



TEKNOLOGISK
INSTITUT

FREMTIDENS DIGITALISEREDE OG BÆREDYGTIGE DRIFT OG VEDLIGEHOLD

ROADMAP TIL LÆNGERE LEVETIDER FOR BYGGERI-
OG ANLÆGSKONSTRUKTIONER



Indhold

INTRODUKTION	3
DIGITALISERING I BYGGE- OG ANLÆGSBRANCHEN	5
TIDLIGERE UNDERSØGELSER	6
INTERVIEWS MED BRANCHEN	8
DIGITALE TEKNOLOGIER TIL DRIFT OG VEDLIGEHOLD	11
DATAINDSAMLING	12
DATAHÅNDBYGGING	14
DATAANALYSE	15
NEDBRYDNINGSMEKANISMER, SKADER OG DIGITALISERING	17
FYSISK NEDBRYDNING - FROST TØ	18
FYSISK NEDBRYDNING - TEMPERATUR-/ VOLUMENÆNDRINGER	19
FYSISK NEDBRYDNING - FUGT / VOLUMENÆNDRINGER	20
KEMISK NEDBRYDNING - ALKALIKIESELREAKTIONER	21
ELEKTROKEMISK NEDBRYDNING - KORROSION	22
CASE: EKSPONERINGSSITE RØDBYHAVN	23
STATISK OG DYNAMISK NEDBRYDNING	24
CASE: LEVETIDSFORLÆNGELSE AF BRØNDBY STADION	25
BIOLOGISK NEDBRYDNING - SVAMP OG RÅD	26
CASE: FUNGAI	27
INDSATSER	29
#01 EKSPONERINGSSITES TIL FREMTIDENS GENERATIONER	30
#02 MERE INTELLIGENT MONITORERING	31
#03 STRATEGI FOR DATA, STRUKTURERING OG STANDARDISERING	32
#04 UDNYTTELSE AF AI-VÆRKTØJER TIL OPTIMERING AF DRIFT OG VEDLIGEHOLD	33
#05 DEMONSTRATIONSPROJEKTER OG FORMIDLING	34
#06 FORSKNING- OG UDVIKLINGSPROJEKTER OG INTERNATIONALT SAMARBEJDE	35
#07 KOMPETENCEOPBYGNING	36
#08 NYE INVESTERINGS- OG SAMARBEJDSFORMER	37
#09 INNOVATIONSHUB OG TDU-FACILITETER	38

PUBLIKATIONEN ER UDARBEJDET AF

Teknologisk Institut i forbindelse med projektet "Digitale teknologier til bæredygtig drift og vedligehold af bygninger og anlægskonstruktioner" støttet af Uddannelses- og Forskningsministeriet.

FORFATTERE

Ricardo Antonio Barbosa
Peter Bisgaard Andersen
Søren Lundsted Poulsen
Thomas Juul Andersen

FOTOS

Teknologisk Institut medmindre angivet på hver enkelt foto.

UDGIVELSE

Maj 2024

Introduktion

Med 80 % af Danmarks samlede nationalformue på 6.200 milliarder kroner bundet i det byggede miljø i form af bygninger og anlæg, er det indlysende, at vi skal sørge for at drifte og vedligeholde disse, så værdien fastholdes. Set ud fra et klimaperspektiv er der endvidere indlejret store mængder CO₂ i opførelsen af disse bygninger og anlæg, hvorfor det er vigtigt, at vi kan sikre maksimale levetidsforlængelser, så vi kan spare klimaet for nye CO₂-udledninger og anvendelse af sparsomme ressourcer forbundet med nybyg. Behovet for at passe på vores bygninger og anlæg bakkes op af nye rapporter fra både Rambøll [2020] og BUILD [2022], som peger på, at renovering frem for nybyg stort set altid giver en lavere CO₂-udledning.

Nærværende Roadmap er udfærdiget som en del af projektet "Digitale teknologier til bæredygtig drift og vedligehold af bygninger og anlægskonstruktioner", der indgår som en del af en større resultatkontrakt mellem Forsknings- og Undervisningsministeriet og Teknologisk Institut. Formålet med roadmappen er vise vejen for, hvordan digitale teknologier kan hjælpe med at sikre længere levetider for vores byggerier og anlægskonstruktioner.

En af nøglerne til at sikre længere levetider er at kunne opdage skader i tide, så der bliver mulighed for at sætte ind med rettidigt og forebyggende vedligehold, inden skaderne udvikler sig til uoprettelige og levetidsforkortende skader. Med fremtidens digitale værktøjer til drift og vedligehold, herunder værktøjer baseret på kunstig intelligens, opstår muligheder for at opdage, at visse skademekanismer er gået i gang, inden de kommer til udtryk som synlige skader. Det er særlig her, at det store potentiale ligger for fremtidens digitaliserede drift og vedligehold. Drift og vedligehold er et vidt begreb, som dækker over mange forhold i et byggeri eller en anlægskonstruktions levetid. I denne Roadmap fokuseres udelukkende på beton,

armeringsstål, tegl, træ, asfalt som udgør en stor del af konstruktionerne i byggeri og anlæg.

Roadmappen er opbygget af fire hovedafsnit. I afsnittet: "Digitalisering i bygge- og anlægsbranchen" tages en temperatur på bygge- og anlægsbranchens brug af digitalisering til drift og vedligehold. Afsnittet er blandt andet baseret på interviews med et bredt udsnit af aktører fra branchens værdikæde. I afsnittet: "Digitale teknologier til drift og vedligehold" gennemgås udvalgte digitale teknologier, som enten er i anvendelse i dag eller har et potentiale for anvendelse indenfor drift og vedligehold. I afsnittet: "Nedbrydningsmekanismer, skader og digitalisering" kobles de udvalgte teknologier med konkrete nedbrydningsmekanismer og skader med henblik på at afdække teknologiernes potentiale for at forlænge levetiden for byggeri- og anlægskonstruktioner. Afsnittet er endvidere suppleret med cases, som viser, hvordan nogle af teknologierne allerede er i anvendelse i dag. I afsnittet: "Indsatser" præsenteres ni konkrete forslag til indsatser, der skal fungere som anbefalinger til en samlet byggeri- og anlægsbranche med henblik på at bringe flere digitale teknologier i anvendelse for at forlænge levetiden for bygge- og anlægskonstruktioner.

Roadmappen henvender sig til alle led i bygge- og anlægsbranchens værdikæde, dog med særlig fokus på bygherrer og bygningsejere, som har det overordnede ansvar for vores bygge- og anlægskonstruktioner, samt rådgiverne som typisk står for undersøgelserne af de eksisterende byggerier og anlægskonstruktioner.

Tak til alle som har bidraget i processen, herunder virksomheder og institutioner som har kommenteret på Bedreinnovation.dk, deltaget i specifikke interviews i forbindelse med tilblivelsen af denne Roadmap samt bidraget med gode kommentarer og diskussioner ved Advisory Board møder.



DIGITALISERING I BYGGE- OG ANLÆGSBRANCHEN

Hvor står den danske bygge- og anlægsbranchen pt. med hensyn til at bringe digitale teknologier i spil, når det gælder drift og vedligehold af bygnings- og anlægskonstruktioner? For at belyse dette spørgsmål – og derved skabe et godt udgangspunkt for udarbejdelsen af nærværende roadmap – har Teknologisk Institut været i dialog med udvalgte nøglepersoner, som repræsenterer et bredt udsnit af bygge- og anlægsbranchens værdikæde. Det er blandt andet sket gennem interviews. Derudover har det indledende arbejde med roadmappen også omfattet en gennemgang af relevante publikationer fra litteraturen, som på forskellig vis har fokus på digitalisering af byggeriet.

Forud for indgåelsen af projektet, som nærværende roadmap er en del af, har branchens aktører via hjemmesiden www.bedreinnovation.dk kunne kommentere på projektforslaget. Disse kommentarer er ligeledes blevet gransket som et led i analysen af, hvor branchen står i dag i forhold til implementeringen af digitale teknologier til drift og vedligehold af bygnings- og anlægskonstruktioner.

I det følgende opsummeres inputtet fra branchen.

De perspektiver og udfordringer, som er knyttet til digitalisering i bygge- og anlægsbranchen, er tidligere blevet undersøgt og belyst i en lang række forskellige publikationer. En gennemgående pointe i litteraturen er, at anvendelse af digitale teknologier vil kunne bidrage væsentligt til at takle de produktivets- og klimaudfordringer, som branchen står overfor. Samtidig fremhæves det generelt, at graden af digitalisering i branchen er lav i sammenligning med de fleste andre brancher (Transport-, Bygnings-, og Boligministeriet, 2019).

På baggrund af en litteraturgennemgang peges der i rapporten "Projekt ConTech – Litteraturreview" (Industriens Fond, Realdania og Molio, 2020) på fem hovedudfordringer, der hæmmer branchens brug af digitale teknologier. Det drejer sig om:

1. En fragmenteret værdikæde

I litteraturen fremhæves det forhold, at værdikæden i branchen er fragmenteret som én af de væsentligste årsager til produktivetsudfordringer og den lave digitaliseringsgrad. Fx er projekterings-, udførelses- og driftsfasen kendetegnet ved at være meget afkoblede fra hinanden. Det medfører brudte kommunikationsstrømme, manglende overlevering og manglende opsamling af data på tværs. Dette er en kilde til misforståelser og forsinkelser.

2. Forskellige grader af digital modenhed på tværs af værdikæden

Det er i særlig grad aktører i den udførende fase og bygherrer, der ikke er så langt med hensyn til digitalisering, mens aktører i projekteringsfasen er mere tilbøjelige til at anvende digitale teknologier. Fx påpeger litteraturen, at mange bygherrer ikke har de nødvendige kompetencer til at tilrettelægge et udbud med stor fokus på digitalisering (Deloitte, 2018). Det er en stor barriere for øget digitalisering, da bygherren som den betalende part er den aktør, der har mulighed for at definere krav og rammer for anvendelse af digitale løsninger i de enkelte projekter. Potentielt vil bygherrerne gennem sådanne krav og rammer kunne bidrage til at opnå en mindre fragmenteret værdikæde mht. anvendelsen af digitale løsninger.

3. Mange små virksomheder

Branchen er blandt andet karakteriseret ved et meget stort antal af små virksomheder. Ifølge Dansk Byggeri har 65% af denne brancheorganisations 5.700 medlemsvirksomheder fem ansatte eller mindre, og netop de små virksomheder er generelt mindre digitalt modne end de større virksomheder. En væsentlig årsag er, at de små virksomheder har færre muligheder for at investere i nye digitale teknologier (OECD 2019; Erhvervsministeriet 2019).

