemsøjler	
	Behugning og udskiftning af dæklag på kantbjælker	
	Demolering og bortskaffelse	



1.1

Baggrund og formål

Beton anvendes i store mængder og er vel nok verdens vigtigste konstruktionsmateriale. Alene i Danmark bruges der årligt ca. 8 mio. tons beton. Det svarer til 1,5 tons beton pr. indbygger. Beton er allerede i dag et miljøvenligt materiale. Den danske cement- og betonbranche har i mange år gennemført forskning og udvikling, der har medført en betydelig reduktion af miljøbelastningen ved cement- og betonproduktion. Men fordi der bruges meget beton, er der stadigvæk god grund til at arbejde med at gøre betonkonstruktioner endnu "grønnere". Øget anvendelse af beton kan på denne måde bidrage til opfyldningen af de danske mål vedr. bæredygtig udvikling.

Dette var baggrunden for, at en række virksomheder i 1998 gik sammen i Center for Ressourcebesparende Betonkonstruktioner. Centret er et såkaldt centerkontraktprojekt, der frem til udgangen af 2002 medfinansieres af Ministeriet for Videnskab, Teknologi og Udvikling. Samarbejdet har gjort det muligt systematisk at undersøge og dokumentere grønne betoners egenskaber samt betydningen af fx at vælge grønne konstruktionstekniske løsninger.

Formålet med nærværende rapport er at dokumentere de miljøforbedringer, der er opnået ved materialevalg og konstruktionsløsninger, som er udviklet og/eller afprøvet under centerkontrakten Center for ressourcebesparende betonkonstruktioner (Grøn Beton).

1.2

Centerkontraktens miljømål og miljøbetingelser

Under centerkontrakten er opstillet specifikke miljømål og -betingelser primært ud fra samfundets miljøprioriteringer. Såvel mål som betingelser gælder for betonkonstruktionernes samlede livscyklus. En betontype/-konstruktion skal opfylde mindst ét af miljømålene og alle miljøbetingelser.

Centerkontraktens opstillede miljømål er, at:

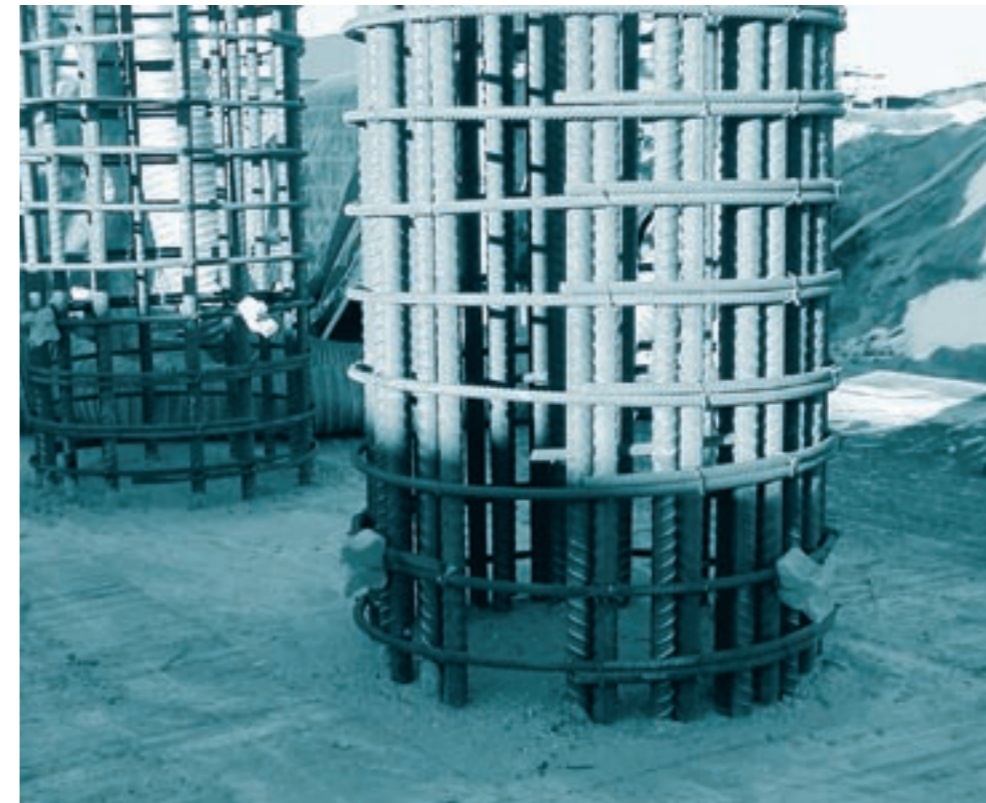
- Reducere CO₂-emissioner med 30%.
- Nyttiggøre brug af restprodukter som tilslag svarende til 20 vægt-% af recepten.
- Genanvende betonindustriens egne restprodukter, der ellers skulle have været deponeret.
- Introducere nye restprodukter, der ikke tidligere er anvendt til betonproduktion, som supplement til nu kendte.
- Reducere forbrug af ikke-fornyelige brændsler ved at øge anvendelsen af fornyelige brændsler i cementproduktionen til 10%.

Centerkontraktens opstillede miljøbetingelser for alle betontyper/-konstruktioner er, at:

- Undgå stoffer fra Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer.
- Sikre betonkvalitet, så det fortsat er muligt at genanvende 95% af affaldet.
- Sikre spildevandskvaliteten fra produktionen af beton, så det er muligt at genanvende

spildevandet i beton i samme omfang, som det er muligt i dag.

- Undgå forøgelse af udledninger af miljøbelastende stoffer i spildevandet.
- Undgå øgede støj- og støvbelastninger ved produktion, udstøbning og nedrivning af beton.



Søjlearmering i Bro 34 opført i Tørring.

Miljømålene og -betingelserne er opstillet på baggrund af de danske politiske miljømålsætninger og en række tekniske overvejelser. Endvidere er Grøn Betons miljømål baseret på den nuværende produktsammensætning i fabriksbetonproduktionen. Selvom nogle af målene er rimeligt specifikke som fx at reducere CO₂-emissionen med 30%, så har det dog også været en del af betragtningen at CO₂-reduktionen samtidig medfører en reduktion i brugen af ikke-fornyelige brændsler og i udledningen af NO_x og SO₂.

Evaluering af miljømål og miljøbetingelser

Evalueringen af de opstillede miljømål og -betingelser sker med udgangspunkt i Grøn Betons demobro, Bro 34 på Ris-Ølholm strækningen. Denne bro er, for forsøgets skyld, opført med fire forskellige betontyper. Som reference er regnet med, at den ellers ville være opført i referencebetonen AR.

Som titlen "Miljøscreening af betonbro" antyder, er der ikke tale om en fuldstændig livscyklusanalyse, men blot en miljømæssig screening, hvilket skal forstås som en livscyklusanalyse, hvor der alene ses på udvalgte parametre, samtidig med, at der primært fokuseres på de parametre, der giver anledning til forskelle mellem de valgte løsninger.

Sammenligning af resultater fra livscyklusanalyser er i øvrigt overordentligt kompliceret. Dette skyldes bl.a.:

- at de funktionelle enheder oftest er så bredt beskrevne, at produkter, der reelt har vidt forskellige egenskaber, kan opfylde den funktionelle enhed; men ikke uden videre erstatte hinanden;
- at de afgrænsninger i livscyklusanalyserne, der nødvendigvis skal foretages, vil påvirke resultaterne;
- at livscyklusanalyserne oftest er udarbejdet på baggrund af data af meget varierende kvalitet. F.eks. kan data for forskellige materialer være indhentet på forskellige tidspunkter, hvor der i den mellemliggende tid kan være udviklet ny teknologi, som medfører andre miljøbelastninger.

