

Klimavenlig beton



**Per Goltermann,
Pawel Wargocki,
Kristian Dahl Hertz,
Lisbeth M. Ottosen,
Pernille Erland Jensen,
Carsten Rode**

Institut for Byggeri og Anlæg
2017

DTU Byggeri og Anlæg
BYG R-371, 2017

Rapport BYG R-371
2017

Af Per Goltermann, Pawel Wargocki, Kristian Dahl Hertz, Lisbeth M. Ottosen, Pernille Erland Jensen, Carsten Rode

Copyright: Hel eller delvis gengivelse af denne publikation er tilladt med kildeangivelse
Forsidefoto: Skaterpark i Fælledparken, som kan fungere som overløbsbassin ved ekstremregn. Foto: Per Goltermann
Udgivet af: Institut for Byggeri og Anlæg, Brovej
Rekvireres: www.dtu.dk

ISBN: 9788778774651

Forord

Resume: Region Hovedstaden har et mål om at være en grøn og innovativ metropol, hvor CO₂ er udnævnt som kongeindikator. Regionen ønsker dog at udvide sit fokus og har i den forbindelse kontaktet DTU Byg for at undersøge "klimavenlig beton".

DTU Byg har derfor defineret begrebet klimavenlig beton og identificeret en række tiltag og anbefalinger, der kan implementere den klimavenlige beton effektivt.

Kongens Lyngby, 2017

Per Goltermann
Professor

Indhold

1. Introduktion.....	6
1.1. Arbejdsgruppe	7
2. Modenhedsstadier og tidshorisonter	8
3. Hvordan kan beton være klimavenlig?	10
3.1 Definition af klimavenlig beton.....	10
3.2. Global klimavenlig beton	12
3.2.1. Reduktion af CO ₂ -udledningen ved produktion af cement	13
3.2.2. Reduktion af CO ₂ -udledningen ved at reducere cementforbruget per kubikmeter beton.....	14
3.2.3. Reduktion af CO ₂ -udledningen ved at anvende superlette betonkonstruktioner	15
3.2.4. Reduktion af forbruget af sand, grus og sten gennem genbrug af nedknust beton.....	17
3.2.5. Reduktion af CO ₂ -udledningen ved fleksible og holdbare konstruktioner	19
3.2.6. Anvendelse af CO ₂ -absorberende beton	20
3.2.7. Reduktion af CO ₂ -belastning fra andre materialer	21
3.3. Lokal klimavenlig beton	22
3.3.1. Klimatilpasning til et ændret klima med kraftigere regnskyl	23
3.3.2. Reduktion i behovet for belysning på arealer.....	24
3.3.3. Reduktion af lydniveau i området	25
3.3.4. Reduktion af kølebehov i bygninger	26
3.3.5. Forbedring af luftkvaliteten	27
3.3.6. Reduktion af behovet for rengøring af betonoverfladerne.....	27
3.4. Indendørs klimavenlig beton	29
3.4.1. Reduktion af CO ₂ -belastningen til køling og opvarmning.....	31
3.4.2. Reduktion af energiforbruget til belysning	32
3.4.3. Reduktion af smittefrekvens	32
3.4.4. Rensning af luften.....	32
3.4.5. Reduktion af lydniveauet i rummet	33
3.4.6. Reduktion af miljøpåvirkning fra brug af mineraluld og polystyren som varmeisolering	37
3.4.7. Reduktion af giftige gasser under brand	37
3.4.8. Reduktion af emissioner af gasser og reduktion af støv i miljøet.....	37
3.4.9. Stabilisering af den relative luftfugtighed.....	38
3.5 Oversigt over tiltag, modenhed og tidshorisonter.....	39
4. Anbefalede tiltag	41
4.1 Økonomiske konsekvenser af tiltagene	43
5. Tiltag for at øge det teknologiske modenhedsniveau.....	46
6. Referencer	50

Resume

Region Hovedstaden henvendte sig til Danmarks Tekniske Universitet i 2016 for at initiere et projekt med det formål at forøge mulighederne for at anvende klimavenlig beton. Dette projekt har derfor først og fremmest udarbejdet en definition af klimavenlig beton:

"En bæredygtig beton eller betonkonstruktion, der ikke generer klimaet unødigt, men derimod forbedrer klimaet, kompenserer for og modstår klimaændringer".

Derudover er en lang række potentielle tiltag blevet identificeret og vurderet med hensyn til deres effekt på globalt, lokalt og indendørs niveau. Tiltagene er kort beskrevet, og deres teknologiske modenhedsniveauer identificerede, ligesom den nødvendige tidshorisont til anvendelse og drift er angivet (i en række tiltag er dette muligt allerede nu).

Der er i rapporten identificeret en række tiltag, som anbefales anvendt i de nye byggerier allerede nu. For disse tiltag er deres påvirkning af omkostningsniveauet skitseret, idet en del tiltag vil medføre prisstigninger på en fase i byggeriet, men vil lede til besparelser i andre faser.

Der er sidst i rapporten opstillet en strategi for, hvordan de teknologiske modenhedsniveauer kan øges mest effektivt, med aktiviteter rangerende fra studenterprojekter til pilotprojekter.

1. Introduktion

Region Hovedstaden har et mål om at være en grøn og innovativ metropol, og CO₂ er udnævnt som kongeindikator for bæredygtighed. Ved en indledende undersøgelse er det kommet frem, at der i fagkredse ikke foreligger nogen klar definition af, hvad klimavenlig beton er.

I samråd med Region Hovedstaden blev det derfor valgt at anlægge en bred indgangsvinkel, så en af de første opgaver for arbejdsgruppen var at definere og afgrænse opgaven i form af en definition af, hvad klimavenlig beton er.

Der er derefter vurderet, hvilke tiltag der kan gøre betonen mere klimavenlig, hvilken teknologisk modenhed tiltagene har, og hvilke ekstra modningstider der kræves, før tiltagene kan implementeres i byggeriet (Figur 1.1).



Figur 1.1. Forløbet i processen.

Projektet angiver til sidst en række anbefalede kombinationer af tiltag, der bedst vil kunne bevirke væsentlige effekter i den nærmeste fremtid, hvordan de kan kontrolleres, og hvordan det teknologiske modenhedsniveau bedst kan forøges.

1.1. Arbejdsgruppe

Arbejdsgruppen bestod af personer fra Region Hovedstaden og DTU Byg.

Fra DTU Byg deltog følgende personer i arbejdet:

- Professor Per Goltermann
(kontaktperson og projektleder på DTU Byg)
- Professor Kristian Hertz
- Lektor Pawel Wargocki
- Professor Carsten Rode
- Professor Lisbeth M. Ottosen
- Lektor Pernille Erland Jensen

Fra Region Hovedstaden deltog følgende personer i arbejdet i arbejdsgruppen:

- Chefkonsulent Poul Heller Bunde
(leder af arbejdsgruppen og projektleder hos Region Hovedstaden)
- Chefkonsulent Freddy Olesen
- Enhedschef Peter Hansen

2. Modenhedsstadier og tidshorisonter

Der er mange forskellige teknologier, der kan bidrage til at skabe en klimavenlig beton, men ikke alle er reelt til rådighed i praksis. Dette skyldes, at nogle er på idestadiet, hvor kun de basale principper er forklaret, mens andre er fuldt modne og har været anvendt i en række byggerier.

For at kunne udvikle anbefalinger for at gøre betonen klimavenlig er det nødvendigt at angive:

1. Hvor moden teknologien er.
2. Hvor lang tid, det som minimum kræver for at føre teknologien til det nødvendige højere modenhedsniveau.

I rapporten vil vi anvende teknologimodenhedsskalaen TRL (Technology Readiness Levels), som også anvendes bl.a. af Horizon 2020-projekterne, og som er angivet på Innovationsfondens hjemmeside (1). TRL 1 angiver den laveste grad af modenhed, mens TRL 9 angiver den højeste grad af modenhed.

TRL-niveau	Niveau
1	Basale principper er forklaret
2	Det teknologiske koncept er formuleret
3	Der foreligger eksperimentel verifikation af ideerne
4	Teknologien er verificeret i laboratoriet
5	Teknologien er verificeret i relevante omgivelser
6	Teknologien er demonstreret i relevante omgivelser
7	Prototype er anvendt i relevante omgivelser
8	Systemet er færdigudviklet og verificeret
9	Systemet er anvendt og er i drift

Tabel 2.1. Oversigt over teknologisk modenhedsskala (1).

I rapporten vil vi vurdere, hvor lang tid det som minimum vil tage for at modne teknologien fra det nuværende TRL-niveau til et væsentligt højere niveau, som vil være et realistisk for anvendelserne. Det vil således være særdeles usikkert at udtale sig om, hvor lang tid en modning fra TRL-niveau 1 til 9 vil tage, hvorimod en modning fra fx TRL-niveau 4 til 6 eller 7 kan tidsfæstes med en større grad af realisme. Vurdering af tidsbehovet vil blive inddelt efter skalaen i nedenstående tabel, inspireret af tidshorisonterne fra Innovationsfondens hjemmeside (1).

Tidshorisont	Antal år
Ingen	0 år
Kort	1-5 år
Mellem	3-10 år
Lang	5-15 år
Usikker lang	Over 15 år

Tabel 2.2. Oversigt over forventet tidshorisont før teknologien kan forventes modnet til et væsentligt højere niveau.

Ved anvendelse af tidstrin vil rapporten angive, hvilke TRL-niveau teknologien er på i dag, og hvilket TRL-trin teknologien kan øges til med den angivne tidshorisont, forudsat at der arbejdes med tingene i passende udviklingsprojekter, som typisk vil omfatte (Figur 2.1):

1. Indledende projekter (fx eksamensprojekter ved universiteter) fra TRL1 eller 2 til TRL 3 eller 4. Typisk 1-3 år.
2. Egentlige udviklingsprojekter (fx ph.d.-projekter) fra TRL3 eller 4 til TRL 5 eller 6. Typisk 3-6 år.
3. Produktionsmodningsprojekter (fx postdoc-projekter med stærk involvering af producenter) fra TRL 5 eller 6 til TRL 7 eller 8. Typisk 2-4 år.
4. Implementeringsprojekter med produktionstilpasning og markedsanalyser, eksempelvis postdoc med producenter, entreprenører og forretningsfolk fra TRL 7 eller 8 til 9. Typisk 2-4 år i byggeriet.



Figur 2.1 Forløbet i en teknologisk modenhedsøgning.

En øgning af modenhedsniveauet fra fx TRL 2 til TRL 9 for et tiltag vil oftest indebære en kombination af de ovenstående trin med en vurdering og justering efter hvert trin.

Tabellerne 2.1 og 2.2 viser, at det normalt vil tage 8-17 år at gå fra et koncept og dets definition (TRL 1) til anvendelse i praksis (TRL 9), 7 til 14 år fra en verificeret ide (TRL 3) til anvendelsen (TRL 9), men kun 4 til 8 år til anvendelsen, når teknologien er demonstreret i relevante omgivelser (TRL 6).

En væsentlig pointe i forhold til planlægning er derfor, at den mest tidskrævende aktivitet reelt er verificering – det kan tage 3 til 6 år til at verificere og demonstrere, at teknologien kan anvendes i praksis (TRL 3 til TRL 6).

3. Hvordan kan beton være klimavenlig?

Der findes ikke en generelt accepteret definition af klimavenlig beton. Det gælder dog, at klimavenlig beton er en bæredygtig beton med evner som rækker længere end blot til at være så bæredygtig som muligt. Dette projekt har derfor udarbejdet et forslag til, hvordan en klimavenlig beton kan defineres.

3.1 Definition af klimavenlig beton

Bæredygtighed kan forenklet formuleres som det at sikre, at vi altid kan leve i denne verden, uden at løbe tør for ressourcer, uden at være omgivet af affald og med et miljø, der er mindst lige så godt som det, vi har i dag (Brundlandtrapporten, (2)). Bæredygtighed betyder, at vores økosystem skal beskyttes. Det betyder også, at det skal sikres, at bæredygtige løsninger eller tiltag ikke skader mennesker, men tværtimod forbedrer deres livsforhold.

I denne forbindelse er en minimering af udledningen af CO₂ og andre drivhusgasser vital af hensyn til klimaet, men også en høj grad af genbrug er vigtig, både for at reducere forbruget af naturlige ressourcer og for at minimere mængden af affaldsdeponering.

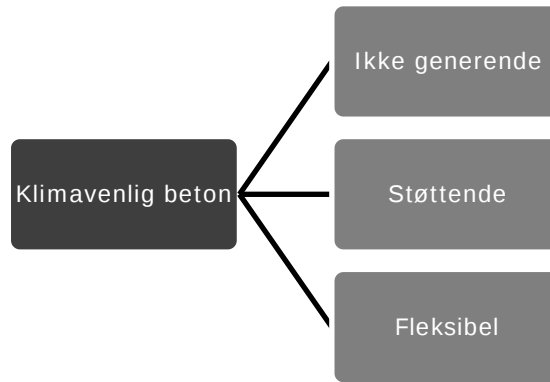
Klimavenlighed kan bedst forstås ved at tænke på, hvad det vil sige at være venlig eller være venner. De fleste personer vil i deres omgang med venner undgå at genere deres venner, de vil støtte og hjælpe deres venner, og de vil også være fleksible når deres venner er i en vanskelig fase (Figur 3.1.1). Ved en første betragtning er en klimavenlig beton eller klimavenlig betonkonstruktion derfor en, der:

- Generer klimaet mindst muligt (dvs. at den stræber mod at være mest mulig bæredygtig).
- Støtter klimaet, hvor det er muligt (den kan forbedre klimaet, enten globalt, lokalt eller indendørs).
- Er fleksibel overfor klimaændringer (fx ekstreme regnskyl).

En klimavenlig beton kan med andre ord defineres som:

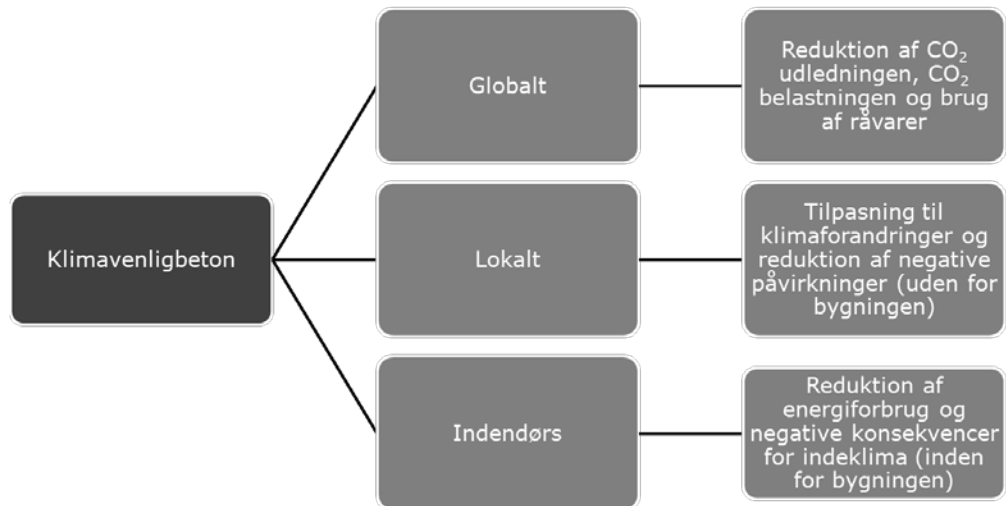
”En bæredygtig beton eller betonkonstruktion, der ikke generer klimaet unødigt, men derimod forbedrer klimaet, kompenserer for og modstår klimaændringer”.