4. Nye – og mange – konstellationer på projekterne

Det er kendetegnende for branchen, at der er nye samarbejdskonstellationer på hvert enkelt projekt med mange forskellige partnere, der har skiftende ansvar. Det bevirker blandt andet, at risikoen for misforståelser øges, at det bliver sværere at opbygge tillid mellem aktørerne, og at det bliver sværere at standardisere processer og produkter, som ellers ville kunne skabe stordriftsfordele (McKinsey, 2018).

5. En økonomisk presset branche

Byggeriet er generelt udfordret af, at overskudsgraden i branchen er meget lav (Deloitte, 2019). Den hårde prismæssige konkurrence for at vinde udbud bevirker blandt andet, at virksomhederne ofte er nødsaget til at byde ind med så lav en pris, at investeringer i ny teknologi vil fjerne hele profitmarginen.



” ...bygherren som den betalende part er den, som har mulighed for at definere krav og rammer for anvendelse af digitale løsninger i de enkelte projekter.

LITTERATUR

- Transport-, Bygnings-, og Boligministeriet (2019): "Strategi for digitalt byggeri"
- Industriens Fond, Realdania, Molio (2020): "Projekt ConTech – Litteraturreview"
- Deloitte (2018): "Global Powers of Construction"
- OECD (2019): "Productivity Growth in the Digital Age"
- Erhvervsministeriet (2019): "Redegørelse om Danmarks digitale vækst"
- McKinsey (2018): "Seizing opportunity in today's construction technology eco system"
- McKinsey (2020): "The next normal in construction"
- MOLIO (2020): "Byggeriets digitale barometer 2020"
- Deloitte (2017): "CIO Insider – Technology budgets: From value preservation to value creation"
- European Construction Sector Observatory (2021), "Digitalisation in the construction sector – Analytical report".
- Teknologisk Institut (2022): "Afdækning af barrierer for anvendelse af digitale løsninger og Smart City-teknologier i bygge- og anlægsbranchen".

INTERVIEWS MED BRANCHEN

Som et led i udarbejdelsen af denne roadmap har Teknologisk Institut gennem en række interviews taget temperaturen på den danske bygge- og anlægsbranche med hensyn til anvendelsen af digitale teknologier til drift og vedligehold af konstruktioner. Det er tilstræbt at interviewe et repræsentativt udvalg af relevante aktører fra hele byggeriets værdikæde. De interviewede aktører har omfattet:

- To entreprenører
- Tre rådgivende ingeniørvirksomheder
- Fire bygherrer/driftsherrer
- Fire teknologileverandører
- Fem brancheorganisationer

Formålet med interviewene har været at skabe et overblik over, hvor branchen pt. står med hensyn til anvendelse af digitale løsninger. I interviewene er der spurgt ind til, hvor den enkelte aktør ser de største udfordringer og barrierer med hensyn til at opnå en øget grad af digitalisering i forbindelse med drift og vedligehold af bygnings- og anlægskonstruktioner, og hvilke initiativer eller udviklingsaktiviteter, der vil kunne bidrage til en mere effektiv implementering af digitale løsninger.

Forud for indgåelse af projektet "Digitale teknologier til bæredygtig drift og vedligehold af bygnings- og anlægskonstruktioner" var det i en periode muligt, via hjemmesiden www.bedreinnovation.dk, at kommentere på projektet. Dermed har personer og virksomheder i bygge- og anlægsbranchen haft mulighed for at påvirke indholdet i projektet. I alt 50 forskellige aktører fra bygge- og anlægsbranchen kommenterede således på projektet forud for igangsættelsen.

Hovedkonklusioner, inklusiv væsentlige pointer omkring barrierer for øget digitalisering og behovet for udviklingsaktiviteter og kompetenceopbygning, fra de gennemførte interviews og kommentarerne på www.bedreinnovation.dk er opsummeret på modstående side. Disse konklusioner udgør således en sammenfatning af synspunkter og input fra bygge- og anlægsbranchen fra perioden 2020 til 2023.



HOVEDKONKLUSIONER FRA BRANCHEN

- Bygge- og anlægsbranchen er generelt bagud mht. implementering af digitale teknologier, fx i forhold til industrien. Det skyldes blandt andet, at branchen er fragmenteret. Der er fx stor forskel på, hvor langt de forskellige aktører er mht. implementering af digitale teknologier. Der er behov for initiativer på tværs af branchen og udvikling af fælles standarder og processer mht. digitale løsninger til drift og vedligehold.
- Byggebranchen har i de seneste år primært fokuseret på implementeringen af digitale løsninger i projekterings- og byggeprocessen. Der er derfor behov for et øget fokus på udvikling af digitale løsninger, som er målrettet den efterfølgende drifts- og vedligeholdelsesfase.
- Det koster mange penge at drive udviklingen, og derfor er den økonomisk pressede branche tilbageholdende med at investere i nye digitale teknologier.
- Flere af de interviewede aktører påpeger, at det er bygherrerne, som primært kan drive udviklingen/ implementeringen af nye digitale teknologier, fx sensorbaserede løsninger til overvågning af konstruktioners tilstand. Der er således behov for, at bygherrerne i forbindelse med udbud i langt højere grad begynder at stille krav om anvendelse af digitale teknologier.
- Det er vigtigt, at alle led i branchens værdikæde kan se værdien i nye digitale løsninger. Det kræver ofte en stor indsats at overbevise kunderne om værdien af at anvende fx sensorbaserede løsninger til overvågning af konstruktioners tilstand. Der er således behov for mere formidling, der kan synliggøre de økonomiske og bæredygtighedsmæssige gevinster, som er knyttet til anvendelsen af nye digitale teknologier.
- Der findes mange gode cases på anvendelse af nye digitale teknologier, men der ligger generelt store udfordringer i forhold til opskalering og integration i eksisterende systemer. Der er generelt behov for at investere ressourcer, hvis de kompetencemæssige og organisatoriske udfordringer med opskaleret implementering af nye teknologier skal løses.
- Et udviklingsmiljø med små korte udviklingsforløb vil kunne bidrage til øget implementering af nye digitale teknologier og stærkere relationer til virksomhederne. Hvis udviklingen skal accelereres, kan der etableres mobile testfaciliteter, fremfor stationære Test-, Demonstrations- og Udviklings-(TDU)faciliteter.
- Teknologileverandørerne mangler generelt domæneviden inden for byggeri og anlæg i forhold til at kunne satse på applikationer inden for denne branche.
- Der er udfordringer med manglende fælles dataformater i byggeriets værdikæde, og derfor er der også et behov for at indføre normer/standarder vedrørende digitalisering, der går på tværs af byggeriets værdikæde.
- Der er behov for udvikling af gode sensorbaserede fjernovervågningsløsninger, som er velegnede til eftermontering på eksisterende konstruktioner.
- Der er generelt et behov for at tilføre BIM-modeller noget mere værdi, fx ved at tilføje real-time data samt data vedrørende bæredygtighed.
- Der ligger et stort og endnu uforløst potentiale for at udnytte AI som et middel til at effektivisere processer vedrørende drift og vedligehold af bygnings- og anlægskonstruktioner. For forløse dette potentiale er der et generelt behov i branchen for at investere i kompetenceopbygning inden for anvendelsen af AI-værktøjer.
- Der er generelt et behov for implementering af fælles dataformater, så forskellige systemer i højere grad bliver i stand til at "tale" sammen. Det er ligeledes behov for udvikling af strategier for, hvorledes data indsamles, lagres og efterfølgende udnyttes. Det er ikke mængden af data, der mangler. Det handler mere om at få defineret, hvilke data, der er relevante, og at få dem bragt i spil i værdiskabende værktøjer.



DIGITALE TEKNOLOGIER TIL DRIFT OG VEDLIGEHOLD

Der findes i dag flere digitale værktøjer, som kan hjælpe til med at få kortlagt skadestyper på forskellige bygge- og anlægskonstruktioner. Disse værktøjer er i nogen grad allerede implementeret i branchen, eksempelvis droner med kamera til kortlægning af skader og sensorer til opsamling af fx fugt- og bevægelsesdata.

En af de spændende teknologier med stort potentiale for fremtiden er udvikling af værktøjer baseret på kunstig intelligens. Der findes i dag prototyper på disse værktøjer, som ikke blot kan kortlægge bygningsdele og skader, men også genkende skadestypen. Næste skridt i udviklingen er at udvide værktøjerne til også at klarlægge omfang og årsag til skaderne ved at kombinere ekspertviden inden for byggematerialer til bygge- og anlægskonstruktioner med dybdegående undersøgelser, som er afgørende for at klarlægge årsagen til skaderne.

I dette afsnit gennemgås de hyppigst anvendte digitale teknologier og termer i forbindelse med drift og vedligehold af byggerier og anlægskonstruktioner. Disse er opdelt i forhold til følgende tre faser:

1. Dataindsamling, hvor digitale værktøjer hjælper med at etablere datagrundlaget for efterfølgende behandling, strukturering og analyse.
2. Datahåndtering, hvor digitale værktøjer hjælper til at håndtere og strukturere data, så det er klargjort til eksempelvis udvikling af værktøjer baseret på kunstig intelligens.
3. Dataanalyse, hvor indsamlet og struktureret data kan anvendes til at lave simuleringer og prognosemodeller eksempelvis baseret på kunstig intelligens.

DATAINDSAMLING

Dataindsamlingsfasen udgør første led i digitalisering af drift og vedligehold af byggeri og anlæg. Det er her at datagrundlaget skabes for efterfølgende behandling, strukturering, visualisering samt analyse med henblik på eksempelvis at udvikle prognosemodeller for at bestemme restlevetiden på en given konstruktion

eller forudse behov for rettidig vedligeholdelse for at forlænge levetiden. Der findes mange forskellige værktøjer til dataindsamling. I det følgende gennemgås nogle af de umiddelbart mest interessante med hensyn til drift og vedligehold af bygge- og anlægskonstruktioner.



BILLEDBASEREDE DATAOPSAMLINGSVÆRKTØJER

Denne kategori omfatter digitalkameraer, 3D-scannere, Matterport mv. Fælles for disse værktøjer er, at de kan producere visuelt baserede data, hvilket er hyppigt anvendte i forhold til registrering i forbindelse med drift og vedligehold. Det er ligeledes den hyppigst anvendte type af data til udvikling af algoritmer baseret på kunstig intelligens til eksempelvis skadesgenkendelse.



Foto: ShareGrid/Unsplash



INTERNET OF THINGS (IOT)

Begrebet Internet of Things (IoT) dækker over et netværk af sensorer - indbygget i eksempelvis bygningsdele - som alle er forbundet til internettet og kan sende data til "skyen".