Oftest er der så store usikkerheder på de samlede resultater, at der skal være markant forskel på de opnåede værdier, før man kan udtale sig om, hvorvidt det ene er miljømæssigt bedre eller værre end det andet. Endvidere vil det ofte være således, at nogle produkter har størst miljøbelastning mht. drivhuseffekt, mens andre måske har det mht. forurening, human toksicitet eller fx ressourceforbrug.

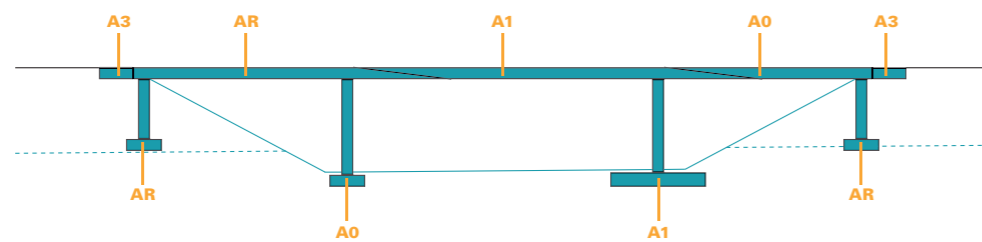
Da der her er valgt at fokusere på nogle få parametre, dvs. miljømålene og -betingelserne, er det således heller ikke muligt at samle påvirkninger til ét tal, således som det i nogle tilfælde praktiseres.

Den funktionelle enhed er en bro, svarende til demobroen, således som den er opført og yderligere beskrevet i kapitel 2.

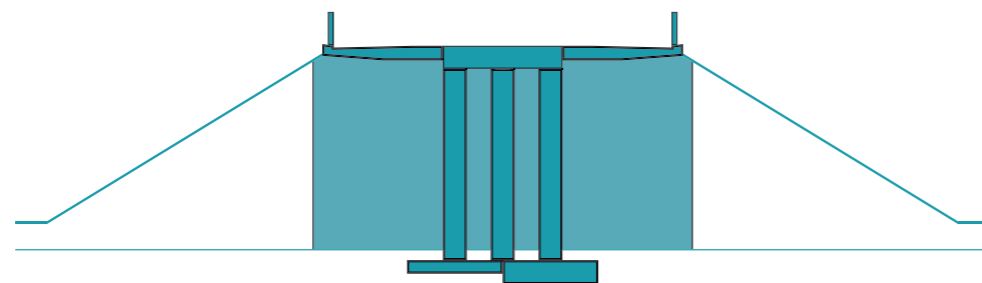
Miljøpåvirkningerne beregnes for demobroen og herudover beregnes de tilsvarende data for en referencebro med de hidtil normale løsninger. Endelig beregnes en miljøscreening for løsninger svarende til den opførte bro, men med udgangspunkt i, at der var anvendt den samme betontype i hele konstruktionen. Dette er gjort for 3 forskellige nyudviklede betontyper i miljøklassen aggressiv.



Bro 34 er en traditionel tosporet bro over en motortrafikvej. Broen har de ydre mål: længde 41,25 m og bredde 9,92 m. Frihøjden under broen er 4,72 m. Broen er bygget med 2 rækker mellemsøjler med 3 søjler i hver række og 2 rækker endesøjler, se **Figur 1** og **2**.



Figur 1 Længdesnit af bro 34.



Figur 2 Tværsnit af bro 34.

Søjlerne er konstrueret således, at den ene række mellemsøjler er med rustfast armering og den anden række mellemsøjler er med almindelig sort armering. Begge de to endesøjlerækker er med sort armering.

For forsøgets skyld er der anvendt fire forskellige betontyper i bro 34, nemlig betontyperne AR, A0, A1 og A3.

De anvendte betontyper er nærmere beskrevet i **Tabel 1**, og er yderligere beskrevet i **Anneks A**.

Betontype	AR	A0	A1	A3
Beskrivelse	Referencebeton med Lavalkali Sulfatbestandig cement	Som AR men med Ny RAPID® cement (nu kaldet RAPID® cement)	Beton med højt flyveaskeindhold (40% af pulvermængde) og Ny RAPID® cement	Som A0 men med slamaske i stedet for flyveaske

Tabel 1 Kort beskrivelse af anvendte betontyper.

AR, A0 og A1 er anvendt i brodækket, mens A3 er anvendt i tilsætningspladerne. AR er anvendt i endesøjlerne, mens AR, A0 og A1 er anvendt i hver én søjle i rækken af mellem-



Her gennemføres afkostningsforsøg, da brodækket på Bro 34 opføres uden isolering.



Bro 34 set nedefra.

søjler, der er opført med rustfast armering og i hver én søjle i rækken af mellemsøjler med sort armering.

Bro 34 er opført uden fugtisolering og asfaltbelægning, idet der køres direkte på betonen.

Referencebroen regnes opført i store træk som bro 34, men med en traditionel sort armering overalt. Endvidere er brodækket et traditionelt brodæk opbygget med fugtisolering og tre lag asfalt (drænlag, bærelag og slidlag) samt bløde fuger.

Udover Bro 34 og referencebroen (benævnt AR) er der tillige regnet på en række løsninger benævnt svarende til bro 34, men hvor armering i mellemsøjler og kantbjælker regnes for at være rustfast armering. Endvidere regnes der med, at der kun er anvendt én af betontyperne A0, A1 og A3 i broen. Disse løsninger benævnes A0, A1 henholdsvis A3.



Der er i miljøscreeningerne kun indregnet en del af miljøbelastninger. Typisk dem der giver udslag mht. forskelle, når konstruktionerne skal vurderes i forhold til hinanden.

3.1

Generelle afgrænsninger

I beregninger indgår ikke transport af råjord, grus og forme til konstruktionen af broen, idet disse forudsættes at være ens uanset den valgte løsning. Mht. råjorden giver dette ikke anledning til nogen fejl på forskellen af belastninger fra de forskellige løsninger. Men mht. grus og forme er der en mindre forskel, idet der forventes at blive anvendt 3480 m³ grus til en traditionel bro med sort asfalt brobelægning, mens det for de andre løsninger er 3280 m³. Tilsvarende gælder for formene, at der skal anvendes 664 m² henholdsvis 670 m². Der er altså udeladt nogle påvirkninger, som hvis de blev regnet med, ville give broen med sort belægning en øget CO₂-belastning. Årsagen til udeladelsen er, at effekten på beregningerne ikke forventedes at stå mål med arbejdet at fremskaffe data for miljøbelastningerne. CO₂-emissionen fra produktionen af el til produktion af cement er ikke medregnet. Der anvendes lidt mere el til produktion af traditionel Lavalkali Sulfatbestandig Cement i forhold til Ny RAPID® Cement /10/, som er anvendt ved de alternative løsninger.

3.2

Levetid og holdbarhed

Betonerne AR, A0, A1 og A3 er blevet testet mht. holdbarhed /8/, dvs.:

- chloridindtrængning
- karbonatisering
- frostbestandighed
- alkaliskreaktivitet

Den generelle vurdering af de grønne betoners levetid er, at det er muligt at fremstille grøn beton til aggressiv miljøklasse, der er mindst lige så holdbar som traditionel beton, hvis den opfylder de samme krav, der stilles til traditionel beton, og det gør de grønne betoner ud fra de holdbarhedsprøvninger, der er foretaget. Der er derfor regnet med, at de grønne betoner har samme levetid som referencebetonen.

