

Zero Carbon Gebäude International

Begleitmessung und
Auswertung

R. Wimmer
S. Eikemeier



Berichte aus Energie- und Umweltforschung

34/2017

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

www.NachhaltigWirtschaften.at

Titelbild: Zero Carbon Resort (Quelle: Dr. Robert Wimmer)

Zero Carbon Gebäude International

Begleitmessung und Auswertung

Dr. Robert Wimmer
GrAT – Gruppe Angepasste Technologie

DI DI(FH) Sören Eikemeier
GrAT – Gruppe Angepasste Technologie

Wien, August 2017

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des bmvit publiziert und elektronisch über die Plattform www.HAUSderZukunft.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	5
2	Zusammenfassung	6
3	Summary	7
4	Einleitung	8
5	Gebäudedesign und Ausstattung	9
6	Messprogramm Zero Carbon Building.....	12
6.1	Messkonzept	12
6.2	Wetterstation	12
6.3	Langzeitmessung Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte	13
6.4	Kurzzeitmessung Oberflächentemperaturen.....	16
6.5	Kurzzeitmessung thermischer Komfort.....	17
7	Messergebnisse.....	20
7.1	Klimadaten	20
7.2	Energiekonzept	20
7.3	Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte.....	23
7.4	Oberflächentemperaturen.....	25
7.5	Thermischer Komfort.....	26
7.6	Schlussfolgerung messtechnische Begleituntersuchung	28
8	Austrian Green Building Star.....	30
9	Konzeptentwicklung Demonstrationsgebäude in Nepal	31
9.1	Ausgangssituation	31
9.2	Projektlage	32
9.3	Grundlagen für eine erdbebensichere Gebäudeplanung	34
9.4	Historische Adaptierungen	39
9.5	Designentwurf Nepal	41
10	Netzwerkaufbau und Dissemination.....	48
10.1	Workshops und Kooperationen	48
10.2	Universitäten	50
10.3	Besucherzentrum	51
10.4	Konferenzen und Publikationen.....	52
10.5	Stakeholder Treffen für Projektanbahnung Nepal.....	53
11	Schlussfolgerungen und Ausblick	55
12	Literatur	57

2 Zusammenfassung

Die Ziele des Projektes „Zero Carbon Gebäude International“ sind eine messtechnische Analyse des von der GrAT errichteten Zero Carbon Demonstrationsgebäudes in Puerto Princesa, Philippinen vor dem Hintergrund des Austrian Green Building Stars, eine Ableitung möglicher Gebäudetypen für einen erdbebensicheren Wiederaufbau in Nepal sowie eine internationale Dissemination von österreichischem Know-how und Technologie, die aus den vom BMVIT initiierten Forschungsaktivitäten entstanden sind.

Für eine Analyse der Performance des Zero Carbon Buildings hinsichtlich des thermischen Komforts wurde ein umfangreiches Messsystem verwendet, unterteilt in ein Langzeit- und Kurzzeit-Monitoring.

Ein erster Schritt zur Analyse des thermischen Komforts im Gebäude wurde mit einem Satz von Sensoren durchgeführt, die die Lufttemperatur und die relative Feuchte in den Räumen messen sowie einem mobilen Gerät, das die Oberflächentemperatur ausgewählter Bauteile einschließlich Wände, Böden und Decken misst. Mögliche Zonen von lokalem thermischem Unbehagen sowie eine Korrelation zwischen den Innen- und Außenklimabedingungen wurden identifiziert. Zur Ermittlung des lokalen Außenklimas wurde eine Wetterstation auf dem Dach für die Messung der Parameter Lufttemperatur, relative Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung, die Menge an Regen sowie die solare Einstrahlung installiert.

In einem zweiten Schritt erfolgte die Bewertung des thermischen Komforts mit einem mobilen Messkit mittels der adaptierten PMV (Predicted Mean Vote) und PPD (Predicted Percent of Dissatisfied) Methode.

Ausgehend von der Analyse des Gebäudes wurde im Anschluss die Zertifizierung des Gebäudes mit dem Austrian Green Building Star initiiert.

Bei der Ableitung von möglichen Übertragungen der Prinzipien (S-House und Zero Carbon Resorts Demonstrationsgebäude) auf andere Länder wurde im zweiten Teil des Projektes ein adaptiertes Gebäudekonzept für das Zielland Nepal entwickelt.

Vor dem Hintergrund des Wiederaufbaus nach dem großen Erdbeben von 2015 lag ein Fokus dabei zusätzlich auf einer erdbebensicheren Gebäudekonstruktion.

Im Rahmen der internationalen Dissemination wurden die entwickelten Designstrategien und Konzepte und damit auch die Ergebnisse österreichischer Forschungsaktivitäten und Technologieprogramme zahlreichen Stakeholdern bei Workshops und Konferenzen präsentiert.

3 Summary

The goal of this project “Zero Carbon Gebäude International” are the evaluation and analysis of the Zero Carbon Demonstration Building, realised by GrAT in Puerto Princesa, Philippines, taking the Austrian Green Building Star into consideration, the derivation of usable and earthquake-resistant building types for the reconstruction in Nepal and to support the dissemination of Austrian expertise and technologies in the field of green buildings developed in projects initialised by the BMVIT.

To analyse the performance of the ZCR cottage in terms of thermal comfort, a comprehensive set of different sensor types is used, subdivided into a long-term monitoring and a short-term monitoring.

A first step to analyse the thermal comfort in the building is done with a set of sensors that measure the air temperature and the relative humidity in the rooms as well as with a mobile device that measures the surface temperature of selected building elements including walls, floors and ceilings. By this, possible incidents of local discomfort should be detected, and a correlation between indoor and outdoor climate conditions can be found. For the local outdoor climate a weather station was set up on the roof for monitoring the parameters air temperature, relative humidity, wind speed and direction, the amount of rain as well as the solar radiation.

In a second step, evaluation of the thermal comfort is done with a mobile measurement kit using an adapted PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percent of Dissatisfied) method.

Based on the analysis results of the monitoring also the certification process for the Austrian Green Building Star was initialised.

Regarding the transfer of design principles, applied at the S-House as well as at the Zero Carbon Resort Demonstration Building, to other target countries, a modified building concept for a project location in Nepal was developed in the second part of this project.

Keeping the reconstruction in Nepal triggered by the cataclysmic earthquake in 2015 in mind, an additional focus was therefore also on shake-proofed constructions.

Within the scope of a dissemination, the developed design strategies and concepts and thus also the results of Austrian research activities and technology programs were presented to numerous stakeholders at workshops and conferences.

4 Einleitung

In Entwicklungs- und Schwellenländern, insbesondere im asiatischen Raum entwickelt sich der Bausektor besonders dynamisch. Sowohl in städtischen als auch in ländlichen Gebieten entstehen zahlreiche neue Gebäude für Wohn- aber auch für gewerbliche Zwecke (z.B. Tourismus). Diese Gebäude entsprechen oft nicht dem letzten Stand der Technik und erzeugen einen übermäßig hohen Energieverbrauch gerade in Ländern die ohnehin bereits jetzt mit Energieknappheit zu kämpfen haben und darüber hinaus von den negativen Auswirkungen des Klimawandels überproportional getroffen werden. Trotz grundsätzlicher Bekenntnisse zu Effizienzmaßnahmen und der Nutzung regenerativer Energiequellen fehlt ein fundiertes Know-how zur praktischen Umsetzung. Um diese Lücke zu schließen sind gut dokumentierte Vorzeigebispiele erforderlich, die konsequent an die jeweiligen geografischen, sozioökonomischen und kulturellen Bedingungen in den einzelnen Ländern angepasst sind.

Ein derartiges Vorzeigebäude ist z.B. das Zero Carbon Building, welches mit lokal verfügbaren nachwachsenden Rohstoffen kombiniert mit höchster Energieeffizienz und einem zeitgemäßen Design auf den Philippinen errichtet worden ist.

Um eine entsprechend breite Akzeptanz für die entwickelten Lösungen zu schaffen, ist es erforderlich die Gebäudeperformance über einen längeren Zeitraum hinweg zu vermessen und die Messungen auszuwerten. Dabei können wertvolle Informationen für andere Gebäudetypen sowie für ähnliche Vorzeigelösungen in anderen Regionen gewonnen werden. Der Einsatz von neuesten Technologien in Kombination mit traditionellen Materialien hilft dabei die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen einzuhalten und den Weg zu ebnen für österreichische Planungsleistungen und Schlüsselkomponenten. Bei der Ableitung möglicher Gebäudetypen für die Übertragbarkeit und Anwendung in andere Zielregionen steht besonders Nepal im Fokus. Aufgrund der durch Naturkatastrophen zerstörten Gebäude besteht dort ein enormer Bedarf an Aktivitäten für den Wiederaufbau, wodurch sich eine große Chance für eine Richtungsänderung hin zur Verwendung von erneuerbaren Ressourcen und zu einer Steigerung der Effizienz ergibt. Sowohl die Philippinen als auch Nepal gehören zu den Ländern mit der höchsten Gefährdung durch den Klimawandel, wodurch die Bedeutung von geeigneten regionalen Lösungen bei denen vorhandene Ressourcen optimal genutzt und intelligent mit neuesten Technologien kombiniert werden noch verstärkt wird.

Vor diesem Hintergrund werden Konzepte für die Umsetzung weiterer Demonstrationsgebäude erarbeitet sowie Know-how und Technologien aus dem Programm Haus der Zukunft auf internationaler Ebene verbreitet.

5 Gebäudedesign und Ausstattung

Das übergeordnete Ziel dieses Prototypengebäudes ist es, ein innovatives Gebäudekonzept zu demonstrieren, welches die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes deutlich reduziert und nur ein Minimum an grauer Energie benötigt. Um eine optimale Leistung des Gebäudes zu erreichen, wurde es durch die Kombination von regionalen Baustoffen und Bautechniken mit einer modernen Architektur basierend auf einer Analyse traditioneller Gebäudetypen und verschiedener Strategien des passiven Kühlens entworfen [1].



Abbildung 1: Zero Carbon Building

Das Gebäude selbst (siehe Abbildung 1) ist in Leichtbauweise mit einer Gesamtfläche von 114,42 m² errichtet und beinhaltet einen Hauptraum (mit Wohn- und Essbereich), ein Schlafzimmer sowie ein Badezimmer. Als Hauptbaumaterial wurde lokal verfügbarer Bambus in verschiedenen Formen und Anwendungen eingesetzt, aber auch andere traditionelle Baumaterialien wurden verwendet wie z.B. Rattan oder Anahaw Blätter in Kombination mit Bambusspaltschindeln für das schmetterlingsförmige Dach. Im Gesamtkonzept des Gebäudes wurden eine Reihe von Schlüsselinnovationen angewendet, die passive Kühlprinzipien umsetzen. Das netzunabhängige Versorgungssystem kombiniert Photovoltaik-Paneele, thermische Solarenergie, ein innovatives Tageslichtsystem mit röhrenförmigen Solartubes, einen indirekt betriebenen Solarkocher sowie ein Regenwassersammel- und Abwasserbehandlungssystem.

Eine der wichtigsten passiven Kühlstrategien ist natürlich die Verschattung. Wie in Abbildung 1 ersichtlich, wurde das Gebäude mit einem nach allen Himmelsrichtungen überhängenden Dach entworfen, um eine Überhitzung des Gebäudes durch direkte Sonneneinstrahlung zu verhindern.

Ein zweites implementiertes Konzept ist die natürliche Belüftung. An allen Seiten des Gebäudes wurden an strategischen Positionen verstellbare Öffnungen wie Fenster, Klappen oder Türen installiert, um den

Luftstrom durch das Gebäude zu steuern. Für diese Strategie ist die Orientierung des Gebäudes gleichermaßen wichtig, nicht nur wegen des Sonnenverlaufs, sondern auch wegen der wechselnden Windrichtungen in der trockenen und feuchten Jahreszeit. In der trockenen Jahreszeit werden große Gebäudeöffnungen an der Nordostseite benötigt, wenn der Wind aus dem Nordosten kommt, während in der Regenzeit Fensterläden in der südwestlichen Ecke des Gebäudes erforderlich sind.



Abbildung 2: Fensterläden an der südwestlichen Gebäudeseite (links); große Öffnungen an der Ostseite (rechts)

Ein weiteres wichtiges Designelement ist die Errichtung des Gebäudes auf Stelzen. Durch den Abstand der Gebäudekonstruktion vom Boden ergeben sich hervorragende Bedingungen für eine natürliche Belüftung. Punktfundamente, die durch spezielle Stahlgelenke mit den Bambusstangen der Tragkonstruktion verbunden sind, ermöglichen die Verwendung einer belüfteten Bodenplatte aus nachwachsenden Rohstoffen. Um die Wirkung dieses Kühleffektes zu maximieren wurde die Bodenplatte mit mehreren Lüftungsschlitzen an ausgewählten Positionen entlang der Mittelwand und den Außenwänden des Hauptraumes und des Schlafzimmers versehen.



Abbildung 3: Punktfundamente mit Stahlverbindungen (links); thermografische Bild der Lüftungsschlitze (rechts)

Ein weiterer Vorteil dieser Fundamentart ist, dass die Menge an Beton im Vergleich zu einer herkömmlichen Bodenplatte deutlich minimiert werden konnte, ebenso wie die Größe der versiegelten Bodenfläche, was positiv für das Mikroklima ist.

Eine weitere Strategie des passiven Kühlens für das Gebäudedesign ist die Nutzung von thermischer Masse in Form einer Stampflehmwand im Zentrum des Gebäudes. Dadurch werden Oberflächen- und

Lufttemperatur beeinflusst, insbesondere die Spitzentemperaturen während der heißen Tageszeit werden so abgemildert.



Abbildung 4: Stampflehmwand (links); thermografisches Bild niedrigerer Spitzentemperaturen (rechts)

Die Lüftungsschlitze, die sich vor der Mittelwand befinden, helfen die thermische Masse nachts abzukühlen. Auch die Windrichtung wurde dabei berücksichtigt: Neu angelegte, mit Kletterpflanzen bewachsene Windfänge helfen dabei die kühle Luft zu kanalisieren und den Kühleffekt zu maximieren. Diese Windfänge befinden sich entsprechend den Hauptwindrichtungen für einen kühlenden Effekt über das ganze Jahr an der nordöstlichen und südwestlichen Ecke außerhalb vom Gebäude. Eine weitere Kühlstrategie ist der Aufbau des Daches. Es handelt sich um eine Konstruktion aus mehreren Schichten, bestehend aus Anahaw-Blättern, von einer lokal vorzufindenden Rundblattpalme, einer laminierten Aluminiumfolie zur Reflexion der Sonneneinstrahlung sowie „Tadtad“-Schindeln (aus Bambus) als abschließendes Deckmaterial. Diese Kombination minimiert die Oberflächentemperatur der an der Innenseite der Decke deutlich und erhöht so den thermischen Komfort im Gebäude.



Abbildung 5: Neuartige Dachkonstruktion bestehend aus traditionellen und modernen Baumaterialien

Die einzigen aktiven Kühlgeräte im gesamten Gebäude sind 2 energieeffiziente Niedervolt-Ventilatoren an der Decke im Hauptraum und im Schlafzimmer, die je nach Einstellung nur ein Minimum von 5 W bis maximal 18 W für den Betrieb während der heißen Tage benötigen [2].

6 Messprogramm Zero Carbon Building

6.1 Messkonzept

Für die Analyse des thermischen Komforts im Zero Carbon Building wurde ein umfangreiches Messsystem mit unterschiedlichen Sensortypen verwendet, unterteilt in ein Langzeit- und Kurzzeit-Monitoring.

Ein erster Schritt zur Analyse des thermischen Komforts im Gebäude wurde mit einem Satz von Sensoren durchgeführt, die die Lufttemperatur und die relative Feuchte in den Räumen messen sowie einem mobilen Gerät, das die Oberflächentemperatur ausgewählter Bauteile einschließlich Wände, Böden und Decken misst. Dabei sollten auch Zonen mit verringertem thermischen Komfort und eine Korrelation zwischen den Innen- und Außenklimabedingungen identifiziert werden. Für die Ermittlung des lokalen Außenklimas wurde eine Aeron-Wetterstation auf dem Dach installiert, dass die Parameter Lufttemperatur, relative Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung, die Menge an Regen sowie die solare Einstrahlung misst.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Bewertung des thermischen Komforts mit einem mobilen Messkit mittels der adaptierten PMV (Predicted Mean Vote) und PPD (Predicted Percent of Dissatisfied) Methode.

6.2 Wetterstation

Es wurde eine Wetterstation von Aeron [3] mit integrierten Sensoren von Davis Instruments zur Messung aller wichtigen Klimadaten verwendet. Gemessen werden: Lufttemperatur (Thermistor, -40 bis 65 °C), rel. Feuchtigkeit (Filmkondensatorelement, 1 bis 100 %), Windrichtung (Windfahne und Potentiometer, 0° bis 360°) und Windgeschwindigkeit (Festkörper-Magnetsensor, 3 bis 282 km/h), die Regenmenge (Kippeimer) sowie die globale Strahlung, die Summe der direkten und diffusen Komponenten der Sonnenbestrahlung (Solarpyranometer). Die Wetterstation wird von einem 5 W PV Solarpaneel angetrieben und hat integrierte Batterien zur Energiespeicherung.



Abbildung 6: Wetterstation auf dem Dach des Zero Carbon Building

Alle Sensoren der Wetterstation sammeln die Messdaten in einem synchronisierten Intervall von 10 Minuten, die zum einen vor Ort auf einer Mini-SD-Karte gespeichert werden und bei Bedarf lokal ausgelesen werden können. Zum anderen ist die Wetterstation aber auch über eine direkte rs232-Verbindung an den Monitoring Server angeschlossen. Die Ausgabe der Daten erfolgt über einen CSV Export.

6.3 Langzeitmessung Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte

Der Sensirion SHT75 Sensor (siehe Abbildung 7, links) ist ein kombinierter Feuchtigkeits- (0 bis 100 %) und Temperatursensor (-40 bis 123,8 °C) mit einer hohen Langzeitgenauigkeit von ± 3 % für die rel. Feuchtigkeit sowie $\pm 0,4$ K für die Temperatur und verfügt über eine digitale Schnittstelle. Während ein kapazitives Sensorelement für die Bestimmung der rel. Feuchtigkeit verwendet wird, misst ein Band-Gab-Sensor die Temperatur.

Darüber hinaus können auch die Taupunkttemperaturen ermittelt werden. Diese werden nicht direkt gemessen, sondern können aus den Werten der Lufttemperatur und der rel. Feuchtigkeit für einen Temperaturbereich zwischen -40 und 50 °C berechnet werden [4].