Den store gevinst ligger især i, at der dynamisk skabes en stor mængde data, som kan udgøre grundlaget for diverse AI-baserede systemer - og som dynamisk kan sende data tilbage til de forbundne enheder, så de udgør en samlet dynamisk enhed.



Foto: NASA/Unsplash



DIGITALE INSPEKTIONSVÆRKTØJER

Digitale inspektionsværktøjer dækker over specialudstyr, som kan "se" ind i konstruktionen ved hjælp af radiobølger, ultralyd, sensorer mv. Disse omtales typisk som NDT-udstyr (non-destruction-testing) og anvendes eksempelvis til at måle fugt, lokalisere defekter, vurdere tilstand af ikke-synlige konstruktionselementer mv.





SENSORER

I de senere år er anvendelse af sensorer steget markant i bygge- og anlægssektoren. Forskellige typer af sensorer giver mulighed for en løbende og automatisk opsamling af data vedrørende bygninger og konstruktioners tilstand, bl.a. gennem brugen af trådløs IoT-teknologi til transmission af data.

De informationer, som opsamles ved hjælp af sensorteknologi giver bl.a. bygherren langt bedre mulighed for at optimere strategien for drift, eftersyn og vedhold for bygninger og anlægskonstruktioner i driftsfasen. Implementering af sensorløsninger er således forbundet med potentielle gevinster i form af reducerede udgifter til drift og vedligehold af bygnings- og anlægskonstruktioner, CO₂-besparelser samt reduceret ressource- og energiforbrug.



SPECIALISERET KAMERATEKNOLOGI

Modsat traditionelle kameraer kan specialiserede kameraer lave en gengivelse af det fotograferede som ikke er synligt med det blotte øje. Eksempler på denne type kameraer er termografikamera (visuel gengivelse af temperatur) og hyperspektralkamera (visuel gengivelse af information fra hele det elektromagnetiske spektrum). Termografikamera har været anvendt i bygge- og anlægsbranchen i mange år, men gennem de senere år koblet på andre digitale værktøjer. Hvor hyperspektralkamera ikke endnu er specielt udbredt i bygge- og anlægsbranchen, men i forskellige andre brancher hvor farvegenkendelse kan anvendes til vurdering af fx kvaliteten af afgrøder.



ROBOTTER OG DRONER

Robotter og droner er i sig selv ikke værktøjer, som kan opsamle data, men er derimod afhængig af, hvilket digitalt dataopsamlingsværktøj der er påmonteret. Når de alligevel medtages her, er det fordi droner og robotter har skabt nye muligheder for at indsamle data fra svært tilgængelige konstruktioner, og de anvendes derfor i stigende grad til tilstandsundersøgelser af eksempelvis etagehuse, tårne, broer mv.



DATAHÅNDTERING

Data indsamlet gennem diverse dataindsamlingsværktøjer skal håndteres, før de kan anvendes til meningsfyldte, visuelle gengivelser eller som grundlag for værktøjer baseret på kunstig intelligens. Værktøjer

til datahåndtering er således værktøjer, som kan strukturere data, så det er forberedt til en visuel gengivelse eller udvikling af værktøjer baseret på AI.



BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM)

BIM er en metode til at digitalisere byggeprocessen, igennem hele byggeriets livscyklus, fra ide til nedrivning og genanvendelse. Omdrejningspunktet er en digital 3D-model af bygningen/anlægsstrukturen, som indeholder information om geometri og materialer for hver konstruktionsdel, herunder tillægsinformationer som vægt, pris, producent, klimaaftryk, forventet levetid mv. 3D-modellen kan også betegnes som en digital tvilling. Tilføjes data fra sensorer vil den digitale tvilling vise et online og visuelt billede af bygningen. Tilføjes der også materiale- og indeklimatemodeller kan disse i kombination med de indlagte materialedata og data fra sensorerne bruges til at forudse behov for vedligehold for optimalt indeklima og vedligeholdelse. Den digitale tvilling skal løbende opdateres ved vedligehold og ombygninger og vil med fordel kunne bruges til at gemme data fra udførte tilstandsundersøgelser. Disse vil kunne indgå som parametre i de indlagte modeller og dermed bidrage til en yderligere præcision i forudsigelserne omkring indeklima og vedligehold.



DASHBOARDS

Dashboards kan strukturere og vise data på en overskuelig måde. Data vil typisk dynamisk blive sendt fra sensorer fra den pågældende bygning/konstruktion og gengivet i en behandlet version til et let forståeligt overblik.



VIRTUAL REALITY (VR) OG AUGMENTED REALITY (AR)

Teknologier som via briller kan gengive en virtuel 3D-model rumligt - enten fuldt virtuelt (VR) eller som en kombination af et virtuelt og fysisk rum (AR). Teknologierne gør det muligt at få lokationsbestemt information præsenteret på de steder hvor informationen giver mening fx rumtemperaturen når de er i rummet. Særligt AR teknologien vurderes at vinde frem og den ses allerede inden for oplæring og træning af medarbejdere.



DATABASER

Databaser er en digital løsning til at strukturere og gemme store mængder data, så det nemt kan genfindes samt anvendes til eksempelvis udvikling af værktøjer baseret på kunstig intelligens. Der findes forskellige databaser som hver har deres force og ofte har deres egen måde at strukturere og organisere data. Dette gør, at det kan opleves udfordrende og ofte kræver IT-eksperter for at tilgå data i databaser. Databaser har været kendt og brugt i mange år og indgår ofte som datalager i diverse IoT- og sensorsystemer. Skal man have fri og nem adgang til data, er dette en parameter, som tages med i valget af system og udstyr.

DATAANALYSE

Der indsamles store mængder af data i byggeriet. Ofte er det dog uklart, hvordan disse data skal anvendes fremadrettet. Når det handler om vores bygge- og anlægskonstruktioner, kan data indsamlet via sensorer, registreringer og tilstandsundersøgelser være yderst værdifulde i forhold til at indhente erfaringer og ny viden om konstruktionernes ældning, nedbrydning og forventet levetid.



KUNSTIG INTELLIGENS (AI)

Kunstig intelligens er en teknologi, der gør computere i stand til at foretage valg eller bestemme eller kategoriserer ting, som den ikke har set før, og der få det til at se ud som om en computer har intelligens. Mere korrekt er det nok at sige, at det er en nemmere og praktisk måde at lave store, avanceret og kompliceret modeller baseret på et repræsentativt datagrundlag. Når der indsamles større datamængder, kan disse data derfor anvendes til at udvikle værktøjer baseret på kunstig intelligens. Denne type værktøjer kan eksempelvis anvendes til at bestemme, hvilken skadestype der er ved at udvikle sig for en given konstruktion og fx fremskrive denne. Dette er der eksempler på hvor betonskader fx kan bestemmes og kategoriseres ud fra dronebilleder. Udvikling af værktøjer baseret på kunstig intelligens, baserer sig på et databaseret træningsforløb af den kunstige intelligens. Her anvendes begreber som machine learning og deep learning, som begge baserer sig på, at en kunstig intelligens trænes i at genkende strukturer og sammenhænge i data. Kvaliteten af det udviklede værktøj er i høj grad afhængig af kvalitet af de data, kombineret med faglig viden omkring materialer og bygningsvurdering som anvendes til oplæringen af modellen.

En af de helt store anvendelsesmuligheder er udviklingen af værktøjer baseret på kunstig intelligens. Disse værktøjer er afhængige af begge de foregående trin, dvs. indsamling af data (målrettede kvalitetsdata) samt håndtering og strukturering af data så de fremstår ensartede.



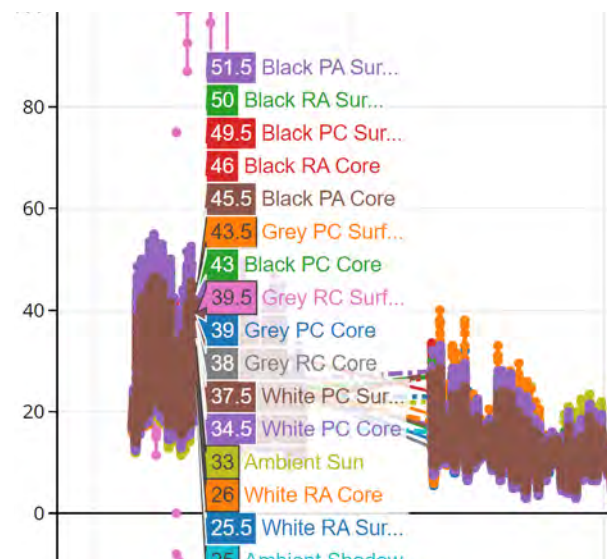
PROGNOSEMODELLERING

Når der tales om prognosemodeller inden for byggeri og anlæg, er der typisk tale om levetidsbestemmelser. En levetidsbestemmelse for en konstruktion kan både basere sig på antagelser, erfaringer, beregninger samt avancerede prognoser baseret på kunstig intelligens.



SIMULERING

Simuleringer anvendes typisk for at afprøve udfaldet af et eller flere scenarier, eksempelvis udviklingen af en skademekanisme på en given konstruktion, ved fremskrivning af forskellige scenarier for klimaet.



CONCRETE SPALLING

CLASS 3

LAT 55.6945515472
LON 12.562571058
ALT 101.335853207



CO

NEDBRYDNINGSMEKANISMER, SKADER OG DIGITALISERING

Materialer i bygge- og anlægskonstruktioner bliver med tiden nedbrudt som følge af klimapåvirkninger, slitage mv. I det tidlige skadesbillede vil nedbrydningen typisk ikke være synlig i overfladen, men vil opstå i mikroskala eller under overfladen, og være en bagvedliggende nedbrydningsmekanisme, som med tiden vil føre til synlige skader som revner, afskalninger, deformationer og i værste fald kollaps af konstruktionsdele. Med fremtidens ændrede klimapåvirkninger forventes det, at nogle nedbrydningsmekanismer vil opstå hyppigere og hurtigere, mens andre vil blive mere sjældne. Eksempelvis forventes flere skader forårsaget af fugtigere vejr, mens der forventes færre skader forårsaget af frost-tø perioder.

Det er typisk først når nedbrydningsmekanismerne viser sig som synlige skader, at der sættes ind med en tilstandsundersøgelse og efterfølgende reparation. Men det store potentiale ligger naturligvis i, at kunne registrere en igangsat nedbrydningsmekanisme på et tidligt tidspunkt, hvor der vil være mulighed for at sætte ind med rettidig vedligehold, og der igennem nedbringe materialeforbruget.