3.3

Råmaterialer og opførelse

Mængden af råmaterialer, der er anvendt til opførelsen, er som angivet i Notatet Hovedmængder for en bro som projektets demobro, /9/. Belastningen til selve opførelsen af betonkonstruktionen er beregnet ud fra data fra branche analyse beton /2/ svarende til en kantbjælke. Data for CO₂-emission af betonens delmaterialer er alle, bortset fra cementen baseret på Brancheanalyse Beton /2/. Data for cementen stammer fra Aalborg Portland /10/, hvor CO₂-emissionen fra alternative brændsler ikke er medregnet, idet disse regnes for CO₂-neutrale. Data for CO₂-emissionen ved produktion af armering er for den sorte arme-



Afretning af brodæk på Bro 34. Brodækket blev udstøbt med tre forskellige betontyper.

rings vedkommende hentet fra SimaPro /15/, mens data for den rustfaste armering er hentet fra Håndbog i miljøvurderinger af produkter /1/, der er baseret på UMIP. Der er cirka en faktor 3 til forskel på de to CO₂-emissioner. Der er indregnet transport af betonen og dens delmaterialer, mens dette ikke er tilfældet for asfalten. Bidraget er dog lille, idet det udgør ca. 3-5% af belastningen ved produktion af beton.

Drift, vedligehold og reparation

I **tabel 2** er angivet forventet drift, vedligehold og reparation for de enkelte broløsninger. Der er regnet med et drift- og vedligeholdelsesprogram, der tager udgangspunkt i programmet, der er beskrevet i U4-Rapporten, Drift og vedligehold (D&V) af grønne betonkonstruktioner /11/. Frekvenserne i vedligeholdelsesprogrammet er dog ikke de samme som angivet i U4-Rapporten. De ændrede frekvenser er baseret på interviews af en repræsentant fra Vejdirektoratet /5/, som fandt, at vedligeholdelsesprogrammet havde en høj frekvens i forhold til, at der var tale om en ny bro, som formentlig vil have et mindre vedligeholdelsesprogram end beskrevet i U4-Rapporten.

Herudover er det en afgørende faktor, om der er anvendt rustfast armering eller ej i den enkelte konstruktionsdel. I de tilfælde, hvor der er anvendt rustfast armering, er der regnet med et reduceret vedligehold i forhold til tilsvarende konstruktioner med sort armering. Vedligeholdelsesprogrammet er endvidere tilpasset de aktuelle behov, dvs., at der fx ikke er regnet med udskiftning af fugtisolering, drænlag og belægning hvert 25. år i demobroen, idet disse lag er udeladt i denne konstruktion. Til gengæld er der indregnet udskiftning af betonen på dækket hvert 40. år.

3.4

År mellem udførelse	Operation	34	AR	A0	A1	A3
1	Trykrensning af kantbjælker		X			
1	Trykrensning af alle mellemsøjler		X			
1	Trykrensning af halvdelen af mellemsøjlerne (med sort armering)	X	X	X	X	X
10	Udskiftning af bløde fuger		X			
12,5	Udskiftning af stenfyldte fuger	X	X	X	X	X
12,5	Overfladebehandling af alle søjler		X			
12,5	Overfladebehandling af halvdelen af søjlerne (sort armering)	X	X	X	X	X
12,5	Overfladebehandling af kantbjælke		X			
12,5	Udskiftning af asfalt slidlag		X			
25	Udskiftning af fugtisolering og brobelægning		X			
40	Udskiftning af betonbelægning	X	X	X	X	X
40	Behugning og udskiftning af dæklag på alle mellemsøjler		X			
40	Behugning og udskiftning af dæklag på halvdelen af mellemsøjlerne (sort armering)	X	X	X	X	X
40	Behugning og udskiftning af dæklag på kantbjælker (sort armering)		X			
100	Behugning og udskiftning af dæklag på kantbjælker	X	X	X	X	X

Tabel 2 Planlagte vedligehold der medregnes i miljøbelastningerne.

Belastningen fra en reparation/vedligehold er kun medtaget i det omfang operationen forventes udført, fx vil man typisk ikke foretage den store reparation hvert 25. år, hvis man netop har plan om at nedrive broen. I beregningerne er dette søgt indregnet ved fx ikke at medregne belastningen fra udskiftning af belægningen, såfremt broen har en levealder på 1-24 år, mens der kun regnes med belastningen fra én udskiftning af belægningen, såfremt broen har en levetid på 25-49 år, belastningen fra to udskiftninger ved levetid 50-74 år etc. Dette medfører, at i grafer mv. er der anvendt levetider på 74 år, hvilket forventes at give det mest retvisende billede.

Ved udskiftning af dele af betonkonstruktionen er der regnet med, at der anvendes samme betontype som den, der borthugges. Ved udskiftning af betonbelægning på brobanen og mellemsøjler hugges der ned til 1 cm bag armeringen. Dvs. dæklag samt tykkelse af den langsgående og tværgående armering plus 1 cm, fjernes og genudstøbes. Belastningen fra den nye beton medregnes, ligesom belastningen ved selve udførelsen af reparationen medregnes svarende til den, der anvendes ved reparation af kantbjælker, og endelig regnes der med, at den borthuggede beton køres 50 km væk. Ved udskiftning af betonen på kantbjælken indregnes samme forhold som ovenfor. Der regnes dog kun med, at det er den vandrette overside (0,46 m) og den lodrette yderside (0,413 m) i hele broens længde, der borthugges. Der er ikke indregnet nogen miljøbelastning fra nedrivning og bortskaffelse af broerne, ligesom der ikke er indregnet nogen miljøbelastning fra den løbende bortskaffelse af de dele, der fx borthugges, bortset fra en transport med lastbil på 50 km. Denne udeladelse medfører, at referencen broen blive bedømt forholdsvis mildere, idet der dels anvendes større mængder beton, armering og asfalt til opførelsen og dermed også til nedrivning og bortskaffelsen, ligesom der også på denne brotype er et større vedligehold med borthugning af beton med heraf følgende bortskaffelse. Øvrige vedligeholdelsesarbejder er nærmere beskrevet i Appendiks B.



Centerkontraktens opstillede miljøbetingelser for alle betontyper/-konstruktioner er som nævnt i afsnit 1.2 at:

- 1 Undgå stoffer fra Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer
- 2 Sikre betonkvalitet, så det fortsat er muligt at genanvende 95% af affaldet
- 3 Sikre spildevandskvaliteten fra produktionen af beton, så det er muligt at genanvende spildevandet i beton i samme omfang, som det er muligt i dag
- 4 Undgå forøgelse af udledninger af miljøbelastende stoffer i spildevandet
- 5 Undgå øgede støj- og støvbelastninger ved produktion, udstøbning og nedrivning af beton



Centerkontraktens partnere ved indvielsen af demobroen.

Miljøbetingelserne vurderes i det væsentligste at være opfyldt for alle de stillede løsninger, idet **Ad 1** Betonrecepterne er ændret, således at der ikke længere anvendes et additiv med fri formaldehyd i, idet dette stof er på Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer. Der anvendes i øvrigt ikke stoffer fra Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer.

Ad 2 Betonkvaliteten er ikke ændret generelt således, at man ikke kan genanvende den i samme omfang som i dag. Dog er indholdet af tungmetaller øget i A1 og A3, ligesom der er et øget indhold af P_2O_5 i A3.