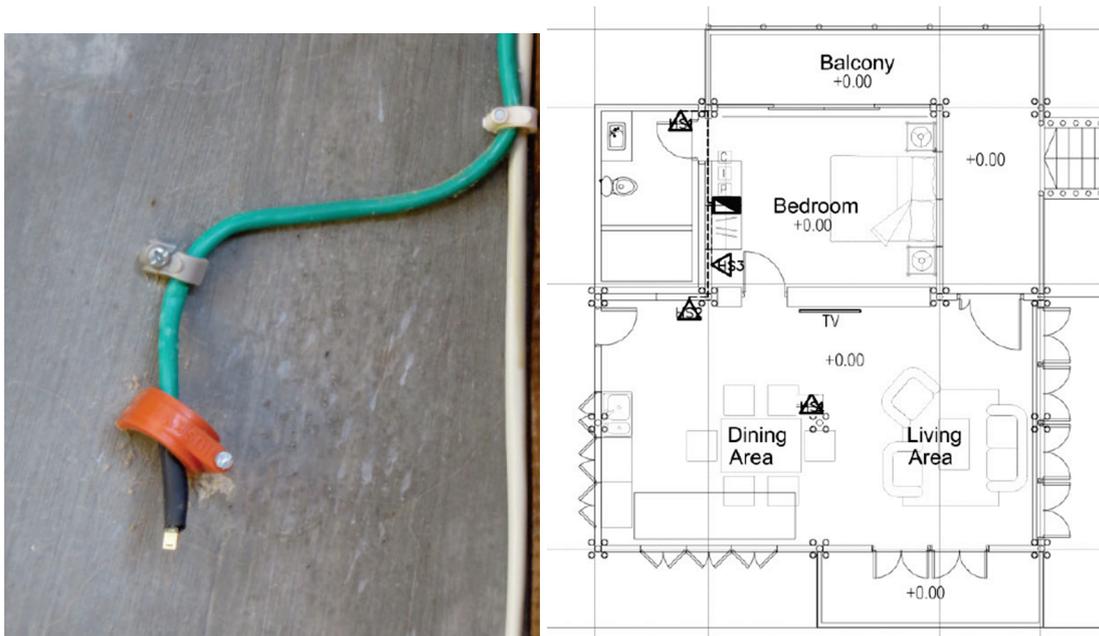


Abbildung 7: Sensirion SHT75 Sensor (links); Messpunkte der SHT75 Sensoren (rechts)

Die Sensoren sind in allen 3 Räumen installiert (siehe Abbildung 7, rechts). Sie befinden sich im Hauptraum an der Nordwand zum Badezimmer (HS2) und unter der Decke (HS4), im Schlafzimmer an der Westwand zum Badezimmer (HS3) und im Badezimmer an der Nordwand nach außen (HS1). An den Positionen HS1, HS2 und HS3 sind immer 2 Sensoren installiert, einer in einer Höhe von 10 cm über dem Boden (im Bereich des Knöchels) und einer in einer Höhe von 160 cm über dem Boden (im Bereich des Kopfes), um nicht nur die Lufttemperatur und die rel. Feuchtigkeit im Raum zu messen, sondern um auch die vertikale Lufttemperaturdifferenz innerhalb der Räume zu analysieren.

Tabelle 1: Messpunkte der Sensirion SHT75 Sensoren

Sensor	Controller	Location	Position	Parameter
HS1_1	C1	Bathroom	10 cm above floor; north wall to outside; 12 cm to corner	Temperature Humidity Dew point
HS1_2	C1	Bathroom	160 cm above floor; north wall to outside; 12 cm to corner	Temperature Humidity Dew point
HS2_1	C3	Main room	10 cm above floor; north wall to bathroom; 10 cm to corner	Temperature Humidity Dew point
HS2_2	C3	Main room	160 cm above floor; north wall to bathroom; 10 cm to corner	Temperature Humidity Dew point
HS3_1	C4	Bedroom	10 cm above floor; west wall to bathroom; 20 cm to end of block wall	Temperature Humidity Dew point
HS3_2	C4	Bedroom	160 cm above floor; west wall to bathroom; 20 cm to end of block wall	Temperature Humidity Dew point
HS4	C4	Main room	410 cm above floor; under ceiling; 40 cm northwest of the fan	Temperature Humidity Dew point

Ergänzend zu den SHT75 Sensoren wurden 4 drahtlose AM2303 Sensoren von Aosong Electronics Co. Installiert (siehe Abbildung 8, links), welche die rel. Feuchtigkeit (0 bis 100 %) mit einem Polymer-Feuchtigkeitskondensatorelement als auch die Temperatur (-40 bis 125 °C) mit einem DT18B20-Element über einen digitalen Ausgang ermittelt. Die Messgenauigkeit des Sensors beträgt $\pm 5\%$ für die rel. Feuchtigkeit und $\pm 0,2\text{ K}$ für die Temperatur [5].

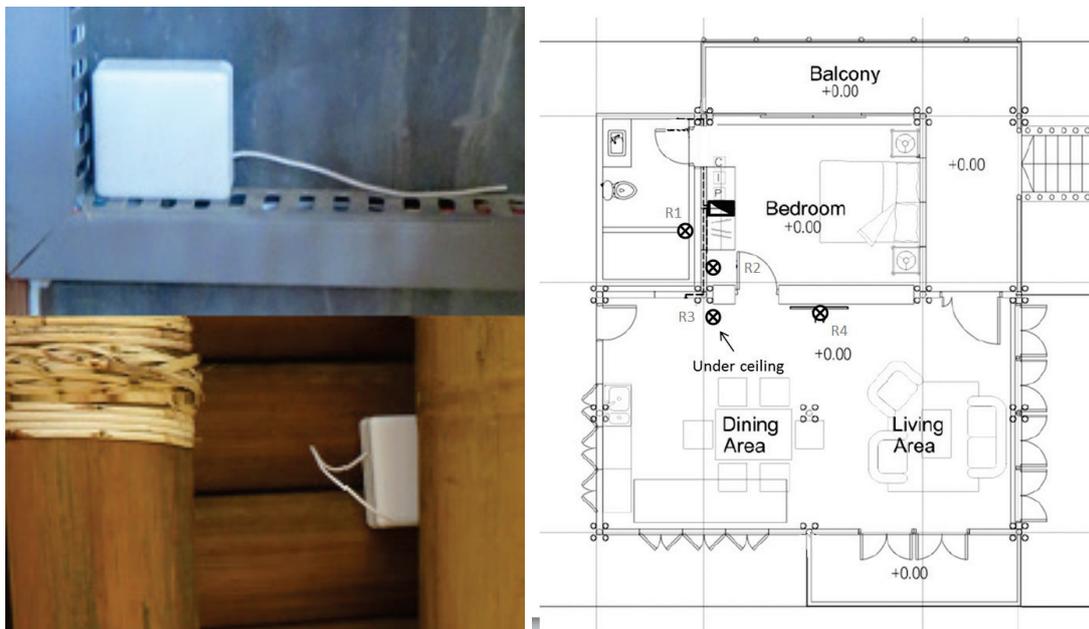


Abbildung 8: AM2303 Sensoren (links); Messpunkte der Am2303 Sensoren (rechts)

Die drahtlosen AM2303 Sensoren zur Messung der Lufttemperatur und rel. Feuchtigkeit befinden sich ebenfalls in allen 3 Räumen (siehe Abbildung 8, rechts), im Badezimmer an der Ostwand zum Schlafzimmer (RA1), im Schlafzimmer an der Westwand zum Badezimmer (RA2) und im Hauptraum unter der Decke (RA3) sowie vor der Stampflehmwand (RA4). Die Sensoren sind in verschiedenen Höhen zwischen 120 und 200 cm als auch unter der Decke platziert (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Messpunkte der AM2303 Sensoren

Sensor	Controller	Location	Position	Parameter
RA1	-	Bathroom	200 cm above floor; east wall to bedroom; 45 cm to door	Temperature Humidity
RA2	-	Bedroom	140 cm above floor; west wall to bathroom; 5 cm to end of block wall	Temperature Humidity
RA3	-	Main room	380 cm above floor; under ceiling; 40 cm south to door	Temperature Humidity
RA4	-	Main room	120 cm above floor; centre of clay wall	Temperature Humidity

6.4 Kurzzeitmessung Oberflächentemperaturen

Ergänzend zu der Langzeitmessung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte werden auch die Temperaturen ausgewählter Oberflächen im Gebäude mit einem mobilen Infrarot-Thermometer gemessen mit dem Ziel einer unterstützenden Bewertung des Gebäudes in Bezug auf die Wahrnehmung von lokalem thermischen Unbehagen hervorgerufen durch z.B. eine asymmetrische Strahlung innerhalb einzelner Räume.

Die Messung der Oberflächentemperaturen erfolgt mit dem Infrarot-Thermometer IR 260-8S der Firma VOLTCRAFT (siehe Abbildung 9, links). Dieses berührungslose Messgerät hat eine Genauigkeit von ± 2 K für den Temperaturbereich zwischen 0 °C und 260 °C.

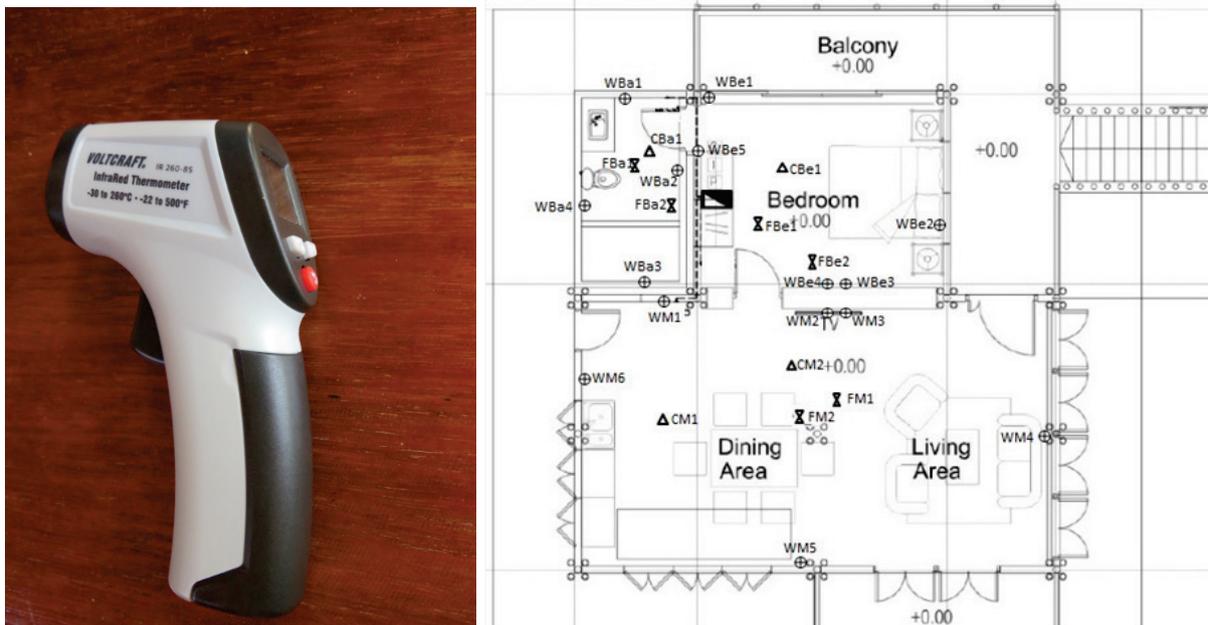


Abbildung 9: IR 260-8S (links); Messpunkte für die Oberflächentemperaturen (rechts)

Die Messungen werden an ausgewählten Punkten der Innen- und Außenwände, der Fußböden und der Decken des Bades, des Schlafzimmers und des Hauptraums durchgeführt (siehe Abbildung 9, rechts und Tabelle 3).

Tabelle 3: Messpunkte und Materialien der gemessenen Oberflächentemperaturen

Point	Building element	Position	Surface
FBa1	Floor	Centre	Concrete
FBa2	Floor	Entrance to shower	Carpet (mat)
WBa1	North wall to outside	160 cm above floor	Concrete
WBa2	East wall to bedroom	160 cm above floor	Concrete
WBa3	South wall to main room	160 cm above floor	Concrete
WBa4	West wall to outside	160 cm above floor	Concrete
CBa1	Ceiling	Under ceiling; close to sink of roof	Bamboo
FBe1	Floor	Centre	Bamboo (engineered)
FBe2	Floor	In front of rammed earth wall	Bamboo (Anibong)
WBe1	North wall to outside	160 cm above floor	Bamboo

WBe2	East wall to outside	160 cm above floor	Bamboo
WBe3	Rammed earth wall to main room	160 cm above floor	Clay
WBw4	South wall to main room	230 cm above floor	Bamboo
WBe5	West wall to bathroom	160 cm above floor	Concrete
CBe1	Ceiling	Under ceiling, centre of the room	Anahaw leaves
FM1	Floor	Centre	Bamboo (engineered)
FM2	Floor	Centre, next to table	Bamboo (mat)
WM1	North wall to bathroom	160 cm above floor	Concrete
WM2	Rammed earth wall to bedroom	230 cm above floor	Clay
WM3	North wall to bedroom	160 cm above floor	Bamboo
WM4	East wall to outside	160 cm above floor	Bamboo
WM5	South wall to outside	160 cm above floor	Bamboo
WM6	West wall to outside	160 cm above floor	Bamboo
CM1	Ceiling	Under ceiling; average roof height	Anahaw leaves
CM2	Ceiling	Under ceiling; close to sink of roof	Bamboo

Da das verwendete Infrarot-Thermometer ein mobiles Messgerät ohne Datenlogger ist, wurde die Messung nicht kontinuierlich durchgeführt, sondern an ausgewählten Tagen mit einem Intervall von ca. 1 Stunde.

6.5 Kurzzeitmessung thermischer Komfort

Der thermische Komfort kann nicht allein über die Temperatur definiert werden, da er in Wirklichkeit durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst wird und auch eine subjektive Wahrnehmung ist [6]. Der thermische Komfort eines Raumklimas kann mittels PMV (Predicted Mean Vote) und PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) nach den Standards ASHRAE [7] oder DIN EN ISO 7730 [8], [9] bestimmt werden.

Die ersten beiden Parameter, die für die Bestimmung benötigt werden, sind der Bekleidungsfaktor und die metabolische Rate. Diese sind iterativ und können entsprechend den Standards ausgewählt werden. Abhängig von den angenommenen Aktivitäten wie Schlafen (Schlafzimmer), Sitzen (Hauptraum) und Stehen (Badezimmer, Hauptraum) können definierte Werte ausgewählt werden. Gleiches gilt für die Auswahl verschiedener Kleidungsstücke.

Für diese Messung wird keine schwere Arbeit in Betracht gezogen, da die primäre Funktion des Gebäudes, die eines Hotel Resorts ist, in der sich die Gäste zur Entspannung und Erholung aufhalten. In Übereinstimmung mit den metabolischen Raten für die angenommenen Aktivitäten werden verschiedene Sätze von Kleidung definiert sowie Möbel für den Tag und die Nacht. Für die Schlafumgebung werden definierte Faktoren von Lin und Deng für häufig verwendete Bettsysteme in den Subtropen verwendet [10], [11].

Die anderen 4 Parameter - Lufttemperatur, relative Feuchte, mittlere Strahlungstemperatur und Luftgeschwindigkeit - zur Definition des Raumklimas müssen gemessen werden.

Für die Messungen wurden Sensoren der Firma Ahlborn verwendet. Der FHAD4641 ist ein kombinierter Sensor zur Bestimmung der Lufttemperatur und der relativen Feuchte mit einem kapazitiven

Sensorelement. Die Genauigkeit beträgt $\pm 0,3$ K bei 25 °C und $\pm 0,4$ K für den Temperaturbereich zwischen 10 und 40 °C, während es für die rel. Feuchtigkeit zwischen 10 und 90 % r.F. zu Abweichungen von $\pm 1,8$ % r.F. kommen kann. Zusätzlich kann auch der Luftdruck (700 bis 1100 mbar, Genauigkeit $\pm 2,5$ mbar für Temperaturen zwischen 0 und 65 °C) gemessen und der Taupunkt berechnet werden.

Für die Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur wurde das FPA805GTS Globe Bulb Thermometer verwendet. Dieses besteht aus 2 Teilen, einem schwarzen Körper in Form einer Kugel und einem Temperatursensor, der in dessen Mitte positioniert ist, um einen Durchschnittswert der Strahlungstemperatur der lokalen Umgebung (-40 bis 200 °C) zu erhalten. Die Kugel ist aus Kupfer und hat einen Durchmesser von 150 mm.

Für die Messung der Luftgeschwindigkeit wird das omnidirektionale Thermo-Anemometer FVA605TA50 verwendet. Dieses hat einen Miniatur-Thermistor und einen Präzisionswiderstand zur Erfassung der Luftströmungsgeschwindigkeit für den Bereich zwischen $0,15$ und 5 m/s bei Betriebstemperaturen von mindestens 0 bis maximal 30 °C [12].



Abbildung 10: Mess-Kit im Badezimmer (links); Mess-Kit im Schlafzimmer (rechts)

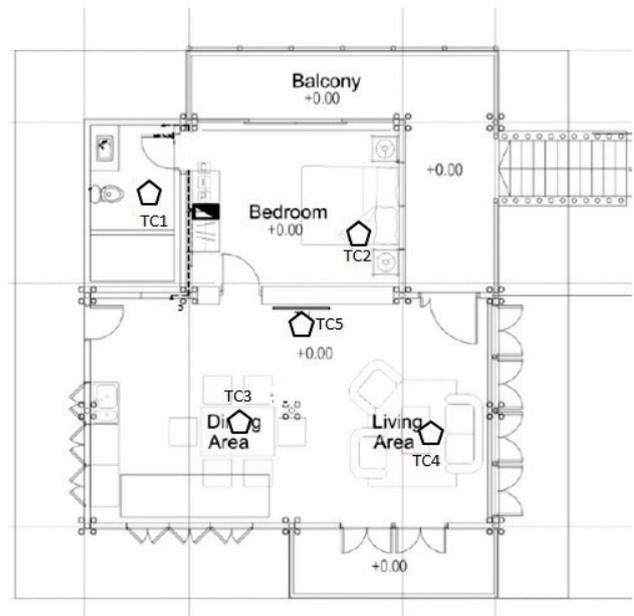


Abbildung 11: Ahlborn Mess-Kit im Wohnzimmer (links), Messpunkte für PMV/PPD (rechts)

Für die Bestimmung des thermischen Komforts wurden fünf Positionen ausgewählt, welche die am meisten genutzten Bereiche im Gebäude repräsentieren. Diese sind das Zentrum des Badezimmers, das Bett im Schlafzimmer (Kopfbereich), der Essbereich, der Couchbereich und die Mitte des Hauptraumes. Während der Kurzzeitmessung wurden zusätzlich die Einstellungen aller beeinflussenden Parameter wie Türen, Fenster und Ventilatoren dokumentiert.

Tabelle 4: Messpunkte für die PMV/PPD Bestimmung

Point	Location	Position
TC1	Bathroom	Centre, 160cm above floor
TC2	Bedroom	Bedhead next to the rammed earth wall, 100 cm above floor
TC3	Main room	Dining area, 120 cm above floor
TC4	Main room	Couch area, 100 cm above floor
TC5	Main room	Centre, 160cm above floor

7 Messergebnisse

7.1 Klimadaten

Das Zero Carbon Building befindet sich in Irawan, einem äußeren Bezirk von Puerto Princesa auf Palawan, einer Provinz im Südwesten der Philippinen. Die genauen Koordinaten des Gebäudes liegen bei 9.78° Breite, 118.67° Länge und einer Höhe von 26 m [13].