Digitale værktøjer har potentiale til at kunne give nogle tidlige indikationer på en igangsat nedbrydningsmekanisme. Dette kræver dog indgående kendskab til konstruktionsmaterialers nedbrydningsmekanismer og typiske skadesbilleder, for at værktøjerne kan indfri potentialet.

I dette afsnit gennemgås de hyppigste nedbrydningsmekanismer og skader for de mest almindelige materialer (beton, tegl, mørtel, træ, asfalt, armeringsstål og natursten) til byggeri og anlægskonstruktioner (facader, vægge, søjler, dæk, bjælker, veje, broer, tunneler mv.). Hertil kommer en vurdering af, hvilke digitale værktøjer som kan hjælpe til med at forlænge levetiden på konstruktionerne ved tidligere at opdage begyndende skader og dermed få mulighed for at sætte ind med rettidigt vedligehold. Afsnittet bygger på viden fra litteraturen samt Teknologisk Instituts ekspertviden indenfor skader og nedbrydningsmekanismer for de omtalte byggematerialer.

FYSISK NEDBRYDNING

FROST TØ

Når flydende vand fryser til is, udvider det sig ca. 9 %. Hvis et materiales porer er helt fyldte med vand, vil volumenforøgelsen kunne forårsage sprængning, forvitring eller revner i materialet.

Konstruktionsmaterialer

Beton, natursten, murværk (mursten og mørtelfuger), asfalt.

Synlige skader

Afskalninger, revner, delamineringer, springere, forvittringer.

Skadesmekanismer

For beton, frostfølsomme natursten, murværk og asfalt kan frost/tø-påvirkninger give skader forårsaget af frysning af frit vand i vandfyldte porer, i vandfyldte revner eller i vandholdige porøse korn i tilslaget.

Frostskader i betonkonstruktioner kan forekomme som synlige skader i form af revnedannelser, afskalninger, forvittringer og springere over porøse tilslagskorn. Frostskader kan ligeledes fremstå som indre delamineringer i konstruktioner.

For frostfølsomme natursten, kalksten, skifer og sandsten, kan frostskader forværres, når stenen udsættes for salt. Revnerne er ikke nødvendigvis synlige for det blotte øje, og kan forekomme som fine revner i stenens indre. Skaderne kan ses som synlige revner og forvittringer.

For murværk kan gentagne frost/tø-episoder i perioder med høj fugtindhold i materialerne forårsage revner først i mikroskala, som ikke er synlige for det blotte øje, og senere større revner og afskalninger. Der er generelt en øget risiko for skadesdannelse i perioden før mørtlen er færdighærdet og i områder med konstruktive fejl som forårsager øget vandpåvirkning, fx ved utætte nedløbsrør. Frostskader ses også ofte i ældre murværk efter udførelse af hulmursisolering, da isoleringen resulterer i at murværket ikke længere modtager varme inde fra bygningen og derfor bliver koldere og udsættes for flere frost/tø-episoder end tidligere.

For asfalt kan en frost/tø-påvirkning skabe mikrorevner i asfalten, som bryder bindingerne i asfalten. Revnerne vil typisk ikke være synlige i starten, men vil bane vej for at mere vand i fremtiden kan påvirke belægningen og derved øge revnerne.

Digitale løsninger

Billedbaserede dataopsamlingsværktøjer kan muliggøre registrering af synlige skader forårsaget af frost/tø-påvirkninger. For svært tilgængelige konstruktionsdele kan de billedbaserede værktøjer kobles til droner eller robotter. Værktøjer baseret på kunstig intelligens kan anvendes til detektering af hvilken skadestype, der er ved at udvikle sig, og med sensorer kan skadesmekanismen potentielt klarlægges og udviklingen fremskrives. 3D-modeller, baseret på fotogrammetri, bidrager til systematisk overblik over skaderne og kan anvendes til at bestemme skadesomfanget samt til planlægning af vedligeholdelsesplaner og budgetter.

Fugt- og temperaturmålere, indbygget i forskellige materialer, muliggør løbende opsamling af data vedrørende skiftende fugt- og temperaturpåvirkninger i materialet. Indbygningen af fugtmålere på kritiske og udsatte områder på konstruktionen, vil kunne alarmere om risikoen for fugtrelaterede skader, og potentielt være med til at forhindre udvikling af eller forværringen af eksisterende skader. Måledata kan desuden anvendes til at skabe bedre korrelation mellem accelererede laborietests og felteksponerede konstruktioner. Baseret på specialistviden indbygges fugtmålere i kritiske og udsatte områder i konstruktionselementet.



FYSISK NEDBRYDNING TEMPERATUR-/ VOLUMENÆNDRINGER

Alle materialer ændrer volumen, når de udsættes for temperaturændringer. Disse temperaturændringer kan skabe betydelige volumenændringer/længdeforøgelse eller formindskelse, der kan give alvorlige skader i konstruktionen.

Konstruktionsmaterialer

Beton, natursten, murværk (mursten og mørtelfuger), asfalt.

Synlige skader

Afskalninger, revner, deformationer.

Skadesmekanismer

Som de fleste andre materialer, udvides beton med øget temperatur. I konstruktioner med relativ stor udbredelse og uden dilatationsfuger, kan varmeudvidelse forårsage revner i tværsnittet eller revner og afskalninger på/ ved tilstødende konstruktioner. Tilsvarende kan beton svinde og skabe kraftige revner i konstruktionen. Revnerne skaber adgang for fugt, klorider samt større karboniseringsdybde.

Tilsvarende for murværk, er en af årsagerne til forekomst af konstruktive revner, fejlagtig placering af dilatationsfuger. For ældre murværk ses nogle gange revnedannelser efter omfugning med en mørtel som er meget stærkere end opmuringsmørtlen. Revnedannelserne forekommer oftest i kontaktzonen mellem den stærke omfugningsmørtel og både mursten og opmuringsmørtel. Revnedannelserne kan senere resultere i udfaldene fuger.

For natursten (visse marmor- og kalkstenstyper) kan temperaturvariationer (positive temperaturer) i kombination med fugt skabe irreversible ekspansioner og deformationer. Bøjning af marmor er den mest iøjnefaldende nedbrydning, men med bøjning følger permanente længdeændringer og potentielle afskalninger samt revner pga. manglende bevægelsesmuligheder. Den mest alvorlig nedbrydning er dog, at marmor kan tabe styrke i en sådan grad, at stenen mister sin sammenhængsstyrke og i sidste ende smuldrer.

Asfalt er et visco-elastisk materiale, som ændrer egenskaber med temperatur og frekvens. Ved lave temperaturer bliver materialet mere stift og mister sin fleksibilitet. Over materialets levetid vil disse egenskaber også ændre sig, typisk ved at materialets

stivhed øges og at det mister sin fleksibilitet. Over vinteren kan dette betyde at der vil være risiko for at undersiden af asfalten ikke kan optage de tøjninger og udvidelser som den udsættes for, og derved danne revner. Disse revner opstår i bunden af materialet og kan derfor ikke ses inden revnen slår igennem.

Digitale løsninger

Der skal først og fremmest tages hensyn til forhold vedr. temperaturbetingede volumenændringer (længdeforøgelse eller -formindskelse) under design og projektering af konstruktioner. Avancerede modeller kan fx anvendes til at klarlægge risikoen for temperaturbetingede skader i konstruktionen. For murværk, hvor det gældende regelsæt ikke er fyldestgørende, kan der potentielt udvikles nye beregnings- og simuleringsværktøjer til at understøtte placeringen af dilatationsfuger.

Billedbaserede dataopsamlingsværktøjer kan muliggøre registreringen af synlige skader forårsaget af temperaturrelaterede volumenændringer. Værktøjer baseret på kunstig intelligens kan anvendes til detektering af hvilken skadestype, der er ved at udvikle sig, og med sensorer kan skadesmekanismen potentielt klarlægges og udviklingen fremskrives. For svært tilgængelige konstruktionsdele kan de billedbaserede værktøjer kobles til droner eller robotter. Flytnings- og temperaturmålere eller billedbaserede dataopsamlingsværktøjer (fx Digital Image Correlation), kan følge materialets og konstruktionens deformationer over tid, og derved skabe overblik over hvor de største volumenændringer forekommer.

For marmorfacader kan laserscanknologier kvantificere udbøjningen af pladerne og klarlægge hvorvidt, der er risiko for nedstyrtning af monterede facadeplader. Data fra eftermonterede flytnings-, fugt- og temperaturmålere kan bidrage til udviklingen af nye nedbrydnings- og levetidsmodeller, og skabe grundlaget for en bedre korrelation mellem accelererede laborietests og felteksponerede facadeplader.

FYSISK NEDBRYDNING

FUGT / VOLUMENÆNDRINGER

Porøse materialer udvider sig under optagelse af fugt (svelning). Omvendt trækker porøse materialer sig sammen, når de afgiver fugt (svind). Ændringerne er størst i finporøse materialer som beton og træ og mindre i grovporøse materialer som tegl.

Konstruktionsmaterialer

Beton og træ.

Synlige skader

Revner, sprækker, deformationer.

Skademechanismer

For beton og træ kan svind (volumenformindskelse) give anledning til kraftige revner. I perioden fra betonens udstøbning, til hærdet beton, der er i fugtligvægt med omgivelserne, sker der volumenændringer, først og fremmest svind og i få tilfælde svelning (volumenforøgelse). Der kan ved udtørring, svind, forekomme kraftige revner i betonen.

For træ kan fugtbetingede volumenændringer give anledning til skader. Svindet kan forårsage revner i materialet og sprækker mellem bygningsdele. Svelning

kan fx forårsage deformationer (volumenforøgelse) af trægulve (opbukning) og forårsage at vinduer og døre som binder.

Digitale løsninger

Der skal først og fremmest tages hensyn til forhold vedr. fugtbetingede volumenændringer (volumenformindskelse eller volumenforøgelse) under design og projektering.

Billedbaserede dataopsamlingsværktøjer kan muliggøre registrering af synlige skader forårsaget af fugtbetingede volumenændringer. Værktøjer baseret på kunstig intelligens kan anvendes til detektering af hvilken skadestype, der er ved at udvikle sig, og med sensorer kan skademechanismen potentielt klarlægges og udviklingen fremskrives. For svært tilgængelige konstruktionsdele kan de billedbaserede værktøjer kobles til droner eller robotter. Flytnings- temperatur og fugtmålere eller billedbaserede dataopsamlingsværktøjer (fx Digital Image Correlation) kan følge materialets og konstruktionens deformation over tid, og derved skabe overblik over, hvor de største deformationer forekommer.

KEMISK NEDBRYDNING

ALKALIKIESELREAKTIONER

Alkalikieselreaktioner opstår, når sand og/eller stentilslaget ikke er stabile i det basiske miljø i betonen.