Det øgede mængde tungmetaller i betontypen A1 skyldes, at der er anvendt et større flyveaskeindhold end normalt. Flyveasken har et større indhold af tungmetal mht. Co, Hg, Ni, Pb og V end cement. Størrelsesorden af forskellen er cirka 3-5, 4, 2-6, 2 og 2 gange for henholdsvis Co, Hg, Ni, Pb og V ved enkelte prøvninger.

Det øgede indhold af tungmetal i betontypen A3 skyldes, at indholdet af tungmetaller i slamaske i forhold til traditionel flyveaske fra kulfyrede kraftværker er væsentlige højere mht. Cu, Pb og Zn. Ved enkelte prøvninger af slamasken er konstateret et indhold af disse stoffer, der er omtrent 59, 11, 10 henholdsvis 13 gange større i slamasken i forhold til en typisk dansk flyveaske fra et kulfyret kraftværk. Det kan dog også konstateres, at der er 6 gange mindre indhold af V i slamaske end i traditionel flyveaske. Indholdet af P_2O_5 er 59 gange større end i traditionel flyveaske /12/.

Det kan diskuteres, hvor væsentligt det er, at der er et øget indhold af tungmetal i betonen. Problemet afhænger blandt andet af, i hvor høj grad tungmetallerne lader sig vaske ud af betonen. Dette er ikke undersøgt.

Kravene til det maksimale indhold i faststoffet angivet i Bekendtgørelse om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder til kategori 1 (reneste) er umiddelbart overholdt, mens det ikke er undersøgt om indholdet i eluatet efter udvaskning er overholdt, idet der ikke er udført udvaskningsforsøg.

Problemet med P_2O_5 afhænger af i hvor høj grad det lader sig udvaske, men miljømæssigt, er det dog mere harmløst end tungmetallerne.

Ad 3 Spildevandskvaliteten (i forhold til om spildevandet kan genanvendes i betonen) vil ikke blive ændret i forhold til i dag, så længe man i øvrigt accepterer et øget indhold af tungmetaller i betonen.

Der må dog forudses et større indhold af tungmetal i spildevandet ved anvendelse af betontyperne A1 og A3 på grund af det større indhold af flyveaske i A1 og for A3's vedkommende slamaskens større indhold af tungmetaller, som beskrevet under punkt ad 2).

Ad 4 A1 og A3 vil medføre et øget indhold af tungmetaller i spildevandet. Niveaulet formodes dog fortsat være under kravene i Miljøstyrelsens vejledning "Tilslutning af industri-spildevand til kommunale spildevandsanlæg, 1994".

Ad 5 Støv og støj er normalt parametre, der er vanskelige at måle. Med de anvendte konstruktionsprincipper og betontyper peger det dog hovedsageligt på, at såvel støj som støv bliver mindre.



Opfyldningsarbejder ifm. Bro 34.

De forhold, der taler for at der vil være mindre støv og støj, er:

- mængderne af beton, armering og asfalt der anvendes til konstruktionen i dens levetid er 30% mindre i de nye brokonstruktioner (Bro 34, A0, A1 og A3) i forhold til referencebroen AR.
- der udføres færre vedligeholdelsesarbejder ved de nye betonkonstruktioner jf. **tabel 2** i afsnit 3.4

De forhold, der taler for øget støv og støj, er:

- A1-betonen er vanskelig at udstøbe og kræver omtrent dobbelt så mange nedstik med vibratoren som referencebetonen AR.

Endvidere er udskiftningen af betonbrodækket en mere larmende og støjende operation end udskiftning af asfalten; men denne udskiftning forventes dog kun at ske hvert 40. år, mens asfalten forventes at blive skiftet for hvert 12,5 år.



I de betoner og konstruktionsløsninger, der anvendes i demobroen, sker der en hel eller delvis opfyldelse af følgende miljømål:

- Reduktion af CO₂-emissionen med 30%
- Introduktion af nye restprodukter, der ikke tidligere er anvendt til betonproduktion som supplement til nu kendte
- Reduktion af forbruget af ikke-fornyelige brændsler ved at øge anvendelsen af fornyelige brændsler i cementproduktionen til 10%.

Der fokuseres derfor i dette afsnit på de tre ovennævnte miljømål.

De to andre miljømål, der er opstillet under centerkontrakten, dvs.:

- Nyttiggøre brug af restprodukter som tilslag svarende til 20 vægt-% af recepten.
- Genanvende betonindustriens egne restprodukter, der ellers skulle have været deponeret

Disse miljømål er ikke undersøgt i demobroen; men kan opfyldes gennem de store mængder af beton der anvendes i passiv miljøklasse og nogle andre grønne beton til aggressiv miljøklasse, der ikke er anvendt i bro 34.

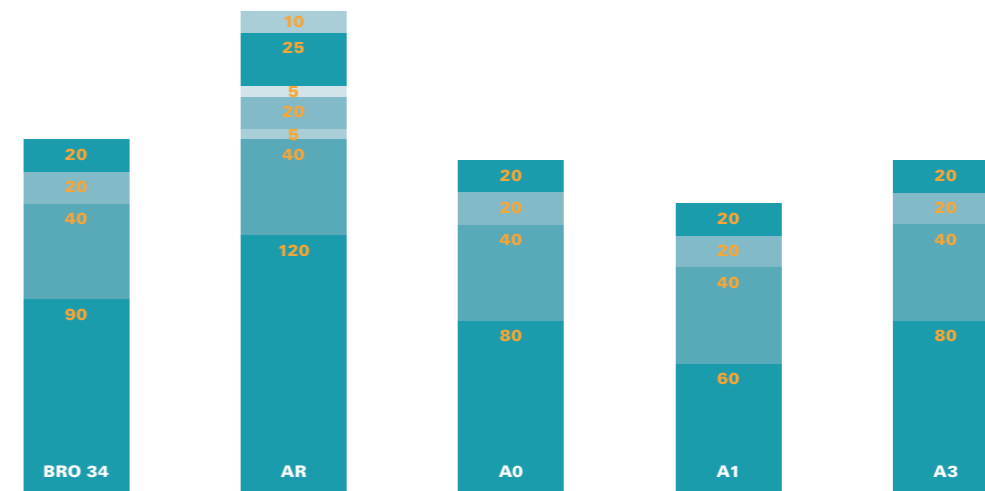
5.1

CO₂-emission til luften

Der er regnet på CO₂-emissionen til luften i broens levetid med de forudsætninger, der er angivet i kapitel 3.

Resultatet er demonstreret i **Figur 3** for en levetid på alle løsninger på 74 år. Som det fremgår, er der i løsningerne bro 34, A0, A1, og A3 en reduktion i CO₂-emissionen i forhold til referencebroen på henholdsvis 26, 29, 39 og 29% for de fire løsninger. Det overordnede mål for centerkontrakten var en reduktion af CO₂-emissionen på 30%. I beregningerne, der ligger til grund for **Figur 3**, er en del af bro 34 er opført med referencebetonen, ligesom der er anvendt sort armering på nogle af de udsatte konstruktionsdele af hensyn til sammenligningen. Når dette tages i regning, synes det oprindelige mål for demobroen at være opfyldt. Endvidere er målene opfyldt for de mere realistiske løsninger A0, A1 og A3, hvor der konsekvent er anvendt rustfast armering i alle mellemsøjler, og uden så mange forskellige betontyper.