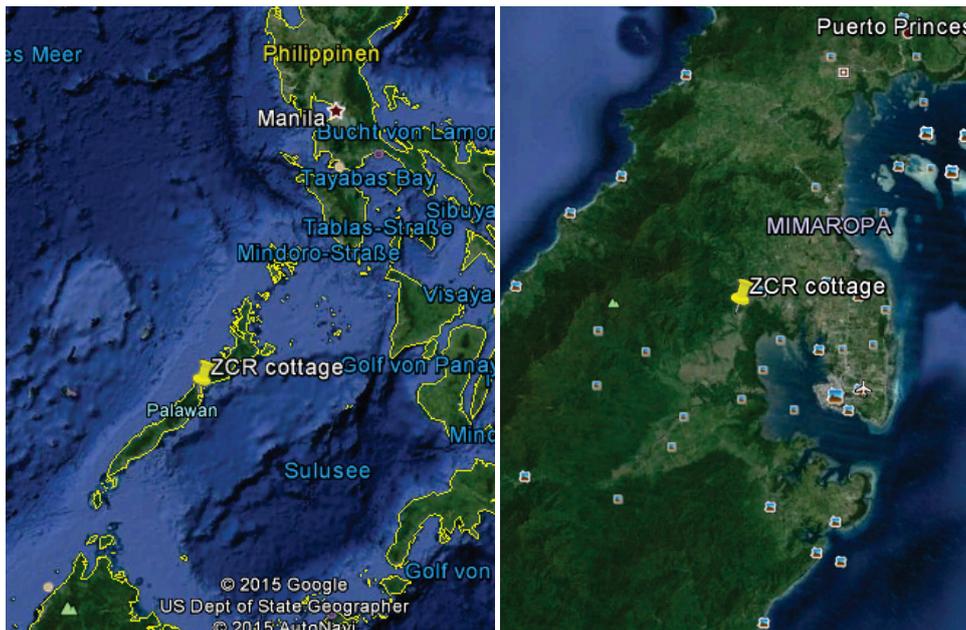


Abbildung 12: Lage des Zero Carbon Building (google earth)

Mit durchschnittlichen monatlichen Lufttemperaturen zwischen 27,2 und 28,8 °C und durchschnittlichen monatlichen rel. Feuchten zwischen 77 und 84 % hat Puerto Princesa ein tropisches Klima mit einer trockenen und einer feuchten Jahreszeit.

Entsprechend der Weltklimakarte von Rudloff [14], ist Palawan selbst als Aw kategorisiert, was tropischer Sommerregen bedeutet. Die Trockenzeit in Puerto Princesa und Palawan beginnt im November und endet im Juni, während die Regenzeit Ende Juni beginnt und bis Oktober andauert.

Der Niederschlag verändert sich dann von weniger als 50 mm im Durchschnitt auf über 200 mm, aber mit der Verschiebung der Jahreszeiten ändert sich auch die Haupt- Windrichtung von Nordosten in der Trockenzeit auf Südwesten in der Regenzeit.

7.2 Energiekonzept

Das Zero Carbon Demonstrationsgebäude hat einen minimalen Verbrauch an grauer Energie über den gesamten Lebenszyklus, von der Herstellung der Materialien über die Nutzungsphase bis hin zum Rückbau und einer möglichen Wiederverwendung bzw. einem Recycling, aufgrund der maximalen Verwendung regionaler erneuerbarer Ressourcen. Darüber hinaus ist es dank eines bedarfsorientierten

Energiesystems auf Basis von Solarenergie zu 100 % energieautonom. Dieses System ist durch eine sorgfältige Berücksichtigung der im Gebäude benötigten Energiedienstleistungen definiert, wobei die Verbraucher- und Versorgerseite aufeinander abgestimmt sind.

Photovoltaikpaneele zusammen mit einem Wechselrichter und einem Laderegler sind die Quelle der elektrischen Energie für das gesamte Gebäude. Dieses System bietet eine stabile Leistung bei 220 V und läuft 24 Stunden am Tag. Es ist unabhängig vom örtlichen Stromnetz und nicht von den regelmäßigen Netzausfällen in der Gegend betroffen. Damit das System auch in der Nacht und während Zeiten mit einer geringeren solaren Einstrahlung durchgängig betrieben werden kann, wurde ein ausreichend großer elektrischer Pufferspeicher eingeplant. Die Batterien befinden sich unter der unterlüfteten Bodenplatte am kühlfsten Platz des Gebäudes um eine lange Lebensdauer und effiziente Ladezyklen zu gewährleisten.

Für die Beleuchtung unter Tags werden rohrförmige Solartubes verwendet. Sie fangen das natürliche Licht der Sonne durch eine Kuppel ein und leiten es über ein hochreflektierendes Rohr in der Decke weiter, wo das Licht durch einen Diffusor geht und so gleichmäßig im Raum verbreitet wird.

Auf diese Weise fällt kein Strombedarf während des Tages für die Beleuchtung dunklerer Bereiche des Gebäudes wie z.B. dem Badezimmer an. Darüber hinaus sind alle Lampen, die im ZCR Demonstrationsgebäude verwendet werden mit hoch effizienten LED (Light Emitting Diode) ausgestattet. Für die Wassererwärmung wird anstelle eines elektrischen Durchlauferhitzers, der typischerweise in dieser Region verwendet wird, ein lokal erzeugter Solarkollektor mit angeschlossenem Speichertank verwendet. Thermische Solarenergie wird jedoch nicht nur zum Heizen von Wasser, sondern auch zum Kochen eingesetzt. Ein speziell entworfener Solarkocher wandelt die Energie von direkter Sonnenstrahlung in Wärme von bis zu 200 °C um, welche in einem ergänzenden Speichersystem mittels Thermoöl als Wärmeträgermedium gespeichert wird. Dieser besondere Solarkocher kann daher auch nachts zum Kochen verwendet werden und führt zu einer deutlichen Reduzierung des Strom- bzw. LPG-Verbrauchs.

Um eine Autonomie für die Energieversorgung zu erreichen, wurde der Energiebedarf für sämtliche Verbraucher im Gebäude ermittelt und mit den typischen Verbräuchen eines vergleichbaren konventionell ausgestatteten Ferienhauses verglichen.

Typische Tagesenergieverbrauchsprofile für beide Szenarien sind in der Tabelle 5 einander gegenüber gestellt. Das Profil für die konventionelle Variante basiert auf ermittelten Energieverbrauchsdaten, die von lokalen Partnern auf den Philippinen recherchiert wurden. Für eine geeignete Gegenüberstellung wurde dieser Energiebedarf in verschiedene Endverbrauchskategorien und verschiedene Nutzungszeiten eingeteilt.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Energieverbrauchsprofile

ZCR	W	h/day	kwh/yr	Conventional Cottage	W	h/day	kwh/yr
Lighting	80	6	175	Lighting	300	11	1204
Low energy ceiling fans	10	15	54	Air conditioner 2.5 HP main room	1865	8	5445
				Air conditioner 1.5 HP bedroom	1119	12	4901
Laptop	40	4	58	Laptop	40	4	58
Solar cooker	0	0	0	Cooking	1500	3	1642
High EEF refrigerator	45	12	197	Refrigerator	100	12	438
Solar water heater	0	0	0	Water heater	5000	3	5475
LED TV	25	2	18	TV	100	2	73
Auxilliaris	3	24	26	Auxiliaries	3	24	26
Total kwh/y	528			Total kwh/y	19262		

Wie erwartet zeigt das Zero Carbon Building mit ca. 528 kWh pro Jahr einen deutlich geringeren Strombedarf im Vergleich zu ca. 19.262 kWh pro Jahr in einem vergleichbaren konventionellen Resort. Das ist eine Reduzierung des Stromverbrauchs um mehr als 95 %. Dieser reduzierte Energiebedarf ermöglicht eine deutlich einfachere und kostengünstigere Abdeckung des Gebäudes mit erneuerbaren Energien.

Darüber hinaus ist das Gebäude so entworfen, dass ausschließlich Regenwasser für die Wasserversorgung verwendet wird. Nur etwa 10 % des jährlichen Niederschlags auf dem Dach reichen aus, um alle Wasserbedürfnisse im Gebäude zu erfüllen. Mit der Verwendung von effizienten Technologien wie zum Beispiel einer Toilettenspülung mit niedrigem Verbrauch, sowie wassersparenden Duschköpfen und Wasserhähnen werden der Wasserbedarf sowie das Abwasservolumen deutlich reduziert. Die umgekehrte Form des Daches ermöglicht die Sammlung von Regenwasser über die gesamte Dachfläche mit einem einzigen Ablauf. Dachrinnen entlang den Seiten des Daches sind nicht erforderlich. Ein Sammelbehälter in Kombination mit einer Zisterne bildet den Hauptspeicher für das gesammelte Regenwasser. Damit nur sauberes Wasser in das System gelangt wird dieses durch einen sogenannten Blattabscheider und einem „first-flush“-Abscheider geleitet. Der Blattabscheider entfernt größere Partikel wie Blätter und Zweige, während der „first-flush“ ein Abspülen des Daches von Staub und Schmutz ermöglicht, bevor das Regenwasser zum Lagersystem geleitet wird. Ein installiertes DIY- Filtersystem reinigt das Wasser bevor es zur Speicherung in die Zisterne weitergeleitet wird.

Das gesamte Abwasser aus dem Gebäude wird direkt vor Ort mit einer sogenannten "Pumice-Wick" behandelt. Das ist eine kostengünstige Alternative zu septischen Systemen. Es ist im Prinzip eine flache unterirdische Senke, die so angelegt ist, dass sowohl die Nährstoffe aus dem Abwasser als auch das Abwasser selbst zur Düngung und Bewässerung der Pflanzen genutzt wird.

Auf diese Weise ist das Zero Carbon Building vollständig netzunabhängig bezüglich Energie- und Wasserversorgung.

7.3 Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte

Die beiden wichtigsten Parameter für einen Vergleich der klimatischen Außen- und Innenzustände sind die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit. Ein erster Evaluierungsansatz untersucht die Abhängigkeit der Räume vom lokalen Außenklima. Die folgenden Abbildungen geben typische Bedingungen eines regnerischen und eines sonnigen Tages wider. Im Allgemeinen sinken die Temperaturen immer in der Nacht bis zum Sonnenaufgang, während die Feuchtigkeit exponentiell zunimmt. Im Fall des Beispiels für den Regentag (siehe Abbildung 13, links) bildeten sich am Vormittag Wolken in der Umgebung. Der erste Regenschauer fand um 10.50 Uhr statt und von Mittag bis zum Abend gab es einen anhaltenden starken Regen. Die Außenfeuchtigkeit stieg dann bereits auf über 90 % und die Feuchtigkeit im Raum auf über 80 %. Gleichzeitig sanken die Temperaturen.

Im Gegensatz dazu erreichte die Außenlufttemperatur am Beispiel des Sonntages (siehe Abbildung 13, rechts) das Maximum gegen Mittag und nahm dann langsam ab, während die Raumlufttemperatur während des Tages kontinuierlich anstieg bis der Wert der bereits abnehmenden Außentemperatur erreicht war. Die Feuchtigkeit zeigt ein gespiegeltes Verhalten für dieses Wetter.

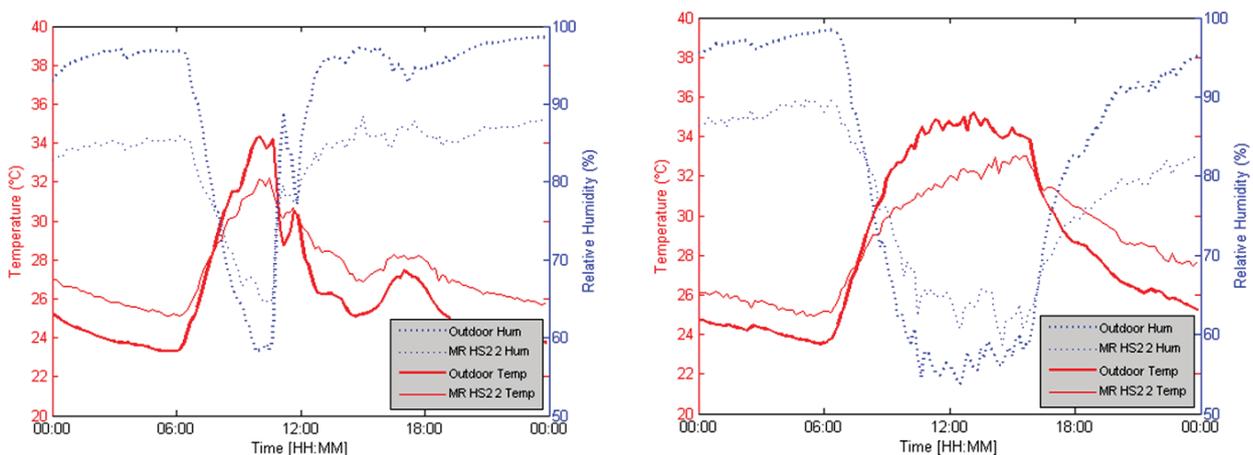


Abbildung 13: Vergleich Außen- und Innenklima, Hauptraum, Regentag (links); Sonnentag (rechts)

Die wichtigsten Ergebnisse der Langzeitüberwachung hinsichtlich der Lufttemperatur und der relativen Feuchte für die Innen- und Außenbedingungen sowie die Unterschiede der Räume zueinander sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 6: Lufttemperaturen (Außen/Innen)

Location	Mean air temperature [°C]	Minimum air temperature [°C]	Maximum air temperature [°C]	Mean difference to outdoor air temp. [°C]	Max difference to outdoor air temp. [°C]
Outdoor	28.08	20.66	37.2	-	-
Bathroom	29.66	25.87	33.90	3.09	5.92
Bedroom	28.34	24.95	31.79	2.45	6.57
Main room	28.76	23.46	34.95	1.63	4.67

Tabelle 7: Relative Luftfeuchten (Außen/Innen)

Location	Mean rel. humidity [%]	Minimum rel. humidity [%]	Maximum rel. humidity [%]	Mean difference to outdoor rel. humidity [°C]	Max difference to outdoor rel. humidity [°C]
Outdoor	80.35	34.10	99.51	-	-
Bathroom	74.35	48.52	92.01	12.92	26.59
Bedroom	78.59	62.06	93.01	11.04	26.61
Main room	74.90	40.12	93.14	8.32	23.37

Alle drei Räume zeigen eine offensichtliche Abhängigkeit vom lokalen Klima. Beeinflusst von der Südausrichtung, der höchsten Anzahl von Gebäudeöffnungen und der kleinsten Menge an massiven Bauelementen zeigt der Hauptraum die höchste Abhängigkeit und den kleinsten Unterschied gegenüber dem Außenklima für diese beiden Parameter. Die Innenräume des nach Norden ausgerichteten Schlafzimmers und des nach Nordwesten ausgerichteten Badezimmers weisen gegenüber dem Außenklima einen tendenziell gleichen Unterschied auf, wobei das Temperaturniveau im Badezimmer etwas höher ist, da es die meisten Mengen an massiven Bauelementen enthält und die geringste Anzahl an Gebäudeöffnungen aufweist. Im Gegenzug ist die relative Luftfeuchtigkeit im Schlafzimmer höher. Der Vergleich der Sensoren innerhalb eines Raumes zeigen Unterschiede in Abhängigkeit von der jeweiligen Position. Vor allem die Ergebnisse des HS2_2, der im Hauptraum an der Nordwand zum Badezimmer in einer Höhe von 160 cm über dem Boden installiert ist, und des RA4, welcher bei der Mitte der massiven Lehmwand angebracht ist, zeigen ein unterschiedliches Verhalten. Die Abbildung 14 (links) verdeutlicht die Funktionalität dieses passiven Kühlelementes. Die Kurven für die Lufttemperatur im Bereich des Wandelementes sowie für die relative Feuchtigkeit sind aufgrund der Masse und der Feuchtigkeitskompensationsfähigkeit des Materials weniger extrem und konstanter. Die größten Abweichungen zwischen RA4 und HS2_2 sind daher zu Zeiten mit den extremsten Klimabedingungen, im Allgemeinen bei kühlen und sehr feuchten Perioden in der Nacht oder in heißen und trockenen Zeiten während des Tages.

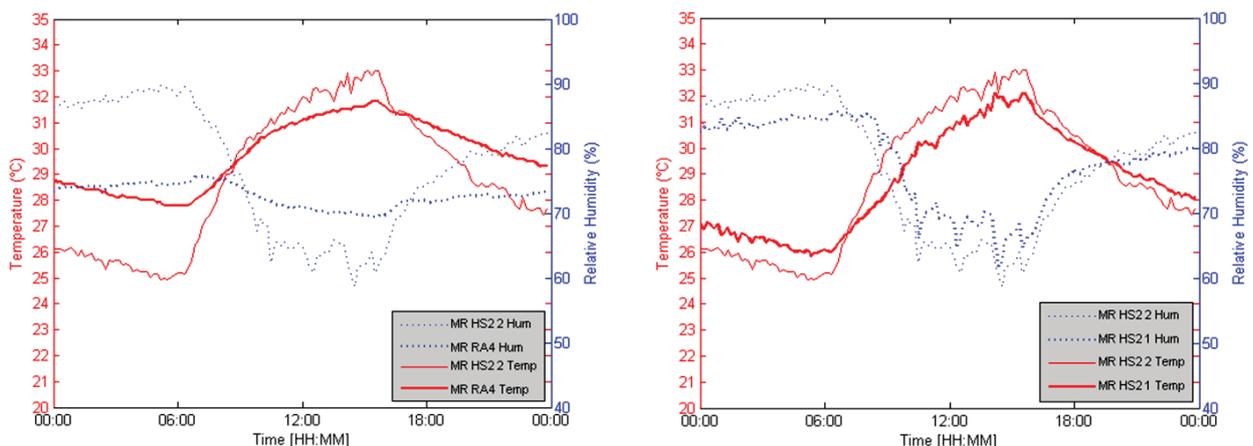


Abbildung 14: Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte im Hauptraum: HS2_2/RA4 (links); HS2_2/HS2_1 (rechts).

Der Vergleich des HS2_2 im Hauptraum mit dem Sensor HS2_1, der an der gleichen Stelle im Raum aber in einer Höhe von 10 cm über dem Boden statt 160 cm installiert ist, zeigt eine konstante

Abweichung ähnlich den komparativen Sensoren im Badezimmer und im Schlafzimmer, aber mit einer etwas höheren Differenz aufgrund der höheren Interferenz des Außenklimas. Dies spiegelt sich auch in der Abbildung 14 (rechts) wieder. Ein weiterer Vergleich mit dem HS4-Sensor zeigt auch eine normale vertikale Lufttemperaturdifferenz unter Berücksichtigung der Höhe von 410 cm über dem Boden (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Abweichungen der Lufttemperatur und der rel. Luftfeuchte innerhalb des Hauptraumes

Sensors	Absolute mean value difference [°C]	Absolute min/max difference [°C]	Absolute mean value difference [%]	Absolute min/max difference [%]
HS2_1_HS2_2	0.87	2.78	3.69	12.10
HS2_2_HS4	0.82	3.10	3.47	9.87
HS2_2_RA4	1.44	3.73	7.59	29.68
HS2_1_RA4	1.08	2.74	5.35	25.59

7.4 Oberflächentemperaturen

Die Messergebnisse für die Oberflächentemperaturen mit dem VOLT CRAFT Infrarot-Thermometer IR 260-8S sind nachfolgend am Beispiel der Wände des Schlafzimmers für einen sonnigen Tag (Abbildung 15, links) und einen regnerischen Tag (Abbildung 15, rechts) dargestellt.