Den klimavenlige betons kvaliteter er illustrerede i figur 3.1.1.



Figur 3.1.1. Hvordan en klimavenlig beton skal fungere.

Rapporten beskriver i de efterfølgende kapitler, hvordan klimavenligheden kan opnås på tre niveauer: globalt, lokalt og indendørs (Figur 3.1.2).



Figur 3.1.2. Effekter af en klimavenlig beton globalt, lokalt og indendørs

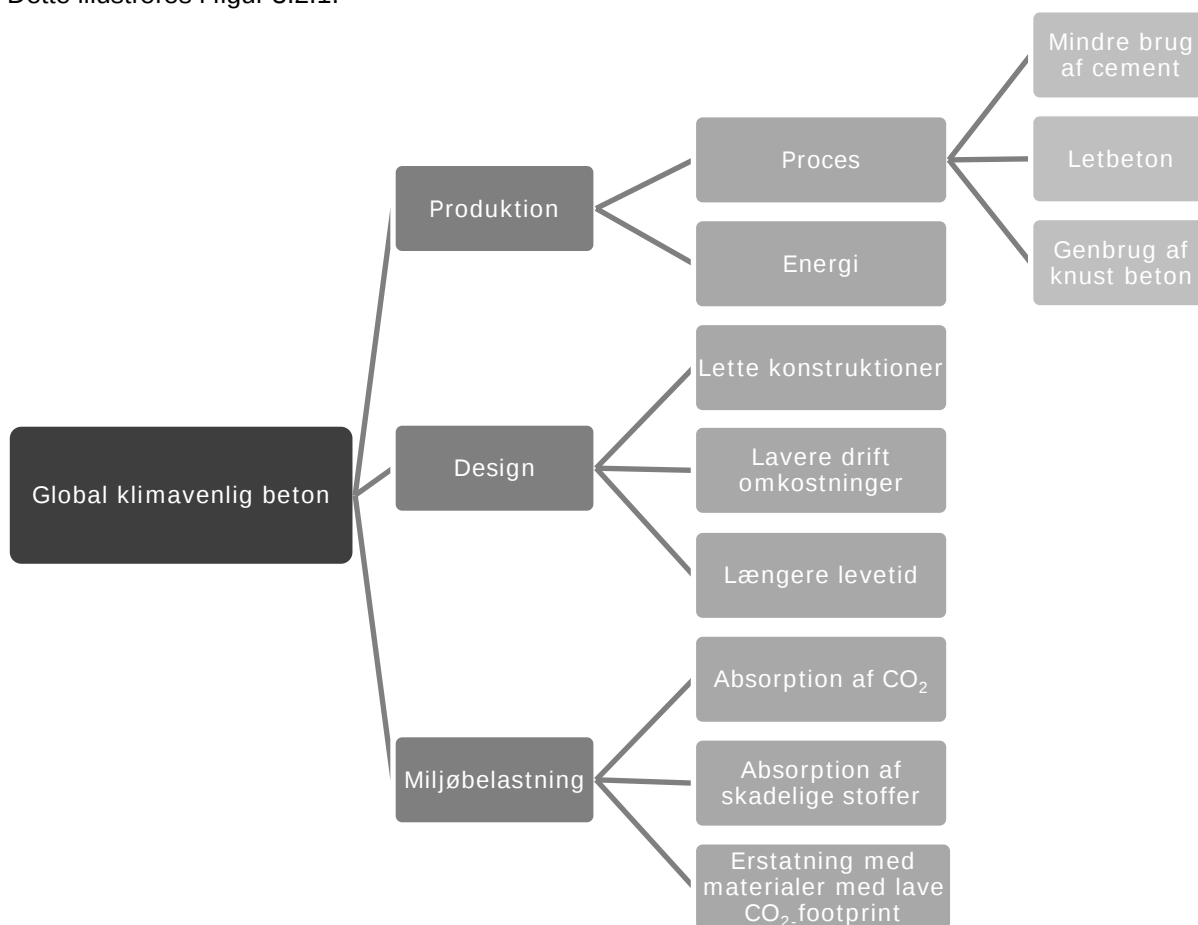
3.2. Global klimavenlig beton

Det globale plan dækker over tiltag og effekter, der påvirker miljøet globalt og vil normalt være fokuseret mod at reducere CO₂-udslippet. Det vil ofte dække over lokale aktione (i det aktuelle byggeri), der påvirker globalt og i mindre grad eller slet ikke påvirker lokalt.

På det globale niveau vil en klimavenlig beton udmærke sig ved, at den muliggør:

1. Reduktion af CO₂-udledningen i produktion af cement.
2. Reduktion af CO₂-udledningen ved at reducere cementforbruget pr kubikmeter beton.
3. Reduktion af CO₂-udledningen ved at anvende superlette betonkonstruktioner.
4. Reduktion af forbruget af sand, grus og sten igennem genbrug af nedknust beton.
5. Reduktion af CO₂-udledningen ved fleksible og holdbare konstruktioner.
6. Anvendelse af CO₂-absorberende beton.
7. Reduktion af CO₂-belastning fra andre materialer.

Dette illustreres i figur 3.2.1.



Figur 3.2.1. Hvad en global klimavenlig beton skal tage hensyn til.

I det følgende kapitel uddybes hvert tiltag inden for de tre hovedområder "Produktion", "Design" og "Miljøbelastning". Ved hvert tiltag angives referencer, og effekter talsættes hvor muligt, ligesom hvert enkelt tiltags teknologiske modenhed og evt. tidshorisont for udvikling angives.

3.2.1. Reduktion af CO₂-udledningen ved produktion af cement

Cementproduktionen giver anledning til den største del af CO₂-udledningen fra betonproduktionen. Det skyldes dels, at der udledes CO₂ gennem de kemiske processer og dels gennem den krævede opvarmning af råmaterialerne igennem cementproduktion.

Der er forskelle på CO₂-udledningen fra forskellige cementtyper pga. anvendelsen af forskellige råstoffer og forskellige produktionsmetoder. Der arbejdes derfor i en række cementproduktioner (3) med at reducere CO₂-udslippet fra produktionen gennem anvendelse af alternative brændsler, men også ved at anvende andre råmaterialer til cementproduktionen. Det forventes ved disse tiltag at kunne reducere CO₂-udledningen ved cementproduktionen med 30 % (4), (5), (6). Dette er en langvarig proces, men i det danske Grøn Beton-konsortium (7) er udviklingen nået ganske langt, idet der er udført en testbro i 2002 (8) og en ny testbro på 6 x 60 m blev bygget i samarbejde med Vejdirektoratet (9) i 2016, hvori en ny cement med lavere CO₂-aftryk anvendes i en optimeret betonblanding.

Det skal her nævnes, at der er andre betontyper end de traditionelle typer hvor cement, vand, tilslag m.m. sammensættes for at danne betonen. Disse andre typer kan have andre fremstillingsmetoder og dermed anden CO₂-udledning. Et eksempel, som er værd at nævne, er porebetonen (10) (kendt som gasbeton), som er en betontype, der dannes uden anvendelse af cement, og som kun fremstilles industrielt til præfabrikerede blokke, vægelementer og dækelementer. Porebetonen er en letvægtsbeton med lave styrker og en evne til at varmeisolere og er derfor egnet til massive vægge i mindre byggerier eller til fx udfyldningsvægge i et større byggeri eller direkte som erstatning for traditionel isolering.

TRL-niveau: 9

Tidshorisont: Ingen

3.2.2. Reduktion af CO₂-udledningen ved at reducere cementforbruget per kubikmeter beton

Cementen anvendes i beton for sammen med vandet at kunne udfylde hulrummene imellem tilslagene¹ (sand, grus, sten) og for at reagere med vandet, så der opnås en styrke i materialet. Cementen kan derfor delvist erstattes af kulflyveaske, microsilika eller andre sekundære materialer, der har en puzzolanvirkning², eller af kalkfiller³, der blot har en fillereffekt. Anvendelse af kulflyveaske kan således lede til 20-40 % reduktion af cementbehovet i en tilsvarende beton uden flyveaske (11).

Danmark har besluttet at udfase brugen af fossile brændsler i el og fjernvarmeproduktionen, og vi må derfor forvente, at produktionen af kulflyveaske ophører, og at dette vil lede til en forøgelse af cementforbruget og en forøgelse af CO₂-udledningen i betonproduktion, dersom der ikke findes alternativer. Der har været gennemført forsøg med anvendelse af slamaske, træaske og bioaske som cementerstatning i beton, men dette har endnu ikke nået et modenhedsniveau, der tillader anvendelse i praksis. Slamasker foreligger kun i beskedne mængder og er derfor ikke et realistisk alternativ til kulflyveasken. Træaske og bioaske forventes derimod at forekomme i voksende mængder i forbindelse med udfasning af de fossile brændsler, men kræver endnu en del forskning, før de eventuelt kan anvendes som cementerstatning i byggeriet.

Cementindholdet i betonen kan også reduceres ved en optimeret sammensætning af materialerne, således at cementbehovet reduceres. Hvis der anvendes sømaterialer (afrundede sten og sandkorn), reduceres cementbehovet, hvorimod anvendelse af nedknuste materialer som eksempelvis skærver (kantede materialer), vil øge cementbehovet (11). Anvendes nedknust beton, vil dette således øge cementbehovet i betonen, selvom dette ofte kan kompenseres ved en fornyet optimering (12).

Det anbefales derfor, at betonens samlede CO₂-udledning bestemmes, således at der tages hensyn til både effekten af den valgte cementtype, effekten af delvis erstatning af cementer med andre materialer og af effekten af en optimering af betonen.

TRL-niveau: 9 (kulflyveaske og optimering)

Tidshorisont: Ingen

TRL-niveau: 2 (træaske eller slamaske)

Tidshorisont: 15 år

¹ Tilslag er materialerne sand, grus og sten, der ikke reagerer kemisk med vandet.

² Puzzolaner er naturligt forekommende materialer som fx vulkansk aske fra Pozzuoli ved Vesuv, der reagerer med vand og opbygger styrke og dermed kan anvendes som en "naturcement".

³ Filler er finkornet materiale der kan medvirke til at fylde hulrummene ud imellem tilslagene, men som ikke reagerer med vandet.

3.2.3. Reduktion af CO₂-udledningen ved at anvende superlette betonkonstruktioner

Den anvendte mængde af beton og cement i byggeriet kan også reduceres igennem et mere avanceret konstruktivt design, hvorved der anvendes mindre og eller lettere beton. Denne reduktion af betonvægten vil lede til yderligere CO₂-reduktioner fra transport og udførelse.

Byggeriet tegner sig for ca. 55 % af den samlede CO₂-udledning. Af disse 55 % udgør bygningers drift til bl.a. opvarmning, køling og elforbrug ca. 35 procentpoint. Der er meget fokus på at reducere denne andel med energibesparende foranstaltninger. Derimod oplever vi, at den andel på ca. 20 procentpoint, som kommer fra materialer og opførelse af bygværker, øges. Heraf kommer ca. 5 procentpoint fra fremstillingen af cement (13) (14) (15) (16).

Data for CO₂-udledning varierer betydeligt, fordi fremstillingsmetoder for både materialer og bygningskonstruktioner samt transportafstande og transportmidler varierer fra det ene studie til det andet. Derfor anvendes her et estimat baseret på forskellige kilder (17) (18) (19) (20) (21).

Halvdelen af CO₂-udledningen fra cementfremstillingen kommer fra den kemiske reaktion i materialet, og en del af denne mængde optages igen af betonen med alderen. 40 procentpoint af bidraget fra cementfremstillingen kommer desuden fra brændslet, der varmer materialet op til 1400 °C, og resten er fra elforbrug og transport mv. I Danmark anvendes i vid udstrækning affald som brændsel, så CO₂-udledningen herfra ville have fundet sted alligevel i et forbrændingsanlæg. I denne fremstilling antager vi dog, at brændingen udelukkende sker med olie. Det samme gøres for fremstillingen af porøse letklinker (fx Lecanødder), der også i dagens Danmark produceres med affald, og overskudsvarmen bruges til fjernvarme.

Materiale	Kg CO ₂ /kg	Kg CO ₂ /m ³
Stål	3,00	23600
Beton, 40MPa, 2300 kg/m ³	0,160	367
Letklinkerbeton, 900 kg/m ³	0,220	198
Letklinkerbeton, 600 kg/m ³	0,306	183
Skumbeton, 900 kg/m ³	0,322	290
Skumbeton 600 kg/m ³	0,467	280

Tabel 3.2.3.1. CO₂-udledning for bygningsmaterialer (13).

Brændstof	Kg CO ₂ /kWh	Kg CO ₂ /MJ
Dieselolie eller gas	0,24	0,067
Kul eller træ	0,37	0,103
Skønnet vægtet gennemsnit	0,3	0,09

Tabel 3.2.3.2. CO₂ udledning fra energiproduktion (13) (19)

Transportform	g CO ₂ /km
Skib	13
Jernbane	23
Lastbil	120
Bil	125

Tabel 3.2.3.3. CO₂ emission fra transport (13) (22)

Betragtes konsekvenserne for konstruktioner til større overdækninger og haller mv. er det muligt at spare op mod 40-50 % af den samlede CO₂-udledning med en optimal udnyttelse af super-lette konstruktioner i forhold til normale betonkonstruktioner, og omkring 75 % i forhold til tilsvarende stålkonstruktioner.

For dækelementer til bygninger, hvor der er krav til lydisolering, er besparelsen mindre i forhold til normale betonkonstruktioner (15-25 %). Besparelsen for denne type dækelementer opnås ved transport af lettere elementer, lettere understøttende konstruktioner og især ved, at lyden dæmpes bedre i den færdige konstruktion og man dermed sparer på støbning af tung lydisolerende overbeton, samt ved anvendelse af indspændte dæk, som øger spændvidden og stivheden af de super-lette dæk i forhold til de traditionelle huldæk, der ikke kan indspændes. Stålkonstruktionerne skal lydisoleres med beton på oversiden og brandisoleres på undersiden.

Hvis man ønsker at udnytte de super-lette dæks lyddæmpende undersider, bliver besparelsen endnu større i forhold til huldæk, hvor der medgår CO₂ til fremstilling, transport og montage af de lyddæmpende plader. Ståldækket kan her bruge brandbeskyttelsen til lyddæmpning.

Konsekvenserne af designet kan illustreres med eksemplet Opus Indkøbscenter.



Figur 3.2.3.1. Opus Indkøbscenter. Arkitekt Årstiderne, Ingeniør SWECO.

I forbindelse med dette projekt har DTU og SWECO estimeret CO₂-udledningen til materialer for et aktuelt indkøbscenter på 90.000 m², der udført i stål ville give 300 kg CO₂/m², i traditionel beton med TT profiler 132 kg CO₂/m², og i super-let konstruktion 77 kg CO₂/m² som angivet i tabel 3.2.3.4. Besparelsen bliver således 5.000 ton CO₂ i forhold til traditionel beton og 20.000 ton CO₂ i forhold til stålløsningen.