En stor del af CO₂-emissionen fra fremstilling af cement stammer fra calcineringen, der er en nødvendig proces for fremstilling af cement. Cementen gennemgår efterfølgende en hydratisering gennem blandings- og hærdningsprocessen. Efterfølgende vil cementen over en længere periode gennem karbonatiseringen i princippet optage den samme mængde CO₂ som emissionen ved calcineringen. Dette kan dog tage meget lang tid, med mindre der sker en nedknusning af betonen med efterfølgende adgang til luftens indhold



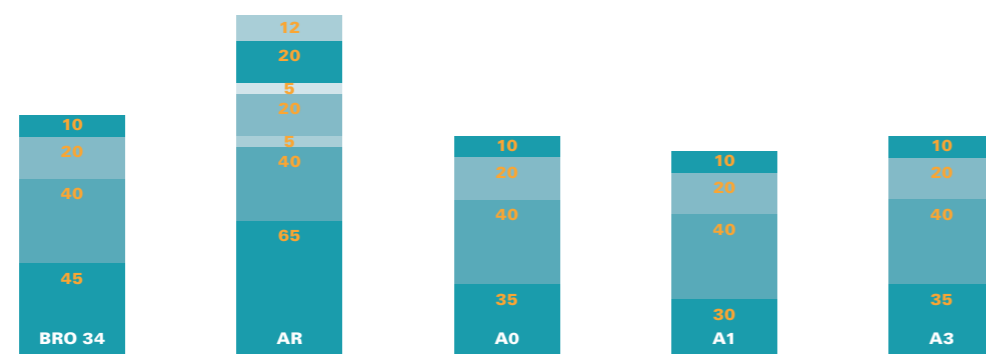
Figur 3 CO₂-emission (ton CO₂) i hele broens levetid (74 år). Bidragene er indsat i livscyklus, dvs. fase 1 (indvinding af råvarer) og fase 2 (fremstilling af beton etc) nederst etc. Dvs. at fx det øverste bidrag fra betonen er fra vedligeholdelsesfasen. Der er set bort fra effekten af karbonatisering.
 ■ beton ■ armering ■ asfalt ■ opførelse ■ div. vedl.

af CO₂. Bidraget fra calcineringen udgør omtrent 0,5 kg pr. kg cement, dog afhængigt af den enkelte cementtype.

Såfremt man indregner effekten af karbonatiseringen, opnås dels en generelt reduceret CO₂-emission, men samtidig ser de nye beton- og konstruktionsløsninger mere favorable ud i forhold til referencebroen. Dette skyldes, at calcineringsprocessen udgør procentvis en større del af CO₂-emissionen ved produktion af Ny RAPID® Cement (61%) i forhold til ved produktionen af Lavalkali Sulfatbestandig Cement (49%).

I **Figur 4** er CO₂-emissionen i broens levetid demonstreret, idet der er regnet med fuld karbonatisering og en levetid på 74 år. Som det fremgår er der en reduktion i forhold til reference broen i løsningerne bro 34, A0, A1, og A3 på henholdsvis 30, 36, 41 og 36%, hvilket opfylder det oprindeligt opstillede mål.

Hvis der igen tages udgangspunkt i referencebroen med en estimeret levetid på 74 år, kan man beregne CO₂-emissionen pr. leveår, og dernæst se på, hvor længe de andre konstruktioner skal holde for at have de samme CO₂-emissioner pr. leverår. I beregningerne bag **Figur 5** er der lagt til grund, at levetiden for konstruktionerne bro 34, A0, A1 og A3 skal være henholdsvis 55, 52, 45 og 52 år for at der opnås samme CO₂-emission pr. leveår (in-



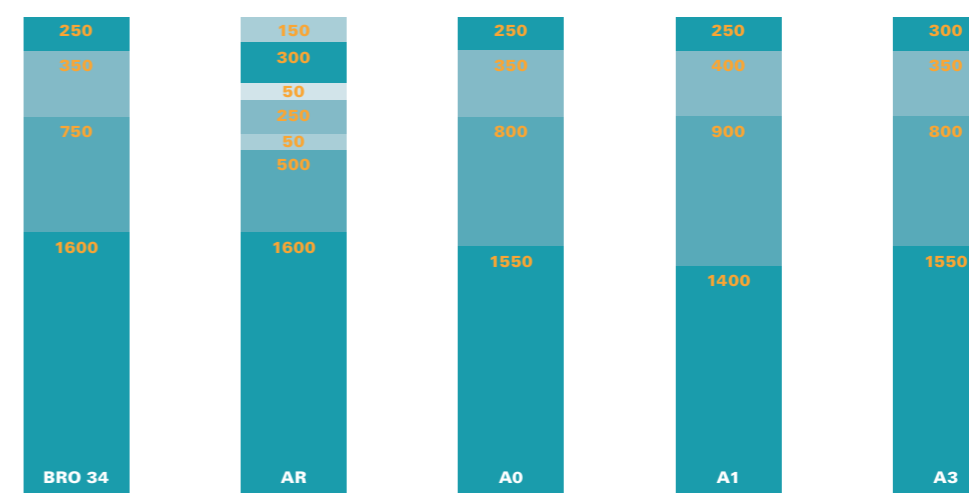
Figur 4 CO₂-emission (ton CO₂) i hele broens levetid (74 år). Bidragene er indsat i livscyklus, dvs. fase 1 (indvinding af råvarer) og fase 2 (fremstilling af beton etc) nederst etc. Dvs. at fx det øverste bidrag fra betonen er fra vedligeholdelsesfasen. Der er regnet med effekten af fuld karbonatisering. ■ beton ■ armering ■ asfalt ■ opførelse ■ div. vedl.

denfor +/- 1%) som for referencebroen, ved en levetid på 74 år. Dvs. at når bro 34 har stået i 55 år, har den pr. leveår har kostet det samme CO₂-mæssigt som referencebroen. Så levetiden udover de 55 år kan betragtes som CO₂-mæssigt gratis, bortset fra det vedligehold, der skal udføres efter det 55. år.

Foretages den samme beregning, som netop beskrevet ovenfor, men hvor der regnes med fuld karbonatisering, fås levetiderne 52, 74, 47, 44 og 47 år for løsningerne henholdsvis bro 34, AR, A0, A1 og A3, dvs. at de alternative løsninger bliver CO₂-mæssigt tilbagebetalt lidt hurtigere.

I beregningerne bag ovenstående figurer (nr. 3-5) er den forventede emission fra trafikken ikke indregnet. Ifølge undersøgelser udført for Portland Cement Association /13/ er der imidlertid en forskel i diesel forbruget for tunge lastbiler (17-40 tons) på omtrent 11%, 8% og 6% ved henholdsvis 100, 75 og 60 km/h afhængigt af, om der køres på asfalt eller beton.