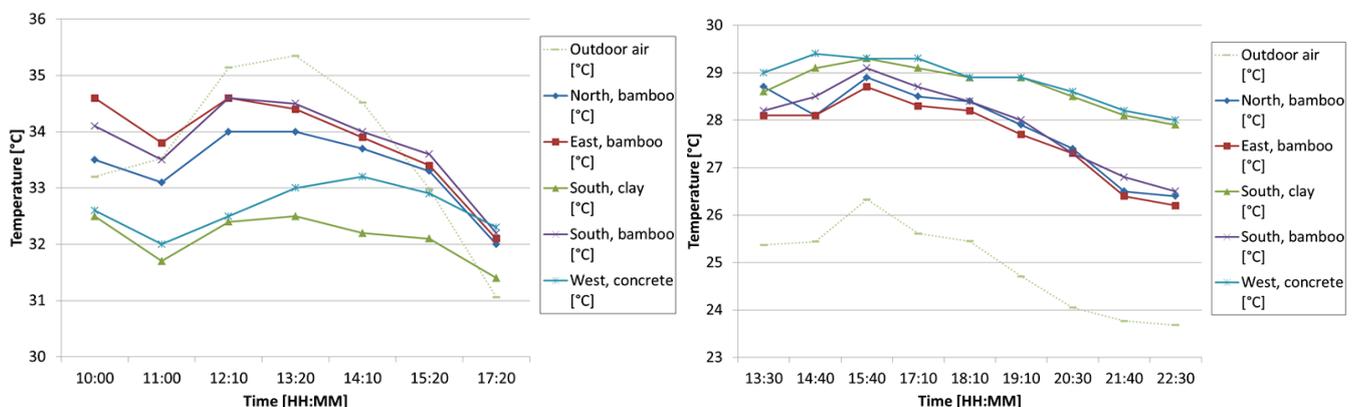


Abbildung 15: Oberflächentemperaturen der Wände: Sonnentag (links); Regentag (rechts)

Genauso wie die Lufttemperatur und die relative Feuchtigkeit in den Räumen zeigen auch die Oberflächentemperaturen eine deutliche Abhängigkeit vom lokalen Außenklima. Während der heißen Perioden liegen diese Temperaturen unterhalb der Außenlufttemperatur, während bei den kühleren Regen- und Nachtzeiten diese im Allgemeinen etwas höher sind. Je nach Ausrichtung der Bauteile aber vor allem auch aufgrund der verschiedenen Materialien weisen die verschiedenen Bauteile unterschiedliche Oberflächentemperaturen auf. Die Leichtbaukonstruktionen reagieren schneller auf die wechselnden Außenbedingungen als die massiven Konstruktionen. Im Allgemeinen zeigt die massive Stampflehmwand in der Mitte des Gebäudes die gleichmäßigsten Temperaturwerte mit den kühlssten

Temperaturen während der heißen Perioden, wodurch ebenfalls der thermische Komfort im Gebäude positiv beeinflusst wird.

7.5 Thermischer Komfort

Der thermische Komfort wurde mit dem in Kapitel 6.5 beschriebenen Messkit bestimmt. Für den Einsatz in tropischen Klimazonen und in natürlich belüfteten Gebäuden ist jedoch eine Adaptierung des Verfahrens für die Bestimmung des thermischen Komforts mittels PMV erforderlich [15]. Zuerst muss die metabolische Rate um 6,7 % für jede Maßstabseinheit auf der thermischen Wahrnehmungsskala für einen PMV über neutral reduziert werden, da in heißen Klimata die Menschen unbewusst dazu neigen ihre Aktivitäten zu verlangsamen. Zweitens muss nach Fanger das Ergebnis mit dem Erwartungsfaktor e multipliziert werden, der wiederum durch zwei Parameter definiert ist: die Dauer der heißen Jahreszeit und die Häufigkeit bzw. das Vorkommen von klimatisierten Gebäuden in der Region. Die Berechnung erfolgte mit einem Erwartungsfaktor e von 0,6. Dies ist der gleiche Wert der für Bangkok definiert wurde, welches ein vergleichbares Klima hat, aber eine höhere Anzahl an klimatisierten Gebäuden, so dass ein e von 0,6 als Worst-Case-Benchmark für die Region angenommen werden kann.

Als Beispiel sind die Ergebnisse für den Essbereich TC3 in Abbildung 16 dargestellt. Die Werte wurden an einem sonnigen Tag ohne Niederschlag, aber mit einigen bewölkten Intervallen im Lauf des Tages bestimmt. Das Maximum von fast 35 °C wurde für die Lufttemperatur gemessen. Die relative Feuchtigkeit lag im Bereich von 56 bis 75 % während der Zeit der Messung und die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit betrug 1,04 m/s.

Die Einstellungen der Gebäudeöffnungen des Hauptraums wurden je nach Außenbedingungen verändert. Entsprechend dem Pfad der Sonne wurden die Öffnungen nach Osten im Allgemeinen am Morgen und am Vormittag geschlossen, die Öffnungen nach Süden während der Mittagszeit, während die Öffnungen im Westen von etwa 13.30 Uhr bis zum Sonnenuntergang geschlossen wurden um zu verhindern, dass sich der Raum weiter aufheizt. Auf der anderen Seite wurden Türen und Fenster, die einander gegenüberliegen gleichzeitig geöffnet, um eine kühle Brise durch das Gebäude strömen zu lassen. Zusätzlich wurde der Deckenventilator wegen der hohen Außentemperaturen während der Messung eingeschaltet.

Die Bestimmung des thermischen Komforts im Essbereich entsprechend der Anpassung für tropische Klimata wurde mit einem Bekleidungsfaktor von 0,19 durchgeführt, der das Set Light Sommer Cloth 1 sowie den Einfluss eines Holzstuhls beinhaltet. Abbildung 16 zeigt annehmbare Ergebnisse für den Essbereich mit PMV-Werten zwischen 0,45 und 1,64 ($PMV - clo = 0,19 - adapted\ met.\ rate - e = 0,6$) bei einer durchschnittlichen Außenlufttemperatur von 33,23 °C während der Zeit der Messung.

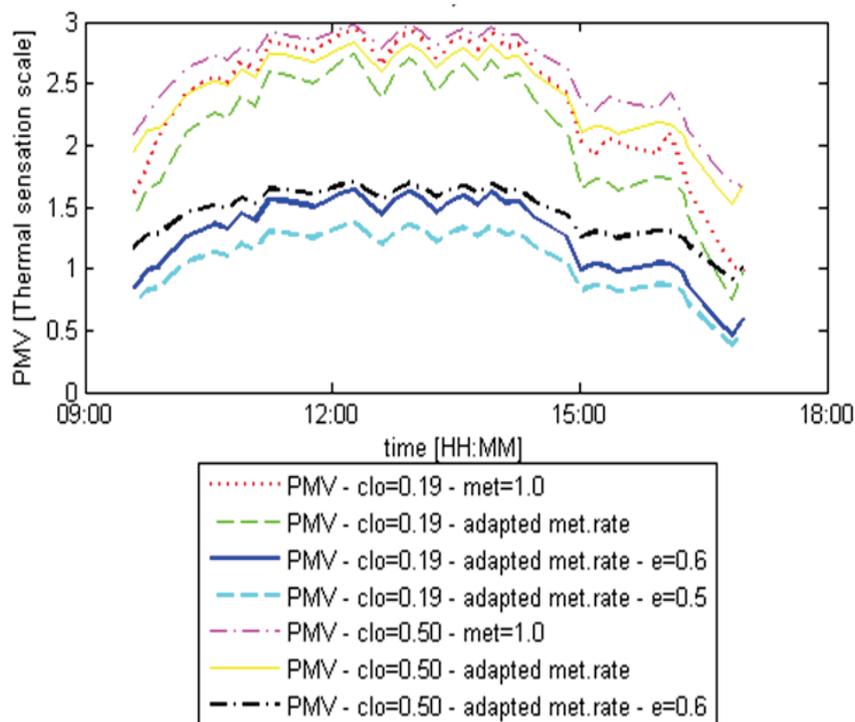


Abbildung 16: PMV Variationen für den Essbereich im Hauptraum, TC 3

Die Ergebnisse zeigen einen annähernden neutralen thermischen Komfort am Morgen und vor allem am Nachmittag sowie am Abend, während die kritische Zeitspanne die sehr heiße Zeit in der Mitte des Tages ist. Die gemessenen Werte variieren zwischen 31,05 und 33,93 °C für die mittlere Strahlungstemperatur, zwischen 31,25 und 33,91 °C für die Lufttemperatur, zwischen 0,67 und 1,00 m/s für die Luftgeschwindigkeit sowie zwischen 58,55 und 70,87 % bei der relativen Feuchtigkeit. Die vergleichsweise hohen Luftgeschwindigkeiten im Raum wurden aufgrund der extremen lokalen Klimabedingungen als angenehm empfunden.

Darüber hinaus wurden PMV-Varianten für den Essbereich bei gleichen Klimabedingungen mit unterschiedlichen iterativen Parametern neu berechnet und in Abbildung 16 vergleichend dargestellt. Zuerst wurden die Berechnungen ohne Anpassungen für Prognosen in tropischen Klimazonen durchgeführt (PMV - clo = 0,19 - met = 1,0), mit einer angepassten metabolischen Rate, aber ohne die Multiplikation des Erwartungsfaktors (PMV - clo = 0,19 - adapted met. rate) und mit einem noch weiter reduzierten Erwartungsfaktor für eine angepasste metabolische Rate (PMV - clo = 0,19 - adapted met. rate - e = 0,5) mit dem gleichen Bekleidungsfaktor.

Zweitens werden die Neuberechnungen auch mit einem höheren Bekleidungsfaktor von 0,5 clo für das Set Formal Wear (FW) durchgeführt, welches den Einfluss einer formelleren Kleidung simuliert, für eine Variation nach der Anpassung für tropische Klimate (PMV - clo = 0,5 - adapted met rate - e = 0,6), eine Variation mit einer angepassten metabolischen Rate, aber ohne die Multiplikation eines Erwartungsfaktors (PMV - clo = 0,5 - adapted met. rate) und für eine Variation ohne Anpassung für tropische Klimata (PMV - clo = 0,5 - met = 1,0).

Diese letzte Variation ohne Adaptierungen und mit formeller Kleidung zeigt die höchsten PMV-Werte, gefolgt von der vergleichbaren Variante mit einem Bekleidungsfaktor für leichte Sommerkleidung und

den Varianten ohne Ergänzung des Erwartungsfaktors. Die Kurve mit den niedrigsten Werten ergab sich entsprechend durch die weitere Reduzierung des Erwartungsfaktors.

Die Werte zeigen deutlich die Abhängigkeit des thermischen Komforts im Hauptraum vom Außenklima. Während an kühleren Tagen mit einer sehr hohen Luftfeuchte sogar Ergebnisse im kühlen Bereich der thermischen Empfindungsskala erreicht werden, wird in heißen und trockenen Perioden eine höhere Luftgeschwindigkeit benötigt um einen akzeptablen thermischen Komfort zu erzielen. Mit der Unterstützung des Ventilators, der sich oberhalb des Essbereichs befindet, kann eine durchschnittliche Innenluftgeschwindigkeit von ca. 1 m/s erzeugt werden um ein PMV (leichte Sommerkleidung mit Holzstuhl, angepasste met. rate, e = 0,6) von weniger als 1,64 auch bei extremen Außenbedingungen zu erreichen.

Tabelle 9 stellt die ermittelten Ergebnisse und Neuberechnungen der PMV entsprechend den Adaptierungen für tropische Klimazonen zusammenfassend dar; einschließlich einer reduzierten metabolischen Rate und der Multiplikation mit einem Erwartungsfaktor von 0,6 für die spezifischen Positionen in den drei Räumen und deren typische Nutzungszeiten.

Tabelle 9: PMV Ergebnisse entsprechend den Adaptierungen für tropische Klima

Location	Time	Clothing set	Clothing factor	PMV
Bathroom	Morning, evening	Underwear	0.03	0.43 to 0.83
	Day	Light summer cloth	0.18	0.46 to 1.36
Bedroom	Day	Light summer cloth + mattress, sheet	1.16	0.10 to 1.17
	Night	60 % cover + mattress, sheet	1.76	0.20 to 1.12
	Day, night	Underwear + mattress, sheet	1.01	-0.33 to 0.93
Dining area	Day	Light summer cloth + wooden chair	0.19	-0.42 to 1.64
		Formal wear	0.50	0.29 to 1.79
Couch area	Day	Light summer cloth + armchair	0.33	0.49 to 2.08
		Formal wear	0.50	0.68 to 2.01
Center main room	Day	Light summer cloth	0.18	1.22 to 1.90
		Formal wear	0.50	1.38 to 1.87

Die Auswertung des thermischen Komforts mittels PMV/PPD nach der Adaptierung für die Verwendung im tropischen Klima zeigt, dass eine neutrale thermische Wahrnehmung vor allem an regnerischen Tagen und in der Nacht in den verschiedenen Bereichen des Gebäudes durch die Wahl geeigneter Kleidung für das lokale Klima sowie durch eine Steuerung der beeinflussenden Parameter des Gebäudes erreicht werden kann. Heiße Perioden während des Tages sind kritischer zu betrachten und verstärken die Bedeutung eines ergänzenden mechanischen Lüftungssystems für windstille Zeiten.

7.6 Schlussfolgerung messtechnische Begleituntersuchung

Das Ziel der messtechnischen Begleituntersuchung bestand darin zu prüfen, ob der thermische Komfort in einem Prototypen-Resortgebäude aus lokalen erneuerbaren Ressourcen in den Philippinen ohne die

Installation und Nutzung von Klimaanlage erreicht werden kann, was zu einem enormen Rückgang des Energiebedarfs in tropischen Klimazonen führen kann.

Die messtechnische Untersuchung erfolgte an sonnigen Tagen mit heißen und trockenen Perioden sowie an regnerischen Tagen mit kühleren, aber feuchteren Bedingungen und betraf die Oberflächentemperaturen ausgewählter Bauelemente, den Vergleich des Außen- und Innenklimas mit Fokus auf die Lufttemperatur und die relative Feuchtigkeit sowie die Bestimmung des thermischen Komforts mit einer angepassten PMV-Methode.

Die Studie zeigt, dass der thermische Komfort in konditionierten Gebäuden, wie in den Normen definiert, mit den implementierten Innovationen zwar nicht erreicht werden kann, aber akzeptable Innenraumbedingungen für dieses extrem heiße und feuchte Klima aufrecht erhalten werden können, wenn die passiven Kühlmethoden richtig angewendet werden, besonders unter Berücksichtigung der fast täglichen Stromausfälle in der Region, da in diesen Zeiten ein deutlich besserer thermischer Komfort erreicht wird im Vergleich zu Gebäuden mit nicht funktionierenden Klimaanlage.

Insgesamt wurde ein nachhaltiges und umweltfreundliches Gebäudekonzept mit einem sehr niedrigen Energiebedarf für tropisches Klima entwickelt und demonstriert, was auch durch die Verleihung des Global Human Settlement Awards bestätigt wurde.

8 Austrian Green Building Star

Ausgehend von dem umfangreichen Monitoringkonzept und den Messergebnissen sowohl des Langzeit-Monitorings als auch des Kurzzeit-Monitorings wurde im Rahmen dieses Projektes eine Zertifizierung des Gebäudes mit dem Austrian Green Building Star angestrebt (<http://austriangreenbuildingstar.com/>). Das Zertifikat wurde gemeinsam vom BMVIT und dem BMLFUW entwickelt und berücksichtigt auch nachhaltige Gebäude im Ausland, bei denen österreichische Planungs- und Architekturbüros, Baustoffproduzenten, Bauunternehmen oder Investoren etc. einen wesentlichen Beitrag bei der Planung und Umsetzung geleistet haben.

Die Implementierung des Programmes und der offizielle Beginn der Zertifizierungsabwicklung befinden sich in der finalen Vorbereitungsphase. Nichts desto trotz wurde bereits im Vorfeld Kontakt mit dem Österreichischen Ökologie Institut aufgenommen, um die Anforderungen oder mögliche Hürden im Zuge der Zertifizierung abzuklären. Eine detaillierte Beschreibung des Gebäudes und der implementierten Innovationen sowie eine umfassende Analyse der messtechnischen Begleituntersuchung wurden eingereicht.

Die wesentlichen Aspekte für die Auszeichnung mit dem Austrian Green Building Star konzentrieren sich auf die Bereiche:

- Energieeffizienz
- Gesundheit und Nutzerkomfort
- Vermeidung umweltschädlicher Baustoffe
- Hochwertige Ausführungsqualität

Vor diesem Hintergrund wurde das Zero Carbon Resorts Demonstrationsgebäude mit seinem Mix aus moderner und traditioneller Architektur, der Nutzung von Baumaterialien aus lokalen nachwachsenden Rohstoffen und seinem netzunabhängigen Haustechnikkonzept mittels Nutzung erneuerbarer Energien sowie seinem hohen Nutzerkomfort für eine Auszeichnung in der Kategorie Sonderfall, aufgrund der angepassten Bauweise für tropisches Klima, als sehr geeignet bewertet.

Die offizielle Verleihung des Zertifikats soll unmittelbar nach Aufnahme der Programmabwicklung vor Ort im Zero Carbon Building erfolgen.

9 Konzeptentwicklung Demonstrationsgebäude in Nepal

9.1 Ausgangssituation

Bei der Ableitung von möglichen Übertragungen der Prinzipien vom S-House als auch vom Zero Carbon Resorts Demonstrationsgebäude auf andere Länder bietet insbesondere Nepal ein sehr großes Potential, da dort zum einen eine hohe Nachfrage an ökologischen Gebäuden besteht, die leistbar und energieeffizient sind und aus lokalen Materialien errichtet werden können. Darüber hinaus besteht aufgrund der häufigen Naturkatastrophen ein hoher Bedarf an erdbebensicheren Konstruktionen.

Im spezifischen geht es dabei um die Entwicklung von geeigneten regionalen Lösungen die vorhandene Ressourcen optimal nutzen und sich intelligent mit neuesten Technologien kombinieren lassen, denn gerade der Wiederaufbau nach dem verheerenden Erdbeben von 2015 stellt eine Chance zur Weichenstellung in Richtung erneuerbarer Ressourcen und einer Steigerung der Energieeffizienz dar.

Die Übertragung der Prinzipien für einen Wiederaufbau von durch Naturkatastrophen zerstörten Gebäuden und Energieversorgungen in anderen Klimazonen erweitert zusätzlich das Anwendungsspektrum und kann darüber hinaus auch die Bekanntheit des „Austrian Green Building Star“ sowie österreichischer Forschungsergebnisse und Technologieprogramme erhöhen.

Um das Potential für einen Wiederaufbau nach Naturkatastrophen zu verdeutlichen sind in der nachfolgenden Weltkarte Erdbeben mit einer Stärke von über 5,0 auf der Richterskala aus den letzten Jahrzehnten eingezeichnet, da diese Gebäude maßgeblich beschädigen können [16], [17].

