

Unbitten: Preventing hospital-acquired mosquito-borne disease through adaptations to the built environment.

In the coming years, climate change, increasing global travel, trade, and urbanisation are expected to help disease-carrying mosquitoes spread to new areas, while growing insecticide resistance necessitates alternative preventive interventions. In areas with endemic mosquito-borne diseases (MBDs) like Zanzibar, district hospitals may become transmission hotspots if patients or staff are bitten by infected mosquitoes inside and then bring these diseases to their home communities. Hospital design may increase the risk of being bitten by a mosquito, by for example, mosquitoes breeding in the building's water infrastructure or openings providing entry points.

This PhD thesis investigates *the following two-part question*:

- i) How can MBD transmission risks in hospital environments be identified, and**
- ii) preventive interventions developed through adaptations to the building and landscape?**

The thesis hypothesises that **knowledge to answer this question can be generated through the development of preventative interventions**. This was tested through a suite of building and landscape modifications created and implemented across four district hospitals in Zanzibar as part of the MBD-Free Project.

Drawing on relational theories, this thesis proposes that MBD transmission emerges from complex interactions between biotic actors (e.g. staff, patients, and mosquitoes) and abiotic actors (e.g. institutions, windows, and solar radiation). Archival research into vector control and hospital development in Zanzibar shows that both have historically been applied top-down, limiting end-user involvement. Rather than repeating this, the thesis adopts the following four analytic processes to better understand how these actor groups interact within the study hospitals, revealing the specific transmission foci that the interventions then target:

1. Literature review (Article 1): a wide scoping review identified 72 building and landscape features that increase risk factor of MBD-transmission and 84 building related interventions to reduce that risk. These were categorised across five built-environment domains: architectural planning, landscape design, water and sanitation, building components and interiors, and building users; and directly informed the intervention development in the study hospitals.

2. Environmental monitoring (Articles 2 and 3): entomological and architectural surveys, supported by an extensive network of indoor climate sensors across 25 hospital spaces, examined the links between environmental conditions and mosquito behaviours in the hospitals. Monitoring revealed that most ward spaces failed to meet ASHRAE 55 thermal comfort standards, with poor conditions coinciding with increased door opening during evening/night-time



Det
Kongelige
Akademi

Arkitektur
Design
Konservering



Det
Kongelige
Akademi

Arkitektur
Design
Konservering

hours, the peak biting periods for *Culex* and *Anopheles* mosquitoes. Air-conditioned rooms had high concentrations of CO₂, a mosquito attractant. A comparison study revealed that older passively cooled "cottage hospital" wards were on average 2.8°C cooler than the new district study hospital wards, demonstrating how climatic design features such as shading overhangs, cross-ventilation and planting can substantially reduce the risk factors observed in the newer buildings.

3. Co-creation (*Article 4*): Sixteen workshops with over 80 participants (hospital staff, patients, and specialists, including government hospital architects) explored how stakeholder needs and patterns of hospital use shape mosquito exposure within the hospitals and how risks identified in article 2 (e.g. overcrowding, mosquito breeding in water systems, and discarded waste) could be addressed through tailoring approaches identified in article 1.

4. Contextual material practice (*Article 5*): site-specific building practices and materials were investigated to understand how the local construction context could influence transmission risk. This included botanical surveys to identify suitable native plants for creating shaded waiting spaces and the use of locally produced building materials made from waste plastic and glass containers, turning common mosquito breeding sites into outdoor furniture and shading structures.

Together, these informed a suite of interventions implemented across the study hospitals, including:

- insect-proofing water and sanitation systems to prevent mosquito breeding indoors
- changes to waste management to reduce discarded containers becoming breeding sites
- modifying ward rooms to improve patient comfort and reduce the need to open windows/doors
- shading planting and the creation of outdoor waiting spaces to reduce overcrowding in existing indoor areas

A six-month post-occupancy evaluation of the landscape interventions revealed a range of social, health, and well-being co-benefits, including greater use of patient waiting in the new outdoor spaces, reduced crowding, a calmer waiting atmosphere, and reduced surface temperatures on walls. The co-creation process also prompted hospital staff to independently identify additional breeding sites and implement protective measures, while government hospital architects began integrating preventive design principles into new additions to the hospitals. Long-term evaluation will compare baseline environmental and entomological data pre- and post-intervention, alongside qualitative feedback from end-users, once the MBD-Free Project study ends in 2027.

