



Technische  
Universität  
Braunschweig



Technische Universität Braunschweig  
Leichtweiß-Institut für Wasserbau  
Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen  
Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci

## **Bachelorarbeit**

# **Entwicklung von Strategien für die Konstruktion von tsunamisicheren Bauweisen**

Ina Zimmermann  
Matrikelnummer 4035538

Prüfer:  
Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci

Betreut durch:  
Dr.-Ing. A. Strusińska-Correia

Braunschweig, August 2013

# *Danksagung*

Ich möchte mich recht herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci und dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau bedanken, die mir ermöglicht haben, dieses Thema als Bachelorarbeit umzusetzen.

Insbesondere möchte ich meiner Betreuerin Dr.-Ing. A. Strusińska-Correia danken, die mich schon während des Japanaufenthalts im Rahmen der Summer School auf Feldbegehungen mitgenommen und so mein Interesse für dieses Thema verstärkt hat. Vielen Dank für die interessante Aufgabenstellung, sowie die wissenschaftliche und persönliche Betreuung.

Mein besonderer Dank gilt Frau Neuert, als Organisatorin der Summer School, die mir für weitere Fragen zur Seite stand. Außerdem danke ich meinen Eltern, die sich Zeit genommen haben, meine Arbeit zu korrigieren und sich für das Thema meiner Bachelorarbeit begeistern konnten.

Ich danke meinen Freunden für die moralische Unterstützung und Motivation.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis.....	ix
Symbolverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	i
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	5
1.3 Methodik.....	5
2 Theoretische Grundlagen.....	7
2.1 Tsunamiphänomen.....	7
2.2 Tsunamientstehung und -ausbreitung.....	9
2.2.1 Entstehung.....	9
2.2.2 Ausbreitung.....	11
2.2.3 Wellenformen.....	18
2.3 Tsunamiskalen zur Bestimmung von Intensität und Magnitude.....	19
2.3.1 Intensität.....	19
2.3.2 Magnitude.....	20
2.4 Tsunamieinwirkung auf die Küste am Beispiel der letzten Tsunamiereignisse.....	21
2.5 Zusammenfassung.....	24
3 Übliche Bauweisen und Stadtplanung in tsunamigefährdeten Ländern.....	25
3.1 Typische Bauweisen in tsunamigefährdeten Ländern.....	25
3.1.1 Wohngebäude.....	25
3.1.2 Evakuierungsgebäude und öffentliche Gebäude.....	35
3.2 Richtlinien und Strategien für tsunamisichere Konstruktionen.....	43
3.3 Stadtplanung.....	49
3.3.1 exemplarische Stadtplanungskonzepte.....	49
3.3.2 konkrete Planungskonzepte für die Städte Otsuchi und Rikuzentakata.....	55
3.4 Wiederaufbau.....	58
3.5 Innovative Ideen.....	62
3.6 Zusammenfassung.....	66
4 Belastung der Gebäude durch Tsunamis.....	69
4.1 Art der Tsunamikräfte.....	69

4.1.1	Hydrostatische Kräfte .....	69
4.1.2	Auftriebskräfte .....	70
4.1.3	Hydrodynamische Kräfte .....	71
4.1.4	Druckwellen Kräfte.....	72
4.1.5	Aufprall Kräfte.....	72
4.1.6	Brechende Flutwellenkräfte .....	73
4.2	Mögliche Gestaltungsmöglichkeiten von Gebäuden .....	75
4.3	Richtlinien und Normen zur Berechnung der Tsunamibelastung.....	78
4.3.1	Überblick der wichtigsten Richtlinien .....	78
4.3.2	Unterschiede in den Berechnungsansätzen zwischen den Richtlinien .....	79
4.4	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen zur Belastung der Gebäude von Tsunamis.....	81
4.5	Zusammenfassung .....	84
5	Zusammenstellung und Analyse von Tsunamischäden auf Gebäude .....	86
5.1	Tsunamischäden bei Gebäudetypen unterschiedlichen Baumaterials .....	86
5.1.1	Bambus- und Holzgebäude .....	87
5.1.2	Gebäude aus Mauerwerk.....	89
5.1.3	Stahl- und Stahlbetongebäude.....	92
5.2	Versagensursachen und Schadensbilder .....	95
5.3	Zusammenhänge zwischen dem Zerstörungsgrad in Abhängigkeit von Lage und Standort der Gebäude .....	97
5.4	Statistische Auswertung der Gebäudeschäden .....	102
5.5	Zusammenfassung .....	110
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	111
6.1	Kritische Zusammenfassung.....	111
6.2	Ausblick.....	112
	Literaturverzeichnis.....	113
	Forschungsarbeiten und Berichte .....	113
	Internetquellen.....	118

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Subduktionszonen-Erdbebens in Japan (Fujita, 2012) .....	2
Abb. 1.2:	Überblick der Region Tohoku und der Sanriku Küste mit Fokus auf die Präfektur Iwate: a) Japankarte (Internetquelle 5), b) die sechs Präfekturen der Region Tohoku, c) besuchte Städte der Sanriku Küste während der Summer School .....	3
Abb. 1.3:	Zerstörte Küstenorte: a) Taro, b) Omoto, c) Yamada (Dank an A. Strusińska-Correia), d) Kamaishi (Dank an A. Strusińska-Correia) .....	4
Abb. 2.1:	Weltkarte : Einstufung der Tsunami-Gefährdung (Internetquelle 9) .....	8
Abb. 2.2:	Ausbreitung des Teletsunamis im Indischen Ozean 26. Dezember 2004 (Internetquelle 10) .....	8
Abb. 2.3:	Weltkarte mit Übersicht der Plattengrenzen: a) Ausschnitt des Pazifischen und Indischen Ozeans, b) Detailansicht (Internetquelle 11) .....	9
Abb. 2.4:	Plattengrenzen: a) konstruktive Plattengrenze (divergent), b) destruktive Plattengrenze (konvergent), c) konservative Plattengrenzen (Transformstörung) (Internetquelle 13).....	10
Abb. 2.5:	Entstehung eines Tsunamis durch ein Subduktionszonenerdbeben (Hyndman & Hyndman, 2005): a) vor dem Erdbeben, b) während des Erdbebens, c) nach dem Erdbeben .....	11
Abb. 2.6:	Zusammenhänge zwischen Wellenlänge, Wellenperiode, Wellengeschwindigkeit und Tiefe des Wassers: a) Aufsteilung von Tsunamiwellen (Bormann, 2008 a), b) Geschwindigkeit von Tsunamiwellen in Abhängigkeit der Wassertiefe (Cuypers, 2004) .....	12
Abb. 2.7:	Zusammenhang zwischen Wellenschnelligkeit, Wellenlänge und Wellenperiode bei Tsunamis im Vergleich zu Windwellen (Oumeraci, 2010) ..	13
Abb. 2.8:	Eigenfunktion von Tsunamiwellen bei Flachwasserwelle, Übergangsbereich und Tiefwasserbereich (Oumeraci, 2010) .....	16
Abb. 2.9:	Tsunami Amplitude (Wellenhöhe) (UNESCO-IOC, 2006) .....	17
Abb. 2.10:	Wellenformen von Tsunamis (Cuypers, 2004): a) auf offenem Meer ( <i>deep</i> ), b) im Flachwasserbereich ( <i>shallow</i> ), c) an der Küste ( <i>coast</i> ) - veraltete Annahme, d) an der Küste ( <i>coast</i> ) - veraltete Annahme, e) Bore ( <i>bore</i> ), f) schnell aufsteigender Wasserspiegel ( <i>surge</i> ).....	18
Abb. 2.11:	Vorher/Nachher Bilder 2 Jahre nach dem Tsunami 2011 in Japan (Internetquelle 14): a) und b) Miyako, Präfektur Iwate, c) und d) Ofunato, Präfektur Iwate, e) und f) Ishinomaki, Präfektur Miyagi .....	22
Abb. 2.12:	Überschwemmungszonen der Sanrikuküste Japans (Internetquelle 15) .....	23
Abb. 3.1:	traditionelles japanisches Wohnhaus: a) Querschnitt, b) Holzverbindungen (Kujawski, 1972) .....	26
Abb. 3.2:	Hausbau bei Miyako, Japan: a) Betonfundament mit Holzunterkonstruktion, b) Fundament mit Lüftungsgitter, c) und d) durch Nut verbundene Holzbalken 27	

Abb. 3.3:	Fortgeschrittener Hausbau bei Miyako, Japan: a), b) und c) Dachgiebel mit oberer Beplankung, d) Gesamtansicht des Rohbaus, e) Bodendetail, f) Gipskartonplatten .....	28
Abb. 3.4:	Bauschritte eines traditionellen Ziegelsteinhauses in Sri Lanka (Internetquelle 17) 29	
Abb. 3.5:	für Mauerwerksbauten verwendetes Material (Pomonis, et al., 2006): a) halb gebrannte Tonziegel, b) Vollziegel .....	29
Abb. 3.6:	Wohnhäuser in Sri Lanka: a) Galle (Internetquelle 18), b) Galle (Internetquelle 19), c) Galle (Internetquelle 19), d) Peraliya (Borreo, 2005), e) und f) Hambantota (Wijeyewickrema, et al., 2006) .....	30
Abb. 3.7:	Wohnhäuser in Indien: a) Andamanen (Internetquelle 21), b) Nagapattinam (Internetquelle 22), c) Nagapattinam (Internetquelle 22), d) Andamanen (Internetquelle 23), e) Car Nicobar (Internetquelle 24), f) Car Nicobar (Internetquelle 25) ,g) Tamil Nadu, Dach aus Kokusnussblättern, h)Tamil Nadu, Strohdach, i)Tamil Nadu, Dach aus Mangalore-Ziegeln (Barenstein & Pittet, 2007) .....	31
Abb. 3.8:	Ziegelsteine in Indien (Internetquelle 26): a) sonnengetrocknete Ziegelsteine, b) gebrannte Ziegel und Zementblöcke .....	32
Abb. 3.9:	Traditionelle Baustoffe in Thailand (Sthapitanonda & Mertens, 2006): a) und b) tong tung Blätter c), d), e) und f) Gras, Schilf und Palmenblätter, die an Bambus oder Rattan genäht werden .....	32
Abb. 3.10:	Traditionelle Baustoffe in Thailand (Sthapitanonda & Mertens, 2006): a), b) und c) geteilter Bambus, Rattan und Schilf als Leichtbauwand.....	33
Abb. 3.11:	Wohnhaus in Thailand kostengünstigem Material (Sthapitanonda & Mertens, 2006).....	33
Abb. 3.12:	Typische Häuser in Thailand: a) Phuket (Internetquelle 27), b) Ko Phi Phi (Internetquelle 28), c) und d) Kamala Beach (Pomonis, et al., 2006), e) Ton Sai Bay (Pomonis, et al., 2006), f) Kamala Beach (Pomonis, et al., 2006).....	34
Abb. 3.13:	Landestypische Leichtbauweisen auf Java, Indonesien (Reese, et al., 2007): a) und b) Zerstörung bei Bambus-Holzhäusern nach Überflutungshöhen von 1 m bzw. 3 m, c) und d) traditionelle Ziegelsteinbauten bei Überflutungshöhen von ca. 3 m .....	35
Abb. 3.14:	Beispielhaftes Design eines Tsunamievakuierungsgebäudes (Raskin, et al., 2009).....	36
Abb. 3.15:	Anordnung von Evakuierungsgebäuden: a) mögliche Anordnung in Küstennähe , b) unvorteilhafte (1, 2, 3, 4) und vorteilhafte Lage (5, 6).....	38
Abb. 3.16:	vertikale Evakuierungskonstruktionen in Japan: a) Life-Saving Tower/Tasukaru Tower in Tanabe Town (FEMA-P646, 2008), b) Gebäude in Minamisanriku nach 2011 (Shibayama, et al., 2013), c) Shirahama Beach Resort in Toyo (FEMA-P646, 2008), d) Gebäude in Kaifu (FEMA-P646, 2008), e) Grundschule in Aonae f) Nishiki Tower (FEMA-P646, 2008), g) Konstruktion in Rikuzentakata nach 2011 (Dank an Gesa Neuert), h) Berme in Aonae (FEMA-P646, 2008), i) Gebäude in Kesenuma City (Internetquelle 29) 39	

Abb. 3.17:	Krankenhaus in Distrikt Kinniya, in Trincomalee, Sri Lanka (Borreo, 2005)....	40
Abb. 3.18:	öffentliche Gebäude in Indien (Patel, et al., 2001): a) um 1900 erbautes 2-geschossiges Regierungsgebäude aus Ziegelstein in Bhuj, b) Gebäude in Mirzapur mit ausgefachten Wänden, c) Stahlbetonkonstruktion in Bharazar.....	40
Abb. 3.19:	Evakuierungsgebäude in Phang Nga (Internetquelle 30) .....	41
Abb. 3.20:	Öffentliche Gebäude bzw. mögliche Evakuierungsgebäude in Thailand (Pomonis, et al., 2006): a) und b) Schule in Kamala Beach vor und nach dem Tsunami, c) 2-etagiger Resort in Khao Lak, d) örtliches Elektrizitätswerk und Kommunikationsgebäude in Phi Phi Island .....	41
Abb. 3.21:	Evakuierungsgebäude in Indonesien nach dem Tsunami 2004 erbaut: a) und b) Banda Aceh (Leonard, et al., 2011), c) Banda Aceh (Suppasri, et al., 2012 b), d), e) und f) Entwürfe für Evakuierungsgebäude.....	42
Abb. 3.22:	Nutzung von Moscheen in Padang als Evakuierungsgebäude (Internetquelle 31): a) Masjid Nural Iman, b) 3D Grafik, c) weitläufige Treppen zu oberen Etagen, d) Übersicht an Moscheen in Küstennähe .....	43
Abb. 3.23:	Gegenüberstellung von Theorie und Praxis .....	44
Abb. 3.24:	Bebauungsdichte in Küstenstreifen: a) und b) optimale und ungünstige Häuseranordnung (ATEP, 2006-2010).....	45
Abb. 3.25:	Verringerung des Tsunamirisikos: a) vermeiden, b) lenken, c) verlangsamen, d) blocken (NTHMP, 2001). .....	46
Abb. 3.26:	Bauliche Maßnahmen (NTHMP, 2001): a) und b) Konstruktionen um Schäden durch Tsunamieinwirkung zu minimieren, c) horizontale und vertikale Evakuierung.....	46
Abb. 3.27:	Schnitt durch den unteren Bebauungsbereich von Hilo, Hawaii (NTHMP, 2001).....	47
Abb. 3.28:	Ausrichtung zur Küste: a) und b) Design einer Turnhalle (FEMA-P646, 2008), c) theoretisches Modell (Internetquelle 34). .....	47
Abb. 3.29:	Richtige Anordnung von Gebäuden ermöglicht den Tsunamiwellen an Gebäuden vorbei zu fließen (Budiarjo, 2006) .....	47
Abb. 3.30:	Konzept für die Entwicklung einer tsunamiresistenten Stadt (MLIT, 2011) .....	48
Abb. 3.31:	Umstrukturierungsbeispiel (Internetquelle 36).....	49
Abb. 3.32:	Stadterneuerung (urban regeneration): a) Überblick und Anordnung der einzelnen Nutzungssektoren, b) vorstellbare Evakuierungsmöglichkeiten, c) Küstendämme und Evakuierungsrouten ( Iwate Prefecture, 2011).....	50
Abb. 3.33:	Wiederaufbau ( <i>urban rebuilding</i> ).....	51
Abb. 3.34:	Umsiedelung ( <i>settlement relocation</i> ) oder interne Siedlungsumstrukturierung ( <i>internal settlement restructuring</i> ): a) vorhandene Siedlungen, b) vorstellbare Evakuierungsmöglichkeiten, c) Küstendämme und Evakuierungsrouten ( Iwate Prefecture, 2011) .....	52
Abb. 3.35:	Stadtplanung in Chile (Costa, 2011): a) vorhandene Bebauung, b) verbessertes Konzept.....	53
Abb. 3.36:	Stadtplanung in Chile (Costa, 2011): a) altes Konzept, b) und c) neues Konzept.....	54
Abb. 3.37:	Stadtplanung in Banda Aceh, Indonesien (Budiarjo, 2006) .....	54

Abb. 3.38:	Wiederaufbaupläne der Stadt Otsuchi (Internetquelle 37) .....	55
Abb. 3.39:	Wiederaufbaupläne der Stadt Rikuzentakata, Iwate (Inagaki & Saito, 2012).....	56
Abb. 3.40:	Schnitt durch die Küstenzone Rikuzentakatas: a) Vorstellung der Regierung, b) Vorstellung der Bürger (Inagaki & Saito, 2012) .....	56
Abb. 3.41:	Wohnhäuser, die dem Tsunami standgehalten haben: a) Taro, Japan (Dank an A. Strusińska-Correia, b) Otanabe Port, Japan.....	57
Abb. 3.42:	schmale Gassen zwischen Wohnhäusern in Taro, Japan (Dank an A. Strusińska-Correia).....	57
Abb. 3.43:	Sanierung eines Wohnhauses in Arari der Präfektur Shizuoka (Internetquelle 39) 58	
Abb. 3.44:	Beispiele für wiederaufgebaute Wohnhäuser in Sri Lanka (Internetquelle 41) .	59
Abb. 3.45:	Wiederaufbau in Karaikal Pondicherry, Indien (Swiss Solidarity & Swiss Red Cross, 2008 a) .....	60
Abb. 3.46:	Wiederaufbau eines Hauses in Tamil Nadu, Indien (Internetquelle 42) .....	60
Abb. 3.47:	Wiederaufbau eines Wohnhauses in Thailand (Internetquelle 43).....	61
Abb. 3.48:	Wiederaufbau von Wohnhäusern in Indonesien (Internetquelle 44).....	61
Abb. 3.49:	Tsunamievakuierungspark (Internetquelle 45).....	62
Abb. 3.50:	Verbesserte und übliche Bauweise des typischen Küstenhauses in Sri Lanka : a) Aufbau des tsunamiresistenteren Hauses , b) Seitenansicht des tsunamiresistenteren Hauses ,c) Anordnung der bewehrten Betonblöcke des tsunamiresistenteren Hauses, d) typisches Haus in Sri Lanka (Berrios, et al., 2005).....	63
Abb. 3.51:	Kogami Projekt: a) und b) Schnitt durch die Konstruktion (Internetquelle 47).	64
Abb. 3.52:	3D Grafiken des Kogami Projektes: a) Anbau von natürlichen Korallenriffen (Internetquelle 46), b) Seitenansicht der verbundenen Elemente (Internetquelle 49), c) und d) Gründungen der tragenden Konstruktion (Internetquelle 47), e) Wege führen oberhalb der zerstörten Bereiche zu Zufluchtsgebäuden (Internetquelle 46).....	65
Abb. 3.53:	Tohoku sky village: a) Grafik für Konzept von Insel mit Wohngebiet, b) Grafik für Konzept von Insel mit Wohnhäusern, als auch öffentlichen Gebäuden, c) Konzeptskizzen für Insel mit Schwerpunkt auf Wohnhäusern bzw. öffentlichen Gebäuden (Internetquelle 50) .....	66
Abb. 4.1:	Hydrostatische Kräfte auf eine Wand bzw. Gebäude (FEMA P646 S.71(2008)) .....	70
Abb. 4.2:	Auftriebskräfte (Internetquelle 52).....	70
Abb. 4.3:	Hydrodynamische Kräfte auf eine Wand (FEMA-P646, 2008).....	72
Abb. 4.4:	Mögliche Lastkombinationen (Palermo & Nistor, 2008): a) einleitender Aufprall, b) anschließender Aufprall.....	75
Abb. 4.5:	Hydrostatische Belastung (Internetquelle 53): a) vorher, b) nachher.....	75
Abb. 4.6:	Auftriebskräfte(Internetquelle 53) : a) vorher, b) nachher .....	76
Abb. 4.7:	Hydrodynamische Kräfte (Internetquelle 53) : a) vorher, b) nachher .....	76
Abb. 4.8:	Druckwellen Kräfte (Internetquelle 53): a) vorher, b) nachher.....	77
Abb. 4.9:	Aufprall Kräfte (Internetquelle 53) : a) vorher, b) nachher .....	77
Abb. 4.10:	Unterspülungen (Internetquelle 53): a) vorher, b) nachher .....	78

Abb. 4.11:	Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsansätze für die Geschwindigkeit von Tsunami-Boren (Nouri, 2008) .....	80
Abb. 4.12:	Modellhäuser der ersten Versuchsreihe (Meyyappan, et al., 2013): a) rundes Modell, b) rechteckiges Modell c) quadratisches Modell .....	81
Abb. 4.13:	Grafischer Vergleich von rundem (rot), rechteckigen (blau), und quadratischem (grün) Modell bei 0, 25 und 50 % Öffnungen (Meyyappan, et al., 2013).....	81
Abb. 4.14:	Modellhäuser der zweiten Versuchsreihe mit unterschiedlichen Gründungstypen, geordnet nach steigender Widerstandsfähigkeit von links nach rechts (Meyyappan, et al., 2013).....	82
Abb. 4.15:	Versuchsaufbau (Thusyanthan & Madabhushi, 2008) .....	83
Abb. 4.16:	Modellhäuser (Thusyanthan & Madabhushi, 2008): a), b) und c) tsunamiresistentes Haus, c) typisches Küstenhaus .....	84
Abb. 5.1:	Überflutungshöhe im Verhältnis zu Schäden an unterschiedlichen Bauweisen nach Shuto (1993) (Pomonis, et al., 2006) .....	86
Abb. 5.2:	Wohngebiet in Taro, Iwate in Japan: a) vor dem Tsunami von 2011 (Internetquelle 54), b) unmittelbar nach dem Tsunami 2011 (Internetquelle 55), c) nach Beseitigung von Schutt (Internetquelle 56).....	87
Abb. 5.3:	Zerstörung eines Wohngebäudes aus Bambus auf Java, Indonesien (Reese, et al., 2007).....	88
Abb. 5.4:	Zerstörung von 1-geschossigen Holzgebäuden in Thailand (Saatcioglu, et al., 2005): a) und b) Kata Beach, c) und d) Patong Beach .....	88
Abb. 5.5:	Zerstörung von Holzgebäuden auf Phi Phi Island, Thailand (Saatcioglu, et al., 2005): a), b), c) und d) verschiedene Ansichten von Küstenkonstruktionen .....	89
Abb. 5.6:	Zerstörung von Gebäuden aus Mauerwerk: a) Java, Indonesien (Reese, et al., 2007) b) Khao Lak, Thailand (Saatcioglu, et al., 2005), c) Kamala Beach, Thailand (Saatcioglu, et al., 2005), d) Banda Aceh, Indonesien (Saatcioglu, et al., 2005).....	90
Abb. 5.7:	Zerstörung von Mauerwerksgebäuden in Sri Lanka (Pomonis, et al., 2006): a) Paiyagala, b) Kahawa, c) Kahawa, d) Peraliya, e) Peraliya, f) Peraliya, g) Paiyagala, h) Paiyagala, i) Unawatuna, j) Kahawa, k) Paiyagala, l) Kahawa.....	91
Abb. 5.8:	Stahlbetongebäude in Japan, die dem Tsunami standgehalten haben (Fraser, et al., 2012): a) 3-geschossiges Stahlgebäude des Crisis Management Departments, b) Stahlbetongebäude in Shiomi-cho in Minami-Sanriku, c) Matsubara Apartment und Evakuierungsgebäude in Minami-Sanriku, d) Shizugawa Krankenhaus in Minami-Sanriku, e) Grundschule und Evakuierungsgebäude in Arahama, f) Stahlgebäude in Yamamoto .....	92
Abb. 5.9:	Krankenhaus in Galle, Sri Lanka, erlitt lediglich mäßige Schäden (Pomonis, et al., 2006).....	93
Abb. 5.10:	Zerstörung von Stahlbetongebäuden in Sri Lanka (Pomonis, et al., 2006): a) Peraliya, b) Unawatuna, c) Galle, d) Matara .....	93
Abb. 5.11:	Zerstörung von Stahlbetonbauten: a) Khao Lak, Thailand (Rosetto, et al., 2006), b) Khao Lak, Thailand (Saatcioglu, et al., 2005), c) Phi Phi Island,	

	Thailand (Saatcioglu, et al., 2005), d) Banda Aceh, Indonesien (Saatcioglu, et al., 2005).....	94
Abb. 5.12:	Durch Unterspülung belastete Moschee in Lambuuk Beach, Indonesien (Leonard, et al., 2011) .....	94
Abb. 5.13:	Versagensursachen und Schadensbilder (Fukuyama, et al., 2011): a) pfannkuchenartiger Einsturz und b) Zusammenbruch der 1.Etage .....	95
Abb. 5.14:	Versagensursachen und Schadensbilder (Fukuyama, et al., 2011): a) Kippen und Bewegung und b) Schiefstellungen oder treibenden Gebäuden.....	96
Abb. 5.15:	Versagensursachen und Schadensbilder (Fukuyama, et al., 2011): a) Rutschen und b) Abbruchstellen an Wänden und Öffnungen.....	96
Abb. 5.16:	Versagensursachen und Schadensbilder (Fukuyama, et al., 2011): a) Schuttaufpralle und b) mitgerissene Verkleidungsmaterialien.....	96
Abb. 5.17:	Thotagamuwa (Pomonis, et al., 2006).....	98
Abb. 5.18:	Unawatuna.....	99
Abb. 5.19:	Weligama.....	101
Abb. 5.20:	Schadenskurve für alle erfassten Gebäude (Chiba bis Aomori) in Japan 2011(Suppasri, et al., 2012 a).....	104
Abb. 5.21:	Schadenskurve unterteilt nach Baumaterial von Chiba bis Aomori in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a): a) Stahlbeton, b) Stahl, c) Holz, d) Mauerwerk.....	104
Abb. 5.22:	Schadenskurve von Stahlbeton- und Holzgebäuden mit 1, 2 und 3 oder mehr Etagen von Chiba bis Aomori in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a): a) Stahlbeton-1 Etage, b) Holz-1 Etage, c) Stahlbeton-2 Etagen, d) Holz-2 Etagen, e) Stahlbeton-3 oder mehr Etagen, f) Holz-3 oder mehr Etagen.....	105
Abb. 5.23:	Vergleich der Schäden zwischen flacher Küstenlandschaft und Riaküste bei weggespülten Gebäuden (ZG 6) in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a): a) Stahlbeton , b) Stahl, c) Holz, d) Mauerwerk.....	106
Abb. 5.24:	Vergleich der Schäden zwischen flacher Küstenlandschaft und Riaküste bei zusammengebrochenen Gebäuden (ZG 5) in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a): a) Stahlbeton , b) Stahl, c) Holz, d) Mauerwerk .....	107
Abb. 5.25:	Vergleich der Schäden in der Stadt Ishinomaki für alle Baumaterialien in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a): a) flache Küstenlandschaft, b) Riaküste .....	108
Abb. 5.26:	Schadensanfälligkeit verschiedener Bauweisen und Städte im Vergleich: a) Khao Lak (Thailand), b) Banda Aceh (Indonesien), c) Okushiri (Japan) .....	109
Abb. 5.27:	Schadenskurve von Gebäuden in Java, Indonesien: a) Vergleich von drei ortstypischen Bauweisen, b) Vergleich von geschützten mit freistehenden Gebäuden.....	109

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Intensitätsskala nach Sieberg-Ambraseys (Levin & Nosov, 2010).....	20
Tab. 2:	Gegenüberstellung von Überlebenden des Tsunamis 2011 in Japan im Verhältnis zu Evakuierungseinrichtungen (Fraser, et al., 2012) .....	38
Tab. 3:	Richtlinien bzw. Strategien vor und nach 2004 und 2011.....	44
Tab. 4:	Strömungswiderstandskoeffizienten $C_d$ nach FEMA-P55 (Yeh, et al., 2005) ...	71
Tab. 5:	Aufpralldauerbestimmung nach FEMA-P55 (Yeh, et al., 2005).....	73
Tab. 6:	Bestimmung des dynamischen Druckbeiwertes $C_p$ nach FEMA-P55 (Yeh, et al., 2005).....	74
Tab. 7:	Gebäudekategorien nach Baumaterial (Pomonis, et al., 2006) .....	97
Tab. 8:	Schadens- und Intensitätsskala (Pomonis, et al., 2006).....	97
Tab. 9:	Zerstörungsgrade nach MLIT (Suppasri, et al., 2012 a).....	102

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Großbuchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Größe der angehobenen Fläche	m <sup>2</sup>
A <sub>H</sub>	Projektionsfläche des ebenen Körpers senkrecht zur Fließrichtung	m <sup>2</sup>
C	konstanter Beiwert	-
C <sub>d</sub>	Strömungswiderstandskoeffizienten	-
C <sub>db</sub>	Formbeiwert	-
C <sub>E</sub>	Entfernungsfaktor	-
C <sub>p</sub>	dynamische Druckkoeffizient	-
D	Pfeildurchmesser	M
E	Potentielle Energie	J
F <sub>b</sub>	Auftriebskraft	KN
F <sub>brkp</sub>	Brechende Flutwellenkraft	KN
F <sub>d</sub>	Auftriebskraft	KN
F <sub>h</sub>	Hydrostatische Kraft auf eine Wand	KN
F <sub>I</sub>	Auftriebskraft	KN
F <sub>s</sub>	Auftriebskraft	KN
H	durchschnittliche Tsunamihöhe an der Küste, nächstgelegenen zu dem Ursprung	M
H <sub>A</sub>	maximal erfasste Amplitude des Tidepegels	M
H <sub>b</sub>	Höhe der brechenden Welle	M
H <sub>r,max</sub>	maximale Wellenauflaufhöhe	M
L	Wellenlänge	M
M <sub>t</sub>	Tsunamimagnitude	-
T	Wellenperiode	S
V	durch Gebäude verdrängtes Wasservolumen	m <sup>3</sup>

**Lateinische Kleinbuchstaben**

$\Delta t$	Aufpralldauer	S
$c$	Wellenschnelligkeit	m/s
$c(\omega)$	Phasengeschwindigkeit	m/s
$d_s$	Bemessungswert für Ruhewasserfluthöhe	M
$d_{s2}$	Überflutungshöhe	M
$f_{brkp}$	Brechende Flutwellenkraft	KN
$g$	Gravitationskonstante	m/s <sup>2</sup>
$h$	Wassertiefe	M
$h_A$	maximale Wellenamplitude	M
$h_D$	Druckwellenhöhe	M
$h_m$	Mittlere Anhebung	M
$h_R$	Distanz oberhalb des Wandsockels	M
$k(\omega)$	Wellenzahl	-
$m$	Masse des Körpers	Kg
$r$	Abstand von der Quelle	M
$u$	Bore-Geschwindigkeit	m/s
$u(\omega)$	Gruppengeschwindigkeit	m/s
$u_b$	Geschwindigkeit des durch Aufprallkräfte betroffenen Körpers	m/s
$u_I$	Anströmungsgeschwindigkeit	m/s
$u_p$	Geschwindigkeitskomponente auf die Wand	m/s

**Griechische Kleinbuchstaben**

$\Delta$	Distanz vom Epizentrum des Erdbebens zum Messpunkt	Km
$\rho$	Wasserdichte	kg/m <sup>3</sup>
$\omega$	Häufigkeit	T <sup>-1</sup>



## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ASCE	American Society of Civil Engineers
ATEP	Alaska Tsunami Education Programs
CCH	The City and Country of Honolulu Building Code
DCS	Department of Census & Statistics Sri Lanka
DJSFSF e.V.	Deutsch-Japanischen Synergie Forum Sanriku Fukkou
DS Divisions	Divisional Secretary's Divisions
EEFIT	The Earthquake Engineering Field Investigation Team
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FEMA CCM	Federal Emergency Management Agency Coastal Construction Manual
ft	Feet
GHI	Geo Hazards International
GS Divisions	Grama Niladhari Divisions
IBMB	Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
IOTWS	Indian Ocean Tsunami Warning System
JMA	Japan Meteorological Agency
mi	Meilen
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MLIT	Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Japan
Mw	Magnitude
NGO	non-governmental organisation
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NS	Niederschlag
NSF	National Science Foundation
NTHMP	National Tsunami Hazard Mitigation Programs

---

SDC	Swiss Agency for Development and Cooperatio
SKAT	Swiss Resource Centre and Consultancies for Development
SMBTR	Structural Design Method of Buildings for Tsunami Resistance
sq ft	square feet
TEB	Tsunami evacuation building
TEREP	Tsunami Evacuation Raised Earth Parks
UBC	Uniform Building Codes
UNEP SBCI	United Nations Environment Programme Sustainable Building & Construction Initiative
USGS	U.S. Geological Survey

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Bilder **des Tohoku-Erdbebens** und des darauf folgenden **Tsunamis** vom **11. März 2011 in Japan** trafen einen unerwartet: Ein solches Ausmaß an Zerstörung war bisher nur aus Entwicklungsländern bekannt, galt Japan doch bis dato als fortschrittlich und führend in Bezug auf Erdbebensicherheit. Das Tohoku-Erdbeben mit der Magnitude von 9,0 auf der Richterskala war das viertstärkste seit 1900 erfasste Beben weltweit (Internetquelle 1). Der Tsunami hat knapp 16.000 Menschen das Leben gekostet, weitere 3.000 gelten als vermisst. Durch die Zerstörung ganzer Küstengebiete mussten 470.000 Menschen umquartiert werden, 300.000 Häuser sind als komplett oder teilweise eingestürzt erfasst (Internetquellen 2 und 3).

Zu dem hohen **Ausmaß** an zerstörten **Häusern** und benötigten **Notunterkünften** haben mehrere Faktoren beigetragen: In Japan wurde der **Schwerpunkt nicht auf die Tsunamisicherheit einzelner Gebäude**, sondern auf den **Entwurf und Bau von Küstenschutzmaßnahmen** (Wellenbrecher, Ufermauern) gesetzt. Ihre Aufgabe ist es, die Kraft des Wellenaufpralls - auf die Küste zu verringern, um insbesondere eine Überflutung der in Küstennähe liegenden Städte und Dörfer zu verhindern. Diese Küstenschutzmaßnahmen haben in ihrer Aufgabe während des besonders starken Tsunamis 2011 versagt. Durch **suboptimale Anordnung** und zu **geringfügige Dimensionierung** wurden die Küstenschutzmaßnahmen zunächst durch die auflaufenden Wellen überspült. Durch den Sog des ablaufenden Wassers wurden komplette Mauerelemente von den Wassermassen mitgerissen.

Die **meisten Gebäude**, in Japan, insbesondere Einfamilienhäuser, bestanden aus einer leichten Konstruktionsbauweise, die oftmals **erbeben-** aber **nicht tsunamisicher** waren. Sie waren aus einem belüfteten Betonfundament und einem Aufbau in Holzrahmenbauweise konstruiert. Da viele Häuser direkt angrenzend hinter Ufermauern und nur wenige auf Anhöhen gebaut waren, wurden sie nach der Zerstörung der Mauerelemente ebenfalls von den Tsunamiwellen erfasst. Mauerelemente und Häuserüberreste wurden als schwimmende Schutt- und Trümmer Teile von den Wassermassen mitgerissen und haben so zur Vergrößerung des Tsunamiausmaßes beigetragen.

Durch seine geographische Lage, dem Aufeinandertreffen von vier tektonischen Platten, ist **Japan** einerseits **besonders** in Bezug auf die Häufigkeit der Eintrittswahrscheinlichkeit **tsunamigefährdet** (s. Abb. 1.1). Andererseits bleibt durch die geringe Entfernung der Epizentren zur Küste nur **wenig Zeit zur Evakuierung**, da Tsunamis in weniger als 20 Minuten die Küste erreichen können. Ausgewiesene Evakuierungsgebäude und höher gelegene Standorte (Plattformen) waren insbesondere von körperlich beeinträchtigten oder älteren Menschen nicht gut und schnell genug von jedem Standort aus erreichbar.

Ein ähnliches Bild bot sich 2004 im **Indischen Ozean**. Der Teletsunami forderte insgesamt ca. 230.000 Opfer aus 15 betroffenen Ländern (Suppasri, et al., 2012 b), zerstörte einige 100.000 Häuser und hinterließ 3 Mio. Obdachlose (GFZ Potsdam, 2008). Besonders betroffen waren die Länder **Indonesien, Sri Lanka, Indien und Thailand**.

