

CENTER FOR GRØN BETON

CENTER FOR GRØN BETON

center for ressourcebesparende betonkonstruktioner

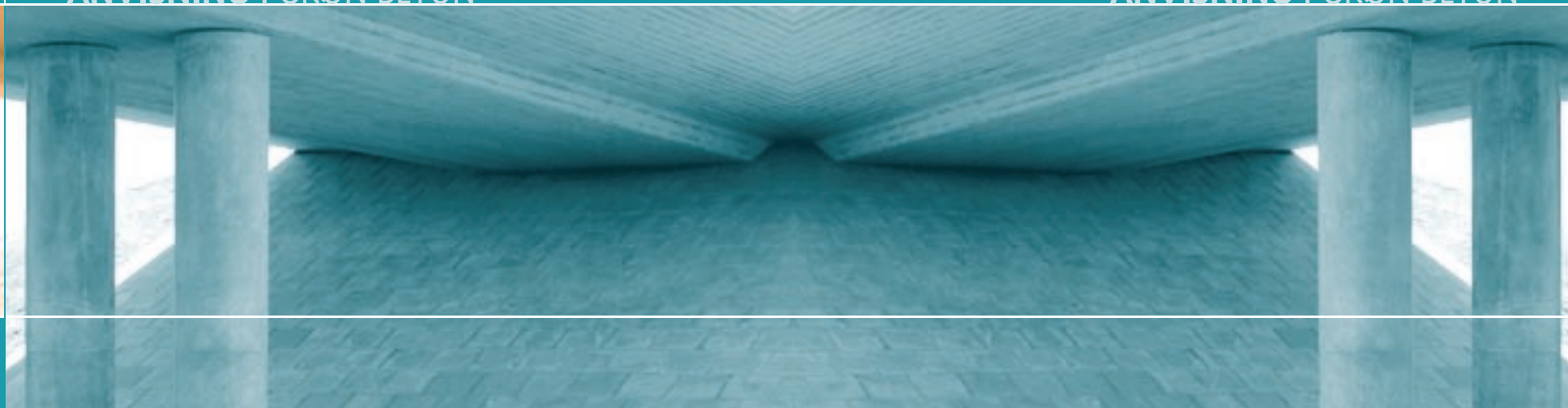
center for ressourcebesparende betonkonstruktioner

Marianne Tange Hasholt  
Anette Berrig  
Dorthe Mathiesen

Teknologisk Institut  
December 2002

ANVISNING I GRØN BETON

ANVISNING I GRØN BETON



0	<b>Forord</b>	1
1	<b>Hvad er grøn beton?</b>	2
2	<b>Betons miljøpåvirkning</b>	3
2.1	Hvad er "den bedste løsning"?	3
2.2	Miljømæssige styrker og svagheder ved beton	3
3	<b>Projekt Grøn Beton</b>	5
4	<b>Forskellige grønne strategier</b>	6
4.1	Energiforbrug og dets miljøeffekter	6
4.2	Materialeforbrug og begrænsning af affaldsmængder	7
5	<b>Beton med grøn cement</b>	9
5.1	Ny RAPID® cement	9
5.2	Vælg den mindst miljøbelastende cement	9
6	<b>Beton med minimalt klinkerindhold</b>	12
6.1	Mere tilslag	13
6.2	Mere flyveaske	14
7	<b>Beton med betonindustriens egne restprodukter</b>	17
7.1	Beton med betonslam	17
7.2	Beton med stenmel	18
8	<b>Beton med alternative asketyper</b>	20
8.1	Aske fra forbrænding af biobrændsel	22
8.2	Aske fra forbrænding af spildevandsslam	22
9	<b>Drift, vedligehold og konstruktiv udformning</b>	24
9.1	Ressourcebesparende konstruktionstekniske løsninger	24
9.2	Ressourcebesparelser ved drift og vedligehold	24
10	<b>Fremtidens grønne betoner</b>	26
10.1	Hvordan kommer man i gang?	26
10.2	Stikord til gennemgang af en kemisk analyse	27
10.3	Dokumentation af den grønne betons egenskaber	30
10.4	Dokumentation af miljøforbedringer	32
11	<b>Referencer</b>	36

Denne anvisning er udarbejdet som en del af projektet Center for Ressourcebesparende Betonkonstruktioner, der også er kendt som Center for Grøn Beton. Projektet er gennemført i perioden 1998-2002 som en centerkontrakt med støtte fra Ministeriet for Videnskab, Teknologi og Udvikling.

Center for Grøn Beton har udviklet ressourcebesparende løsninger til både anlægskonstruktioner og husbygning. Centret har bl.a. arbejdet intensivt med betonens sammensætning og med forslag til at gøre betonen mere miljøvenlig. Centret har også udført et omfattende arbejde for at undersøge grønne betoners egenskaber, så der er den fornødne dokumentation til at benytte dem i moderne byggeri.

Formålet med denne anvisning er både at give en oversigt over det erfaringsgrundlag, der er oparbejdet via Center for Grøn Beton, og at give vejledning og inspiration til udviklingen af nye, miljøvenlige betontyper og betonkonstruktioner.

Det er vort håb, at de nye, grønne betonløsninger vil bidrage til, at beton i øget omfang anvendes til at fremstille bygningsværker af høj miljømæssig værdi.

Taastrup, december 2002



**Jesper Sand Damtoft**  
Aalborg Portland A/S  
Formand for styregruppen for  
Center for Grøn Beton



**Mette Glavind**  
Teknologisk Institut  
Centerkontraktleder for  
Center for Grøn Beton



■ **Grøn beton**

*Grøn beton er beton, der fra blanding af betonen til nedrivning af bygværket og bortskaffelse af resterne belaster miljøet mindre end traditionel beton. Det kan fx være beton, der fremstilles med et lavere energi- eller ressourceforbrug end traditionel beton. Det kan også være beton, der holder længere eller kræver mindre vedligeholdelse.*

Produktion af byggematerialer som fx beton påvirker miljøet. Miljøstyrelsens Byggepanel har udpeget følgende miljøpåvirkninger som de væsentligste for byggesektoren.<sup>1</sup> De enkelte miljøpåvirkninger skal betragtes over hele bygværkets livscyklus:

- Energiforbrug, herunder udledning af bl.a. CO<sub>2</sub>.
- Materialeforbrug og affaldsdannelse
- Forbrug af sundheds- og miljøbelastende stoffer

Desuden kan byggematerialer give anledning til en række andre miljøpåvirkninger. Byggematerialer har fx betydning for arbejdsmiljøet under bygværkets opførelse og de færdige bygningers indeklima. For at nedbringe disse miljøbelastninger er det derfor relevant at udvikle grønne byggematerialer. Grøn beton er fællesbetegnelsen for betonkonstruktioner, der samlet set belaster miljøet mindre end traditionelle betonkonstruktioner.

Det er vigtigt at betragte hele konstruktionens livscyklus, når det skal vurderes, om beton er grøn. Ud over fremstilling af betonen og opførelse af konstruktionen, skal drift, vedligehold og reparationer også tælles med i det samlede regnestykke - lige som muligheden for eventuelt at genbruge betonen efter nedrivning.

Denne anvisning omfatter primært tiltag, der vedrører beton som materiale. Langt den største miljøpåvirkning gennem et bygningsværks livsforløb stammer fra selve brugssituationen, fx fra opvarmning og belysning af en bygning.

<sup>1</sup> Miljøstyrelsens Byggepanel: *Handlingsplan for bæredygtig udvikling i den danske byggesektor* (2001)

**Hvad er "den bedste løsning"?**

Det er vanskeligt at sammenligne forskellige byggematerialer miljømæssigt. Det skyldes, at materialerne har vidt forskellige egenskaber, herunder ikke mindst forskellige styrker og forskellig levetid. Derfor er det umuligt generelt at udpege det ene eller det andet byggemateriale som mest miljøvenligt.

Det er som regel nødvendigt med en detaljeret analyse af det konkrete byggeprojekt for at afgøre hvilket byggemateriale, der er bedst for miljøet. Dette er imidlertid ikke altid muligt entydigt at pege på et bestemt materiale. Hvad



*Detaljer fra en brokonstruktion.*

skal man vælge, hvis det ene materiale kan fremstilles med et meget lille energiforbrug, men til gengæld indeholder flere sundhedsskadelige stoffer end et andet muligt materiale? Dermed bliver det nødvendigt at tage stilling til, hvad der skal lægges størst vægt på. Er bidraget til drivhuseffekten fx vigtigere end arbejdsmiljøet? Disse afvejninger ender ofte med at blive politiske. Desuden spiller også andre faktorer ind i en bæredygtighedsbetragtning, fx økonomi og æstetik. De bedste løsninger opnås ved en fordomsfri kombination af materialer, der tager alle faktorer i betragtning.

**Miljømæssige styrker og svagheder ved beton**

Det er umuligt at opstille præcise retningslinier for, hvornår beton miljømæssigt set er det bedste materiale. Men det er muligt at pege på betonens miljø-

2.1

2.2

### ■ **Det danske betonforbrug**

*I Danmark anvendes der årligt ca. 8 mio. tons beton. Det svarer til 1,5 tons pr. indbygger. Beton er et naturmateriale, der fremstilles af kridt, sand, sten og vand. Styrken af beton betyder, at energiforbruget til at opføre et bygværk med en given bæreevne er relativt lille. Det giver lav CO<sub>2</sub>-emission og et beskedent bidrag til forureningen. Betonens lange levetid betyder samtidig en lav miljøbelastning pr. år, når miljøbelastningen fordeles over hele levetiden.*

styrker og -svagheder. Betonens største fordele miljømæssigt set er de samme, som gør beton til det meste anvendte byggemateriale: Stor styrke, lang levetid og høj varmekapacitet. Hertil kommer yderligere en miljøfordel ved beton: De primære råstoffer til fremstilling af cement og beton er kridt, sand, sten og vand, som alle findes i rigelige mængder i Danmark.



*Motortrafikvejsbro opført af grøn beton og med grønne konstruktionstekniske løsninger.*

Til betonens miljømæssige ulemper hører, at betonkonstruktioner fører til forholdsvis store affaldsmængder. Der er dog primært tale om affald, der er kemisk inaktivt, og som derfor kun i begrænset omfang påvirker miljøet. Desuden er beton ikke så fleksibelt, når det skal genbruges, som fx stål, der kan smeltes om. Alligevel er det hidtil lykkedes at genanvende stort set al affaldsbeton i Danmark. Hovedparten af betonen fra nedrevne bygværker genbruges til vejbyggeri og opfyldning, hvor knust beton erstatter grus.