Såfremt man tager udgangspunkt i de samme forudsætninger, som ligger til grund for **Figur 3**, når man frem til, at der må forventes en reduktion i CO₂-emission på cirka 6,7 tons ved kørsel på beton i stedet for asfalt, svarende til ca. 1% af den totale emission. Det forudsættes, at trafikmængden er uændret i alle 74 år, og at emissionerne fra lastbilerne ikke



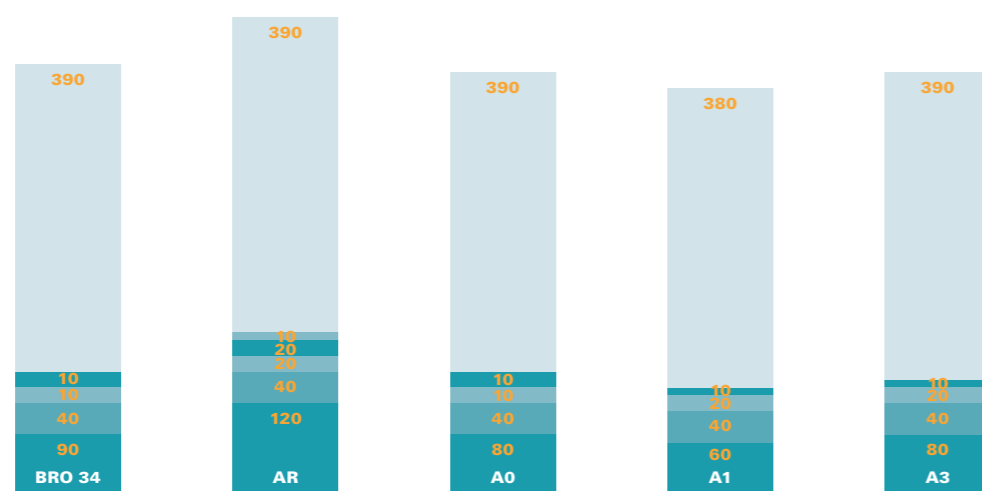
Figur 5 CO₂-emission (kgCO₂ pr leveår), ved levetider på henholdsvis 55, 74, 52, 45 og 52 år for løsningerne henholdsvis bro 34, AR, A0, A1 og A3. Effekten af karbonatisering er ikke medregnet. ■ beton ■ armering ■ asfalt ■ opførelse ■ div. vedl.

ændres i denne periode. Trafikdata er oplyst af Tørring-Uldum Kommune /14/ og emissionsinstallene er fra Vejdirektoratet /16/.

I **Figur 6** er indregnet den samlede emission fra trafikken. Denne er lagt til de emissioner, der er regnet med i **Figur 3**. Der er regnet med en lastbilstrafik svarende til et ækvivalent 10 tons akseltryk på 72og en årsdøgntrafik på 1366. Dvs. at trafikbelastningen udgør mellem 280 og 520% af materialets CO₂-emission for betonerne. Reduktionen i samlet CO₂-emission for løsningerne Bro 34, A0, A1 og A3 er hhv. 10, 11, 15 og 11% i forhold til referencebroen.

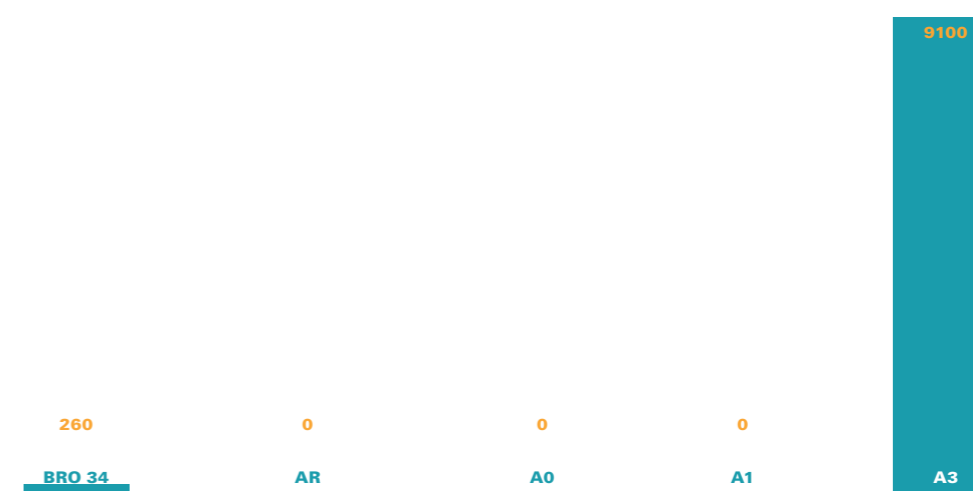
Brug af nye restprodukter

Målet om at "Introducere nye restprodukter, der ikke tidligere er anvendt til betonproduktion som supplement til nu kendte" er i demobroen, bro 34, alene opfyldt ved anvendelse af betontypen A3 i sætningspladerne. I betontypen A3 er den traditionelle flyveaske fra kulfyrede kraftværker erstattet med aske fra forbrænding af slam fra rensningsanlæg. Der er anvendt 32 kg/m³, hvilket medfører, at der samlet set er anvendt 256 kg nye restprodukter i bro 34. Såfremt hele broen var fremstillet i A3, ville der være anvendt ca. 9120 kg nye restprodukter ved opførelsen, se **Figur 7**.



Figur 6 CO₂-emission (ton CO₂) i hele broens levetid (74 år) incl. bidrag fra trafikken over broen. Bidragene er indsat i livscyklus, dvs. fase 1 (indvinding af råvarer) og fase 2 (fremstilling af beton etc.) nederst etc. Dvs. at fx det øverste bidrag fra betonen er fra vedligeholdelsesfasen. Der er set bort fra effekten af karbonatisering.

■ beton ■ armering ■ asfalt ■ opførelse ■ trafik



Figur 7 Anvendelse af nye restprodukter (kg slamaske), der ikke tidligere er anvendt til betonproduktion, ved opførelse af bro.

5.3

Reducere brugen af ikke fornyelige brændsler til cementproduktion

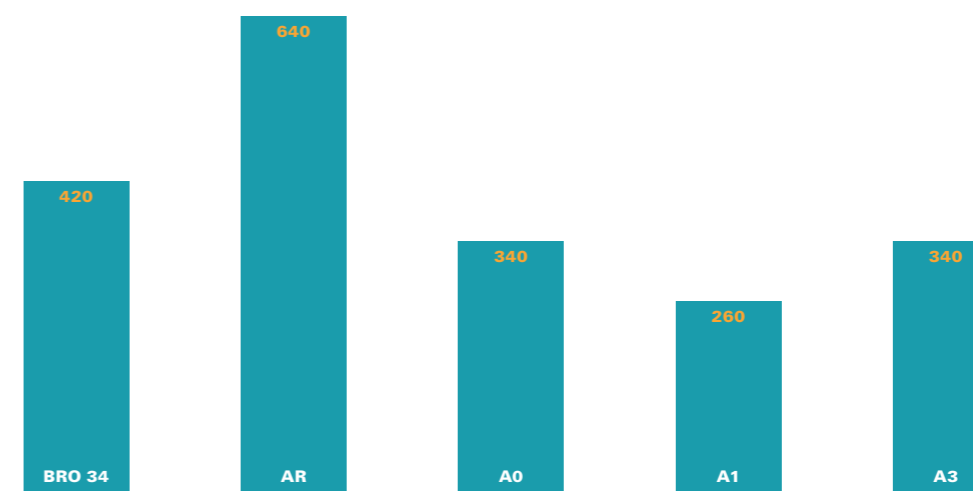
Målet er at reducere forbrug af ikke-fornyelige brændsler ved at øge anvendelsen af fornyelige brændsler i cementproduktionen til 10%.

I dette projekt er det valgt at foretage en beregning af forbruget af ikke-fornyelige brændsler, der anvendes til fremstilling af cementen til opførelse af broen. Der er således set bort fra cementforbruget ved de efterfølgende reparationer/vedligeholdelsesarbejder, idet dette cementforbrug bedst repræsenterer det niveau der er opnået.

Al energi fra olie, petcoke, kul og elektricitet regnes som ikke-fornyelige brændsler, selv om dette ikke er fuldtud korrekt mht. elektriciteten, der også delvis produceres ved vedvarende energi.

Al energi fra alternative brændsler som affald mv. medregnes ikke til kategorien "ikke-fornyelige brændsler", om end en del af affaldet naturligvis er ikke-fornyeligt.