Konstruktionsmateriale	Beton	Stål	Superlet betonkonstruktion
Halkonstruktion	132	300	77
Dæk med lydisolering	73	200	65
Dæk med lyddæmpning	78	200	65

Tabel 3.2.3.4. Estimerede CO₂ udledninger i kg/m² fra materialer i forskellige konstruktioner (13).

TRL-niveau for super-lette halkonstruktioner: 5

Tidshorisont: 5-6 år

TRL-niveau for lydisolerende super-lette dæk: 9

Tidshorisont: Ingen

TRL-niveau for lyddæmpende super-lette dæk: 9

Tidshorisont: Ingen

3.2.4. Reduktion af forbruget af sand, grus og sten gennem genbrug af nedknust beton

Genbrug af nedknust beton kan i dag opnås som erstatning af forbruget af sand og sten i mere sekundære anvendelser, som fx stabilgrus og drænlag under belægninger og veje, såkaldte bærelag. I dag genanvendes 90 % af den nedknuste beton som bærelag (12).

Dette stiller krav til betonerne, men vil ofte være mulig for betoner anvendt i mindre aggressive miljøer, hvorimod aggressive miljøer kræver en del mere kontrol af delmaterialerne i betonen. Genbrugen af betonen reducerer i øvrigt behovet for deponering af byggeaffald (12).

Anvendelsen af nedknust beton som bærelag eller drænlag bør dog altid vurderes af hensyn til risikoen for udvaskning af tungmetaller eller brug af materialer, som indeholder toksiske stoffer. Ved anvendelse som bærelag under vandtætte vejbelægninger vurderes dette ikke at være en væsentlig risiko, men ved anvendelse som kombinerede bærelag og drænende lag under permeable (gennemtrængelige) belægninger bør risiko for udvaskning af tungmetaller, PCB eller anden forurening altid vurderes.

En større værdi af genbrugsbeton vil måske kunne opnås, dersom det kan anvendes som tilslag. Der er en del uenighed om, hvorvidt det vil lede til øget cementforbrug (12) og dermed til en øgning af CO₂-udledningen, som overstiger den CO₂-besparelse, der er sket ved den reducerede anvendelse af naturligt sand og sten, eller om det kan anvendes med omhu uden den øgede belastning (23). Det er rapporteret, at man uden problemer kan erstatte 10 % eller 20 % af alle tilslag med nedknust beton, ligesom der har været undersøgelser, hvor op til 100 % af de store tilslag (over 4 mm) og op til 30 % af de fine tilslag (under 4 mm) er blevet erstattet af genbrugsbeton (12). Anvendelse af genbrugsbeton som tilslag vil dog kunne øge svindet og

dermed revnedannelsen og vil kunne reducere betonens frostmodstand (12). Det sidste er ikke et problem i et passivt miljø (typisk for fundamenter og indendørs konstruktioner).

Genbrug af nedknust beton er således en anvendelse, der i denne tid er under megen debat (24) og hvor der er brug for en del politiske initiativer og økonomiske incitamenter (25). Der mangler dog viden, designregler og kontrol, så producenter, kunder og myndigheder kan være trygge ved at basere produktion og brug af betonen på genbrugsbeton som erstatning for sand, grus og sten, ligesom det kræver en optimal sammensætning af betonen for at undgå et øget cementforbrug.

Det er dog principielt muligt at erstatte al sand, grus og sten i betonfremstillingen med nedknust beton, så længe kvaliteten af den nedknuste beton er tilstrækkelig god. Der er her kun to begrænsninger, hvor den ene er mængden af nedknust beton (som ikke er tilstrækkelig, når der anvendes mere beton, end der nedknuses) og den anden den nedknuste betons kvalitet, specielt mht. holdbarhed.

Mængden af beton, der nedrives i Danmark, varierer noget, men mængden var i 2009 på 1,3 mio. tons ud af i alt 5,0 mio. tons byggeaffald (26). Den årlige produktion af ny beton i Danmark er ikke registreret entydigt, men kan estimeres til 0,5-1,0 m³ per person baseret på kendskab til cementproduktion, befolkningstal og generelt kendskab til betonsammensætninger (27) (28), svarende til 2,8-5,7mio m³ beton årligt. Dette svarer til et forbrug på 5-10 mio. tons tilslag (sand, grus og sten), og dermed udgør den nedrevne beton kun 30-15 % af den tilslagsmængde, der skal anvendes til produktionen af ny beton.

Nedknust beton, der oprindeligt har opfyldt holdbarhedskravene til beton i hhv. passivt og moderat miljø kan således ikke uden videre anvendes til beton i hhv. moderat og aggressivt miljø, da der stilles skærpede krav til delmaterialer ved at gå fra en miljøklasse til en anden med skarpere krav. Det vurderes dog, at det meste nedknuste beton fra byggerier uden nedbrydningsskader og uden forurening af denne beton kan anvendes som erstatning af sand, grus og sten i ny beton, blot skal designet af betonens sammensætning optimeres og den endelige kvalitet dokumenteres at opfylde holdbarheds og styrkekrav.

TRL-niveau (ubundne bærelag og drænlag): 9

Tidshorisont: Ingen

TRL-niveau (genbrug i ny beton): 7

Tidshorisont: 4-5 år

3.2.5. Reduktion af CO₂-udledningen ved fleksible og holdbare konstruktioner

Opførsel af byggeri vil altid medføre et forbrug af ressourcer og en større eller mindre CO₂-udledning. Det er dog vigtigt ikke kun at se på belastningen ved opførelsen af byggeriet, men også på driften, levetiden og nedrivningen.

En meget vigtig parameter er således levetiden af byggeriet, hvor et byggeri i beton kan forventes at have en meget længere potentiel levetid end byggerier i træ. Dette skyldes primært den store holdbarhed af betonkonstruktioner, hvor et rimeligt vedligehold vil være i stand til at sikre en næsten uendelig levetid.

Levetiden af konstruktioner begrænses dog af mange andre ting, som fx de fremtidige krav og behov, den lokale byplanlægning, teknologien osv. En del industrielt betonbyggeri (12) er således blevet kraftigt ændret til anden anvendelse som fx boliger. Dette har ofte været muligt i kraft af, at de eksisterende konstruktioner havde store styrker og derfor kunne gennembøres eller gennemskares uden for stort tab af bæreevner.

Andre konstruktioner er udformede, så der er få bærende konstruktioner, mens fx vægge, facader m.m. blot er udfyldning, der uden konstruktive indgreb vil kunne fjernes helt eller delvist.

Anvendelse af fleksible konstruktioner, der nemt kan ombygges og justeres til nye anvendelser uden større indgreb i de vitale konstruktionsdele, vil kunne forøge den reelle levetid af konstruktioner væsentligt, dersom der er anvendt holdbare konstruktionsmaterialer. Her vil beton normalt have en større levetid end fx trækonstruktioner.

Det anbefales derfor klart, at byggeriet bliver planlagt og udformet, så der er størst muligheder for ombygning og opgradering i fremtiden – endda til anvendelser, der ikke med rimelighed kan forudsiges. Konstruktionen skal dermed være fleksibel.

TRL-niveau: 9

Tidshorisont: Ingen

3.2.6. Anvendelse af CO₂-absorberende beton

En del af den CO₂, der udledes under fremstillingen af cementen kan optages af cementen senere, dersom luften har adgang til cementen. Dette er naturligvis en udfordring, når cementen er en del af en beton.

Beton, der skal armeres (normalt for mange konstruktioner), udformes normalt, så luftens CO₂ ikke kan transporteres langt ind i betonen, da dette vil ændre pH i betonerne, fjerne betonens evne til at korrosionsbeskytte armeringen og resultere i kraftige skader på armering og efterfølgende også på betonen.

Betoner med åben struktur (Lecablokke eller letklinkerbeton) absorberer CO₂ forholdsvis hurtigt, dersom deres overflader ikke er overdækkede af mørtel, spartling eller andre tætte materialer. Betoner med åben struktur (29) kan dog anvendes til uarmerede betonkonstruktioner eller til armerede betonkonstruktioner med en speciel beskyttelse af den konstruktive armering i elementerne eller til konstruktioner med rustfri armering.

Nedknust beton kan optage en del CO₂ igen, men kun hvis luftens CO₂ har rimelig adgang til de nedknuste betondeles overflader. Anvendes den nedknuste beton til bærelag eller tilsvarende, vil luften kun i begrænset omfang have adgang til betonen, og dermed vil kun en mindre del af cementen kunne reabsorbere CO₂.

TRL-Niveau for CO₂ absorberende beton: 4-5

Tidshorisont: 6-7 år

TRL-Niveau for brug af letklinkerbeton: 7

Tidshorisont: 3-5 år

3.2.7. Reduktion af CO₂-belastning fra andre materialer

Meget miljøbelastende og/eller CO₂-tunge materialer kan erstattes af beton. Der kan her nævnes erstatning af bitumenbelægninger (asfalt) med beton eller udskiftning af isolering med skumbeton eller andre meget lette betontyper. Tabel 3.2.7.1 viser varmeledningsstal for traditionelle isoleringstyper (mineraluld, polystyren, IQ therm), for skumbeton og for en moderne porebeton (gasbeton) og det bemærkes at denne type porebeton har en isoleringsevne svarende til de refererede, traditionelle isoleringsmaterialer.

Materiale	Varmeledningsevne λ (W/mK)
Mineraluld (30)	0,04
Sundolit (polystyren) (31)	0,04
IQ therm (32)	0,03
Skumbeton (200-400 kg/m ³) (33)	0,08-0,1
Skumbeton, DTU (34)	0,05-0,06
Multipor Gasbeton (35)	0,04

Tabel 3.2.7.1. Isoleringsevner af materialer. Værdierne er oplyst af leverandører, med undtagelse af (34), som er en rapporteret, eksperimentel middelværdi.

Betonkonstruktioner armeres normalt med armeringsjern. Armeringsjernene har en stor CO₂-belastning ved initialproduktionen fra brydning af jernmalm, transport, smeltning m.m.. Det skal dog bemærkes, at ved nedrivning af en armeret betonkonstruktion kan armeringen let frasorteres fra betonen og genbruges ved gensmeltning og valsning. Dette genbrug er væsentligt mindre CO₂-udledende end den initiale produktion.

TRL-Niveau: 4-5

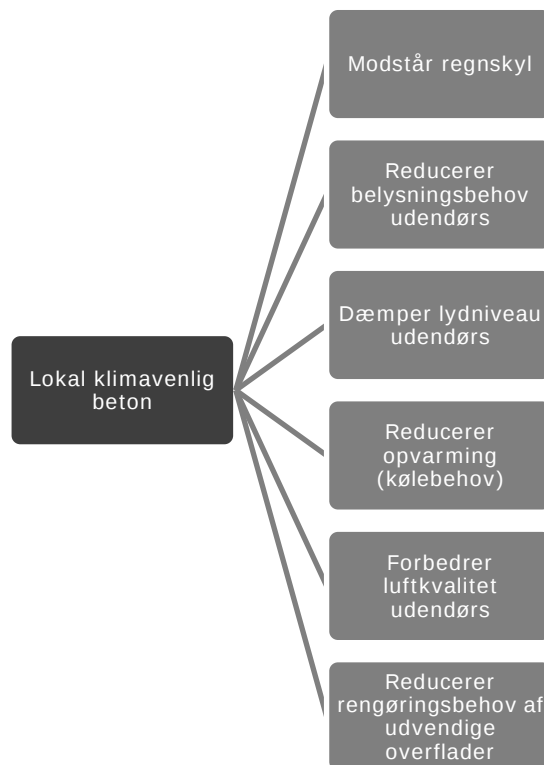
Tidshorisont: 6-7 år

3.3. Lokal klimavenlig beton

Det lokale plan dækker tiltag og effekter, der påvirker klimaet indenfor en kort afstand fra byggeriet, fx indenfor syns- og høreafstand eller indenfor selve regionen. Det vil kun i begrænset omfang påvirke det globale klima udenfor det lokale plan.

På det lokale niveau vil en klimavenlig beton udmærke sig ved at den muliggør (Figur 3.3.1):

1. Klimatilpasning til et ændret klima med kraftigere regnskyl.
2. Reduktion i behovet for belysning på arealer.
3. Reduktion af lydniveau i området.
4. Reduktion af kølebehov i bygninger.
5. Forbedring af luftkvaliteten.
6. Reduktion af behovet for rengøring af betonoverfladerne.



Figur 3.3.1. Lokale gevinster ved en klimavenlig beton.

I det efterfølgende uddybes hvert af disse tiltag, der angives referencer, effekter talsættes hvor muligt, og deres teknologiske modenhed og evt. tidshorisont for udvikling angives.

3.3.1. Klimatilpasning til et ændret klima med kraftigere regnskyl

Et ændret klima kan medføre øgede regnmængder i korte perioder i et omfang, der ikke kan opsamles af kloakkerne og derfor leder til oversvømmelser. Håndteres dette problem ikke korrekt, vil der være en risiko for, at vandet trænger ind i konstruktioner og materialer, som skades eller bliver ramt af skimmelsvampe.

Dette problem kan løses ved at der anvendes permeable betonbelægninger, der tillader vandet at sive igennem, kombineret med drænende lag og lokale faskiner, som dog skal have en særdeles stor kapacitet.

Belægningstype	Eksempler på anvendelse
Porøs asfalt	Landingsbane Stærkt trafikeret areal med høj hastighed Trafikeret areal med lav hastighed Cykel- og gangsti Parkeringsareal
Porøs beton	Trafikeret areal med lav eller høj hastighed Cykel- og gangsti Pladser og Parkeringsarealer Gårdareal
Belægningssten med afvanding via fuger	Trafikeret areal med lav hastighed Cykel- og gangsti Parkeringsareal Gårdareal
Porøse belægningssten	Trafikeret areal med lav hastighed Cykel- og gangsti Parkeringsareal Befæstede rabatter Gårdarealer og have Indkørsler
Græsarmeringssten	Parkeringsareal Befæstede rabatter Indkørsler

Tabel 3.3.1.1. Anvendelse af forskellige permeable belægninger (36)

Ved anvendelse af græsarmeringssten skal der gøres opmærksom på, at disse kan udgøre et væsentligt problem for svagt gående, rollatorbrugere og kørestolsbrugere, om end der til disse kan anlægges passager med fx belægningssten, der vil være nemmere at færdes på.

Belægninger i porøs asfalt eller beton kræver oprensning for, at de store porer kan renses op og sikre gennemstrømningen, ligesom belægningssten med afvanding via fuger kræver oprensning, fx ved fejning en gang årligt. Erfaringerne er dog at fugerne selv efter mange år uden rensning stadig vil fungere tilfredsstillende, blot vandet kan føres bort i de underliggende

lag. Der nævnes således (37) at belægninger med belægningssten har vist gennemstrømninger på op til 800 liter/sekund/hektar svarende til regn på 4,8 mm/minut efter 8 år uden rengøring, hvorimod porøs asfalt eller porøs beton kræver mere oprensning, da porerne nemt stoppes til af sand m.m.

Gennemsiivningen kan give en risiko for udvaskning af gruset under belægningerne og medfølgende svækkelse af belægningerne, og et alternativ er derfor at udskifte gruslaget med et lag skærver (36) (37), nedknust beton i skærvefraktionen eller med drænbeton.