The four district study hospitals are part of Zanzibar's largest public healthcare infrastructural upgrade in recent history, approximately tripling its bed capacity in two years. Despite this, thousands more beds are needed to be built in the archipelago by 2030 to meet universal healthcare targets, a fraction of the



Det
Kongelige
Akademi

Arkitektur
Design
Konservering

Det
Kongelige
Akademi

Arkitektur
Design
Konservering

Unbitten: Preventing hospital-acquired mosquito-borne disease through adaptations to the built environment.

I de kommende årer forventes klimaforandringer, øget global mobilitet, handel og urbanisering at bidrage til spredning af sygdomsbærende myg til nye områder, mens stigende resistens mod insekticider kræver alternative forebyggende løsninger. I områder med endemiske myggebårne sygdomme (MBD) såsom Zanzibar kan distrikthospitaler være smitte-hotspots, hvis patienter eller personale bliver bidt af inficerede myg indendørs og derefter bringer sygdommene med sig hjem til deres lokalsamfund. Hospitalsdesign kan medvirke til øget risiko for at blive bidt, for eksempel som følge af vandkilder der tjener som ynglesteder i og omkring bygningen eller åbninger, der giver myg adgang. Denne ph.d.-afhandling undersøger, **hvordan smitterisici for MBD i hospitalsmiljøer kan identificeres, samt hvordan vektorkontroltiltag kan udvikles og integreres i bygningsdesign og det omgivende landskab.**

Afhandlingen opstiller den hypotese, at viden til at besvare dette spørgsmål kan genereres gennem udvikling af forebyggende interventioner og deres evaluering. Dette testes gennem en række bygnings- og landskabsændringer, udviklet og implementeret på tre distrikthospitaler i Zanzibar som en del af MBD-Free-projektet.

Med afsæt i relationelle teorier foreslår afhandlingen, at MBD-smitte opstår gennem komplekse interaktioner mellem biotiske aktører (f.eks. personale, patienter og myg) og abiotiske aktører (f.eks. institutioner, vinduer og solstråling). Arkivstudier af vektorkontrol og hospitalsudvikling i Zanzibar viser, at begge historisk er blevet implementeret top-down, hvilket har begrænset slutbrugernes involvering. Denne afhandling anvender i stedet fire følgende analytiske processer for bedre at forstå, hvordan disse aktørgrupper interagerer i de undersøgte hospitaler, og for at identificere specifikke smittefoci, som interventionerne derefter målrettes mod:

1. Litteraturgennemgang (Artikel 1): Et scoping review har identificeret 72 risikofaktorer i bygninger og landskaber og synliggjort mulige 84 interventioner fordelt på fem domæner i det byggede miljø: arkitektonisk planlægning, landskabsdesign, vand og sanitet, bygningskomponenter og interiør samt brugere af bygningen. Disse blev samlet i en open source-database, som direkte informerede udviklingen af interventioner på de undersøgte hospitaler.

2. Miljømonitorering (Artikler 2 & 3): Entomologiske og arkitektoniske undersøgelser, understøttet af et omfattende netværk af indeklimasensorer i 25 hospitalsrum, analyserede sammenhænge mellem miljøforhold og myggenes adfærd. Målingerne viste, at de fleste sengeafdelinger ikke levede op til ASHRAE 55-standarder for termisk komfort, og at u hensigtsmæssige forhold faldt sammen med øget åbning af døre i aften- og nattetimerne, hvor bidaktiviteten for *Culex* og *Anopheles*-myg er højest. Rum med aircondition havde høje CO₂-koncentrationer, som tiltrækker myg. En komparativ undersøgelse viste, at ældre, passivt afkølede "cottage hospital"-afdelinger i gennemsnit var 2,8 °C køligere end de nyere afdelinger, hvilket demonstrerer, at klimatiske designgreb såsom



Det
Kongelige
Akademi

Arkitektur
Design
Konservering



Det
Kongelige
Akademi

Arkitektur
Design
Konservering

skyggegivende udhæng, tværv ventilation og beplantning kan reducere risikofaktorer betydeligt.

