

Abstract

The architecture, engineering and construction industry (AEC) needs to pivot towards a circular design paradigm to mitigate environmental impacts by keeping buildings, components, and materials in circulation longer and reduce waste. The most resource efficient method is retaining through repair. Repair is a complex and labour-intensive practice responsible for ensuring the functionality of the built environment. Designing for repair (DfR) is an emergent approach, however underexplored in architecture, where repair is normalized as a mundane activity sustaining the stability of the built environment. To enable DfR requires that design and manufacturing processes have a direct engagement with the constituents of the repair practice - the inspection, diagnostic investigation and decision-making, to address continual material transformation. Architectural design continues to focus on creation and is attached to an expectation of permanence and stability. Consequently, it evolves separately from the relational and dynamic networks in which buildings exist and where repair operates.

This thesis conceptualizes design for repair in architecture by developing an integrated design and repair framework using 3D printing technologies. To blur the clear-cut boundaries between repair and design necessitates introducing repair thinking in early design stages and recognising the creative potential in repair interventions. To do so, this project draws from interdisciplinary theoretical discourse where breakdown is foregrounded, repair is studied as relational and creative, while architectural design is positioned as open to change and anticipatory of repair.

The focus of this research is 3D printing with biopolymer composites. 3D printing, conventionally used as an endpoint for new production, is expanded in the context of repair and iteratively applied and adapted to ongoing material transformation. The material case study, biopolymer composites, is a hygroscopic material class which has an accelerated response to environmental conditions. Conventionally considered unfit for industry standards, this project leverages their shorter lifespan to enable the framework.

A hybridised research-through-design (RtD) methodology is employed to pursue this investigation. Methodological approaches from outdoor exposure testing and building pathology are used to extend RtD to investigate how experimental samples deteriorate. Knowledge is thus generated through iterative designing and repairing experimental samples. These are differentiated as this research progresses as probes, prototypes and demonstrator. They are subjected to cycles of design, diagnosis and repair, leading to a secondary mode of differentiation specific to each cycle phase, categorizing them as design, as deteriorated and as repaired. The research is thus matured from a design perspective, a material examination perspective and a repair practice perspective. This project is structured through three objectives specific to each cycle phase and advanced through four experiments initiated through research questions.

The thesis reports on methods of inspection, 3D scanning, diagnosis via computational analysis and repair through 3D printing. It investigates decisionmaking, weaving together activities performed on exposure sites with activities performed in the fabrication lab through both human and machine means. It develops a design language informed by material transformation over time and repair processes. This research culminates in the making of a demonstrator, the Repair Pavilion, which takes the research from the lab and into the everyday life, exploring an architecture where repair is central, where endurance is achieved through iterative fabrication rather than material durability.

This PhD thesis contributes to the growing research field on additive manufacturing in architecture. The main contribution is the development of the design for repair framework for 3D printing. It is enabled by continuity in tool deployment across multiple cycles, implementing repair thinking in design processes, exploring generative processes in repair, exchange of information between different cycle phases, and responding to material behaviour accumulated in time. Together, these technological and conceptual developments aim to challenge our current expectations of permanence and stability within the built

environment and enable an architecture practice aligned with broader ecological networks and considerate of care activities.

Resume

Arkitektur-, ingeniør- og byggebranchen (AEC) er nødt til at omstille sig til et cirkulært designparadigme for at reducere miljøpåvirkningen ved at holde bygninger, komponenter og materialer i kredsløb længere og dermed reducere affald. Den mest ressourceeffektive metode er at bevare det byggede miljø gennem reparation. Reparation er en kompleks og arbejdskrævende praksis, der er afgørende for at opretholde funktionaliteten i det byggede miljø. Design for repair (DfR) er en voksende tilgang, men stadig underudforsket inden for arkitektur, hvor reparation er normaliseret som en del af hverdagen for at opretholder stabiliteten i det byggede miljø. At muliggøre DfR forudsætter at design- og fremstillingsprocesserne har en direkte forbindelse til de komponenter, der indgår i reparationspraksis – inspektion, diagnostisk undersøgelse og beslutningstagning i forhold til den kontinuerlige materialetransformation. Arkitektonisk design fokuserer fortsat på kreativitet og bygger på en forventning om varighed og stabilitet. Som følge heraf udvikler det sig adskilt fra de relationelle og dynamiske netværk, som bygninger indgår i, og hvor reparationspraksisser udfolder sig.