Drænbeton er en beton med en meget åben struktur (som i en Lecablok) og dette gør betonen både særdeles effektiv til at lede vand og forsyner betonen med et hulrum på 25-30 %, som nemt kan fyldes med vand. Drænbeton anvendes i vejbygning i USA, men er endnu ikke slået igennem i Europa (DTU har i samarbejde med universitetet i Iowa videreudviklet drænbetonen, så den kan udstøbes i store tykkelse til brug for bygninger, veje og belægninger (38)).

Dette koncept skal dog kombineres med en analyse af overfladevandledningen i området, da der bør anvendes et design som leder vandet på overfladen væk fra følsomme konstruktioner (som fx hospitaler) og videre til dedikerede oversvømmelsesområder (parker, marker, skaterbaner). Dette koncept skal nødvendigvis også vurdere risikoen for vandtilstrømning fra omkringliggende områder, som ikke har de permeable belægninger eller vandstrømning under selve belægningerne, hvis der er tale om skrånende terræn (37). Konceptet bør også tage hensyn til eventuelle ændringer i grundvandsstanden enten pga. øget regn intensitet eller pga. direkte havstigninger.

TRL niveau: 8 (36) (37)

Tidshorisont: 0-1 år. Der er anlæg i drift, der er erfaringer, designanvisninger og endda en vis erfaring med prissætning (36)

3.3.2. Reduktion i behovet for belysning på arealer

Reduktion i belysningsbehov kan opnås på kørearealer og parkeringsarealer ved anvendelse af hvid eller lys beton, der kræver mindre lyseffekt end de traditionelle sorte asfaltbelægninger.

Den hvide beton har været anvendt ved vejbygning (39) med gode resultater, om end der ikke er angivet noget tal for reduktionen i belysningsbehov. Der er derimod lavet en del vurderinger på parkeringsområder, hvor sort asfalt reflekterer 10-15 % af lyset, så reflekterer lys grå beton 30-50 % (40) (41) og hvid beton vil reflektere mere, dvs. over 50 %. Denne effekt vil naturligvis blive reduceret lidt af smuds. Den øgede refleksion vil reducere behovet for belysning på parkerings og trafikområder væsentligt og tal i størrelsen 30 % har været nævnt (40).

En mere futuristisk løsning er at anvende en selvlysende beton (42), hvor cementen er erstattet af en nyudviklet geopolymere, som kan opsamle sollyset i løbet af dagen og derefter udsende lys i løbet af den mørke nattetid. Dette er en meget ny og patenteret teknik, der kræver en del modning, inden den måske kan anvendes i praksis.

TRL-niveau (hvid beton): 6-7

Tidshorisont: Kort (1-5 år), idet konceptet skal afprøves på danske parkeringsområder

TRL-niveau (selvlysende beton): 3

Tidshorisont: Usikker lang (5-15 år) før den (måske) kan anvendes til at reducere belysningsbehovet væsentligt

3.3.3. Reduktion af lydniveau i området

Beton kan designes til at have lydabsorberende overflader, der i modsætning til almindelige glatte overflader ikke reflekterer lyden. Dette kræver dog en ganske ru overflade, som ikke vil være nem at male eller vedligeholde, men teknologien har været anvendt i en årrække til støjvægge langs motorveje og jernbaner, ligesom andre teknologier med grønne vækster i kombination med andre materialer har været anvendt (43) (44) (45).

Langs sådanne trafikkorridorer skelnes der imellem støjskærme, der blot reflekterer støjen (og dermed øger støjniveauet andre steder), og støjskærme der absorberer lyden og dermed generelt sænker lydniveauet overalt. Langs trafikkorridorerne er den mest effektive støjskærm beplantede jordvolde, men disse kræver desværre for meget plads til at være relevante for de fleste byggerier, hvor der snarere skal anvendes lodrette eller skrånende støjskærme.

Der kan desuden anvendes porøse belægninger på køre- og parkeringsområder af drænbeton eller drænasfalt, hvilket reducerer kørestøjen med op til 60 % (46), om end en del af denne effekt også opnås ved lavere kørehastighed.

Der kan anvendes lydabsorberende overflader i betonbyggeri. Sådanne overflader vil have en væsentlig ruhed og porøsitet, og deres anvendelse vil have den største berettigelse indendørs. Denne anvendelse gennemgås i afsnit 3.4.5.

Udføres betonen som en beton med en ret ru og måske åben overflade, vil det være muligt for planter at vokse på væggene, enten som vedbend med fastholdelse på overfladen eller med rødder i hulrummene i betonen. Nogle planter vil reducere lyddæmpningen i større eller mindre grad, hvor andre vil øge den, men til gengæld vil alle planter absorbere CO₂ løbende. Disse grønne vægge kan være en del af facaderne eller være placerede i forbindelse med køre- og parkeringsområder.

TRL-niveau (drænasfalt og drænbeton): 8

Tidshorisont: 0-1 år

TRL-niveau (grønne vægge som lydabsorption): 9

Tidshorisont: Ingen (kendt viden)

3.3.4. Reduktion af kølebehov i bygninger

Ved anvendelse af lys eller hvid beton i facader og i belægninger udendørs forøges refleksionen (40) (41), og dermed sænkes indstrålingen og opvarmningen om sommeren. Tilsvarende vil farven reducere udstrålingen og dermed hjælpe med at holde på varmen om vinteren. Da isoleringen i facaderne forhindrer den store varmetransport, har disse tiltag kun en tilsvarende mindre effekt på indendørs temperaturen, men bevirker også at temperatursvingningerne i bygningens ydre lag reduceres, hvorved revnedannelser og nedbrydning modvirkes.

Et alternativt kan her være en anvendelse af løvbærende træer eller andre løvbærende vækster, der kan skygge om sommeren, men tillade lysindfald i vinterhalvåret (en løsning, der har vist sig at virke rimeligt godt på DTU's øst-vestvendte bygninger). Dette kræver dog træer af en højde, der overstiger vinduesniveauerne med en del meter, og det er derfor en attraktiv løsning ved byggeri på max. 3 etager, hvorimod det vil have en mindre effekt på højhusbyggeri. Ved lavere byggeri forventes træer at kunne reducere de kraftigste lysindfald væsentligt, men præcise data vil afhænge af træernes typer, højde og placering.

Anvendes løvbærende træer, vil det medføre en del fordampning i sommerperioden med en medfølgende køling af udeluften. Træer, der bruger meget vand, fordamper også meget vand og køler derfor meget effektivt (fordampning af 1 l vand kræver til den energi, der skal til for at ændre temperaturen 1 °C i 1 m³ vand (47) (48)). Det er her fristende med piletræer, som forbruger store mængder vand, men disse træer har også en evne til at få rødderne ind i alt, der rummer vand, dog forventes moderne dræn at være i stand til at undgå dette. Træers rødder ødelægger ofte tætte belægninger, men vil blot gøre belægninger med belægningssten ujævne.

Anvendes grønne vægge og tage (49), vil fordampningen fra planterne holde temperaturen nede i området udenfor bygningen (men i mindre grad end større træer) og i en vis grad reducere behovet for køling i bygningerne (50) (51). Det kræver normalt en stærk konstruktion i beton at bære den øgede belastning ved de grønne tage, hvorimod grønne vægge ofte vil kunne klares uden ekstra bæreevnetiltag ved lavt byggeri med beton i kraft af betonens høje bæreevne, men vil kræve ekstra bæreevner ved højere byggeri. Anvendelsen af grønne tage og vægge giver dog udfordringer med rødder, der kan gennembryde membraner (49) eller problemer med mus (49) og muligvis rotter.

Anvendes grønne tage og vægge, kan temperaturfluktuationerne mellem nat og dag reduceres væsentligt, med op til 50 % (49), ligesom betonens store masse og varmekapacitet vil stabilisere temperaturen yderligere. Dette vil reducere kølebehovet i bygningen væsentligt.

Anvendes grønne vægge og tage, evt. i kombination med træer, så vil windchill-effekten reduceres væsentligt (49) (52), og dette vil i øvrigt reducere behovet for opvarmning i vinterperioden.

På en lidt større, lokal skala skal det nævnes at byer – inkl. København – oplever højere temperaturer end det omkringliggende landdistrikter, bl.a. pga. den ekstra opvarmning de

mange mørke overflader og fraværet af grønne planter skaber. Dette kan medføre effekter i form af øget risiko for ekstremregn.

TRL-niveau: 9

Tidshorisont: Ingen

3.3.5. Forbedring af luftkvaliteten

Luftkvaliteten kan forbedres ved at fjerne skadelige (toksiske) stoffer fra luften. Dette kan opnås passivt eller aktivt.

En passiv fjernelse af skadelige stoffer opnås ved naturlige adsorption af stoffer på overflader eller absorption af stoffer indenfor struktur af materialer. Adsorption og absorption kræver, at beton har en porøs struktur og overflade, som gør det muligt, at stoffer bliver adsorberet på overfladen eller længere inde i betonen og ikke kommer tilbage i luften, når forholdene ændrer sig.

En aktiv fjernelse opnås ved at transformere skadelige stoffer til harmløse stoffer. For at gøre det muligt er kemiske stoffer tilføjet til betonen. De muliggør transformering af stoffer som er adsorberet på overfladen eller i betonen. Transformation kan ske ved kemiske reaktioner med oxidanter eller andre stoffer. Aktiv fjernelse af stoffer kan også ske ved at forøge adsorption/absorption. Dette kan ske ved at ionisere stoffer eller ændre deres elektriske ladning.

Et eksempel af en aktiv fjernelse af skadelige stoffer er anvendelse af titandioxid (53), som iblandes betonen. Dette kan eksempelvis opsuge NO_x fra luften men også andre skadelige stoffer. Titandioxid ved UV-lys fremmer oxidering, som omdanner skadelige stoffer til neutrale eller gunstige stoffer. Påføres titandioxid direkte på betonoverfladerne, kan det slides af belægninger, men stoffet kan anvendes direkte på lodrette flader uden slid. Projektet Light2CAT er i gang med at afprøve denne metode på Fælledvej i København, og en nærmere vurdering af dette tiltag bør afvente afslutningen af projektet.

TRL-Niveau: 6

Tidshorisont: Kort (1-5 år)

3.3.6. Reduktion af behovet for rengøring af betonoverfladerne

En betonbygning udformes normalt ud fra både funktionelle behov og arkitektoniske ønsker, og dette påvirker valget af overflader, overfladers udseende og struktur. Der bør i designfasen således indgå en vurdering af drift og vedligehold, enten for at fjerne smuds eller for at direkte rengøre overfladen for begroning eller smitekilder.

Rengøring eller afrensning af en betonoverflade er således lettere, dersom materialet har en lav porøsitet (som fx i en højstyrkebeton eller en højstyrkemørtel), og dersom overfladerne er glatte eller direkte polerede i stedet for ru (54).

Anvendes konceptet for grønne vægge, er der næppe et behov for afrensning eller rengøring, men derimod et behov for vedligehold af planterne.

Udvendige overflader

Udvendige overfladers patinering er i høj grad afhængig af, om regnvand og smuds har en ensartet adgang til overfladerne eller en mere varierende adgang, der vil give anledning til en ujævn patinering og ujævn afvaskning (54) på overfladerne. Dette problem kan minimeres ved en feltopdeling eller andet mønster på ydervægges overflader (55).

Det skal påpeges at en del lodrette betonoverflader kan risikere at blive udsat for graffiti, og man derfor bør overveje at give byggeriet en antigraffiti-behandling (ved anvendelse af hydrofoberingsmidler på udsatte steder før graffitiangrebet kan foregå). Antigraffiti-behandling eller anden overfladebehandling vil dog altid ændre overfladernes udseende og kan give en konflikt med de arkitektoniske ønsker.

Indvendige overflader

De indvendige overflader er normalt mere eksponerede overfor personers kontakt end de udvendige overflader. Det er derfor nødvendigt at vurdere behovet for, at sådanne vægge skal kunne rengøres, og hvor effektivt de skal kunne rengøres.

Er behovet for rengøring lavt, kan en glat betonoverflade med lav porøsitet være tilstrækkelig, men den kan gøres væsentlig mere rengøringsvenlig ved en overfladebehandling (graffitibehandling, imprægnering eller maling). Er der et højt behov for rengøring og renhed (som fx hospitaler), bør overfladerne altid modtage en slidstærk og rengøringsvenlig overfladebehandling for at forsegle overfladen.

Det skal her erindres, at al beton er porøs, selvom denne porøsitet kan reduceres meget ved brug af en højstyrke beton eller mørtel, og at graffiti altid vil kunne trænge ind i materialet og misfarve dette. Skal byggeriet være sikkert mod graffiti, dvs. at graffiti skal kunne fjernes uden misfarvning, anbefales det altid at give de tilgængelige overflader en forsegling.

TRL-niveau: 9

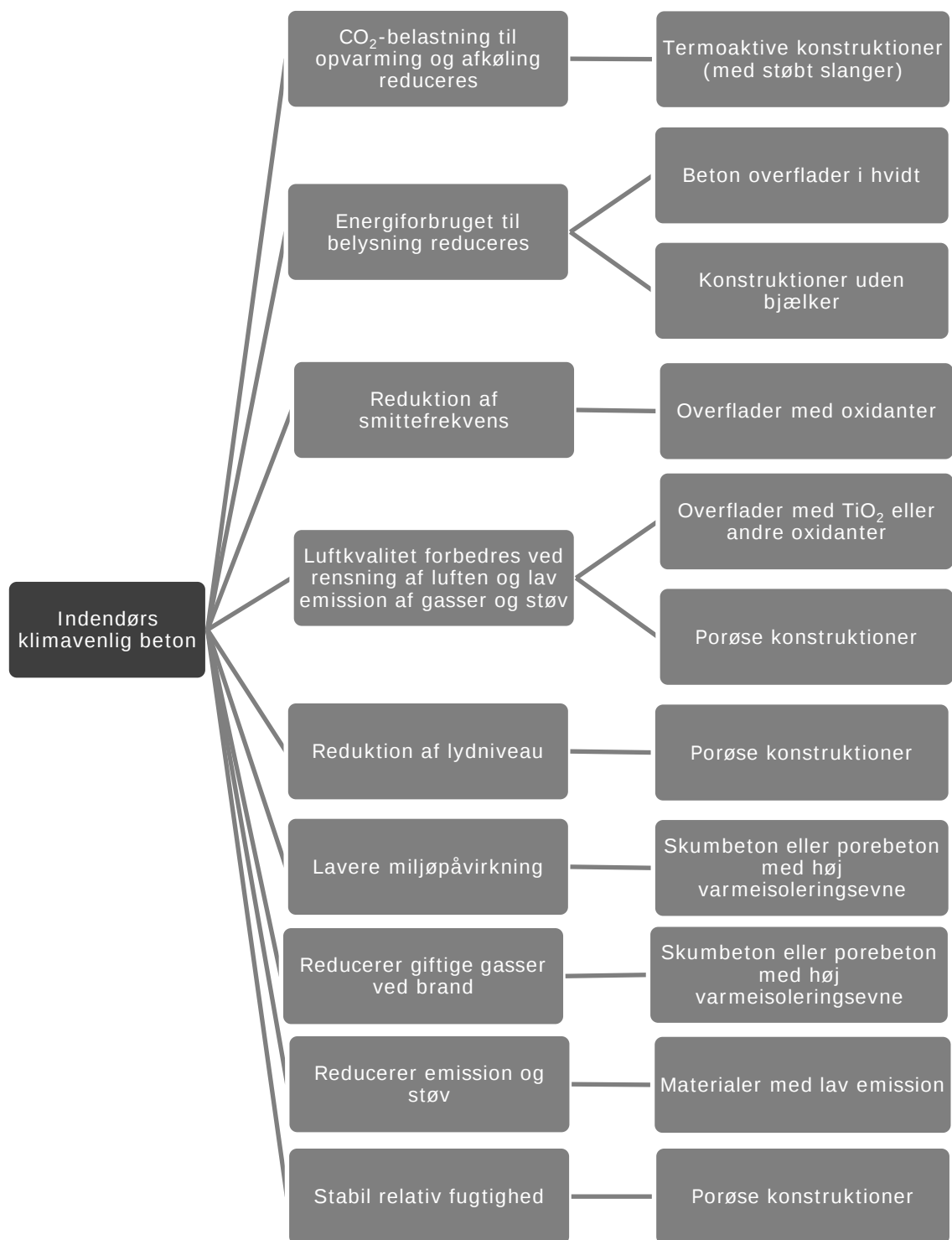
Tidshorisont: Ingen (kendt viden)

3.4. Indendørs klimavenlig beton

Det indendørs plan dækker tiltag og effekter, der påvirker det indeklima, som de personer (personale, patienter og beboere), der færdes i byggeriet, påvirkes af. Det vil kun i begrænset omfang påvirke det globale klima, om end en del af tiltagene vil forbedre byggeriets bæredygtighed.