Beton er et miljøvenligt materiale, der anvendes i store mængder. Det betyder, at selv små miljømæssige forbedringer har stor effekt. Samtidig bliver miljøvenlighed en stadig vigtigere konkurrenceparameter i byggeriet. Det fremgår fx af de seneste regler for udbud af offentlige opgaver. De nye regler giver bygherren mulighed for bl.a. at inddrage miljøhensyn, så det ikke længere kun er prisen, der tæller. Disse forhold er baggrunden for, at en række virksomheder og videntcentre i 1998 gik sammen i Center for Grøn Beton. Målet var at øge betons konkurrenceevne ved at synliggøre betonens miljømæssige fordele og at gøre disse endnu større.

Centret har i 2002 afsluttet en række udviklingsprojekter. Hovedparten af disse fokuserer på fremstilling af grønne betoner. De øvrige omhandler henholdsvis grøn drift og vedligehold samt grøn udformning af konstruktioner, så de kan opføres med et mindre materialeforbrug. En række tværgående aktiviteter har understøttet udviklingsprojekterne ved at se nærmere på:

- Grøn betons mekaniske egenskaber.
- Grøn betons udførelsesmæssige egenskaber.
- Grøn beton og brand.
- Grøn betons holdbarhed.

De mekaniske og udførelsesmæssige egenskaber er undersøgt for alle de grønne betoner, der beskrives i denne anvisning. Brandbestandighed og holdbarhed er blevet undersøgt, hvor dette er relevant. Betonens modstandsevne mod brand er således primært blevet undersøgt for betoner til passivt miljø; til indendørs brug i bygninger. Holdbarheden er primært blevet undersøgt for beton til aggressivt miljø som fx anlægskonstruktioner. Centrets resultater er blevet brugt i forbindelse med en ny motortrafikvejsbro, der er opført for Vejdirektoratet med brug af grøn beton og grønne konstruktionstekniske løsninger.

Dette demonstrationsprojekt viser, at de grønne løsninger kan anvendes i praksis. Samtidigt giver broen mulighed for at høste flere erfaringer i de kommende år, fordi det vil være muligt at følge de grønne betoners holdbarhed, når de udsættes for det danske vejrlig.

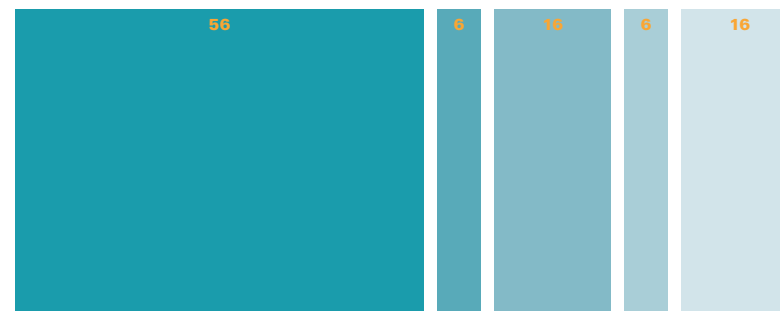
Som nævnt i indledningen, har Miljøstyrelsens Byggepanel opstillet en række miljøpåvirkninger, der er væsentlige for hele byggesektoren. Således anbefaler panelet, at der sættes ind overfor følgende påvirkninger, for at miljømæssige og sundhedsmæssige hensyn kan gå hånd i hånd i udviklingen i byggesektoren:

- **Energiforbrug og dets miljøeffekter.** Der stiles både mod en reduktion af det samlede energiforbrug og af andelen af ikke-vedvarende energi. Herved reduceres en række miljøeffekter, fx forsurening forårsaget af SO<sub>2</sub>- og NO<sub>x</sub>-emissioner, næringssaltbelastningen og drivhuseffekten.
- **Materialeforbrug og affaldsdannelse.** Her stiles mod at udnytte knappe, ikke-fornybare materialeressourcer bedre og at undgå overforbrug af fornybare ressourcer. Desuden sigtes der på at reducere affaldsdannelse og fremme genanvendelse af det dannede affald.
- **Forbrug af sundheds- og miljøbelastende stoffer.** Her stiles primært mod at undgå negative sundhedseffekter og giftvirkninger i miljøet - bl.a. for at forbedre arbejdsmiljø og indeklima.
- **Øvrige miljøbelastninger.** Øvrige miljøbelastninger omfatter bl.a. påvirkning af byrum og landskab, vandforbrug, støj og vibrationer samt andre miljøpåvirkninger, der ikke hører ind under de ovennævnte, prioriterede typer af belastning.

I Grøn Beton-projektet er der fokuseret på de to første punkter, dvs. på energi- og materialeforbrug samt på muligheden for at genanvende affaldsprodukter og derved reducere mængden af affald.

**4.1 Energiforbrug og dets miljøeffekter**

I Grøn Beton-projektet er CO<sub>2</sub>-udledningen benyttet som et mål for energiforbruget. Årsagen er bl.a., at vi i Kyoto-aftalen som nation har forpligtiget os til at nå nogle overordnede mål for CO<sub>2</sub>-udledningen for at begrænse drivhuseffekten. **Figur 1** viser et eksempel på, hvordan CO<sub>2</sub>-emissionerne forbundet med fremstilling af armerede betonkonstruktioner fordeler sig på forskellige kilder. Fremstillingen af armerede betonkonstruktioner fordeler sig på forskellige kilder. Fremstillingen af cement giver det største enkeltbidrag til den samlede CO<sub>2</sub>-emission. Over halvdelen af CO<sub>2</sub>-udslippet stammer fra fremstillingen af cement. Der er to måder at reducere dette bidrag på:



**Figur 1** CO<sub>2</sub>-emissioner fra produktion af huldæk af beton fordelt på forskellige kilder (i %).<sup>2</sup>

■ cement ■ transport ■ varme ■ armering ■ andet

- **Fremstilling af beton med grøn cement.** Ud over cement, der kan fremstilles med lavere CO<sub>2</sub>-emissioner, dækker begrebet grøn cement også cementer, der begrænser andre skadelige emissioner til det eksterne miljø (fx NO<sub>x</sub> og SO<sub>x</sub>) samt cement, der kan fremstilles med fornyelige brændsler.
- **Fremstilling af beton, der indeholder mindre cementklinker.** Klinker er den bestanddel af cementen, der fremstilles ved brænding i en cementovn. Hovedparten af CO<sub>2</sub>-emissionerne forbundet med cementproduktion stammer fra brænding af klinker. Det medfører derfor en miljømæssig gevinst, når klinkerne erstattes af andre materialer, der medfører mindre CO<sub>2</sub>-emissioner.

**Materialeforbrug og begrænsning af affaldsmængder**

Et af betonens svage punkter er de forholdsvis store affaldsmængder, der er forbundet med betonproduktion. Men samtidigt er det muligt at genanvende store mængder affald i betonen - både fra betonindustrien og fra andre industrier. Det er således muligt på én gang at begrænse materialeforbruget og samfundets affaldsproblem ved at øge anvendelsen af restprodukter i beton.

<sup>2</sup> Intern rapport fra EU-projektet TESCO: *LCA of floor element, pre-stressed hollow core slab* (1999)

### ■ Grønne betonstrategier

1 Fremstil beton med grøn cement 2 Fremstil beton med mindre cementklinker 3 Genbrug betonslam i produktionen 4 Fremstil beton med stenmel i stedet for sand 5 Fremstil beton med alternative asketyper

**Betonindustriens egne restprodukter** Center for Grøn Beton har arbejdet på at gøre det nemmere for betonindustrien at genbruge en del af dens egne restprodukter. Det sker ved:

- Fremstilling af beton med betonslam, der stammer fra vask af blandeanlæg, betonbiler mm.
- Fremstilling af beton med stenmel, der stammer fra knusning af granit til tilslag.

Betonslam kan erstatte vandværkssvand og en del af det sand, der blandes i betonen, mens stenmelet blandes i betonen i stedet for sand. På den måde erstatter de to restprodukter naturlige ressourcer.

**Restprodukter fra andre industrier** I Danmark indgår flyveaske fra kulfyrede kraftværker allerede i høj grad i beton. Men også andre virksomheder har restprodukter i form af aske. Derfor har projekt Grøn Beton også beskæftiget sig med fremstilling af beton med alternative asketyper. Med alternativ aske menes aske, der stammer fra forbrænding af andet end kul eller fra samforbrænding af kul og andre brændsler. Helt konkret er der arbejdet med

- Fremstilling af beton med aske fra forbrænding af biobrændsel
- Fremstilling af beton med aske fra forbrænding af spildevandsslam

De alternative asketyper er ikke omfattet af gældende standarder for flyveaske til betonproduktion. Men da det kan forudses, at der i fremtiden bliver mindre aske fra kulfyring til rådighed for betonproduktion, er det relevant at undersøge mulighederne for at anvende alternative asketyper. Resultaterne af arbejdet med de forskellige strategier er beskrevet i kapitel 5-8. Dertil kommer en beskrivelse af grøn drift og vedligehold samt grønne konstruktions-tekniske løsninger i kapitel 9.

Den såkaldte calcinerings står for cirka halvdelen af den CO<sub>2</sub>, der frigives ved cementproduktion. Calcinerings er en kemisk reaktion, der er nødvendig for at sand og kalk kan blive til cement. Denne CO<sub>2</sub>-emission kan derfor ikke undgås, hvilket betyder, at cementfremstilling altid vil være forbundet med udledning af CO<sub>2</sub>. Det hører dog med til billedet, at hærdnet beton løbende optager CO<sub>2</sub> fra luften. Dette modsvarer i nogen grad den mængde CO<sub>2</sub>, der frigives ved calcinerings. Den anden halvdel af CO<sub>2</sub>-emissionerne skyldes energiforbruget til fremstilling af cementklinker. Her er det særligt brændingen af klinker ved 1.400-1.500 °C, der kræver meget energi.