Konstruktionsmaterialer

Beton.

Synlige skader

Revner, afskalninger.

Skademechanismer

Alkalikieselreaktioner (AKR) er reaktioner mellem porøse kiselholdige bjergarter i tilslaget og alkalier i betonens porevæske. Vand er en nødvendig forudsætning for en skadelig udvikling af alkalikieselreaktioner. Reaktionerne er potentielt ekspansive, hvilket kan resultere i ydre og indre revner. Mængden af reaktivt materiale, der i dansk tilslag, typisk er porøse sandkorn af flint, er afgørende for risikoen for skadevoldende AKR i Danmark. Det er ikke unormalt at se skader i forbindelse med overkorn i sandet, og i sjældne tilfælde forekommer skadelige reaktioner endda i stentilslaget. AKR-skader ses typisk på konstruktioner, der er opført før ibrugtagning af Basisbetonbeskrivelsen fra 1986.

Digitale løsninger

Ligesom ved andre synlige skader, kan billedbaserede dataopsamlingsværktøjer muliggøre registreringerne,

og koblet til droner og robotter kan registreringerne automatiseres. Værktøjer, baseret på kunstig intelligens, kan anvendes til detektering af hvilken skadestype, der er ved at udvikle sig på konstruktionens overflade, og med indbyggede eller eftermonterede sensorer, kan skademechanismen potentielt klarlægges og udviklingen fremskrives. Ved kobling af historiske data (betonens sammensætning) og revnetyper, kan AKR-skader på betonoverflader potentielt vurderes automatisk.

Alkalikieselskader kan dog også forekomme som indre revnedannelser i konstruktionen, som først kommer visuelt til udtryk på betonoverfladen efter en vis tidsperiode. For at forebygge alkalikieselskader, gælder det om tidligt at detektere fugtpåvirkningen af betonen. Indbyggede fugtmålere på kritiske og udsatte steder i konstruktionen, vil kunne alarmere om fugtindtrængningen og forhindre udvikling af skadelige reaktioner. Indbyggede flytningsmålere, på betonoverfladen eller inde i konstruktionen, vil kunne informere om revneudvikling, ekspansionen og udviklingshastighed. Ved at opdage begyndende indre ekspansioner/revnedannelser i tide, kan det fx være muligt at sætte ind med rettidigt vedligehold, eller det kan muliggøre prioritering af hvilke bygværker, der har behov for reparationer (forebyggende eller udbedrende).

ELEKTROKEMISK NEDBRYDNING KORROSION

Korrosion er en nedbrydningsmekanisme, som finder sted i metaller, når metallet reagerer med luft og vand. I byggeri og anlæg er det en meget afgørende nedbrydningsmekanisme. Armeringskorrosion kan fremstå som synlige skader på konstruktionsdele eller som indre skader, som først kommer visuelt til udtryk efter en vis tidsperiode.

Konstruktionsmaterialer

Beton, murværk, armeringsstål.

Synlige skader

Rust, rustudfældninger, revner, afskalninger.

Skadesmekanismer

Betons naturligt høje pH-værdi danner et beskyttende (passiverende) lag, som hindrer den indstøbte armering i at korrodere. Flere forskellige mekanismer kan nedbryde det passiverende lag, hvoraf de vigtigste er karbonatisering og kloridpåvirkning.

Karbonatisering er den naturlige kemiske omdannelse af cementpastaens calciumhydroxid (CaOH_2) til calciumcarbonat (CaCO_3) ved optagelse af luftens CO_2 . Når beton karbonatiserer, sænkes pH-værdien i betonen, og når karbonatiseringsfronten når armeringen, vil betonens passiverende film om armeringen nedbrydes. Højt indhold af klorider i betonen øger risikoen for korrosion af armeringen. Korrosionsprocessen påvirkes af mange faktorer, fx mængden af klorider (iblandet, via tørsaltning eller ved havvandseksposering), fugt, temperatur (processen aftager, når temperaturen falder) og iltkoncentration.



For murværk kan korrosion af murbindere forårsage, at skalmure kan vælte. Først i midten af firserne blev det et krav at anvende korrosionsbestandige trådbindere i alle ydermure, hvorfor skalmure fra før dette tidspunkt kan være i risikogruppen.

Digitale løsninger

Visuelle skader forårsaget af armeringskorrosion (revnedannelser, blotlagt armering og dæklagsafskalninger) kan potentielt registreres med dataopsamlingsværktøjer, og koblet til droner og robotter kan registreringerne automatiseres. Værktøjer, baseret på kunstig intelligens, kan anvendes til detektering af hvilken skadestype, der er ved at udvikle sig, og med sensorer kan skadesmekanismen potentielt klarlægges og udviklingen fremskrives.

Data fra eftermonteret fugt- og temperaturmålere kan muliggøre udvikling af nye nedbrydnings- og levetidsmodeller og skabe bedre korrelation mellem teori og praksis. Måledata kan hjælpe med at vurdere hvilke, og hvorvidt en reparation vil være nødvendig for den pågældende konstruktion. Fugtmålere kan blive et effektivt redskab til at overvåge fugttilstanden i betonen omkring armeringsjernet, og til at vurdere risikoen for korrosion, herunder udviklingshastigheden. Måledata kan fx skabe et bedre grundlag for at vurdere betydningen af overfladebehandling ved renovering af betonoverflader med karbonatiseringsbetinget korrosion.

Korrosionstilstanden ved kloridpåvirkede bygværker kan potentielt overvåges med indstøbte sensorer, hvor dataanalysen fx kan foretages ved brug af værktøjer, baseret på kunstig intelligens, trænet af materialespecialister. Sensorer er et effektivt redskab til at overvåge korrosionstilstanden af armeringsjernet. Sensorer kan også bidrage til at bestemme den mængde af klorider, der skal til for at igangsætte korrosion. Potentialet for korrosion af armeringsjernet og indikationen af fugtindholdet i konstruktionen, kan ligeledes måles ved anvendelse af velafprøvede udstyr, som dog vil kræve en destruktiv undersøgelse (lokal opbrugning) i konstruktionen.

Dæklag til armering kan måles ved anvendelse af velafprøvede ikke-destruktive målemetoder. Dette ikke-destruktive udstyr, kan potentielt kobles til robotteknologier for at automatisere og effektivisere måleprocessen, især for svært tilgængelige konstruktionsdele.

CASE: EKSPONERINGSSITE RØDBYHAVN

I 2010 etablerede Femern A/S, dvs. bygherren for Femern Bælt-forbindelsen, et felteksponeringssite ved havnebassinet i Rødbyhavn. Her er en serie af betonblokke installeret i en stålkonstruktion, hvor de holdes delvist neddykket i havnebassinet, dvs. i et havvandsmiljø svarende til det aktuelle for Femern Bælt-tunnelen. Blokkene er fremstillet af en række forskellige betontyper, der normalt anses som velegnede til konstruktioner i marine miljøer, og deres tilstand er med jævne mellemrum blevet undersøgt grundigt af Teknologisk Institut. Det har resulteret i en værdifuld og unik samling af resultater vedrørende holdbarhed af beton i havvand.

Nogle af de havvandseksponerede betonblokkene er fremstillet med indstøbte korrosionssensorer ("anode-trapper"). Der opsamles kontinuerligt måledata fra sensorerne, og data transmitteres automatisk fra eksponeringssitet videre til en server i "skyen", hvorefter de opsamlede data visualiseres på et web-baseret "dashboard".

Den anvendte type af sensorer kan bruges som et effektivt redskab til at overvåge korrosionstilstanden af armeringsjernet i en betonkonstruktion, men ved eksponeringssitet benyttes sensorerne blandt andet også til at bestemme den mængde af klorid fra havvand, som skal til for at igangsætte rustdannelse på armeringsjernene i forskellige betontyper – hvilket er en afgørende parameter for at kunne beregne den forventede levetid for betonkonstruktioner i havvandsmiljøer.

I tilknytning til det etablerede opsamlingsystem er der udviklet en såkaldt "alarm-manager", det vil sige et system, der automatisk udløser en alarm, hvis data fra sensorerne indikerer, at korrosionstilstanden for den enkelte sensor ændrer sig, fx hvis data viser tegn på begyndende korrosion (rustdannelse). Et sådant værktøj vil med fordel kunne anvendes i forbindelse med automatiseret fjernovervågning af store anlægskonstruktioners tilstand.



STATISK OG DYNAMISK NEDBRYDNING

Bærende konstruktioner påvirkes i deres levetid af statiske og dynamiske kræfter fra egenvægt, nyttelast (fx personer eller køretøjer), naturlast (fx sne, vind, bølger) eller ulykkelast (fx påkørsel, termisk brandlast).

Konstruktionsmaterialer

Beton, træ, asfalt, murværk.

Synlige skader

Revner, deformationer og svingninger.

Skademekanismer

Ved en overbelastning af bærende konstruktioner på grund af uhensigtsmæssigt statiske og eller dynamiske kræfter, kan der skabes revner og/eller store deformationer.

Digitale løsninger

Structural Health Monitoring (SHM) er ved at få udbredelse til rettidig drift og vedligehold af anlægskonstruktioner. Ved SHM kan konstruktionernes fysiske tilstand og opførelse monitoreres, analyseres og vurderes på baggrund af data fra indbyggede eller eftermonterede sensorer, fx strain gauges, flytningsmålere, inklinometre, accelerometer, fugtsensorer m.fl. Der kan desuden anvendes billedbaseret opsamlings- og analyseværktøjer fx Digital Image Correlation (DIC). Dataanalyser og specialistviden kan tilsammen skabe grundlaget for vurderingen af konstruktionernes nuværende tilstand og bæreevne. Anvendelse af avancerede FEM-modeller kan fremskrive konstruktionens tilstande og bæreevne under nuværende eller ændrede påvirkninger.



CASE: LEVETIDSFORLÆNGELSE AF BRØNDBY STADION VED FORSTÆRKNING OG PERMANENT OVERVÅGNING

Stemningen på Brøndby Stadions berømte Sydside var over årene blevet så intens, at tribunen i 2018 blev udsat for overbelastning under koordinerede hop. I samarbejde med Brøndbyernes IF levetidsforlængede Rambøll tribunerne gennem en kombination af forstærkning og et permanent overvågningssystem. Overvågningssystemet består af en række smartphones med egenudviklet applikation RamVib (iphone/Android) til vibrationsmålinger og online adgang.