På det indendørs niveau vil en klimavenlig beton udmærke sig ved at den muliggør (Figur 3.4.1) følgende effekter:

1. Reduktion af CO₂-belastningen til køling og opvarmning.
2. Reduktion af energiforbruget til belysning.
3. Reduktion af smittefrekvens.
4. Rensning af luften.
5. Reduktion af lydniveauet i rummet.
6. Reduktion af miljøpåvirkning fra brug af mineraluld og polystyren som varmeisolering.
7. Reduktion af giftige gasser under brand.
8. Reduktion af emissioner af gasser og reduktion af støv i miljøet.
9. Stabilisering af den relative luftfugtighed.



Figur 3.4.1. Effekter af en indendørs klimavenlig beton.
Punkterne er gennemgået detaljeret i de efterfølgende kapitler.

I det efterfølgende uddybes hvert af disse tiltag, der angives referencer, effekter talsættes hvor muligt og deres teknologiske modenhed og evt. tidshorisont for udvikling angives.

3.4.1. Reduktion af CO₂-belastningen til køling og opvarmning

Beton er et tungt byggemateriale med en stor varmekapacitet, der ved sin masse udligner temperaturer mellem dag og nat. Dette kan føre til reduktion af energi, som er brugt til at opvarme og afkøle bygninger og dermed reducere CO₂-belastningen. Varmekapaciteten kan forøges ved at indstøbe slanger i betonen. Indstøbte slanger fyldt med væske gør det muligt aktivt at ændre varmekapaciteten af betonen til at akkumulere varme eller kulde. En forøget kapacitet bruges til at afkøle (fjerne varme) eller opvarme bygninger efter behov. Konstruktioner med indstøbte slanger gør det også muligt at flytte eller udligne perioder med spidstemperaturer. Dermed er det ikke nødvendigt at installere højere kapacitet af køleanlæg. Som følge heraf kan større besparelser opnås ved at bruge disse konstruktioner til at mindske energiforbrug og installationsomkostninger. Dette bidrager til reduktion af CO₂-udslip.

Systemer med indstøbte slanger som aktivt ændrer kapaciteten af betonen kaldes termoaktive konstruktioner (på engelsk Thermo Active Building Systems, TABS). Disse systemer er blevet brugt siden 1930'erne, men blev populære igen i 1990'erne især pga. besparelser af energi til afkøling. Termoaktive konstruktioner bruger vand i indstøbte slanger. Vandet har en temperatur tæt på rumtemperatur og forbedrer dermed effektiviteten af varmepumper eller andre systemer, som bruger vedvarende energi (56) (57) (58). Dette er endnu en fordel ved at bruge disse konstruktioner.

Forøget varmekapacitet af betonen kan med fordel udnyttes til at skabe en ønsket træghed i variationen af temperaturerne. Køling ved brug af natteluft, køligt grundvand eller havnevand er både økonomisk og klimamæssigt favorabelt. Tilsvarende kan opvarmning foretages med varme fra varmepumper (jordvarme eller luftvekslere) eller med fjernvarmevand med lavere temperaturer end traditionelt (og dermed lavere varmetab). Udover de aktive anlæg vil betonens egen varmekapacitet kunne gemme meget varme fra dag til nat og virke kølende om dagen.

Anlæg af sådanne betonvarmelagre bør ske som lodrette vægge, hvor luften normalt har en god kontakt med betonoverfladen, og hvor luftens temperaturforskelle medfører en naturlig luftbevægelse, der medvirker til at udnytte effekten maksimalt.

TRL-niveau: 9

Tidshorisont: Ingen (kendt viden)

3.4.2. Reduktion af energiforbruget til belysning

Anvendelse af hvide overflader i rummene kræver mindre brug af el til belysning (59), og der kan spares op til 20 % af belysningen ved at vælge lyse eller hvide farver i stedet for mørkere farver (59) (60). De hvide overflader kan opnås ved brug af hvid beton (som ikke kræver maling) eller ved anvendelse af en hvid eller meget lys maling.

Lysindfaldet kan også øges, så elektricitetsforbruget reduceres ved at designe konstruktionerne, så der ikke anvendes bjælker. Herved kan vinduerne nå længst muligt op mod etagedækket, hvorved det naturlige lysindfald øges og når længst muligt ind i rummet. Øges vinduets højde med 1 m kan man således påregne dagslys op til 2,5 m længere ind i lokalerne (59), hvorved elektricitetsforbruget kan reduceres væsentligt. Der skal i denne situation dog vurderes, om det vil medføre et øget behov for køling. Kølingsbehovet kan holdes nede ved at anvende vinduer med solafskærmende ruder, persienner eller lignende, der kan reducere solindfaldet i de nødvendige perioder.

TRL-niveau: 9

Tidshorisont: Ingen (kendt viden)

3.4.3. Reduktion af smittefrekvens

Designet af betonoverflader og detaljer kan udformes, så de er nemmere at rengøre, således at smittefrekvensen kan reduceres.

Smittefrekvensen kan også reduceres ved at behandle overflader med et lag, som indeholder oxidanter, således at UV-lys kan oxidere og reducere de smitsomme stoffer. Dette dog kræver tilstrækkeligt UV-lys og overstiger normalt den mængde, der kommer fra det almindelige dagslys.

TRL-niveau: 4-5

Tidshorisont: 3-5 år

3.4.4. Rensning af luften

Betonen kan med fordel bruges til at rense luften for forskellige gasarter, som kan være toksiske og skadelige for mennesker, eller som kan deltage i kemiske reaktioner, der danner toksiske stoffer. Luftrensning kan reducere kravet til mængden af luft til ventilation af bygninger og har derfor direkte effekt på energiforbruget.

Rensning af luften foregår når luften er i kontakt med overfladen af de luftrensende materialer. Der skal bruges store overflader for at sikre, at stoffer kommer i kontakt med betonen. Forurening, som er i kontakt med betonen, kan adsorberes på overfladen eller kan absorberes ind i strukturen. Der findes ikke oplysninger om i hvilket omfang stoffer kan akkumuleres i

strukturen. Men det antages, at der med de små koncentrationer, som opstår i ikke industrielle bygninger, tales om en stor kapacitet. Der eksisterer dog en risiko for, at akkumulerende stoffer under særlige forhold kan desorberes til luften. Dette kan ske, når temperaturen eller den relative fugtighed ændrer sig, eller hvis koncentrationen tæt på overfladen ændrer sig markant. Derfor er teknologien ikke 100 % risikofri og skal videreudvikles, inden den anvendes bredt.

Stoffer som er adsorberet på overfladen eller absorberet ind i strukturen kan i en vis grad nedbrydes, så de ikke længere kan desorbere tilbage til luften (fx kan ozon adsorberes og nedbrydes på overfladen). Ozon kan fjernes ved brug af beton, som får en speciel struktur eller overfladebehandling (med fx aktiv kul), hvilket sikrer, at ozonen opfanges og nedbrydes. Denne løsning er især vigtig i bygninger med naturlig eller hybrid-ventilation, som tit er valgt til at opnå energibesparelser. I disse bygninger kan ozon ikke fjernes gennem ventilationsanlæg. Ozon som bliver oftest bragt indenfor fra udeluft og skal dermed fjernes fra indeluften. Ozon er et meget reaktivt stof, som deltager i kemiske reaktioner med andre stoffer i luften. Disse reaktioner kan danne toksisk forurening.

Andre stoffer end ozon, især organiske stoffer som er emitteret af konstruktionsmaterialer, mennesker, møbler eller processer, som foregår indendørs, kan også med fordel adsorberes på betonens overflader og omdannes til ikke skadelige stoffer. Dette kræver dog særlige betingelser, forhold, og overfladebehandling med oxidanter, som fremmer nedbrydning. Titandioxid (TiO_2) er oftest brugt som en oxidant på overflader til at fremme redoxreaktioner. Materialer, som sælges på markedet som luftrensende bygningsmaterialer (61) (62) (63) (64) (65), er ofte overfladebehandlet med TiO_2 . Reaktionerne kræver et UV-lys til stede. Derfor skal overfladerne belyses med dagslys med UV eller med pærer, som producerer UV. Der eksisterer den risiko, at redoxreaktioner på overflader belyst af et UV-lys er ufuldstændige. Dette fører til produktion af toksiske stoffer. Teknologien er derfor ikke 100 % risikofri og kan være skadelig for luftkvaliteten. Derudover er der endnu ikke tilstrækkelig dokumentation for, at teknologien er effektiv til at fjerne forurening fra luften i eksisterende bygninger og igennem længere tid (66) (67). Dette nødvendiggør en videreudvikling af teknologien, inden den bliver anvendt i bygninger.

TRL-niveau: 3-5

Tidshorisont: 4-6 år

3.4.5. Reduktion af lydniveauet i rummet

Beton kan anvendes til at reducere lydniveauet på 3 måder:

- Luftlydsisolation, der reducerer lyden fra de omkringliggende rum.
- Trinlydsisolation, der reducerer lyden af trin direkte på konstruktionen.
- Lyddæmpning, som reducerer lyden i samme rum.

Luftlydisolation

Støj fra omgivende rum er ofte en belastning i byggeriet. Denne støj transmitteres direkte gennem vægge og dæk eller gennem samlinger fx fra et dæk til en væg og derfra til rummet nedenunder – den såkaldte flangetransmission.

Den traditionelle måde at opnå lydisolation på er ved at gøre konstruktionerne tunge. Her udmærker betonen sig ved, at forholdet mellem vægt og pris er tæt, så man relativt billigt kan skaffe sig en tung konstruktion og dermed en god lydisolation. Problemet med denne og andre traditionelle løsninger er, at disse tunge konstruktionsdele skal transporteres og bygges ind med kran, og i tilfælde af dæk skal konstruktionen også bære sin egenlast vandret ud til understøtningerne. Det koster stålarmering, som dels er dyrt, og dels giver en stor ekstra CO₂-belastning, fordi 1 kg stål koster hele 3 kg CO₂ at producere.

Man kan med beton dog gå andre veje end de traditionelle. De super-lette konstruktioner anvender i deres SL-dæk således en stærk tung og tæt beton med rumvægt 2400 kg/m³ i samspil typisk med en letklinkerbeton med rumvægt 6-700 kg/m³. De to betontyper svinger forskelligt, når de bliver anslået fx af lydpåvirkning, hvorved en del af energien i lyden bliver til varme. Dertil kommer, at letklinkerbetonen er porøs, hvorfor en del af lyden transmitteres gennem luften i porerne, så dette samspil mellem klinker og porer yderligere reducerer energien i lyden til varme. Eller sagt på en anden måde: letklinkerbetonen er i sig selv mere lydisolerende, end den tunge beton. Man siger at den har en større "tabsfaktor" end normal beton. Tabsfaktoren er typisk 0,005 for normal beton og 0,01 for letklinkerbeton altså dobbelt så stor (68).

Det er grunden til, at et SL-dæk med vægt 340 kg/m² har en lydisolation på 58 dB, hvor et huldæk med samme vægt kun kan klare 52 dB. Derfor skal et huldækforsynes med en overbeton, der bringer dets vægt op på 440 kg/m² – altså 100 kg ekstra pr m² bare for at opfylde myndighedskravet på 55 dB og 200 kg ekstra pr m² for at opnå de 58 dB (69) (70) (71). Forskellen mellem SL-dæk og huldæk svarer således til en besparelse på ca. 200 kg/m² eller ca. 1/3 mindre beton og cement. Denne løsning masseproduceres i dag.

En tilsvarende super-let teknologi kan anvendes for vægkonstruktioner, så man kan opnå lettere vægelementer med samme gode lydisolation som de traditionelle tungere, men med tilsvarende mindre omkostninger og CO₂-forbrug til materialer, transport og kranløft.

Til dette formål er teknologien ikke helt udviklet, og der er ikke tale om en masseproduktion, men erfaringerne fra dækkene er et godt udgangspunkt for udviklingen. Grunden til, at udviklingen ikke er så langt, er, at dækkene har haft førsteprioritet, da den lettere løsning også giver besparelser på den egenlast, der skal føres vandret ud til understøtningerne, med deraf følgende omkostninger, som kan spares ved at gøre dem lettere.

Trinlydisolation

Trinlyd dæmpes dels ved anvendelse af bløde indlæg, så den direkte bankelyd klinger noget af, inden den ledes videre i konstruktionen, og dels ved de samme mekanismer, som er i spil for luftlydisolationen, der er omtalt ovenfor.

I Danmark måles trinlydisolationen som det lydniveau, man får i rummet under konstruktionen, når der på dækket ovenover står en standardiseret bankemaskine. Tabel 3.4.5.1 viser eksempler på måling af sådanne lydniveauer. Bygningsreglementet i Danmark foreskriver, at man højst må kunne høre 53 dB fx i boliger ved standardstøjniveau og et lavt dB-tal er derfor bedre end et højt.

Der findes almindelige gode gulvopbygninger, som typisk kan skære 30 dB af den transmitterede trinlyd (fx parketguld lagt på strøer, der er kilede op fra betongulvet, hvorefter hulrummet er udfyldt med isolering), som kombineres med en betonetageadskillelse.

Opbygning	Trinlyd uden gulvopbygning (dB) målte tal (69) (70) (71)	Trinlyd med gulvopbygning (dB) estimerede tal
Huldæk (69)	83	53
SL-dæk (70) (71)	77	47

Tabel 3.4.5.1. Trinlyd i etagebyggeri.

Lyddæmpning

Beton kan designes til at have lydabsorberende overflader, der i modsætning til almindelige glatte overflader ikke reflekterer lyden. Dette kræver dog en ganske ru og åben overflade, som ikke vil være nem at male eller vedligeholde.