### Ny RAPID® cement

Cementproducenterne arbejder til stadighed på at udvikle processer, der er mindre energikrævende. Aalborg Portland har således udviklet en ny teknologi, der gør det muligt at fremstille RAPID® cement med væsentligt reducerede miljøbelastninger. Forbedringerne skyldes to ting:

- Den nye RAPID® cement fremstilles med mineraliserede klinker.<sup>3</sup> Det betyder, at der tilsættes en katalysator under brændingsprocessen, så den kræver mindre energi. Samtidigt øges styrken af cementen.
- Der anvendes større mængder CO<sub>2</sub>-neutrale brændsler end tidligere. Den nye RAPID® cement, der er anvendt i Grøn Beton-projektet, er fremstillet med 18% CO<sub>2</sub>-neutralt brændsel i form af brændbart affald. Det er målet at øge denne andel, så 40% af brændslet bliver CO<sub>2</sub>-neutralt.

### Vælg den mindst miljøbelastende cement

**Fremstilling af cement** Der er stor forskel på, hvor meget fremstilling af de enkelte cementtyper belaster miljøet, se **Tabel 1**. Lavalkali Sulfatbestandig cement fra Aalborg Portland anvendes typisk til konstruktioner i aggressiv og ekstra aggressiv miljøklasse, hvor der er store krav til betonens holdbarhed. Grøn Beton-projektet har undersøgt en typisk A-beton, hvor Lavalkali Sulfatbestandig cement er skiftet ud med RAPID® cement, kg for kg. De efter-

<sup>3</sup> S. Rasmussen & D. Herfort: *Mineralised cement*, artikel udgivet i forbindelse med konferencen *Creating with Concrete*. Conference 1: Modern Concrete Materials: Binders, Additions, and Admixtures. Basic Portland Cement, afholdt i Dundee, 1999.

5.1

5.2



### ■ Brug grøn cement

Det er ofte muligt at substituere Lavalkali Sulfatbestandig cement med RAPID® cement, der er mindre miljøbelastende - og som hvad angår frostbestandighed, kloridindtrængning, carbonatisering og alkalireaktivitet giver samme holdbarhed.

følgende undersøgelser af de to betoners frostbestandighed, kloridindtrængning, carbonatisering og alkalireaktivitet viste, at beton med RAPID® cement har en holdbarhed, der fuldt ud er på højde med holdbarheden af beton med Lavalkali Sulfatbestandig cement. Det ser således ud til, at det i mange tilfælde er muligt at substituere Lavalkali Sulfatbestandig cement med den mindre miljøbelastende RAPID® cement.

Undtagelsen er betonkonstruktioner i sulfatholdigt miljø. Normalt regnes en beton for at være sulfatbestandig, hvis cementen indeholder mindre end 5% af klinkermineralet C<sub>3</sub>A (tricalciumaluminat). Dette krav overholdes af Lavalkali Sulfatbestandig cement, hvorimod RAPID® cement indeholder 6% C<sub>3</sub>A. Sulfat kan trænge ind i betonen enten fra marine omgivelser eller fra en sulfatholdig jordbund. Det er derfor på forhånd muligt at afgøre, om betonen bliver udsat for sulfat. Derfor er det også muligt at tage stilling til, om det i det konkrete tilfælde er velbegrundet at bruge Lavalkali Sulfatbestandig cement - eller om den mere miljøvenlige RAPID® cement gør lige så god fyldest.

De anførte miljødata i **Tabel 1** gælder specifikt for Aalborg Portlands produkter. Energiforbruget og CO<sub>2</sub>-emissionerne kan imidlertid variere meget fra producent til producent. Derfor kan konklusionerne ikke umiddelbart overføres til andre cementtyper og -mærker. Når man skal vurdere hvilken cement, der er den mindst miljøbelastende til et givet formål, er det således nødvendigt at rekvirere miljødata for de cementer, man aktuelt sammenligner.

**Styrkepotentiale** Aalborg Portlands Lavalkali Sulfatbestandig cement har standardbetegnelsen CEM I 42,5, mens RAPID® cement betegnes som en CEM I 52,5 cement. Tallene på henholdsvis 42,5 og 52,5 referer til cementstyr-

	CO <sub>2</sub> kg CO <sub>2</sub> /ton cement	NO <sub>x</sub> kg NO <sub>x</sub> /ton cement	Andel CO <sub>2</sub> -neutral brændsel i %
Lavalkali Sulfatbestandig cement	1158	8,9	6
RAPID® cement	834	3,4	18

**Tabel 1** Emissioner forbundet med produktion af forskellige typer cement produceret på Aalborg Portland.<sup>4</sup>

ken, og de giver også en indikation af cementens styrkepotentiale i beton. Ny RAPID® cement har en 28-døgnsstyrke på 66 MPa, hvilket er 5-10% højere end for den RAPID® cement, der tidligere blev produceret. Det er ofte miljøvenligt at vælge en cement med høj styrke, hvis man kan udnytte den højere styrke til at nedsætte mængden af beton i konstruktionen og på den måde opnå miljømæssige besparelser. Alternativt kan indholdet af cement i betonen reduceres svarende til den øgede styrke.

**Regelgrundlag** Betonstandarden DS 481 tillader brug af cement svarende til RAPID® cement i alle miljøklasser, også A og E. DS 481 forhindrer således ikke brug af RAPID® cement i stedet for Lavalkali Sulfatbestandig. Dette vil også være tilladt, når den europæiske betonstandard EN 206-1 træder i kraft i december 2003. Vejregeludvalgets udbuds- og anlægsforskrifter, herunder Almindelig Arbejdsbeskrivelse for Betonbroer (AAB), benyttes for de fleste offentlige anlægsarbejder. AAB'en kræver, at der i miljøklasserne A og E anvendes cement med høj sulfatbestandighed (HS). Dette krav kan RAPID® cement ikke opfylde.

<sup>4</sup> Kilde: Aalborg Portland, december 2002

Klinker er fællesbetegnelsen for den del af cementen, der har været igennem en brændeprocess. Fint formalede klinker er den vigtigste bestanddel i cement, men det er også den del, der kræver mest energi at fremstille. Fra et miljømæssigt synspunkt gælder det derfor om at begrænse betonens indhold af klinker.

En beton med lavt indhold af klinker må nødvendigvis indeholde mere af andre bestanddele. Der er principielt tre måder at reducere betonens indhold af klinker:

- Øge betonens andel af tilslag (dvs. sand og sten)
- Anvende cement, hvor en del af klinkerne er erstattet af kridt, flyveaske, mikrosilica eller andet
- Erstatte en del af cementen i betonen med flyveaske, mikrosilica eller andet.

De to sidste metoder er delvist to sider af samme sag. Det handler om hvorvidt fx flyveaske tilsættes af cementproducenten og på den måde bliver en del af cementen, eller om flyveasken først tilsættes på betonfabrikken.

I store dele af Europa er der krav til, at betonen skal indeholde et vist minimum af cement og der er samtidigt tradition for at bruge cement med forholdsvis lav styrke. Her reduceres betonens klinkerindhold i stor udstrækning ved at tilsætte andre materialer til cementen.

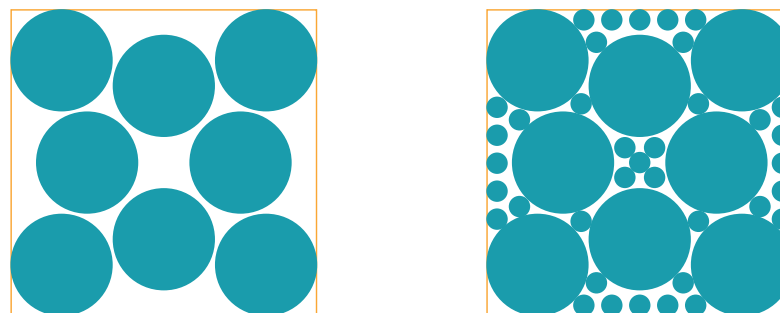
I Danmark er der tradition for at anvende cement med høj styrke og til gengæld holde betonens cementindhold på et minimum. Derfor tilsættes fx flyveaske først på betonfabrikken. Aalborg Portlands BASIS® cement er den eneste danskproducerede cementtype, hvor der er foretaget en substitution af klinker. Her udnyttes et fordelagtigt samspil mellem mineraliserede klinker og en specialfiller af formålet kridt. På den måde opnås en cement med høj styrke, hvor 14% af klinkerne er erstattet med kridt. I Grøn Beton-projektet er det i overensstemmelse med dansk tradition forsøgt at reducere betonens klinkerindhold ved at erstatte en del af cementen med flyveaske.

### 6.1

#### Mere tilslag

Frisk beton kan ansues som partikler af fast stof i form af sand og sten, der er omgivet af en pasta af vand og pulver, som består af cement samt eventu-

elt flyveaske og mikrosilica. Jo mere sand og sten fylder, desto mindre pasta - og dermed cement - skal der til for at fylde hulrummene mellem de faste partikler ud, se **Figur 2**.



**Figur 2** Eksempler på pakning. Til venstre partikler med samme størrelse. Til højre partikler med forskellig størrelse. Hulrummet mellem partiklerne bliver som regel mindre, når partiklerne har forskellig størrelse.

Det gælder derfor om at finde en kombination af tilslag med forskellige størrelser, hvor andelen af fast stof, den såkaldte pakning, er maksimal. Pakningen kan beregnes på baggrund af forsøg med, hvordan materialerne pakker hver for sig. Beregningerne er dog ret komplicerede, og det kan være en fordel at bruge et passende beregningsværktøj.<sup>5</sup>

Stikprøver viser, at kombinationen af tilslag i de danske betoner som regel er meget tæt på det optimale. Miljømæssigt set er der derfor ikke så meget at opnå ved at optimere pakningen. Det skyldes, at der også er en økonomisk tilskyndelse for betonproducenten til at have et højt indhold af tilslag, fordi tilslaget næsten altid er betonens billigste ingrediens.

<sup>5</sup> Mette Glavind, Ingolf Sørensen og Esben Thygesen: *Pakningsberegninger som hjælpemiddel ved betonproportionering*, Beton-Teknik 2/11/1999 udgivet af CtO.