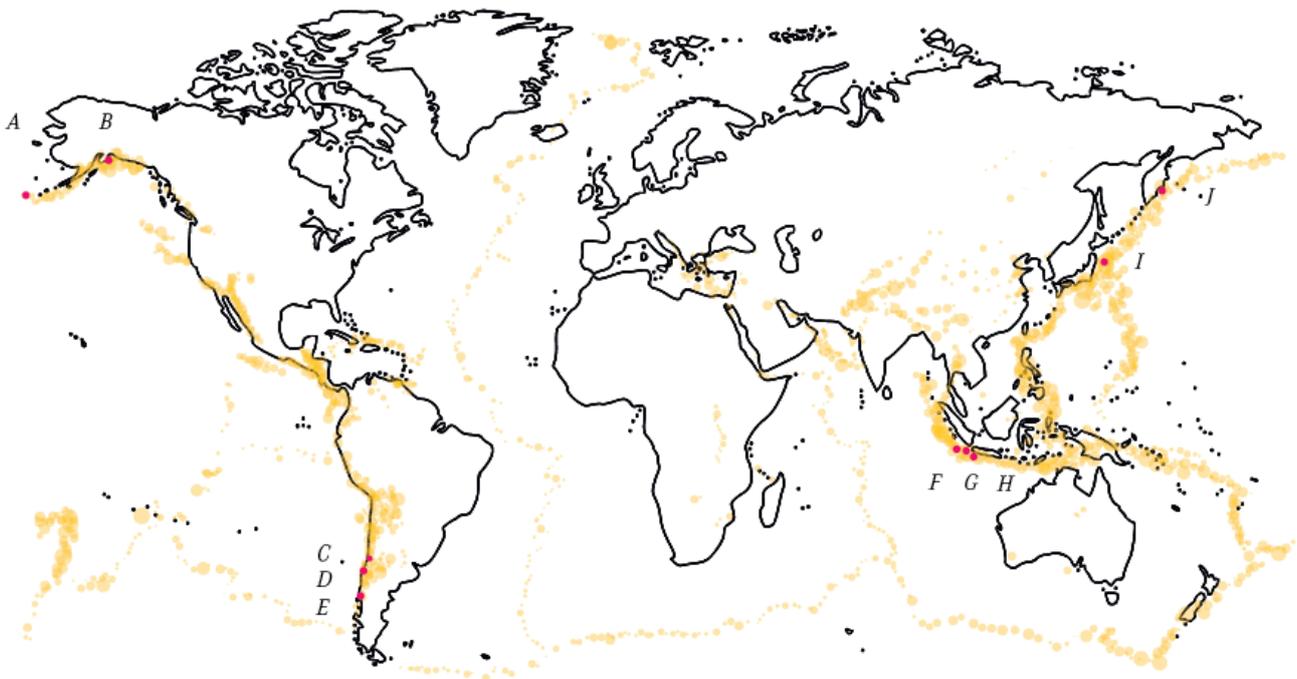


Abbildung 17: Seismologische Weltkarte, GrAT

Im asiatischen Raum sind besonders die in der nachfolgenden Tabelle gelisteten Länder durch die Zerstörung von Erdbeben betroffen, wobei in Nepal mit einem Wert von 7,3 auf der Richterskala im Durchschnitt die stärksten Erdbeben vorkommen. Auch bzgl. der durch Erdbeben verursachten Todesopfer weist Nepal in Bezug auf die Einwohnerzahl die höchsten Werte in Prozent auf [18].

Tabelle 10: Betroffene Länder in der Region

Country	Average magnitude [Richter scale]
Nepal	7.3
Japan	7.2
Philippines	7.0
Indonesia	6.6
India	6.4

9.2 Projektlage

Nepal ist ein Binnenstaat in Südasien und grenzt an China im Norden und an Indien im Süden, Osten und Westen. Die Hauptstadt von Nepal ist Kathmandu. Aufgrund der Lage im zentralen Himalaya Gebirge liegen acht der zehn höchsten Berge der Welt innerhalb der Landesgrenzen, darunter der Mount Everest [19], [20].

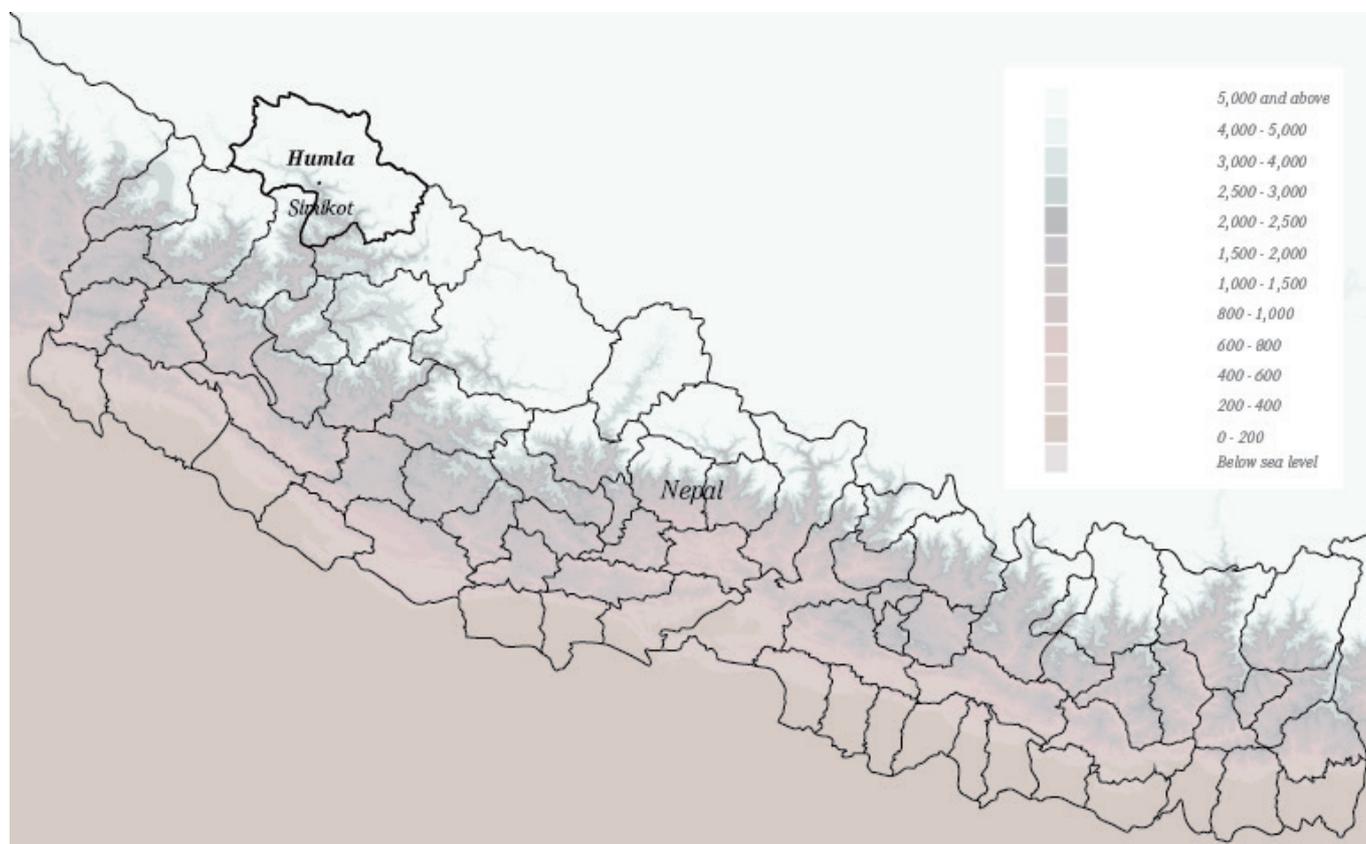


Abbildung 18: Höhenkarte Nepal, GrAT

Die Einwohnerzahl liegt bei etwas unter 30 Millionen. Entsprechend der Höhenlage und den verschiedenen Klimazonen im Land ist die Bevölkerungsdichte abgesehen von Kathmandu im Terai am höchsten, da sich diese Tiefebene mit einem tropisch bis subtropischen Klima und den hohen Niederschlägen gut für die Agrarproduktion eignet [21].

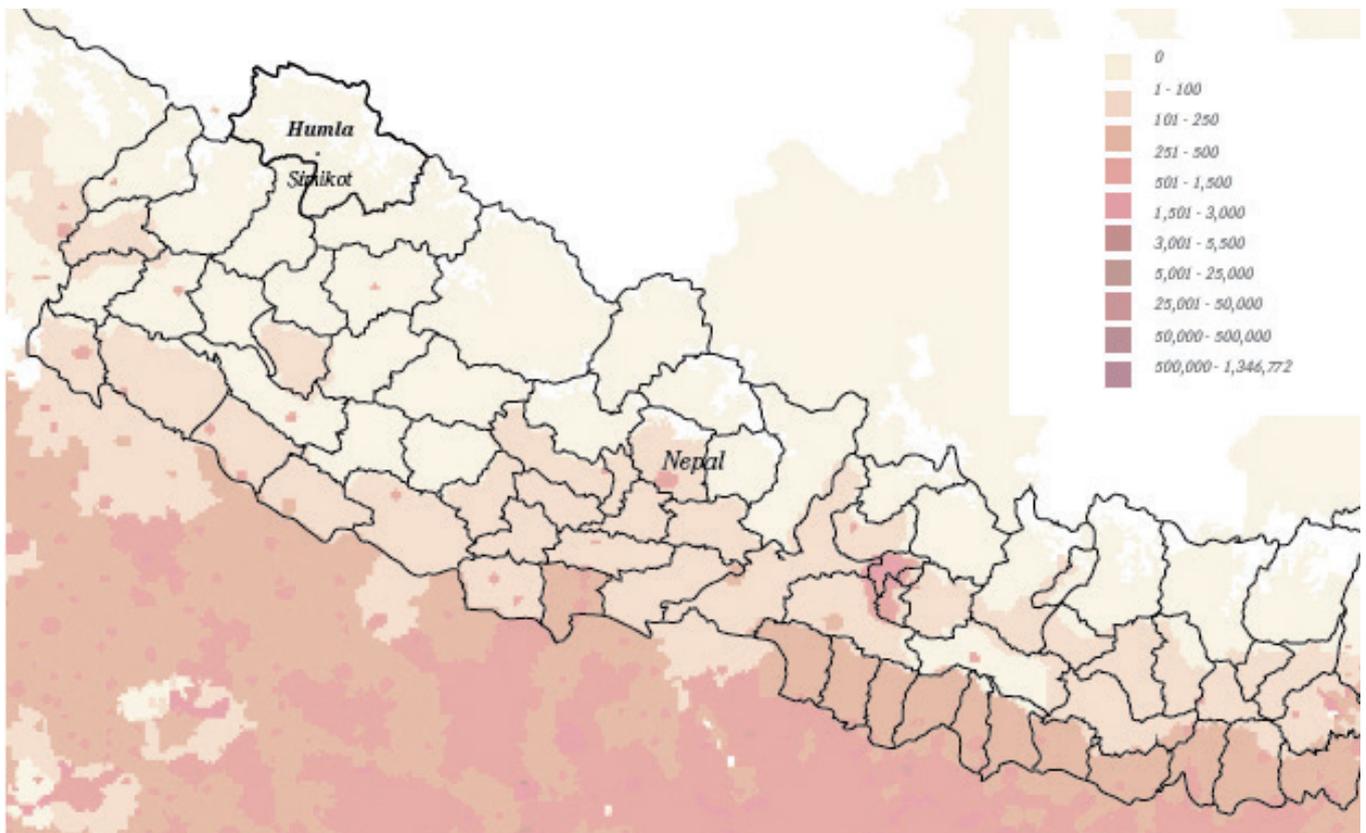


Abbildung 19: Bevölkerungsdichte, GrAT

Für die Konzeptentwicklung wurde der Ort Humla ausgewählt. Dieser liegt im 6ten der 75 Bezirke von Nepal. Die Bezirkshauptstadt auf einer Höhe von 2.910 m ist Simikot. Dort leben ca. 4340 Einwohner in ungefähr 1250 Haushalten. Das Gebiet liegt zwischen der gemäßigten und subalpinen Zone, wo das Erdbeben im April und Mai 2015 sowie deren Nachbeben zahlreiche Gebäude zerstörten. Die nachfolgende Karte illustriert die in Nepal aufgetreten Erdbeben im Detail und zeigt, dass diese nicht nur in bestimmten Regionen, sondern im ganzen Land vorkommen [22], [23], [24], [25].

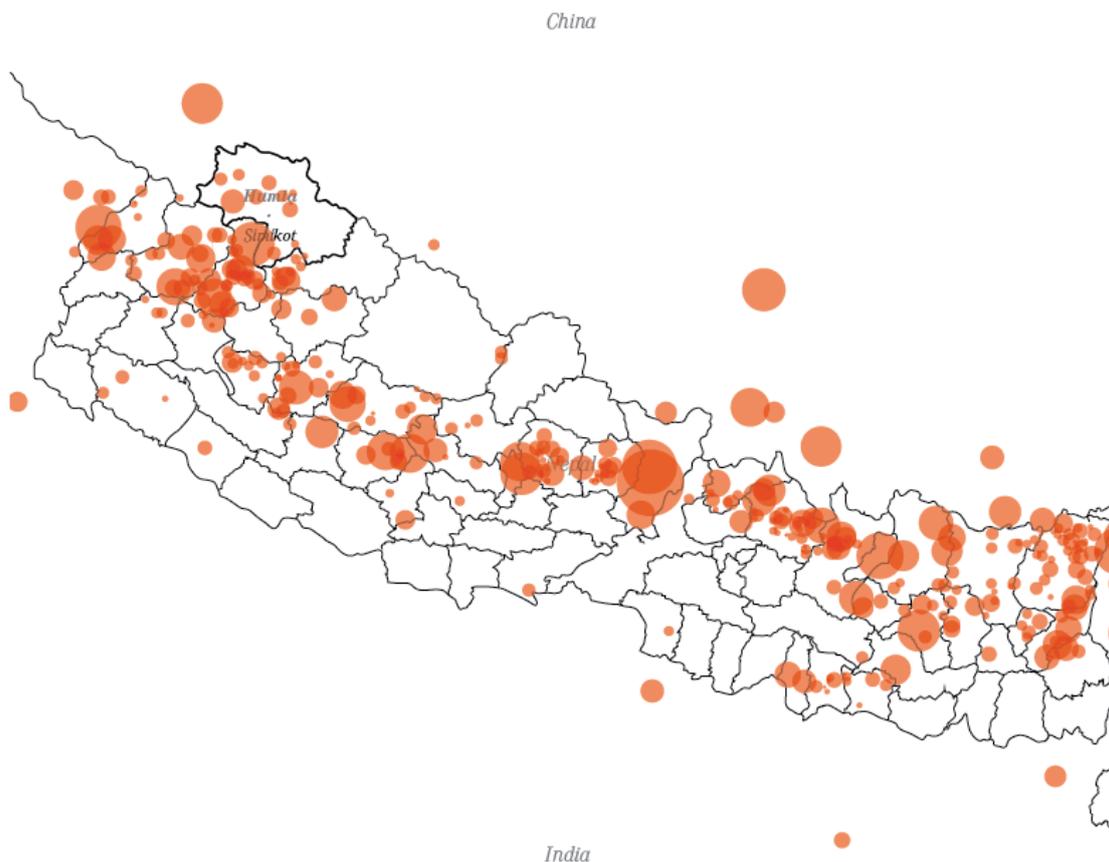


Abbildung 20: Übersichtskarte Erdbeben in Nepal, GrAT

9.3 Grundlagen für eine erdbebensichere Gebäudeplanung

Das Ausmaß der durch Erdbeben verursachten Gebäudeschäden ist jedoch nicht nur von der Stärke des Bebens abhängig, sondern auch vom Gebäude selbst. Das Design eines Gebäudes kann maßgeblich dazu beitragen die Schäden zu minimieren bzw. das Einstürzen zu verhindern. Sinnvolle Schutzmaßnahmen können abhängig von den auftretenden Lastbeanspruchungen zur Verstärkung implementiert werden. Im Allgemeinen gibt es 2 Hauptkategorien von Lasten für Gebäudekonstruktionen:

- Statische Belastung
- Dynamische Belastung

Erdbeben sind dabei in die Kategorie dynamische Belastung einzuordnen. Im spezifischen ist es eine variierende, temporäre Belastung (siehe auch Abbildung 21) [26].

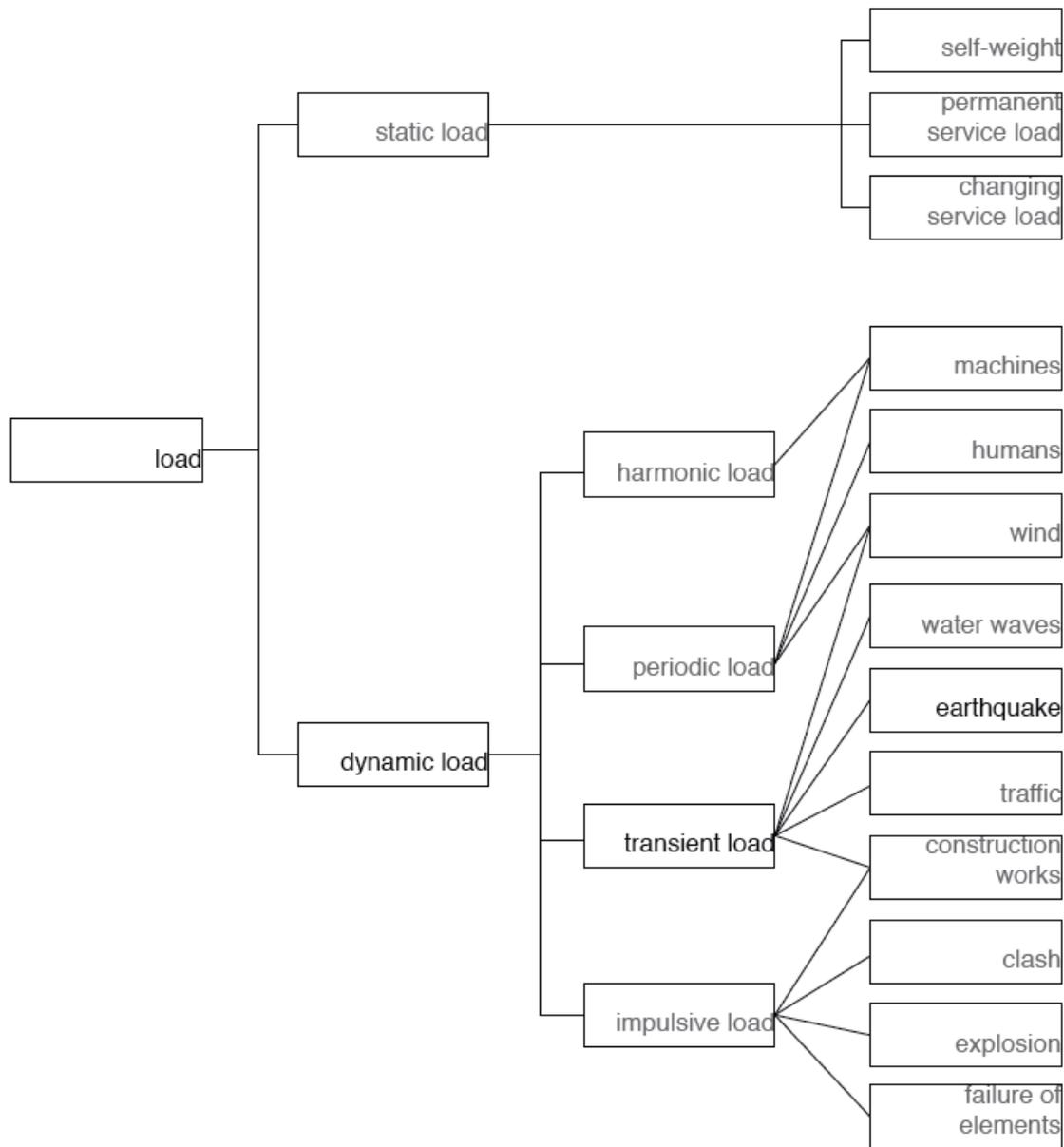


Abbildung 21: Belastungsarten

Bei einem Erdbeben können drei verschiedene Arten von Wellen auftreten. Die sogenannten P-Wellen, die Primärwellen, sind dabei die schnellsten Wellen. Es ist eine Kompressionswelle, die sich mit maximal 6 km/sek im Inneren der Erde bewegt. Die sogenannten S-Wellen sind die sekundären Wellen und sie reagieren wie Scherwellen, die im Erdinneren auf-, abwärts- oder seitwärts-torsionen verursachen.

Die dritte Art sind die L-Wellen, die Oberflächenwellen, die an der Oberfläche der Erde geführt verlaufen und mit zunehmender Tiefe abnehmen.

Wie eine Kombination dieser Wellen die Bewegung der Erdoberfläche beeinflussen kann, ist im folgenden Diagramm graphisch dargestellt [27].