Rambølls beregninger viste, at elementerne kunne tåle en nedbøjning på 31 mm, når man regnede alle sikkerheder med. Målinger af tribunernes bevægelser inden forstærkning viste svingninger på op til ca. 1,8 g svarende til, at et af tribuneelementerne bøjede ned med 45 mm, hvilket fik Brøndbyernes IF til at indføre restriktioner for anvendelsen af tribunen efter Rambølls vurdering af konstruktionssikkerheden. Rambølls specialister udarbejdede en strategi for, hvad der skulle til for at forstærke de eksisterende tribunelementer og tribunekonstruktioner så de kunne modstå belastningen fra de hoppende tilskuere.

Rambølls strategi bestod af forstærkning af tribunelementer og hovedbjælker fra undersiden af både Sydsiden Nedre og udebaneafsnittet på Nordsiden Nedre, kombineret med permanent vibrationsovervågning og databaseret analyse. På trods af forstærkningen af tribunelementerne, var belastningen iht. gældende normer så stor, at bæreevnen fortsat ikke kunne eftervises. Rambøll udførte derfor et stort "hoppeforsøg" med flere hundrede fans på tribunen, hvor elementernes bevægelser blev overvåget, målt og analyseret som grundlag for ibrugtagning af tribunen på ny. Rambøll satte en grænse for nedbøjningen svarende til 28 mm, men hoppeforsøget viste en nedbøjning på kun 19 mm under fuld belastning fra fans der hoppede koordineret i takt til fansange. Brøndby Stadion har nu fået monteret et permanent fjernbetjent overvågningssystem (bestående af smartphones og applikationen RamVib), og Rambølls specialister regner med, at de på længere sigt kan nøjes med at monitere til enkelte kampe hvert år. Anvendelse af overvågning og dataanalyse har skabt stor værdi for Brøndby Stadion i form af økonomisk gevinst og øget sikkerhed for de eksisterende betonkonstruktioner.

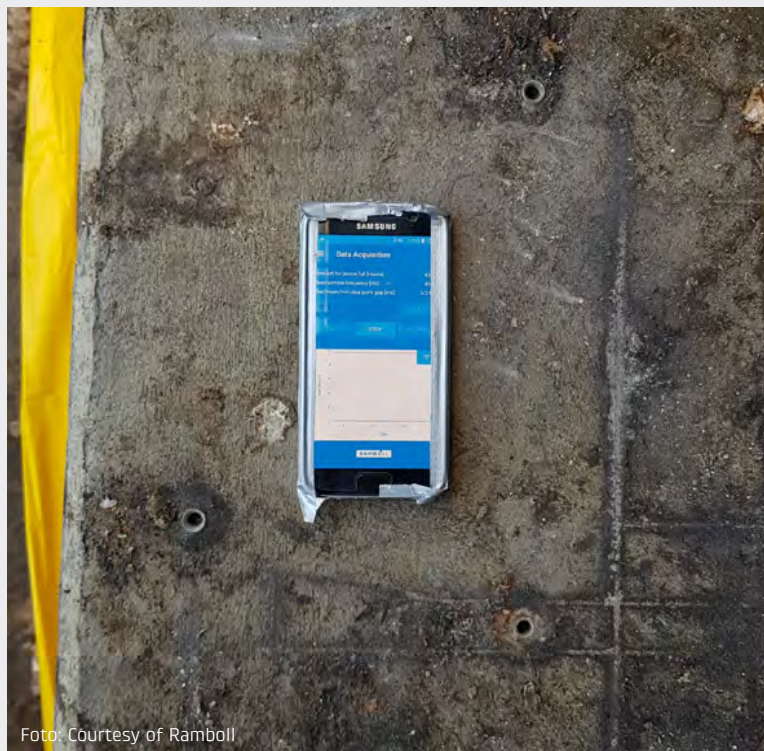


Foto: Courtesy of Ramboll



Foto: Courtesy of Ramboll

BIOLOGISK NEDBRYDNING

SVAMP OG RÅD

Gængse skimmelsvampearter er overfladesvampe, som kan have sundhedsmæssige skadesvirkninger, men som ikke svækker materialernes konstruktive egenskaber. Derimod udgør svamp og råd specifikt i trækonstruktioner en konstruktionsmæssig nedbrydningsmekanisme. Derudover kan Ægte hussvamp, i kraft af dens evne til at udnytte kalk i murværket, og den evne til at transportere vand/fugt over lange afstande, sprede sig fra én konstruktion til en anden. Fx kan den etablere sig i en indmuret bjælkeende i kælderniveau og via murværket i facaden sprede sig til de øvrige etager, og helt op til tagkonstruktionen. Disse angreb kræver derfor øget fokus og skærpet kontrol ved udbedring. Det kan bl.a. være vanskeligt at bestemme det fulde omfang af skaden.

Konstruktionsmaterialer

Træ og murværk.

Synlige skader

Misfarvning, krakelering.

Skademekanismer

Der skelnes mellem råd og svamp, særligt ud fra hastigheden i nedbrydningen: Hvor et angreb af svamp forløber hurtigt ift. konstruktionens forventede levetid, og råd, forårsaget af både svampe og bakterier, forløber langsomt. Både råd og svamp er grundlæggende

forårsaget af fugt og en gunstig temperatur. De optimale vækstbetingelser afhænger af den specifikke svampeart, og af disse findes der ca. 30 almindeligt forekommende i gavntræ i Danmark. Blandt disse er spændet af optimale vækstbetingelser en træfugtighed på 20-70% og en temperatur på 20-35 °C. For udvendigt træ, der udsættes for gentagen opfugtning, er det helt nødvendigt med korrekt behandling af træet, og løbende vedligeholdelse af denne behandling. For indvendigt træ der holdes tørt, vil der ikke være problemer.

Digitale løsninger

Nye digitale værktøjer giver muligheder inden for både forebyggelse og diagnosticering af skimmel, svamp og råd. Når det kommer til forebyggelse, er tidlig detektion eller helt at undgå udsættelse for fugt. Integreerede fugtmålere på udsatte steder i konstruktionen, vil kunne alarmere om fugt-indtrængen. Samtidig kan hyperspektrale og spektroskopiske metoder bruges til at finde skader eller uventet slid på overfladebehandlingen af udvendigt træ, således at der kan sættes ind med tidlig forebyggende vedligehold. Når det kommer til korrekt og hurtig karakterisering/diagnosticering af svampe/råd-angrebet, vil billedgenkendelse på forskellige (størrelses)-niveauer, drevet af AI-systemer, muliggøre et langt hurtigere resultat, som igen åbner op for at der kan inspiceres mere automatisk, som en del af en drift- og vedligeholdelsesplan der sikrer tidlig indgriben, og forlænger bygningens levetid.



CASE: FUNGAI

Hvert år udfører Teknologisk Institut over 3.000 analyser for forekomst af skimmelsvampe, hvor de bliver identificeret samt kvantificeret. En særlig analyse er tapeaftryk, hvor bygningsundersøgeren presser et plastikstykke med en kraftig lim på en overflade, der ønskes undersøgt for skimmelsvampe. Er der skimmelsvampe til stede på overfladen vil svampematerialet blive trukket af og sidde i limen. I laboratoriet bliver dette aftryk analyseret ved mikroskopi og tilstedeværelsen af svampemateriale vurderes subjektivt. Arbejdet kræver et sæt trænedede ekspertøjne, der kan spotte de mikroskopiske strukturer i skimmelsvampenes morfologi, og skelne dem fra prøvestedets materiale, der også er afsat på limen.

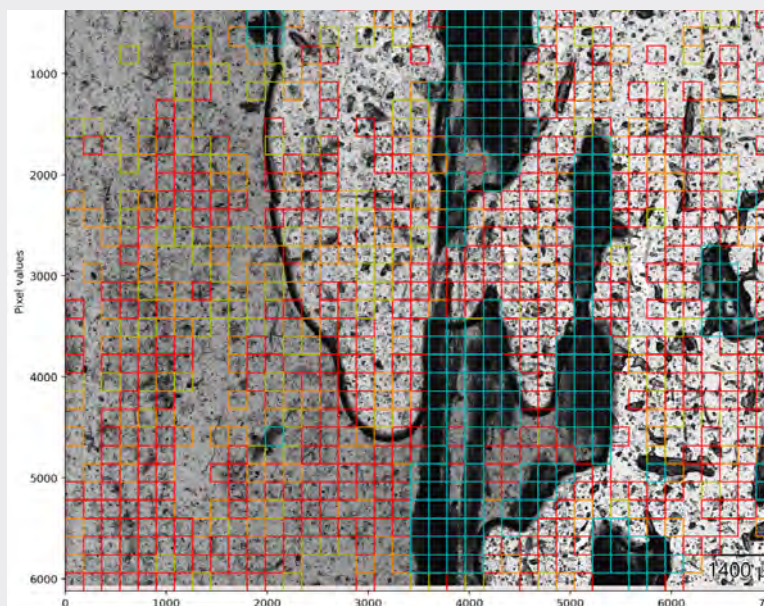
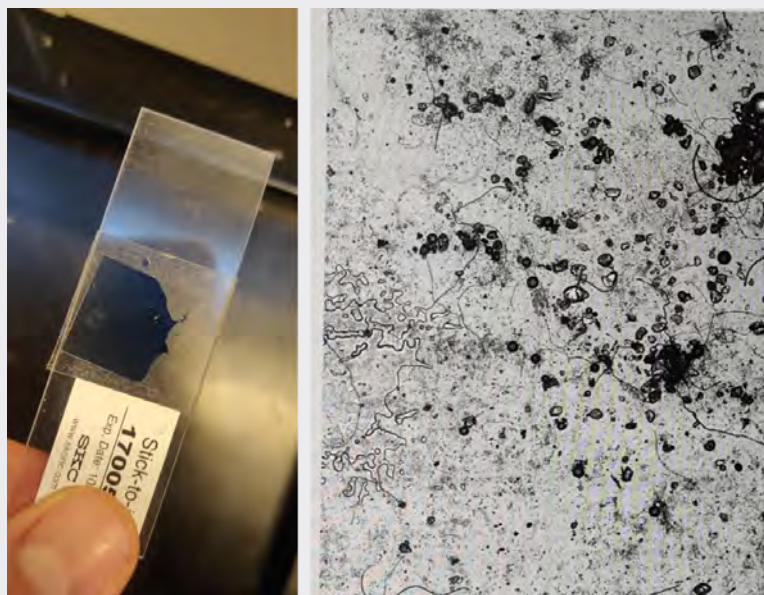
Nu skal det specialiserede arbejde understøttes af en lige så specialiseret deep learning-løsning, der er i stand til at identificere svampemateriale på et mikroskopibillede.