Denne afhandling konceptualiserer design for repair i arkitekturen ved at udvikle en integreret design- og reparationsramme baseret på 3D-printteknologier. For at udviske de skarpe grænser mellem reparation og design er det nødvendigt at introducere reparationstænkning i de tidlige designfaser, samtidig med at det kreative potentiale i reparative indgreb anerkendes. For at muliggøre dette, trækker projektet på tværfaglige teoretiske perspektiver, hvor nedbrud sættes i fokus, reparation forstås som en relationel og kreativ praksis, mens arkitektonisk design positioneres som åbent for forandring og i forventning om reparation.

Fokus for denne forskning er 3D-print med biopolymerkompositter. 3D-printning, som traditionelt bruges som et slutpunkt for ny produktion, udvides i en reparationssammenhæng og anvendes iterativt og tilpasses løbende materialeforandringer. Materialecasesstudiet, biopolymerkompositter, er en hygroskopisk materialeklasse, der har en accelereret reaktion på miljøforhold. Selvom de traditionelt anses for uegnede til industristandarder, udnytter projektet netop deres kortere levetid til at muliggøre rammeværket.

En sammenflettet research-through-design (RtD) metode anvendes til at gennemføre denne undersøgelse. Metodologiske tilgange fra udendørs eksponeringstests og bygningspatologi bruges til at udvide RtD-rammen for at undersøge, hvordan eksperimentelle prøver nedbrydes. Viden genereres således gennem iterativ design og reparation af de eksperimentelle prøver. Efterhånden som forskningen skrider frem, differentieres disse som probes, prototypes og demonstrator. Prøverne gennemgår cyklusser af design, diagnosticering, og reparation, hvilket fører til en sekundær differentiering, der er specifik for hver cyklusfase, hvor de kategoriseres som henholdsvis designet, nedbrudte og reparerede. Forskningen modnes således gennem et designperspektiv, et materialeundersøgelsesperspektiv og et reparationspraksisperspektiv. Projektet er struktureret omkring tre mål, der er specifikke for hver fase i cyklussen, og udvikles gennem fire eksperimenter, der er igangsat ud fra forskningsspørgsmål.

Projektet rapporterer om metoder til inspektion, 3D-scanning, diagnosticering via computerbaseret analyse og reparation gennem 3D-print. Det undersøger beslutningsprocesser og sammenfletter aktiviteter udført på eksponeringsstederne med aktiviteter udført i fabrikationslaboratoriet gennem både menneskelige og maskinelle midler. Det udvikler et formsprog, der er præget af materials forandring over tid og reparationsprocesser. Forskningen kulminerer i fremstillingen af en demonstrator, Repair Pavilion, som bringer forskningen ud af laboratoriet og ind i hverdagen og udforsker en arkitektur, hvor reparation er central, og hvor udholdenhed opnås gennem iterativ fabrikation frem for materialets præstation.

Dette ph.d.-projekt bidrager til det voksende forskningsfelt inden for additive fremstilling i arkitekturen. Hovedbidraget består i udviklingen af en design-for-reparation-ramme for 3D-printning, som muliggøres af kontinuitet i værktøjsanvendelsen på tværs af flere cyklusser, implementeringen af reparationstænkning i designprocesser, udforskningen af generative processer i reparation, udveksling af viden mellem forskellige cyklusfaser samt tilpasning til materialeadfærd, der akkumuleres over tid. Sammen sigter disse teknologiske og konceptuelle udviklinger mod at udfordre vores nuværende forventninger til varighed og stabilitet i det byggede miljø og muliggøre en arkitekturpraksis, der er afstemt med det bredere økosystem, og som tager hensyn til omsorgsaktiviteter.