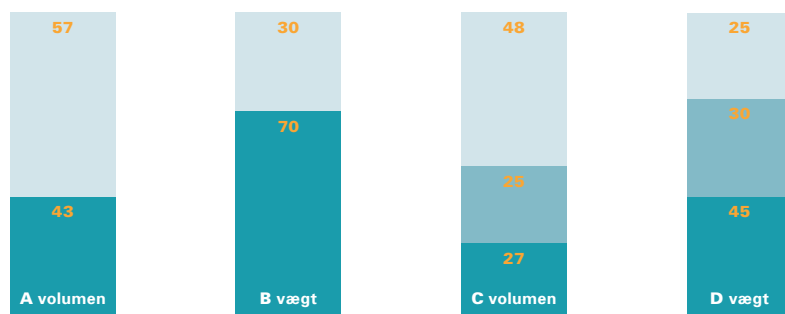
## 6.2

### Mere flyveaske

Flyveaske kan til en vis grad erstatte cement, men ikke kg til kg. Mange af betonens egenskaber er bestemt af, hvor meget cement der er i betonen. Fx afhænger betonens styrke af forholdet mellem vand og cement, det såkaldte v/c-forhold. Flyveaske bidrager ikke så meget til betonens styrke som cement, mens mikrosilica giver et større styrkebidrag end cement. Dette udtrykkes i det ækvivalente v/c-forhold. Ved sammensætning af en grøn beton skal der også tages højde for, at cement og flyveaske har forskellig rumvægt. I Grøn Beton-projektet er der opnået gode erfaringer med:

- P-betoner, hvor ca. 50% af pulveret består af flyveaske.
- A-betoner, hvor ca. 40% af pulveret består af flyveaske.

For både P- og A-betoner gælder det, at procentsatsen angiver andelen af pulverets samlede vægt. Betonerne er fremstillet på en måde, så det samlede volumen af vand og pulver er uændret i forhold til referencebetonerne. Dette gælder også det ækvivalente v/c-forhold. **Figur 3** viser et eksempel på denne fremgangsmåde.



**Figur 3** Sammensætning af beton (i %) med ækvivalent v/c-forhold på 0,42, hvor A-B er beton uden flyveaske og C-D er beton med 40% flyveaske.

■ cement ■ flyveaske ■ vand

### ■ Det ækvivalente v/c-forhold

Flyveaske bidrager ikke så meget til betonens styrke som cement, mens mikrosilica giver et større styrkebidrag end cement. Det tager man højde for ved at beregne det ækvivalente v/c-forhold, hvor indholdet af flyveaske og mikrosilica multipliceres med aktivitetsfaktorer på henholdsvis  $\frac{1}{2}$  og 2:

$$v/c_{\text{ækv}} = c + \frac{1}{2} \cdot fa + 2 \cdot ms$$

hvor: **v** vand [kg pr. m<sup>3</sup> beton] **c** cement [kg pr. m<sup>3</sup> beton] **fa** flyveaske [kg pr. m<sup>3</sup> beton] **ms** mikrosilica [kg pr. m<sup>3</sup> beton]. Det skal dog bemærkes, at aktivitetsfaktorerne afhænger af betonens sammensætning. Fx begynder aktivitetsfaktoren for flyveaske at falde, når indholdet bliver meget højt (større end 30-40% af pulveret). Det giver således et fejlagtigt indtryk af betonens styrke, hvis der regnes med en aktivitetsfaktor for flyveaske på  $\frac{1}{2}$  i beton, hvor flyveaskeindhold er på 60%.

Betonerne med højt indhold af flyveaske kan stort set anvendes som almindelige P- og A-betoner. Dog bør man være opmærksom på følgende:

- Betonerne kræver forholdsvis store mængder tilsætningsstoffer (plastificeringsmidler, superplastificeringsmidler og luftindblanding). Dette kan påvirke betonernes udstøbelighed, idet betonerne kan blive mere klistrede. Det gør det vanskeligere at glitte betonerne og give dem en pæn finish.
- Betonerne har en forholdsvis lav varmeudvikling. Dette er i nogle tilfælde en fordel, fx ved udstøbning af store, massive konstruktionsdele, hvor der er risiko for termorevner på grund af store temperaturdifferencer. Men den lave varmeudvikling og deraf følgende langsommere modenhedsudvikling kan også være en ulempe. Fx kræver betonerne udtørningsbeskyttelse i meget lang tid ved støbning under vinterforhold.
- A-betonerne kræver mere styring og kontrol. Flyveasken påvirker virkningen af bl.a. luftindblandingsmidlet. Derfor slår variationer i flyveaskeleverancen kraftigere igennem i en beton med store mængder flyveaske end i en beton med moderate mængder flyveaske.

Det kan være svært at opnå en tilstrækkelig fin luftporestruktur til at sikre A-betonernes frostbestandighed. Bortset fra det har betonerne en meget tilfredsstillende holdbarhed. De store mængder flyveaske nedsætter indtrængning af klorider, men betyder samtidig, at carbonatiseringen forløber lidt hurtigere end ellers.



*Fra opførelsen af den grønne demonstrationsbro. Billedet i midten viser modtagekontrol af beton på byggepladsen, idet det måles, at betonens luftindhold er i orden.*

**Regelgrundlag** Flyveaske skal opfylde DS/EN 450 om flyveaske til beton. Denne standard stiller bl.a. krav til flyveaskens kemiske sammensætning. Ifølge materialestandarden DS 481 må den samlede mængde flyveaske og mikrosilica i miljøklasse M ikke overstige 35% af pulvervægten, mens den ikke må overstige 25% i miljøklasse A og E. Den maksimale mængde flyveaske afhænger således af, hvor store mængder mikrosilica, der anvendes. Der er ikke krav til P-betonernes maksimale indhold af flyveaske. Den kommende EN 206-1 fastsætter ingen øvre grænse for flyveaskeindhold i P-betoner. For de øvrige betoner skelner den europæiske standard ikke mellem miljøklasser, idet det for både M-, A- og E-betoner gælder, at vægten af flyveasken højst må svare til en tredjedel af cementvægten. EN 206-1 træder i kraft til december 2003. Vejregeludvalgets AAB refererer til de samme grænser for flyveasketilsætning som DS 481.

### Beton med betonslam

Betonslam er vand, der har været benyttet til vask af blandedstyr og betonbiler eller til udvaskning af frisk beton. Betonslammet har en høj pH-værdi, så det i mange tilfælde ikke kan udledes til rensningsanlæg uden først at blive neutraliseret. Det er miljømæssige fordele ved at genanvende slammets til betonproduktion. Således kan slammets tørstof erstatte en del af betonsandet, og vandet i slammets kan bruges som blandevand. På den måde spares der på naturlige ressourcer, samtidigt med at betonværket minimerer sine affaldsmængder. Desuden er det ikke længere nødvendigt at neutralisere betonslammet kemisk.

Grøn Beton-projektet har brugt betonslam i både P- og A-betoner. Betonerne med betonslam er blandet på flere forskellige produktionssteder, så betonslammet tørstofindhold har varieret i intervallet 10-25%. Beton med betonslam har generelt gode mekaniske egenskaber, og betonslammet ser ikke ud til at nedsætte betonens holdbarhed. De udførelsesmæssige egenskaber er imidlertid dårligere end for en beton uden betonslam:

- Beton med betonslam kræver en øget dosering af plastificerings- og/eller superplastificeringsmidler for at opnå en tilfredsstillende bearbejdelighed.
- Betonen taber hurtigere sin bearbejdelighed og afbindingstiden er kortere end ved beton uden betonslam, selvom de forholdsvis høje doseringer af tilsætningsstoffer burde trække i den modsatte retning.
- Nogle betoner med betonslam - men ikke alle - har tendens til at separere ved glitning.

**Regelgrundlag** Betonslam er ikke nævnt i standarderne for beton. Men som regel vil betonslam falde ind under definitionen på procesvand. Procesvand er defineret som vand opsamlet på betonproduktionsstedet fra specifikke kilder, herunder vand fra rengøring af udstyr og regnvand. Procesvand til betonfremstilling i miljøklasse P og M må ifølge DS 481 højst indeholde 35% tørstof og i miljøklasse A og E højst 2%. Hvis der anvendes procesvand med et højt tørstofindhold i miljøklasse P og M, skal procesvandet fortyndes med vandværksvand, idet blandevandet højst må indeholde 10% tørstof. EN 206-1 tillader også brug af procesvand til betonfremstilling. Mængden af tørstof

### ■ **Betonslam**

Betonslam stammer fra vask af blandeudstyr og betonbiler eller udvaskning af frisk beton. Betonslammet består primært af opslæmmed, hydratiseret cement, flyveaske og mikrosilica samt fine sandpartikler. De grovere tilslagspartikler sorteres fra.

må i alle miljøklasser udgøre op til 1% af den samlede tilslagsmængde. Ved en normal sammensætning, hvor tilslaget typisk udgør ca. 1.800 kg pr. m<sup>3</sup> beton, betyder dette for miljøklasserne A og E en lempelse i forhold til kravene i DS 481. Kravene i Vejregeludvalgets AAB svarer til kravene i DS 481.

## 7.2

### Beton med stenmel

Stenmel er et restprodukt fra knusning af klippe til grovere betontilslag. Stenmelet minder om traditionelt betonsand, men det har en mere kantet kornform og en lidt anderledes gradering. I Grøn Beton-projektet er stenmelet blevet brugt i stedet for sand i beton for at minimere mængden af restprodukter hos tilslagsproducenterne. Samtidigt betyder brug af stenmel, at der kan spares på naturlige sandforekomster.

Projektet har brugt stenmel fra to forskellige stenbrud. De to typer stenmel har forskellige kornkurver og dermed forskelligt indhold af finstof, se **Figur 4**. Det skyldes, at der anvendes forskellige metoder til knusning: I Dalby knuses tilslaget tørt, mens der i Hardeberga anvendes vådknusning, hvor finstoffet vaskes ud. Grøn Beton-projektet har undersøgt betoner, hvor stenmelet helt eller delvist har erstattet betonsandet. I alle tilfælde bliver resultatet betoner med gode mekaniske egenskaber. Stenmelet påvirker heller ikke betonens holdbarhed negativt. På følgende punkter adskiller beton med stenmel sig fra beton med sand:

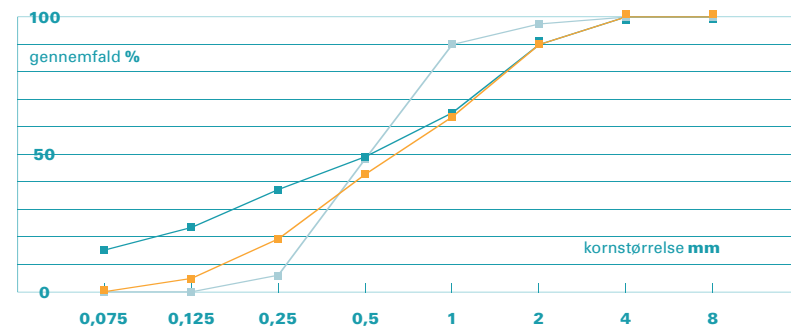
- Betonen kræver forholdsvis høj dosering af plastificerende og/eller superplastificerende tilsætningsstoffer. Det medfører, at der går lidt længere tid, før betonen er klar til at blive glittet.
- Betonen er mere følsom overfor dannelse af plastiske svindrevner. Det stiller større krav til betonens udtørningsbeskyttelse.