Resultatet af beregningerne fremgår af **figur 8**. Ved opførelsen af en referencebro ville der være anvendt ikke-fornyelige brændsler med et energiindhold på 636 GJ til cementen, mens der i den aktuelt opførte bro kun er anvendt 422 GJ. Dvs. der er sket en reduktion på



Figur 8 Energimængden (i GJ) i ikke fornyelige brændsler anvendt til produktion af cement, der er anvendt i opførelsesfasen.

34%. Der kunne være opnået en yderligere reduktion ved opførelse i A1 betonen, idet der til cementen i en bro med ren A1 beton kun ville være anvendt 255 GJ, dvs. en reduktion på 60% i forhold til referencebroen.

De store forskelle i forbruget af ikke-fornyelige brændsler fremkommer af flere årsager. Disse er som følger:

- 1 Til produktion af Lavalkali Sulfatbestandig Cement anvendes 7,18 GJ/ton, mens forbruget til Ny RAPID® Cement kun er 4,72 GJ/ton.
- 2 Forbruget af alternative brændsler udgør 6% ved produktion af Lavalkali Sulfatbestandig Cement, mens de udgør 18% ved produktion af Ny RAPID® Cement.
- 3 Der er et mindre betonforbrug i de øvrige løsninger i fht. referencebroen AR.
- 4 I recepten A1 er der et lavere cementindhold pr kubikmeter beton, idet der i stedet anvendes store mængder flyveaske.

Miljømålet kan imidlertid anses for opfyldt, da der er sket en øgning fra 6% til 18% anvendelse af fornyelige brændsler til fremstilling af cementen anvendt hhv. i referencebroen og i de "grønne" løsninger.



I centerkontrakten er der ikke stillet betingelser om, at der ikke må anvendes knappe ressourcer. Dette skyldes dels, at dette normalt ikke er et større problem ved betonproduktion, og dels at miljømålene er opstillet udfra fra en samfundsmæssig prioritering, hvor det danske samfund ikke vægter dette punkt højt. Ved anvendelse af rustfast armering bliver problemstillingen imidlertid aktuell. I bro 34 er der anvendt rustfast armering i én række mellemsøjler samt i kantbjælkerne og i de øvrige løsninger A0, A1 og A3 er der regnet med, at der er anvendt rustfast armering i begge rækker mellemsøjler samt i kantbjælkerne. I den aktuelle bro er der anvendt to forskellige slags rustfast armeringsjern, hvor typeskiftet beror på, at de to typer har hver deres styrker ved forskellige diametre. Duplex I.4462 er anvendt ved diametre større eller lig med 20 mm, mens Austenitic I.4571 er anvendt med diameteren 12 mm.

Ressourceforbruget er omregnet til mPR/kg, (milli-person-reserve pr. kilogram), hvilket er mål for den mængde råstof, der er til rådighed pr. person og alle dennes efterkommere på verdensplan. Dvs. des højere tal, des mere knap er ressourcen. Fx angiver tallet 250 mPR/kg, at ved et forbrug af 4 kg af den pågældende ressource, så er der forbrugt, hvad en person og alle dennes efterkommere har til rådighed, idet $4 \text{ kg} * 250 \text{ mPR/kg} = 1000 \text{ mPR} = 1 \text{ PR}$. I **Tabel 3** er angivet den kendte mPR/kg for det enkelte metal /1/, og dels det sumerede træk på ressourcerne for de to rustfaste stållegeringer samt det sorte stål. Som det fremgår medfører brugen af rustfast stål et voldsomt forbrug af begrænsede ressourcer, hvor det især er forbruget af nikkel og molybdæn, der er ressourcekrævende.

	Generel knaphed (mPR/kg)	Austenitic, I.4571 Ø=12 mm (% og mPR/kg)		Duplex I.4462 Ø>=20 mm (% og mPR/kg)		Sort stål (% og mPR/kg)	
Fe	0,08	67,2	0,05	68,5	0,05	100,0	0,08
Ni	106,00	12,0	12,72	5,5	5,83	0,0	0,0
Cr	12,78	17,5	2,24	22,0	2,81	0,0	0,0
Mn	10,00	1,0	0,10	1,0	0,10	0,0	0,0
Mo	250,00	2,3	5,63	3,0	7,50	0,0	0,0
I alt		100,0	20,74	100,0	16,30	100,0	0,08

Tabel 3 Rustfaste og almindelig sort armerings træk på begrænsede ressourcer i forhold til hinanden.

I den samlede konstruktion er forskellen imidlertid ikke så stor, idet den rustfaste armering kun udgør omtrent 7% af den samlede mængde armering. Det samlede ressourcestræk for armeringen i en bro som bro nr. 34 med cirka 7% rustfast armering bliver 48,9 PR, mens det for en bro alene med sort armering bliver cirka 2,8 PR, dvs. der er cirka en faktor 18 til forskel.



Selvom der alene er foretaget en miljømæssig screening, peger alle beregningerne på, at der med de valgte nye konstruktionsudformninger og receptvalg er opnået væsentlige forbedringer for miljøet. Dette positive resultat er endda opnået, selvom der jf. afgrænsningerne er regnet på den sikre side.



Udstøbning af fundament i Bro 34.

For centerkontrakten var opstillet 5 miljømål. Heraf har de anvendte løsninger i bro 34 indflydelse på 3 af disse mål. Alle 3 mål er opfyldte.

Målet om at reducere CO₂-emissionen med 30%, er opfyldt, idet der er sket en reduktion mellem 26% og 41% afhængig af, hvilken beton der anvendes, og om der regnes med fuld karbonatisering eller ej. For bro 34 er der sket en reduktion på 26%, såfremt karbonatiseringen ikke tages i regning og 30% såfremt den tages i regning. Bro 34 er imidlertid ikke en

realistisk løsning, da der er anvendt så mange forskellige betontyper, på stort set ens konstruktionsdele der udsættes for de samme påvirkninger. For de øvrige og mere realistiske løsninger er der opnået større reduktioner i CO₂-emissionerne.

Endvidere opnås en yderligere reduktion i CO₂-emissionen fra tunge lastbiler på betonbelægninger i forhold til asfaltbelægninger.

Målet om at øge brugen af fornyelige brændsler til 10% for cementproduktion er opfyldt, idet der er sket en forøgelse fra 6% til 18%. Endvidere er der sket en reduktion i forbruget af ikke-fornyelige brændsler på 34% ved opførelse af bro 34 i forhold til referencebroen og en reduktion på 60% ved anvendelse af løsningen A1.

Målet om at introducere nye restprodukter der ikke tidligere er anvendt i betonproduktion, er lykkedes, idet slammaske anvendes.

I centerkontrakten var opstillet 5 miljøbetingelser. Af disse er to af betingelserne umiddelbart overholdt, mens de resterende tre bør undersøges nærmere.

De to der vurderes overholdt er betingelserne om, at der ikke må anvendes stoffer fra Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer, og at der ikke må ske en forøgelse af støv- og støjbelastningerne ved produktion, udstøbning og nedrivning af betonen.

Med hensyn til de tre øvrige miljøbetingelser:

- at sikre betonkvalitet, så det fortsat er muligt at genanvende 95% af affaldet
 - at sikre spildevandskvaliteten fra produktionen af beton, så det er muligt at genanvende spildevandet i beton i samme omfang, som det er muligt i dag
 - at undgå forøgelse af udledninger af miljøbelastende stoffer i spildevandet
- er disse alle opfyldt ved anvendelse af betontypen A0; men ved anvendelse af A1 og især A3 er indholdet af tungmetaller øget, hvilket medfører et større indhold af tungmetal i betonen, ligesom der må forudses flere tungmetaller i spildevandet.