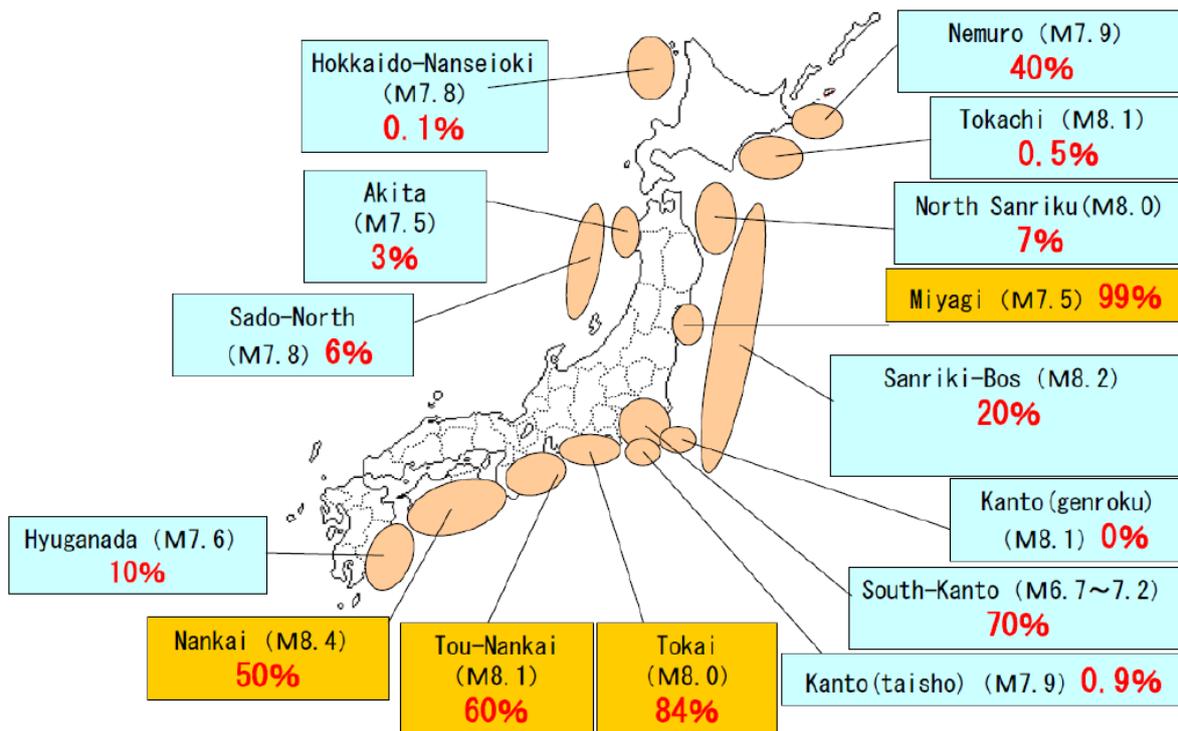


Abb. 1.1: Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Subduktionszonen-Erdbebens in Japan (Fujita, 2012)

Da zu diesem Zeitpunkt im Gegensatz zu Japan weder Frühwarnsysteme noch ausgereifte Küstenschutzmaßnahmen vorhanden waren, gab es neben dem immensen Zerstörungsausmaß deutlich mehr Todesopfer zu verzeichnen. Alleine in Sri Lanka sind über 88.000 Wohneinheiten als beschädigt verzeichnet, von denen ca. 40.000 als vollständig zerstört gelten (Internetquelle 4).

**Deshalb stellen tsunamisichere Bauweisen** (Evakuierungsgebäude, Wohngebäude, öffentliche Gebäude), neben der Weiterentwicklung von vorhandenen Frühwarnsystemen, regelmäßig stattfindenden Evakuierungsübungen, dem Ausbau gut ausgewiesener Evakuierungswege sowie der Entwicklung innovativer Schutzmaßnahmen, wie z.B. Küstenwäldern, **ein wichtiges Aufgabenfeld für die zukünftige Stadtplanung dar.**

Vor Beginn meiner Bachelorarbeit habe ich im September 2012 an einer Summer School in Japan zum „**Wiederaufbau der Sanriku Küste im Norden Japans**“ teilgenommen, die als einmonatiges Programm (05.-24.09.12) von dem Deutsch-Japanischen Synergie Forum Sanriku Fukkou (DJSFSF e.V.) und der Japanisch-Deutschen Gesellschaft Tochigi veranstaltet wurde. Die Sanriku Küste, zu der die drei Präfekturen Aomori, Iwate und Miyagi gehören (s. Abb. 1.2), wurde am schwersten vom Tsunami 2011 getroffen und wurde aus diesem Grund, um das Ausmaß der Zerstörung zu zeigen, als Motto der Summer School ausgewählt.

Ziel dieser Summer School war das **Sammeln und Diskutieren** von gemeinsamen Ideen für den Wiederaufbau der japanischen Nordostküste nach dem Tsunami Ereignis 2011. Dazu wurden unterschiedliche Teilnehmer aus Deutschland und Japan zusammengebracht.

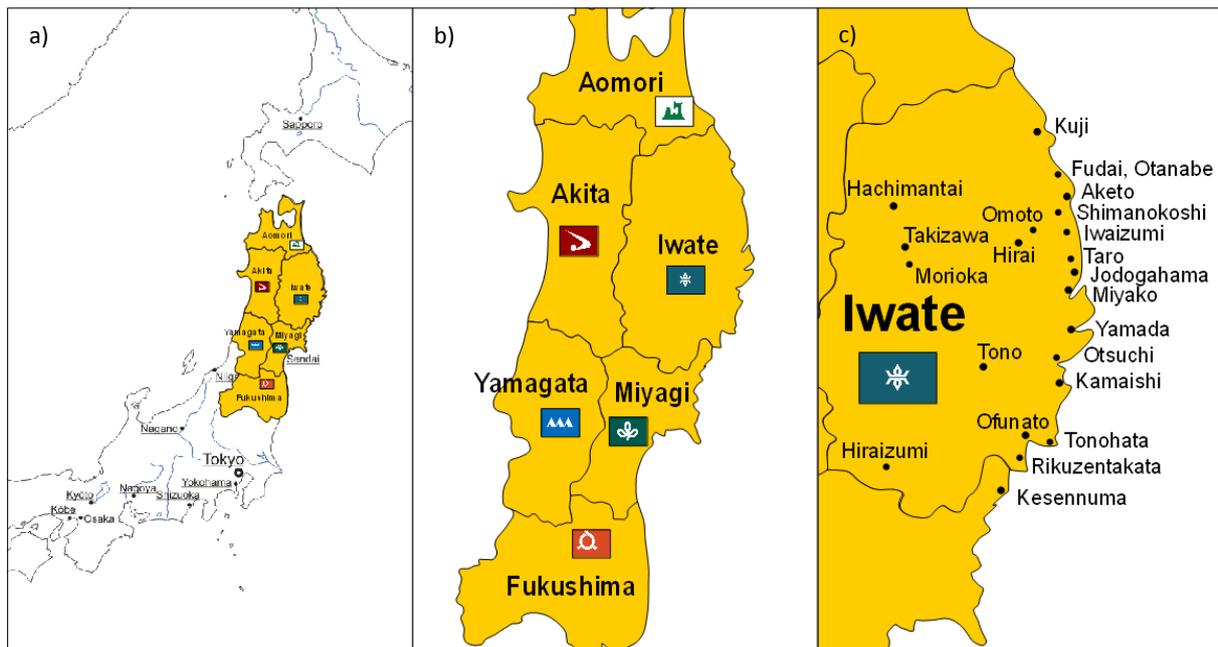


Abb. 1.2: Überblick der Region Tohoku und der Sanriku Küste mit Fokus auf die Präfektur Iwate: a) Japankarte (Internetquelle 5), b) die sechs Präfekturen der Region Tohoku, c) besuchte Städte der Sanriku Küste während der Summer School

Zum Wissens- und Meinungsaustausch fanden Seminare, Vorträge und Workshops vor Ort in Tokio, Takizawa, Taro und Yamada statt. Zu den Referenten aus unterschiedlichen Fachgebieten gehörten Wissenschaftler, Politiker, Vertreter gemeinnütziger Organisationen, sowie betroffene Bürger. Workshops dienten den Studenten zur theoretischen Vertiefung der zuvor gehörten Vorträge. Die Vorträge verfolgten unterschiedliche Ansätze aus Sichtweise von Wissenschaft, Behörden und Bürgern: Einerseits wurden Ideen zur Verbesserung bestehender, sowie zu innovativen Küstenschutzmaßnahmen und ökologischer Stadtplanung vorgestellt, dessen Umsetzung in den kommenden Jahren Aufgabe für **Planer** und **der Regierung Japans** sein wird. Erkenntnisse aus vorangegangenen Tsunamikatastrophen und Schwachpunkte der bestehenden Küstenschutzmaßnahmen wurden beschrieben. Andererseits wurde in den Vorträgen Bezug auf die Perspektive der **Bürger** genommen: Augenzeugen aus Taro und Rikuzentakata berichteten wie sie den Tsunami miterlebt haben. Die Wünsche der Bewohner Rikuzentakatas zur Neugestaltung ihrer Stadt wurden basierend auf Umfragewerten dargestellt. Erfolgreiche, regierungsunabhängige Projektkonzepte aus Deutschland zum Thema Bürgerinitiative und erneuerbare Energien wurden vorgestellt.

Exkursionen entlang der Küste haben einen persönlichen Eindruck von der Situation vor Ort vermittelt: Japans Küstenstädte der Präfektur Iwate (s. Abb. 1.2) befinden sich gegenwärtig immer noch in der Phase des Wiederaufbaus. Wenn man die Küste entlangfährt, sieht man überall das gleiche Bild: riesige Schuttberge und Fundamente von Häusergrundrissen. Die auf den Fotos sichtbaren Grünflächen, waren vor dem Tsunami dicht mit Wohnhäusern bebaut (s. Abb. 1.3). Die Aufräumarbeiten sind noch längst nicht abgeschlossen, die angeschlagene Wirtschaft erholt sich im wenig besiedelten und ohnehin ärmeren Nordosten nur schwer.



Abb. 1.3: Zerstörte Küstenorte: a) Taro, b) Omoto, c) Yamada (Dank an A. Strusińska-Correia), d) Kamaishi (Dank an A. Strusińska-Correia)

Zwei Jahre nach dem verheerenden Tsunami sind immer noch ca. 315.000 Menschen in Notunterkünften untergebracht (Internetquelle 6). Grund dafür sind unter anderem fehlende Geldmittel in Form von Zuschüssen zum Neubau, als auch die Pläne der Präfekturen und der Regierung ehemals bebauter Grundstücke in unmittelbarer Küstennähe möglicherweise nicht mehr als Baugrund auszuweisen. Die durch den Tsunami hervorgerufene Absenkung der Geländeoberfläche in den Tohoku Küstenregionen erschwert die Planungen. Die Gefahr von Überflutung und Überschwemmung in unmittelbarer Küstennähe ist dadurch gestiegen (Internetquelle 7). Zudem fehlen durch die Zerstörung von Rathäusern oftmals amtliche Unterlagen, die u.a. den Besitz von Grundstücken belegen. Besuche von privaten (*Notunterkunft und Community Center Kamaishi, Schulen in Taro, Kamaishi, Yamada*) und öffentlichen Einrichtungen (*Bauamt Miyako, Bürgerinformationszentrum Otsuchi, Rathaus Taro, Rathaus Otsuchi*) haben gezeigt, dass oftmals Interessenkonflikte zwischen den Wünschen der Bewohner und ihren lokalen Problemen sowie seitens der Behörden in Bezug auf den Wiederaufbau bestehen.

Vor Ort die verbliebenen Küstenschutzmaßnahmen zu besichtigen und die Zerstörung durch eine solche Naturkatastrophe mit eigenen Augen zu sehen, übersteigt jegliches Vorstellungsvermögen. Durch die hohe Zahl an Todesopfern und das Ausmaß der Zerstörung gilt es neue Ideen zu entwickeln um Menschenleben, Lebensraum und Infrastruktur zu schützen. Der Aufenthalt in Japan hat mich darin bestärkt, mich insbesondere mit Bauweisen beschäftigen zu wollen, die neben ihrer Erdbebensicherheit auch Schutz vor Tsunamis ermöglichen. Tsuna-

mis, die nahe der Küste entstehenden, können in kurzer Zeit das Festland erreichen, wodurch kaum Zeit für eine Evakuierung bleibt. Deshalb ist die Entwicklung tsunamisicherer Gebäude für die Bevölkerung von Ländern, die an aktive Erd- und Seebebenzonen grenzen, überlebensnotwendig.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der Bachelorarbeit ist es, mögliche tsunamisichere Bauweisen für gefährdete Länder, wie Japan, Thailand, Indonesien, Indien und den USA anhand der Auswertung der letzten dokumentierten Tsunamis, Erkenntnissen auf dem Gebiet der Tsunamiforschung und Ideen von Wiederaufbauprojekten vorzuschlagen.

Dazu werden zunächst Erkenntnisse aus vergangenen Tsunamireignissen zusammengefasst. Es werden übliche (ortstypische) mit geplanten Gebäuden verglichen und Vor- und Nachteile gegenübergestellt. Bestehende tsunamisichere Gebäude werden vorgestellt, verglichen und bewertet.

Daraus lassen sich Schlussfolgerungen in Bezug auf die Weiterentwicklung von Bauweisen treffen. Denkbar wäre, dass die Ergebnisse Vorschläge für Laboruntersuchungen liefern, deren Resultate vor Ort von Behörden und Planern genutzt werden könnten.

Die Nutzung von vorhandenen (regionalen) Ressourcen, wie einfache Umsetzbarkeit durch nicht speziell ausgebildetes Personal, Finanzierbarkeit und vor Ort verfügbaren Baustoffen sind dabei von Bedeutung.

Durch die gute Dokumentation der letzten Tsunamireignisse (Scheffers, et al., 2009) ist es möglich statistisch festzustellen welche Bauweisen den Tsunamis standgehalten und sich somit bewährt haben. Das gibt Aufschluss darüber welche **Bauweisen** in Zukunft angewandt und welche **Materialien** künftig verwendet werden sollten.

Ebenso kann für die künftige Stadtplanung berücksichtigt werden, wieweit Wasser ins Landesinnere vordringt, indem beurteilt wird welche Küstenabschnitte besonders gefährdet sind und somit zur Besiedelung vermieden werden sollten.

## 1.3 Methodik

Grundlage dieser Bachelorarbeit bilden Wissenschaftliche Publikationen auf Basis von Feldbegehungen, experimentellen Untersuchungen, Richtlinien, Gesetzesvorlagen (*white paper*) und Standards der durch die Tsunamis 2004 und 2011 betroffenen Länder Thailand, Indonesien, Indien, Sri Lanka und Japan sowie den USA, als ein Land, das als führend auf dem Gebiet der Tsunamiforschung gilt. Fachliteratur diene hauptsächlich zur Erläuterung der Grundlagen, Fotomaterial im Rahmen der Summer School als kapitelübergreifende Ergänzung der Arbeit. Zur Eingrenzung des Themas beziehen sich sämtliche Kapitel auf die oben genannten Länder, die 2004 und 2011 durch Tsunamireignisse betroffen waren.

Um eine Aussage über die Auswirkung des Tsunamiaufralls auf Gebäude treffen zu können, werden zunächst in **Kapitel 2** die **theoretischen Grundlagen** eines Tsunamiphänomens dargestellt. Dazu zählen sowohl die Tsunamientstehung, als auch -ausbreitung, sowie Einwirkung auf die Küste, die am Beispiel der letzten Tsunamiereignisse von 2004 und 2011 erklärt werden.

In **Kapitel 3** wird auf die üblichen **Bauweisen** und die **Stadtplanung** an der Küste in tsunamigefährdeten Ländern eingegangen. Beschrieben werden die vorhandenen Bauweisen von Wohngebäuden, öffentlichen Gebäuden und Evakuierungsgebäuden in Thailand, Indonesien, Indien, den USA und Japan. Schwerpunkt der Arbeit wird Japan sein. Während der Summer School erworbene Materialien ergänzen die Literatur: Broschüren sowie Videomaterial des Bürgerinformationszentrums Otsuchi enthalten konkrete Pläne und Richtlinien zum Wiederaufbau der Stadt. Eigene Feldbegehungen dienen als Ergänzung, um Zusammenhänge zwischen Stadtplanung und Tsunamischutz zu veranschaulichen. Fotomaterial aus diversen Küstenorten, von intakten und zerstörten Gebäuden, gibt Einblicke in die übliche japanische Bauweise. Vorlesungen und Präsentationen im Rahmen der Summer School ergänzen die Literatur.

Um die Belastung der Gebäude durch Tsunamis zu beurteilen, werden in **Kapitel 4 Richtlinien** und **Normen** zu Entwurf und Bau erläutert und miteinander verglichen. Ergebnisse von bisherigen Laboruntersuchungen zur Tsunamibelastung auf Bauwerke werden dargelegt. Dabei wird sowohl Bezug auf die unterschiedlichen Richtlinien der einzelnen Länder, als auch eventuelle Änderungen der Richtlinien nach den Tsunamikatastrophen genommen.

Zur Erfassung der **Schadensarten** dienen u.a. Statistiken zu Gebäudeschäden bei unterschiedlich verwendeten Konstruktionen und Materialien, auf die in **Kapitel 5** näher eingegangen wird. Dokumentierte und persönliche Feldbegehungen werden als Anhaltspunkt dienen, welche Bauweisen (*Holz-, Bambus-, Ziegelstein-, Stahl-, Stahlbetonkonstruktionen*) durch tsunamiinduzierte Kräfte am wenigsten beschädigt wurden. **Berichte von Feldbegehungen** geben einen Überblick über Zerstörung, verwendetes Baumaterial, Konstruktionsart, Lage, Anordnung und Ausrichtung der Gebäude.

**Kapitel 6** beinhaltet eine **Zusammenfassung** der Arbeit und **kritische Bewertung** von den neuen Strategien des Wiederaufbaus über neue Richtlinien und der Stadtplanung sowie Empfehlungen für das weitere Vorgehen.

## 2 Theoretische Grundlagen

Dieses Grundlagenkapitel befasst sich allgemein mit dem Thema Tsunami und bildet die Basis für die themenspezifischen Kapitel 3 bis 5. In Kapitel 2.1 wird zunächst auf die Wortbedeutung eingegangen, die Unterschiede zwischen Tsunamis und windinduzierten Meereswellen sowie die Differenzierung zwischen verschiedenen Tsunamiarten wird erläutert. Des Weiteren wird beschrieben in welchen Ländern Tsunamis besonders häufig und mit welcher Wahrscheinlichkeit eintreten. Auf Entstehungsmechanismen und Ausbreitungsdynamik wird in Kapitel 2.2 eingegangen. In Kapitel 2.3 werden die zwei gängigen Skalen zur Erfassung der Erdbebenstärke, Intensität und Magnitude, erklärt. Kapitel 2.4 bezieht sich auf die Folgeschäden am Beispiel der letzten Tsunamireignisse 2004 und 2011, die sich durch Einwirkung auf die Küste ergeben. Erst anhand des Basiswissens ist es möglich die besonderen Anforderungen zu verstehen, die an den Bau von Gebäuden zu stellen sind.

### 2.1 Tsunamiphänomen

Als Tsunami werden aufeinander folgende, sehr langperiodische Meereswellen bezeichnet (Bormann, 2008 a), die am häufigsten durch Erdbeben in Subduktionszonen verursacht werden. Je größer die ausgelöste vertikale Verschiebung des Meeresbodens ist, desto mehr Wasser wird verdrängt und breitet sich in Form von Tsunamiwellen aus. Den Ursprung seiner Bedeutung hat das Wort Tsunami im Japanischen und bedeutet übersetzt „Hafenwelle“ (Hyndman & Hyndman, 2005). Die Bedeutung leitet sich aus den Beobachtungen japanischer Fischer ab: Auf offener See wurden die Tsunamiwellen kaum bemerkt, da sich Tsunamiwellen auf offener See wie Flachwasserwellen verhalten. Das Ausmaß an Zerstörung des Tsunamis wurde erst bei der Rückkehr der Fischer in die Häfen und Buchten sichtbar, da sich die Wellenlängen erst in Küstennähe durch die geringere Meerestiefe stauchen und zu mehr als dem Zehnfachen aufsteilen können (Internetquelle 8).

#### Häufigkeit und gefährdete Gebiete

Tsunamireignisse sind sehr selten. Von den im letzten Jahrhundert durchschnittlich pro Jahr erfassten 10 Tsunamis, haben maximal 1-2 Tsunamis zu Schäden geführt. Trotz ihrer Seltenheit sind die Folgen eines Tsunamis in Form von verheerender Zerstörung und hohen Opferzahlen gravierend. Etwa 25 % der dokumentierten Tsunamis (der letzten 140 Jahre) wurden in Japan, je 10 % an den Westküsten Südamerikas, Nord- und Mittelamerikas, Indonesiens, den Philippinen, Neuguinea und den Solomon-Inseln, erfasst (s. Abb. 2.1) (Bormann, 2008 a).

Laut Schneider (2004) konzentrieren sich über 80 % aller seismischen Verschiebungen auf die Subduktionszonen, wo auch die größten Erdbeben stattfinden. Im Randbereich des Pazifischen Ozeans („Ring of Fire“) treten Tsunamis am häufigsten (82 %) auf. Im Mittelmeer, Schwarzen Meer, Roten Meer und nordöstlichen Atlantischen Ozean treten Tsunamis mit einer Häufigkeit von 10 % auf. Seltener entstehen Tsunamis in der Karibik und dem südwestlichen Atlantischen Ozean (5 %). Im Indischen und südöstlichen Atlantischen Ozean beträgt die Häufigkeit 1 % (Kopp & Weinrebe, 2009).

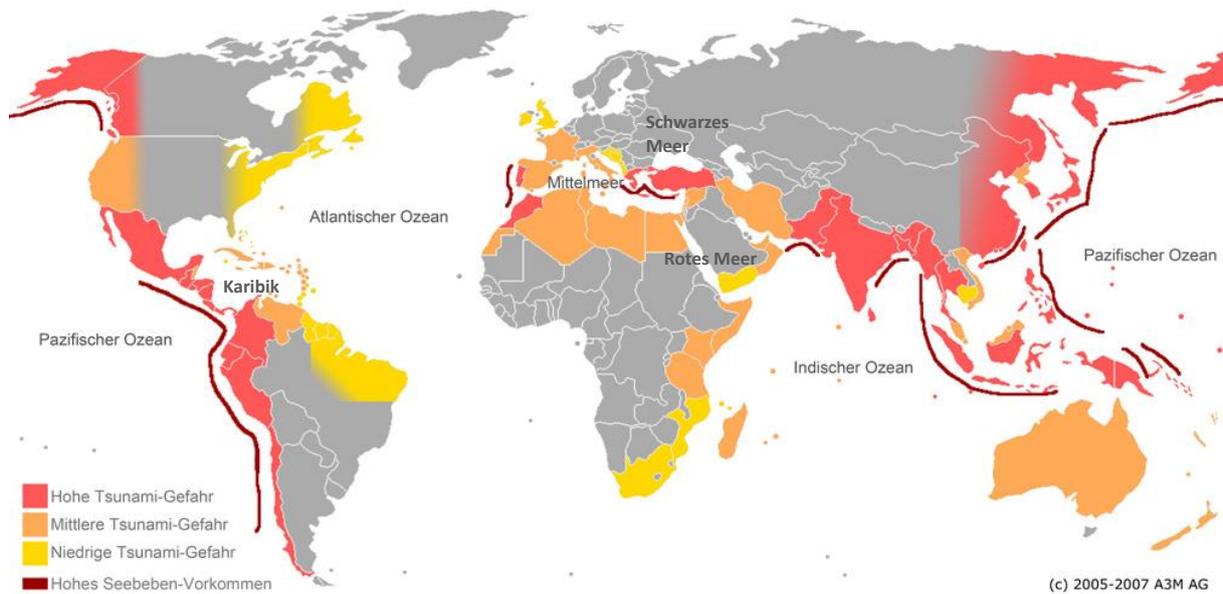


Abb. 2.1: Weltkarte : Einstufung der Tsunami-Gefährdung (Internetquelle 9)

Nicht jeder Tsunami verursacht eine derartige Zerstörung wie im Jahr 2011 (Japan) oder 2004 (Indischer Ozean), der als der opferreichste Tsunami der je verzeichnet wurde gilt (Bormann, 2008 a). Zur besseren Differenzierung wird deshalb zwischen verschiedenen Tsunamiarten nach Ausmaß bzw. Ausbreitung unterschieden: **Microtsunamis** sind nicht einfach visuell erkennbar. Sie weisen eine so geringe Amplitude auf, dass sie instrumentell beobachtet werden müssen. Das Ausmaß bzw. Ausbreitung eines **lokalen Tsunamis** liegt in einem Radius von ca. 100 km. Am gefährlichsten sind **Teletsunamis**, die nicht nur in Umfeld ihres Epizentrums für große Zerstörung sorgen, sondern ganze Ozeane durchqueren können, wie bei dem **Sumatra-Andamanen-Beben** 2004 im Indischen Ozean (s. Abb. 2.2). Sie werden meist durch bedeutendere Erdbeben einer Magnitude  $M_w > 7$  ausgelöst (UNESCO-IOC, 2006) und zeichnen sich durch eine lange Bruchfläche sowie großen vertikalen Versatz von mehreren Metern aus (Kopp & Weinrebe, 2009).

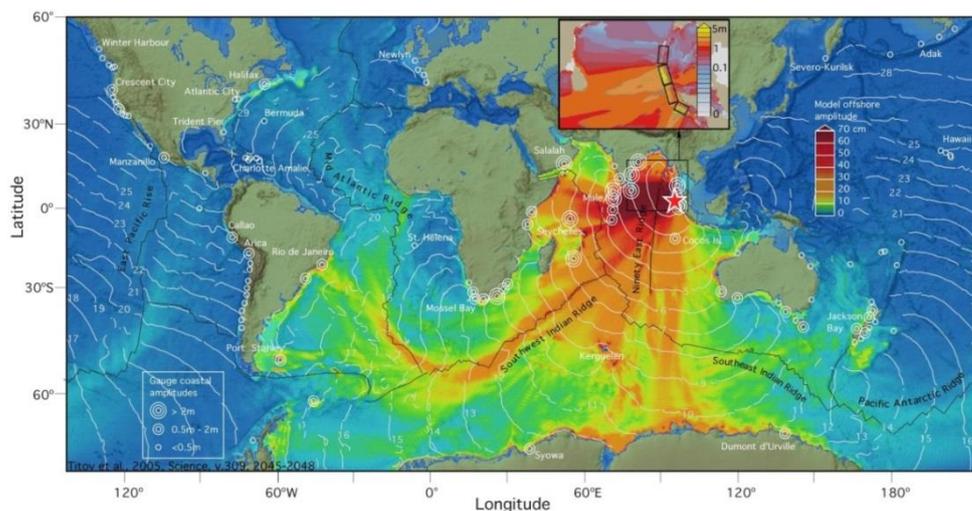


Abb. 2.2: Ausbreitung des Teletsunamis im Indischen Ozean 26. Dezember 2004 (Internetquelle 10)

## 2.2 Tsunamientstehung und -ausbreitung

### 2.2.1 Entstehung

Der **häufigste Grund** für die Entstehung eines Tsunamis sind **starke Erdbeben (90%)** (Bormann, 2008 a). Wesentlich seltener werden Tsunamis dagegen durch Vulkanausbrüche, Erdbeben, Unterwassererdrutsche, Unterwasserexplosionen (Cuypers, 2004) und Einschläge kosmischer Projektile (Kopp & Weinrebe, 2009) verursacht. Daher wird im Folgenden der Schwerpunkt auf durch Erdbeben ausgelöste Tsunamis gesetzt.

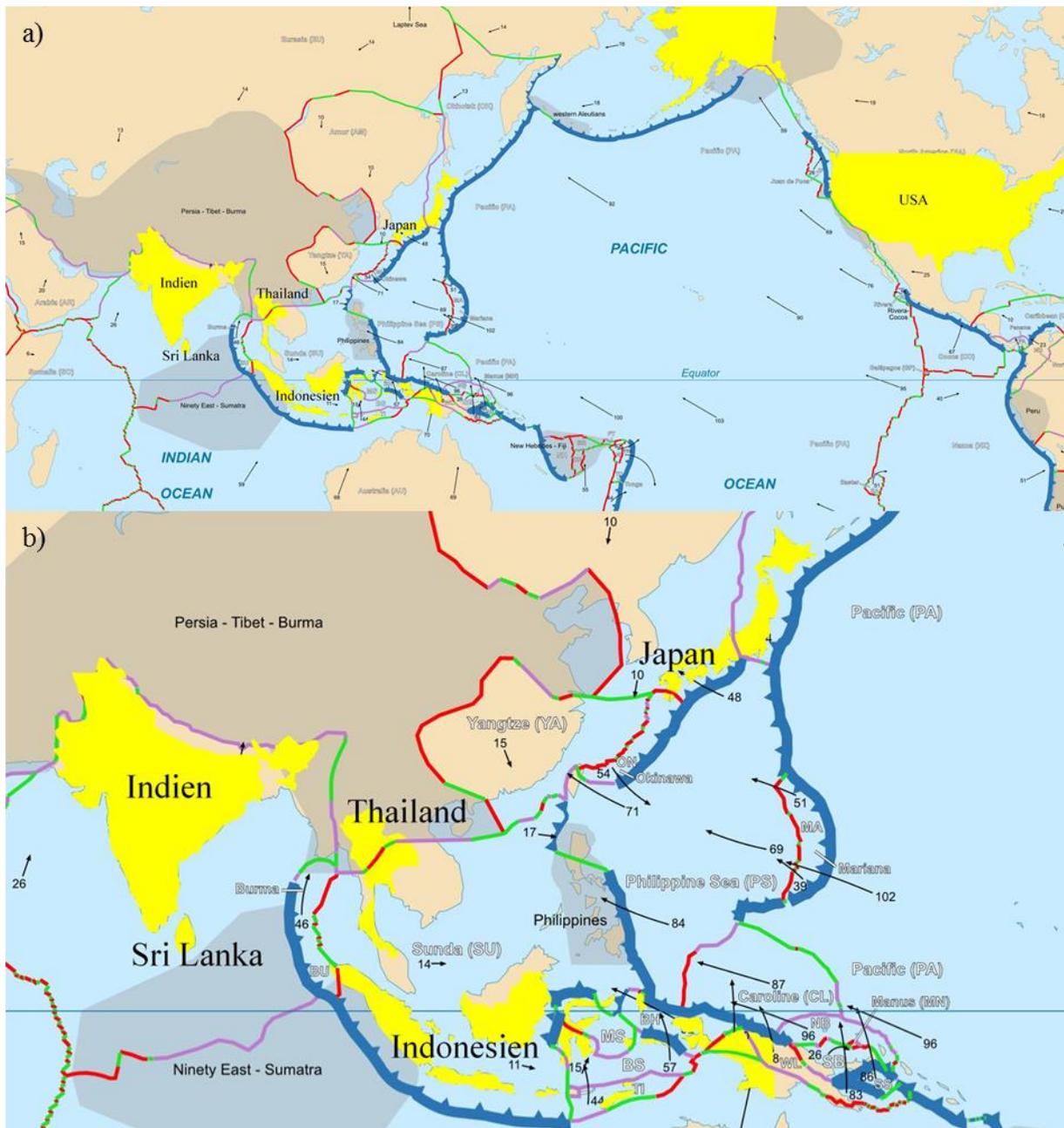


Abb. 2.3: Weltkarte mit Übersicht der Plattengrenzen: a) Ausschnitt des Pazifischen und Indischen Ozeans, b) Detailansicht (Internetquelle 11)

Erdbeben entstehen dort wo Lithosphärenplatten aufeinandertreffen (s. Abb. 2.3) und mit unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten rotieren (Frisch, 2011). In Abb. 2.3 sind sowohl destruktive bzw. konvergente (lila), als auch konstruktive bzw. divergente (rot) sowie konservative Plattengrenzen bzw. Transformstörungen (grün) und Subduktionszonen (blau) dargestellt. Die in dieser Arbeit behandelten Länder sind gelb hervorgehoben.

Es wird zwischen **konstruktiven, destruktiven und konservativen Plattengrenzen** unterschieden. Als **konstruktive Plattengrenze (divergent)** werden aneinandergrenzende Platten bezeichnet, die sich voneinander weg bewegen (s. Abb. 2.4 a). Die zwischen den Platten entstehende Kluft wird durch sich neu bildendes Lithosphärenmaterial geschlossen. Von einer **destruktiven Plattengrenze (konvergent, Subduktionszone)** wird bei einer Unterschiebung (Biegung) von einer Platte unter eine Andere gesprochen (s. Abb. 2.4 b). Durch die Subduktion werden Spannungen im Gestein verursacht. Zu einer Entladung der Kräfte kommt es, wenn der obere Plattenrand in einer ruckartigen Bewegung in seine Ausgangsposition zurückschnellt (Internetquelle 12). Aneinander vorbei gleitende Platten werden als **konservative Plattengrenzen (Transformstörung)** (s. Abb. 2.4 c) bezeichnet (Frisch 2011).

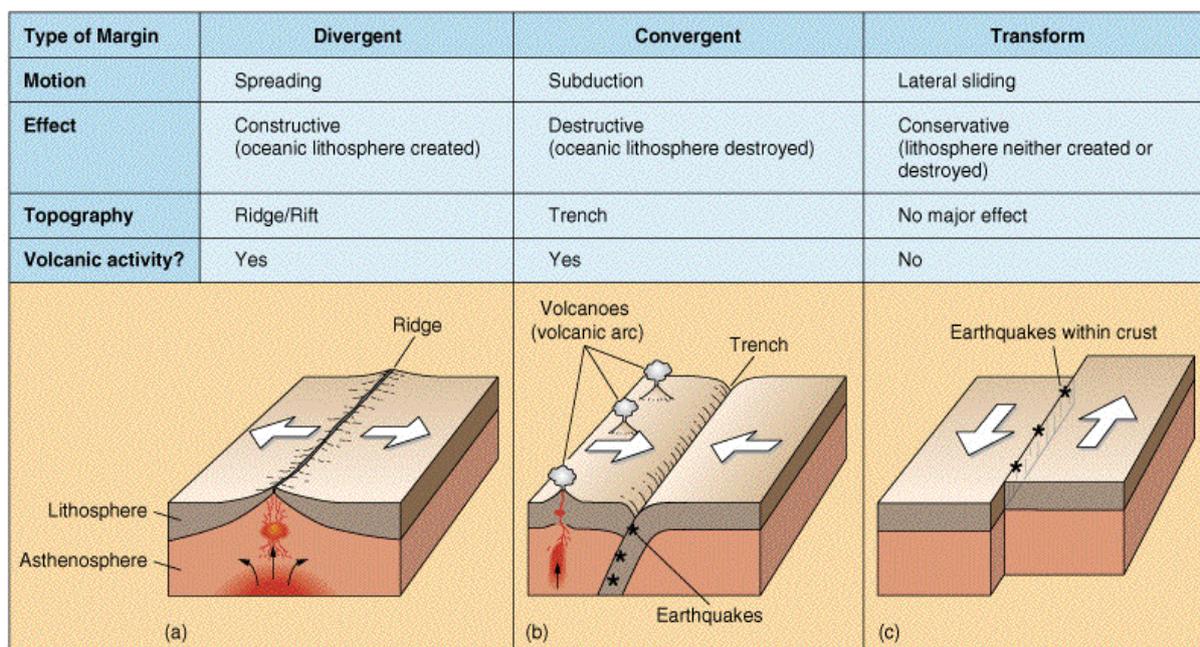


Abb. 2.4: Plattengrenzen: a) konstruktive Plattengrenze (divergent), b) destruktive Plattengrenze (konvergent), c) konservative Plattengrenzen (Transformstörung) (Internetquelle 13)

### Bedingungen zur Entstehung

Zur Entstehung eines Tsunamis kommt es (s. Abb. 2.5), wenn abgesehen von einem Erdbeben mehrere Voraussetzungen erfüllt werden: Die Vertikalverschiebung des Meeresbodens muss stark genug sein, um durch den daraus resultierenden Impuls eine immense Wasserverdrängung zu verursachen (Schneider, 2004). Das Sumatra-Andamanen-Beben im Indischen Ozean hat 2004 eine vertikale Verschiebung des Meeresbodens von 1200-1300 km Länge hervorgerufen (Sterr et al., 2009). Durch die Wasserverdrängung kommt es zur Ausbreitung von Wellen. Dabei muss sich das Hypozentrum eines tsunamiinduzierten Erdbebens unter Wasser

oder in direkter Küstennähe, in einer Tiefe von weniger als 30 km befinden, sogenannte *shallow earthquakes*. Das Bruchverhalten eines tsunamiinduzierten Erdbebens ist im Gegensatz zum reinen Subduktionsbeben langsamer (1-2 km/s) und länger andauernd (100-120 s) (Kopp & Weinrebe, 2009).