### ■ **Stenmel**

Stenmel er et restprodukt fra knusning af klippe til grovere betontilslag. Stenmel kan med godt resultat erstatte sand i beton, men stenmel fra forskellige stenbrud kan have forskellige kornkurver og dermed forskelligt indhold af finstof. Stenmel med lavt indhold af finstof er umiddelbart bedst egnet til betonproduktion.

Der er forskel på beton med stenmel fra henholdsvis Dalby og Hardeberga. Stenmel fra Hardeberga med lavt indhold af finstof er umiddelbart bedst egnet til betonproduktion.

**Regelgrundlag** Stenmel kan umiddelbart anvendes i stedet for sand, både i henhold til DS 481 og EN 206-1. Vejregeludvalgets AAB stiller imidlertid krav til sandets kornkurve. Her er det afgørende, at gennemfaldet på 0,075 mm sigten er mindre end 3%. Dette krav opfylder stenmel af den type, der kommer fra Hardeberga, hvorimod stenmel fra Dalby ikke gør det.



**Figur 4** Typiske middelkornkurver for stenmel (Dalby og Hardeberga) samt for et typisk dansk bakkensand.

■ 0-2 Dalby ■ 0-2 Hardeberga ■ Bakkensand 0-4 Kl. A

Alternativ aske er i princippet al aske, der ikke stammer fra kulfyring, og som derfor ikke er omfattet af EN 450. Konkret har Grøn Beton-projektet udvalgt to alternative asketyper, nemlig aske fra forbrænding af spildevandsslam og aske fra forbrænding af biobrændsel. Der er store potentialer i begge typer aske. I Danmark produceres der 10-15.000 tons aske om året fra forbrænding af spildevandsslam. Den afprøvede aske fra forbrænding af biobrændsel er fra Sverige. I Danmark samfyres biobrændsel som regel med kul.

Aske fra kulfyring har en forholdsvis veldefineret kemisk sammensætning, og der er stor erfaring med at bruge denne aske i beton. Udfordringen ved at bruge de alternative asketyper er, at deres sammensætning varierer betydeligt. De alternative asker indeholder således stoffer, der ikke findes i kulaske, ligesom en række velkendte stoffer findes i andre mængder end i kulaske, se **Tabel 2**. Det spiller også ind, at brændingsforholdene er anderledes end i kulfyrede kraftværkskedler. Det har betydning for, hvor store dele af asken, der bliver henholdsvis amorf og krystallinsk, og dermed for, hvordan den reagerer kemisk i betonen. Det er en forskel, der ikke fremgår af den kemiske analyse i **Tabel 2**. Derfor kan det være vanskeligt at forudsige, hvordan de alternative asketyper påvirker betonens egenskaber.

Både traditionel flyveaske og alternative asketyper indeholder desuden en række tungmetaller i små mængder, se **Tabel 3**. Tungmetallerne påvirker ikke betonens tekniske egenskaber, men de er alligevel uønskede. For det første kan tungmetallerne forringe betonproducenternes affalds- og spildevandskvalitet. For det andet er det uheldigt, hvis der sker en ophobning af tungmetal i betonen, fordi det kan begrænse mulighederne for senere genbrug. I værste fald kan der ske en udvaskning af tungmetaller fra betonen. Det generelle billede er, at de alternative asker har et højere indhold af tungmetaller end flyveaske fra kulfyring.

I det konkrete tilfælde er det vurderet, at betonproducenten stadigvæk kan overholde kravene i fabrikkens miljøgodkendelse med hensyn til tungmetalindholdet i spildevand og fast affald. Tungmetalindholdet i den færdige betonkonstruktion overholder kravene for affald i kategori 1 i Bekendtgørelse om genanvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder.<sup>6</sup>

Eksempel	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO total	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O-ækv.	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	glødetab
<b>Krav i EN 450</b>	>25 <sup>1</sup>	.1	.1	.2	<0,10	<3,0	.3	-	-	<5,0
<b>Dansk flyveaske fra forbrænding af kul</b>	59,7	21,3	7,6	2,8	0,00	0,65	1,8	1,4	0,34	3,4
<b>Aske fra forbrænding af biobrændsel</b>	29,4	14,7	4,2	18,1	1,5	-	-	2,8	0,42	4,6
<b>Aske fra forbrænding af spildevandsslam</b>	20,2	6,0	15,1	24,4	0,00	2,0	1,8	2,4	20,2	2,5

**Tabel 2** Kemisk sammensætning af forskellige asketyper (i % af tørstof).

**1** Forventet krav i kommende EN 450-1: SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>70%

**2** Forventet krav i kommende EN 450-1: total CaO<10%

**3** Forventet krav i kommende EN 450-1: Na<sub>2</sub>O-ækvivalent<5,0%

Eksempel	Arsen	Bly	Cadmium	Chrom	Kobber	Kviksølv	Nikkel	Zink
<b>Dansk flyveaske fra forbrænding af kul</b>	<30	34	<10	137	77	0,2	100	181
<b>Aske fra forbrænding af biobrændsel</b>	189	1010	31	1050	916	1,47	138	6920
<b>Aske fra forbrænding af spildevandsslam</b>	<30	397	<20	148	817	1,2	155	2709

**Tabel 3** Indhold af udvalgte tungmetaller i forskellige asketyper (i mg pr. kg tørstof).

Derfor vurderes det også, at det aktuelle tungmetalindhold ikke ændrer på, at betonen senere kan anvendes i nedknust form i fx jordvolde.

<sup>6</sup> Bekendtgørelse om anvendelse af restprodukter og jord til bygge- og anlægsarbejder, bekendtgørelse nr. 655 udgivet af Miljø- og Energiministeriet i 2000.

### ■ **Beton med aske fra biobrændsel**

*Aske fra forbrænding af biobrændsel kan erstatte en del af cementen i betoner, der ikke indeholder flyveaske. Betonen får gode mekaniske egenskaber. Aske fra biobrændsel er dog kun velegnet til betoner i passiv miljøklasse, fordi indholdet af klorid er forholdsvis stort. Indholdet af tungmetaller er højt sammenlignet med indholdet af tungmetaller i traditionel flyveaske fra kulfyring.*

8.1

### **Aske fra forbrænding af biobrændsel**

Grøn Beton-projektet har undersøgt beton, hvor aske fra forbrænding af biobrændsel erstatter 30% af cementen i en beton, der ikke i forvejen indeholder flyveaske. Erfaringerne fra Grøn Beton-projektet er følgende:

- Asken er kun egnet til beton i passiv miljøklasse, idet askens kloridindhold giver for stor risiko for armeringskorrosion i fugtigt miljø.
- Betonen kræver en større dosering af tilsætningsstoffer for at opnå den ønskede bearbejdelighed end beton uden aske. Betonen har udmærkede støbeegenskaber, om end den er en anelse klistret og har længere afbindingstid. Det er ikke afklaret, om dette skyldes asken eller den øgede mængde tilsætningsstoffer. I sidstnævnte tilfælde vil problemet sandsynligvis kunne løses med en bedre receptjustering, hvor betonens pastamængde øges en anelse.
- Betonen har generelt gode mekaniske egenskaber så som styrke og stivhed. Der er tale om en sej beton med et langt deformationsforløb efter arbejdskurvens toppunkt, før betonen bryder definitivt.

8.2

### **Aske fra forbrænding af spildevandsslam**

Grøn Beton-projektet har undersøgt beton, hvor aske fra slamforbrænding helt eller delvist erstatter flyveaske i betonrecepter, der som udgangspunkt indeholder traditionel flyveaske. Det har givet anledning til følgende erfaringer:

- Betonen har generelt gode mekaniske egenskaber. Dog har beton med meget slamaske i forhold til cementindholdet en lavere styrke end forventet. Denne kombination er dog kun afprøvet for P-betoner. Årsagen er ikke klarlagt, men den lavere styrke skyldes muligvis, at askens indhold af fosfor i form af  $P_2O_5$  hæmmer cementens hydratisering. Slamasken indeholder ca. 20%  $P_2O_5$ , hvor traditionel flyveaske fra kulfyring indeholder under 1%.

### ■ **Beton med aske fra spildevandsslam**

*Beton med aske fra spildevandsslam har generelt gode mekaniske og udførelsesmæssige egenskaber. Ved brug af store mængder af denne aske bliver styrken lavere ned forventet. Desuden har asken et forholdsvis stort indhold af  $SO_3$ , hvilket måske har betydning for holdbarheden.*

- Betonen har generelt gode udførelsesmæssige egenskaber. Dog er der brug for en øget dosering af plastificerings- og/eller superplastificeringsmidler for at opnå den ønskede bearbejdelighed. Det medfører blandt andet, at det går lidt længere tid, før betonen kan glittes.
- Betonen ser umiddelbart ud til at få et større luftindhold. Der er imidlertid tale om grove luftporer, så det fortsat er nødvendigt at anvende et luftindblandingsmiddel for at opnå en luftporestruktur, der beskytter betonen effektivt mod frostskafer.
- Beton til miljøklasse A er foruden frostangreb undersøgt for carbonatisering, kloridindtrængning og alkali-reaktivitet. På alle områder viste betonen tilfredsstillende holdbarhed. Askens  $SO_3$ -indhold er større end i traditionel flyveaske. Undersøgelser af beton ét år efter udstøbning viste, at  $SO_3$  kunne genfindes bundet i betonens bindemiddel. Det er uvist, om de pågældende kemiske forbindelser er stabile på lang sigt, eller om  $SO_3$  senere kan frigives og forårsage samme skader som et sulfatangreb.