Det er hullerne i overfladen, der dæmper lyden, og størrelsen og formen på dem bestemmer, hvor meget dæmpning man opnår som funktion af lydets frekvens. Af tabel 3.4.5.2 ses, at en letklinkerbetonoverflade med rumvægt 600 kg/m^3 svarende til den, man bruger til letklinkerblokke eller til blokke i SL-dæk, har en lydabsorptionskoefficient, som stort set for alle frekvenser svarer til den, man kan opnå ved at opsætte en lydabsorberende plade af træbeton eller en plade af stenuld, og at lyddæmpningen er langt bedre end den, man kan opnå ved at ophænge et bomuldstæppe eller en krydsfinérplade på lægter.

Frekvens i Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Letklinkerbeton ca. 600 kg/m^3	0,15	0,19	0,44	0,63	0,52	0,75
Letklinkerbeton ca. 1200 kg/m^3	0,10	0,20	0,40	0,60	0,50	0,60
25mm træbeton lydplade	0,18	0,11	0,19	0,39	0,95	0,56
Træbeton med mere cement	0,08	0,20	0,45	0,80	0,66	0,85
25 mm stenuld lydplade	0,09	0,23	0,53	0,72	0,75	0,77
8 mm Krydsfinér på lægter	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Bomuldstæppe ved væg	0,04	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
Polstrede sæder i en sal	0,07	0,12	0,26	0,42	0,50	0,55
Polstrede sæder med publikum	0,32	0,62	0,74	0,76	0,81	0,90
Beton	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02

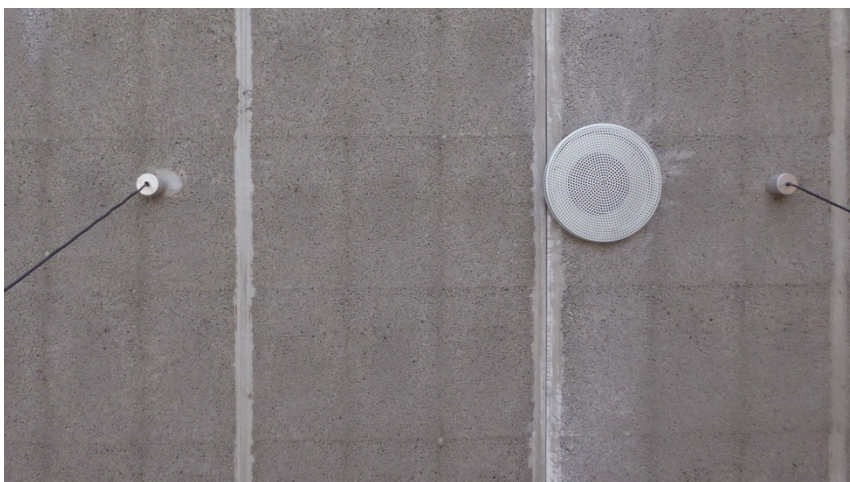
Tabel 3.4.5.2. Lydabsorptionskoefficienter (72) (73).

Ca. halvdelen af SL-dækket består af letklinkerbeton med $6-700 \text{ kg/m}^3$ rumvægt. Normalt leveres det med en helt glat underside, men denne cementmørtel kan undlades, så SL-dækkene får den rene letklinkerbeton 600 kg/m^3 som overflade på undersiden.

De gode lyddæmpende egenskaber af denne overflade er bl.a. anvendt til dæmpning i klasselokalerne til BIG's tilbygning til Gl. Hellerup gymnasium. Fotoene på figurerne 3.4.5.1 og 3.4.5.2 viser, hvordan det ser ud,



Figur 3.4.5.1. Klasseværelse i Gl. Hellerup Gymnasium med lydabsorberende SL-dæk i loftet.
Foto: K. Hertz.



Figur 3.4.5.2. Overflade af lydabsorberende SL-dæk i loft. Foto: K. Hertz.

TRL-niveau luftlydisolation, trinlydisolation og lyddæmpning med super-lette dæk: 9
Tidshorisont: Ingen

TRL-niveau luftlydisolation og lyddæmpning med super-lette vægge: 4
Tidshorisont: 6 år

3.4.6. Reduktion af miljøpåvirkning fra brug af mineraluld og polystyren som varmeisolering

Det er muligt at producere skumbetoner eller porebetoner med lave rumvægte og en høj varmeisoleringsevne, hvor der kan produceres betontyper med varmeisoleringstal svarende til mineraluld. Disse kan derfor erstatte mineraluld og polystyren som isoleringsmaterialer i vægge og under gulve mod jord, sådan som det er beskrevet i kapitel 3.2.7.

TRL-Niveau: 6-7

Tidshorisont: 1-5 år

3.4.7. Reduktion af giftige gasser under brand

Skumbeton eller gasbeton kan (som beskrevet i kapitel 3.2.7) anvendes som isoleringsmateriale i stedet for polystyren og dermed reducere risikoen for giftige dampe fra fx polystyren under en brand eller for, at gasser eller smeltende materialer medvirker til en eksplosiv spredning af brand.

TRL-Niveau: 6-7

Tidshorisont: 4-5 år

3.4.8. Reduktion af emissioner af gasser og reduktion af støv i miljøet.

Anvendelse af den korrekte type beton eller mørtel vil fjerne risikoen for afslidning af maling med tilhørende støvproblemer for arbejdsmiljøet, idet en anvendelse af lysgrå eller hvid beton med høj slidstyrke vil fjerne behovet for maling af gulve.

Klimavenlig beton skal være en beton, som har lavt eller minimal afgasning af forurening til luften. Dette opnås ved at udvælge produkter, hvis indhold af toksiske stoffer er så lavt som muligt. Det vil sige, at cement, sten, sand og vand, der bruges i betonen, skal være af den højeste kvalitet. Der kan ikke opstå kontamination af betonen under produktion, transport, opbevaring eller brug på byggepladsen. Hvis der bruges andre typer flyveaske end kulflyveaske i betonen (for at reducere cementindholdet), skal det sikres, at de ikke inkluderer toksiske stoffer eller stoffer, som kan skabe lugtgener (74) (75).

TRL-niveau: 4-5

Tidshorisont: 6-7 år

3.4.9. Stabilisering af den relative luftfugtighed

Betonerne kan primært bidrage til et stabilt niveau for den relative luftfugtighed ved at stabilisere temperaturen. Betoner kan kun i mindre grad stabilisere den relative luftfugtighed ved at fungere som en fugtbuffer, medmindre betonen udføres med en meget porøs overflade.

Der er en del usikkerhed på betydningen af relativ luftfugtighed og fugtindhold i luften mht. smittespredning. Høj luftfugtighed vil således beskytte mod smitte især ved epidemier, men høj luftfugtighed forøger også risikoen for, at der opstår skimmelsvamp eller mug.

Der er uenighed om hvorvidt det er den absolutte fugtighed (vandindhold) eller den relative fugtighed, som har betydning for smitsomme sygdomme og overlevelse af mikroorganismer, bakterier og vira.

Betonen kan virke som en fugtbuffer til at undgå alt for højt eller lav luftfugtighed, men det kræver en meget porøs beton, og det er derfor usikkert, om dette vil modvirke en eventuel luftrensning eller forøge eventuelle emissioner fra betonen (emissioner af egne stoffer eller stoffer som er blevet adsorberet eller absorberet i betonen).

TRL-niveau: 6-7

Tidshorisont: 4-6 år

3.5 Oversigt over tiltag, modenhed og tidshorisonter

De beskrevne tiltag har forskellige grader af teknologisk modenhed og forskellige tidshorisonter, ligesom visse tiltag reelt medvirker til at gøre betonerne mere klimavenlige på flere punkter. Disse ting er opsummerede i tabellen nedenfor.

Afsnit	Tiltag	TRL	Tidshorisont (år)
Globale tiltag			
3.2.1	Reduktion af CO ₂ -udledningen ved produktion af cementen.	9	0
3.2.2	Reduktion af CO ₂ -udledningen ved at reducere cementforbruget pr kubikmeter beton - Kulflyveaske og optimering - Træaske og bioaske	9 3	0 15
3.2.3	Reduktion af CO ₂ -udledningen ved at anvende superlette betonkonstruktioner - Super-lette halkonstruktioner - Lydisolerende super-lette dæk - Lyddæmpende super-lette dæk	5 9 9	5-6 0 0
3.2.4	Reduktion af forbruget af sand, grus og sten gennem genbrug af nedknust beton - Bærelag og drænlæg - Genbrugsbeton	9 7	0 4-5
3.2.5	Reduktion af CO ₂ -udledningen ved anvendelse af holdbare og ombyggelige konstruktioner, der forøger levetiden af konstruktionen	9	0
3.2.6	Anvendelse af CO ₂ -absorberende beton Materialebesparelse ved letklinkerbeton	4-5 7	6-7 3-5
3.2.7	Reduktion af CO ₂ -belastning fra andre materialer	4-5	6-7
Lokale tiltag			
3.3.1	Klimatilpasning til et ændret klima med kraftigere regnskyl	8	0-1
3.3.2	Reduktion i behovet for belysning på arealer - Hvid beton - Selvlysende beton	6-7 3	1-5 5-15
3.3.3	Reduktion af lydniveau i området - Drænasfalt og drænbeton - Grønne vægge som lydabsorption	8 9	0-1 0
3.3.4	Reduktion af kølebehov i bygninger	9	0
3.3.5	Forbedring af luftkvaliteten	6	1-5
3.3.6	Reduktion af behovet for rengøring af betonoverfladerne	9	0

Tabel 3.5.1 (del 1 af 2). Oversigt over tiltag, teknologisk modenhed og tidshorisonter.

Afsnit	Tiltag	TRL	Tidshorisont (år)
Indendørs tiltag			
3.4.1	Reduktion af CO ₂ -belastningen til køling og opvarmning	9	0
3.4.2	Reduktion af energiforbruget til belysning	9	0
3.4.3	Reduktion af smittefrekvens	4-5	3-5
3.4.4	Rensning af luften	4-5	4-6
3.4.5	Reduktion af lydniveauet i rummet • Superlette dæk • Superlette vægge	9 4	0 6
3.4.6	Reduktion af miljøpåvirkning fra brug af mineraluld og polystyren som varmeisolering	4-5	6-7
3.4.7	Reduktion af giftige gasser under brand	6-7	4-5
3.4.8	Reduktion af emissioner af gasser og reduktion af støv i miljøet	6-7	4-5
3.4.9	Stabilisering af den relative luftfugtighed	7	4-6

Tabel 3.5.1 (del 2 af 2). Oversigt over tiltag, teknologisk modenhed og tidshorisonter.

4. anbefalede tiltag

Dette kapitel indeholder anbefalinger af, hvilke aktioner der efter DTU Bygs mening vil være mest realistiske og gevinstgivende med det nuværende teknologiske modenhedsniveau for at skabe et klimavenligt betonbyggeri. Aktionerne består normalt af kombinationer af flere tiltag, som beskrevet i kapitel 3. Deres forventede effekter er vurderede fra 0 til 3 stjerner, hvor:

- *** angiver en aktion, der vil have en stor effekt.
- ** angiver en aktion, der vil have en god, men moderat effekt.
- * angiver en aktion, der vil have en mindre effekt.
- angiver en aktion, hvor effekten vil være beskeden eller endog tvivlsom.

I tabel 4.1 er de anbefalede aktioner præsenteret, alle med 3 eller 2-stjernede effekter.

Det betyder ikke, at andre tiltag ikke kan have en effekt, men blot at deres effekter enten forventes at have mindre impact, eller at tiltagene kræver en del mere arbejde, før deres teknologiske modenhed er tilstrækkelig høj til at kunne indarbejdes i udbud på projekter. Kapitel 6 præsenterer en strategi for at hæve disse modenheder.

Effekt	Aktioner	TRL	Tidshorisont
***	Begræns CO₂-udledning fra cementforbruget Det anbefales at sætte en grænse på CO ₂ -udledning fra byggeriet, specificeret som max kg CO ₂ pr m ² for hhv. vægge og for etageadskillelser. Det anbefales at sætte grænsen for CO ₂ -udledning til 300kg/m ² betonvæg og etagedæk lagt sammen. Dette vil kombinere effekten af cementer med lavere CO ₂ -udledning, effekten af at reducere cement/m ³ beton og også effekten af at bruge superlette konstruktioner, der anvender mindre beton. Se kapitel 3.2.1, 3.2.2 og 3.2.3.	8	1-2 år
***	Anvend fleksible og holdbare konstruktioner Ved design af konstruktionerne skal der tages hensyn til, at brugen af bygningen kan ændres markant i dens levetid, måske endda til anvendelser der endnu ikke er forudset. Dette kan fx være et design, hvor alle vægge kan fjernes eller udskiftes uden ombygning af de øvrige bygningsdele. Det er et design, hvor der ikke er anvendt bjælker under etagedækkene. Se kapitel 3.2.5.	9	0 år
***	Lyddæmpning i rummet ved anvendelse af superlette dæk Der anvendes superlette dæk som etageadskillelse, således at der opnås en luftlydsdæmpning, trinlydsdæmpning og lydabsorption. Det anbefales at sætte kravet til lyddæmpning til min. 55 dB nu, med en skærpelse over de næste 5-10 år til min. 60 dB. Det anbefales at kræve kontrolmålinger af det udførte. Se kapitel 3.4.5.	9	0 år
**	Minimer behov for køling, opvarmning og belysning Der anvendes etageadskillelser med køle-/varmeslanger indbygget, således at temperaturreguleringen kan ske ved temperaturer, der ligger nær rumtemperaturen (jordvarme, solvarme, køling via grundvand etc.). Dermed begrænses brugen af nedhængte lofter. Der anvendes hvid/lys beton i de synlige overflader for at reducere belysningsbehovet. Der anvendes et konstruktivt design uden bjælker under dæk, således at dagslyset kan maksimeres Se kapitel 3.4.1 og 3.4.2.	9	0 år

Tabel 4.1. Anbefalede aktioner (del 1 af 2).

Effekt	Aktioner	TRL	Tidshorisont
**	Anvend genbrugsbeton i ny beton Forbruget af tilslag (sand, grus og sten) reduceres gennem genbrug af nedknust beton. Det kan her kræves, at en vis procentdel af tilslagene skal erstattes med genbrugsbeton. Se kapitel 3.2.4.	7	4-5 år
**	CO₂-tunge byggematerialer udskiftes med beton Asfalt skal udskiftes med permeable betonbelægninger. Isoleringsmaterialer som polystyren og mineraluld skal udskiftes med varmeisolerende beton (skumbeton, porebeton). Se kapitel 3.2.7.	8	1-2 år
**	Anvend hvide/lyse permeable belægninger Permeable belægninger med et kraftigt drænende lag i nedknust beton vil kunne optage kraftige regnmængder. Den hvide/lyse farve vil reducere belysningsbehovet på arealerne og reducere sommerens lokale opvarmning. Det anbefales her at udføre kontrolmålinger, da fx beplantninger kan vokse og kan forøge belysningsbehovet. Se kapitel 3.3.1 og 3.3.2.	6-9	0-5 år

Tabel 4.1. Anbefalede aktioner (del 2 af 2).