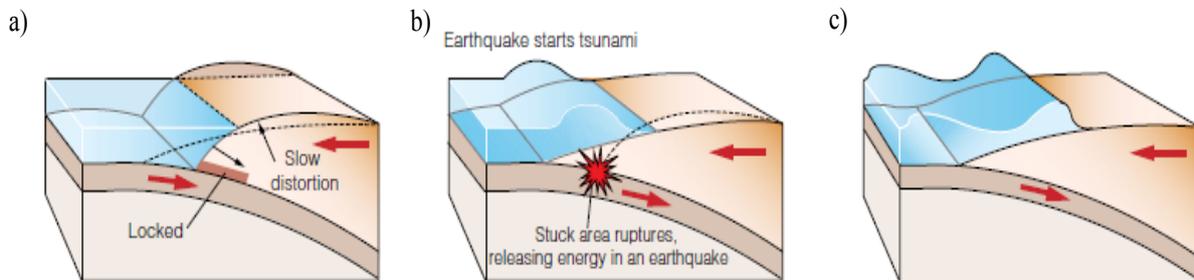


Abb. 2.5: Entstehung eines Tsunamis durch ein Subduktionszonenerdbeben (Hyndman & Hyndman, 2005): a) vor dem Erdbeben, b) während des Erdbebens, c) nach dem Erdbeben

Bormann (2008 a) beschreibt, dass nur etwas 10-20 % der Beben mit einer Magnituden  $M_w \geq 6,5$  Tsunamis verursachen. Bei gemessenen Magnituden von  $M_w < 7,5$  sind in der Regel nur regionale Auswirkungen bis zu wenigen 100 km ausgehend vom Epizentrum des Bebens zu erwarten. Bei Tsunamis mit run-up Höhen (maximale Auflaufhöhe der Welle an der Küste) von über 2 m, die durch Beben der Stärke  $M_w > 7$  ausgelöst werden können, sind „nennenswerte Schäden“ zu erwarten (Bormann, 2008 a).

### 2.2.2 Ausbreitung

Die Ausbreitungsrichtung eines Tsunamis ist wesentlich von 2 Faktoren abhängig:

- der Geometrie des Gesteinsversatzes (Verwerfung) sowie
- der regionalen und lokalen Form und Struktur (Morphologie) der Küste.

Das Tiefenprofil des Meeresbodens bzw. eine Änderung der Meerestiefe kann zur Richtungsänderung der Tsunamiwellen führen, die sich anfangs vom Epizentrum kreisförmig ausbreiten (Kopp & Weinrebe, 2009).

Während die Wellen auf offener See wegen der großen Wassertiefe noch kaum als Wellen auszumachen sind, werden sie im Flachwasser zunehmend abgebremst, wodurch die Wellen sich aufsteilen und bei Erreichen der Küste deutlich an Höhe gewinnen (s. Abb. 2.6) (Cuypers, 2004). Die Charakteristik von einem Tsunami ist durch die Kinematik der Wellen, der Wellenlänge und der Wellenhöhe definiert. Man unterscheidet zwischen Flachwasserwellen, Wellen im Übergangsbereich und Tiefwasserwellen, die nach  $h/L$  definiert sind. Diese werden in nächsten Abschnitten detailliert beschrieben.

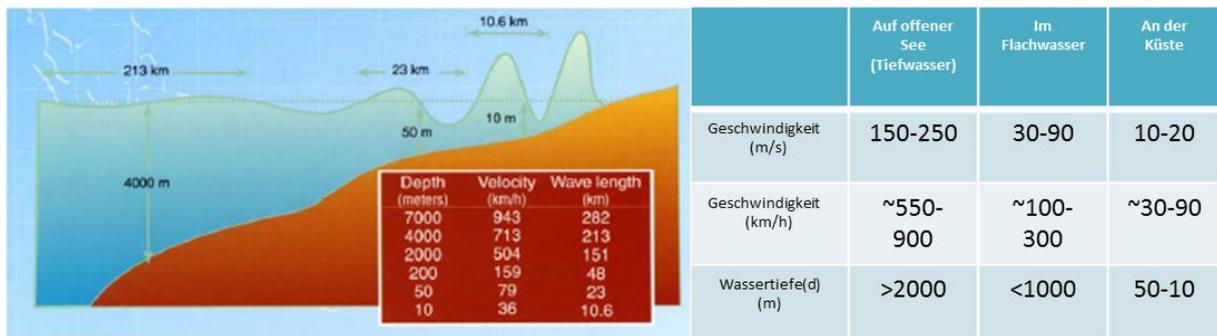


Abb. 2.6: Zusammenhänge zwischen Wellenlänge, Wellenperiode, Wellengeschwindigkeit und Tiefe des Wassers: a) Aufteilung von Tsunamiwellen (Bormann, 2008 a), b) Geschwindigkeit von Tsunamiwellen in Abhängigkeit der Wassertiefe (Cuypers, 2004)

### a) Kinematik

Bei der Berechnung von Tsunamigeschwindigkeiten wird grundlegend zwischen **Wellenschnelligkeit** und **Wasserpartikelgeschwindigkeit** unterschieden. Letzteres wird als Eigenfunktion der Tsunamiwelle und Verdrängung an der Wasseroberfläche verstanden, wohingegen sich die Wellenschnelligkeit auf die Ausbreitung von der Entstehung bis zum Auftreffen auf die Küste bezieht.

#### Wellenschnelligkeit und Wellenlänge

Die klassische Theorie zur Berechnung der **Ausbreitungsgeschwindigkeit** geht von einem starren Meeresboden aus, der von einem nicht-zusammendrückbaren, homogenen, nicht-viskosen Meer überlagert wird und einem konstanten Gravitationsfeld ausgesetzt ist (Ward, 2004).

Bei der Berechnung der **Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Wellenlänge** wird zwischen drei verschiedenen Annahmen und Phasen der Tsunamiwelle unterschieden: Auf offener See verhalten sich Tsunamis wie **Flachwasserwellen** während sie nur in geringen Wassertiefen und Perioden dem Verhalten von **Wellen im Übergangsbereich bzw. Tiefwasser** entsprechen (Oumeraci, 2010).

Abb. 2.7 veranschaulicht die komplexen Zusammenhänge zwischen Wellenschnelligkeit, Wellenlänge und Wellenperiode bei Ozeantiefen von 1-6 km. Die grauen Markierungen geben die Bereiche an, in denen Tsunamis im Vergleich zu Windwellen auftreten. Im ersten Diagramm der Abbildung kennzeichnet die durchgezogene Linie die Phasen- und die gestrichelte Linie die Gruppengeschwindigkeit.

Das untere Diagramm hebt vor allem den Unterschied von Tsunamis und Windwellen in Wellenlänge und Wellenperioden und deren Geschwindigkeit hervor. Windwellen liegen im Bereich von ~10 s Wellenperioden bei einer Wellenlänge von 100 m (gelbe Markierung), während Tsunamiwellen Wellenlängen um die 10 km und Wellenperioden um das 10-fache (blaue Markierung) vorweisen.

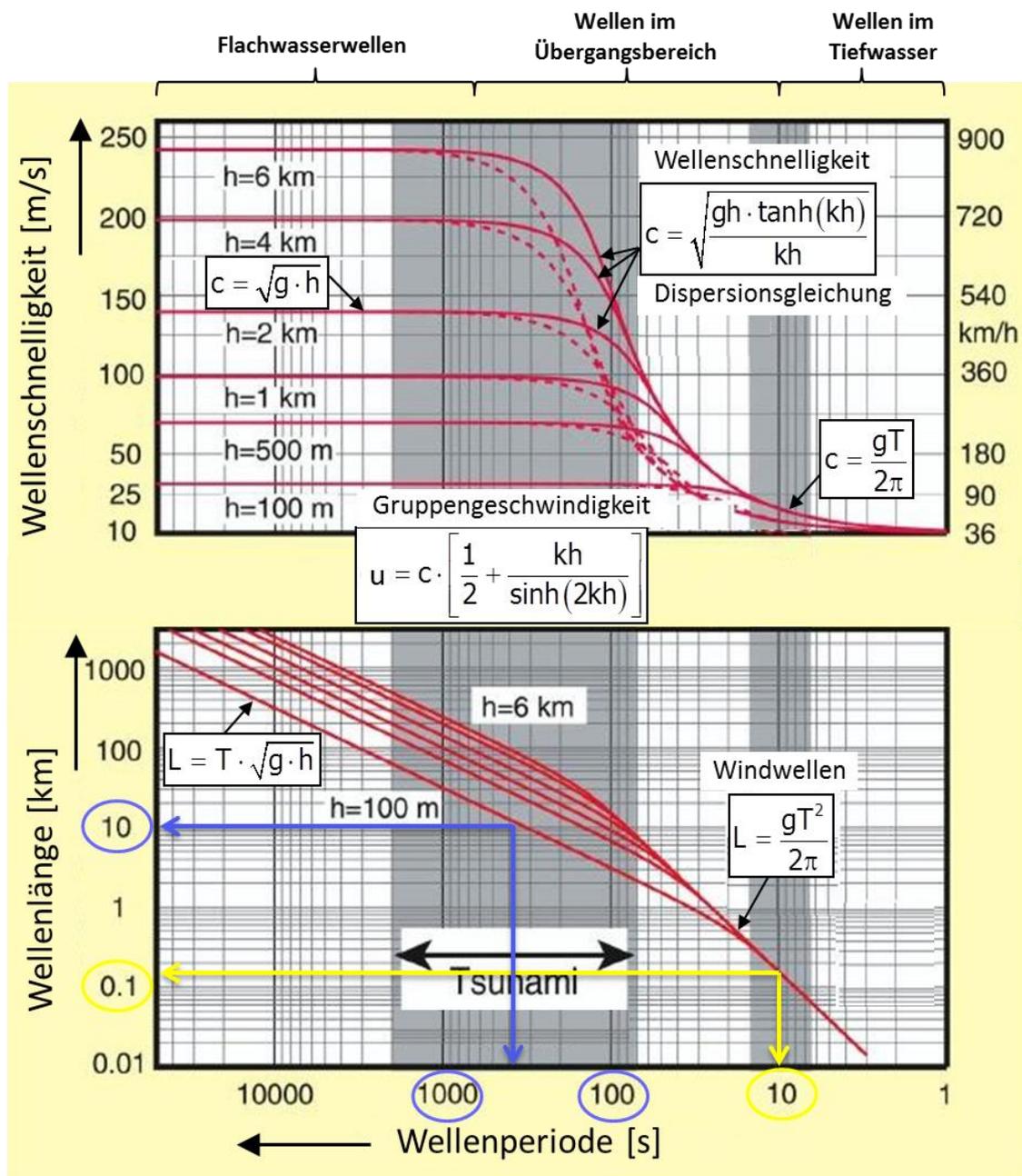


Abb. 2.7: Zusammenhang zwischen Wellenschnelligkeit, Wellenlänge und Wellenperiode bei Tsunamis im Vergleich zu Windwellen (Oumeraci, 2010)

Die Wellenlänge von Tsunamis betragen auf offener See mehrere 100 km (Cuyper, 2004). Bei großer Wassertiefe und großer Wellenlänge nähern sich Tsunamis dem Verhalten von **Flachwasserwellen** ( $kh \rightarrow 0, \lambda \gg h, 1/k \gg h$ ) an (Formeln 1 und 2):

$$c = \sqrt{g \cdot h}, \tag{1}$$

$$L = c \cdot T = \sqrt{g \cdot h} \cdot T, \tag{2}$$

- mit
- c: Wellenschnelligkeit [m/s],
  - g: Gravitationskonstante [m/s<sup>2</sup>],
  - h: Wassertiefe [m],
  - L: Wellenlänge [m],
  - T: Wellenperiode [s].

Im **Übergangsbereich** wird zwischen Phasen  $c(\omega)$ - und Gruppengeschwindigkeit  $u(\omega)$  präzisiert. Die Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung der Wellenzahl  $k(\omega)$ ,  $L=2\pi/k(\omega)$ . Je größer die Wellenzahl  $k(\omega)$ , desto kürzer die Welle und je kleiner die Wellenzahl, desto länger die Welle (Ward, 2004) (Formeln 3 bis 6):

$$c(\omega) = \sqrt{\frac{gh \cdot \tanh[k(\omega)h]}{k(\omega)h}}, \quad (3)$$

$$u(\omega) = c(\omega) \cdot \left[ \frac{1}{2} + \frac{k(\omega)h}{\sinh[2k(\omega)h]} \right], \quad (4)$$

$$\omega^2 = gk(\omega)\tanh[k(\omega)h], \quad (5)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \cdot \tan\left(\frac{2\pi h}{L}\right), \quad (6)$$

- mit
- $c(\omega)$ : Phasengeschwindigkeit [m/s],
  - $u(\omega)$ : Gruppengeschwindigkeit [m/s],
  - $k(\omega)$ : Wellenzahl [-],
  - $\omega$ : Häufigkeit [T<sup>-1</sup>],
  - g: Gravitationskonstante [m/s<sup>2</sup>],
  - h: Wassertiefe [m],
  - L: Wellenlänge [m],
  - T: Wellenperiode [s].

Bei geringer Wassertiefe und kleiner Wellenperiode ab (< 2 min) treten Tsunami wie Wellen in **Tiefwasser** ( $kh \rightarrow \infty$ ,  $\lambda \ll h, 1/k \ll h$ ) und **Übergangsbereich** auf (Oumeraci, 2010). In flachem Wasser nimmt ihre Länge, im Vergleich zum offenen See, um etwa das 10 bis 20-fache durch die Aufsteilung der Wellen ab (Bormann, 2008 a) (Formeln 7 und 8)

$$c = \frac{gT}{2\pi}, \quad (7)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}, \quad (8)$$

- mit
- c: Wellengeschwindigkeit [m/s],
  - g: Gravitationskonstante [m/s<sup>2</sup>],
  - L: Wellenlänge [m],
  - T: Wellenperiode [s].

### Wasserpartikelgeschwindigkeit

Bei Berechnung der Eigenfunktion werden Tsunami-Schwingung und die jeweilige Frequenz der Wasserpartikel betrachtet. Die Bewegungsverteilung differenziert zwischen vertikaler und horizontaler Verdrängung der Wasseroberfläche (Ward, 2004) (Formeln 9 und 10):

$$u_z(\omega, z) = \frac{k(\omega)g}{\omega^2} \frac{\sinh[k(\omega)(h-z)]}{\cosh[k(\omega)h]} e^{i[k(\omega)x - \omega t]}, \quad (9)$$

$$u_x(\omega, z) = \frac{-ik(\omega)g}{\omega^2} \frac{\cosh[k(\omega)(h-z)]}{\cosh[k(\omega)h]} e^{i[k(\omega)x - \omega t]}, \quad (10)$$

- mit
- c(ω): Phasengeschwindigkeit [m/s]
  - u(ω): Gruppengeschwindigkeit [m/s],
  - g: Gravitationskonstante [m/s<sup>2</sup>],
  - k(ω): Wellenzahl (*wavenumber*) [-],
  - ω: Häufigkeit (*frequency*) [-],
  - h: Wassertiefe [m],
  - L: Wellenlänge [m],
  - T: Wellenperiode [s].

Abb. 2.8 zeigt die Eigenfunktionen der Tsunamiperioden von 1500 s, 150 s und 50 s bei Wellenlängen von 297 km, 26 km und 4 km im Verhältnis zu Wassertiefen von 0 bis 4 m.

Im Flachwasserbereich stellt die Ellipsenform den Verlauf eines Wasserwellenpartikels mit einer bestimmten Frequenz  $\omega$  dar. Während die vertikale Bewegung an der Wasseroberfläche ihren Maximalwert erreicht und am Meeresboden nahezu 0 beträgt, verläuft die horizontale Bewegung konstant über die gesamte Wassersäule. Sie macht das 10-fache der vertikalen Komponente aus. Lange Wellen erreichen im Gegensatz zu kurzperiodischen Wellen den Meeresboden.

Im Übergangsbereich bei Wellenperioden von 150 s reduziert sich die Wellenlänge auf 26 km, wodurch sich horizontale und vertikale Bewegungen annähern.

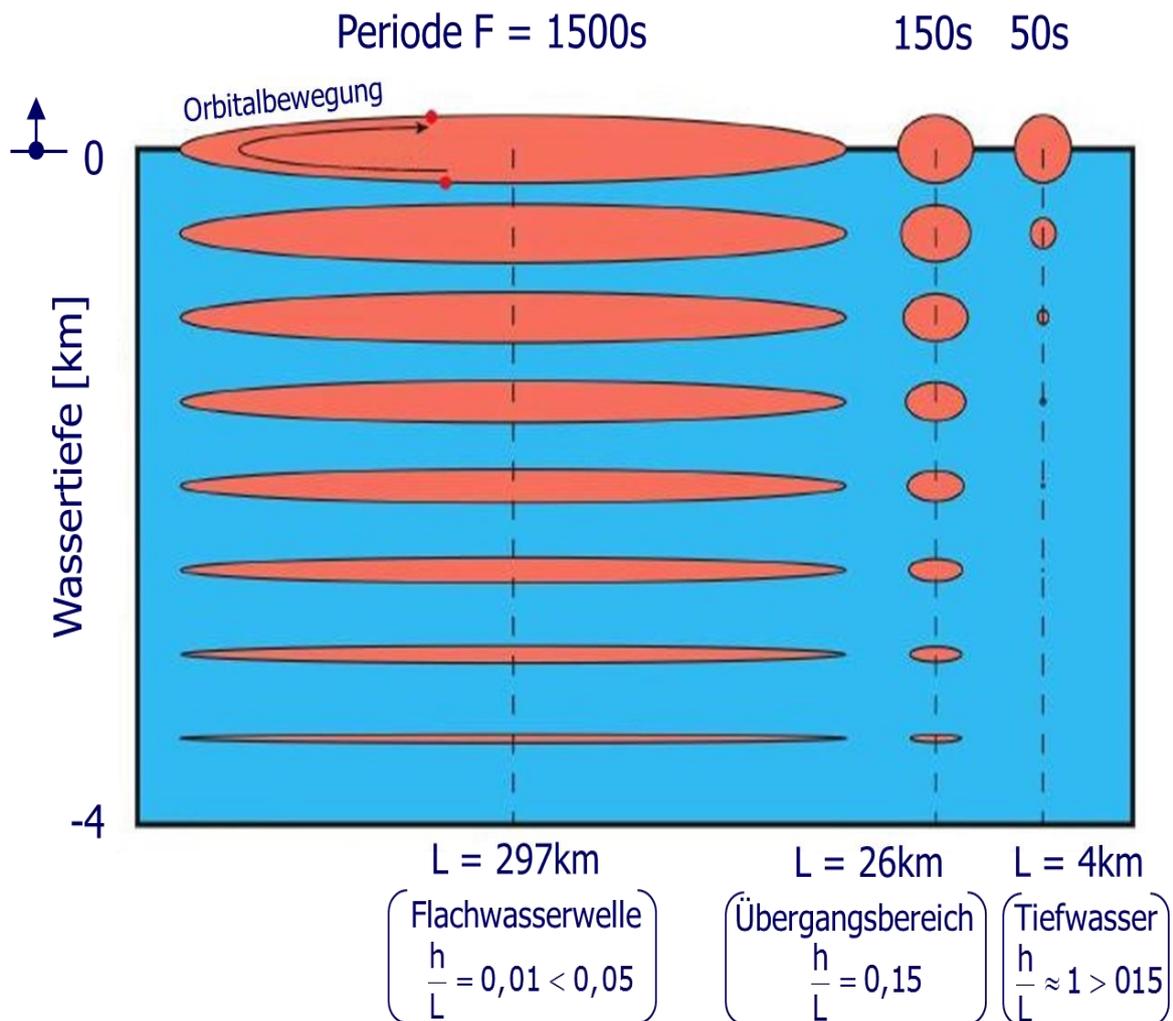


Abb. 2.8: Eigenfunktion von Tsunamiwellen bei Flachwasserwelle, Übergangsbereich und Tiefwasserbereich (Oumeraci, 2010)

Bei Wellenperioden von 50 s verhalten sich Tsunamis vollständig wie Tiefwasserwellen. Die Geschwindigkeiten sind unabhängig von der Ozeantiefe, da die Wellen den Meeresboden nicht erreichen. Horizontal- und Vertikalbewegung sind  $\approx 1$  und verlaufen in kreisförmigen Orbitalbahnen (Ward, 2004 und Oumeraci, 2010).

### b) Amplitude (Wellenhöhe)

Als Amplitude (s. Abb. 2.9) wird der absolute Größe zwischen Spitzen- und Minimalwert des Tsunamis bei ungestörtem Wasserspiegel bezeichnet (UNESCO-IOC, 2006). Amplituden unterhalb eines Wertes von 1.5 stellen in der Regel keine Gefahr dar. Bei steigender Wassertiefe nimmt die Amplitude ab. Durch die Stauchung der Wellen im flachen Wasser nehmen die Abstände zwischen den Wellen ab, während die Amplitude zunimmt. In tiefem Wasser erstrecken sich Wellenhöhen zwischen 30 bis 80 cm. In Nähe der Küste, insbesondere flachen Buchten betragen die Höhen zwischen 10 m, in Ausnahmefällen sogar 30 m bis 50 m (Bormann, 2008 b).

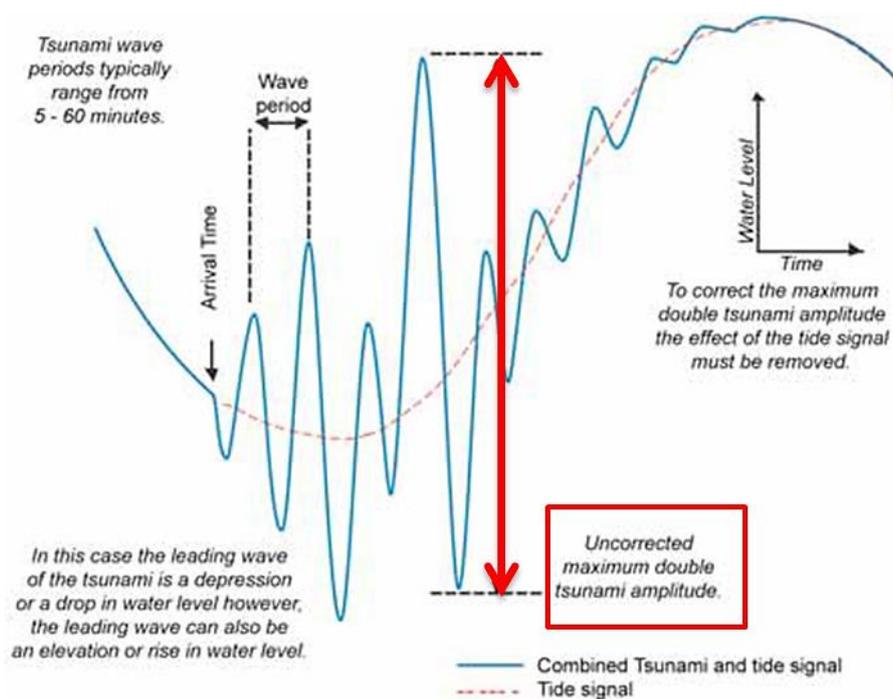


Abb. 2.9: Tsunami Amplitude (Wellenhöhe) (UNESCO-IOC, 2006)

Tsunamis bestehen nicht aus einer einzigen Welle, sondern mehreren Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden. Lauterjung et al. (2009) zufolge kann sich eine Wellenperiode, der zeitliche Abstand zwischen zwei Wellenkämmen, von mehreren Minuten bis zu etwa zwei Stunden erstrecken. Formel 11 gibt die Berechnungsformel für Amplituden an:

$$A \sim \sqrt{\frac{E}{r \times \sqrt{h}}}, \quad (11)$$

mit E: Potentielle Energie [J],  
h: Wassertiefe [m],  
r: Abstand von der Quelle [m],

### Potentielle Energie

Die potentielle Energie beschreibt die Energie, die durch das ausgelöste Erdbeben auf die Wassermassen ausgeübt wird (Lauterjung, et al., 2009). Die Berechnung erfolgt durch die nachfolgende Formel 12:

$$E = \frac{1}{2} \times A \times g \times \rho \times h_m^2, \quad (12)$$

- mit
- A: Größe der angehobenen Fläche [ $\text{m}^2$ ],
  - g: Erdbeschleunigung/Gravitationskraft [ $\text{m/s}^2$ ],
  - $\rho$ : Wasserdichte [ $\text{kg/m}^3$ ],
  - $h_m$ : Mittlere Anhebung [m].

### 2.2.3 Wellenformen

In **tieferm Wasser** lassen sich Tsunamiwellen vereinfacht als **sinusförmige Kurve** darstellen (s. Abb. 2.10 a). Dagegen spitzt sich die Höhe des Wellenkamms **in flachem Wasser** oberhalb des Meeresspiegels zu. Das Wellental wird flacher. Man spricht auch von **Stokes Wellentheorie** (s. Abb. 2.10 b). Bei Erreichen der Küste gibt es kein Wellental mehr, es bleibt nur der Wellenkamm. Zu Versuchszwecken werden im Labor oft unendlich lange **Einzelwellen** generiert, da Tsunamis aus mehreren sehr langen Wellen bestehen (s. Abb. 2.10 c). Mittlerweile geht man davon aus, dass Tsunamis mit dem Wellental zuerst die Küste erreichen und sich daher eher als **N-Wellen** anstatt Einzelwellen verhalten. Diese Vorstellung basiert auf dem Generierungsmechanismus von Tsunamis, der durch die Verschiebung von Lithosphärenplatten hervorgerufen wird. Der Tsunami erreicht die Küste als eine Art Ebbe, es folgt eine Flut in Form eines Wellenberges (s. Abb. 2.10 d). Die meisten Wellen erreichen die Küste als schnell aufsteigender Wasserspiegel. Wenn jedoch der Fall auftritt, dass die Wellen an der Küste brechen, kommt es zu **Boren** (Abb. 2.10 e). Neben Auftriebs- und Hydrostatischen Kräften kommt es zusätzlich zu Aufprallkräften. Die Bore-Wellen erreichen hohe Wassergeschwindigkeiten und reißen Schuttsedimente und Trümmer durch die turbulente Wellenfront mit. Aufgrund der turbulenten Wellenfront, verursachen Bore-Wellen eine größere Zerstörung als die anderen Wellenformen. Bei Flut- und Ebbewellen entstehen Auftriebs- und Hydrostatische Kräfte, die Resultat des **schnell aufsteigenden Wasserspiegels** sind. Zur Zerstörung kommt es durch die starke Strömung und den schwimmenden Schuttsegmenten, die aus der Überschwemmung resultieren (Cuypers, 2004).

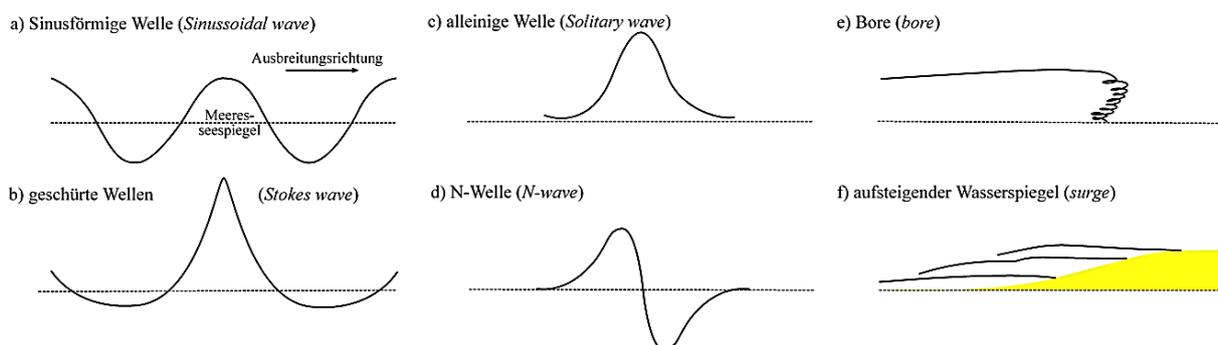


Abb. 2.10: Wellenformen von Tsunamis (Cuypers, 2004): a) auf offenem Meer (*deep*), b) im Flachwasserbereich (*shallow*), c) an der Küste (*coast*) - veraltete Annahme, d) an der Küste (*coast*) - veraltete Annahme, e) Bore (*bore*), f) schnell aufsteigender Wasserspiegel (*surge*)

## 2.3 Tsunamiskalen zur Bestimmung von Intensität und Magnitude

Zur Erfassung der Tsunami- und Erdbebenstärke werden sowohl die Magnituden- als auch die Intensitätsskala verwendet. In den zwei folgenden Kapiteln werden die Unterschiede in der Berechnung und der Abschätzung von Intensität und Magnitude vorgestellt.

### 2.3.1 Intensität

Zur Abschätzung der Tsunamiintensität finden die Formeln (13) und (14) in der Praxis Verwendung. Beide Skalen basieren auf der Messung der Wellenauflaufhöhe (Cuypers, 2004):

#### Abschätzung der Tsunamiintensität nach Imamura- Ida

Laut Cuypers (2004) wurden anhand der **Imamura-Ida Skala** ursprünglich Magnituden abgeschätzt. Inzwischen wird die Skala wegen des starken lokalen Einflusses auf die Wellenauflaufhöhe  $H_{r,max}$  der Intensitätsskala zugerechnet und bezieht sich auf die maximale Wellenauflaufhöhe (Formel 13):

$$m = \log_2 H_{r,max}, \quad (13)$$

mit  $H_{r,max}$ : maximale Wellenauflaufhöhe [m].

#### Abschätzung der Tsunamiintensität nach Soloviev-Imamura

Die **Soloviev-Imamura Skala** nimmt dagegen Bezug auf die durchschnittliche Tsunami Höhe an der Küste (Formel 14), die nächstgelegen zu dem Ursprung ist (Levin & Nosov, 2010):

$$I = \frac{1}{2} + \log_2 H, \quad (14)$$

mit  $H$ : durchschnittliche Tsunamihöhe an der Küste, nächstgelegen zu dem Ursprung [m].

Beide Skalen, nach **Imamura-Ida** bzw. **Soloviev-Imamura**, sind bei der Bestimmung von Wellenhöhen bei kleinen Messabweichungen nicht sehr empfindlich, da der Logarithmus als Formelgrößen überwiegt. Die Abschätzung der Wellenhöhe erfolgt an einem oder einigen Punkten der Küste.

#### Abschätzung der Tsunamiintensität nach Sieberg-Ambraseys

Die **Sieberg-Ambraseys Tsunami Intensitätsskala** unterteilt die Wahrnehmungen in 6 Klassen (Levin & Nosov, 2010). Sie geht dabei grundsätzlich von den subjektiven Wahrnehmungen an einem beliebigen Ort durch Menschen aus (Bormann, 2002).

Tab. 1: Intensitätsskala nach Sieberg-Ambraseys (Levin &amp; Nosov, 2010)

	1 Sehr gering	2 Gering	3 Ziemlich stark	4 Stark	5 Sehr stark	6 verheerend
Wellen	Erfassung nur durch spezielle Tide Messinstrumente ( <i>mareographs</i> )	bemerkbar, an sehr flachen Küsten durchgängig wahrnehmbar	grundsätzlich wahrnehmbar		laute Geräusche	
Flutung			von flach ansteigenden Küsten	Erhebliches Überfluten der Ufer	Durchgängiges erhebliches Überfluten der Ufer, Flutwellen bilden sich in Mündungen von Flüssen	Starke Überflutung der Küste
Schiffe			Leichte Segelschiffe werden am Ufer mitgerissen	Kleine und durchschnittliche Schiffe werden mitgerissen entweder ins Landesinnere oder auf die See hinaus	mit Ausnahme von großen Schiffen werden alle anderen Typen von Schiffen ins Landesinnere oder aufs Meer hinaus mitgerissen	Große Schiffe schwer beschädigt
Beschädigungen			Geringfügig an leichten Konstruktionen, die sich in Küstennähe befinden	Gebäude, Böschungen, Dämme und landwirtschaftliche Anbaufläche nahe der Küste	Kaimauern und massive Konstruktionen nahe dem Meer, Hafenanlagen	Bäume entwurzelt oder abgebrochen.
Zerstörung					leichte Konstruktionen, umfangreiche Unterspülungen von Kulturland, landwirtschaftliche Anbaufläche	teilweise oder vollständig Zerstörung der Kulturlandschaft in einiger Entfernung vom Ufer
Verschmutzung				Küsten verschmutzt mit Schutt, Trümmern	Verschmutzung der Küste durch schwimmende Gegenstände, Fisch und Meerestiere	
Opfer					Menschen ertrinken	viele Opfer

### 2.3.2 Magnitude

Die Magnitudenskala, auch Richterskala genannt, bezieht sich dagegen auf die freigesetzte seismische Schwingungsenergie beim Beben, die durch Seismographen instrumentell erfasst wird. Da die Erfassung durch Seismographen von sehr geringen ( $< 10^{-6}$  mm) bis zu sehr großen Verschiebungen ( $> 10$  m) reicht, wird eine logarithmische Skala zur Erfassung der Bodenbewegungen verwendet (Bormann, 2002).

### Magnitudenskala nach Abe und Hatori

Die Skala betrachtet die Abschwächung der Wellen, wenn sich der Abstand zur Quelle erhöht (Levin & Nosov, 2010) (Formel15):

$$M_t = a \log h_A + b \log \Delta + D, \quad (15)$$

- mit  $M_t$ : Tsunamimagnitude [-],  
 $h_A$ : maximale Wellenamplitude [m],  
 $\Delta$ : Distanz vom Epizentrum des Erdbebens zum Messpunkt [km],  
 $a, b, D$ : Beiwerte [-].

Cuypers (2004) unterscheidet formal zwischen regionalem und transpazifischem Tsunami:

#### Regionaler Tsunami

$$100 \text{ km} < \Delta < 3500 \text{ km}$$

$$M_t = \log H_A + \log \Delta + 5.8, \quad (16)$$

- mit  $M_t$ : Tsunamimagnitude [-],  
 $H_A$ : maximal erfasste Amplitude des Tidepegelmessgeräts [m],  
 $\Delta$ : Abstand von der Quelle zu dem Tidepegel [km].

#### Transpazifischer Tsunami

$$\Delta > 3500 \text{ km}$$

$$M_t = \log H_A + C_E + 9.1, \quad (17)$$

- mit  $M_t$ : Tsunamimagnitude [-],  
 $H_A$ : maximal erfasste Amplitude des Tidepegelmessgeräts [m],  
 $C_E$ : Entfernungsfaktor [-].

## 2.4 Tsunamieinwirkung auf die Küste am Beispiel der letzten Tsunamiergebnisse

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Folgeschäden gegeben, die durch Tsunamis entstehen.

Die **Infrastruktur** der betroffenen Gebiete ist nach Tsunamis stark in Mitleidenschaft gezogen: zertrümmerte Gegenstände, Gebäudeteile, Schiffe, Blockierung von Straßen, unterspülte

Eisenbahngleise sind die Folge. Durch stehendes Wasser sind Hafenbereiche und Fischersiedlungen unbenutzbar geworden (Bormann, 2008 a). Länder wie die Malediven und Thailand, deren Haupterwerbssektor der Tourismus ist, haben im Jahr 2004 durch die Zerstörung große wirtschaftliche Einbußen erlitten (Brückner & Brill, 2009). Mithilfe des TRAIT- Projekts (*Tsunami Risk and Information Tool*) wurde der Tsunami 2004 teilweise modelliert, um Erkenntnisse zu Überflutungsausdehnung, -tiefe und -geschwindigkeit zu erhalten. Die Ergebnisse sollen als Basis für die Planung von Evakuierungswegen, Notunterkünften und Bebauungsregularien dienen (Sterr et al., 2009).