Der bør foretages yderligere undersøgelser af, hvor hensigtsmæssigt det er at få spredt tungmetaller fra flyve- og slammaske ud i større mængder beton, og specielt hvilken risiko der er for udvaskning af betonstrukturen i brugstilstanden og specielt i nedkøst tilstand, der evt. anvendes som stabilgrus uden overdækning med membran (grusveje) eller med overdækning af membran (asfaltbelagte veje).

En del af reduktionerne i miljøbelastningerne skyldes brugen af rustfast armering og det deraf følgende mindre vedligeholdelsesprogram. Brugen af rustfast stål har dog den ulempe, at der her sker et stort forbrug af begrænsede ressourcer (mht. metaller), forbruget er cirka 18 gange større end ved brug af sort armering.

- 1 ■ Håndbog i miljøvurderinger af produkter - en enkel metode, Miljønyt nr. 58, 2001, Kirsten Pommer, Pernille Bech, Henrik Wenzel, Nina Caspersen og Stig Irving Poulsen, Miljøstyrelsen.
- 2 ■ Brancheanalyse beton - renere teknologi ved betanfremstilling Teknologisk Institut Byggeri og Carl Bro, Delrapport fase 4: Livscyklusanalyser, Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 43, 1995.
- 3 ■ Brancheanalyse beton - renere teknologi ved betanfremstilling Delrapport fase 4: Miljøpåvirknings profiler for underleverandører og brugere af beton. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 42, 1995.
- 4 ■ Häkkinen, Tarja & Mäkelä, Kari; Environmental adaption of concrete, Environmental impact of concrete and asphalt pavements, VTT, Espoo 1996.
- 5 ■ Nielsen, Henrik; Vejdirektoratet, Telefonsamtale 2002-05-17.
- 6 ■ Wegan, Vibeke; Vejteknisk Institut, Telefonsamtale 2002-05-17.
- 7 ■ Pedersen, Jørn, NCC, E-mail af 2002-05-28 og 2002-05-17.
- 8 ■ Grøn Beton, BK4 Samlet rapport holdbarhed.
- 9 ■ U5 Grønne konstruktionstekniske løsninger og konstruktionstekniske løsninger for grønne betoner, Notat Hovedmængder for en bro som projektets demobro af 2002-04-18.
- 10 ■ Damtoft, Jesper Sand; Aalborg Portland, E-mail af 2002-08-06, Data fra perioden 2002-01-01 - 2002-06-30.
- 11 ■ U4-Rapport, Drift og vedligehold (D&V) af grønne betonkonstruktioner, 3. udkast af 2002-01-25.
- 12 ■ Grøn Beton Rapportering, Beton med slammaske, appendiks 3, Center for Grønbeton, 2002-10-22 .
- 13 ■ Fuel Savings of Heavy Trucks on Concrete Pavement, SR351, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2001, 8 sider.
- 14 ■ Tørring-Uldum Kommune v/ Lars Storm. Telefonsamtaler uge 47 2002.
- 15 ■ SimaPro 4.0, Databaseprogram fra Pré Consultants BV, Amersfoort, Nederlandene.
- 16 ■ E-mail fra Vejdirektoratet v/Lene Nøhr Michelsen af 2002-11-22.
- 17 ■ Bekendtgørelse om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder, Bekendtgørelse nr. 655 af 2000-06-27.

Betontype	AR	A0	A1	A3
Beskrivelse	Referencebeton med Lavalkali Sulfat-beständig cement	Som AR men med Ny RAPID® cement (nu kaldet RAPID® cement)	Beton med højt flyveaskeindhold (40% af pulvemængde) og Ny RAPID® cement	Beton med slammaske og Ny RAPID® cement
Lavalkali	317			
Ny RAPID® cement		317	238	320
Flyveaske	32	32	135	
Slammaske				32
Mikrosilica	18	18	18	18
Tilsætningsstoffer	3,6	3,6	9,3	6,13
0/2 Vestbirk sand	636	633	579	638
A-sten 4/8	232	232	232	221
A-sten 8/16	348	348	347	367
A-sten 16/32	580	580	581	573
Vand	153	153	133	144

Anneks A Sammensætning af de forskellige betontyper i kg/m³.

Trykrensning af kantbjælker I det tilfælde, hvor der er sort armering i kantbjælken, spules denne ved forårets vedligehold.

Trykrensning af mellemsøjler Mellemsøjler med sort armering spules på de 2 nederste meter. I referencebroen er der regnet med sortarmering i alle søjler, mens der i de øvrige broer er regnet med samme løsning som i Bro 34, nemlig med halvdelen i sort armering og den anden halvdel i rustfast armering.

Udskiftning af bløde fuger Der er alene medregnet mængden af bitumen til denne reparation, der alene sker såfremt der er asfaltbelægning. CO₂-belastningen fra bitumen er taget fra /4/.

Udskiftning af stenfyldte fuger Det er alene mængden til fyldning af fugerne der er medregnet. Tilnærmelsesvis er der regnet med samme materiale som asfaltslidlaget.

Overfladebehandling af søjler og kantbjælker Søjler med sort armering regnes overfladebehandlet på de nederste 2 meter, mens kantbjælker med sort armering forventes påført 0,3 l/m² 2 gange. Der regnes alene med at kanten, der vender mod kørebanen, og oversiden af kantbjælken behandles.

Udskiftning af asfaltslidlag, brobelægning og fugtisolerung Der er regnet med et generelt energiforbrug på 90 kWh/ton ved varmblanding af asfalt /7/. Sammensætningen er baseret på oplysninger fra Vejteknisk Institut /6/ og CO₂-belastningerne fra de enkelte delkomponenter er baseret på /4/.

Mængden der skal anvendes er baseret på /9/.

Der er ikke medregnet miljøbelastningen ved selve udlægningen.

Udskiftning af betonbelægning Der hugges ned til 1 cm bag armeringen i hele brobanens længde og bredde. Dvs. dæklag samt tykkelse af den langsgående og tværgående armering plus 1 cm, i alt 91 mm, fjernes og genudstøbes. Belastningen fra den nye beton medregnes, ligesom belastningen ved selve udførelsen af reparationen medregnes svarende til den, der anvendes ved reparation af kantbjælker /3/ eller /4/.

Behugning og udskiftning af dæklag på mellemsøjler Følgende forhold er medregnet: Behugning, transport 50 km væk, sandblæsning, sprøjttestøbning og beton til sprøjttestøbning. Der er regnet med behugning til 1 cm bag hovedarmeringen.

Behugning og udskiftning af dæklag på kantbjælker Der er regnet med at kantbjælken behugges på den vandrette overside (0,46 m) og den lodrette yderside (0,413 m) i hele broens længde. Dybden regnes til 1 cm bag armeringen, dvs. $0,045 + 2 \cdot 0,012 + 0,01 = 0,079$ m

Demolering og bortskaffelse Der er ikke indregnet nogen miljøbelastning fra nedrivning og bortskaffelse af broerne, ligesom der ikke er indregnet nogen miljøbelastning fra den løbende bortskaffelse af de dele, der fx borthugges.



Miljøscreening af betonbro

ISBN 87-7756-691-2

Udført af Karsten Tølløse

Teknologisk Institut, Beton, december 2002

Grafisk design Barbara Elbæk

Reproduktion af dele af rapporten er tilladt, hvis kilde angives