4.1 Økonomiske konsekvenser af tiltagene

Tabel 4.1 angiver en række anbefalede tiltag, som alle kan påvirke prisen for design, anlæg og drift af byggerierne. I det efterfølgende har vi beskrevet hvordan prisen påvirkes, dels i tre hovedsituationer og dels for hvert af de anbefalede tiltag

1. Prisen stiger, når der stilles nye typer af krav, eller når krav skærpes kraftigt indenfor en kort periode. Dette skyldes, at byggeriets parter ofte er usikre overfor store, nye ændringer, som de reelt er usikre på hvordan de skal kunne opfylde. De vil derimod nemmere kunne acceptere og opfylde kravene, hvis de indføres gradvist over en årrække. Dette kan gælde for krav om en maksimal grænse for CO₂-udledning, som derfor bør skærpes over en årrække.
2. Design og anlægsprisen kan stige ved nyt design, der leder til et fald i driftsomkostningerne. Faldet i driftsomkostningerne kan dermed finansiere de øgede anlægsudgifter. Dette kan fx gælde ved anvendelse af køle-/varmeslanger i byggeriet.
3. Design- og anlægsprisen kan stige ved nyt design, der leder til et senere fald i omkostningerne ved senere ændringer. Dette kan fx gælde for det fleksible byggeri, hvor det er billigere og nemmere at justere under selve byggeriet og ved senere ombygninger.

I det efterfølgende er disse ting beskrevet for hvert af de anbefalede tiltag.

Begræns CO₂-udledning fra cementforbruget

Cement med lav CO₂ er et ekstra krav, som koster penge; men en reduktion i cement/m³ beton (optimering af betonrecept og erstatning af cement med fx kulflyveaske) og en reduktion i antallet af m³ beton (superlette konstruktioner) er begge ting, der reducerer byggeprisen. Dette krav vurderes at have en stor effekt på CO₂-udledningen og kan indenfor rimelige kravniveauer gennemføres uden økonomiske omkostninger.

Anvend fleksible og holdbare konstruktioner

Disse konstruktioner vil umiddelbart koste mere at designe, men vil være nemmere at bygge, og dermed kan prisstigninger holdes nede eller undgås. Den store besparelse ved byggeriet kommer ved, at installationer i langt mindre grad skal omgå eller gennemskære de bærende konstruktioner, når der ikke anvendes bjælker under dæk, og når mængden af bærende og afstivende vægge holdes nede. En sekundær gevinst vil komme ved, at konstruktionen kan anvendes i en længere årrække og væsentligt nemmere kan ombygges til en ændret anvendelse.

Lydisolering og lyddæmpning i rummet ved anvendelse af superlette dæk

Skærpede krav til lydisolering koster typisk en øget anlægsudgift, indtil byggebranchen har vænnet sig til kravet. Kravet kan opfyldes ved enten et øget forbrug af beton pr m² etageadskillelse eller ved brug af superlette dæk med flere betontyper i dækket. Ved superlette dæk opnås en bedre lydisolering pr. ton beton i etageadskillelsen end ved massive dæk eller huldæk. Der kan endvidere opnås en gratis lyddæmpning af rumlyden, så man sparer opsætning af lyddæmpende plader fx af træbeton.

Kontrolmålinger af lydisoleringen anbefales. Her gælder det, at ekstra kontrolkrav kan øge anlægsprisen men til gengæld sikre, at bygherren opnår den krævede kvalitet, og at kontrolmålinger endda medvirker til at reducere mængden af diskussioner om, hvorvidt det udførte byggeri opfylder specifikationerne.

Minimer behov for køling, opvarmning og belysning

Indbygges køle-/varmeslanger i byggeriet, kan det forøge anlægsprisen, selvom det medfører, at andre varme- og køleinstallationer kan reduceres. Det vil dog gøre det muligt at reducere driftsudgifterne, og anvendelse af fjernvarme eller jordvarme vil normalt gøre dette koncept økonomisk fordelagtigt.

Anvendes der et konstruktionsdesign uden bjælker og uden nedhængte lofter ved vinduerne, kan belysningsbehovet reduceres væsentligt uden ekstra udgifter ved at lade vinduerne nå højere op. I Danmark anvendes der normalt lyse farver på væggene, og ved at anvende hvid beton kan man evt. spare maling og vedligeholdelse deraf.

Anvend genbrugsbeton i ny beton

Genbrugsbeton er billigere end de jomfruelige tilslag, der normalt anvendes i beton. Det vil dog lede til et ekstra forbrug af cement (og dermed både prisøgning og øgning af CO₂-udledning), medmindre recepterne optimeres, således at ekstraforbruget kan undgås.

Det vurderes, at det vil være muligt at optimere betonrecepterne, således at et ekstraforbrug af cement kan undgås. Er der i kravene foreskrevet en øvre grænse for CO₂-belastningen fra byggeriet, vil det krav forhindre en øgning og lede til en optimering af recepter og konstruktivt design.

CO₂-tunge byggematerialer udskiftes med beton

Isoleringsmaterialer som polystyren og mineraluld bør udskiftes med varmeisolerende beton (skumbeton, porebeton), da de kan udgøre en stor del af byggeriets CO₂-belastning. Polystyren er direkte brandfarligt og kan give store problemer med brandsikkerheden og bør derfor undgås uanset pris og den store CO₂-belastning.

Udskiftes mineraluld med varmeisolerende beton, forventes prisen for byggeriet at øges, da mineralulden er et kendt og indarbejdet materiale, mens den varmeisolerende beton er forholdsvis ny, selvom kraftigt varmeisolerende porebetonprodukter er på markedet.

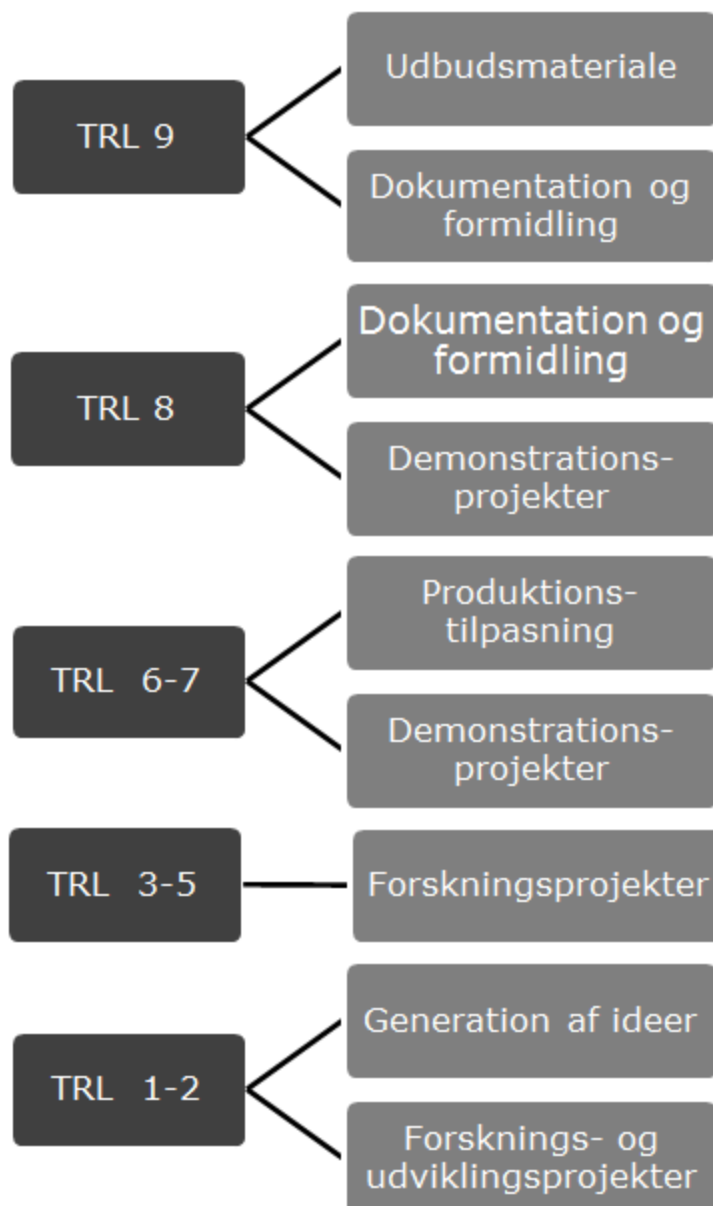
Anvend hvide/lyse permeable belægninger

Anvendelse af permeable belægninger forventes at være absolut nødvendig aht. ekstremregnperioder og det er derfor ikke relevant at vurdere om dette tiltag forøger anlægsudgifterne. Vedligeholdelsen af permeable belægninger kan dog være lavere end vedligeholdelsesudgifterne for en asfaltbelægning, og ofte bliver de permeable betonbelægninger økonomisk attraktive.

Anvendelse af hvide/lyse belægninger vil kræve brug af hvid cement, som fordyrer byggeriet, men til gengæld kan en del af elforbruget til oplysning reduceres.

5. Tiltag for at øge det teknologiske modenhedsniveau

Beton er, som det fremgår, et materiale, der har mange muligheder for at fungere på en klimavenlig måde i byggeriet. Hvis det bruges rigtigt, kan man opnå "en bæredygtig beton eller betonkonstruktion, der ikke generer klimaet unødigt, men derimod forbedrer klimaet og kompenserer for klimaændringer". I det følgende gives forslag til, hvad man kan gøre for at udnytte mulighederne, som illustreret på figur 5.1, med uddybende forklaringer efterfølgende.



Figur 5.1. Tiltag for at øge det teknologiske modenhedsniveau.

TRL 9

Rapporten anfører en række teknologier, der kan bidrage til de klimavenlige anvendelser. En række af dem er allerede implementeret i byggeriet. Det er anvendelser, som har TRL-niveau 9 herunder:

- Reduktion af CO₂-produktionen ved fremstilling af cement (3.2.1).
- Reduktion af cementforbrug ved tilsætning af andre fine materialer (3.2.2).
- Super-lette dæk til luftlydisolering, trinlydisolering, lyddæmpning, større spænd og brandmodstandsevne og reduktion af samlet CO₂-produktion (3.2.3) og (3.4.5).
- Holdbare, ombyggelige konstruktioner til reduktion af CO₂-produktion (3.2.6).
- Grønne vægge og tage til reduktion af kølebehov (3.3.4).
- Massive vægge og termoaktive konstruktioner til termisk udligning (3.3.4) og (3.4.1).
- Glatte overflader til nedsættelse af rengøringsbehov på udsatte steder (3.3.6).
- Hvid eller lys beton til reduktion af indendørs belysning (3.4.2).

Det eneste, der kræves for disse anvendelser, er, at de foreskrives, eller at de ønskede effekter foreskrives i udbudsmaterialet. Det er her væsentligt, at effekterne ikke kun foreskrives for anvendelse af beton, men for byggeriet generelt, så man ikke risikerer, at andre materialer med dårligere egenskaber vælges i stedet for at undgå de øgede krav til betonen.

Rapporten foreslår, at effekten af disse tiltag dokumenteres ved regelmæssige målinger i bygninger, der anvender disse teknologier, og ved erfaringsopsamling blandt entreprenører, som har brugt disse teknologier. Disse målinger og erfaringer kan bruges til at udarbejde retningslinjer, pjecer o.l., som formidles bredt og gør det nemmere og billigere at anvende disse tiltag. Dette kan forøge chancen for, at fremtidige projekter anvender disse løsninger og bidrager til, at entreprenører vælger dem i stedet for at vælge traditionelle betonkonstruktioner.

TRL 8

Nogle tiltag er fuldt dokumenteret og klar til anvendelse, men mangler den første implementering. Det er anvendelser, som har TRL-niveau 8 herunder:

- Drænbeton og porøse belægninger til bortledning af vand og lyddæmpning (3.3.1) og (3.3.3).

Disse tiltag kræver en beslutningsdygtig bygherre, som er indstillet på at være blandt de første, der anvender dem. Til brug for beslutning og styring kan der være behov for en opsamling af den tilgængelige dokumentation og en opfølgning af byggeriet, så man løbende sikrer sig, at man opnår det, man ønsker. Der kan evt. også foretages en monitorering af, at de ønskede effekter blev opnået i det endelige byggeri til brug for beslutning om fortsat anvendelse af de pågældende tiltag. En anden mulighed for at øge det teknologiske modenhedsniveau er at lave et demonstrationsprojekt, hvor fordelene af den nævnte teknologi dokumenteres.

TRL 6-7

Nogle tiltag virker i relevante omgivelser, men mangler et endeligt design og en dokumentation for at blive anvendt. Der kan også være tale om et vist udviklingsarbejde, hvor det endelige design færdiggøres, så det kan fremstilles på en hensigtsmæssig måde. Det er anvendelser, som har TRL-niveau 6-7 herunder:

- Nedknust beton til bærelag (3.2.5).
- Letklinkerbeton og konstruktioner deraf til materialebesparelse (3.2.7).
- Hvid eller lys beton til reduktion af udendørs belysning (3.3.2).
- Beton til absorbering af skadelige stoffer udendørs (3.3.5).
- Betonoverflader til modvirkning af gasser og støv (3.4.8).
- Porøs beton som fugtbuffer (3.4.11).

Der skal ske en produktionstilpasning, som fx kan ske i forbindelse med et demonstrationsprojekt. Resultatet fører tiltaget frem til TRL 8, hvor der findes det fornødne beslutningsgrundlag i form af dokumentation, afklarede produktionsmuligheder og prisforhold, så bygherren kan beslutte sig for at anvende det.

Det kalder på et projekt mellem universitet, elementfabrik, entreprenør og diverse teknologiske serviceinstitutioner som f.eks. Delta, Teknologisk Institut, Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut (DBI) til akkrediteret prøvning. Alle former for projekter kan komme i spil, herunder bachelor- og kandidatprojekter, ph.d.-projekter og især postdoc-projekter, hvor man ansætter erfarne, dedikerede personer til at varetage opgaverne.

TRL 3-5

Mange tiltag er lige netop verificeret, men mangler en grundig undersøgelse af konsekvenser, virkemåder og sidegevinster. De er også stadig åbne for nytænkning af de konstruktive principper. Det er anvendelser, som har TRL-niveau 3-5 herunder:

- Superlette konstruktioner til større spænd, større brandmodstandsevne og reduktion af den samlede produktion af CO₂ (3.2.3).
- Nedknust beton til CO₂-absorbering (3.2.7).
- Letklinkerbeton og konstruktioner deraf til CO₂-absorbering (3.2.7).
- Skumbeton og porøs beton til isolering (3.2.8.), (3.4.6) og (3.4.7).
- Selvlysende beton (3.3.2).
- Beton til absorbering af skadelige stoffer indendørs (3.4.4).
- Super-lette vægge til luftlydisolering, lyddæmpning og reduktion af samlet CO₂-produktion (3.2.3) og (3.4.5).

Der resterer for disse anvendelser en egentlig forskningsindsats, som kan involvere bachelor- og kandidatprojekter til afsøgning og konsekvensanalyser af teknologien og især ph.d.-projekter i samarbejde med interesserede bygherrer, rådgivere, producenter og/eller entreprenører.