Abb. 2.11: Vorher/Nachher Bilder 2 Jahre nach dem Tsunami 2011 in Japan (Internetquelle 14): a) und b) Miyako, Präfektur Iwate, c) und d) Ofunato, Präfektur Iwate, e) und f) Ishinomaki, Präfektur Miyagi

Bei dem Tsunami 2011 in Japan mussten 470.000 Menschen aufgrund des **Verlusts** ihrer **Wohngebäude** umquartiert werden. Als komplett oder teilweise eingestürzt wurden 300.000 Häuser verzeichnet (Internetquelle 1 und 2). Der Tsunami im Indischen Ozean zerstörte einige 100.000 Häuser und hinterließ 3 Mio. Obdachlose (Bormann, 2008 a).

Die **Überschwemmung der Küsten (Inundation)** reicht oft mehrere hundert Meter bis mehrere Kilometer ins Landesinnere (s. Abb. 2.12). Landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Brunnen werden durch Versalzung und Versandung unbrauchbar gemacht (Bormann, 2008 a). Korallenriffe, Mangrovenwälder, Küstenwälder, Strände und weitere natürliche Vegetation wird zerstört (Brückner & Brill, 2009).

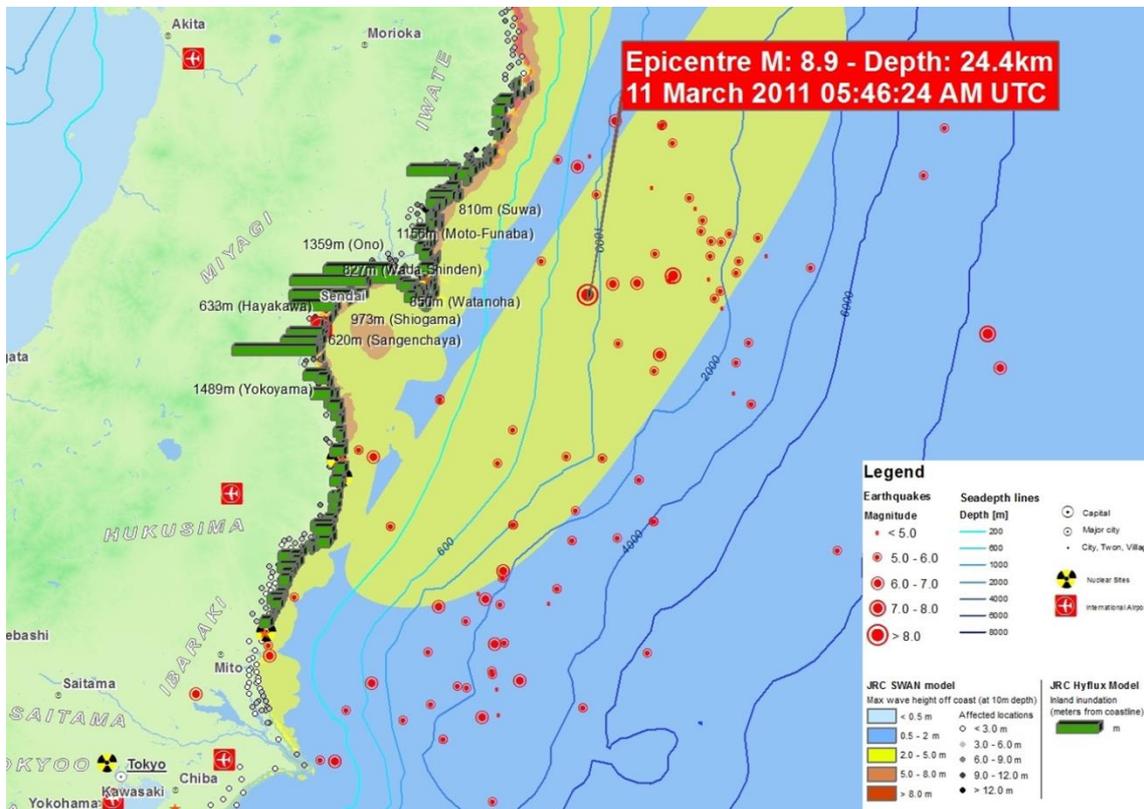


Abb. 2.12: Überschwemmungszonen der Sanrikküste Japans (Internetquelle 15)

Die Tsunamis 2004 und 2011 forderten ca. 230.000 bzw. 16.000 **Opfer**, sowie zahlreiche Vermisste (Internetquelle 1 und 2) und (Brückner & Brill, 2009).

Bei einer Tsunamikatastrophe gilt es nicht nur die entstandene Zerstörung zu beseitigen und den Wiederaufbau zu bewerkstelligen: Leckgeschlagene Fässer mit Treibstoffen Chemikalien und Flutungen von Kläranlagen stellen eine große Gefahr der **Kontamination** dar. Fäkalien-gruben sowie Leichen von Menschen und Tieren können schnell zu **Epidemien und Seuchen** führen, deren Ausbreitung und Infektionsgefahr durch tropisches Klima noch gefördert wird (Bormann, 2008 a).

Durch die Überflutung der Küstengebiete wurden **Süß- und Salzwasser vermischt**. Meerwasser versickerte ins Grundwasser. In Sri Lanka wurden durch eindringendes Salzwasser und Zerstörung 40.000 Brunnen unbrauchbar. Trinkwasser musste extern beschafft werden. Süßwasser ist notwendig, damit sich die Speicher zur Trinkwasserversorgung wieder füllen. Durch ausbleibenden Regen erholten sich die Ressourcen allerdings nur allmählich (Ulmer, 2006).

Durch **Feuer** infolge von gebrochenen Gasleitungen, Kurzschlüssen, auslaufendem Treibstoff von Schiffen und Fahrzeugen und leckgeschlagenen Tanks in Häfen kam es zur **Verstärkung der oben genannten Faktoren und Schäden** (Bormann, 2008 a).

## 2.5 Zusammenfassung

Tsunamis von **Magnituden über 9.0 sind sehr selten**. Da es aber im Falle eines starken Tsunamis zu vielen Todesopfern und **großem Ausmaß an Zerstörung** kommt, wie die letzten Tsunamiereignisse der Jahre 2004 und 2011 zeigen, ist es wichtig neue Küstenschutzmaßnahmen zu entwickeln. In Japan wurden 2011 ca. 20.000 Menschen getötet, obwohl das Land über umfassende Schutzmaßnahmen verfügte und die Bevölkerung durch Übungen auf Tsunamis vorbereitet wurde. Ufermauern und Wellenbrecher können nur für eine spezifische Wellenhöhe dimensioniert werden. In Japan waren die **Küstenschutzmaßnahmen** größtenteils **nicht hoch genug konstruiert** und **suboptimal angeordnet**, sodass die Wellenenergie nicht reduziert wurde und im schlimmsten Fall steigernd gewirkt hat. Insgesamt wurde zu viel auf das Schutzpotential der Ufermauern vertraut, während andere Aspekte, wie die erhöhte Anordnung von Wohnhäusern, sowie eigener Sensibilisierung der Bevölkerung für Tsunami-katastrophen, außer Acht gelassen wurden. Die Gefahr des Tsunamis 2011 wurde von vielen Menschen verkannt, wodurch sich nicht alle Menschen sofort in Sicherheit gebracht haben. Vor allem ältere Menschen wollten nur ungerne ihr Hab und Gut zurücklassen. Schutzbauten wurden zu niedrig dimensioniert, sodass Menschen, die sich vorschriftsmäßig auf Evakuierungsgebäude retten konnten, teilweise ebenfalls von den Wellen erfasst wurden und ertranken.

### 3 Übliche Bauweisen und Stadtplanung in tsunamigefährdeten Ländern

Dieses Kapitel vermittelt einen Überblick der bestehenden Bauweisen der, in Kapitel 1.3 erwähnten, tsunamigefährdeten Ländern. Es wird sowohl auf übliche Wohnhäuser in Küstengebieten, als auch öffentliche und Evakuierungsgebäude eingegangen (Kapitel 3.1), auf deren Grundlage Vorschläge für die Verbesserung von Bauweisen (z.B. Lage und Konstruktion) formuliert werden könnten. Kapitel 3.2 vermittelt einen kurzen Überblick über geltende Richtlinien und Gesetzesvorlagen in Bezug auf Bauweisen, die bereits erwirkt wurden. Des Weiteren wird in Kapitel 3.3 auf den Einfluss der Stadtplanung in Zusammenhang mit dem Zerstörungsgrad der Bauwerke eingegangen. In Kapitel 3.4 werden zudem Maßnahmen des Wiederaufbaus dargestellt und gezeigt, inwieweit Forschungsergebnisse schon bei der Planung berücksichtigt wurden. Konzepte zu innovativen Projekten, die tsunamisichere Bauweisen betreffen, werden in Kapitel 3.5 vorgestellt.

Küstenregionen sind oftmals beliebte Touristenorte, wodurch neben Wohnhäusern auch Hotels und Resorts vorwiegend in unmittelbarer Nähe zur Küste vorzufinden sind. Oftmals sind diese Gebäude jedoch nicht für den Fall eines Tsunamis hinreichend konstruiert. Es wird geschätzt, dass die Höhe des Tsunamis in Kamaishi 2011, durch Wellenbrecher um immerhin 40% reduziert wurde und dadurch die Tsunamiankunftszeit um 6 min verzögert wurde (Fraser, et al., 2012). Das zeigt, dass Wellenbrecher und Frühwarnsysteme ohne ergänzende Maßnahmen nicht ausreichend sind, um Infrastruktur und Menschenleben zu schützen, sondern sie die Kraft des Wellenaufpralls im Idealfall lediglich reduzieren und mehr Zeit zur Evakuierung verschaffen. Der Verlust von Bauweisen löst zudem eine Vielzahl an Folgeschäden aus (s.a. Kapitel 2.4): Vergrößerung des Zerstörungsausmaßes durch schwimmenden Schutt, obdachlose Menschen, kein Betrieb von wichtigen Einrichtungen möglich (z.B. Krankenhäusern).

#### 3.1 Typische Bauweisen in tsunamigefährdeten Ländern

##### 3.1.1 Wohngebäude

Wohngebäude in Japan, Thailand, Indonesien, Indien und Sri Lanka müssen grundsätzlich andere Anforderungen erfüllen als beispielsweise in Deutschland. In diesem Kapitel wird, exemplarisch für tsunamigefährdete Länder, auf die typischen Wohngebäude an den Küsten dieser Länder eingegangen. Im Gegensatz zum gemäßigten deutschen Klima (Braunschweig:  $\bar{\varnothing} \sim 9,2^\circ\text{C}/599$  mm Niederschlag NS) herrschen sowohl in Japan (Ofunato:  $\bar{\varnothing} \sim 10,9^\circ\text{C}/1479$  mm NS) als auch den Anrainerstaaten des Indischen Ozeans tropische Temperaturverhältnisse: Während in Japan wie in Deutschland vier abgegrenzte Jahreszeiten herrschen mit geringen Temperaturen in den Wintermonaten, sind die jahreszeitlichen Schwankungen in Thailand (Phuket:  $\bar{\varnothing} \sim 27,4^\circ\text{C}/2503$  mm NS), Indien (Goa:  $\bar{\varnothing} \sim 27,4^\circ\text{C}/2813$  mm NS), Indonesien (Medan:  $\bar{\varnothing} \sim 26,6^\circ\text{C}/2029$  mm NS) als auch Sri Lanka (Hambantota:  $\bar{\varnothing} \sim 27,2^\circ\text{C}/1045$  mm

NS) gering und liegen nahezu konstant monatlich gleichbleibend über 25 °C im Jahr (Internetquelle 16). Dadurch herrschen hohe Lufttemperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit. Diese Klimabedingungen spiegeln sich in den für unsere Verhältnisse teilweise recht „leichten“ Bauweisen für Wohnzwecke wieder. Im Folgenden werden typische Wohngebäude in Küstenregionen aus Japan, Sri Lanka, Indien, Thailand und Indonesien beschrieben. Da die in Kapitel 3.1 abgebildeten Wohngebäude in Thailand, Indonesien, Indien und Sri Lanka meist von Laien gebaut werden, war es schwierig detaillierte Angaben zu den Bauweisen zu finden.

## Japan

Gemäß der Tradition bestehen Wohnhäuser in Japan aus Holzkonstruktionen. Als Bauhölzer finden Hinoki, vorrangig für Prunkbauten, Sugi, Matsu, entspricht unserer Kiefer und Tsuga, für den gewöhnlichen Wohnungsbau, Verwendung. Aus den klimatischen Gegebenheiten ergibt sich, dass das Erdgeschoss höher gelegen sein muss, um einerseits dem Eindringen von Bodenfeuchtigkeit vorzubeugen und andererseits eine gute Luftzirkulation zu gewährleisten.

Durch diese Materialien und Bauart wird das Eindringen von Feuchtigkeit in Fußböden und Fäulnis des Holzes vermieden. Für eine gute Feuchtigkeitsregulierung der Wände sorgt traditioneller, poröser Putz, der aus Hackstroh und Lehm besteht, das durch ein Bambusgeflecht gehalten wird.

Desweiteren werden Dachüberstände großzügig dimensioniert, sodass Türen und Fenster gegen Sonne und Regen geschützt sind. Zugunsten einer guten Durchlüftung und variabler Raumnutzung finden im Innenausbau verschiebbare und entfernbare Wände Vorzug gegenüber festen Wänden. Die Raummaße der Grundrissgestaltung erfolgen nach den traditionellen Längeneinheiten Shaku oder Ken, nach denen auch üblicherweise die verwendeten Bauhölzer genormt sind (1Shaku=30,9 cm) und orientieren sich an den Größen der Tatami-Matten (Reisstrohplatten) (B~90cm, T~180cm, H~5cm), deren Anzahl als Größenangabe des Raumes verwendet wird (Kujawski, 1972). Abb. 3.1 zeigt einen Schnitt durch ein traditionelles japanisches Wohnhaus in Fachwerkkonstruktion sowie der verwendeten gängigen Holzverbindungen.

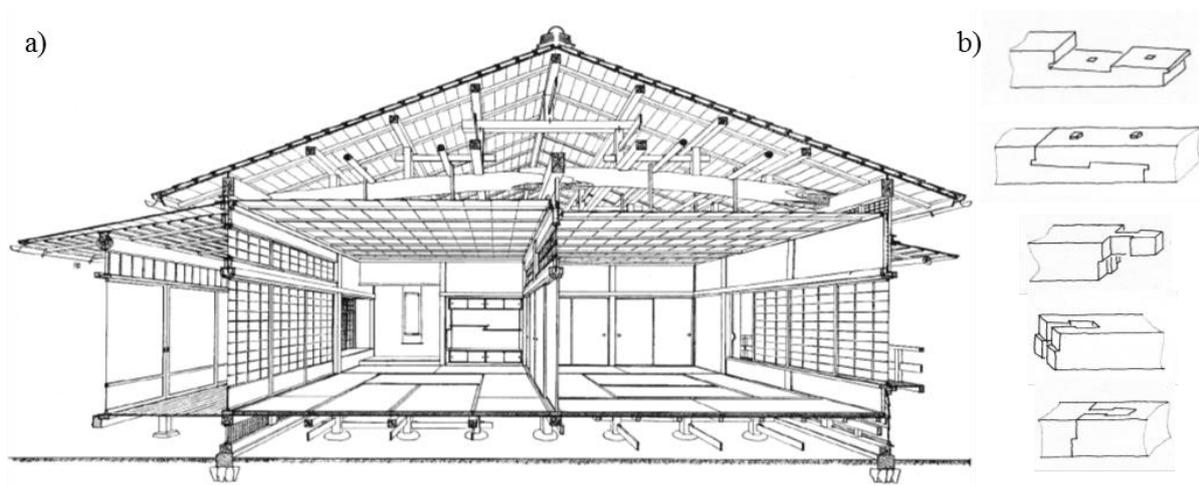


Abb. 3.1: traditionelles japanisches Wohnhaus: a) Querschnitt, b) Holzverbindungen (Kujawski, 1972)

Abb. 3.2 und Abb. 3.3 zeigen zwei Küstenhäuser (September 2011) in Miyako, Japan. Die traditionelle Bauweise aus Abb. 3.1 hat sich mittlerweile weiterentwickelt: die generelle Leichtbauweise ist erhalten geblieben und einige Elemente, wie beispielsweise die erhöhten Fundamente finden weiterhin Verwendung. Es werden jedoch andere Materialien zur Verkleidung verwendet. Statt traditionell 1-etagigen Gebäuden weisen viele Wohngebäude inzwischen zwei Etagen auf, wodurch die generellen Gebäudehöhen gestiegen sind.



Abb. 3.2: Hausbau bei Miyako, Japan: a) Betonfundament mit Holzunterkonstruktion, b) Fundament mit Lüftungsgitter, c) und d) durch Nut verbundene Holzbalken



Abb. 3.3: Fortgeschrittener Hausbau bei Miyako, Japan: a), b) und c) Dachgiebel mit oberer Beplankung, d) Gesamtansicht des Rohbaus, e) Bodendetail, f) Gipskartonplatten

### Sri Lanka

Als üblichste Konstruktionsart für Wohngebäude finden sich sowohl an der Süd- als auch Ostküste Sri Lankas Ziegelsteinbauten (Borreo, 2005). Abb. 3.4 zeigt den Bau eines traditionellen Mauerwerkshauses nach 2004. Als Gründung fanden Kies und Steine Verwendung, die

in der Umgebung gesammelt wurden. Selbiges gilt für das Dach, für das die Familie Holz sammelte. Die Kosten beliefen sich auf ca. 5200 \$ (~4000 €) (Internetquelle 17).



Abb. 3.4: Bauschritte eines traditionellen Ziegelsteinhauses in Sri Lanka (Internetquelle 17)

In Galle, Matara und Hambantota sind laut Feldstudien von Murao & Nakazato (2010), überwiegend ein- oder zweigeschossige Gebäude vorhanden gewesen, wobei der größte Anteil von eingeschossigen Gebäuden aus Ziegelstein, Naturstein oder Holz bestand und Wohnzwecken oder gewerblichen Zwecken diente. Für Mauerwerksbauten finden sowohl halb gebrannte Tonziegel, als auch Vollziegel Verwendung (Abb. 3.5).

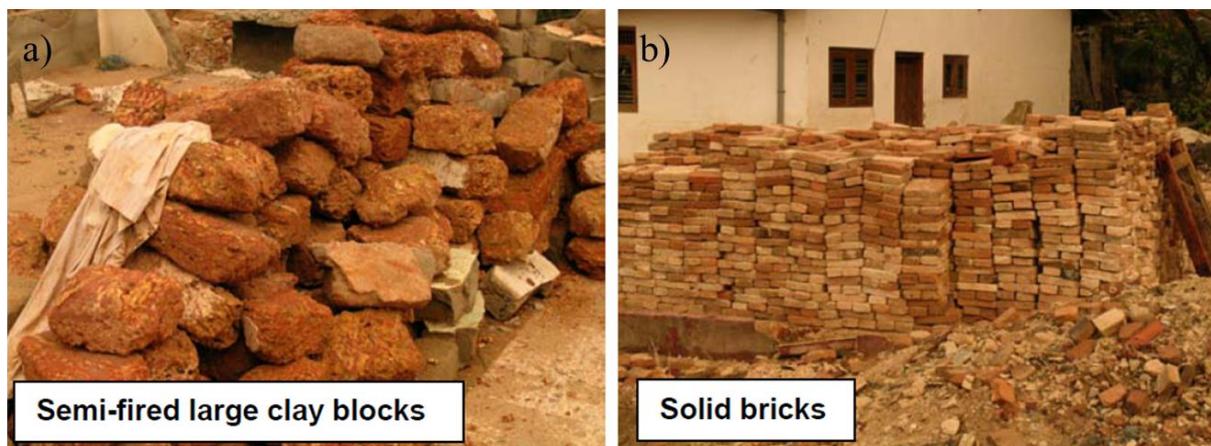


Abb. 3.5: für Mauerwerksbauten verwendetes Material (Pomonis, et al., 2006): a) halb gebrannte Tonziegel, b) Vollziegel

Abb. 3.6 zeigt weitere Bauweisen in Küstengebieten, die durch den Tsunami 2004 zerstört wurden. Abgebildet sind Wohnhäuser aus verputztem Mauerwerk oder Beton mit Dächern, die aus Ziegeln oder Holz bestehen.



Abb. 3.6: Wohnhäuser in Sri Lanka: a) Galle (Internetquelle 18), b) Galle (Internetquelle 19), c) Galle (Internetquelle 19), d) Peraliya (Borreo, 2005), e) und f) Hambantota (Wijeyewickrema, et al., 2006)

## Indien

Nahezu alle Häuser, der vom Tsunami betroffenen Gebiete Indiens waren nicht konstruierte Gebäude. Als Konstruktionsart wurde meist verputztes Mauerwerk mit Ziegelstein- (*brick*)

oder Schilfwänden (*reeds*) verwendet, während die Dächer aus Stroh oder Mangalore-Ziegeln bestanden (Borreo, 2005). Abb. 3.7 veranschaulicht die typischen Bauweisen. Einige Häuser, die unmittelbar am Wasser gebaut sind, verfügen über eine Erhöhung durch Pfosten oder Pfeiler. Dadurch sind sie vor kleineren Überflutungen geschützt (Abb. 3.7 d-f). Traditionellerweise wurden die Wohnhäuser aus dem Material gefertigt, das im Wald gefunden wurde. Dazu zählten Bambus und getrocknetes Gras. Heutzutage können die meisten Materialien nicht mehr vor Ort bezogen werden, sondern Ziegel und Zement müssen gekauft werden. Die Dächer bestehen aus Stroh, Kokosnussblättern oder Mangalore-Ziegeln (Abb. 3.7 g-i), aber auch Asbestplatten und Zinnblechen (Internetquelle 20).



Abb. 3.7: Wohnhäuser in Indien: a) Andamanen (Internetquelle 21), b) Nagapattinam (Internetquelle 22), c) Nagapattinam (Internetquelle 22), d) Andamanen (Internetquelle 23), e) Car Nicobar (Internetquelle 24), f) Car Nicobar (Internetquelle 25), g) Tamil Nadu, Dach aus Kokosnussblättern, h) Tamil Nadu, Strohdach, i) Tamil Nadu, Dach aus Mangalore-Ziegeln (Barenstein & Pittet, 2007)

Die Wände älterer Bauweisen, die sehr einfach gehalten sind, bestehen zum Teil nur aus Schlamm und Bambusstöckern. Zunehmend werden sonnengetrocknete, oder hochwertigere gebrannte Ziegel und Zementblöcke verwendet. Sonnengetrocknete Ziegel können selbst hergestellt werden und sind dadurch deutlich günstiger als gebrannte Ziegel und Zementblöcke die teuer von außerhalb erworben werden müssen (Internetquelle 26). Abb. 3.8 zeigt jeweils ein Beispiel für die genannten Ziegelsteinarten.



Abb. 3.8: Ziegelsteine in Indien (Internetquelle 26): a) sonnengetrocknete Ziegelsteine, b) gebrannte Ziegel und Zementblöcke

### Thailand

Traditionell wurden Wohnhäuser aus Bambus gefertigt, da das Gebäude dadurch komplett von den Eigentümern selbst gebaut werden konnte. Abb. 3.9 a und b zeigen tong tung Blätter vor und nach der Verwendung als Dachkonstruktionen. Gras, Schilf und Palmenblätter, die an Bambus oder Rattan genäht werden, dienen ebenfalls als Dach (Abb. 3.9c bis f).

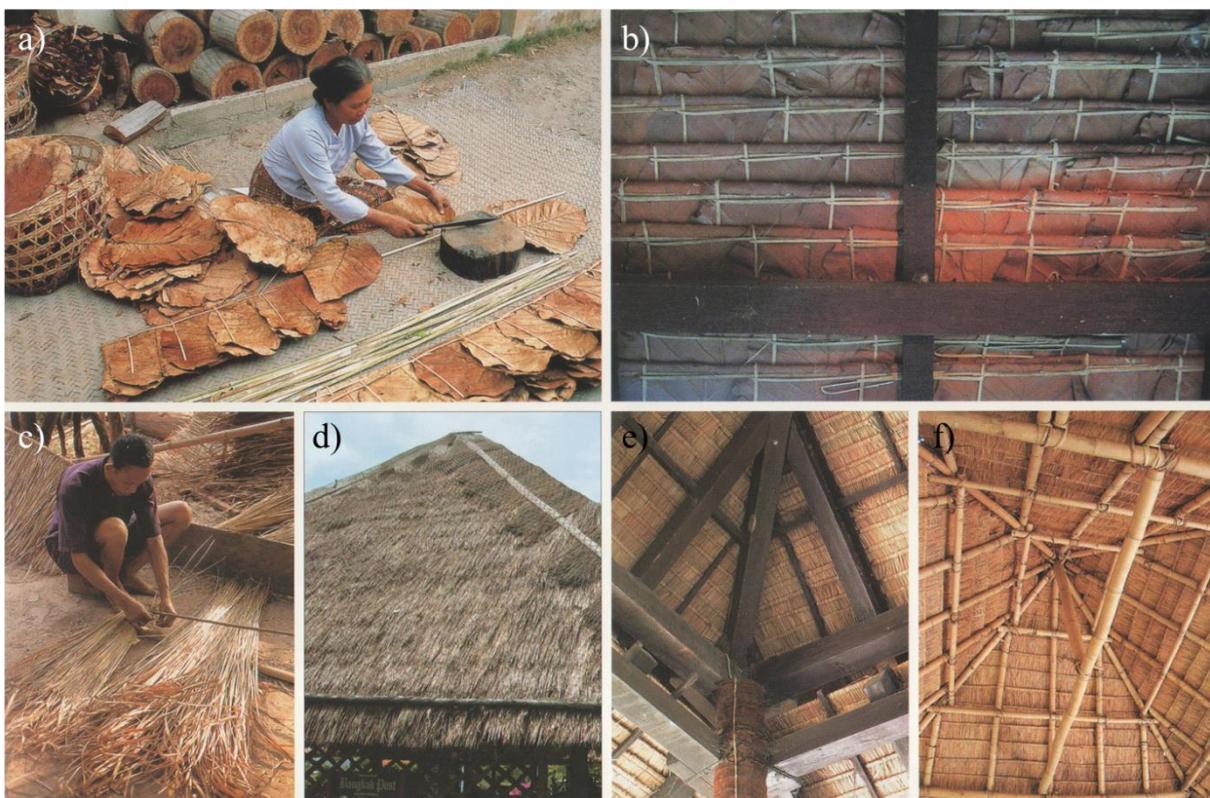


Abb. 3.9: Traditionelle Baustoffe in Thailand (Sthapitanonda & Mertens, 2006): a) und b) tong tung Blätter c), d), e) und f) Gras, Schilf und Palmenblätter, die an Bambus oder Rattan genäht werden

Geteilter Bambus, Rattan oder Schilf werden als Leichtbauwand verwendet (Abb. 3.9 g bis i) (Sthapitanonda & Mertens, 2006).



Abb. 3.10: Traditionelle Baustoffe in Thailand (Sthapitanonda & Mertens, 2006): a), b) und c) geteilter Bambus, Rattan und Schilf als Leichtbauwand

Einige Häuser in Thailand werden aus Kostengründen improvisierend aus gewelltem Blech, Abfallholz und gewebten Elementen gefertigt (Abb. 3.11).

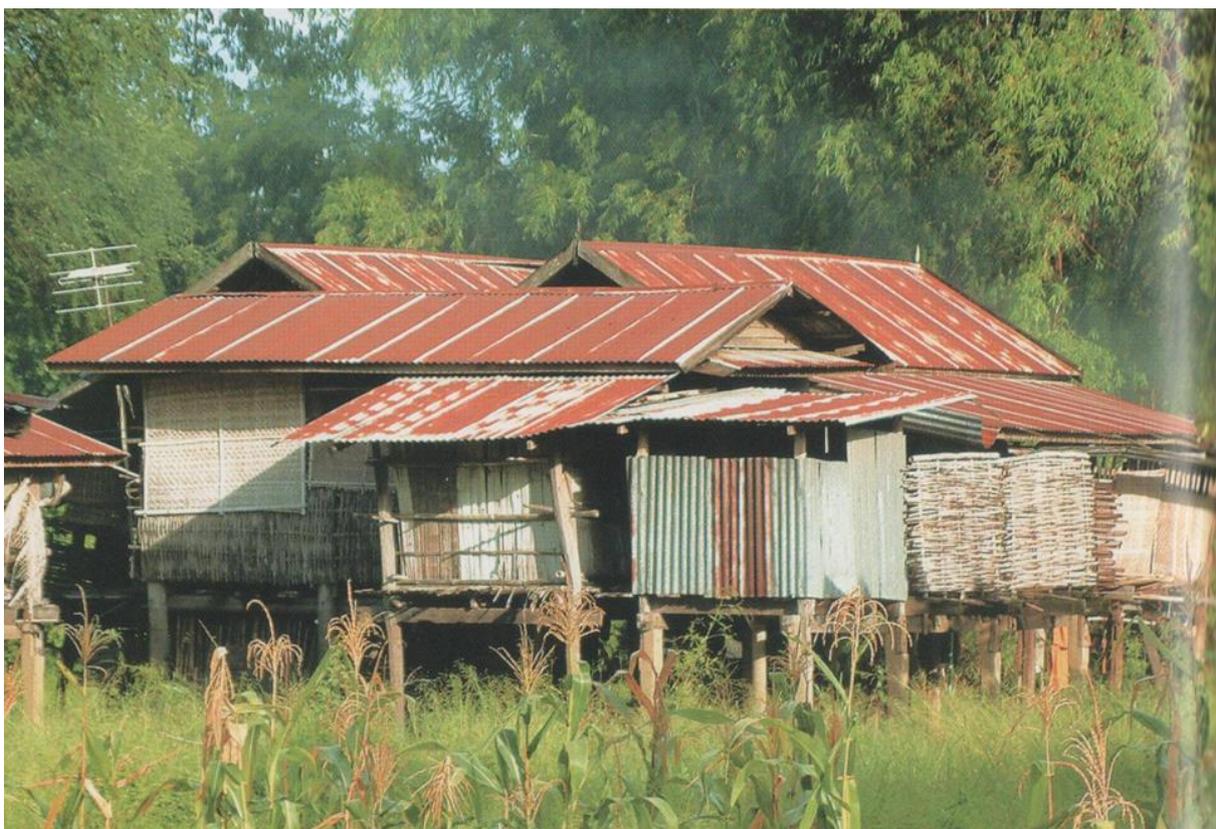


Abb. 3.11: Wohnhaus in Thailand kostengünstigem Material (Sthapitanonda & Mertens, 2006)

Die Fundamente thailändischer Gebäude bestehen meist aus flachen Einzelfundamenten (*shallow spread footings*), meist einen Meter über dem Boden (Dalrymple & Kriebel, 2005). Das in Abb. 3.12 f abgebildete eingeschossige Haus liegt ca. 100 m von der Küste in Kamala

Beach entfernt und ist beispielhaft für ortstypische Leichtbauweise und mangelhaftem Tragwerk (Pomonis, et al., 2006). Wandkonstruktionen sind überwiegend aus Leichtbauweise (Abb. 3.12 d). Häuser die unmittelbar an der Küste gebaut wurden, sind durch Pfeiler oder Pfosten erhöht (Abb. 3.12 b und e). Abb. 3.12 c zeigt ein traditionelles Mauerwerksgebäude.



Abb. 3.12: Typische Häuser in Thailand: a) Phuket (Internetquelle 27), b) Ko Phi Phi (Internetquelle 28), c) und d) Kamala Beach (Pomonis, et al., 2006), e) Ton Sai Bay (Pomonis, et al., 2006), f) Kamala Beach (Pomonis, et al., 2006)

## Indonesien

Auf **Java**, einer der vier Hauptinseln Indonesiens neben Borneo, Sulawesi und Sumata, bilden Holz und Bambuskonstruktionen den einfachsten Wohnungstyp. Bei dieser Konstruktions-

weise werden die Wände meist recht leicht und flexibel gehalten sind, sind oftmals aus geflochtenen Kokosnussblättern. Diese Gebäude sind nicht besonders widerstandsfähig.

Sie sind meist eingeschossig vorzufinden zur Verwendung von Wohnzwecken und gewerblicher Nutzung c Viele eingeschossige Läden und Wohnhäuser wurden jedoch auf Betongründungen aus unbewehrtem Ziegelstein gefertigt, der verputzt wurde.



Abb. 3.13: Landestypische Leichtbauweisen auf Java, Indonesien (Reese, et al., 2007): a) und b) Zerstörung bei Bambus-Holzhausern nach Überflutungshöhen von 1 m bzw. 3 m, c) und d) traditionelle Ziegelsteinbauten bei Überflutungshöhen von ca. 3 m

### 3.1.2 Evakuierungsgebäude und öffentliche Gebäude

Grundsätzlich wird bei Strategien zur Evakuierung zwischen 2 Methoden unterschieden: der horizontalen Evakuierung zu entfernten Standorten außerhalb der Überflutungszonen und der vertikalen Evakuierung (NTHMP, 2001).

Als vertikaler Evakuierungsort im Falle eines Tsunamis werden Gebäude oder Erhöhungen im Überflutungsgebiet bezeichnet, die eine ausreichender Höhe vorweisen, um den zu evakuierenden Menschen oberhalb der Überflutungshöhe einen Zufluchtsort zu bieten (FEMA-P646, 2008). Evakuierungsgebäude und öffentliche Gebäude mit erweiterter Funktion als Zufluchtsort sind im Falle eines Tsunamis überlebenswichtig: Ihre Standsicherheit und gute Erreichbarkeit innerhalb von Überflutungsgebieten ist überlebenswichtig. Vorgesehene Platt-

formen und topographisch höher gelegene Gebiete sind bei Tsunamiepizentren nahe der Küste oft nicht schnell genug erreichbar. Standsichere öffentliche Gebäude sind auch aus wirtschaftlicher Sicht erstrebenswert: Standsichere Gebäude werden nicht zu schwimmendem Schutt, der weitere Zerstörung hervorruft.

### Anforderungen

Ein sicherer Zufluchtsort ist dann gewährleistet, wenn Evakuierungsgebäude:

- leicht identifizierbar sind,
- anhaltenden, starken Erschütterungen widerstehen,
- ein Versagen der Gründung gegen Unterspülungen (*scour*) ausgeschlossen ist,
- mindestens zwei Etagen besitzen,
- eine Freifläche der untersten Etage für Durchgang von Wasser und Schutt ausgelegt ist oder die unterste Etage so konstruiert ist, dass sie geopfert werden kann,
- die Höhe der Unterseite der zweiten Etage höher konstruiert ist, als die voraussichtlich zu erwartende Überschwemmungshöhe (*inundation elevation*).

Das Dach kann im Alltag für allgemeine Zwecke wie Parken oder Erholungsraum gestaltet werden (s. Abb. 3.14). Im Notfall dient es neben der Funktion als Zufluchtsort als Hubschrauberlandeplatz, Notfall-Lagerung von Lebensmitteln oder medizinische Versorgung (Raskin, et al., 2009).

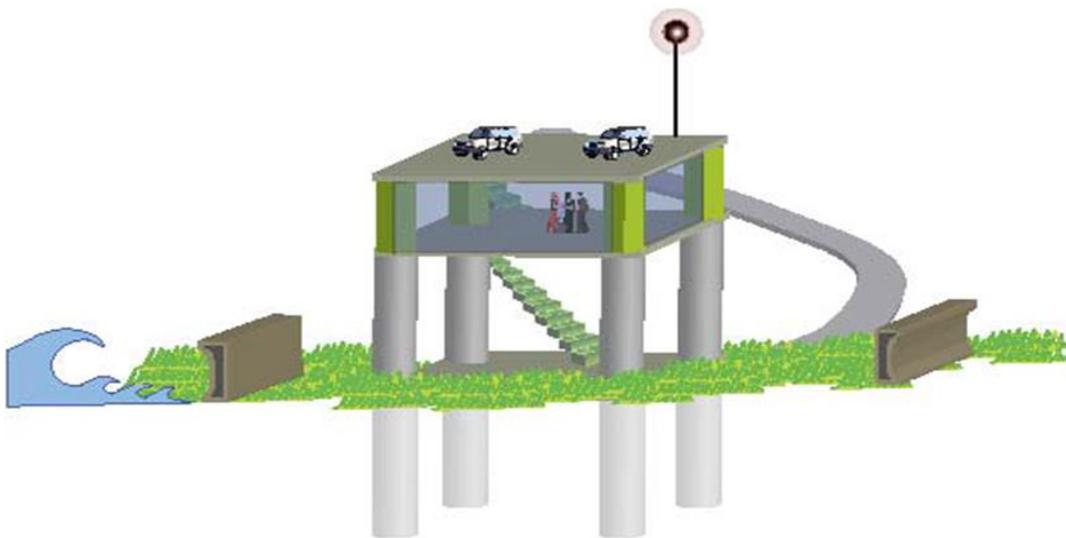


Abb. 3.14: Beispielhaftes Design eines Tsunamievakuierungsgebäudes (Raskin, et al., 2009)

### Anzahl und Abstände bei Evakuierungsgebäuden

In (FEMA-P646, 2008) werden Empfehlungen zu den Abständen von vertikalen Evakuierungsgebäuden untereinander in Abhängigkeit der zu erwartenden Vorwarnzeit und der Entfernung des Epizentrums gegeben.