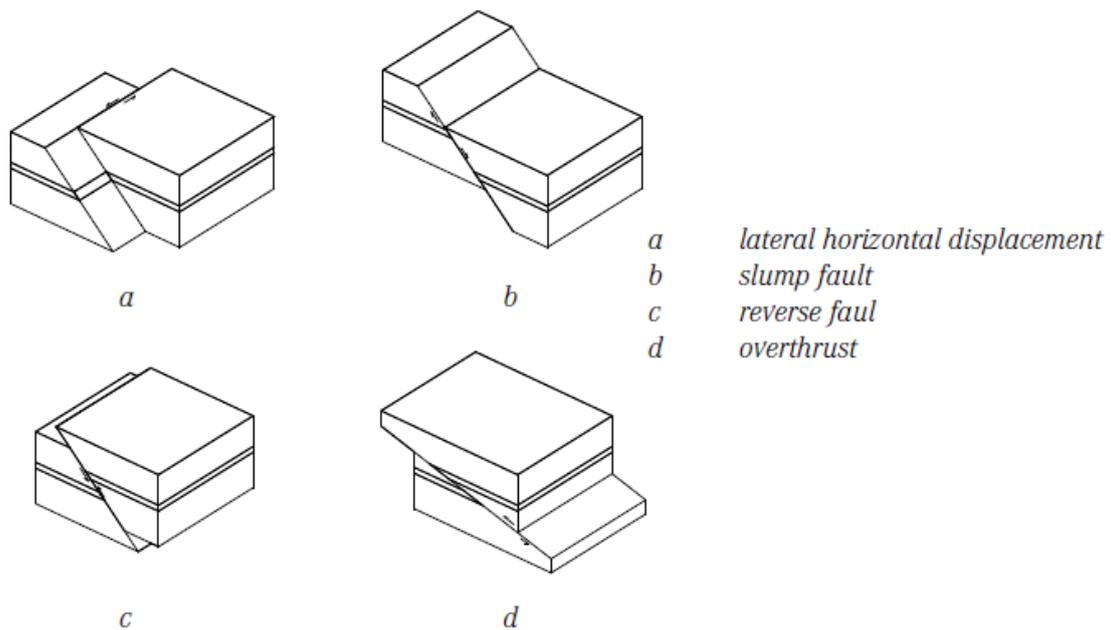


Abbildung 22: Wirkungsrichtungen

Abhängig von der Architektur der Gebäude können diese unterschiedlich beeinträchtigt werden, entsprechend sind auch unterschiedliche Schutzmaßnahmen erforderlich. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine typische Rissbildung im Mauerwerk, die aufgrund von wirkenden Schwerkräften auftreten. Wegen der sich ändernden Bewegungsrichtung der wirkenden Kräfte entstehen unter anderem auch parallel verlaufende Risse im Mauerwerk. Wenn die Kräfte parallel auf die Konstruktion treffen entstehen in der Regel horizontale Risse, während dessen bei einer perpendikularen Krafteinwirkung hingegen senkrechte sogenannte Biegerisse entstehen.

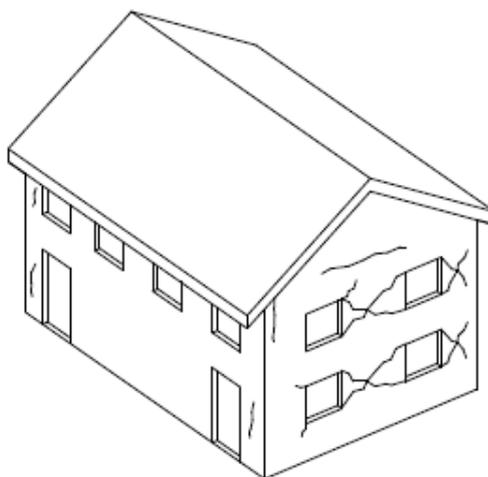


Abbildung 23: Typische Bauschäden durch Erdbeben

In der nachfolgenden Abbildung ist dargestellt wie einzelne Konstruktionen durch die wirkenden Kräfte von Erdbeben beeinträchtigt werden können [26].

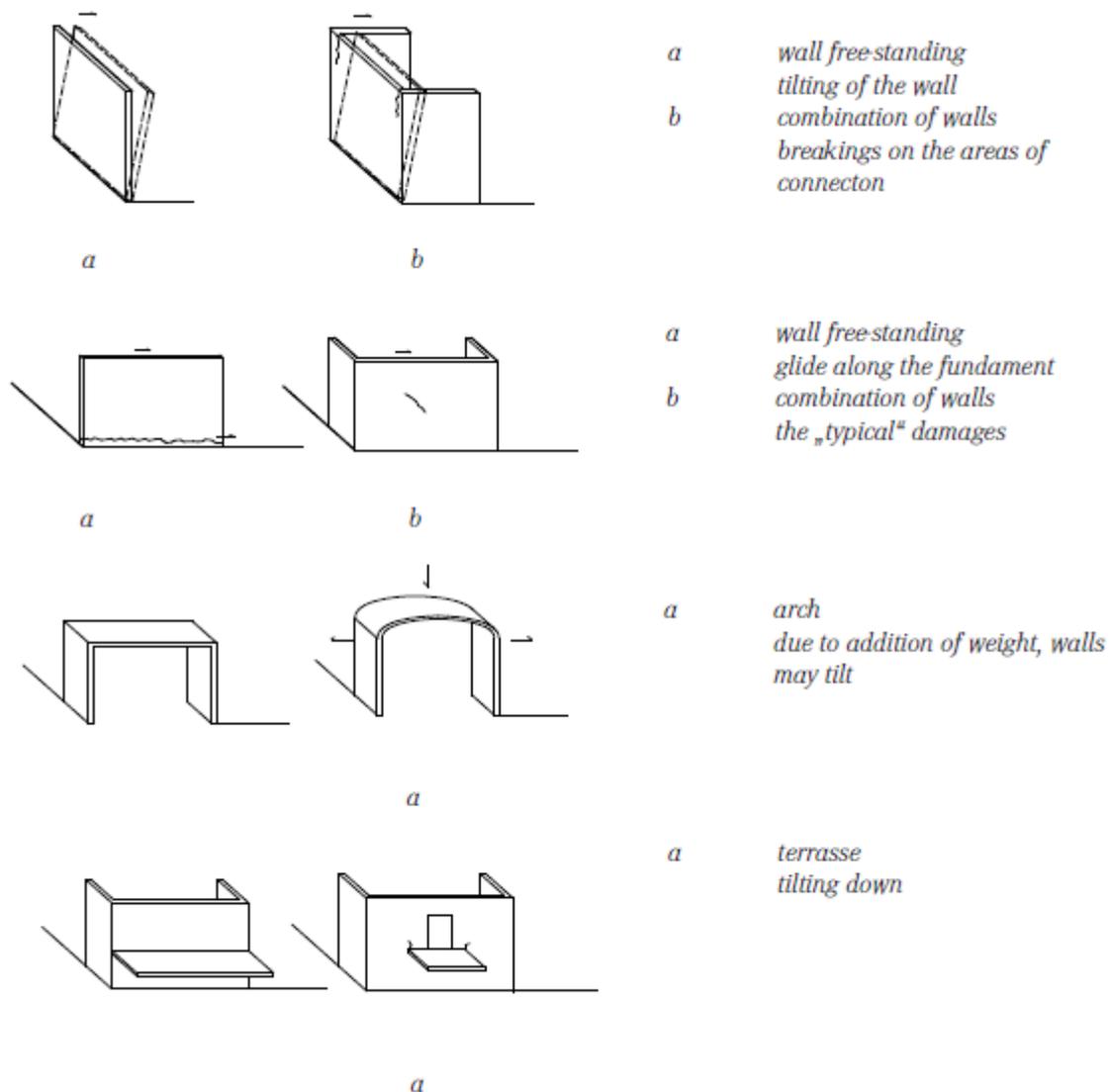


Abbildung 24: Schadensauswirkungen auf einzelne Konstruktionen durch Erdbeben

Die architektonische Struktur eines Gebäudes sollte daher so ausgelegt sein, dass schwache seismische Erdstöße zu keinem Bauschaden am Gebäude führen. Darüber hinaus sollte die Haupt-/Tragkonstruktion des Gebäudes so geplant werden, dass auch bei Erdbeben mit einer mittleren Intensität wenn überhaupt nur minimale Schäden auftreten, die die Sicherheit des Gebäudes nicht gefährden und einen Zusammenbruch des Gebäudes auch bei einem starken Erdbeben verhindern.

Grundsätzlich gibt es drei relevante Arten von Baukonstruktionen für erdbebensicheres Bauen abhängig von der geographischen Lage und den spezifischen Anforderungen:

- Starre/steife Gebäude: Aufgrund der Steifigkeit der Struktur reagiert das Gebäude nur minimal auf Vibrationen oder Stöße. Es behält seine plastische Form bei, ein Beispiel für diese Kategorie ist der Betonbau.
- Flexible Gebäude: Diese weisen eine hohe plastische Formbarkeit auf. Vibrationen und Erdstöße haben eine geringere Auswirkung auf das Gebäude, da sie sich mit der Bewegung der

Oberfläche bewegen können. Im Vergleich zu starren Gebäuden ist die Belastung geringer, jedoch muss die natürliche Schwingung entsprechend berücksichtigt werden. Ein Beispiel für diese Kategorie ist der Holzbau.

- Gemischte Bauweise: Im Falle des Mischens der starren und flexiblen Gebäudetypen ist das Ergebnis ein Gebäude mit einer mittelmäßigen Starrheit. Dieses hat auf der einen Seite strukturelle bauphysikalische Vorteile, aber kann auf der anderen Seite auch zu einer höheren Belastung der steifen Elemente führen [28].

Ein anderes Beispiel für eine der größten Katastrophen ist das Erdbeben bei Yogyakarta in Indonesien am 27. Mai 2006, bei dem mehr als 6000 Menschen gestorben sind und mehr als 150.000 Gebäude und Einrichtungen zerstört wurden. Das Erdbeben mit einer Stärke von 6,3 dauerte ca. 1 Minute gefolgt von etwa 750 Nachbeben, die auch Hangneigungen etc. verursachten.

Bei einer Analyse der betroffenen Gebäude wurden die folgenden Parameter herausgearbeitet, die bei einem vorbeugenden Schutz beachtet werden sollten, um den Einsturz eines Gebäudes aufgrund seismischer Aktivitäten zu verhindern.

- Die geologische Ausgangslage des Standortes (Analyse des Erdbebens selbst)
- Die Höhe des Gebäudes
- Das Gewicht des Gebäudes
- Die Armierung der Konstruktionen bzw. des Gebäudes
- Die Bauqualität [29]

Besonders der letzte Punkt ist nicht zu vernachlässigen, denn Untersuchungen ergaben, dass ca. 90 % der beschädigten Gebäude private Wohnhäuser waren, die ohne die Hilfe von qualifizierten Fachleuten geplant und errichtet wurden, im Gegensatz zu staatlichen Großprojekten.

Aber auch der Aufbau des Daches spielt eine wichtige Rolle bei vorbeugenden Schutzmaßnahmen. Ein hohes, schweres Dach sollte vermieden werden, da aufgrund der vertikalen Bewegungen bei einem Erdbeben das Gewicht des Daches noch erhöht wird, wodurch die Wahrscheinlichkeit von einzustürzenden Wänden zunimmt.

In einer Vielzahl der untersuchten Fälle war die Armierung der Wände nicht ausreichend bzw. wurde sogar das Fehlen von ganzen Ringbalken beobachtet, was sowohl auf eine schlechte Ausführung als auch auf fehlende Kenntnisse zurückzuführen ist.

Bei der Planung eines Gebäudes mit integrierten vorbeugenden Schutzmaßnahmen sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Wahl der Grundrissgestaltung
- Definierung des Mittelpunkts der Masse im Zusammenhang mit dem Mittelpunkt der Steifigkeit des Gebäudes
- Definition des Torsionsvermögens in Bezug auf die Mittelpunkte der Masse und der Steifigkeit
- Wahl der Abmessungen
- Wahl des Gebäudeprofils (z.B.: an welchen Stellen das Mauerwerk unterbrochen werden kann)

- Position der nicht tragenden Elemente
- Dimension der Gebäudeöffnungen (Fenster etc.)
- Wahl der statischen Konstruktionen, insbesondere die Position der horizontalen und vertikalen Stabilisierung [26]

In Bezug auf erdbebensichere Konstruktionen ist die Wahl der Grundrissgestaltung entscheidend. Aufgrund der höheren Belastung in den Ecken eines Gebäudes sollten für eine Stabilisierung des Gebäudes komplexe Bauformen vermieden werden. Alternativ können komplexere Bauformen an Verbindungspunkten verstärkt oder an den Gebäudekanten zusätzlich ausgesteift werden.

Um kritische Torsionsschwingungen zu vermeiden, sollte das Gebäude so geplant werden, dass die Mittelpunkte der Masse und der Steifigkeit am selben Punkt im Gebäude liegen, was am einfachsten mit einem symmetrischen Konzept umzusetzen ist.

9.4 Historische Adaptierungen

Im Hinblick auf eine erdbebensichere Gebäudeplanung in Nepal ist ebenfalls die Wahl der Baumaterialien relevant. Zum Einsatz kommen vorwiegend natürliche Materialien wie Lehm, Holz und Stein, die entsprechend lokaler klimatischer und geologischer Anforderungen erfolgreich in Regionen mit seismischen Aktivitäten verwendet wurden.

Das Hauptproblem bei Ziegelkonstruktionen ist das geringe Aufnahmevermögen von horizontalen Lasten, wodurch reine Ziegelbauweisen in Regionen mit Erdbeben nicht geeignet sind. Mittels Verstärkungen kann die Widerstandskraft gegen eine horizontale Belastung verstärkt werden, jedoch ist selbst dann die Steifigkeit des Gebäudes nur bedingt ausreichend.

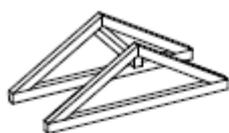
Ein Unterschied zu Konstruktionen mit Lehm besteht darin, dass diese in Kombination mit z.B. Matten auch Zuglasten aufnehmen können. Reine lasttragende Lehmwandkonstruktionen eignen sich jedoch nur für kleinere einstöckige Gebäude. Für größere und auch höhere Gebäude wird üblicherweise eine Leichtbaukonstruktion verwendet, bei welcher der Lehm keine statische Funktion hat, sondern z.B. zur Befüllung oder als Verputz verwendet wird.

Bei den Holzbauweisen gibt es drei Eigenschaften, die für erdbebensichere Konstruktionen relevant sind [29]:

- Tragfähigkeit
- Steifigkeit
- Dehnbarkeit

Die Tragfähigkeit eines Gebäudes ist bei einem Erdbeben immer dann besonders kritisch, wenn nur eine minimale plastische Verformung erfolgt, die horizontale Versteifung aber die Bewegung des Gebäudes aufnimmt. Daher ist der Dehnbarkeit der Materialien ein wichtiger Faktor für erdbebensichere Konstruktionen. Je größer die Kapazität, desto stärker ist der Widerstand für eine Bewegung der Materialien. Eine architektonische Schutzmaßnahme basiert daher auf dem strukturellen Widerstand der

ausgewählten statischen Konstruktion die einerseits das Gewicht des Gebäudes tragen müssen, während gleichzeitig eine Dehnbarkeit der Materialien gegeben sein sollte. Holzkonstruktionen bieten daher im Vergleich zur Stahl- oder Betonbauweise deutliche Vorteile, da die Tragfähigkeit in Bezug auf ihr Eigengewicht größer ist. Daher verursachen sie weniger Trägheitskraft während der Bodenbeschleunigung. Aus diesem Grund ist Holzbau wegen seiner Eigenschaften bzgl. Zug- und Biegebelastung ein sehr geeignetes Baumaterial und besonders in Kombination mit der richtigen architektonischen Struktur und entsprechenden Verbindungselementen eine effektive Bautypologie für die Errichtung von Gebäuden in durch Erdbeben gefährdeten Gebieten [30].



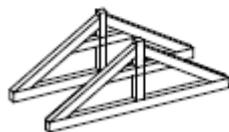
minor span^A

from a logical point of view, the smaller the dimension of the span, the less material is needed to construct the roof framework. this is a model for a minor span.



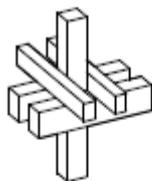
middle span

if the dimensions increase, more timber is needed to help against the loads. in this case some compression members are added to the framework



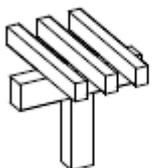
major span

there are many ways of solving the span in the framework. this is just a simple solution.



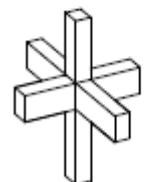
continuous column

in the shown model, the main - beam is attached to the column, on which the sub - beam sits.



continuous beam

this model is a very easy exemple of constructing floors: it hardly acquires joints, because the construction lays on top of each other (sub - beam on the main - beam).



continuous column and beams on the same level

the most complicated of the shown exemples, this particular system does allow the load to spread equally from the sub - beams to the main - beams.

Abbildung 25: Holzverbindungen

9.5 Designentwurf Nepal

Obwohl Nepal größtenteils von Bergen bedeckt ist, besteht ca. 30 % des Landes aus Waldgebieten. Dementsprechend sind viele Branchen wie z.B. Brennstoff-, Papier- oder Möbelindustrie davon abhängig. Auch für die Errichtung von Gebäuden dient Holz als eine der wichtigsten Ressourcen vor allem im Tiefland.

Die nachfolgenden Bilder zeigen nicht nur die traditionellen architektonischen Unterschiede, sondern auch die verwendeten Baumaterialien. Abhängig von den lokal verfügbaren Ressourcen ist in Nepal in den höheren Lagen im Allgemeinen eine steinbasierte Architektur zu finden, während in den tiefer gelegenen Regionen holzbasierte Gebäude vorherrschend sind. Ausgenommen hiervon sind Regionen wie die Hauptstadt etc.