**Regelgrundlag** DS 481 tillader kun brug af flyveaske, der er omfattet af EN 450, og det samme er desuden tilfældet for EN 206. EN 450 tillader kun flyveaske fra kulforbrænding. DS 481 tillader dog alligevel de alternative asketyper til beton. Blot skal de indgå som "øvrige anden tilsætning" og ikke som flyveaske. Desuden skal det dokumenteres, at askerne ikke fremmer armeringskorrosion eller på anden måde forringer betonens egenskaber.

Når asken tilsættes som "øvrige anden tilsætning", har det den ulempe, at asken ikke kan medregnes i det ækvivalente v/c-forhold. Den vil i så fald stort set kun have interesse til beton i miljøklasse P, hvor standarden ikke stiller krav til et minimum v/c-forhold.

Undersøgelserne i Grøn Beton-projektet viser, at de grønne betoner er lige så holdbare som sædvanlige betoner (dog med enkelte undtagelser omtalt i kapitel 5-8). Det betyder, at de grønne betoner ikke har særlige behov for vedligehold eller andre foranstaltninger. De grønne løsninger, der er beskrevet nedenfor, omhandler derfor alle betoner og ikke kun de grønne. Hovedkonklusionen er, at det er muligt at opnå væsentlige ressourcebesparelser ved samlet at gennemtænke drift, vedligehold og udformningen af konstruktionerne.

## 9.1

**Ressourcebesparende konstruktionstekniske løsninger**

Det er muligt at nedsætte byggeriets miljøbelastning ved at optimere konstruktionerne, så der benyttes mindst muligt materiale. Grøn Beton-projektet har bl.a. undersøgt følgende muligheder:

- Broer uden fugtisolering. Fugtisolering benyttes ofte ved vejbroer, hvor vejbanens fugtisolering beskytter den underliggende beton. Fugtisoleringen har imidlertid en kortere levetid end resten af broen og skal derfor repareres med mellemrum for stadigvæk at være effektiv. Ved at benytte en tæt beton med god holdbarhed bliver fugtisoleringen overflødig. Det sparer materiale og energi både ved opførelse af broen og ved efterfølgende reparationer.

- Konstruktionsudformninger, hvor enkeltdele er nemme at udskifte. Ofte vil enkelte konstruktionsdele være væsentligt mere udsatte end konstruktionen som helhed. For en vejbro gælder dette søjler og kantbjælker. Konstruktionen kan udformes, så fx søjler er forholdsvis nemme at skifte ud. Derved kan broens samlede levetid forlænges ved en række mindre reparationer.

Sådanne løsninger vil i mange tilfælde også være økonomisk fordelagtige. Men nogle af løsningerne kræver mere arbejde eller dyrere materialer. De er derfor ikke nødvendigvis økonomisk optimale. I disse tilfælde må bygherren afveje, hvor meget miljøforbedringerne er værd.

## 9.2

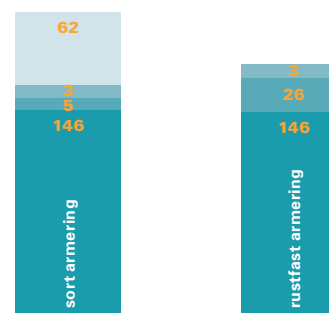
**Ressourcebesparelser ved drift og vedligehold**

Drift og vedligehold inkluderer både løbende vedligehold og reparationer. Det vil blandt andet sige rengøring, overfladebeskyttelse, udskiftning af isolering mv. og betonreparationer. Drift og vedligehold er ofte en tungtvejende

**■ Drift, vedligehold og udformning**

*Der er betydelige miljøgevinster at høste ved konstruktioner med minimalt behov for vedligehold og ved ressourcebesparende konstruktioner, hvor der benyttes mindst muligt materiale. Det gælder både for grønne og for sædvanlige betoner.*

del af det samlede miljøregnskab, når man ser på hele konstruktionens levetid. Behovet for vedligehold afhænger meget af konstruktionens udformning. Derfor vil det ofte være en god idé at lave konstruktioner, hvor behovet for vedligehold er minimalt - også selvom det betyder, at miljøbelastningen ved opførelsen af bygværket bliver lidt større. Eksempler på denne tankegang er bl.a. rustfri armering, permanent stålforskalling og øget dæklag. Sådanne tiltag er især relevante for særligt udsatte konstruktionsdele, hvor fx kloridindtrængning er bestemmende for konstruktionens levetid.



**Figur 5** Sammenligning af CO<sub>2</sub>-emissioner ved fremstilling, drift og vedligehold af forskellige brosjøler (kg CO<sub>2</sub> pr. år). Der er regnet med en levetid på 100 år.

■ beton ■ armering ■ opførelse i øvrigt ■ drift og vedligehold



De foregående kapitler redegør for erfaringerne med at anvende forskellige restprodukter ved produktion af frisk beton. Men der findes også en række andre restprodukter, der kan være interessante i denne forbindelse.

## 10.1

**Hvordan kommer man i gang?**

Først og fremmest gælder det om at finde ud af, om det pågældende restprodukt må formodes at være egnet til betonproduktion, og hvad det i givet fald skal erstatte. Her kan man starte med at kortlægge, om restproduktet ligner nogle af de traditionelle bestanddele i betonen:

- Er der fysiske ligheder med fx sand eller flyveaske? Undersøg restproduktets kornkurve og partikelform.
- Er der kemiske og mineralogiske ligheder? Gennemgå en kemisk og mineralogisk analyse af restproduktet, og vurder om det fx vil kunne tage del i en puzzolanreaktion, som flyveaske og mikrosilica gør det - eller om restproduktet må forventes at være kemisk inaktivt.

Desuden er det vigtigt at undersøge, om restproduktet indeholder skadelige stoffer - det gælder både stoffer, der kan skade miljøet (bl.a. tungmetaller) og stoffer, der skader betonen (klorid, sulfat etc.).

Som udgangspunkt vil det være naturligt at lade restproduktet helt eller delvist erstatte den bestanddel i betonen, det ligner mest. Forskellene mellem restproduktet og den bestanddel, det erstatter, vil kunne give et fingerpeg om, hvorvidt restproduktet vil påvirke betonens egenskaber og i givet fald i hvilken retning. Fx var det forventeligt, at beton med stenmel ville kræve mere plastificeringsmiddel for at opnå tilfredsstillende bearbejdelighed, da kornformen er mere kantet end formen af det sand, der erstattes - samtidigt med at stenmelet indeholder mere finstof. Både kantede korn og øget indhold af finstof gør betonen mere vandkrævende.

Ændringer i forhold til traditionel beton er ikke nødvendigvis negative. Således kan både kortere og længere afbindingstider være hensigtsmæssige i bestemte situationer, ligesom større eller mindre varmeudvikling kan være positivt i bestemte sammenhænge. Men aktiviteterne på byggepladsen er

normalt planlagt på baggrund af konventionel betons egenskaber. Derfor er det vigtigt at kende eventuelle ændringer af egenskaber på forhånd, så der kan tages højde for dem ved planlægningen af betonarbejdet.

**Stikord til gennemgang af en kemisk analyse**

Første skridt mod at anvende et nyt restprodukt er at klarlægge forskelle og ligheder i forhold til de bestanddele, der allerede benyttes til betonproduktion. I praksis er det umuligt at opstille en liste, der tager højde for alle de forskelle, der vil være mellem de delmaterialer til beton, vi allerede kender i dag, og alle de restprodukter, man i fremtiden vil komme til at overveje at inddrage i betonproduktion. Nedenstående liste må derfor ikke betragtes som en fuldstændig liste over mulige problemfelter. Listen er et forsøg på at inddrage de erfaringer, vi allerede har med den kemiske sammensætning af cement (EN 197-1) og flyveaske fra kulfyring (EN 450). Hvis de uønskede stoffer væsentligt overskrider de grænser, der kendes fra flyveaske og cement, er det på et tidligt tidspunkt muligt at afgøre, at restproduktet sandsynligvis ikke er egnet til betonproduktion. Kemiske forskelle, der ikke er nævnt, bør vurderes særskilt i hvert enkelt tilfælde.

**Silica (SiO<sub>2</sub>), aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) og jernoxid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)** Silica, aluminiumoxid og jernoxid er de væsentligste bestanddele i flyveaske, der overholder kravene i EN 450. Silica er kendt for at kunne reagere med calciumhydroxid, der er dannet ved cementens hydratisering, og derved bidrage til dannelsen af bindemiddel i betonen. Denne reaktion kaldes en puzzolanreaktion. Aluminiumoxid og jernoxid indgår i nogen grad i lignende reaktioner. Indholdet af de tre oxider kan derfor indikere, om et givet restprodukt må forventes at have puzzolanske egenskaber og dermed bidrage til udvikling af betonens styrke og tæthed.

**Kloridindhold (Cl<sup>-</sup>)** Tilstedeværelsen af klorider fremmer armeringskorrosion ved at ødelægge passiveringen af armeringsjernet. Klorider er derfor uønskede i betonen. Ifølge EN 197-1 må cement højst indeholde 0,10% klorid. Det samme krav gælder for flyveaske jf. EN 450.

**Sulfatindhold (SO<sub>3</sub>)** Nogle sulfatforbindelser nedsætter betonens styrke,

## 10.2

hvorfor kun et begrænset sulfatindhold er tilladt. Der tilsættes allerede sulfat til beton, idet cementen indeholder gips ( $\text{CaSO}_4$ ). Gipsen tilsættes for at styre cementens hydratiseringsforløb og er nøje afstemt efter cementens sammensætning. Det kan derfor heller ikke udelukkes, at tilsætning af yderligere sulfat kan påvirke hydratiseringsforløbet. Ifølge EN 450 må flyveaske ikke indeholde mere end 3,0% sulfat.

**Fri kalk ( $\text{CaO}$ )** Fri kalk, der ikke er bundet til oxiderne  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  eller  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , kan reagere med vand og danne calciumhydroxid. Dette er en ekspansiv reaktion, der kan føre til skader i betonen. Derfor er et stort indhold af fri kalk u hensigtsmæssigt. Ifølge EN 450 skal flyveaske indeholde mindre end 1% fri kalk. Dog kan flyveaske med op til 2,5% fri kalk godkendes, hvis det dokumenteres, at ekspansionerne er på et uskadeligt niveau.

**Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ )** Magnesiumoxid kaldes også periklas. Magnesiumoxid kan reagere med vand og føre til skadelige ekspansioner. I flyveaske fra kulfyring findes magnesiumoxid kun i helt ukritiske mængder, hvorfor EN 450 ikke stiller krav til indholdet. I EN 197-1 er det maksimalt tilladte indhold af magnesiumoxid i cement på 5%. Som tommelfingerregel gælder, at indholdet af magnesiumoxid ikke må overstige 5% af betonens pulvervægt. Hvis restproduktet indeholder mere end 5% magnesiumoxid, afhænger det således både af mængden af restproduktet og mængden af magnesiumoxid i cementen, om indholdet af den samlede pulvermængde overstiger 5%.

**Alkali ( $\text{Na}_2\text{O}$  og  $\text{K}_2\text{O}$ )** Alkali er en fællesbetegnelse for natrium- og kaliumioner og angives ofte som den ækvivalente mængde  $\text{Na}_2\text{O}$ . Alkali-ionerne får betonens pH-værdi til at stige. I beton med reaktivt tilslag kan det føre til dannelse af en gel af alkali-kisel eller alkali-carbonat. Gelen tiltrækker vand. Derved kan der opbygges et så stort tryk i gelen, at det kan skade betonen. Den høje pH-værdi kan dog også have positive effekter. Bl.a. kan den i nogle tilfælde accelerere betonens styrkeudvikling. Både cement og flyveaske har et vist alkali-indhold, men der er ingen krav til indholdet i hverken EN 197-1 eller EN 450. DS 481 angiver, at det samlede indhold af ækvivalent  $\text{Na}_2\text{O}$  ikke må overstige 3,0 kg pr.  $\text{m}^3$  beton i miljøklasse M, A og E. Det er tilladt at se

bort fra alkali-bidrag fra flyveaske og mikrosilica, idet de kendte puzzolaner nedsætter risikoen for skadelige alkali-kisel-reaktioner.

**Glødetab** Glødetabet er et udtryk for restproduktets indhold af organisk materiale. I flyveaske er der hovedsageligt tale om uforbrændt kul. Frit kulstof er meget reaktivt og vil reagere med betonens tilsætningsstoffer så som plastificeringsmiddel og luftindblandingsmiddel. Høje glødetab eller meget varierende glødetab kan derfor føre til, at det er svært at styre luftindhold og konsistens af den friske beton. Iflg. EN 450 må flyveaske højst have et glødetab på 5%.

**Fosforoxid ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )** Hverken flyveaskestandarden eller cementstandarden indeholder krav til indholdet af  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Erfaringerne med aske fra forbrænding af spildevandsslam tyder dog på, at man bør være forsigtig, hvis restproduktet indeholder større mængder af dette oxid.

**Tungmetaller** Ud fra en miljømæssig betragtning er tungmetaller i betonen uønskede af flere grunde. Tungmetallerne kan give betonproducenten problemer med at opfylde krav til spildevandskvalitet og kvaliteten af fast affald. Dertil kommer, at det ikke kan afvises, at tungmetallerne langsomt kan udvaskes fra betonen. Det er uheldigt, hvis betonen fx anvendes til drikkevandstanke. Risikoen for udvaskning kan måske også medføre, at betonen ikke senere kan genbruges som fx vejfyld. Derfor bør man for hvert enkelt restprodukt overveje, om indholdet af tungmetaller diskvalificerer materialet til betonproduktion, også selvom indholdet set fra en betontechnisk synsvinkel er ganske lille og uden betydning for betonens primære egenskaber.

**Respirabelt kvarts** Respirabelt kvarts er skadeligt ved indånding. Respirabelt kvart bindes i betonen, men det kan være et stort problem ved håndtering på betonfabrikken, før det tilsættes i betonen. Det er ikke muligt at opstille krav til restproduktets indhold af respirabelt kvarts. Men hvis det indeholder respirabelt kvarts, bør det undersøges, om det vil kræve særlige foranstaltninger for at opretholde et sundt arbejdsmiljø.

**Organiske stoffer** Organiske stoffer er som udgangspunkt fremmede i be-

### ■ **Vurdering af et restprodukt**

Følgende områder bør som minimum indgå i vurderingen af, om et nyt restprodukt egner sig til betonproduktion: **1 Silica** ( $\text{SiO}_2$ ), **aluminiumoxid** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) **og jernoxid** ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) **2 Kloridindhold** ( $\text{Cl}^-$ ) **3 Sulfatindhold** ( $\text{SO}_3$ ) **4 Fri kalk** ( $\text{CaO}$ ) **5 Magnesiumoxid** ( $\text{MgO}$ ) **6 Alkali** ( $\text{Na}_2\text{O}$  og  $\text{K}_2\text{O}$ ) **7 Glødetab** **8 Fosforoxid** ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) **9 Tungmetaller** **10 Respirabelt kvarts** **11 Organiske stoffer**

tonen, selvom der findes organiske forbindelser i visse tilsætningsstoffer til beton. Der henvises generelt til Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer.

### **Dokumentation af den grønne betons egenskaber**

I forbindelse med en ny, grøn betonrecept skal betonens konsistens samt dens brugs- og produktionsegenskaber forprøves. Det kræver DS 481 for alle nye betoner. Formelt indeholder standarden ikke krav om udvidet prøvning af en grøn beton, hvis denne i øvrigt efterlever standardens krav til sammensætning. Hvis det grønne tiltag består af tilsætning af et restprodukt som "øvrige andentilsætning", skal det dog dokumenteres, at restproduktet ikke forringer betonens egenskaber. Dette vil i mange tilfælde kræve flere prøvninger end omfattet af forprøvningen.

Beton, der ikke opfylder DS 481, kan kun benyttes, hvis den såkaldte afvigeparagraf i DS 409 tages i anvendelse. Den foreskriver, at enhver afvigelse skal dokumenteres at være forsvarlig. Dette vil normalt også kræve flere prøvninger end i forprøvningen for at skabe den fornødne tillid til betonen. I det følgende gennemgås nogle af de vigtigste egenskaber, som det kan komme på tale at undersøge og dokumentere.

**Mekaniske egenskaber** Forprøvningen dokumenterer kun betonens trykstyrke, idet der antages at være en entydig sammenhæng mellem trykstyrke og henholdsvis trækstyrke og stivhed, så disse to egenskaber kan beregnes på baggrund af trykstyrken. Men, hvis der ændres væsentligt på betonens sammensætning, bør betonens trækstyrke og E-modul også bestemmes for at dokumentere, at de gængse beregningsmetoder fortsat gælder. Desuden

kan det komme på tale at fastlægge betonens arbejdskurve for at se, hvordan betonen opfører sig omkring kurvens toppunkt. Dette gælder især for betoner med høj styrke, hvor der kan være mistanke om, at materialet er blevet mere skørt, så det bryder umiddelbart efter arbejdskurvens maksimum. Endelig bør betonens udtørringssvind dokumenteres, hvis det grønne tiltag ændrer sammensætningen af pulveret væsentligt. Dokumentationen skal svare til den dokumentation, der kræves for udtørringssvind for portland-composite cement, jævnfør DS 481.

**Brand** Forprøvning i henhold til DS 481 siger ikke noget om betonens egenskaber ved høje temperaturer. Betonens mekaniske egenskaber under brand vil typisk blive dårligere, hvis betonens pastaindhold øges væsentligt - eller hvis betonen indeholder materiale, der ikke er brandbestandigt. Det vil sige materiale, der dekomponerer eller på anden måde omdannes ved de temperaturer, der optræder ved brand. Det er derfor relevant at undersøge, hvordan grønne betoners mekaniske egenskaber påvirkes ved brandbelastning - også fordi beregningsgrundlaget i DS 411 ikke nødvendigvis er på den sikre side.

**Holdbarhed** Forprøvning efter DS 481 omfatter enten en luftporeanalyse eller en accelereret frost/tø-test. Men udover dette giver prøvningen ikke direkte mål for betonens holdbarhed. De fleste nedbrydningsmekanismer er afhængige af, at der kan foregå en transportproces i betonen:

- Armeringskorrosion på grund af indtrængning af klorider.
- Carbonatisering forårsaget af  $\text{CO}_2$  fra luften.
- Alkali-kisel-reaktioner forårsaget af indtrængende alkali.
- Sekundær ettringitdannelse forårsaget af indtrængende sulfater.

Derfor vil meget tæt beton oftest også være beton med god holdbarhed. Tæt beton vil som regel have en høj styrke og et lavt v/c-forhold, som begge dokumenteres ved forprøvningen. Således gør forprøvningen det i nogen grad muligt at vurdere betonens holdbarhed. Det afhænger af situationen, i hvilket omfang der er brug for dokumentation ud over forprøvningen. Det må dog tilrådes:

- At prøve carbonatiseringen ved beton med store mængder materiale med puzzolansk effekt, da dette nedsætter betonens indhold af calciumhydroxid

### ■ Sådan dokumenteres en grøn beton

Oftentimes er der brug for flere prøver end den obligatoriske forprøvning for at skabe tillid til en ny, grøn beton. Den udvidede prøvning kan fx omfatte:

**1** Trækstyrke og E-modul **2** Arbejdskurve **3** Udtørringssvind **4** Betonens mekaniske egenskaber ved brandbelastning **5** Carbonatisering **6** Måling af kloridmodstanden **7** Luftporeanalyse og accelereret frost/tø-test (begge metoder) **8** Måling af kloridindtrængning

og dermed - i hvert fald teoretisk - øger carboniseringshastigheden.

■ Afhængigt af betonens anvendelse at prøve fx kloridmodstanden for beton, der skal udsættes for kloridholdigt miljø.

■ At undersøge betonens frostbestandighed både med luftporeanalyse og med en accelereret frost/tø-test, selvom DS 481 kun stiller krav om at én af metoderne skal anvendes.

Måling af kloridindtrængning er en anden god indikator for betonens generelle tæthed. Dog skal der tages højde for, at kloridbinding kan spille ind. Eksempelvis er betoner med store mængder flyveaske kendt for at have en stor bindingskapacitet og dermed en lille kloridindtrængning i forhold til deres tæthed. **Figur 6** (se opslag side 34-35) giver et overblik over en god proces, der kan sikre den nødvendige dokumentation for en ny, grøn beton.