Bei weit von der Küste entstehenden Tsunamis wird von einer ca. 2 stündigen Vorwarnzeit ausgegangen. Die Route zu einem Evakuierungsgebäude sollte dann maximal 4 mi (ca. 6,4 km), bzw. der Abstand der Evakuierungsgebäude zueinander maximal 8 mi (ca. 12,9 km) entsprechen. Dementsprechend sollten vertikale Evakuierungsgebäude von einem beliebigen Standpunkt aus bei 30 minütiger Vorwarnzeit in maximal 1 mi (ca. 1,6 km) und 15 min in maximal  $\frac{1}{2}$  mi (0,8 km) Entfernung zu erreichen sein. Es gilt allgemein, je kürzer die Vorwarnzeit, desto geringer die Abstände zwischen den vertikalen Evakuierungsgebäuden. Die Abb. 3.15 a zeigt eine mögliche Anordnung von vertikalen Evakuierungsgebäuden in Küstennähe. Bei der Gehgeschwindigkeit wurde von einer gehbeeinträchtigten Bevölkerung ausgegangen und zwei mi/h angesetzt.

Besondere Vorsicht ist beim Aufsuchen der Evakuierungsgebäude geboten, wenn brechende Wellen (*breaking waves*), viel mitgespülter Schutt (*debris*) und Gefahrgut im Wasser (*waterborne hazardous material*) zu erwarten sind. Aufgrunddessen sollten Evakuierungsgebäude möglichst entfernt von Gefahrenquellen erbaut werden. Dies betrifft sowohl möglichen Schaden an der **Baustruktur** als auch **geringere Sicherheit** für die zu Evakuierenden.

Zu gebrochenen Wellen an der Küste kann es beispielsweise bei steilem Küstengelände kommen. Die daraus resultierenden Kräfte sind stark und schlecht einzuschätzen, weshalb mit einer Gefährdung der Baustruktur zu rechnen ist. Deshalb sollten sich Evakuierungsgebäude in einiger Entfernung zur Küstenlinie befinden.

Ein Beispiel für die Anordnung von vertikalen Evakuierungsgebäuden zeigt Abb. 3.15: Gebäude 1 liegt an einem Hafen und ist zusätzlich durch das angrenzende Container Terminal gefährdet, da Schiffe und Boote als **Aufprallkräfte** (*impact forces*) das Gebäude gefährden könnten. Das trifft ebenfalls auf Gebäude 2 zu, das an Hafen und Parkplatz angrenzt. Durch das Angrenzen an eine Tankstelle ist Gebäude 3 suboptimal platziert. Wegen der möglichen Entzündlichkeit von Chemikalien und anderen brennbaren Stoffen müsste das Gebäude neben Schutz vor Schutt auch gegen Feuer in besonderem Maße geschützt werden. Die Lage von Gebäude 4, angrenzend an einen bewaldeten Küstenabschnitt ist ideal, da sie Schutz vor Aufprallkräften durch Schutt bietet. Trümmer sind lediglich in geringem Ausmaß von Parkeinrichtungen, Treibholz oder Teilen von Baumstämmen zu erwarten. Gebäude 5 befindet sich in unmittelbarer Nähe einer Notfallreaktionseinrichtung von Feuerwehr und Polizei. Dadurch ist Unterstützung und Kontrolle bei der Evakuierung zu erwarten. Die Anbindung an erhöhtes, natürliches Gelände der Gebäude der Nummer 6 ist vorteilhaft.

### Dimensionierung

Die Größe eines vertikalen Evakuierungsgebäudes hängt von der zu erwartenden **Anzahl an zu Evakuierenden**, der vorgesehenen **Nutzungsdauer** des einzelnen Gebäudes und der **Art der Belegung** ab. Der Abstand zu anderen Evakuierungsgebäuden und die Gesamtzahl der Bevölkerung in den Evakuierungsgebieten müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Bei einem Tsunamireignis wird von einer kurzfristigen Belegung für eine Dauer zwischen 8 und 12 Stunden ausgegangen. Der vorgesehene Platz pro Person beträgt 10 *square feet* (ca. 0,93 m<sup>2</sup>). Die Mindesthöhe eines Evakuierungsgebäudes ergibt sich aus der maximalen Wellenaufhöhe (*run-up elevation*) zuzüglich einer Höhe von 10 ft (ca. 3 m).

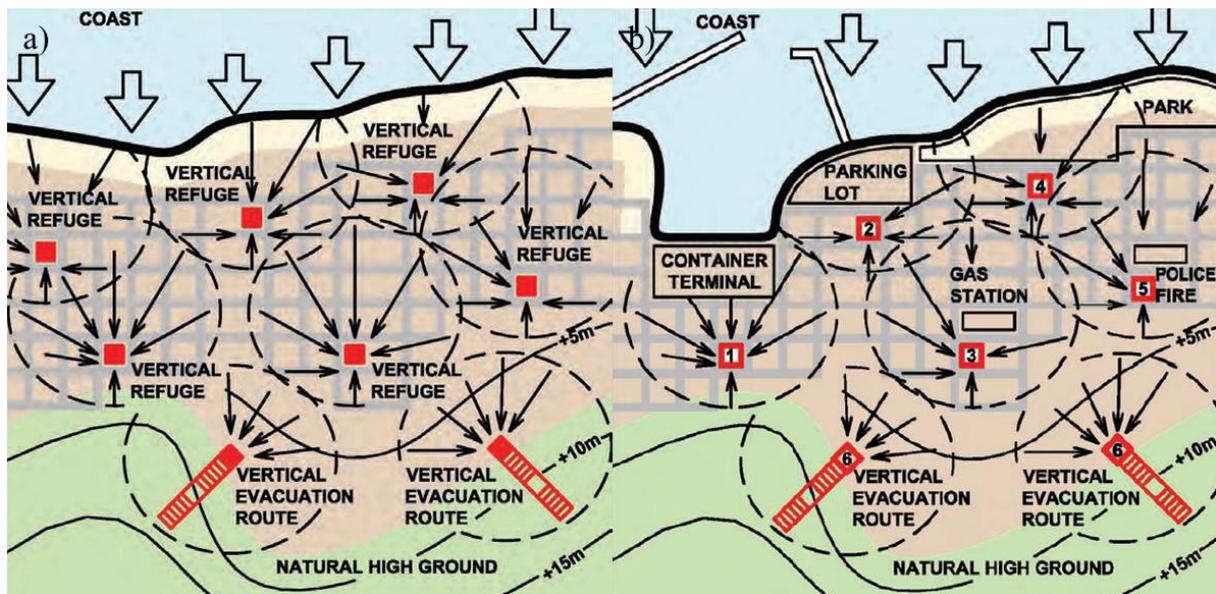


Abb. 3.15: Anordnung von Evakuierungsgebäuden: a) mögliche Anordnung in Küstennähe , b) unvorteilhafte (1, 2, 3, 4) und vorteilhafte Lage (5, 6)

## Japan und die USA

Allgemein lässt sich festhalten, dass der Bau von vertikalen Evakuierungsgebäuden in Japan und den USA fortgeschrittener ist als in den Anrainerstaaten des Indischen Ozeans.

In Japan gab es bereits vor 2011 zahlreiche zu Evakuierungszwecken konstruierte, ausgeschilderte Gebäude (s. Tab. 2), während ich keinerlei Belege finden konnte, dass offiziell ausgewiesene Evakuierungsgebäude bereits vor 2004 in den Anrainerstaaten vorzufinden waren. Aus und für die USA gibt es zudem zahlreiche Richtlinien u.a. „FEMA P-646 - Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis (2008), FEMA P-55 - Coastal Construction Manual (2011), The City and Country of Honolulu Building Code (CCH) –The 2003 International Building Code (IBC) und American Society of Civil Engineers (ASCE) 7 - Minimum Design Loads for Buildings and other Structures” (vgl. Kapitel 4.2). Abb. 3.16 zeigt verschiedene Möglichkeiten von vertikalen Evakuierungsgebäuden.

Tab. 2: Gegenüberstellung von Überlebenden des Tsunamis 2011 in Japan im Verhältnis zu Evakuierungseinrichtungen (Fraser, et al., 2012)

Stadt	Überlebende in oberen Stockwerken	Anzahl an Evakuierungseinrichtungen
Sendai	2.139	4
Natori	3.285	5
Iwanuma	2.095	5
Watari	2.102	5
Yamamoto	91	1



Abb. 3.16: vertikale Evakuierkonstruktionen in Japan: a) Life-Saving Tower/Tasukaru Tower in Tanabe Town (FEMA-P646, 2008), b) Gebäude in Minamisanriku nach 2011 (Shibayama, et al., 2013), c) Shirahama Beach Resort in Toyo (FEMA-P646, 2008), d) Gebäude in Kaifu (FEMA-P646, 2008), e) Grundschule in Aonae f) Nishiki Tower (FEMA-P646, 2008), g) Konstruktion in Rikuzentakata nach 2011 (Dank an Gesa Neuert), h) Berme in Aonae (FEMA-P646, 2008), i) Gebäude in Kesenuma City (Internetquelle 29)

Viele der Gebäude die in Japan versagt haben wurden zu Zeiten wo es noch keine Richtlinien zum Tsunamischutz gab erbaut. Die einzige verfügbare Richtlinie wäre das „Tsunmai Rescue Building Design Manual“ nachdem beispielsweise das Evakuierungsgebäude in Minamisanriku (Abb. 3.16 b) gebaut wurde, das den Tsunami 2011 überstanden hat (Shibayama, et al., 2013). Der Tasukaru Tower in Tanabe Town der Präfektur Wakayama hat eine Höhe von 7,5 m und bietet Zuflucht für 100 Menschen (Abb. 3.16 a). Für 700 Evakuierende ist der Shirahama Beach Resort (Höhe 11,5 m) in Toyo, der Präfektur Kochi, konzipiert (Abb. 3.16 c). In der Präfektur Mie können durch den 21,8 m hohen Nishiki Tower (Abb. 3.16 f) 500 Menschen evakuiert werden (Velotti, et al., 2012). Mi ist eine kleine Fischerstadt, die in der Vergangenheit stark durch Tsunamis zerstört wurde. Der aus Stahlbeton gebaute Evakuierungsturm besteht aus fünf Ebenen und soll im Ernstfall innerhalb von 5 min erreichbar sein (Leonard, et al., 2011).

## Sri Lanka

Öffentliche Gebäude, wie Schulen und Krankenhäuser sind in Sri Lanka im Allgemeinen als Stahl oder Stahlbetonkonstruktion vorzufinden. Diese Aussage trifft allerdings nicht auf alle Gebäude zu (s. Abb. 3.17). Das Krankenhaus in Kinniya hat den Tsunami zwar scheinbar überstanden, dennoch entspricht ein Wellblechdach und eine eingeschossige Bauweise nicht den Anforderungen bei hohen Überflutungshöhen. In Galle, Matara und Hambantota werden laut Feldstudien von Murao & Nakazato (2010), die überwiegende Anzahl der Häuser mit zwei oder mehr Etagen aus Stahl oder Stahlbeton als Apartments, Büros, zu gewerblichen Zwecken oder als öffentliche Gebäude genutzt.



Abb. 3.17: Krankenhaus in Distrikt Kinniya, in Trincomalee, Sri Lanka (Borreo, 2005)

## Indien

Zwischen 1986 und 1991 wurde der Bau von Stahlbetonkonstruktionen in Kutch, West-Indien üblich. Die Konstruktionen (s. Abb. 3.18) bestanden meist aus Betonsäulen und einem Beton- oder Holzdach und umfassten zwei bis drei Etagen (Patel, et al., 2001).

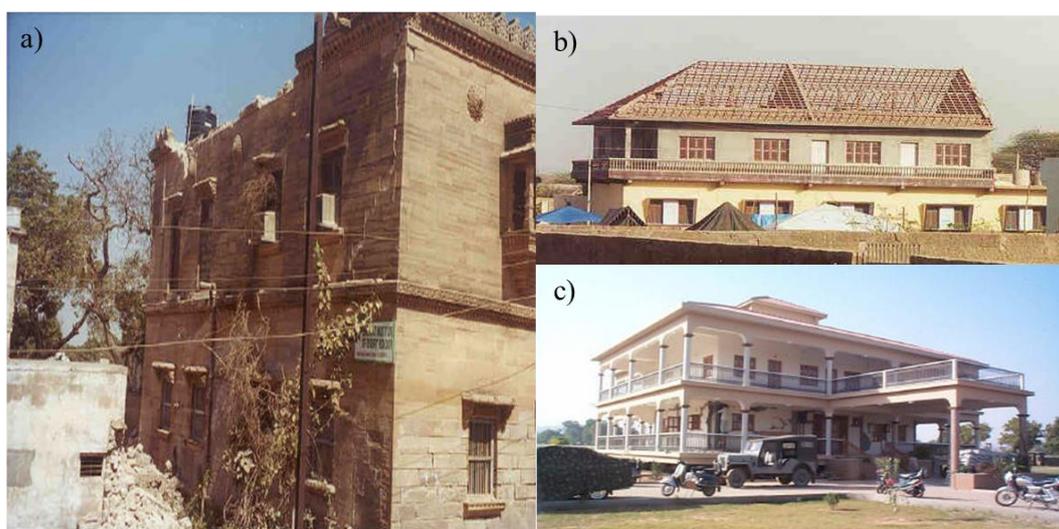


Abb. 3.18: öffentliche Gebäude in Indien (Patel, et al., 2001): a) um 1900 erbautes 2-geschossiges Regierungsgebäude aus Ziegelstein in Bhuj, b) Gebäude in Mirzapur mit ausgefachten Wänden, c) Stahlbetonkonstruktion in Bharazar

## Thailand

Während des Tsunamis 2004 fanden bereits mehrstöckige Gebäude, darunter Ferienbauten aus Stahlbeton, Verwendung als vertikale Evakuierungsgebäude (Dalrymple & Kriebel, 2005). Mittlerweile wurde in Nam Khem eine Schule offiziell als Evakuierungsgebäude deklariert und 2010 ein Evakuierungsgebäude in Phang Nga fertiggestellt (s. Abb. 3.19) (Suppasri, et al., 2012 b).



Abb. 3.19: Evakuierungsgebäude in Phang Nga (Internetquelle 30)



Abb. 3.20: Öffentliche Gebäude bzw. mögliche Evakuierungsgebäude in Thailand (Pomonis, et al., 2006): a) und b) Schule in Kamala Beach vor und nach dem Tsunami, c) 2-etagiger Resort in Khao Lak, d) örtliches Elektrizitätswerk und Kommunikationsgebäude in Phi Phi Island

## Indonesien

Zwei- oder mehrgeschossig ausgeführte Bauweisen, wie Hotels, Läden und öffentliche Gebäude aus Stahlbeton mit ausgefachten Ziegelsteinwänden waren durch Verwendung von Bewehrung und Material gut konstruiert. Oftmals beinhalteten die Schäden nur zerbrochene Fenster und Aufprallschäden durch Schutt (*debris*). Bei Wasserspiegeln von 1,5 bis 4 m sind bei dieser Konstruktionsweise nur von mäßigen, reparablen Beschädigungen im Erdgeschoss auszugehen. Die oberen Stockwerke blieben unbeschädigt und dienten der Zuflucht für Menschen (Reese, et al., 2007). Nach dem Tsunami 2004 wurde ein Evakuierungsgebäude in Banda Aceh erbaut (s. Abb. 3.21).

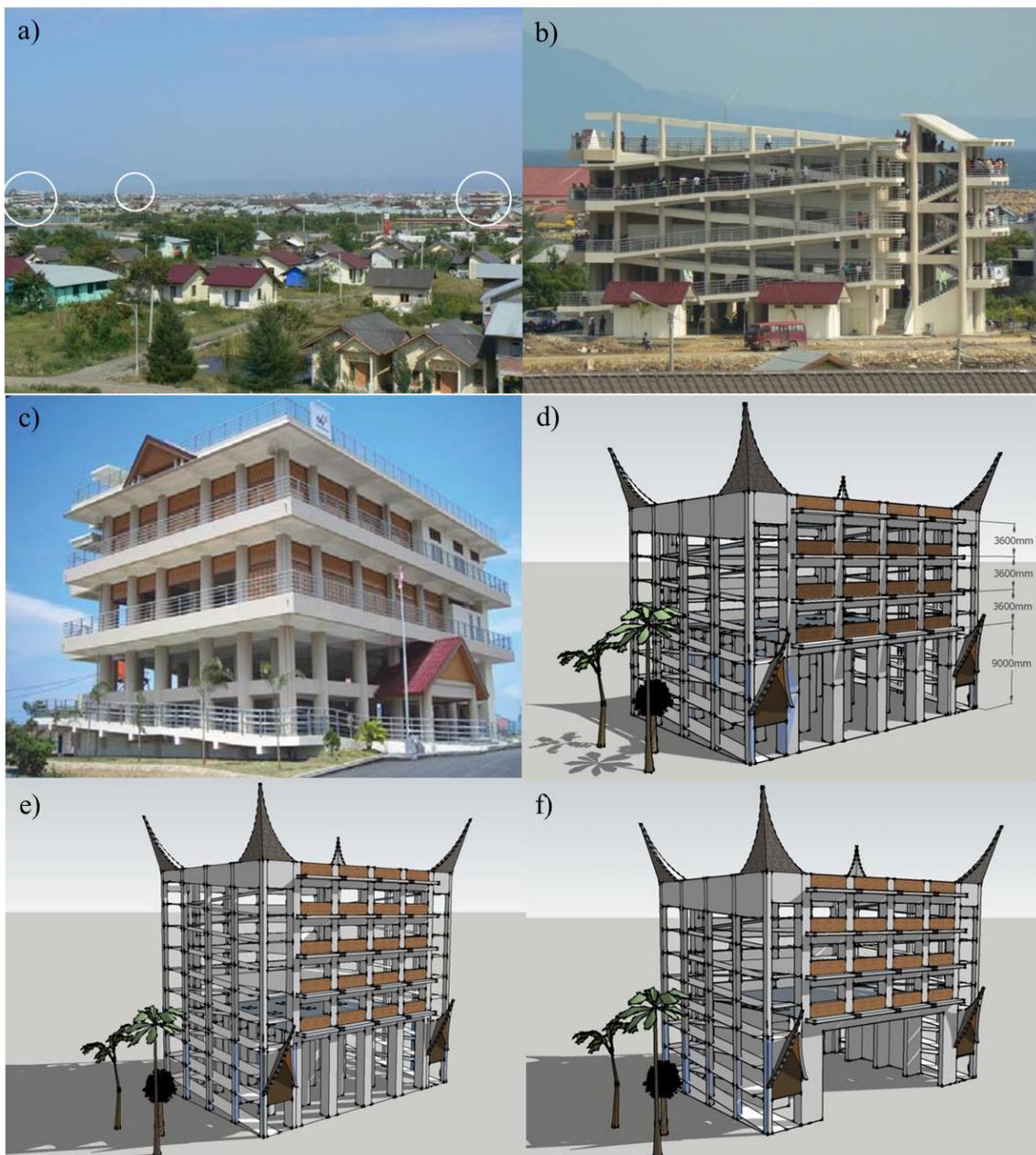


Abb. 3.21: Evakuierungsgebäude in Indonesien nach dem Tsunami 2004 erbaut: a) und b) Banda Aceh (Leonard, et al., 2011), c) Banda Aceh (Suppasri, et al., 2012 b), d), e) und f) Entwürfe für Evakuierungsgebäude

In einer flachen gelegenen Gegend wie Padang ist eine horizontale Evakuierung der Menschen nicht möglich und für einen Neubau steht oft kein Baugrund zu Verfügung. Deshalb wäre eine Nutzung einiger bereits bestehender Gebäude und Verbesserung zu vertikalen Evakuierungsgebäuden denkbar. Abb. 3.22 zeigt einen mögliche Verbesserung einer Moschee sowie eine Übersicht von weiteren potentiellen Gebäuden (Internetquelle 31), die als Evakuierungsgebäude nach baulicher Anpassung dienen könnten.



Abb. 3.22: Nutzung von Moscheen in Padang als Evakuierungsgebäude (Internetquelle 31): a) Masjid Nural Iman, b) 3D Grafik, c) weitläufige Treppen zu oberen Etagen, d) Übersicht an Moscheen in Küstennähe

### 3.2 Richtlinien und Strategien für tsunamisichere Konstruktionen

Die Kapitel Richtlinien (Kapitel 2.3), Stadtplanung (Kapitel 2.4) und Wiederaufbau (Kapitel 2.4) sind nicht immer eindeutig voneinander abgrenzbar. Abb. 3.23 veranschaulicht die Zusammenhänge und Unterschiede in Theorie und Praxis.

In der Theorie sollen Richtlinien die formellen Rahmenbedingungen schaffen, durch Formulierung von Vorschriften und Empfehlungen. Auf Basis der bestehenden Richtlinien werden Konzepte für die Stadtplanung erarbeitet. Dabei wird versucht die verschiedenen Nutzungsansprüche (Land- und Forstwirtschaft, Verkehr, Siedlungsentwicklung, Freizeit und Erholung, Naturschutz) gleichermaßen zu berücksichtigen (Internetquelle 32). Wiederaufbau lässt sich als „Wiedererrichtung von Zerstörtem“ (Internetquelle 33) übersetzen und soll sich bei der Umsetzung an den Konzepten der Stadtplanung orientieren.



Abb. 3.23: Gegenüberstellung von Theorie und Praxis

In der Praxis sind jedoch vor allem in den Entwicklungsländern nicht immer Richtlinien und Stadtplanungskonzepte vorhanden, die die einzelnen Nutzungsansprüche regeln. Der Wiederaufbau erfolgt dann nicht durch Absprache mit den öffentlichen Instanzen, sondern wird in Eigenregie von der Bevölkerung oder auch durch Hilfsorganisationen vorgenommen.

Die folgende Tab. 3 gibt einen Überblick über Richtlinien vor und nach den Ereignissen 2004 und 2011, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Tab. 3: Richtlinien bzw. Strategien vor und nach 2004 und 2011

<b>Verfasser/ Erscheinungsjahr</b>	<b>Bezeichnung der Richtlinie bzw. Strategie</b>
NTHMP 2001	Designing for Tsunamis - Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards (NTHMP, 2001).
Budiarjo 2006	Evacuation Shelter Building Planning for Tsunami-prone Area; a Case Study of Meulaboh City Indonesia
FEMA-P646 2008	Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis
MLIT 2011	Gesetz zur Entwicklung von „tsunamiresistenten Gemeinden“
UNEP & SKAT 2007	After the Tsunami - Sustainable building guidelines for South-East Asia“

Bereits vor 2004, im März 2001 wurde das Paper „**Designing for Tsunamis - Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards**“ im Rahmen des National Tsunami Hazard Mitigation Programs herausgebracht. An dem Projekt waren sowohl die National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), U.S. Geological Survey (USGS), Federal Emergency Management Agency (FEMA) sowie National Science Foundation (NSF) als auch die US Amerikanischen Staaten Alaska, Kalifornien, Hawaii, Oregon und Washington beteiligt (NTHMP, 2001).

In sieben Grundsätze gegliedert, wird im ersten Schritt verdeutlicht, dass das Wissen über Gefährdung (*hazard*), Schadenspotential (*vulnerability*) und Lage des jeweiligen Orts vorhanden sein sollte. Dazu zählen auch Erkenntnisse zur Tsunamientstehung (*generation*), -ausbreitung (*propagation*) und -überflutung (*inundation*), wie in Kapitel 2 bereits behandelt. Der Erschließung von neuen Bauprojekten in tsunamigefährdeten Gebieten sind landwirtschaftliche Nutzung, Parks und Infrastruktur zu Erholungszwecken vorzuziehen. Zudem sollte in gefährdeten Küstengebieten eine **ingeschränkte oder geringe Bebauungsdichte** (*low density*) angestrebt werden (s. Abb. 3.24 b). Die **Einteilung von Zonen** in Küstennähe ermöglicht den Tsunamiwellen zwischen den Gebäuden entlang zu fließen und **verringert** die Menge von **potentieller Zerstörung durch schwimmenden Schutt** (NTHMP, 2001).

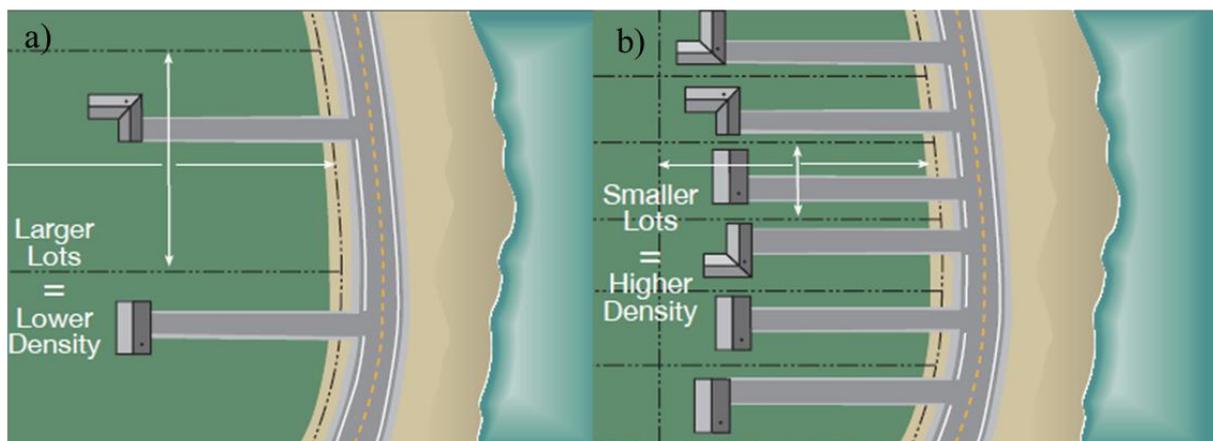


Abb. 3.24: Bebauungsdichte in Küstenstreifen: a) und b) optimale und ungünstige Häuseranordnung (ATEP, 2006-2010)

Das Überflutungsmaß in tsunamigefährdeten Küstengebieten auf Gebäudekonstruktionen soll **vermieden, verlangsamt, gelenkt** oder **blockiert** werden (s. Abb. 3.25). Wenn diese Maßnahmen nicht praxisnah umsetzbar sind, beispielsweise aufgrund von vorhandener Bebauung, oder gewollt sind, sollten ergänzende Techniken in Erwägung gezogen werden: Dazu zählen Einhaltung von maximalem Abstand zwischen den Gebäuden, sowie strategisches Platzieren von Gebäudekonstruktionen hinter schützenden massiveren Konstruktionen oder beispielsweise Küstenwäldern (NTHMP, 2001).

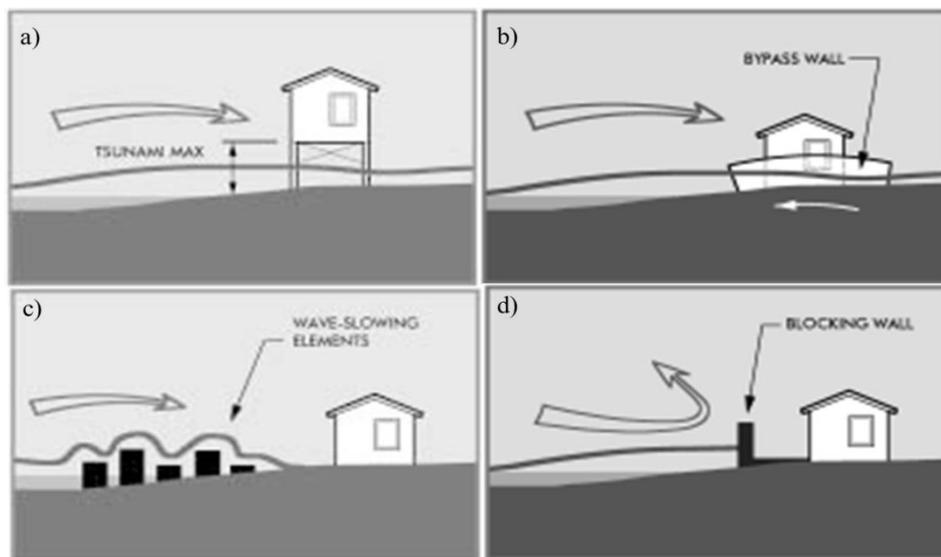


Abb. 3.25: Verringerung des Tsunamirisikos: a) vermeiden, b) lenken, c) verlangsamen, d) blocken (NTHMP, 2001).

Die Wahl von geeigneten **baulichen Maßnahmen** (s. Abb. 3.26), Größe, Form sowie Ausrichtung der Gebäude hängt nicht zuletzt von der geografischen Lage und Häufigkeit der Tsunamigefahr ab. Allgemein gelten in den USA die herausgegebenen Uniform Building Codes (UBC), wohingegen in Honolulu besondere Regelungen gelten. Das FEMA P-55 „Coastal Construction Manual“ gilt ebenfalls als Leitfaden für Architekten und Ingenieure. Existierende Strukturen sollten zudem durch Nachrüstung und Sanierung geschützt werden.

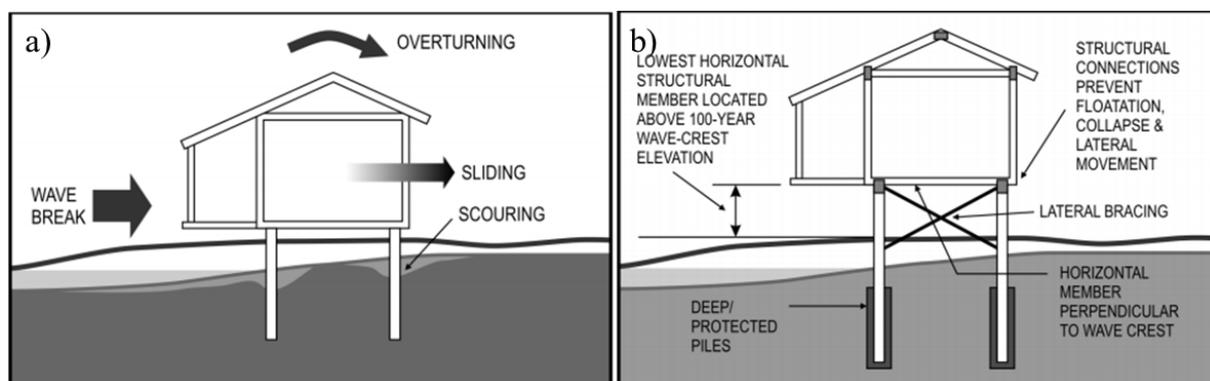


Abb. 3.26: Bauliche Maßnahmen (NTHMP, 2001): a) und b) Konstruktionen um Schäden durch Tsunamieinwirkung zu minimieren, c) horizontale und vertikale Evakuierung

Beim Entwurf von Hotels ist zu beachten, dass die unteren Räumlichkeiten nur zur öffentlichen Verwendung, z.B. Empfangshalle und zu Parkzwecken genutzt werden sollten, während Zimmer und Tagungsräume ausschließlich in den oberen Etagen anzuordnen sind.

Industrieanlagen, Feuerwehr, Krankenhaus, Umspannwerke und andere ebenfalls **kritische Infrastrukturen** sind **außerhalb von Überflutungszonen** zu errichten. Abb. 3.27 zeigt exemplarisch die Umstrukturierung der Küste auf Hilo, Hawaii, die bereits 1974 verabschiedet wurde.

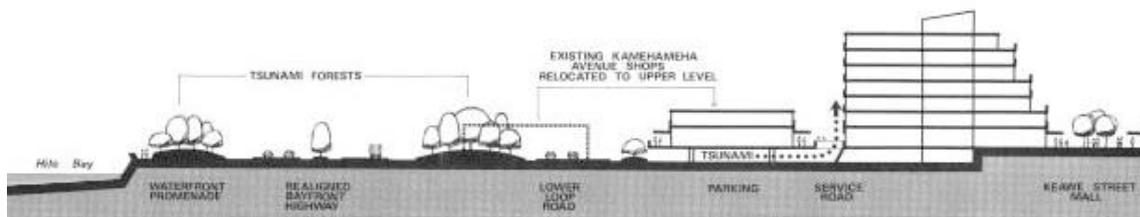


Abb. 3.27: Schnitt durch den unteren Bebauungsbereich von Hilo, Hawaii (NTHMP, 2001)

Generell sind Gebäude, die um 45 °C gedreht zum Wasser zeigen sicherer, als solche deren komplette Wandfläche Angriffspunkt für die Tsunamiwellen bieten (Internetquelle 34). FEMA-P646 (2008) empfiehlt bei einem Konstruktionsbeispiel einer Turnhalle vor dem eigentlichen Gebäude, ein zur Küste diagonal angeordnetes Rampensystem hinzuzufügen, damit Schutt und Tsunamiströmung nicht das Gebäude gefährden (s. Abb. 3.28).

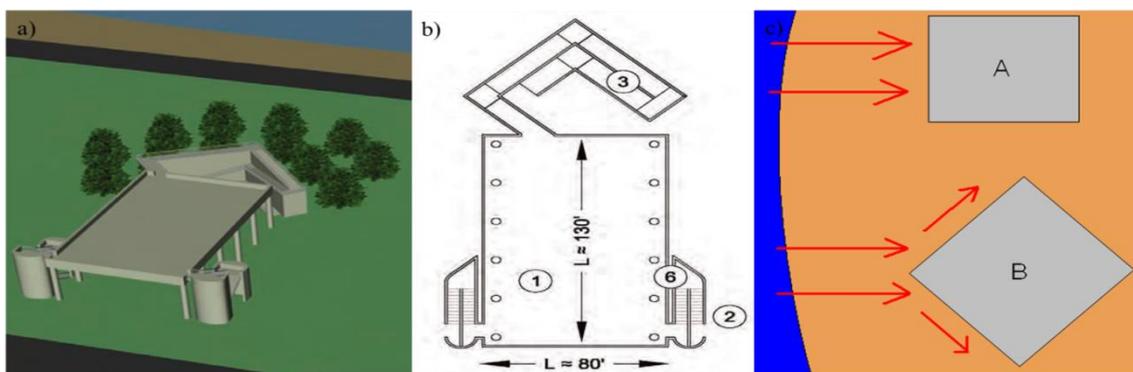


Abb. 3.28: Ausrichtung zur Küste: a) und b) Design einer Turnhalle (FEMA-P646, 2008), c) theoretisches Modell (Internetquelle 34).