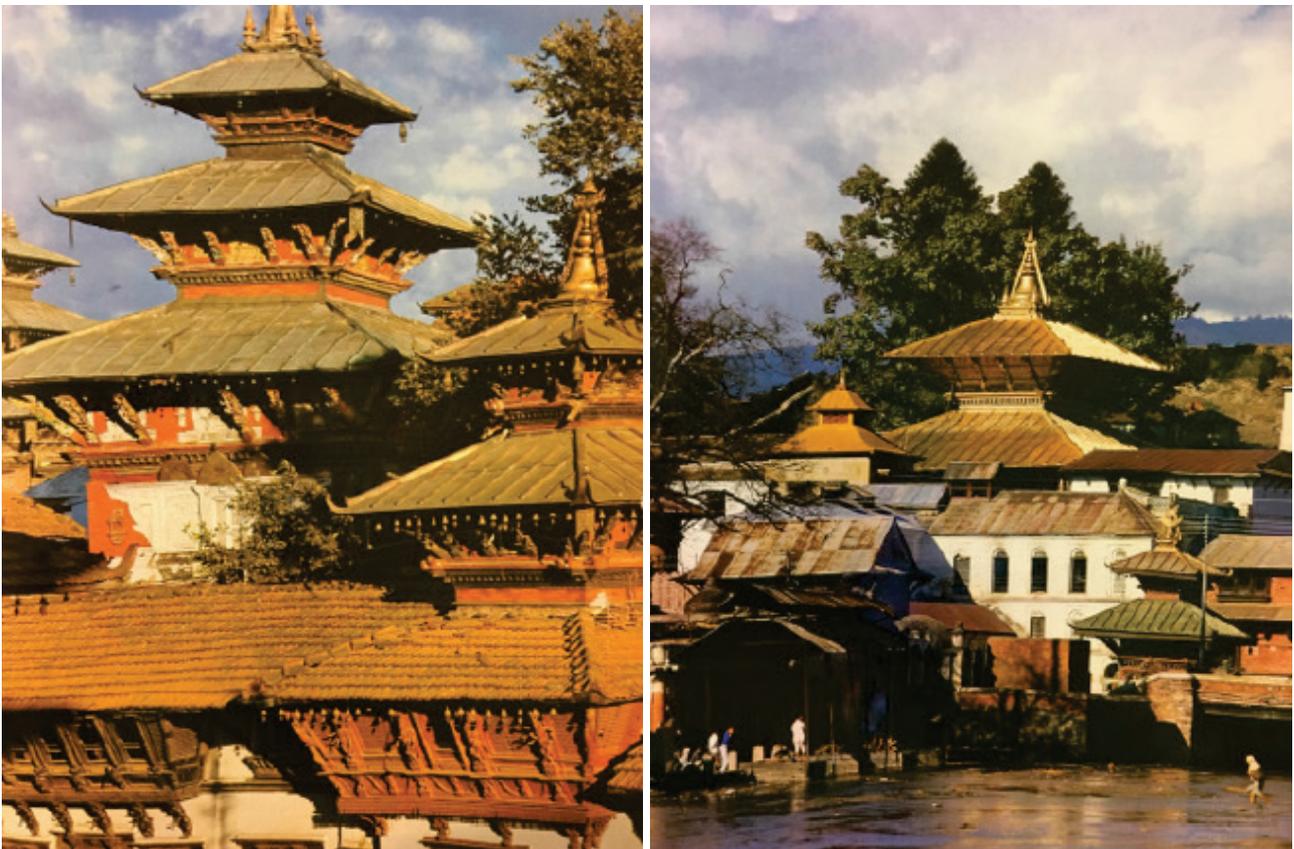


Abbildung 26: Hanuman Dhoka: Königspalast in Kathmandu (links); Pashupatinath Tempel (rechts) [31]

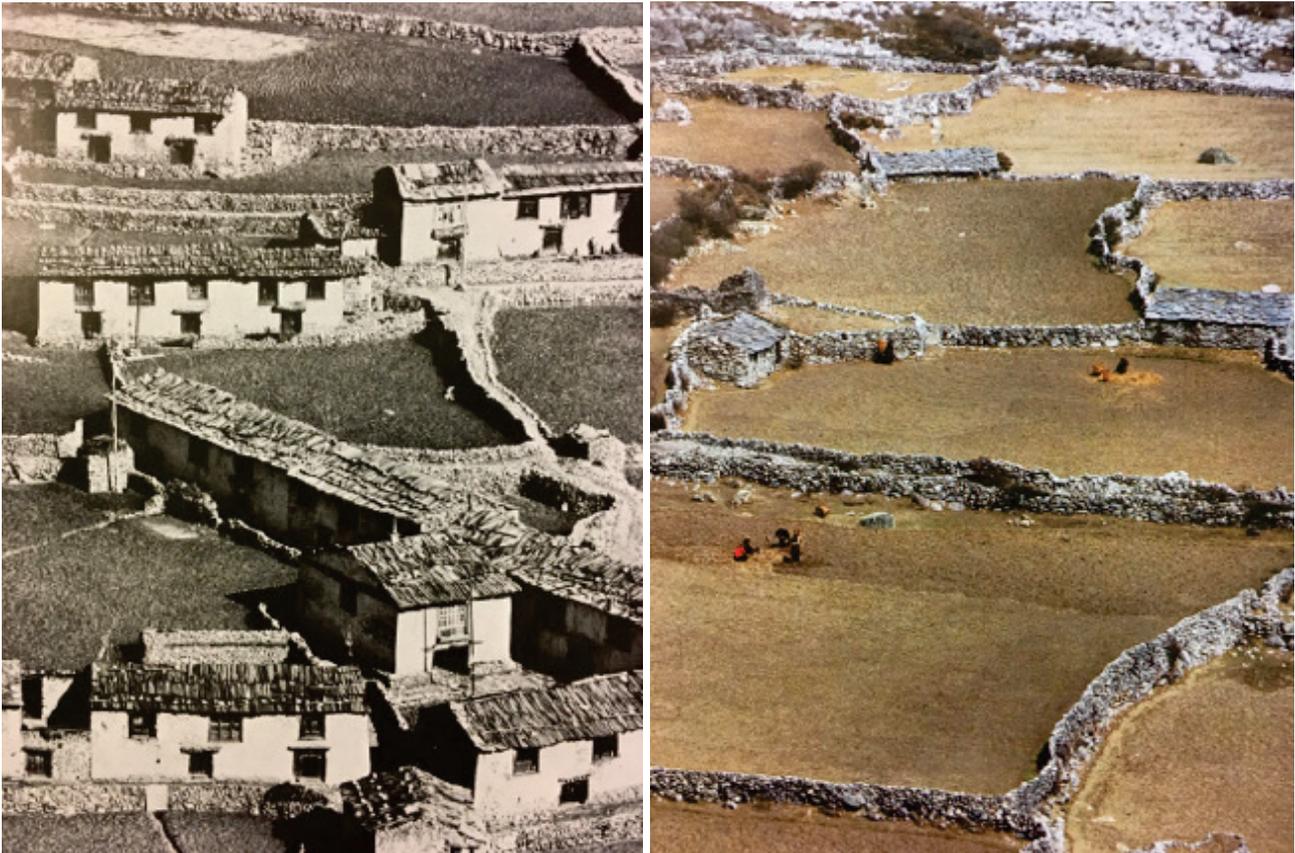


Abbildung 27: Beding in 3700 m Höhe (links); Dingpoche in 4300 m Höhe (rechts) [31]

In der Projektregion Humla ist ebenfalls Naturstein die lokale vorkommende Ressource und daher das vorwiegende Baumaterial. Es bietet nur einen geringen vorbeugenden Schutz gegen Erdbeben, aber es schützt auf der anderen Seite gegen Wind und Nässe sowie in einem gewissen Ausmaß auch gegen Kälte, und fungiert darüber hinaus als statisches Element für die Dachkonstruktion. Eine geeignete Alternative für die Errichtung von erdbebensicheren Gebäuden ist die Verwendung von Holz, aufgrund seiner Materialeigenschaften, für die statischen Elemente. Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung von Holzskelettkonstruktionen auch den Einsatz von ergänzenden Isolationsschichten aufgrund geringerer Wandstärken gegenüber Steinkonstruktionen, wodurch auch der Schutz gegen Kälte deutlich verbessert werden kann. Eine Kombination mit Natursteinen als Schutz gegen Nässe ist aber durchaus sinnvoll so lange diese nicht die tragende Funktion für die Dachkonstruktion übernehmen. Diese Lösung ist nicht zu verwechseln mit der gemischten Bauweise in Kapitel 9.3.

Entsprechend den Grundlagen für ein erdbebensicheres Planen und Bauen sollte der Schwerpunkt in der Gebäudestruktur liegen, welche auch beim Holzbau Details wie Grundriss, Form, Verbindungselemente oder die Funktion des Gebäudes beinhalten [31].

Wichtige Aspekte für das Planungsobjekt in Humla ausgehend vom aktuellen Zustand des beschädigten Gebäudes (ausgewähltes Modellobjekt ist ein Internat für 30 SchülerInnen) sind nachfolgend aufgelistet:

- Die Grundstücksfläche für das anstehende Gebäude beträgt ca. 800 m². Das beschädigte Gebäude verfügte ebenfalls über eine Unterkunftsmöglichkeit und wurde von ca. 30 Kindern und

2 Lehrern genutzt. Der Bezirk ist nur bedingt über eine Straße zu erreichen, jedoch gibt es in unmittelbarer Nähe einen kleinen lokalen Flughafen.

- Das Gebäude wurde beim Erdbeben stark beschädigt und kann seitdem nicht mehr verwendet werden. Die Kinder übernachteten seit dem Vorfall in Zelten.
- Die Temperaturen liegen Winter bei -10 °C , während im Sommer Temperaturen von bis zu 30 °C erreicht werden können. Das alte Gebäude verfügte über kein Heizsystem. Für eine Erhöhung des thermischen Komforts ist ein Heizsystem mittels Solarenergie und Biomasse als Back-Up angedacht. Der Heizwärmebedarf soll durch ein entsprechendes Gebäudedesign minimal sein. Solare Warmwasserbereiter ergänzen das System.
- Eine Kochstelle wird täglich für die Versorgung der Kinder benötigt. Bisher wurde Brennholz zum Kochen verwendet. Ein optimiertes Design der Kochstelle soll den Brennstoffbedarf reduzieren und gleichzeitig den Ausstoß schädlicher Emissionen reduzieren.
- Strom wird aktuell über eine kleine Wasserkraftanlage erzeugt. Die verfügbare Leistung ist jedoch beschränkt, weshalb Strom in erster Linie für die Beleuchtung verwendet wird. Die Ergänzung eines Photovoltaik Back-Up Systems wäre sinnvoll.
- Das Gebäude wird über eine nahe liegende Gebirgsquelle mit Frischwasser versorgt.
- Die Innenwände sollen mit Lehm verputzt werden.

Für das Demonstrationsgebäude in Humla sollen diese funktionalen Anforderungen mit den statischen Anforderungen für ein erdbebensicheres Bauen kombiniert werden.

In diesem Schulinternat sollte es daher neben dem Klassenraum auch einen multifunktionalen Aufenthaltsraum geben. Da die meisten Kinder in der Regel jünger als 10 Jahre sind, sollte dieser Raum auch gut von den Lehrern zu überschauen sein. Der private Raum ist den Lehrern vorbehalten und beinhaltet deren Schlafräume sowie einen Küchenbereich. Das geplante Gebäude ist daher in die Kategorien privater Raum, semi-öffentlicher Raum, Schlafräume der Kinder und Sanitärräume und einen öffentlichen Raum unterteilt. Die Räume der Kinder sind modular in derselben Größe und im selben Design ausgelegt.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Entwurfspläne und Zeichnungen für das Schulprojekt in Humla, bei dem nicht nur ein Gebäude wiederaufgebaut werden soll, sondern auch ein moderner Ansatz für ein nachhaltiges Bauen mit lokalen vorhandenen Baustoffen in der Region demonstriert werden soll mit der gleichzeitigen Implementierung von angepassten Technologien.

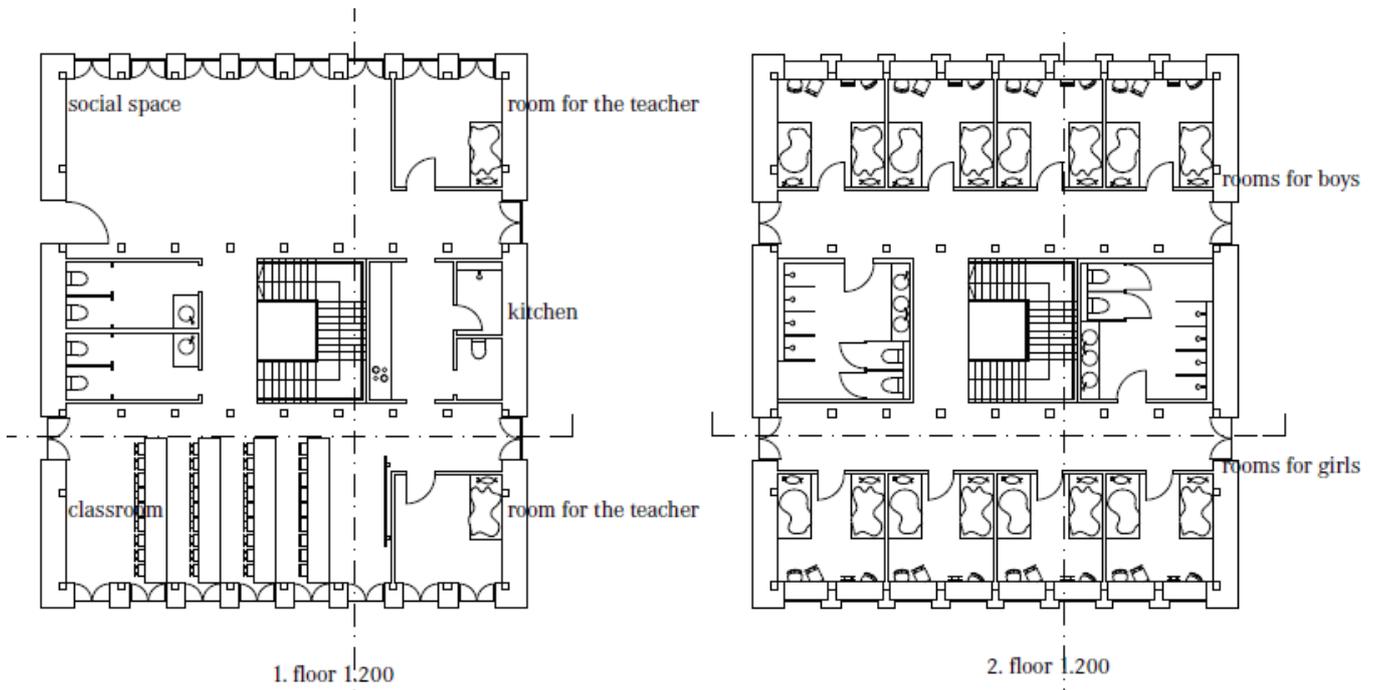


Abbildung 28: Grundrisse Projekt Humla

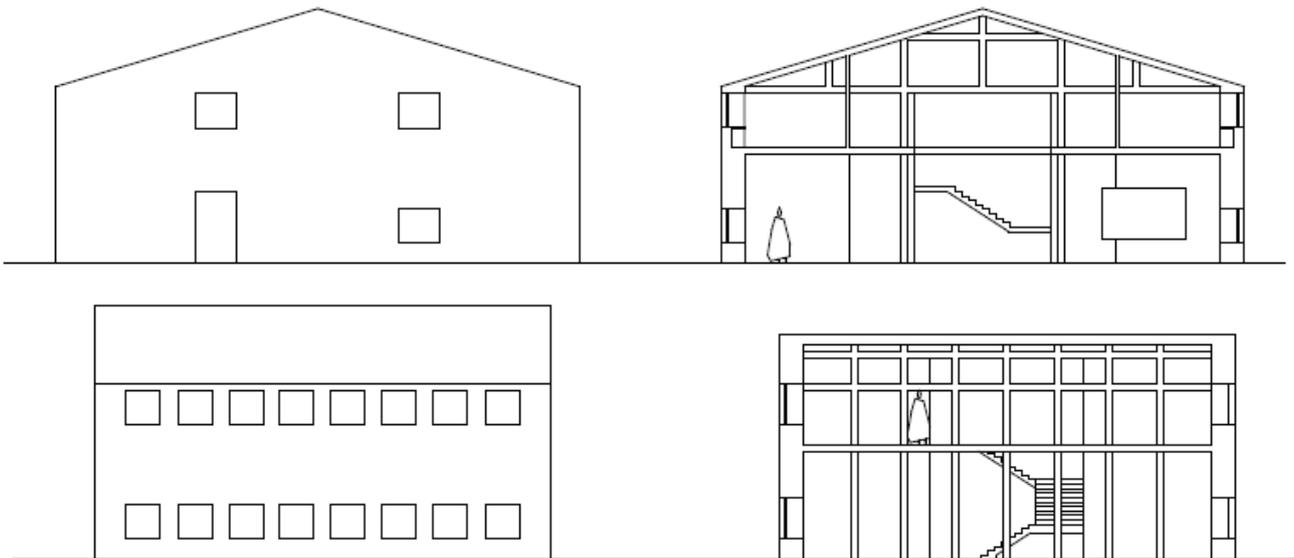


Abbildung 29: Ansichten und Schnitte Projekt Humla

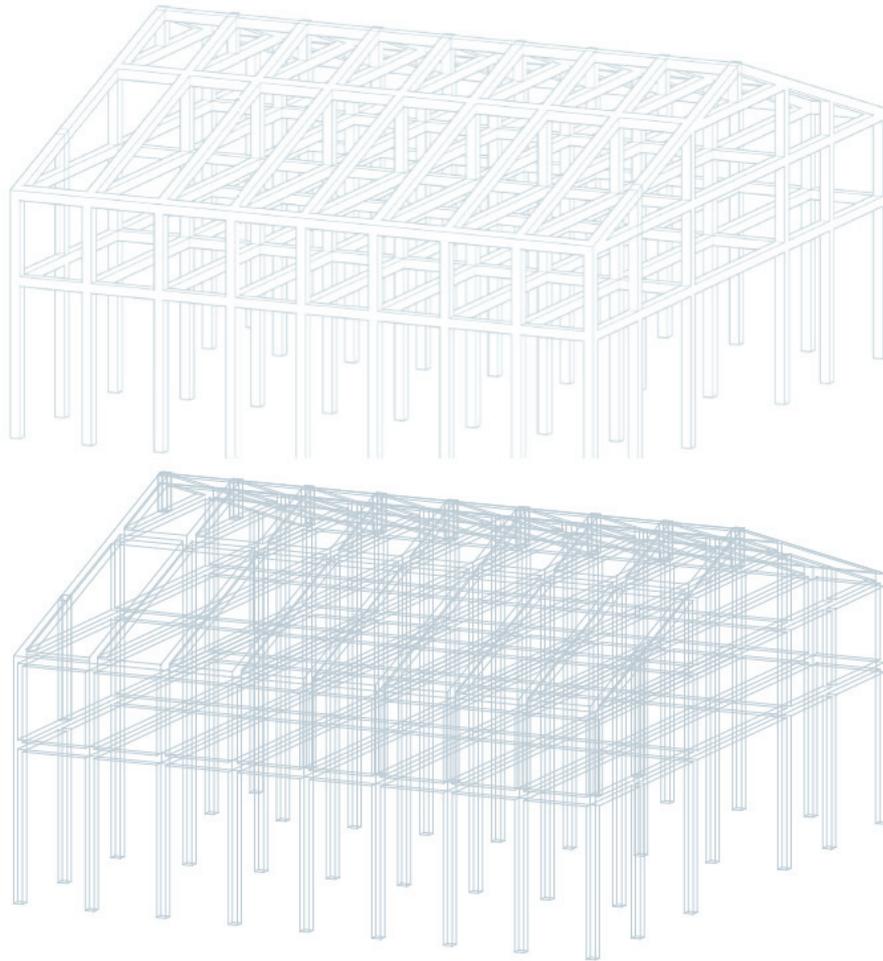


Abbildung 30: Holzkonstruktion Projekt Humla



Abbildung 31: Gebäudemodell Projekt Humla



Abbildung 32: Einbindung Gebäudemodell in die Region

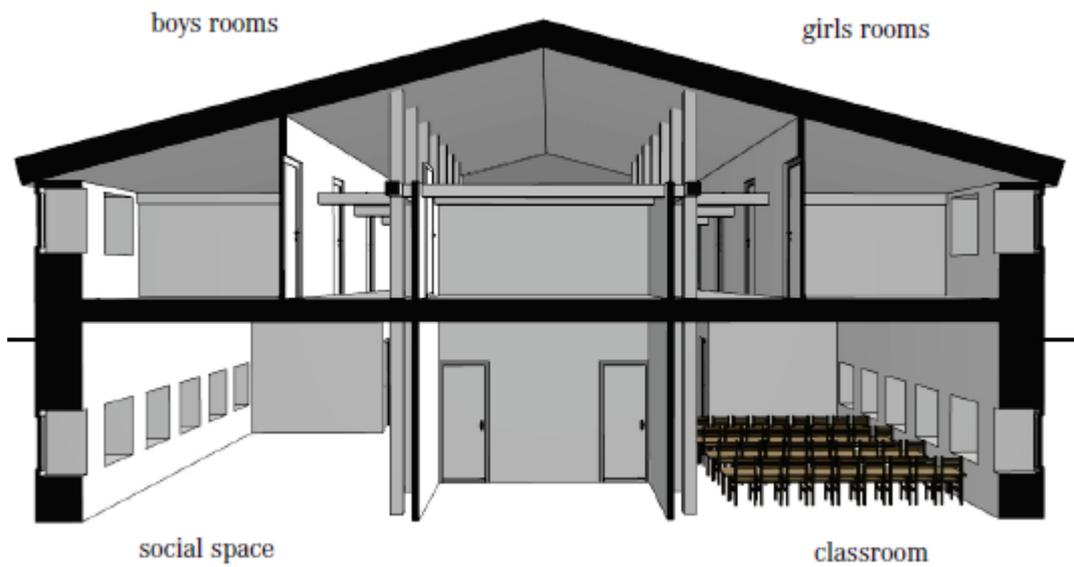


Abbildung 33: 3d-Ansicht Projekt Humla



Abbildung 34: Ansicht Klassenraum Projekt Humla

10 Netzwerkaufbau und Dissemination

Für die Dissemination und Verbreitung von österreichischen Forschungsergebnissen, Förderprogrammen und technologischen Errungenschaften auf internationaler Ebene wurden bestehende Netzwerke genutzt und weiter ausgebaut. Darüber hinaus wurden verschiedenen Fachveranstaltungen, Konferenzen und Workshops organisiert bzw. besucht.