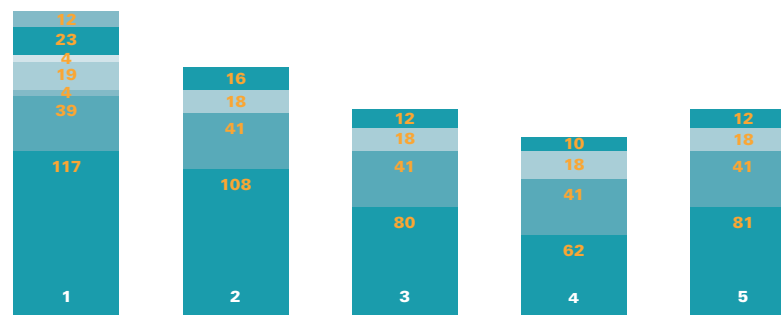
10.4

### Dokumentation af miljøforbedringer

Ved anvendelse af en grøn betonløsning er det vigtigt at dokumentere, at den nye løsning er en reel forbedring. Dokumentationen skal fx sikre, at der ikke utilsigtet introduceres nye miljøproblemer, og at den samlede løsning ikke fører til en større miljøpåvirkning end den traditionelle løsning. Miljødokumentationen skal omfatte hele betonkonstruktionens livscyklus, og alle relevante miljøpåvirkninger må vurderes jf. afsnit 10.1 og 10.2. Blandt disse betragtninger kan det bl.a. fremhæves, at den grønne løsning ikke må medføre, at udledningen af miljøskadelige stoffer øges eller at mulighederne for at genanvende betonen forringes. Hvis indholdet af tungmetaller er højere end i de delmaterialer, der normalt anvendes til betonproduktion, kan det anbefa-

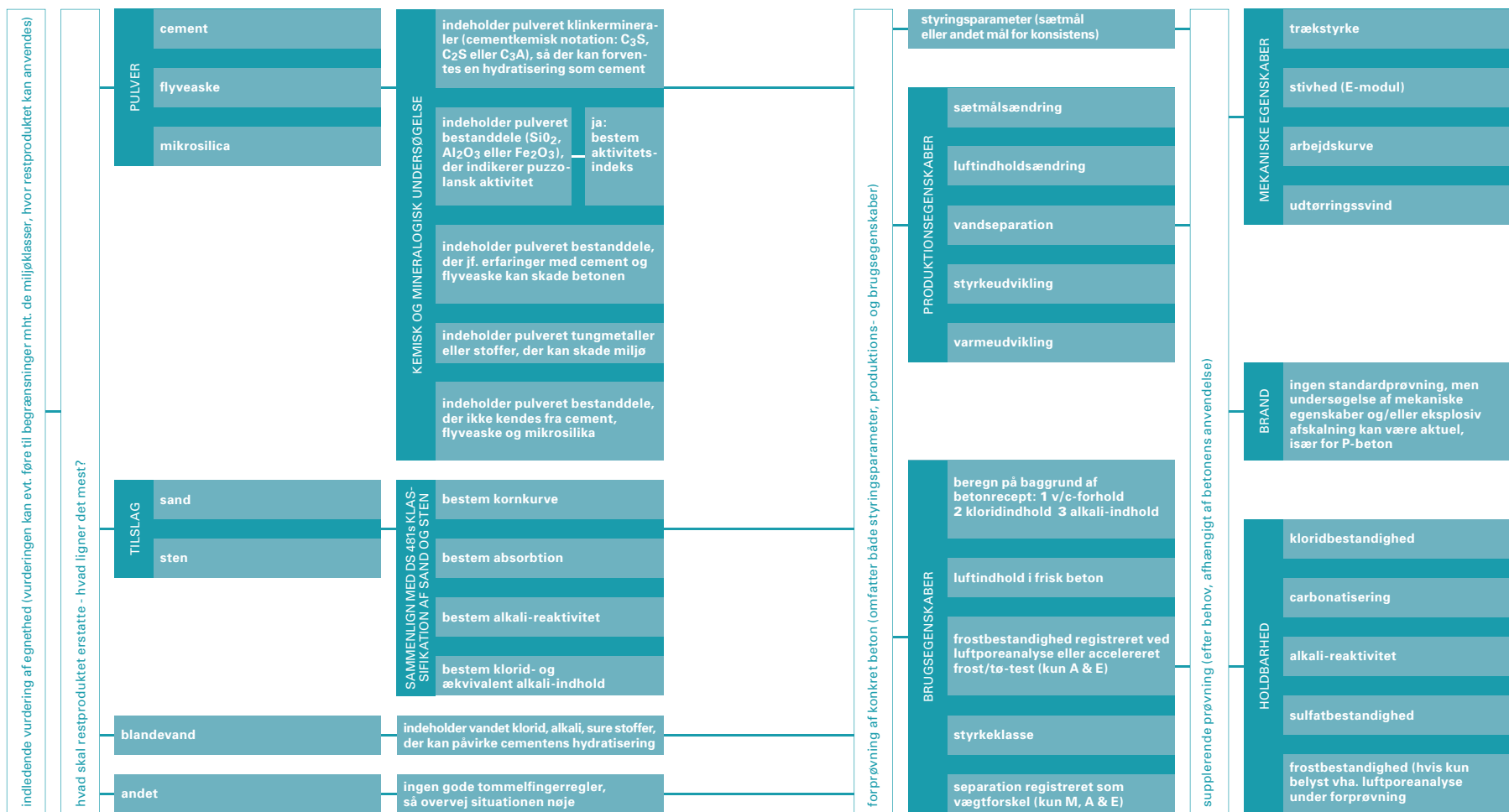
les at gennemføre udvaskningsforsøg. Endvidere skal de nødvendige miljøtilladelser og anvisninger indhentes fra myndighederne.

Det er hensigtsmæssigt at opstille miljømål for et givent grønt projekt og efterfølgende dokumentere, at målene er opfyldt. Et miljømål bør opstilles, så det relateres til hele betonkonstruktionens livscyklus. Dette sikrer, at der ikke sker en suboptimering, så der fx udvikles en beton, der målt på materialforbrug ved produktion er meget grøn, men som kun har den halve levetid eller kræver mere vedligehold og dermed samlet er en dårligere løsning for miljøet. **Figur 7** viser et eksempel på en livscyklusscreening af den miljømæssige effekt ved at vælge forskellige løsninger. Figuren viser CO<sub>2</sub>-emissionerne i løbet af en vejbro livscyklus. Eksemplet er fra den demonstrationsbro, der er opført for Vejdirektoratet i forbindelse med gennemførelsen af Grøn Beton-projektet.



**Figur 7** Den totale emission af CO<sub>2</sub> for en vejbro opført med forskellige løsninger med en levetid på 100 år (i ton CO<sub>2</sub>).

**1** Traditionel løsning med sort armering og asfalt **2** Rustfast armering, ingen asfalt på brodæk **3** Rustfast armering, ingen asfalt og grøn beton med miljøvenlig cement **4** Rustfast armering, ingen asfalt og grøn beton med højt flyveaskeindhold **5** Rustfast armering, ingen asfalt og grøn beton med slamaske  
■ beton ■ armering ■ asfalt ■ opførelse ■ div. vedl.



**Figur 6** Dokumentation af nye grønne betontyper i 3 etaper: Indledende vurdering af egnethed, forprøvning samt evt. supplerende prøvning.

Der er i forbindelse med projektet Center for Ressourcebesparende Betonkonstruktioner udarbejdet følgende offentligt tilgængelige rapporter:

- Beton med reducerede CO<sub>2</sub>-emissioner
- Beton med slamaske
- Beton med alternativ flyveaske
- Beton med betonslam
- Beton med stenmel
- Grøn Beton - Demobro
- Miljøscreening af demobro
- Drift og vedligehold (D&V) af grønne betonkonstruktioner
- **BK1** Udvidet pakke. Arbejdskurver, spaltetrækstyrke og udmattelsesundersøgelse
- **BK1** Udvidet pakke. Bøjning af armerede bjælker. Instabilitet af søjler
- **BK1** Udvidet pakke. Forskydningsbæreevne af bjælker. Forankring af gevindstænger
- **BK1** Udvidet pakke. Fugttransport, svind- og temperaturdeformationer samt krybning
- **BK2** Udvidet pakke. Mekaniske egenskaber under brand
- **BK3** Udvidet pakke. Varmeudvikling og plastisk svind
- **BK3** Hærdesimuleringer for Demobro
- **BK3** Udførelse. Hovedrapport
- **BK4** Holdbarhed. Hovedrapport
- **BK5** Sammenfattende rapport om bestemmelse af termodynamiske parametre
- Implementering af Grøn Beton i normer og standarder
- Grønt tillæg til SAB Paradigma

Rapporterne kan hentes på [www.gronbeton.dk](http://www.gronbeton.dk) eller ved henvendelse til

**Teknologisk Institut, Byggeri/Beton**

**Gregersensvej,**

**Postboks 141**

**2630 Taastrup**

På hjemmesiden er det også muligt at læse mere om selve projektet.

Projektet Center for Ressourcebesparende Betonkonstruktioner har deltagere, der repræsenterer alle involveret i betonproduktion: Producenter af cement og tilslagsmaterialer, betonfabrikker, rådgivere, entreprenører, bygherrer samt forsknings-, udviklings- og videntcentre. Centeret er finansieret af deltagerne og har desuden modtaget støtte fra Rådet for Teknologisk Service under Ministeriet for Videnskab, Teknologi og Udvikling.



**Aalborg Portland A/S**



**Unicon A/S**



**Cowi A/S**



**MT Højgaard a/s**



**AB Sydsten**



**Vejdirektoratet**



**Teknologisk Institut, Byggeri/Beton**



**Danmarks Tekniske Universitet, BYG-DTU**



**Aalborg Universitet, Institut for Bygningsteknik**

#### **Anvisning i grøn beton**

ISBN 87-7756-697-1

**Udført af** Marianne Tange Hasholt, Anette Berrig og Dorthe Mathiesen  
Teknologisk Institut, Beton, december 2002

**Grafisk design** Barbara Elbæk

Reproduktion af dele af anvisningen er tilladt, hvis kilde angives