Zudem muss zur Verringerung der Zerstörung darauf geachtet werden, dass die Tsunamiwellen bei küstennaher Bebauung an den Gebäuden vorbeifließen können und nicht durch die Gebäude blockiert werden (Budiarjo, 2006). Die **Orientierung** und **Anordnung** von Gebäuden ist ebenfalls von Bedeutung, da Gebäude stärker beschädigt werden, die bei einem senkrechten Tsunamiaufrall die größere Angriffsfläche bieten (s. Abb. 3.29 b). Gebäude erleiden deutlich weniger Schäden, wenn sie in Fließrichtung des Wassers in einer Flucht ausgerichtet sind und den Tsunamiwellen eine möglichst geringe Angriffsfläche bieten (s. Abb. 3.29 a),

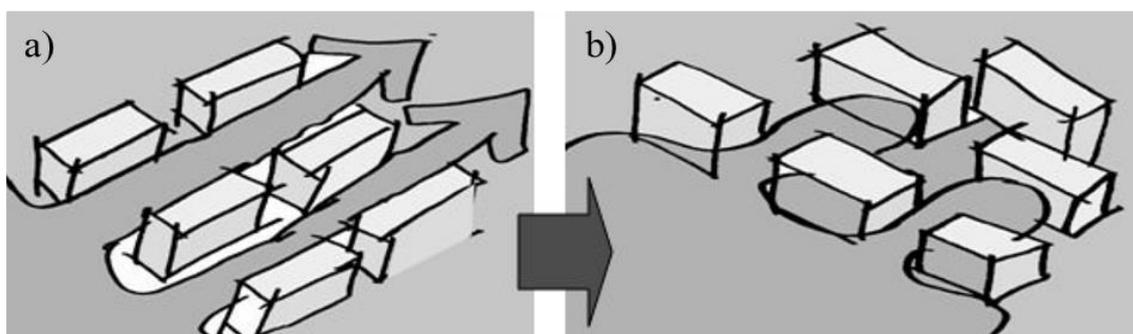


Abb. 3.29: Richtige Anordnung von Gebäuden ermöglicht den Tsunamiwellen an Gebäuden vorbei zu fließen (Budiarjo, 2006)

Im Dezember 2011 wurde ein **Gesetz zur Entwicklung von „tsunamiresistenten Gemeinden“** verabschiedet. Abb. 3.30 zeigt eine Grafik aus der Gesetzesvorlage des japanischen Ministeriums für Land, Infrastruktur, Transport und Tourismus.

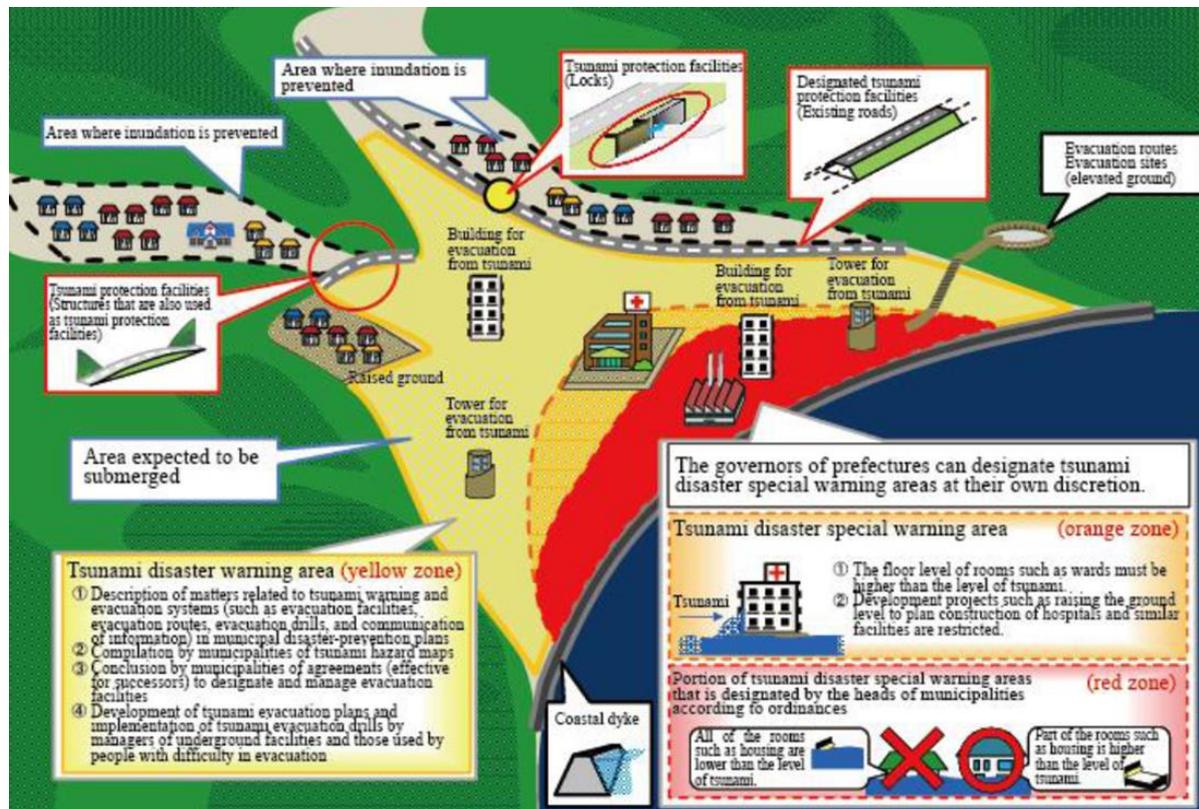


Abb. 3.30: Konzept für die Entwicklung einer tsunamiresistenten Stadt (MLIT, 2011)

Zunächst gibt es ausgehend von der Küste eine Unterteilung in rote, orangene und gelbe Zonen, die durch die zuständige Stadtverwaltung erfolgt. Angefangen mit einer roten Zone, in der keine Gebäude niedriger als das zu erwartende Überflutungslevel gebaut werden sollten. Ebenso sind Evakuierungsgebäude oder -türme sowie Evakuierungsrouten vorzusehen, die zu Anhöhen führen. Im orangenen Bereich gelten beschränkte Erlaubnisse für Entwicklungsprojekte, wie beispielsweise Landaufschüttungen zum Bau eines Krankenhauses.

Der gelbe Bereich kennzeichnet die Überflutzungszone, für die Gefahrenkarten vorliegen sowie ebenfalls Evakuierungsrouten und -gebäude vorzusehen sind. Tidetore, Straßen und Brücken sind so auszuführen, dass sie gleichzeitig als Schutz Einrichtung dienen können. Wohngebiete sollten sich in Arealen befinden, die vor Überflutung geschützt sind.

Im Jahr 2007 wurde die Richtlinie „**After the Tsunami - Sustainable building guidelines for South-East Asia**“ von der UNEP SBCI und SKAT herausgebracht. Die Richtlinie beschreibt u.a. wie Bauwerke gegründet sein sollten und welche Materialien verwendet werden sollten (UNEP & SKAT, 2007).

### 3.3 Stadtplanung

Zunächst wird in Kapitel 3.3.1 auf exemplarische Planungskonzepte des Wiederaufbaus und zur Verbesserung der Baustruktur eingegangen. Anschließend werden in Kapitel 3.3.2 konkreten Konzepte erläutert, die individuell für die jeweilige Stadt entwickelt wurden.

*„Die Stadtplanung beschäftigt sich mit der nachhaltigen städtebaulichen Entwicklung der Städte und Gemeinden und steuert im Rahmen der Bauleitplanung im Wesentlichen die Bodennutzung im Stadt- bzw. Gemeindegebiet. Sie ordnet sowohl die öffentliche als auch die private Bautätigkeit. Dabei sind die sozialen, wirtschaftlichen und umweltschützenden Anforderungen in Einklang zu bringen. Sie erstellt Planungskonzepte unter Abwägung öffentlicher und privater Belange mit dem Ziel der Konfliktminimierung.“* (Internetquelle 35)

#### 3.3.1 exemplarische Stadtplanungskonzepte

Zunächst wird detailliert auf Stadtplanungskonzepte zum Wiederaufbau von Japan erläutert. Anschließend werden Umstrukturierungspläne für Chile betrachtet. Auf Änderungen der Stadtplanungskonzepte in Indonesien und Sri Lanka wird eingegangen.

Nachdem in **Japan** die Küstenschutzmaßnahmen vor 2011 hauptsächlich auf Ufermauern und Wellenbrechern konzentriert waren und teilweise direkt anschließend daran gebaut wurde sehen die neuen Konzepte der Städte Rikuzentakata und Otsuchi Erhöhungen und weniger ufernahe Bebauung vor. Zudem werden alternative Forschungsergebnisse wie Küstenwälder berücksichtigt. Eine Aufstockung der Ufermauern wurde ebenfalls verabschiedet.

Abb. 3.31 zeigt exemplarisch das Konzept der Umsiedelung von Wohngebäuden auf erhöhte Gebiete ins Landesinnere; entfernt von den betroffenen Küstengebieten. In Japan sind von dieser Maßnahme insgesamt mehr als 224 Bezirke betroffen (Internetquelle 36).

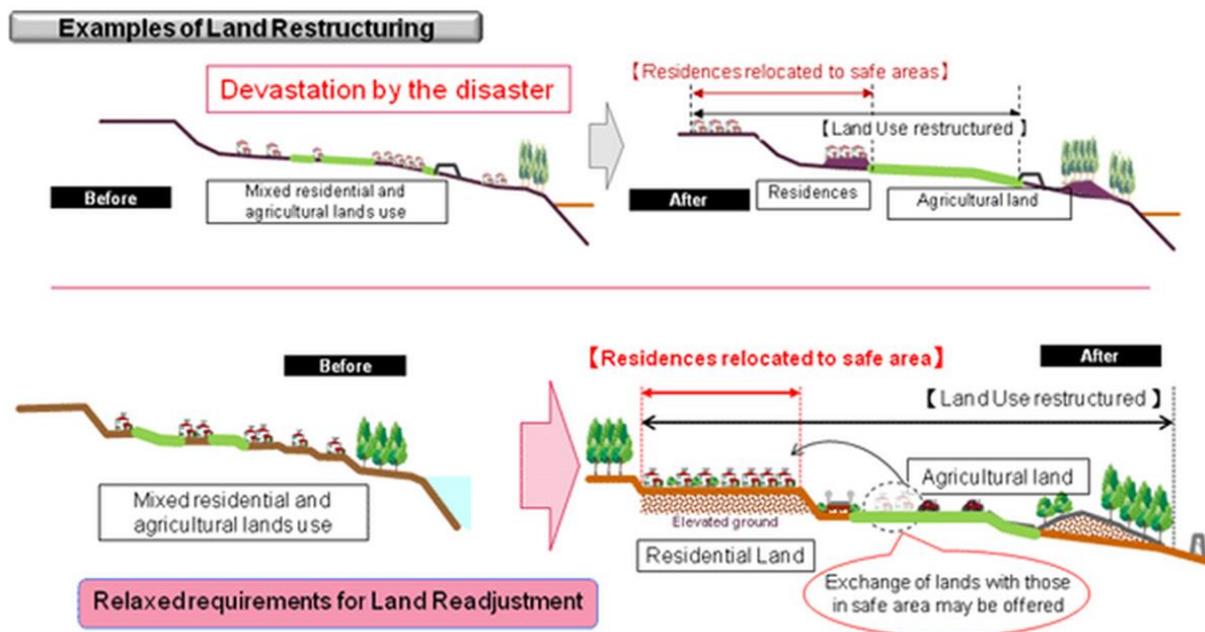


Abb. 3.31: Umstrukturierungsbeispiel (Internetquelle 36)

Die **Präfektur Iwate** (2011) hat einen allgemeinen Basisplan zum Wiederaufbau veröffentlicht, indem u.a. 4 Schadensarten anhand ihres Schadensgrades und ihrer jeweiligen Landnutzung klassifiziert wurden. Anhand dieser Klassifizierung wurden 3 Strategien zum Wiederaufbau entwickelt: Stadterneuerung (*urban regeneration*), Wiederaufbau (*urban rebuilding*), sowie Umsiedlung (*settlement relocation*) bzw. interne Siedlungsumstrukturierung (*internal settlement restructuring*).

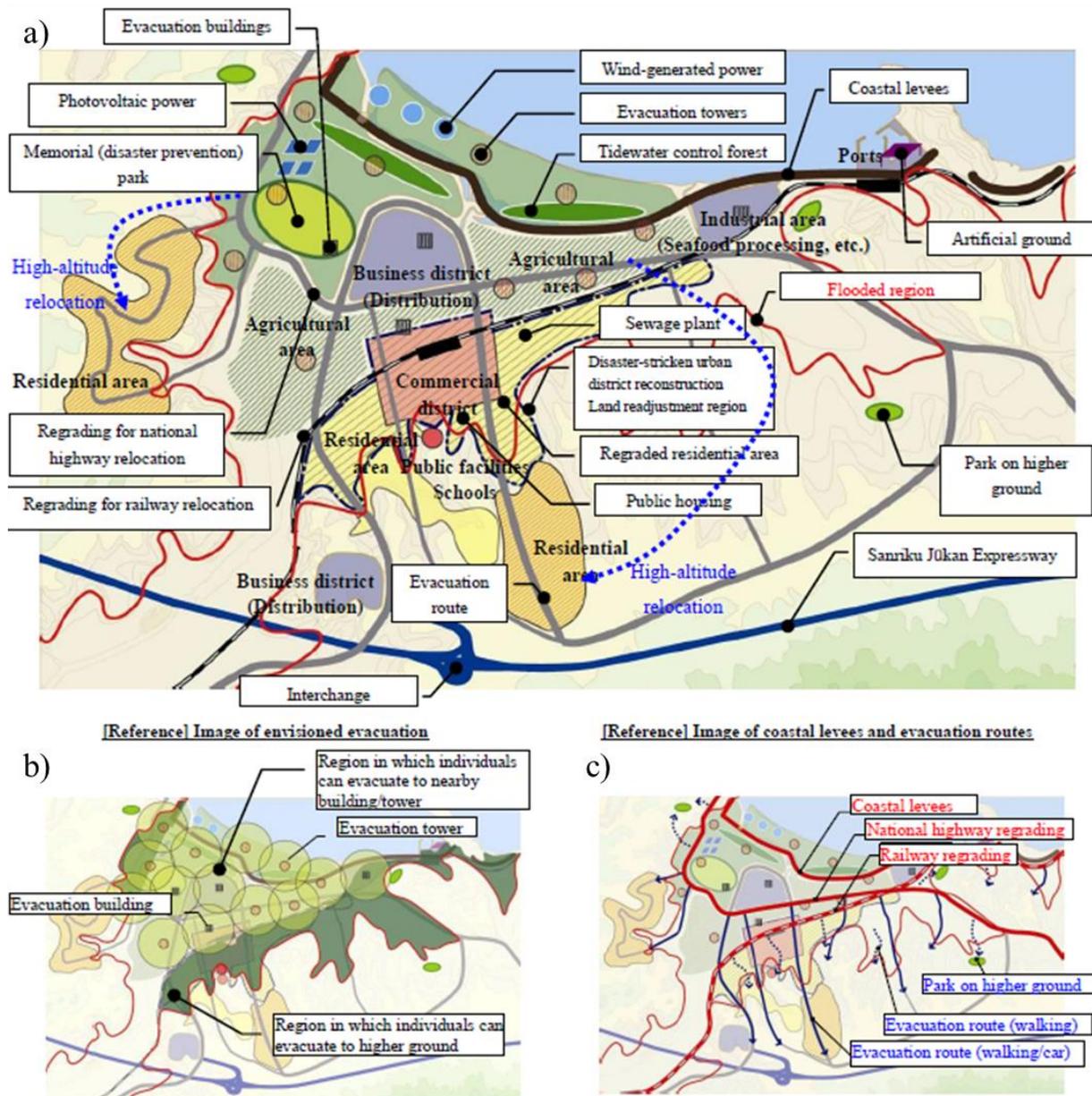


Abb. 3.32: Stadterneuerung (urban regeneration): a) Überblick und Anordnung der einzelnen Nutzungssektoren, b) vorstellbare Evakuierungsmöglichkeiten, c) Küstendämme und Evakuierungsrouten (Iwate Prefecture, 2011)

Das Konzept der **Stadterneuerung (urban regeneration)** umfasste eine komplette Neuplanung der Stadt, da die Schäden von Wohngebieten über Industrieviertel und öffentliche Plätze reichen. Bei den neuen Konzepten sollte beachtet werden, dass diese Anlagen künftig auf An-

höhen oder erhöhter natürlicher Topographie platziert werden und sich nicht zu dicht in Küstennähe befinden. Einrichtungen, die mit Fischfang in Zusammenhang stehen und zwingend erforderlich sind, sollten wieder in Küstennähe platziert. Pufferzonen sollten innerhalb der Überflutungszonen geschaffen werden und als landwirtschaftlichen Zonen oder Geschäftsviertel Verwendung finden. Abb. 3.32 veranschaulicht eine denkbare Stadterneuerung.

Ein **Wiederaufbau** (*urban rebuilding*) ist dann sinnvoll, wenn grundlegende Infrastruktur noch vorhanden ist. Dazu zählen vor allem Industrie- und Gewerbegebiete als auch Geschäftsviertel. Eine Verbesserung der vorhandenen Strukturen soll durch neue Küstenschutzmaßnahmen erfolgen. Im Gegensatz zur kompletten Neuplanung umfasst das überflutete Gebiet deutlich weniger Raum, weshalb von einer grundlegend neuen Aufteilung einzelner Sektoren abgesehen werden kann (s. Abb. 3.33).

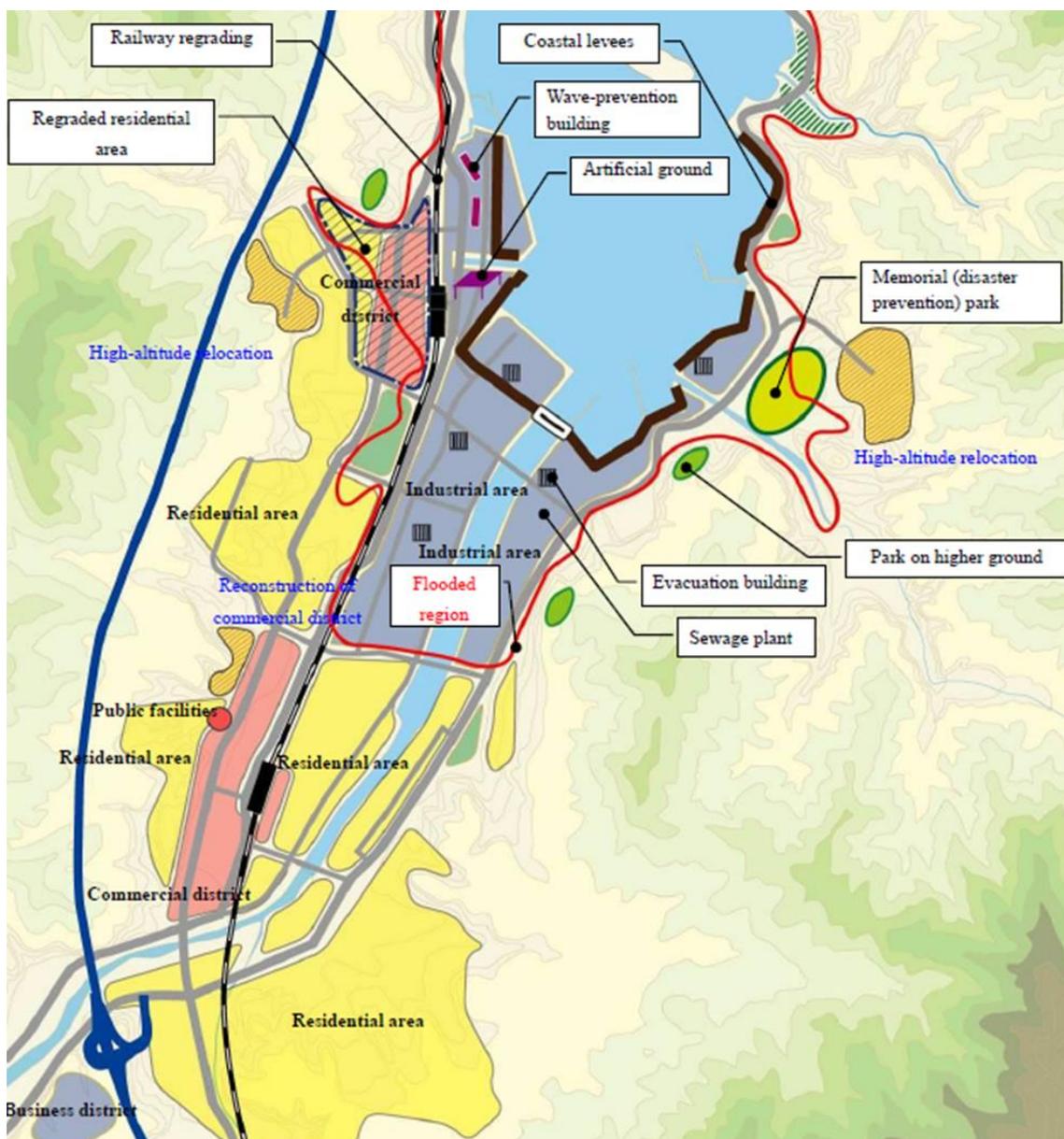


Abb. 3.33: Wiederaufbau (*urban rebuilding*)

Das Konzept der **Umsiedelung** (*settlement relocation*) oder **interne Siedlungsumstrukturierung** (*internal settlement restructuring*) greift, wenn viele Siedlungen in Küstennähe liegen, die teilweise oder komplett zerstört wurden. Als Maßnahme ist eine Umsiedelung auf erhöhten Grund oder erhöhter natürlicher Topographie erforderlich. Neue Infrastruktur in Form von Straßen und der Trennung von Wohnsiedlungen und Geschäftsvierteln sind nötig.

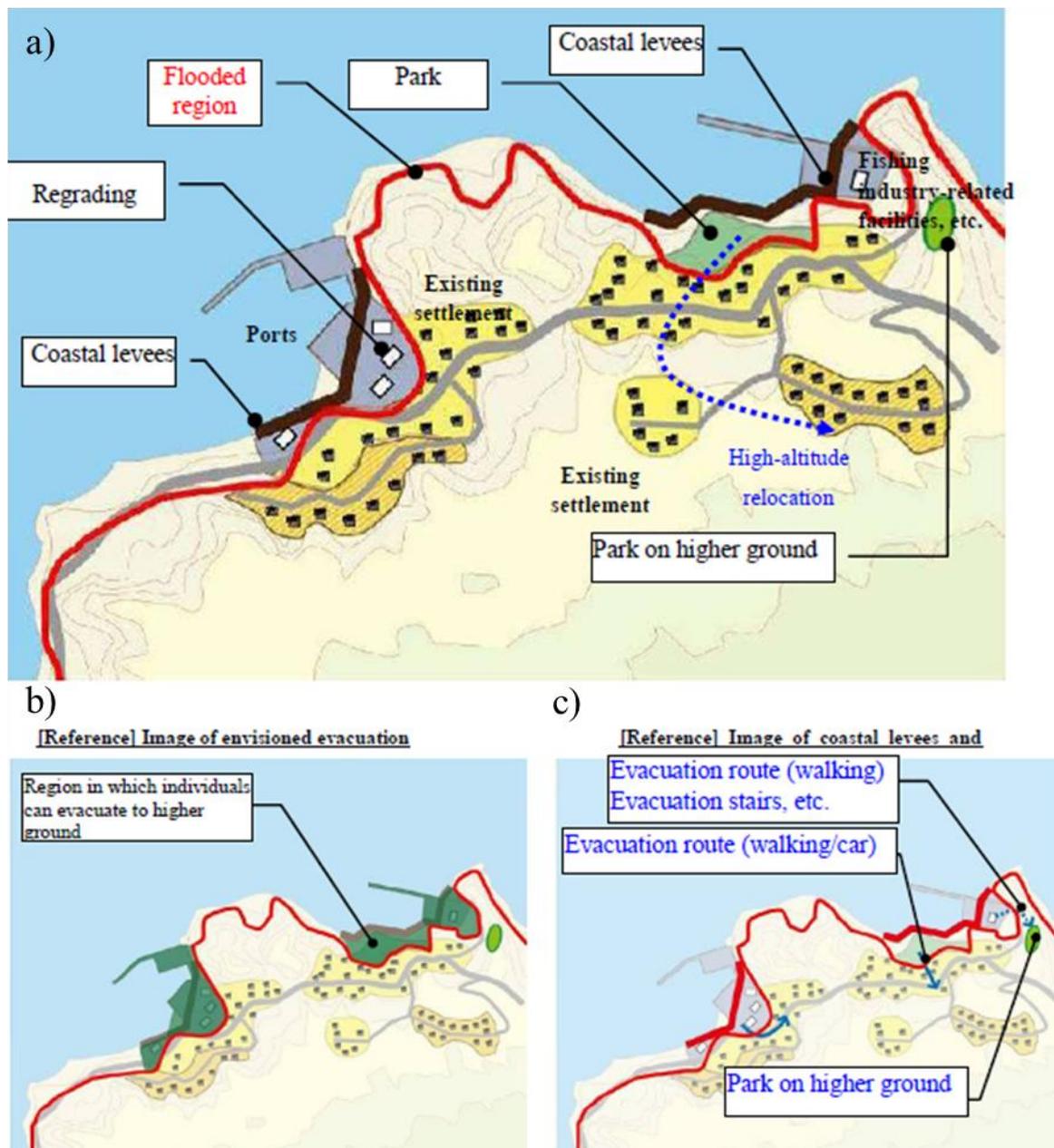


Abb. 3.34: Umsiedelung (*settlement relocation*) oder interne Siedlungsumstrukturierung (*internal settlement restructuring*): a) vorhandene Siedlungen, b) vorstellbare Evakuierungsmöglichkeiten, c) Küstendämme und Evakuierungsrouten (Iwate Prefecture, 2011)

In Kapitel 3.2 wurde bereits beschrieben, dass bei Bebauung in Küstennähe sowohl Orientierung, als auch Anordnung der Gebäude entscheidend sind um Schäden zu minimieren. Unter diesem Aspekt berücksichtigt das nachfolgende neue

Stadtplanungskonzept für **Chile**, dass das Wasser unterhalb der angeordneten Wohnblöcke durchfließen kann. In Abb. 3.35 a ist ein Ausschnitt der vorhandenen Bebauung und dem verbesserten Konzept Abb. 3.35 b gegeben.

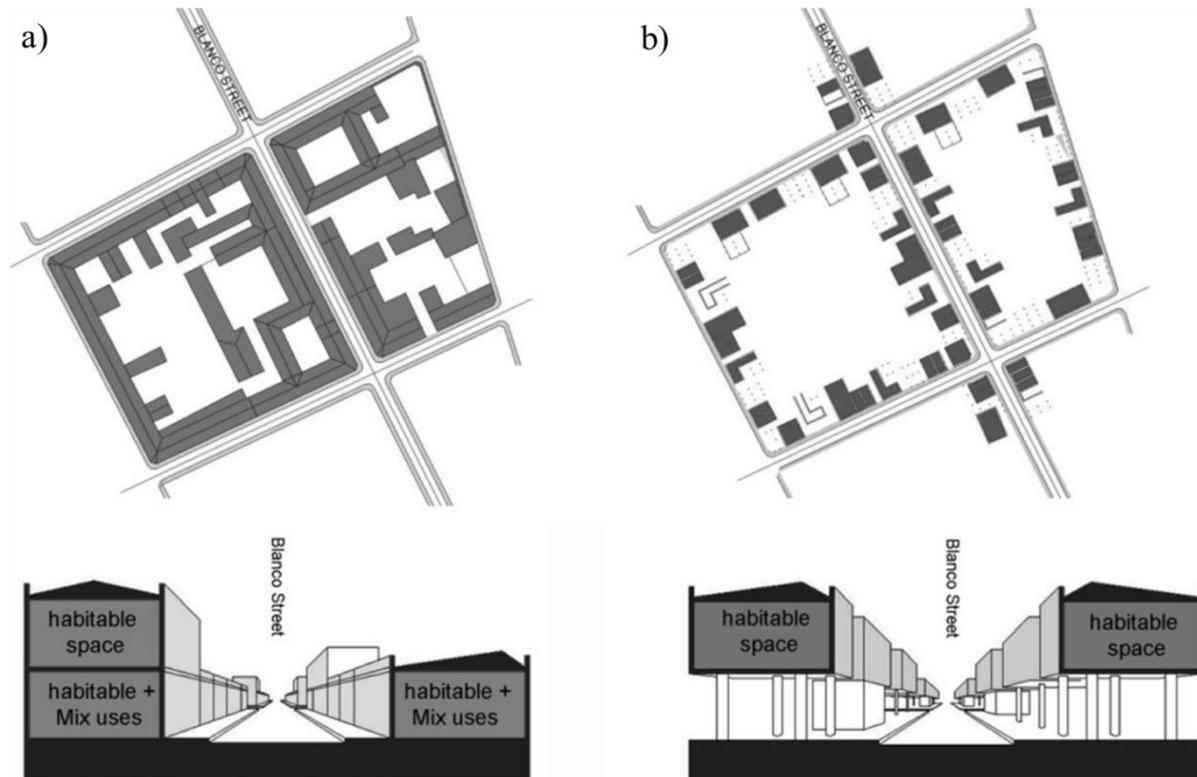


Abb. 3.35: Stadtplanung in Chile (Costa, 2011): a) vorhandene Bebauung, b) verbessertes Konzept

Aus Sicherheitsgründen sieht das neue Konzept keine Wohnraumnutzung im Erdgeschoss vor und eine Beschränkung der durchgehenden Fassadenelemente. Durch die vorgesehenen Öffnungen im Erdgeschossbereich und Distanzen zwischen den Gebäuden soll der Einsturz von Gebäuden vermieden und die Zerstörung durch schwimmendem Schutt minimiert werden. Um den Charakter der Stadt beizubehalten wird die örtliche Architektur im Planungskonzept aufgegriffen und die vorhandenen Bauwerke integriert.

Die nachfolgende Abbildung stellt die Nutzung des Küstengebiets vor dem Tsunami 2010 (Abb. 3.36 a) mit den neuen Stadtplanungskonzepten (Abb. 3.36 b und c) gegenüber. In dem Stadtplanungskonzept sind für die Gebäude Höhen von 3 bis 4 Etagen vorgesehen, je nach Distanz zur Küste. Trotz der zu erwartenden Minimierung der Schäden an Gebäuden sollten vertikale Evakuierungsmöglichkeiten vorgesehen werden.

Konzepte zur Umstrukturierung der Küstenzone wurden bereits nach dem Tsunami 2004 für **Banda Aceh, Indonesien** entwickelt. Im Wasser sollen zunächst die angeordneten Wellenbrecher die Wellenenergie verringern. Es folgen Ufermauern an die unmittelbar eine begrünte Küstenzone aus Mangroven und Palmen grenzt. In dem ehemaligen Wohngebiet sollen neben Evakuierungstürmen und -gebäuden auch wieder die Wohnhäuser jener Bewohner angeordnet werden, die an die Küste zurückkehren wollen (s. Abb. 3.37).

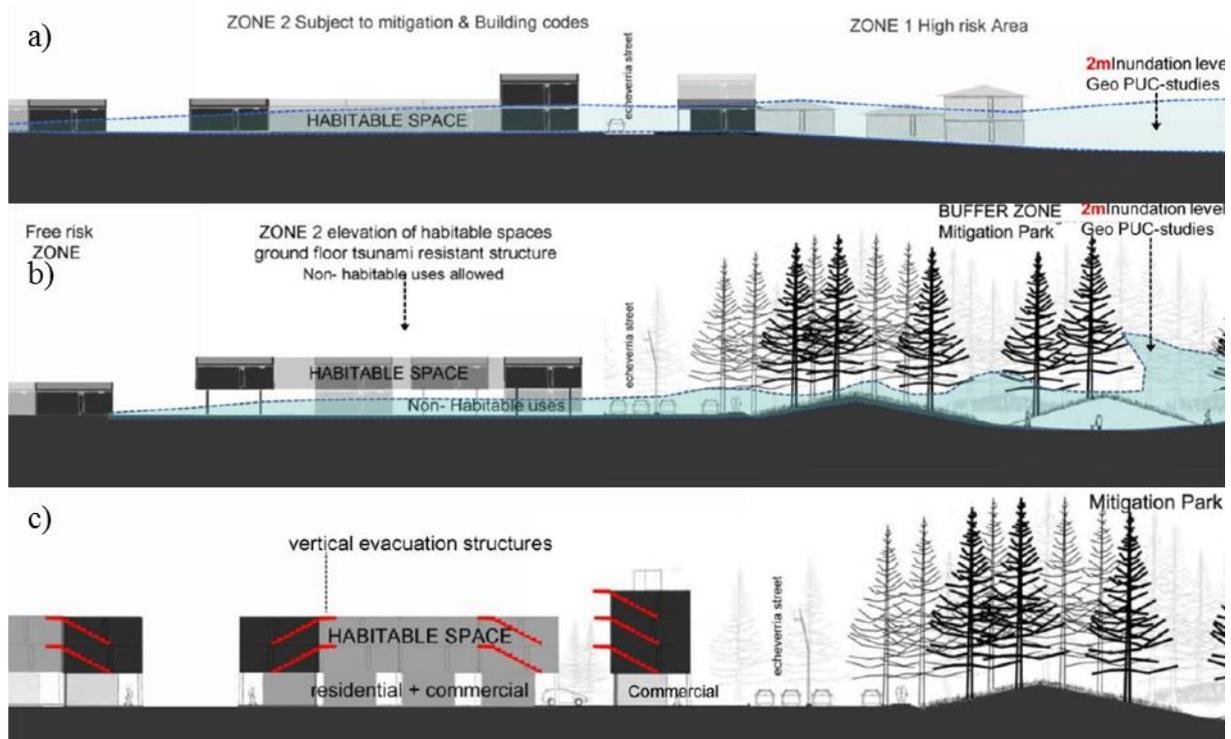


Abb. 3.36: Stadtplanung in Chile (Costa, 2011): a) altes Konzept, b) und c) neues Konzept

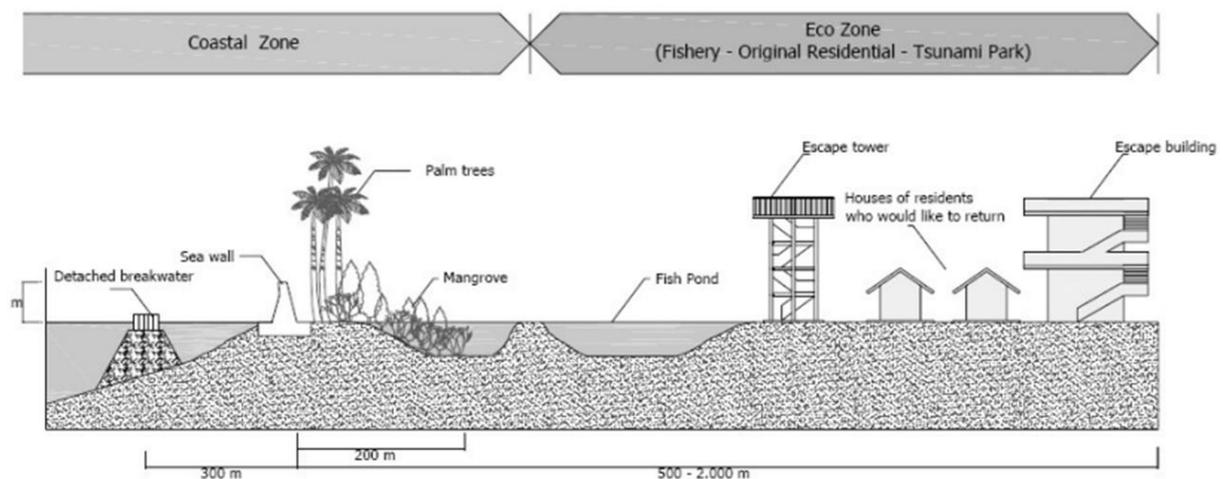


Abb. 3.37: Stadtplanung in Banda Aceh, Indonesien (Budiarjo, 2006)

In **Sri Lanka** wurde nach 2004 veranlasst, dass aus Sicherheitsbelangen ein Küstenstreifen von 100 m bis 200 m Breite nicht durch Neubauten bebaut oder zum Wiederaufbau von Gebäuden verwendet werden darf. Große touristische Anlagen wurden jedoch von der Regelung befreit, sodass diese Maßnahme letztendlich lediglich benachteiligend für die Bevölkerung war, der durch das Verbot der Wiederansiedlung die Lebensgrundlage genommen wurde (Brückner & Brill, 2009).

### 3.3.2 konkrete Planungskonzepte für die Städte Otsuchi und Rikuzentakata

Im Folgenden wird auf die Planungskonzepte für die Städte **Otsuchi** und **Rikuzentakata** vorgestellt. Es wird ebenso auf Wohngebäude in **Otanabe Port** und **Taro** eingegangen, die den Tsunami überstanden haben.

Die Wiederaufbaupläne für **Otsuchi** sehen vor, die Stadt von Grund auf durch Aufschüttungen, ein neues Zentrum, Straßen und Wohngebiete wieder aufzubauen. Bereits im September 2011 wurde im Bürgerinformationszentrum der Stadt Otsuchi ein 3D Abspann gezeigt, wie das künftige Stadtbild aussehen soll. Durch den Tsunami wurden 3700 Häuser komplett oder teilweise zerstört. Abb. 3.38 zeigt anschaulich die Erhöhung der Wohngebiete und neue Strukturierung der Stadt. Die hellblauen Flächen kennzeichnen Gebiete für den Fischereibetrieb (Internetquelle 37).