3. Co-creation (Artikel 4): 16 workshops med over 80 deltagere (hospitalspersonale, patienter og specialister, herunder offentlige hospitalsarkitekter) undersøgte, hvordan interessenters behov og brugsmønstre påvirker myggesporening, og hvordan identificerede risici (f.eks. overbelægning og ynglesteder i vand- og affaldssystemer) kan håndteres ved at tilpasse tiltag fra litteraturstudiet.

4. Kontekstuel material praksis (Artikel 5): Lokale byggemetoder og materialer blev undersøgt for at forstå, hvordan den lokale byggeskik påvirker smitterisiko. Dette omfattede brug af lokalt producerede byggematerialer af affaldsplast og glas, som typisk danner ynglesteder i udendørs møblement og skyggesteder. Desuden, anvendes botaniske undersøgelser for at identificere egnede hjemmehørende planter der kan skabe skygge i venteområder.

Samlet set dannede disse grundlag for en række implementeret interventioner på hospitalerne, herunder:

- sikring af vand- og sanitetssystemer mod myg for at forhindre indendørs yngel
- forbedret affaldshåndtering for at reducere ynglesteder i kasserede beholdere
- ændringer i sengeafdelinger for at forbedre komfort og reducere behovet for at åbne døre og vinduer
- etablering af skyggegivende beplantning og udendørs venteområder for at reducere trængsel indendørs

Efter implementeringen af første runde af interventioner blev der gennemført en seks måneders evaluering der viste en række sociale, sundhedsmæssige og trivselsmæssige gevinster. Herunder øget brug af udendørs venteområder, mindre trængsel, roligere atmosfære og lavere overfladetemperaturer på vægge. Co-recreation-processen førte også til, at hospitalspersonale selv identificerede yderligere ynglesteder og iværksatte forebyggende tiltag, mens offentlige hospitalsarkitekter begyndte at integrere forebyggende designprincipper i nye udvidelser. Fremtidige evalueringer vil sammenligne miljø- og entomologiske data før og efter interventionerne samt kvalitative brugeroplevelser, når MBD-Free-projektet afsluttes i 2027.

De fire distrikthospitaler er en del af den største udbygning af den offentlige sundhedsinfrastruktur i Zanzibars nyere historie og har næsten tredoblet kapaciteten på to år. Alligevel er der behov for tusindvis af ekstra senge frem mod 2030 for at opfylde mål om universel sundhedsdækning, en lille del af de anslåede 2,5 millioner senge, der vil være nødvendige i Afrika syd for Sahara. Afhandlingen bidrager med teoretiske, metodiske og praksisbaserede indsigter i, hvordan design kan mitigere MBD relaterede smitterisici og integrere forebyggende tiltag i både eksisterende og fremtidige sundhedsbyggerier. Endvidere kan

samskabelse, der involverer slutbrugere, bidrage til yderligere sociale, sundheds- og trivselsmæssige sidegevinster.

Studiet er en del af det bredere MBD-Free-projekt, et tværfagligt femårigt forskningsinitiativ finansieret af Danida. Dette samarbejde involverer State University of Zanzibar, Kilimanjaro Clinical Research Institute, Kilimanjaro Christian Medical University College, Zanzibar Malaria Elimination Programme, Directorate of Preventive Services and Health Promotion Ministry of Health Zanzibar, SACIDS Foundation for One Health, University of Agriculture, Instituto Nacional de Saúde, University of Copenhagen samt The Royal Danish Academy.



Det
Kongelige
Akademi

Arkitektur
Design
Konservering