TRL 1-2

I et kreativt miljø opstår der løbende mange nye ideer, som kan blive til mulige tiltag. Det er så at sige første led i fødekæden, og uden dem sker der ingenting. Men de kræver naturligvis at blive undersøgt, især med hensyn til om de virker efter hensigten. Det er anvendelser på TRL-niveau 1-2 herunder:

- En mængde idéer, som løbende kommer til, og som ikke er modne til at blive beskrevet i en sammenhæng som denne.
- Idéer eller konstaterede behov kan indmeldes, så de kan behandles, hvis ressourcer og/eller interesserede studerende kan skaffes til opgaverne.

Undersøgelsen af sådanne nye ideer og teknologiske koncepter går i første række på, om de overhovedet vil virke, og dertil om de er nye, eller om der allerede er lavet et forsknings- og udviklingsarbejde på dem, som kan bibringe en viden om, hvorvidt de vil være relevante at gå videre med.

Sådanne tiltag undersøges typisk ud fra en lang række brugskrav og konstruktive muligheder i bachelor- og kandidatprojekter, hvor både litteraturstudier samt teoretiske og eksperimentelle undersøgelser vil være relevante.

6. Referencer

1. Teknologifondens hjemmeside:
http://innovationsfonden.dk/sites/default/files/technology_readiness_levels_-_trl.pdf.
2. Brundtland, Gro Harlem. World Commission on Environment and Development. Our Common Future. Oxford: Oxford University Press. p. 27. ISBN 019282080X. s.l. : Oxford: Oxford University Press. p. 27. ISBN 019282080X, 1987.
3. Justness, Harald. Principles of making cement with reduced CO2 emission. State of the art. s.l. : SINTEF, https://www.sintef.no/globalassets/sintef-byggforsk/coin/sintef-reports/sbf-bk-a07019_principles-of-making-cement-with-reduced-co2-emission.pdf, 2007.
4. Aether – Demonstration of the reduction of CO2 emissions from the production of an innovative class of cements. s.l. : LIFE 09 ENV/FR/000595, http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3718&doc, 2010.
5. Damtoft, Jesper Sand. Aalborg Portland-offensiv for markant reduktion af CO2-udslip. s.l. : <http://www.aalborgportland.dk/default.aspx?m=4&i=452&pr=1&pi=1> , 2009.
6. Andersen, Kasper Brøndgaard. Cement-klinker med ler skal banke CO2-udslippet i bund. s.l. : Ingeniøren, 3 Juni 2010, <https://ing.dk/artikel/cement-klinker-med-ler-skal-banke-CO2-udslippet-i-bund-109339>, 2010.
7. Grøn Beton. Center for Grøn beton, hvor projektet Grøn Beton II arbejder med udvikling af grønnere betoner i 2014-2018. s.l. : Teknologisk Institut, www.groenbeton.dk.
8. Nielsen, Henrik. www.vejdirektoratet.dk. [Online] 2002. [Citeret: 29. 06 2017.] Henrik Nielsen: http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/statens-veje/vejenes_historie/Documents/Midtjyske_Motorvej/Grøn_betonbro_ved_Tørring.pdf.
9. Vejdirektoratet. Grøn beton gør bro miljøvenlig. s.l. : Vejdirektoratet, <http://www.vejdirektoratet.dk/DA/vejprojekter/holstebro-herning/nyheder/Sider/Gr%C3%B8n-beton-g%C3%B8r-bro-milj%C3%B8venlig.aspx>, 2-11-2015.
10. DS/EN 12602 +A1:2013. Standard for Præfabrikerede armerede komponenter af autoklaveret porebeton. s.l. : Dansk Standard, 2013.
11. Munch-Petersen, Gitte Normann. Proportionering, Betonhåndbogen, kapitel 6 . s.l. : Dansk Betonforening, http://betonhaandbogen.dk/media/bogen/kap_6.0_proportionering_27112013.pdf, 2013.
12. Trine Henriksen, Lise Juel-Hansen og Dorthe Mathiesen. Udredning af teknologiske muligheder for at genbruge og genanvende beton. s.l. : Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 1667, <http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2015/maj/genbrug-af-beton/>, 2015.
13. Bagger, A. og Hertz K.D. CO2 emissions from Super-light Structures. s.l. : IABSE-IASS conference, London, 2011.
14. Andersen, S. The accumulated energy consume for building materials . s.l. : DTU Byg, PhD Report 134, 1979.
15. Guide to PAS 2050. s.l. : Crown 2008 and Carbon Trust 2008.
16. Buildings and Climate Change. s.l. : United Nations Environment Programme, 2007.
17. V., Penttala. Concrete and Sustainable Development. s.l. : ACI Materials Journal, Vol.94, Issue 5, pp. 409-416., 1997.
18. Alcorn A., Wood P. New Zealand Building Materials Embodied Energy Coefficients Database, Volume II – Coefficients. s.l. : Centre for Building Performance Research, 1998.
19. http://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html.

20. Concrete CO2 Fact Sheet. s.l. : National Ready Mixed Concrete Association: Publication Number 2PCO2, Concrete CO2 Fact Sheet, February 2008, 2008.
21. Kruse, C. Climate Change and the Construction Sector. s.l. : IIGCC Briefing Note (International Investors Group for Climate Change). ISIS Asset .
22. http://ims.eionet.europa.eu/Sectors_and_activities/transport/indicators/TERM27%2C2005.11/Figure2/view . s.l. : European Environmental Agency.
23. Andersen, Ulrik. Genopstanden beton deler vandene. s.l. : Ingeniøren, 11 november 2016.
24. Velbesøgt session på Building Green om kvalitet i genanvendelse af ressourcerne i betonaflald . s.l. : Dakofa, <https://dakofa.dk/element/velbesoegt-session-paa-building-green-om-kvalitet-i-genanvendelse-af-ressourcerne-i-betonaflald/> .
25. Hansen, Erik Krogh Lauritzen og Jette Bjerre. Cirkulær økonomi i byggesektoren – genanvendelse af beton . s.l. : DAKOFA arrangement, Building Green messe 2-3 November 2016 i Forum, <https://dakofa.dk/element/velbesoegt-session-paa-bui>.
26. Affaldsstatistik 2009 og Fremskrivning af affaldsmængder 2011-2050. s.l. : Miljøstyrelsen, <http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2011/dec/affaldsstatistik-2009-og-fremskrivning-af-affaldsmaengder-2011-2050/>, 2009.
27. Annual cement production. s.l. : CemBureau, <http://www.cembureau.be/about-cement/key-facts-figures>, 2015.
28. Worldometers. s.l. : Worldometers, <http://www.worldometers.info/world-population/europe-population/> , 2016.
29. DS/EN 1520:2011. Præfabrikerede armerede elementer af letbeton med lette tilslag og åben struktur med bærende eller ikke-bærende armering. s.l. : Dansk Standard, 2011.
30. Teknisk Ståbi, 23. udgave. s.l. : Nyt Teknisk Forlag, 2015.
31. Sundolit gulvisolering. s.l. : Sundolit, http://www.sundolit.dk/upload_images/069A069E43644A518113F3705862CAC2.pdf, 2006.
32. IQ Therm - den indvendige isolering uden dampspærre. s.l. : Introflex, <http://www.introflex.dk/iq-therm-systembeskrivelse.html>.
33. Foam Concrete, . s.l. : Aercrete, <http://www.aercrete.se/eng/foam6.html>.
34. Sandholdt, Daniel Dysted og Hasse. Experimental and theoretical investigation of Interior insulation of solid brick walls with foam concrete and another silicate based material. s.l. : DTU Byg, 2015.
35. Ytong Multipor indvendig isolering. s.l. : Ytong, http://www.ytong.dk/multipor_innendaemmung_wi.php.
36. LAR 06 Permeabel belægning. s.l. : <http://www.aarhus.dk/~media/Dokumenter/Teknik-og-Miljoe/Natur-og-Miljoe/Vand/Spildevand/LAR/Afledning-af-regnvand/Andet/LAR-06-Permeabel-belaegning-03.pdf>.
37. Lokal håndtering af regnvand med permeable belægninger. s.l. : Dansk Beton, <http://www.danskbeton.dk/files/Servicebutik/Dansk%20Beton%20publikationer%20til%20servicebutikken/Belaegning/Lokal%20haendtering%20af%20regnvand%20med%20permeable%20belaeagninger.pdf>.
38. Lund, Mia. Durability of Materials in Pearl-Chain Bridges. s.l. : DTU Byg, 2016.
39. Moderne betonveje, endelig rapport. s.l. : Vejdirektoratet, http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/736/Endelig%20rapport_Moderne%20betonveje.pdf.

40. Pool, A. Vance. Concrete Parking Areas Aren't White, They're GREEN. s.l. : Concrete In Focus 1 (2005), s. 43-44,
http://www.nrmca.org/news/connections/Spring%7B%5C_%7D2005.pdf.
41. Carpio, Joe Arnaldo Villena Del. Urban pavements used in Brazil: Characterization of solar reflectance and temperature verification in the field. s.l. : Solar Energy 134,
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X16300>, 2016.
42. Saietz, Dorrit. Selvlysende beton kan erstatte gadebelysning. s.l. : Politiken,
<http://politiken.dk/oekonomi/2050/energi/ECE3194883/selvlysende-cement-kan-erstatte-gadebelysning/>.
43. Pilebyg. 240mm kerne - tør pil. s.l. : Pilebyg, http://www.pilebyg.dk/240mm_tør_pil.asp.
44. Støjhegn ved motorvej og vej-tunnel. s.l. : <http://www.al-akustik.dk/stoejhegn-ved-motorvej-og-vej-tunnel/>.
45. Poda terrænmur. s.l. : <http://www.byggebolig.dk/artikel/poda-terraenmur/>.
46. Drænasfalt æder larm fra biler. s.l. : Ingeniøren, <https://ing.dk/artikel/draenasfalt-aeder-larm-fra-biler-8500>.
47. Vands varmfylde. s.l. : Wikipedia,
https://da.wikipedia.org/wiki/Varmekapacitet#Vands_varmefylde.
48. Fordampningsvarme. s.l. : Wikipedia, <https://da.wikipedia.org/wiki/Fordampningsvarme>.
49. Watts, Andrew. GreenWalls, Modern construction handbook. 2. udg. . s.l. : Springer, Wien, NewYork, 2013, s. 390-391, 2013.
50. C. Y. Cheng, Ken K. S. Cheung og L. M. Chu. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. s.l. : Building and Environment 45 (2005), s. 1779-1787.
51. Attributes. s.l. : Staffordshire University,
<http://www.staffs.ac.uk/research/greenwall/attributes/>.
52. Chiquet, Caroline. Birds and the urban environment: the value of green walls. s.l. : Urban Ecosyst 16, s. 453-462. , 2013.
53. Lufttrensede beton afprøvet i hjertet af København. s.l. : Teknologisk Institut,
<http://www.teknologisk.dk/lufttrensede-beton-afprovet-i-hjertet-af-koebenhavn/36392>.
54. Synlig Beton projektgruppe. Smukke betonoverflader - produktion, udførelse og vedligehold. s.l. : Synlig Beton,
http://www.synligbeton.dk/media/pdf_dokumenter/smukke_overflader_produktion.pdf, 2003.
55. Smukke betonoverflader - konstruktivt design. s.l. : Teknologisk Institut % Aalborg Portland,
<http://www.danskbeton.dk/publikationer/%C3%A6stetik/overflader/smukke-betonoverflader-konstruktivt-design/>, 2003.
56. Rhee, K. N., & Kim, K. W. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. s.l. : Building and Environment, 91, 166-190., 2015.
57. Olesen, B. W. Thermo active building systems using building mass to heat and cool. s.l. : Ashrae Journal, 54(2), 44-52., 2012.
58. Hansen, J. O., Jacobsen, T. D., & Weitzmann, P. Det skjulte indeklima. Vvs. 2002.
59. SBI-anvisning 219. Dagslys i rum og bygninger. s.l. : Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, 1. udgave, 2008.
60. Wikimedia. Belysning. s.l. : Wikimedia, <http://energiwiki.dk/index.php/Belysning>.
61. Benedix, R., Dehn, F., Quaas, J., & Orgass, M. Application of titanium dioxide photocatalysis to create self-cleaning building materials. s.l. : Lacer, 5, 157-168, 2000.
62. Sekine, Y., & Nishimura, A. Removal of formaldehyde from indoor air by passive type air-cleaning materials. s.l. : Atmospheric Environment, 35(11), 2001.

63. Knudsen, H. N., Nielsen, P. A., Clausen, P. A., Wilkins, C. K., & Wolkoff, P. Sensory evaluation of emissions from selected building products exposed to ozone. s.l. : Indoor Air, 13(3), 223-231, 2003.
64. Sakr, W., Weschler, C. J., & Fanger, P. O. The impact of sorption on perceived indoor air quality. s.l. : Indoor Air, 16(2), 98-110, 2006.
65. Lamble, S. P., Corsi, R. L., & Morrison, G. C. Ozone deposition velocities, reaction probabilities and product yields for green building materials. s.l. : Atmospheric environment, 45(38), 6965-6972, 2011.
66. Kolarik, J., & Toftum, J. The impact of a photocatalytic paint on indoor air pollutants: sensory assessments. s.l. : Building and Environment, 57, 396-402, 2012.
67. Darling, E. K., Cros, C. J., Wargocki, P., Kolarik, J., Morrison, G. C., & Corsi, R. L. Impacts of a clay plaster on indoor air quality assessed using chemical and sensory measurements. 2012.
68. L.Cremer, M.Heckl, E.E.Unger. Structure-Borne Sound, Second ed. s.l. : Springer-Verlag, 1973.
69. DELTA Test Report, Measurement of Acoustic Properties of lightweight concrete SL-Deck. s.l. : DELTA, 2014.
70. Christensen, J.E. Acoustic Design of Super-light Structures. s.l. : DTU Byg, PhD thesis, 2013.
71. Simmons, C. Ljudisolering i bostadshus byggda 1880-2000. s.l. : Techincal report 0405, FoU-Vä st, Gothenborg, Sweden, 2004.
72. Ventilation, Glent. Håndbog 2. Oplag . s.l. : Glent ventilation, 1970.
73. Acoustics. Acoustic Absorption data. s.l. : Acoustics;
http://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf.
74. Krejcirikova, B., Rode, C., Wargocki, P., Peuhkuri, R. H., & Kolarik, J. ZeroWaste BYG: Hygro-thermal conditions and pollutant emissions from ZeroWaste materials and their effects on humans. Abstract Book-Dtu Sustain Conference 2014. s.l. : Danmarks Tekniske Universitet, 2014.
75. Krejcirikova, B., Kolarik, J., Peuhkuri, R. H., Rode, C. and Wargocki, P. Sensory ratings of emissions from unconventional building materials, Proceedings of Indoor Air 2016, Ghent, Belgium. 2016.
76. Andersen, S. The accumulated energy consume for dwellings, PhD Report 137. s.l. : DTU Byg, 1980.
77. DS/EN 12464-1:2011. Lys og belysning - belysning ved arbejdspladser - Del 1: Indendørs arbejdspladser. s.l. : Dansk Standard, 2011.
78. s.l. :
http://www.danskbeton.dk/files/DanskBeton/Fabriksbeton/Publikationer/Publikationer_billeder/FabriksbetonGruppen_vejledning_2015_net.pdf.

DTU Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Technical University of Denmark

Brovej, Building 118
2800 Kgs. Lyngby
Telephone 45 25 17 00

www.byg.dtu.dk