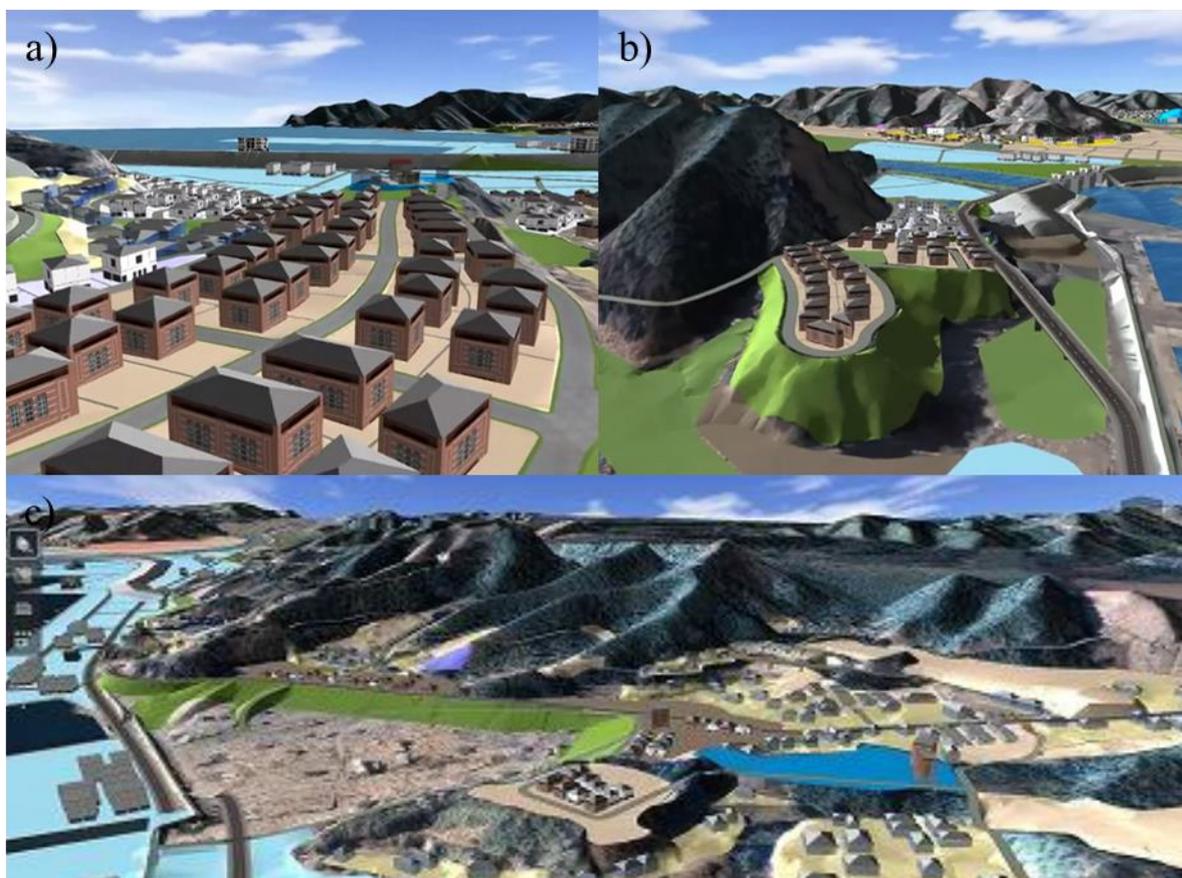


Abb. 3.38: Wiederaufbaupläne der Stadt Otsuchi (Internetquelle 37)

Insgesamt wurden in **Rikuzentakata** 3.159 Gebäude komplett zerstört, 182 mäßig zerstört, und 27 als teilweise beschädigt verzeichnet. Abb. 3.39 zeigt eine Grafik zum Wiederaufbau der Stadt. Häuser in erhöhten Gebieten sind gelb markiert, lila steht für neue Industrie und die orange Markierung zeigt den geplanten neuen Stadtkern (Häuser, Industrie, öffentliche Einrichtungen). In brauner Farbe ist das vorgesehene Gebiet für öffentliche Einrichtungen, in grün die Erneuerung der Natur dargestellt. Die hellblauen Rechtecke stehen für den Schienen-

verkehr und die breiten gestrichelten Linien für den Ausbau von Straßen (Inagaki & Saito, 2012).



Abb. 3.39: Wiederaufbaupläne der Stadt Rikuzentakata, Iwate (Inagaki & Saito, 2012)

In **Rikuzentakata** gab es vor allem Meinungsverschiedenheiten zwischen den öffentlichen Instanzen und der Bevölkerung in welcher Form der Wiederaufbau erfolgen soll: Während die Vertreter der Stadt eine Erhöhung der Ufermauern und Wohngebiete bevorzugten, hielten die Bewohner eine Erhöhung für nicht notwendig. Sie hätten lieber ihre alten Grundstücke behalten (s. Abb. 3.40).

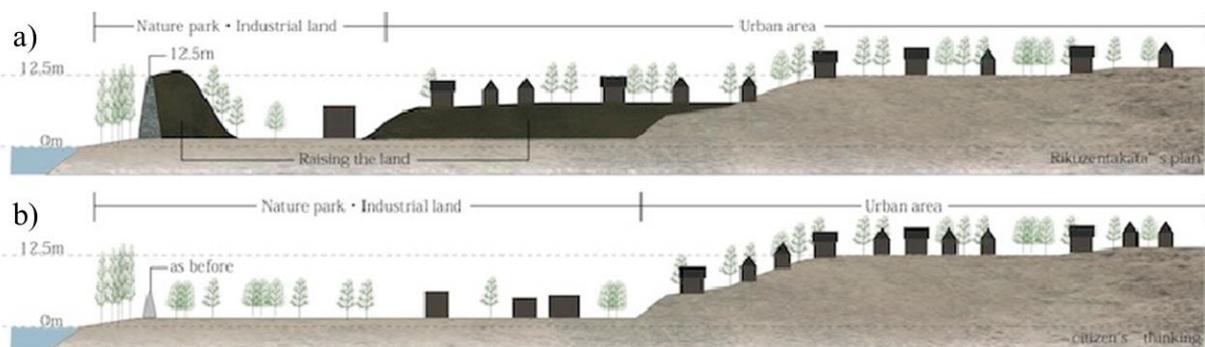


Abb. 3.40: Schnitt durch die Küstenzone Rikuzentakatas: a) Vorstellung der Regierung, b) Vorstellung der Bürger (Inagaki & Saito, 2012)

Häuser in **Otanabe Port** haben den Tsunami 2011 hinter Ufermauern überstanden (s. Abb. 3.41 b), die deutlich höher waren als in anderen Küstenstädten, ebenso wie Wohnhäuser in

Taro (s. Abb. 3.41 a), die in erhöhtem Gelände errichtet wurden. Die Pfeile zeigen auf die Überreste der Grundmauern von ehemaligen Wohnhäusern. Abb. 3.42 zeigt erhöht liegende Wohngebäude in **Taro**. Diese Häuser haben den Tsunami aufgrund ihrer Lage in erhöhtem Gelände überstanden. Deutlich erkennbar sind die engen Wege zwischen den Gebäuden und die recht willkürliche Ausrichtung. Diese Voraussetzungen sind bei einer Evakuierung unvorteilhaft, da die schmalen Wege nicht von vielen Menschen zum gleichen Zeitpunkt passiert werden können.

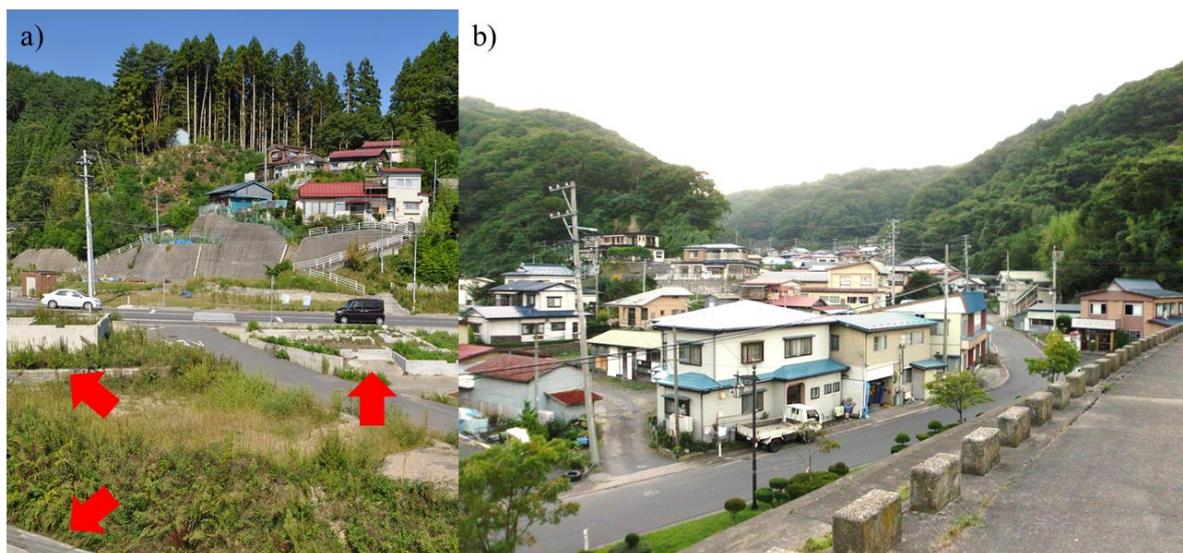


Abb. 3.41: Wohnhäuser, die dem Tsunami standgehalten haben: a) Taro, Japan (Dank an A. Strusińska-Correia, b) Otanabe Port, Japan



Abb. 3.42: schmale Gassen zwischen Wohnhäusern in Taro, Japan (Dank an A. Strusińska-Correia)

### 3.4 Wiederaufbau

Die wörtliche Übersetzung von Wiederaufbau lautet „Wiedererrichtung von Zerstörtem“ (Internetquelle 38). Dieses Kapitel zeigt einige exemplarische Beispiele für den Wiederaufbau nach den Tsunamis der Jahre 2004 und 2011. In Japan wird ein Großteil der Wohnhäuser im Zuge des Wiederaufbaus nach den Konzeptvorlagen öffentlicher Instanzen saniert oder neu erbaut. Viele Projekte zum Wiederaufbau von Thailand, Indonesien, Indien und Sri Lanka werden durch gemeinnützige Organisationen, sogenannte NGOs, realisiert, deren vorrangiges Ziel es ist den Menschen überhaupt erst wieder einen eigenen Wohnsitz zu ermöglichen. Boen (2006) beschreibt, dass die NGOs im Allgemeinen eine Firma mit dem Wiederaufbau der Häuser beauftragen und Kapitalgeber sind. Der Einkauf von Material und die Einstellung von Bauarbeitern werden dann meist von den Begünstigten bewerkstelligt, in einigen Fällen wird das Material von den Organisationen gestellt. Resümierend stellt Boen (2006) fest, dass viele beratende Einrichtungen nicht daran interessiert sind Erdbeben- und Tsunamisichere Häuser zu bauen. Auf den meisten Baustellen würden die Pläne fehlen nachdenen Bauarbeiter und Begünstigte arbeiten können. Daraus resultieren Baufehler an der Gesamtkonstruktion. Insgesamt würde das vorhandenen Fachwissen zudem nicht ausreichen ein tsunamisicheres Wohnhaus zu bauen. Nachfolgend werden einige Bilder des Wiederaufbaus gezeigt.

Abb. 3.43 zeigt die Sanierung eines Wohngebäudes in Arari der Präfektur Shizuoka in **Japan**. Durch den Tsunami wurden große Steine, Treibholz und Sediment unter den Boden des Hauses gespült (Internetquelle 39).



Abb. 3.43: Sanierung eines Wohnhauses in Arari der Präfektur Shizuoka (Internetquelle 39)

In den Städten Panichankerni und Thiraimadu in **Sri Lanka** wurde der Wiederaufbau von 130 bzw. 100 Häusern von der Organisation SKAT initiiert (Internetquelle 40). Durch die Organisation SDC wurde der Wiederaufbau von 3.341 total zerstörten und 7.288 teilweise zerstörten Gebäuden in Sri Lanka im Dezember 2007 erfolgreich abgeschlossen. Die Häuser durften von

den Bewohnern nach eigenen Wünschen wiederaufgebaut werden. Die Zuschüsse betragen 1.000 \$ für teilweise zerstörte und 2.500 \$ für total zerstörte Gebäude (Internetquelle 41).



Abb. 3.44: Beispiele für wiederaufgebaute Wohnhäuser in Sri Lanka (Internetquelle 41)

In Karaikal Pondicherry, **Indien** wurde ein ganzes Dorf wiederaufgebaut (s. Abb. 3.45). Das Konzept wurde zusammen mit den künftigen Bewohnern entwickelt und umgesetzt. Es wurden umweltfreundliche Baumaterialien verwendet, die vor Ort hergestellt werden konnten und die Nutzung von Regenwasser für den Hausgebrauch ermöglicht. Die errichteten Gebäude werden zudem als sicher bei Erdbeben, Hochwasser und Zyklonen beschrieben (Swiss Solidarity & Swiss Red Cross, 2008 a).



Abb. 3.45: Wiederaufbau in Karaikal Pondicherry, Indien (Swiss Solidarity & Swiss Red Cross, 2008 a)

Die gleiche gemeinnützige Organisation ist auch in ein Wiederaufbauprojekt in Nagapattinam, Tamil Nadu involviert. Für die Gründung wurde Beton verwendet während das Baumaterial in den Wänden aus Stahlbetonsäulen in Kombination mit Ziegelstein besteht. Das Flachdach ist begehbar und besteht aus einer Betonplatte. Die Kosten pro Haus wurden mit ca. 5.600\$ (~4.200€) angegeben (Swiss Solidarity & Swiss Red Cross, 2008 b).

Die folgende Abb. 3.46 zeigt im Vergleich den Bau eines einfachen Hauses aus Stroh und Bambus, das in Eigenregie in Tamil Nadu, Indien, wiederaufgebaut wird.



Abb. 3.46: Wiederaufbau eines Hauses in Tamil Nadu, Indien (Internetquelle 42)

Durch die Organisation **Habitant Thailand** wurde insgesamt der Bau von 1.469 Häusern in Phang Naga, Phuket, Ranong und Krabi ermöglicht. Durch ein Rückfinanzierungskonzept wurde das Projekt realisiert. Abb. 3.47 zeigt den Wiederaufbau eines Wohnhauses durch Habitant Thailand (Internetquelle 43)



Abb. 3.47: Wiederaufbau eines Wohnhauses in Thailand (Internetquelle 43)

Aufgrund von Umfang und hohem Ausmaß an Zerstörung wurde im Jahr 2005 von der Regierung **Indonesiens** eine besondere Dienststelle, die „Agency for Reconstruction and Rehabilitation in Aceh and Nias“ zur Durchführung des Wiederaufbau eingerichtet. Die Kosten beliefen sich auf ca. 6,5 Mrd. \$, die von Regierung und internationalen NGOs, sowie aus Spenden finanziert wurden (Suppasri, et al., 2012 b). Die Organisation „build change“ beschreibt, dass in Banda Aceh durch Hilfe von lokalen Bauarbeitern 4.200 Häuser wiederaufgebaut wurden. Um eine langzeitige Verbesserung zu erreichen, wurden insgesamt 138 Bauarbeiter und 245 Studenten in erdbebensicheren Bauweisen geschult (Internetquelle 44). Abb. 3.48 zeigt einige Wohngebäude, die in Indonesien wiederaufgebaut wurden.



Abb. 3.48: Wiederaufbau von Wohnhäusern in Indonesien (Internetquelle 44).

### 3.5 Innovative Ideen

In diesem Kapitel werden Ideen und Konzepte vorgestellt, die nicht in direktem Zusammenhang mit dem unmittelbaren Wiederaufbau von zerstörten Städten und Gemeinden zu tun haben. Im Internet mittlerweile einige Ideen und neue Ansätze, die Tsunamischutz bieten sollen. Im Folgenden werden einige Projekte vorgestellt.

Die Projektstudie **Tsunami Evacuation Raised Earth Parks TEREPS** (Internetquelle 45) von Geo Hazards International (GHI) vereint die Idee von alltäglicher Nutzung zu Gemeinschaftszwecken und innovativer **Evakuierungsmaßnahmen**. Das Projekt ist auf Padang im Westen Sumatras, Indonesien bezogen und setzt sich mit den dortigen Problem einer schnell wachsenden Stadt in einem durch Tsunami stark gefährdeten Gebiet auf Meereshöhe weit entfernt von topographischen Anhöhen, auseinander. Die Idee besteht im Bau einer künstlichen Erhöhung deren Größe höher ist als der zu erwartende Tsunami. Im Alltag soll die Fläche Gemeinschaftszwecken dienen. Vorteilhaft sind sowohl die gute Zugänglichkeit und gute Sichtbarkeit im Falle einer Evakuierung, als auch die geringen Baukosten und einfache Umsetzbarkeit mittels lokaler Ressourcen.



Abb. 3.49: Tsunamievakuierungspark (Internetquelle 45)

Das Projekt „**tsunami-safe(r) house**“ stellt in seiner Studie für eine weltweit tätige humanitäre Organisation namens „The Prajnopaya Foundation“, eine alternative Bauweise eines typischen Wohnhauses aus Sri Lanka vor, dessen Baukosten im Vergleich zu traditionellen Häusern gleichwertig oder günstiger sein sollen (s. Abb. 3.50). Statt des traditionellen Grundrisses aus 4 Wänden werden vier Betonblöcke mit Bewehrung angeordnet, die mit der kürzeren Seite zur Küste zeigen um Tsunamiwellen möglichst wenig Angriffsfläche zu bieten. Als Material für das Dach ist Holz und für die Wände, wie bei der traditionellen Bauweise, Bambus- und Ziegelsteinkonstruktionen vorgesehen, obwohl auch die Wiederverwertung von Elementen aus eingestürzten Gebäuden denkbar ist. Als Vorteile werden neben der erhöhten Tsunamisicherheit vor allem die hohe Anpassungsfähigkeit des Gebäudes und die gute Umsetzbarkeit aufgrund des niedrigen Baupreises und des vor Ort vorhandenen Materials genannt. In der

Studie werden zudem verschiedene Konzepte zur Raumnutzung vorgestellt: optional zur Wohnraumnutzung ist eine Verwendung als Kommunikationszentrum vorstellbar (Berrios, et al., 2005).

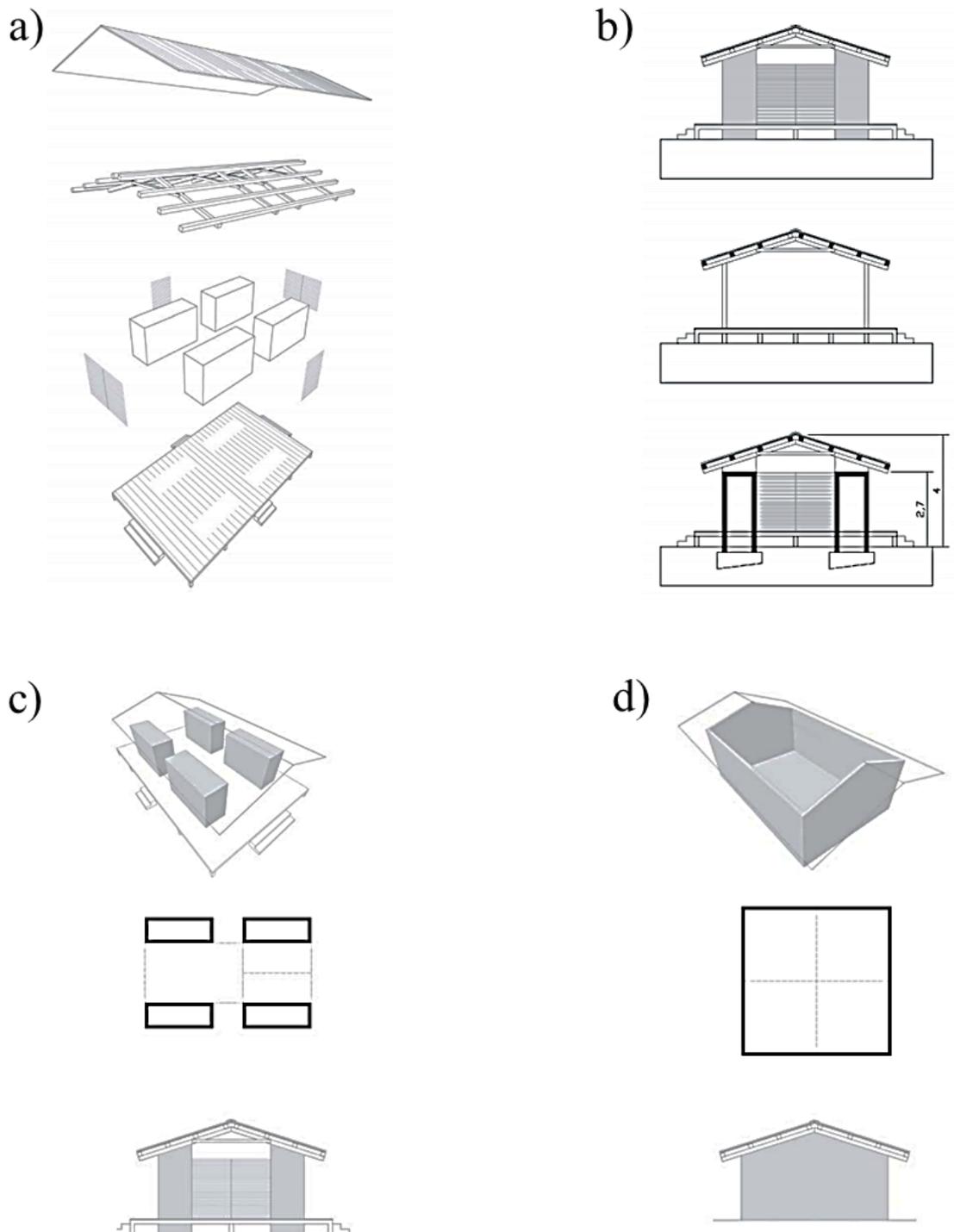


Abb. 3.50: Verbesserte und übliche Bauweise des typischen Küstenhauses in Sri Lanka : a) Aufbau des tsunamiresistenteren Hauses , b) Seitenansicht des tsunamiresistenteren Hauses ,c) Anordnung der bewehrten Betonblöcke des tsunamiresistenteren Hauses, d) typisches Haus in Sri Lanka (Berrios, et al., 2005)

Das Konzept „**Kogami- Tsunami Alert Community**“ von **Ben Devereau** und **Elvira The**, der Universität von Liverpool, Großbritannien, ist der Gewinner des Archiprix 2013 und behandelt thematisch gleich 2 Ansätze: die Rückbildung von natürlichen Korallenriffen zur Verlangsamung von Wellenenergie bei Erreichen des Ufers und gleichzeitig der Verwendung als Baumaterial zur Konstruktion von Zufluchtsorten während eines Tsunamis (Internetquelle 46). Ein Prototyp wurde für Padang, eine Küstenstadt auf der indonesischen Insel Sumatra, entworfen. In Abb. 3.51 wird ein Schnitt durch die entworfene Baukonstruktion dargestellt.

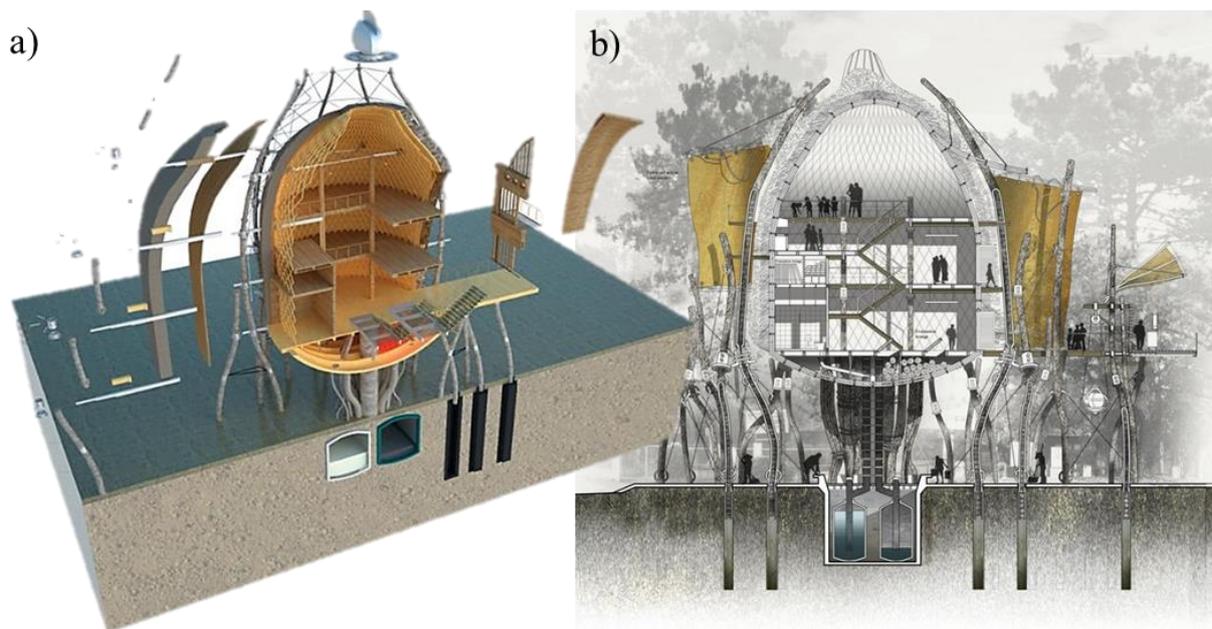


Abb. 3.51: Kogami Projekt: a) und b) Schnitt durch die Konstruktion (Internetquelle 47)

Durch „cathode accretion“ sollen Riffe wiederhergestellt werden, indem Drahtgitter in Meerwasser eingebracht werden, die Gleichstrom ausgesetzt werden, wodurch sich eine Schicht aus Kalziumcarbonat anreichert, die als Baumaterial verwendet werden kann (s. Abb. 3.52 a).

Auf Basis dieser Technik wurde sich die natürliche Struktur der Ökosysteme zu Nutze gemacht und eine Lösung zum Tsunamischutz entwickelt: Die entworfenen Konstruktionen sollen im Alltag als Gesellschaftsmittelpunkt der Bevölkerung fungieren und bei Tsunamigefahr Zuflucht bieten (Internetquelle 48).

Die Projektentwickler stellen die Verwendung natürlicher, widerstandsfähiger Ökologie, von Mangrovenwäldern und Warmwasserkorallen in den Vordergrund und heben die Vorteile der Herstellung, Montage und Wartung vor Ort hervor (Internetquelle 47) (s. Abb. 3.52 b bis e).

„**Tohoku sky village**“ wurde von dem Architekturbüro „**Sako Architects**“ entworfen und verfolgt die Strategie während Naturkatastrophen unabhängig, autarke Bereiche für die Tohoku Region zu schaffen (Abb. 3.53). Diese Bereiche oder Inseln sollen mit der vorhandenen Infrastruktur verbunden werden. Geplant ist, die Inseln vor allem in flachen Gegenden zu bauen, wo keine natürliche erhöhte Topographie vorhanden ist. Die Hügel sollen aus dem reichlich vorhandenen Schutt konstruiert werden. Darauf ist Platz für öffentliche Einrichtungen, Schulen und Freizeiteinrichtungen vorgesehen (Internetquelle 50).

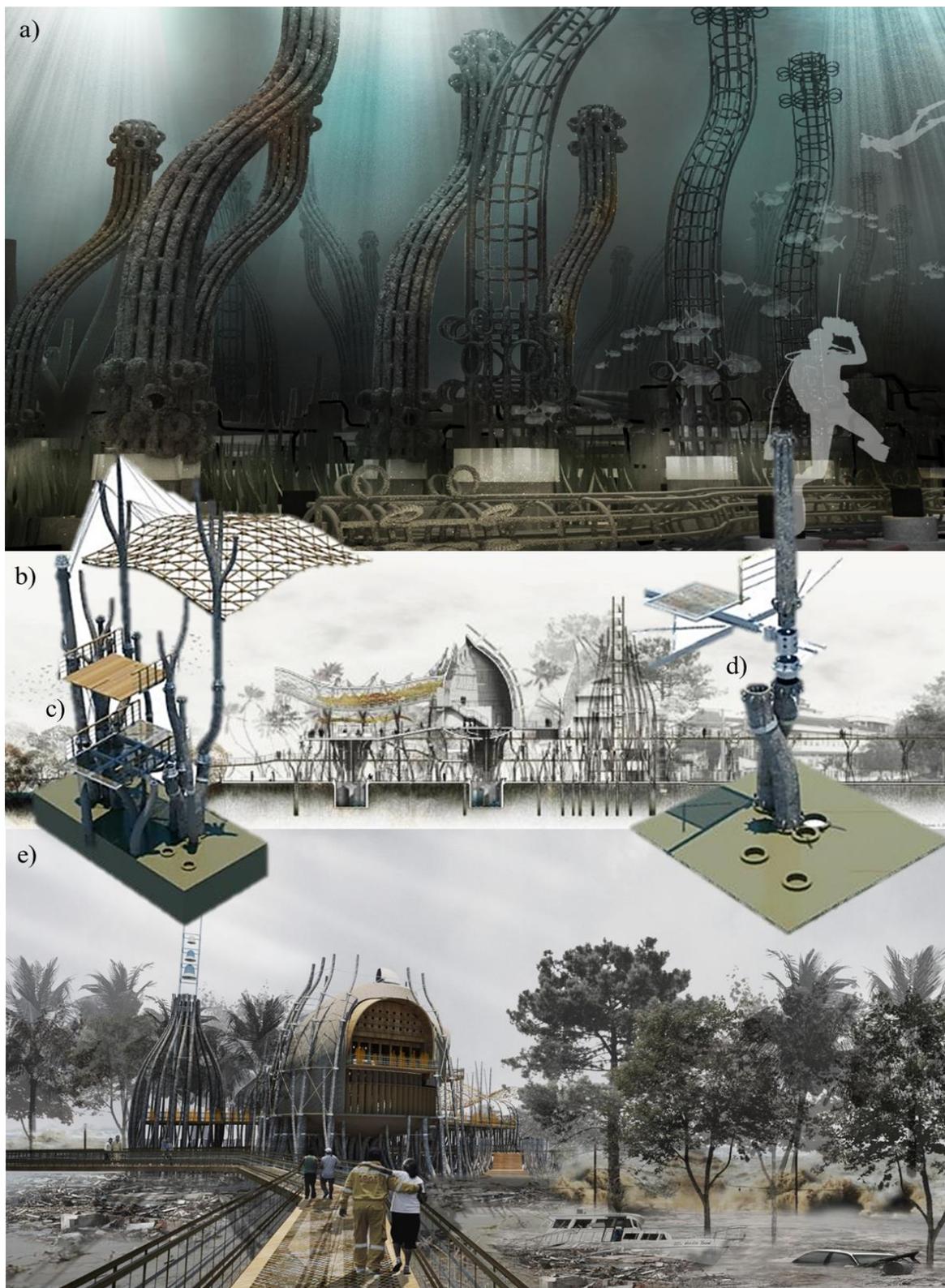


Abb. 3.52: 3D Grafiken des Kogami Projektes: a) Anbau von natürlichen Korallenriffen (Internetquelle 46), b) Seitenansicht der verbundenen Elemente (Internetquelle 49), c) und d) Gründungen der tragenden Konstruktion (Internetquelle 47), e) Wege führen oberhalb der zerstörten Bereiche zu Zufluchtsgebäuden (Internetquelle 46)

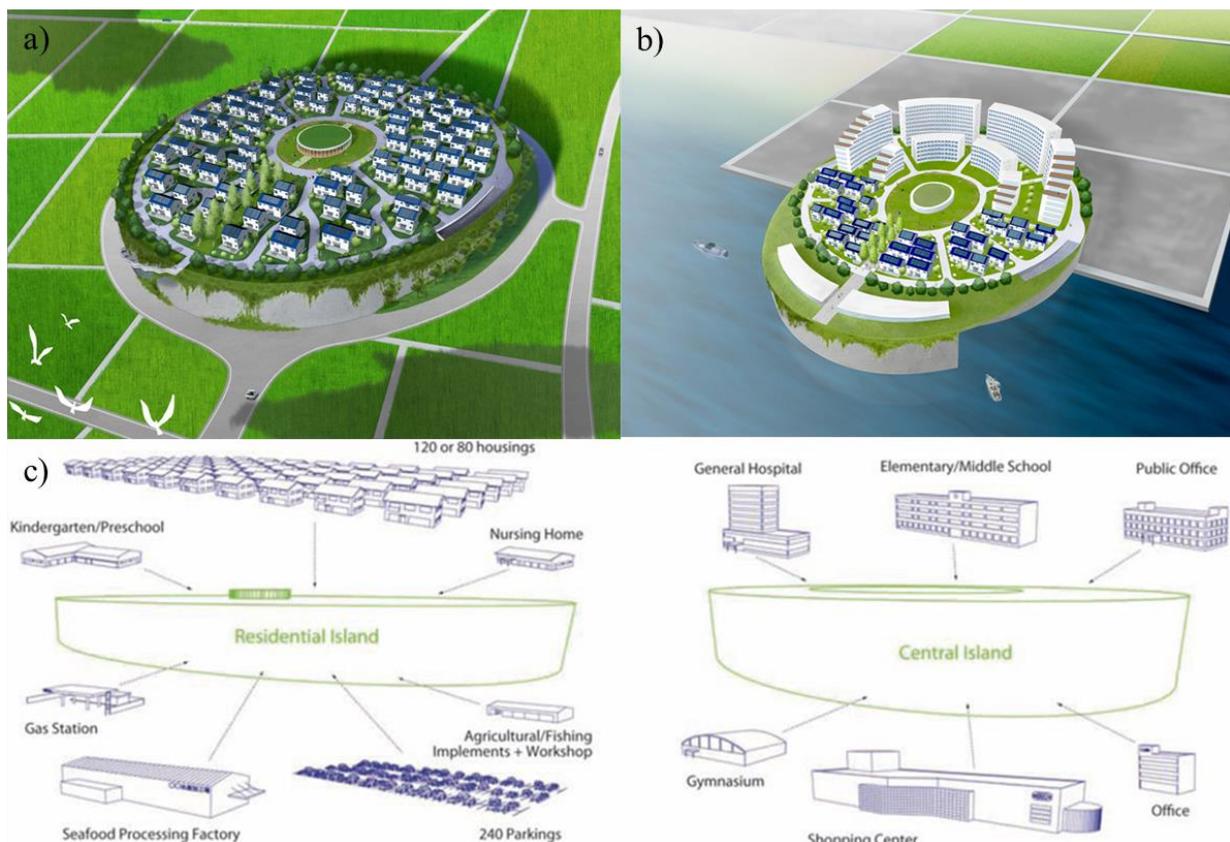


Abb. 3.53: Tohoku sky village: a) Grafik für Konzept von Insel mit Wohngebiet, b) Grafik für Konzept von Insel mit Wohnhäusern, als auch öffentlichen Gebäuden, c) Konzeptskizzen für Insel mit Schwerpunkt auf Wohnhäusern bzw. öffentlichen Gebäuden (Internetquelle 50)

### 3.6 Zusammenfassung

Bei Vergleich der **ortstypischen Wohnhäuser** vor den Tsunamis 2004 und 2011 und den Wohnhäusern die im Zuge des **Wiederaufbaus** errichtet wurden, sind keine grundlegenden Änderungen der jeweils landestypischen Bauweise festzustellen gewesen. In Japan wurden die Häuser wieder aus einem Betonfundament mit einer Holzrahmenbauweise neu errichtet (s. Abb. 3.2 und Abb. 3.3) oder alte Gebäude grundlegend saniert (Abb. 3.43). Das in Abb. 3.4 wiederaufgebaute Haus in Sri Lanka, wirkt von seiner Bauweise und den verwendeten Materialien insgesamt hochwertiger konstruiert, als die zerstörten Überreste der Wohnhäuser in Abb. 3.6. Dennoch kann man von keiner tsunamisicheren Bauweise sprechen, da weder das Fundament erhöht ist, noch verstärkende Bewehrung zu erkennen ist. Die in Kapitel 3.4 vorgestellten Bauweisen Thailands, Indonesiens, Indiens und Sri Lankas wurden größtenteils durch gemeinnützige Organisationen realisiert. Im direkten Vergleich zu den beschriebenen typischen Bauweisen in Kapitel 3.1, ist eine Verbesserung der Baukonstruktionen erkennbar. Vereinzelt wird darauf hingewiesen, dass die Gebäude erdbeben- und überflutungssicher seien. Ausbleibende nennenswerte Verbesserungen im Bereich des tsunamisicheren Wohnungsbaus, lassen sich nicht zuletzt durch fehlende finanzielle Mittel erklären, vor allem in den Entwicklungsländern. Viele Projekte zum Wiederaufbau von Thailand, Indonesien, Indien und Sri Lanka laufen über gemeinnützige Organisationen, deren vorrangiges Ziel ist den

Menschen überhaupt erst wieder einen eigenen Wohnsitz zu ermöglichen. In Japan wurde eine Änderung der Wohnbauweisen umgangen, indem äußeren Randbedingungen nach den Konzeptvorlagen öffentlicher Instanzen verändert wurden. Durch die Erhöhung des vorgesehenen Baugrundes und der entfernteren Lage zur Küste sind die neu konstruierten Wohnhäuser sicherer vor Tsunamieinwirkungen. Gleichzeitig wird die erdbebensichere Leichtbauweise beibehalten, die auch auf die in Japan herrschenden tropischen Klimabedingungen optimal abgestimmt ist.