Når tapeaftrykket kommer til laboratoriet, bliver det scannet af et kamera med høj opløsning og der dannes ét billede af hele aftrykket. Dette billede klippes op i ca 1300 delbilleder, frames, der hver for sig analyseres ved en kunstig intelligens algoritme, FungAI. FungAI er bygget op af åbne og frit tilgængelige kunstig intelligensmodeller, AI modeller, der er prætrænede til at genkende objekter på billeder. FungAI er trænet med tusindvis af egne billeder, hvor der er svampemateriale på i varierende mængde, men også med billeder uden svampemateriale. Alle data fra annotering, træning og analyse i FungAI er visualiseret i et webbaseret "dashboard", der også er interfacet til upload af nye billeder og scanninger.

Analyse af et tapeaftryk med FungAI resulterer i en samlet vurdering af svampeforekomsten hele det scannede billede på baggrund af en klassifikation af hver af de ca. 1300 delbilleder. Denne klassifikation er baseret på hvor sikker FungAI modellerne vurderer tilstedeværelsen af svampemateriale i det enkelte delbillede. Delbilleder, der er uskarpe eller helt uden struktur, fx helt sorte pga. uigennemsigtigt materiale fra prøvestedet bliver sorteret fra og indgår ikke analysen. Resultatet kan illustreres ved bardigrammer, tabeller eller som et sammensat billede af det scannede

tapeaftryk, hvor hver af de ca. 1300 delbilleder er farvekodet rød, orange og gul afhængig af hvor sikker FungAI vurderer tilstedeværelse af svampe, samt blå for de delbilleder der ikke indgår i den samlede vurdering.

Konceptet bag FungAI har vist sig meget robust og har vist at FungAI er et brugbart grundlag for at etablere billedanalyse på andre områder i byggebranchen.





INDSATSER

Som et resultat af arbejdet med denne Roadmap, introduceres i dette afsnit en række indsatser, som hver især har potentiale til at sikre, øget anvendelse af digitalisering i bygge- og anlægsbranchen og i sidste ende kan føre til forlængede levetider for vores bygge- og anlægskonstruktioner.

Disse indsatser skal læses som en anbefaling til branchen, når der igangsættes nye projekter, initiativer, samarbejder osv. som beskæftiger sig med digitaliseret drift og vedligehold af bygge- og anlægskonstruktioner.

Der er i alt udvalgt ni forskellige indsatsområder, som beskrives i det følgende:

1. Eksponeringssites til fremtidens generationer
2. Mere intelligent monitorering
3. Strategi for data, strukturering og standardisering
4. Udnyttelse af AI-værktøjer til optimering af drift og vedligehold
5. Demonstrationsprojekter og formidling
6. Forskning- og udviklingsprojekter og internationalt samarbejde
7. Kompetenceopbygning
8. Nye investerings- og samarbejdsformer
9. Innovationshub



#01: EKSPONERINGSSITES TIL FREMTIDENS GENERATIONER

Adgang til kvalitetsdata er én af forudsætningerne for at kunne udvikle gode og pålidelige levetids- og prognosemodeller, der vil kunne bruges til at opnå optimerede strategier for drift og vedligehold af eksisterende konstruktioner. Og en effektiv måde at frembringe sådanne kvalitetsdata er gennem etableringen af såkaldte eksponeringssites. Det vil sige fysiske test-lokaliteter, hvor eksempelvis prøveemner af et givent byggemateriale eksponeres i et relevant miljø over en længere periode for at undersøge materialets performance. Ved at indsamle data fra et eksponeringssite over tid, kan der således opbygges et sæt af værdifulde data, der kan fx udgøre et udgangspunkt for udviklingen af modeller til estimering af bygnings- eller anlægskonstruktioners restlevetid.

En udfordring med eksponeringssites er, at etableringsomkostningerne generelt er relativt høje. Men erfaringerne viser, at når først en eksponeringssite er etableret, så øges værdien og interessen for de data, som indhentes derfra, i takt med at årene går. Datasæt, der strækker sig over en periode på mere end fx 10 år, er desværre ganske sjældne, og etableringen af flere eksponeringssites vil kunne bidrage væsentligt til opbygningen af de nødvendige inputdata til udviklingen af levetids- og prognosemodeller.

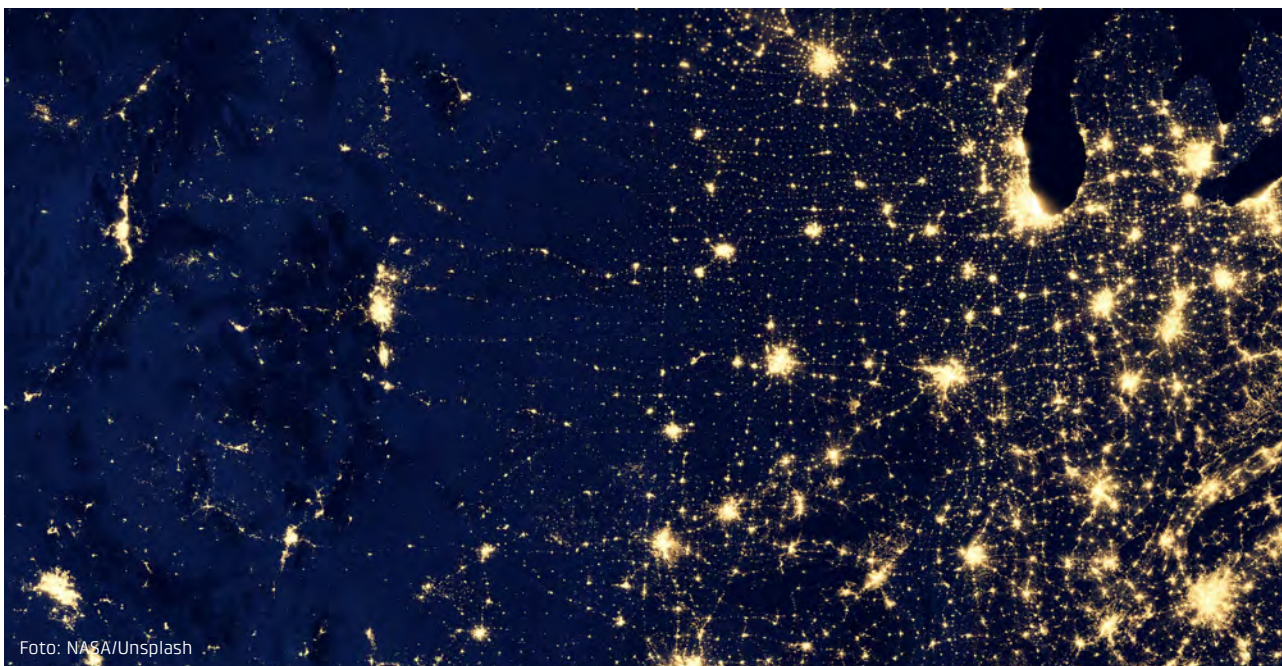


#02: MERE INTELLIGENT MONITORERING

Det handler ikke om mere overvågning, men om intelligent overvågning. Sensorbaseret overvågning kan give de nødvendige informationer til objektiv og intelligent vurdering af bygninger og anlægskonstruktioners tilstand og levetid. Sensorbaseret overvågning anvendes i mindre skala på udvalgte projekter eller på større bygværker med stor succes. Her er der tale om sensorer, der primært overvåger konstruktionsdele – fx vibrationer og flytninger. Sensorbaseret overvågning af materialenedbrydning er dog yderst begrænset og der er et stort potentiale for at udvikle og implementere retrofit-sensorer i eksisterende konstruktioner.

Data fra sensorer alene kan ikke skabe grundlaget for udarbejdelse af intelligente og objektive tilstand- og levetidsvurderinger, men koblingen af data fra sensorer med ekspertviden indenfor materialer og konstruktioner, kan skabe de nødvendige levetids- og prognosemodeller. Der er store perspektiver i at anvende data fra sensorer til objektiv rettidig vedligeholdelse og forudsigelse om materialers og konstruktioners levetid.

For at udbrede anvendelse af sensorer i branchen, er det nødvendigt at afprøve, validere og implementere sensorteknologier. TDU-faciliteter kan skabe et rum hvor nye sensorer testes, valideres og evalueres under kontrollerede og virkelige forhold, således organisationer har mulighed for at se, vurdere og bestemme om disse sensorer er egnede til deres behov.



#03: STRATEGI FOR DATA, STRUKTURERING OG STANDARDISERING

På trods af den store mængde data der i dag bliver produceret hver eneste dag i bygge- og anlægsbranchen, er anvendelsen af disse data generelt yderst begrænset i forhold til intelligent drift og vedligehold.

Det er ofte ikke defineret, hvilke data der er relevante i forhold til drift og vedligehold, hvilket ofte gør de registreret data er mangelfulde og ustruktureret. Det er ligeledes nødvendigt at sikre den nødvendige kvalitetssikring af data for at gøre dem troværdige og værdifulde i forhold til den efterfølgende drift og vedligehold. Intelligent drift og vedligehold kræver standardiserede og strukturerede data, herunder et digitalt fællessprog, et fællessprog som kan bruges på tværs af værktøjer og organisationer.

At opnå et digitalt fælles sprog for nybyg er signifikant anderledes end for eksisterende konstruktioner. Når vi ser på den eksisterende bygningsmasse så er indhentning og strukturering af historiske data krævende og omkostningsfulde. Ressourceforbruget står sjældent mål med gevinsten.

I forhold til bæredygtighed og genbrug af byggematerialer vil manglende bygnings- og materialedata være et fordyrende og tidskrævende element. Der er derfor behov for at sikre data igennem hele byggeriets levetid, herunder sikre at ændringer i bygningen registreres og dokumenteres på en ensartede og standardiseret måde på tværs af branchen.

Strategier for anvendelse, strukturering og vedligeholdelse af nuværende og fremtidige data, igennem hele byggeriets levetid, skal gennemføres på tværs af bygge- og anlægsbranchen, således drift og vedligehold samt bygningsændringer og til sidst sanering kan gennemføres rettidigt og bæredygtigt.



#04: UDNYTTELSE AF AI-VÆRKTØJER TIL OPTIMERING AF DRIFT OG VEDLIGEHOLD

Der ligger et stort og uforløst potentiale i at få udviklet og implementeret en gængs praksis for at anvende AI (Artificial Intelligence) som en del af bygninger og anlægskonstruktioners drift og vedligehold. Processer vedrørende skadesregistrering og -vurdering vil eksempelvis kunne effektiviseres betydeligt ved at udnytte AI's muligheder for at udvikle automatiserede rutiner for analyse af billeder. Fx vil et omfattende billedmateriale fra inspektion af en bygning eller en konstruktion kunne analyseres og vurderes langt hurtigere via en "veltrænet" AI-model sammenlignet med en manuel gennemgang, som typisk vil være både tidskrævende og behæftet med en større risiko for fx at skader overses.