Die entwickelten Designstrategien für Gebäude in tropischem Klima, aufbauend auf denen für das S-House entwickelten Leitprinzipien für nachhaltige energie-effiziente Gebäudelösungen, sowie die Ergebnisse der begleitenden Messuntersuchung wurden im Rahmen der Projektlaufzeit relevanten Zielgruppen in Europa aber auch Stakeholdern in den Zielländern Philippinen und Thailand präsentiert.

10.1 Workshops und Kooperationen

Allein in den durchgeführten Workshops auf den Philippinen (siehe Tabelle 11) haben 524 Personen teilgenommen, von denen ein Großteil aus Tourismusunternehmen kommt. Unter den Teilnehmern fanden sich aber auch Regierungsvertreter, Hersteller und Lieferanten von umweltfreundlichen Technologien, Finanzierungsinstitutionen, Vereine und nicht staatlichen Organisationen sowie Reiseagenturen.

Tabelle 11: Disseminations Workshops

Datum	Ort	Teilnehmer	Gender M	Gender F
22.06.2016	Cebu Parklane International Hotel, Cebu City	63	28	35
27.06.2016	The Metro Centre Hotel and Convention Center, Bohol	78	29	49
30.06.2016	The Pinnacle Hotel and Suites, Davao City	83	39	44
27.09.2016	Marco Vincent Dive Resort, Puerto Galera	96	39	57
30.09.2016	Patio Pacific Boracay, Boracay	87	55	36
05.10.2016	Lima Park Hotel, Batangas City	73	37	36
12.11.2016	Tamaraw Hall, Provincial Capitol, Calapan City	44	24	20
Total		524	251	277

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Teilnehmer der einzelnen Workshops in den Philippinen.



Abbildung 35: Cebu (links); Bohol (rechts)



Abbildung 36: Davao (links); Puerto Galera (rechts)



Abbildung 37: Boracay (links); Batangas (rechts)



Abbildung 38: Calapan City

Die Mitgliederanzahl der teilnehmen Hotels und Resorts ist seit Beginn des Zero Carbon Resort Projektes und der Entwicklung des Zero Carbon Demonstrationsgebäudes auf 844 angestiegen.

In Thailand wurden die Disseminationsaktivitäten für eine Verbreitung der Projektergebnisse vor allem in den Regionen von Surat Thani, Tak, Chang Mai, Loei und Phuket durchgeführt. Die Anzahl der Mitglieder ist dort im Projektzeitraum auf 85 angestiegen.

10.2 Universitäten

Darüber hinaus wurde auch verstärkt eine Zusammenarbeit mit Universitäten angestrebt. In den Philippinen wurden sowohl an der Batangas State University (siehe Abbildung 39) als auch an der Adamson University Informationsveranstaltungen und technische Vorträge abgehalten in denen die implementierten alternativen Technologien demonstriert wurden.



Abbildung 39: Batangas State University

Auch in Thailand wurden neue Kooperationen und Partnerschaften zwischen der GrAT und der Naresuan University sowie dem King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang abgeschlossen und in Form eines Memorandums of Understanding besiegelt formalisiert (siehe Abbildung 40).



Abbildung 40: Unterzeichnung des Memorandum of Understanding in Thailand

10.3 Besucherzentrum

Ein besonderes Highlight war die Besichtigung des Zero Carbon Buildings durch den EU Botschafter Franz Jessen (siehe Abbildung 41). Dessen Besuch sowie der offizielle Showcase Trailer des Demonstrationsgebäudes wurde im Rahmen der Cine Europe 2016, einer EU Veranstaltungsreihe, mehrfach ausgestrahlt (siehe Abbildung 42).



Abbildung 41: Besuch des EU Botschafters im Zero Carbon Demonstrationsgebäude



Abbildung 42: Besuch des EU Botschafters (links); Filmvorführung beim Cine Europe (rechts)

Das Zero Carbon Demonstrationsgebäude, welches ein fester Bestandteil des PCSD (Palawan Council for Sustainable Development) Trainingszentrums in Irawan geworden ist, fungiert auch als Besucherzentrum. Insgesamt wurde das Gebäude seit der Fertigstellung von 774 nationalen und internationalen Experten, Studenten, Schülern und anderen Gästen besucht, wobei die Zahl der Besuche stetig ansteigt (siehe Abbildung 43).



Abbildung 43: Study tour der Nagoya Universität, Japan (links); Schüler der Puerto Princesa Elementary School (rechts)

Ergänzend zu den Führungen sind im Gebäude Schilder und Plakate installiert, welche die implementierten innovativen Technologien umfassend beschreiben.

10.4 Konferenzen und Publikationen

Das Zero Carbon Building, die entwickelten Innovationen sowie die Ergebnisse der begleitenden Messuntersuchung wurden in der Projektlaufzeit auf folgenden Konferenzen und Messen aktiv in Form von Vorträgen präsentiert:

- Internationale Konferenzen in Europa:
 - “Monitoring of a Prototypical Free-Running Building: A case study in a Hot-and-Humid Climate” presented by S. Eikemeier at International Conference enviBUILD 2016 - Buildings and Environment, Brno University of Technology, Czech Republic, 22-23 September 2016
 - “Performance of the ZCR passive cooling design - Thermal comfort in the Philippines” presented by Dr. Wimmer at 2nd international Zero Carbon Building Conference 2016 - Zero Carbon Buildings Today and in the Future, Birmingham City University, Birmingham, UK, 8-9 September 2016
- Konferenzen in den Philippinen:
 - Presentation at 2016 Ecolodge Design Design and Planning Workshop, International School of Sustainable Tourism Campus, Subic Freeport, Zambales, September 20, 2016
 - Presentation at In-Phasing event of ProGED-Department of Trade and Industry, La Terrasse Restaurant, September 16, 2016
- Messen und Ausstellungen in den Philippinen:
 - PCSDS Exhibit, Robinson’s Place Palawan, Puerto Princesa City, Palawan, January 25-27, 2017
 - Palawan’s Environmental Summit, Provincial Capitol, Puerto Princesa City, Palawan, November 17-18, 2016

- World Best Island Tourism, Travel & Expo Trade, Robinson's Place Palawan, Puerto Princesa City, Palawan, July 29-31, 2016
- Bücher:
 - S. Eikemeier: Monitoring of a Prototype Building in Tropical Climate - Thermal Comfort Evaluation, Akademiker Verlag, Formal Science Series, ISBN: 978-3-639-88665-8, Germany, 2016
- Wissenschaftliche Fachartikel:
 - S. Eikemeier, M. Schuß, R. Wimmer et al.: Monitoring of a Prototypical Free-Running Building: A case study in a Hot-and-Humid Climate, Abstract: Proceedings of the Conference, International Conference enviBUILD 2016 - Buildings and Environment, Brno University of Technology, ISBN 978-80-214-5392-0, Full Paper: Applied Mechanics and Materials, Buildings and Environment – Energy Performance, Smart Materials and Buildings Volume 861 (2017), pp 392-400, ISBN: 978-3-0357-1070-0, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.861.392, Brno, Czech Republic, 2016
 - S. Eikemeier, R. Wimmer: Performance of the ZCR passive cooling design - Thermal comfort in the Philippines, Proceedings of the Conference, 2nd international Zero Carbon Building Conference 2016 - Zero Carbon Buildings Today and in the Future, Birmingham City University, ISBN: 978-1-904839-88-0, Birmingham, UK, 2016

10.5 Stakeholder Treffen für Projektanbahnung Nepal

Für eine Umsetzung des für Nepal entwickelten Konzeptes mit dem angepassten Designentwurf und für eine Projektanbahnung mit adaptierten Gebäudelösungen in weiteren Regionen wurden bestehende Netzwerke genutzt um Kontakte zu relevanten Stakeholdern zu generieren.

Ein wichtiges Treffen für die Abwicklung von Projekten in Nepal hat im Februar 2017 mit Mr. Mim Halal, dem Programm Manager für Agriculture, Trade and Private Sector Development der europäischen Delegation für Nepal stattgefunden. Ein Schwerpunkt seines Aufgabenbereiches liegt im Bereich von Kooperationsprojekten für die nachhaltige Entwicklung ländlicher Regionen in Nepal.

Bei seinem Besuch in Wien vom 5ten bis zum 7ten Februar 2017 und im S-House in Böheimkirchen (siehe Abbildung 44) konnten die entwickelten Strategien und Innovationen sowie mögliche Hürden für eine erfolgreiche Implementierung im anvisierten Zielgebiet besprochen werden.



Abbildung 44: Netzwerktreffen mit Programm Manager der EU Delegation für Nepal im S-House

Ein weiterer Informations- und Interessensaustausch für die Initialisierung eines Kooperationsprojektes hat unter anderem mit den NGOs Nepal Trust und ABARI stattgefunden.

Nepal Trust ist eine Non Governmental Organisation (NGO) mit Projektbüros in Simikot, Humla und Kathmandu, die sich für eine Unterstützung der nepalesischen Bevölkerung und Zusammenarbeit einsetzt um nachhaltige gemeinschaftliche Entwicklungsprojekte in den Bereichen Gesundheit, Bildung, erneuerbare Energien, Ökotourismus und Denkmalschutz zu realisieren.

ABARI ist ein sozial und umweltbewusstes Forschungs-, Design- und Bauunternehmen mit Fokus auf die lokale und traditionelle Architektur Nepals. Als Forschungs- und Designfirma versucht ABARI traditionelles Wissen und natürliche Materialien wie Adobe, Bambus, Steine und Schilf mit zeitgenössischen Designpraktiken zu verbinden.

In Hinblick auf eine weiterführende Adaptierung der entwickelten Designstrategien für eine Projektinitialisierung in Bhutan hat ein Informations- und Interessensaustausch mit der Royal Society for Protection of Nature, der Bhutan Chamber of Commerce and Industry, dem Department of Engineering Services und dem College of Science and Technology stattgefunden.

11 Schlussfolgerungen und Ausblick

Ausgehend von den entwickelten Designprinzipien, die bereits beim S-House in Böheimkirchen, Niederösterreich, erstmals realisiert wurden, ist auch dieses Demonstrationsgebäude am Trainingszentrum des „Palawan Council for Sustainable Development“ aus lokal verfügbaren nachwachsenden Rohstoffen errichtet worden und kombiniert höchste Energieeffizienz mit einem zeitgemäßen Design.

Das begleitende Monitoringkonzept (siehe Kapitel 6) und die durchgeführte messtechnische Untersuchung des Gebäudes (siehe Kapitel 7) zeigen die Funktionalität des Gebäudes und beweisen, dass ein akzeptables Innenraumklima selbst für extreme tropische Klimabedingungen mittels einem innovativen nachhaltigen Gebäudedesign auch ohne die Verwendung einer Klimaanlage erreicht werden kann.

Das Gebäude versorgt sich selbst mit Strom und (Regen-) Wasser und auch die Abwässer werden vor Ort gereinigt und wiederverwertet. Damit ist es das ideale Modell für den Einsatz auf Inseln und in abgelegenen Regionen. Der Stromverbrauch konnte im Vergleich zu konventionellen Gebäuden um über 90 % reduziert werden.

Mit der Zertifizierung durch den Austrian Building Star (siehe Kapitel 8) wird sowohl das Zero Carbon Building und die dort implementierten österreichischen Innovationen und Technologien international noch stärker wahrgenommen sowie im Gegenzug wird aufgrund der zahlreichen Netzwerk- und Disseminationsaktivitäten auch die Marke „Austrian Green Building Star“ beworben.

Die durchgeführten Aktivitäten und Meetings mit relevanten Stakeholdern führten zu einer Steigerung der Bekanntheit von österreichischem Know-how und Technologien und führen damit längerfristig auch zu einer weiteren Initiierung von Folgeprojekten bei denen die vom BMVIT initiierten Forschungsaktivitäten im Mittelpunkt stehen. Damit werden Forschungs- und Wirtschaftskooperationen für die Themenbereiche Klimaschutz und ressourcenschonende Bauweisen aktiv unterstützt.

Für die Umsetzung von neuen Projekten bzw. einer Replikation der entwickelten Technologien und Innovationen in anderen Regionen ist es jedoch wichtig diese an die jeweiligen regionalen Rahmenbedingungen der Zielländer anzupassen wie am Beispiel für Nepal (siehe Kapitel 9) gezeigt wurde.

Auf der einen Seite können klimatische Unterschiede die Funktionalität und Effizienz des Gebäudes beeinflussen und auf der anderen Seite können müssen auch unterschiedliche Bautraditionen und Standards berücksichtigt werden, um die Akzeptanz der Bewohner für neue innovative Gebäudekonzepte sicher zu stellen. Eine Analyse der Zielregion bzw. die Kooperation mit lokalen Stakeholdern sowie ein Informationsaustausch mit lokalen Experten sind daher bereits zu Beginn der Planungsphase äußerst wichtig.

Des Weiteren sollte das Gebäudekonzept auch für eine Umsetzung mit lokal verfügbaren Ressourcen und Baumaterialien adaptiert werden, damit die Gebäudelösungen auch zu vertretbaren Kosten repliziert werden können.

Vor dem Hintergrund des Wiederaufbaus in Nepal besteht ein hoher Bedarf an Maßnahmen und innovativen Lösungen im Baubereich um zukünftige Katastrophen zu vermeiden. Dieses wird z.B. auch Projekt: Zero Carbon Gebäude International, Projektnummer: 857285

durch die vom 6-8 Juni stattgefundene World Reconstruction Conference 3 in Brüssel verdeutlicht (<https://www.gfdr.org/wrc3>), bei der über 500 Experten, Firmen, Akademiker, NGO's und Delegierte über Maßnahmen, Strategien und Erfahrungen für einen vorbeugenden Wiederaufbau diskutierten. Besonders der Wiederaufbau in Nepal mit erdbebensicheren Konstruktionen kombiniert mit einer ressourcenschonenden und energie-effizienten Bauweise bietet ein enormes Potential für einen nachhaltigen Klimaschutz, aber auch für eine öffentlichkeitswirksame Erhöhung des Stellenwertes österreichischer Innovationen auf regionaler und internationaler Ebene.

12 Literatur

- [1] R. Wimmer. Zero Carbon Resorts, Appropriate Technology for Sustainable Tourism in the Philippines, Proc. of the Symp.: 30 Jahre "Angepasste Technologie – Eine Erfolgsgeschichte", Vienna University of Technology, Austria. (2016)
- [2] R. Wimmer et al. Zero Carbon Resorts Handbook Vol. 3, EU SWITCH-Asia program. (2014)
- [3] Aeron, 2013. Wireless Data Logger For Automatic Weather Station – Operations & User Guide. Aeron Systems Pvt. Ltd. India. (2013)
- [4] Sensirion, 2008. Datasheet SHT75. Driesen + Kern GmbH, Germany. (2008)
- [5] Aosong, Digital-output relative humidity and temperature sensor/module AM2303. Aosong (Guangzhou) Electronics Co., Ltd. China
- [6] P.O. Fanger, Thermal Comfort - Analysis and Applications in Environmental Engineering, Danish Tech. Press, Copenhagen. (1970)
- [7] ASHRAE HANDBOOK Fundamentals (SI), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning. (2005)
- [8] DIN EN ISO 7730, Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005), German. V. (2006)
- [9] DIN EN ISO 7730-1, Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV, German V. EN ISO 7730:2005, Berichtigungen zu DIN EN ISO 7730:2006-05. (2007)
- [10] Z. Lin, S. Deng, A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics- Developing a thermal comfort model for sleeping environments, Elsevier J. Building and Environment. (2006)
- [11] Z. Lin, S. Deng, A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics- Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics, Elsevier J. Building and Environment. (2007)
- [12] Ahlborn, 2013. Produktkatalog ALMEMO Messgeräte. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH. Holzkirchen. Germany.
- [13] Meteororm, Climate data Puerto Princesa, Meteororm database V7.1.215160. (2015)
- [14] W. Rudloff, World Climates, Sci. Publ. Company, Stuttgart, Germany. (1981)
- [15] P.O. Fanger, J. Toftum, Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates, Elsevier J. Energy and Buildings 34 (2002) 533-536.
- [16] <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2170140/Shaking-Map-major-earthquake-1898-reveals-stunning-image-planets-danger-zones.html>; Zugriff: 31.08.2017
- [17] <https://earthquake.usgs.gov/static/lfs/learn/worldseis.pdf>; Zugriff: 31.08.2017
- [18] <https://www.skymetweather.com/content/earth-and-nature/10-earthquake-prone-countries-in-the-world>, Zugriff: 28.08.2017
- [19] <https://www.openstreetmap.org/relation/184633>; Zugriff: 31.08.2017
- [20] <https://opentopomap.org/#map=14/28.05494/84.02644>; Zugriff: 31.08.2017
- Projekt: Zero Carbon Gebäude International, Projektnummer: 857285

- [21] Government of Nepal, National Planning Commission Secretariat, Central Bureau of Statistics, National Population and Housing Census, Kathmandu, Nepal. (2011)
- [22] <https://pubs.usgs.gov/of/2010/1083/j/>; Zugriff: 31.08.2017
- [23] <http://uxblog.idvsolutions.com/2012/06/earthquakes-since-1898.html>; Zugriff: 31.08.2017
- [24] http://www.preventionweb.net/files/10562_Figure222.jpg; Zugriff: 31.08.2017
- [25] <http://www.raonline.ch/pages/edu/haz/quake04a13.html>; Zugriff: 31.08.2017
- [26] R. Flesch, Baudynamik. praxisgerecht. (1993)
- [27] G. Akyokus & M. Köhler, Erdbeben in Istanbul/Avcilar. Erdbebensicheres Bauen. (2000)
- [29] M. Toms, Erdbebensicheres Bauen mit Naturstoffen. (2004).
- [29] H. J. Blaß & P. Fellmoser, Schadenanalyse von Bauwerken in Indonesien nach einem Erdbeben. (2007)
- [30] T. Herzog, J. Natterer, R. Schweitzer, M. Volz & W. Winter. Holzbau Atlas, Birkhäuser. Basel. (2003)
- [31] L. Wikler, Nepal. S. 33, 77, 202, 208. (1976)