Hvis det nødvendige datagrundlag er til stede, er der også et potentiale for at udvikle AI-modeller, der kan udnyttes til diverse prognoseberegninger. Fx modeller til beregning af den aktuelle restlevetid for en given konstruktionsdel, eller beregning af optimale tidspunkter for udførelse af eventuelle reparations- og vedligeholdelsesarbejder.

Udviklingen af effektive AI-modeller kræver imidlertid dels, at den nødvendige domæneviden fra specialister indbygges i modellerne, og dels at modellerne "trænes" med en tilstrækkelig mængde af relevant data.



#05: DEMONSTRATIONSPROJEKTER OG FORMIDLING

Et afgørende element for at opnå en øget digitalisering af bygnings- og anlægskonstruktioners drift og vedligehold, er, at alle led i bygge- og anlægsbranchens værdikæde kan se nytteværdien i at anvende nye digitale teknologier. Her vil demonstrationsprojekter, hvor de nye digitale løsninger afprøves, kunne fungere som "udstillingsvinduer", der bidrager til at synliggøre og formidle, hvilke økonomiske og bæredygtighedsmæssige gevinster, som er forbundet med løsningerne.

Foruden demonstrationsprojekter vil andre typer af formidlingsinitiativer gennem diverse medier og platforme også kunne bidrage væsentligt til, at kendskabet til de digitale teknologiers nytteværdi når ud til branchens forskellige aktører. I den sammenhæng er det også vigtigt, at det ikke udelukkende er de gode eksempler, hvor teknologierne virker, der formidles. Opsamlet viden om væsentlige udfordringer eller eksempler, hvor teknologierne ikke virker efter hensigten, vil med fordel også kunne deles med branchen, så eventuelle fejl ikke gentages, og værdifulde og måske dyrt købte erfaringer ikke går tabt.



#06: FORSKNING- OG UDVIKLINGSPROJEKTER OG INTERNATIONALT SAMARBEJDE

Udvikling af nye digitale løsninger til drift og vedligehold af bygnings- og anlægskonstruktioner kan med fordel ske gennem forsknings- og udviklingsprojekter, hvor branchens forskellige typer af aktører er bredt repræsenteret. Dette kan bidrage til at sikre, at der udvikles løsninger, som er praktisk anvendelige og generelt accepteres på tværs af branchens værdikæde.

Et område, hvor der fx er identificeret et behov for at igangsætte nye forsknings- og udviklingsprojekter, er inden for sensor-teknologi til monitorering af eksisterende konstruktioner, det vil sige retrofit-løsninger. Der findes allerede et væld af sensorer på markedet, men i mange tilfælde er der brug for en tilpasning eller videreudvikling af de eksisterende løsninger, hvis deres indbygning i eksisterende konstruktioner skal give mening. Ydermere er det vigtigt, at have den rette viden om hvor sensorerne skal placeres.

I forbindelse med forsknings- og udviklingsprojekter vil der med fordel også kunne etableres samarbejder med toneangivende aktører uden for landets grænser. Sådanne internationale samarbejder vil kunne bidrage til hjemtagning af relevant ny viden og opbygning af kompetencer inden for anvendelse af digital teknologier til drift og vedligehold af bygnings- og anlægskonstruktioner.



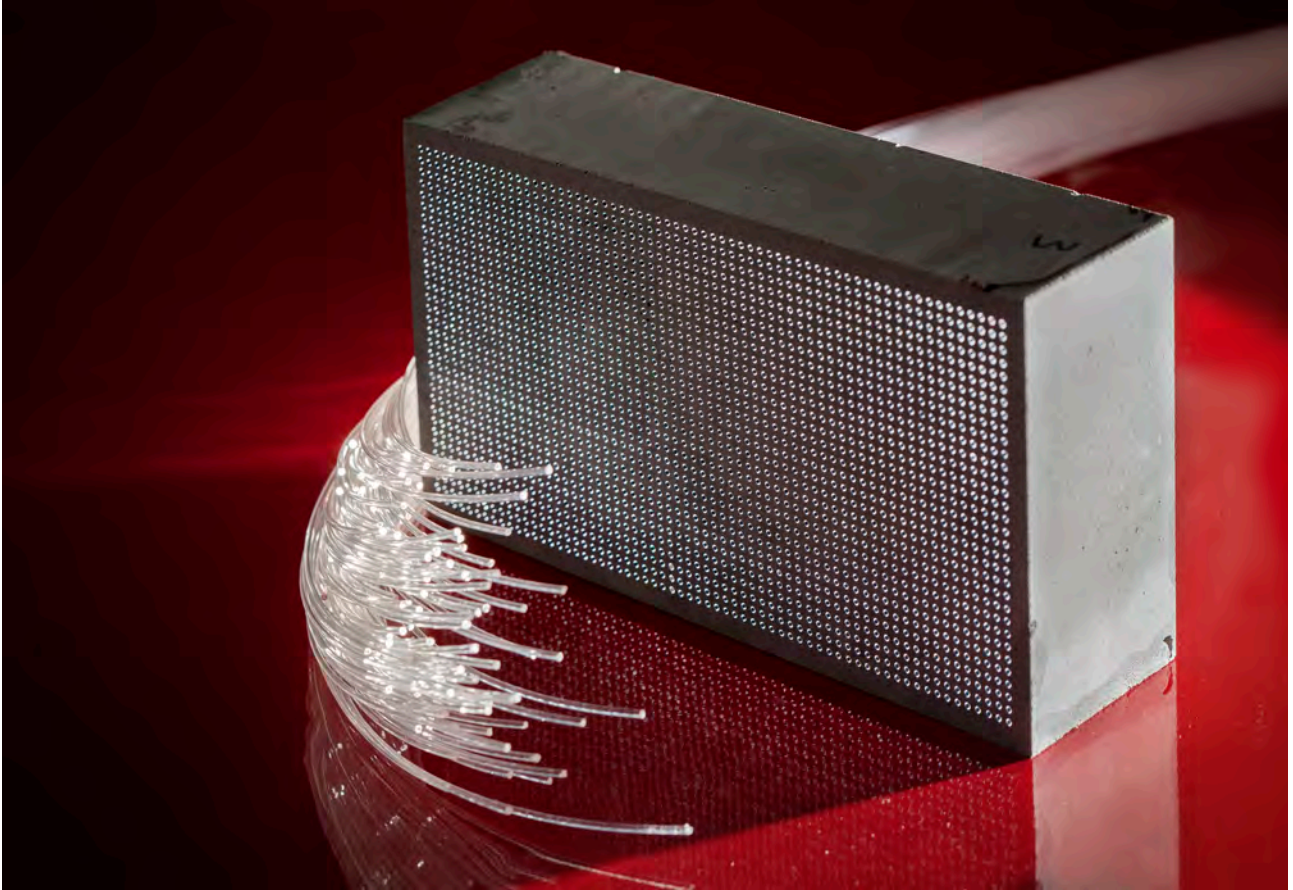
#07: KOMPETENCEOPBYGNING

Anvendelse af nye digitale teknologier til drift og vedligehold af bygninger og anlægskonstruktioner er komplekst og kræver tværfaglig kompetenceopbygning. Kompetenceopbygning skal være en del af hele organisationer og værdikæden, hvoraf ledelsen udstikker de nødvendige strategier for at sikre værdiskabelsen af implementeringen af digitale teknologier til drift og vedligehold. Kompetenceopbygning kræver forandringsparathed. Det kræver ressourcer og vedholdenhed at lykkes med anvendelsen af nye værktøjer og ikke mindst villighed hos brugeren til at arbejde på en ny og anderledes måde. Det kræver opbygning af tillid og fælles forståelse i hele værdikæden, fra teknologileverandøren, der skal forstå behovet hos brugeren, og fra brugeren, som skal kunne forstå de muligheder, som teknologien kan skabe. Teknologibrugeren og teknologiuudvikleren skal sammen skabe rammerne for værdiskabelsen.



#08: NYE INVESTERINGS- OG SAMARBEJDSFORMER

Udvikling og implementering af teknologier kræver langsigtede mål, nye investerings- og samarbejdsformer. Branchen skal være med til at udvikle egne teknologier og nye produkter. Hertil kan vi blive inspireret af internationale aktører, som har en anderledes tilgang til at skabe fællesskab omkring investeringer, så teknologier og produkter ikke drukner i proof-of-concept projekter, men implementeres som skalerbare løsninger i branchen i højt tempo. Det vil kræve langsigtede investeringer fra branchen, private investorer og derfor ikke kun fondsmidler. Der er behov for nytænkning i branchen, hvor der skal være fokus på hvordan, vi - i fællesskab - sammensætter finansieringen til udvikling og implementering af værdiskabende løsninger. Udviklingen vil kræve et stærkt samarbejde mellem organisationer, specialister, teknologileverandører og slutbrugere. Dette kræver, at personer med forskellige perspektiver på samarbejde og teknologiske løsninger samarbejder. For at skabe nye stærke samarbejdsformer, skal finansieringen og udviklingen tilgodese alle parter i samarbejdet.



#09: INNOVATIONSHUB OG TDU-FACILITETER

Etablering af en innovationshub, der fokuserer på digitaliseret drift og vedligehold af bygnings- og anlægskonstruktioner, vil kunne bidrage til at fremme både teknologiudvikling og kompetenceopbygning på dette område. Innovationshubben skal være et sted, hvor aktører fra branchen kan bringes sammen i fælles fysiske rammer med henblik på udvikling nye digitale teknologier. Idéen med innovationshubben er at skabe et inspirerende udviklingsmiljø, som kan bidrage til udveksling af viden og idéer, og hvor forretningskabende initiativer kan modnes og realiseres. Et miljø, hvor der kan etableres tværfaglige samarbejder, fx mellem start-up-virksomheder og mere etablerede virksomheder.

Ud over fysiske rammer i form af et kontormiljø, vil Test-, Demonstrations- og Udviklingsfaciliteter (TDU) med fordel også kunne tilknyttes innovationshubben, dvs. højteknologiske laboratorier med state-of-the-art udstyr til avanceret test og dokumentation, pilotproduktion, prototypefremstilling, etc. Med adgang til sådanne TDU-faciliteter vil de idéer og løsninger, der arbejdes med, løbende kunne testes og tilpasses efter behov. For ydermere at styrke opbygningen af kompetencer bredt i branchen vil uddannelseselementer i form af fx kursusforløb, workshops og faglige events med fordel også kunne indgå som en del af hubben.



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