In Japan haben sich die **vertikalen Evakuierungsgebäude** grundsätzlich während des Tsunamis bewährt und vielen Menschen das Leben gerettet (Tab. 2). Allerdings waren insgesamt nicht genügend gut erreichbare und ausreichend hoch dimensionierte Evakuierungsgebäude vorhanden. Weder in Thailand, Indonesien, Indien noch Sri Lanka waren vor dem Tsunami 2004 ausgewiesene Evakuierungsgebäude vorhanden. Inzwischen verfügen sowohl Phang Naga in Thailand, als auch Banda Aceh in Indonesien über Evakuierungsgebäude (Abb. 3.19 und Abb. 3.21 b und c). Das Konzept, die zahlreich vorhandenen Moscheen in Padang, Indonesien zu nutzen, sollte weiterverfolgt werden, da erst ein Netz aus mehreren Evakuierungsgebäuden die nötige Kapazität bietet und von jedem Standort aus gut erreichbar ist.

Die in Kapitel 3.2 genannten **Richtlinien** finden sich teilweise in den vorgestellten **Stadtplanungskonzepten** wieder. Alle vorgestellten Stadtplanungskonzepte sehen eine Umstrukturierung des Küstengebietes vor. Alle Konzepte sehen direkt am Ufer einen begrünten Küstenstreifen vor. Die Raumnutzung des restlichen Gebietes unterscheidet sich in den Konzepten. Da eine Einteilung in Zonen aufgrund der hohen Bevölkerungs- und Bebauungsdichte in **Chile** nicht infrage kommt, sieht das Stadtplanungskonzept, nur die Nutzung der oberen Etagen als Wohnraum vor, während die offenen unteren Etagen den Durchfluss von Wasser und schwimmendem Schutt gewährleisten sollen. Die Orientierung der Gebäude zur Küste wird in Hinblick auf die Reduzierung von Aufprallschäden ebenfalls berücksichtigt. Die Stadtplanungskonzepte zum Wiederaufbau in **Japan** sehen vor, den Baugrund aufzuschütten und die gefährdeten Gebiete als Agrarland zu nutzen. Zukünftig sollen Wohnhäuser in Japan auf den aufgeschütteten **Anhöhen** platziert werden, die in einiger Entfernung zur Küste liegen.

Die vorgestellten **innovativen Ideen** sind unterschiedlich realistisch zu bewerten. **TEREPs** stellen zur Evakuierung eine sinnvolle Ergänzung zu vertikalen Evakuierungsgebäuden dar. Sie lassen sich gut in das städtische Stadtplanungskonzept integrieren und können neben ihrer Zufluchtsfunktion beispielsweise Freizeit und Erholungszwecken dienen. Die Projektstudie „**tsunami-safe(r) house**“ hat auf Basis des typischen Wohnhauses in Sri Lanka eine verbesserte Konstruktion entwickelt. Die verbesserte Konstruktion stellt durch die größeren Öffnungen und die Bewehrung der Betonblöcke mit Sicherheit eine Verbesserung zu dem typischen Wohnhaus in Sri Lanka dar. Allerdings ist fragwürdig, ob das verbesserte Gebäude größeren Überflutungshöhen ohne weitere Maßnahmen standhalten würde. Das **Kogami-Projekt** nutzt natürliche Baumaterialien des Ökosystems und überträgt die Eigenschaften auf Bauwerke. Die Nutzung von Naturphänomenen und Übertragung auf die Technik wird als Bionik bezeichnet und hat sich bereits zu einer etablierten Wissenschaftsdisziplin entwickelt. Die vorgestellte Biorock Technologie und Prozess der Galvanotechnik von Mineralien in Meerwasser, die sich das Projekt zu Nutze macht, wurde von Prof. Wolf Hilbertz entwickelt. Von die-

ser Technologie wird sich u.a. ein hohes Potential als möglicher Wellenbrecher erhofft, da die natürlichen Strukturen mit wachsendem Alter immer stärker werden (Internetquelle 51). Da bei sämtlichen vorgestellten innovativen Ideen die experimentellen Studien fehlen, kann keine aussagekräftige Angabe zu der Wirkungsweise der Konzepte gemacht werden. Da sich Bauwerke die stark in die Natur eingreifen, wie beispielsweise Ufermauern, nicht ausreichend bewährt haben, sollten Küstenschutzkonzepte die sich an der Wirkungsweise und der Erhaltung der Natur orientieren, weiterverfolgt werden.

## 4 Belastung der Gebäude durch Tsunamis

Kapitel 4 gliedert sich in vier Hauptkapitel, beginnend mit Kapitel 4.1, das näher auf die unterschiedlichen Kräfte eingeht, die bei einem Tsunami auf Gebäude wirken. Kapitel 4.2 beschreibt konstruktive Gegenmaßnahmen, die getroffen werden müssen um den wirkenden Tsunamikräften standzuhalten, die zuvor in Kapitel 4.1 beschrieben wurden. Richtlinien und Normen zur Berechnung der Tsunamibelastung werden in Kapitel 4.3 benannt. Kapitel 4.4 stellt die Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen zu Gebäudebelastungen vor.

### 4.1 Art der Tsunamikräfte

Gebäude können durch Hydrostatische Kräfte, Auftriebskräfte, Hydrodynamische Kräfte, Druckwellen Kräfte, Aufprall Kräfte und Brechende Flutwellenkräfte belastet werden. Im folgenden Kapitel werden die wirkenden Tsunamibelastungen auf Gebäude beschrieben.

#### 4.1.1 Hydrostatische Kräfte

Als Hydrostatische Kräfte werden die seitlichen Belastungen auf Gebäude bezeichnet, die im rechten Winkel zur Oberfläche wirken. Sie werden durch ein Ungleichgewicht des Druckes aufgrund der unterschiedlichen Wassertiefen bei gegenüberliegenden Seiten von Baukörpern und Bauteilen hervorgerufen, wenn stehendes oder langsam bewegendes Wasser auf Gebäude oder Gebäudeteile trifft. Die Richtlinien FEMA-P55 und CCH ähneln sich in der Berechnung der Hydrostatischen Kraft. Bei CCH wird jedoch die dynamische Druckhöhe verwendet, die in FEMA-P55 nicht enthalten ist. Die aufgeführte Formel basiert auf der Berechnung nach CCH. Hydrostatische Kräfte sind verglichen mit und Hydrodynamischen Kräften im Falle von Bore-Tsunamis sehr gering (Yeh, et al., 2005). Bei schnell ansteigender Flut wird die Betrachtung der Hydrostatischen Kräfte umso wichtiger. Wenn die Wand kleiner als  $h$  hoch ist, beinhaltet die Formel keinen direkten Strömungswiderstand auf der Oberseite der Wand (Formel 18). Die resultierende Kraft wirkt horizontal mit einer Distanz von  $h_R$  oberhalb des Wandsockels (Yeh, et al., 2005) (Formel 19):

$$F_h = \frac{1}{2} \rho g \left( h + \frac{u_p^2}{2g} \right)^2, \quad (18)$$

$$h_R = \frac{1}{3} \left( h + \frac{u_p^2}{2g} \right), \quad (19)$$

- mit:
- $F_h$ : Hydrostatische Kraft auf eine Wand [kN],
  - $\rho$ : Wasserdichte [ $\text{kg/m}^3$ ],
  - $g$ : Gravitationskonstante [ $\text{m/s}^2$ ],
  - $h$ : Wassertiefe [m],
  - $u_p$ : Geschwindigkeitskomponente auf die Wand [m/s].

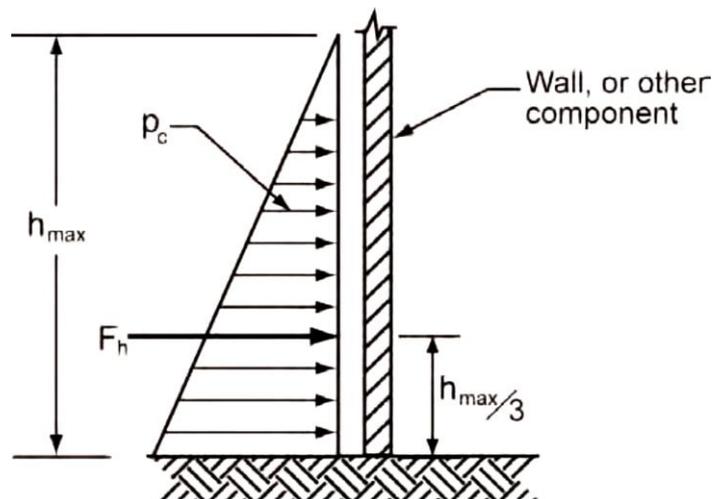


Abb. 4.1: Hydrostatische Kräfte auf eine Wand bzw. Gebäude (FEMA P646 S.71(2008))

#### 4.1.2 Auftriebskräfte

Auftriebskräfte, auch vertikale hydrostatische Kräfte genannt, wirken vertikal auf Baukörper oder Bauteile bis zum Massenmittelpunkt des verdrängten Volumens in Abhängigkeit von teilweiser oder vollständiger Überflutung. Auftriebskräfte sind vor allem ein Problem für Leichtkonstruktionen, Untergeschosse, leere ober- und unterirdische Tankanlagen und Schwimmbecken. Um einem Aufschwimmen und Auftriebskräften entgegenzuwirken, muss das Eigengewicht des Objekts ausreichend dimensioniert sein. Alle Richtlinien verwenden zur Berechnung die gleiche Formel (Yeh, et al., 2005) (Formel 20):

$$F_b = \rho g V, \tag{20}$$

- mit:  $F_b$ : Auftriebskraft [KN],  
 $\rho$ : Wasserdichte [ $\text{kg/m}^3$ ],  
 $g$ : Gravitationskonstante [ $\text{m/s}^2$ ],  
 $V$ : durch Gebäude verdrängtes Wasservolumen [ $\text{m}^3$ ].

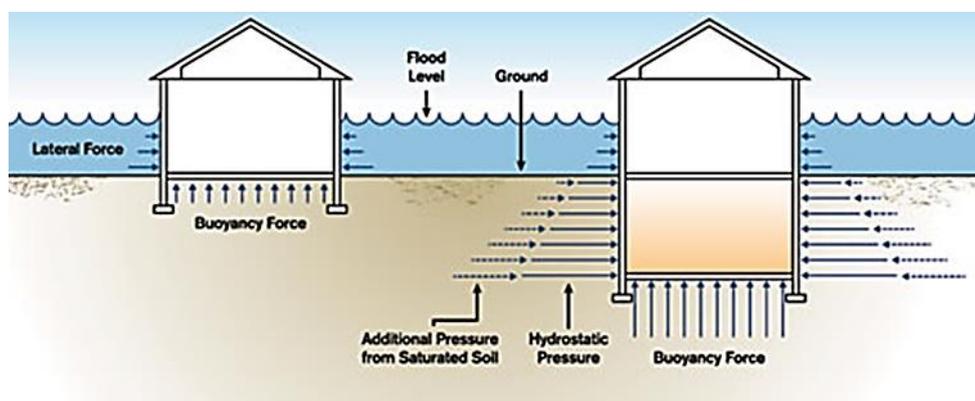


Abb. 4.2: Auftriebskräfte (Internetquelle 52)

### 4.1.3 Hydrodynamische Kräfte

Hydrodynamische Belastungen werden durch fließendes Wasser von mittelmäßigen bis hohen Fließgeschwindigkeiten um ein Gebäude hervorgerufen. Sie beinhalten sowohl Frontalaufprall auf der stromaufwärts gelegenen Seite, als auch Sogwirkung auf der stromabwärts gelegenen Seite. Die Bezeichnung Hydrodynamische Kräfte setzt sich aus der seitlichen Belastung, verursacht durch den Aufprall der bewegten Masse und den Reibungskräften zusammen, die durch das Wasser um das Hindernis herum entstehen. Sowohl CCH als auch FEMA-P55 verwenden zur Berechnung Hydrodynamischer Kräfte die folgende Formel (Formel 21). Für den Strömungswiderstandskoeffizienten  $C_d$  werden in CCH und FEMA-P55 unterschiedliche Werte empfohlen. CCH empfiehlt für runde Pfähle 1.0, 2.0 für quadratische Pfähle und 1.5 für Wandabschnitte. FEMA-P55 empfiehlt einen Wert von 1.2 für runde Pfähle und  $C_d = 2.0$  sowohl für quadratische als auch rechteckige Pfähle (Yeh, et al., 2005). Tab. 4 zeigt umfangreichere Werte für die Bestimmung von  $C_d$ :

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A_H u_p^2 \quad (21)$$

- mit:
- $F_d$ : Auftriebskraft [KN],
  - $\rho$ : Wasserdichte [ $\text{kg/m}^3$ ],
  - $g$ : Gravitationskonstante [ $\text{m/s}^2$ ],
  - $u_p$ : Geschwindigkeitskomponente auf die Wand [m/s],
  - $A_H$ : Projektionsfläche des ebenen Körpers senkrecht zur Fließrichtung [ $\text{m}^2$ ],
  - $C_d$ : Strömungswiderstandskoeffizienten [-].

Tab. 4: Strömungswiderstandskoeffizienten  $C_d$  nach FEMA-P55 (Yeh, et al., 2005)

Verhältnis von Breite zu Tiefe ( $w/d_s$ oder $w/h$ )	Strömungswiderstandskoeffizienten $C_d$
1-12	1.25
13-20	1.3
21-32	1.4
33-40	1.5
41-80	1.75
81-120	1.8
>120	2

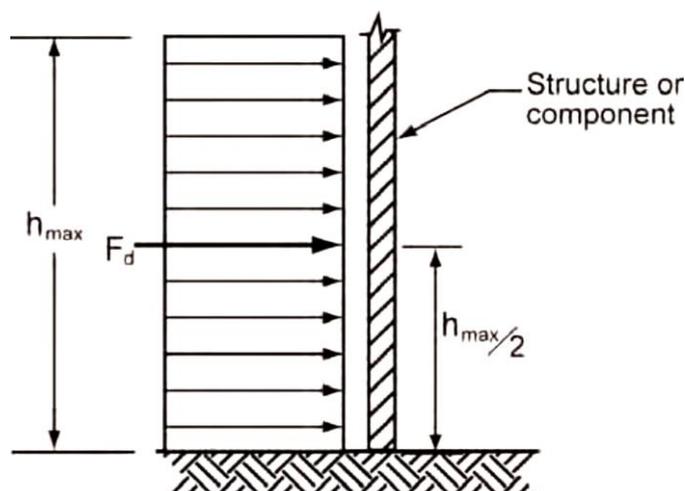


Abb. 4.3: Hydrodynamische Kräfte auf eine Wand (FEMA-P646, 2008)

#### 4.1.4 Druckwellen Kräfte

Druckwellen Kräfte werden durch das Auftreffen der Vorderkante eines Wasserdrucks auf eine Struktur verursacht. Der Anstieg wird als eine Kraft pro Breitereinheit an einer senkrechten Wand ausgedrückt. Die Formel zur Berechnung (Formel 22) nach CCH ist für Wände  $\geq 3 h$  anzunehmen. Bei Wänden  $< 3 h$  sind zur Berechnung geeignete Kombinationen der Hydrostatischen und Hydrodynamischen Formeln für die gegebene Situation erforderlich (Yeh, et al., 2005) (Formel 22):

$$F_s = 4.5\rho gh_D^2, \quad (22)$$

- mit:
- $F_s$ : Auftriebskraft [KN],
  - $\rho$ : Wasserdichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],
  - $g$ : Gravitationskonstante [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],
  - $h_D$ : Druckwellenhöhe [m].

#### 4.1.5 Aufprall Kräfte

Laut Yeh et al. (2005) entstehen Aufprall Kräfte durch den Aufprall von Trümmern und Schutt, wie beispielsweise Treibholz, kleinen Booten oder Häuserteilen, die von den Tsunamiwellen mitgerissen werden. Die Magnitude dieser Kräfte ist schwer bestimmbar. Es wird angenommen, dass die Geschwindigkeit des Schuttes dem der Fließgeschwindigkeit des Wassers entspricht und die Objekte auf Höhe des Wasserspiegels das Gebäude beschädigen. Unsicherheiten bestehen bei der Dauer des Aufpralls, die mit der Steifigkeit des Gebäudes zusammenhängt. Die Steifigkeit hängt wiederum vom verwendeten Material, der Anzahl der Säulen und Pfähle, der Höhe des Gebäudes, sowie insbesondere der Aufprallhöhe ab. Die Berechnungsformel ist in FEMA-P55, CCH und ASCE 7 ähnlich. Nach CCH werden für

Holz- 1.0 s, Stahl- 0.5 s und Stahlbetonkonstruktionen 0.1 s angenommen (Formel 23). Die verwendeten Beiwerte nach FEMA-P55 zeigt Tab. 5:

$$F_I = m \frac{du_b}{dt} = m \frac{u_I}{\Delta t}, \quad (23)$$

- mit:  $F_I$ : Auftriebskraft [KN],  
 $u_b$ : Geschwindigkeit des durch Aufprallkräfte betroffenen Körpers [m/s],  
 $u_I$ : Anströmungsgeschwindigkeit [m/s],  
 $m$ : Masse des Körpers [kg],  
 $\Delta t$ : Aufpralldauer [s].

Tab. 5: Aufpralldauerbestimmung nach FEMA-P55 (Yeh, et al., 2005)

Konstruktionsart	Dauer (t) des Aufpralls (s)	
	Wand	Pfahl
<b>Holz</b>	0.7-1.1	0.5-1.0
<b>Stahl</b>	NA	0.2-0.4
<b>Stahlbeton</b>	0.2-0.4	0.3-0.6
<b>Betonmauerwerk</b>	0.3-0.6	0.3-0.6

#### 4.1.6 Brechende Flutwellenkräfte

In Bezug auf Bauwerke wird zwischen zwei Lastbedingungen unterschieden: Einwirkungen auf vertikale Elemente mit kleinem Durchmesser (z.B. Pfeiler und Säulen) und gegen Wände. Bei Einwirkung auf Körper, die nicht vertikal sind, ändern sich die Kräfte. Aus schräg auftretenden Wellen resultieren geringer auftretende Kräfte. Es wird angenommen, dass die resultierende Kraft der Brechenden Flutwelle, die auf einen starren vertikalen Pfeiler oder Säule wirkt bereits bei einem Ruhewasserspiegel wirkt. Wenn eine brechende Flutwelle auf eine vertikale Wand trifft, bildet sich eine reflektierende oder stehende Welle, die gegen die Seeseite der Wand gerichtet ist. Es herrschen erhebliche Unsicherheiten bei der Abschätzung von Bemessungsflutgeschwindigkeiten, weil es wenige verlässliche, historische Aufzeichnungen dazu gibt. Stark variierende Richtungsänderungen und Geschwindigkeitswechsel während einer Flut erschweren die Berechnung. Deshalb wird immer von der ungünstigsten Richtung und den höchsten Strömungsgeschwindigkeiten ausgegangen.

Sowohl FEMA-P55 als auch ASCE 7 verwenden dieselbe Berechnungsformel (Formel 24) und dieselben Formbeiwerte für  $C_{db}$  (2.25 für quadratische und rechteckige, 1.75 für runde Pfähle) zur Berechnung von **brechenden Flutwellen auf vertikale Pfeiler und Säulen**. Für die Höhe der brechenden Welle wird von FEMA-P55  $H_b=0.78 ds$  angesetzt. Zur Berechnung

von **brechenden Flutwellen auf vertikale Wände** werden 2 Fälle unterschieden: 1. für einen geschlossenen, trockenen Raum hinter einer Wand und 2. ein gleicher Ruhewasserspiegel auf beiden Seiten der Wand (Yeh, et al., 2005) (Formel 25 und 26). Die jeweiligen dynamischen Druckbeiwerte  $C_p$  nach FEMA-P55 können Tab. 6 entnommen werden.

$$F_{brkp} = \frac{1}{2} \rho g C_{db} D H_b^2, \quad (24)$$

$$f_{brkw} = 1.1 C_p \gamma d_s^2 + 2.41 \gamma d_s^2, \quad (25)$$

$$f_{brkw} = 1.1 C_p \gamma d_s^2 + 1.91 \gamma d_s^2, \quad (26)$$

- mit:
- $F_{brkp}$ : Brechende Flutwellenkraft [KN],
  - $f_{brkw}$ : Brechende Flutwellenkraft [KN],
  - $\rho$ : Wasserdichte [ $\text{kg/m}^3$ ],
  - $g$ : Gravitationskonstante [ $\text{m/s}^2$ ],
  - $C_{db}$ : Formbeiwert [-],
  - $C_p$ : dynamische Druckkoeffizient [-],
  - $D$ : Pfeildurchmesser [m],
  - $H_b$ : Höhe der brechenden Welle [m],
  - $d_s$ : Bemessungswert für Ruhewasserfluthöhe [m].

Tab. 6: Bestimmung des dynamischen Druckbeiwertes  $C_p$  nach FEMA-P55 (Yeh, et al., 2005)

$C_p$	Gebäudetyp	Überschreitungswahrscheinlichkeit
1.6	Begleitstruktur, geringe Gefahr für Menschenleben oder Eigentum im Falle eines Versagens	0.5
2.8	Wohngebäude an Küste	0.01
3.2	Hohe Auslastung oder kritische Einrichtung	0.001

### Lastkombinationen

Abb. 4.4 zeigt **mögliche Lastkombinationen**, die Bore-Wellen beinhalten. Die Belastungskombination in Abb. 4.4 a beinhaltet sowohl Druckwellen als auch Schutttaufprall Kräfte, die als die Hauptbelastungen horizontal angreifen. Abb. 4.4 b beinhaltet neben Schutttaufprall

auch Hydrodynamische und Hydrostatische Kräfte sowie seitliche Belastungen (Palermo & Nistor, 2008).

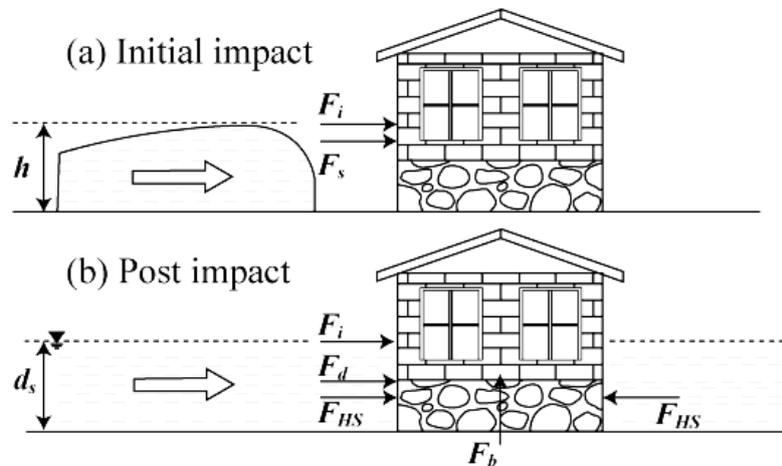


Abb. 4.4: Mögliche Lastkombinationen (Palermo & Nistor, 2008): a) einleitender Aufprall, b) anschließender Aufprall

## 4.2 Mögliche Gestaltungsmöglichkeiten von Gebäuden

In diesem Kapitel werden Maßnahmen des Alaska Tsunami Education Programs (ATEP) zur Verbesserung von Bauweisen vorgestellt, um den jeweiligen in Kapitel 4.1 vorgestellten Tsunami Kräften standzuhalten.

Bei **Hydrostatischer Belastung** drückt das außerhalb anstehende Wasser gegen die Wände (s. Abb. 4.5 a). Eine Verbesserung wird durch Erhöhung der Konstruktion, z.B. durch Pfeiler, wegbrechend konstruierte Wände und gute Verankerung des Gebäudes mit der Gründung erreicht (s. Abb. 4.5 b) (Internetquelle 53).

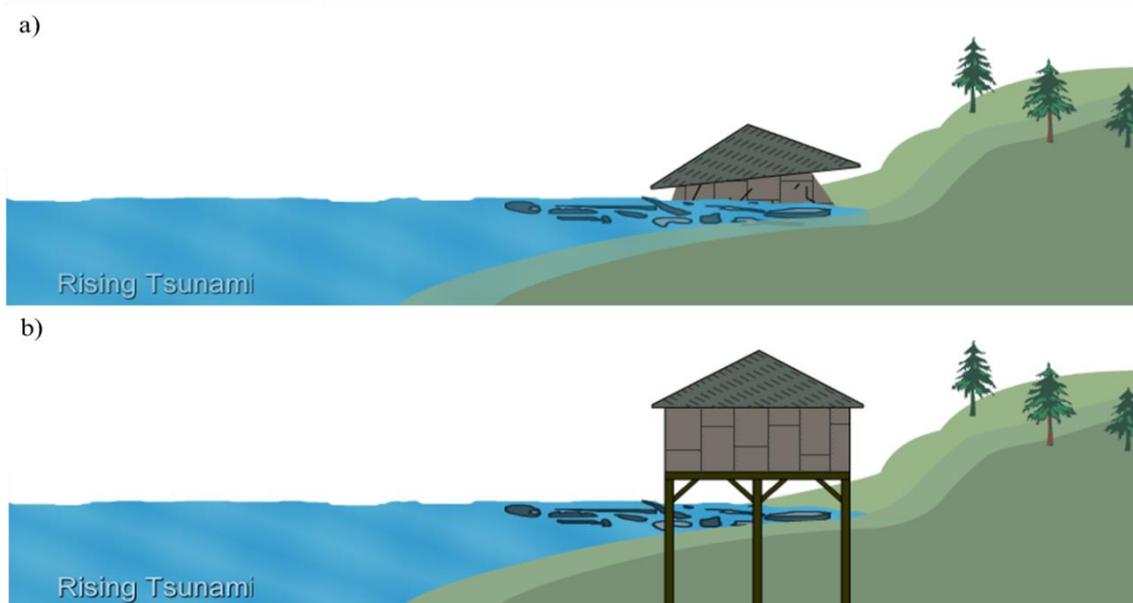


Abb. 4.5: Hydrostatische Belastung (Internetquelle 53): a) vorher, b) nachher

**Auftriebskräfte** verursachen Überflutungen (s. Abb. 4.6 a), die durch Erhöhung, Verankerung des Gebäudes mit der Gründung und Verwendung von Material, das resistent gegenüber Auftrieb ist, vermieden werden können (s. Abb. 4.6 b) (Internetquelle 53).

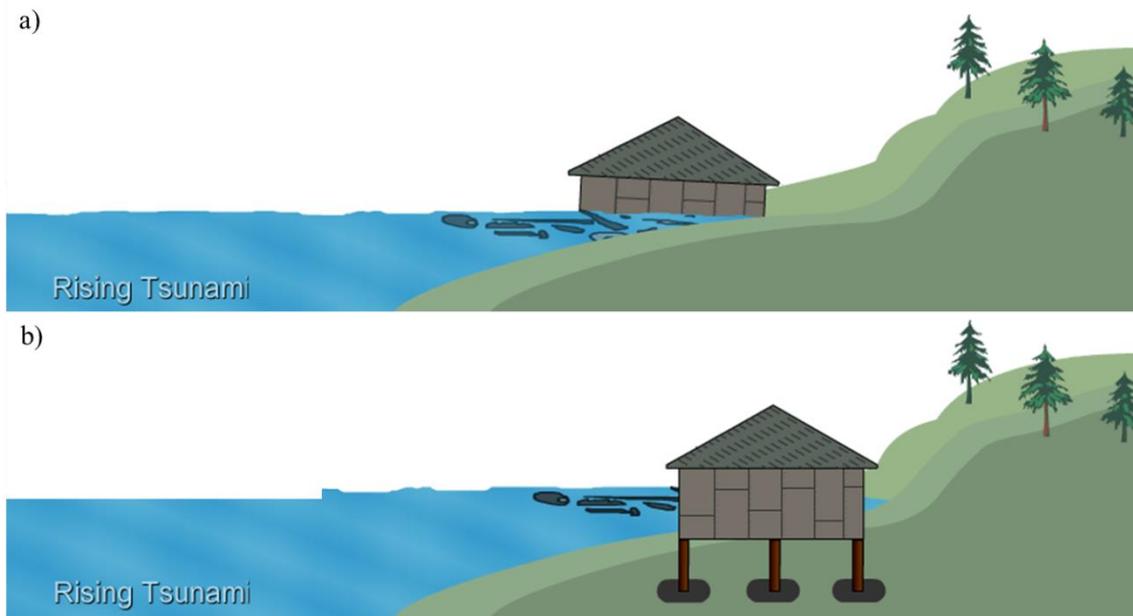


Abb. 4.6: Auftriebskräfte(Internetquelle 53) : a) vorher, b) nachher

Auch nachdem die Vorderkante der Tsunamiwelle das Gebäude erreicht hat, drücken **Hydrodynamische Kräfte** gegen die Konstruktion (s. Abb. 4.7 a). Durch Verwendung von Trägern und Aussteifung, durch Bewehrung von Wänden und der Gründung, sowie Erhöhung des Gebäudes, kann dem entgegengewirkt werden (s. Abb. 4.7 b) (Internetquelle 53).

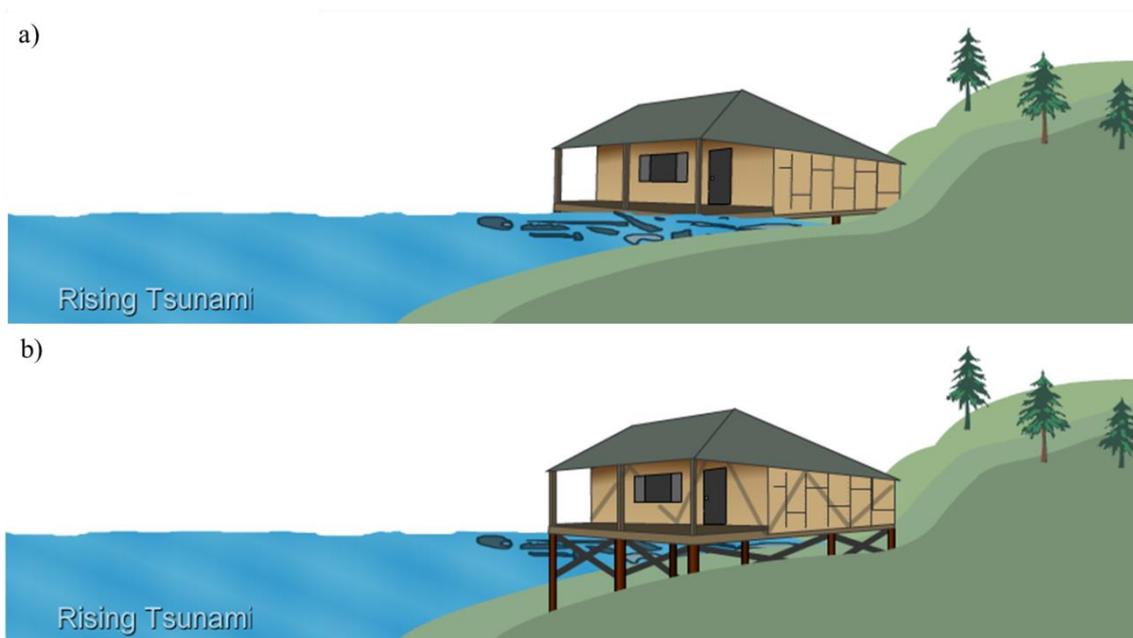


Abb. 4.7: Hydrodynamische Kräfte (Internetquelle 53) : a) vorher, b) nachher

Bei ansteigendem Wasserspiegel verursacht durch **Druckwellen Kräfte** versagt die Konstruktion (s. Abb. 4.8 a). Mit Hilfe von einer Erhöhung des Gebäudes und/oder zusätzlichen wegbrechenden Wänden wird ein Versagen des Gebäudes vermieden (s. Abb. 4.8 b) (Internetquelle 53).

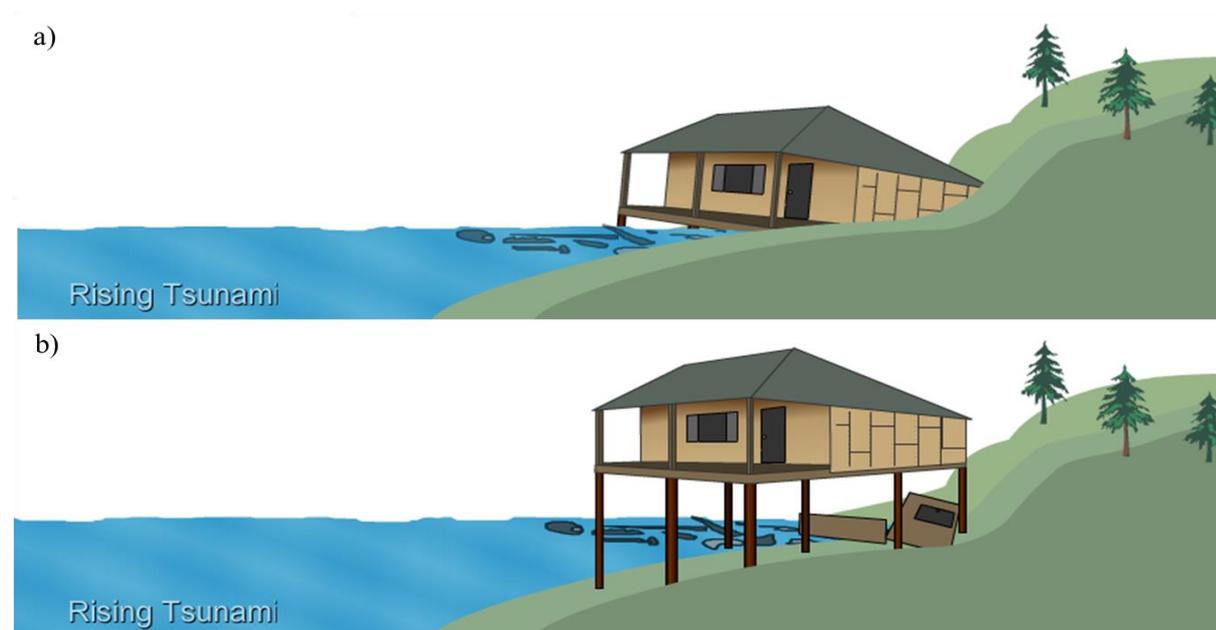


Abb. 4.8: Druckwellen Kräfte (Internetquelle 53): a) vorher, b) nachher

**Aufprall Kräfte** beschädigen Gebäudekonstruktionen stark durch mitgespülten Schutt (s. Abb. 4.9 a). Um dies zu vermeiden, sollte das Gebäude erhöht und schützende Barrieren errichtet werden, die den Schutt vor einem möglichen Aufprall abfangen (s. Abb. 4.9 b) (Internetquelle 53).

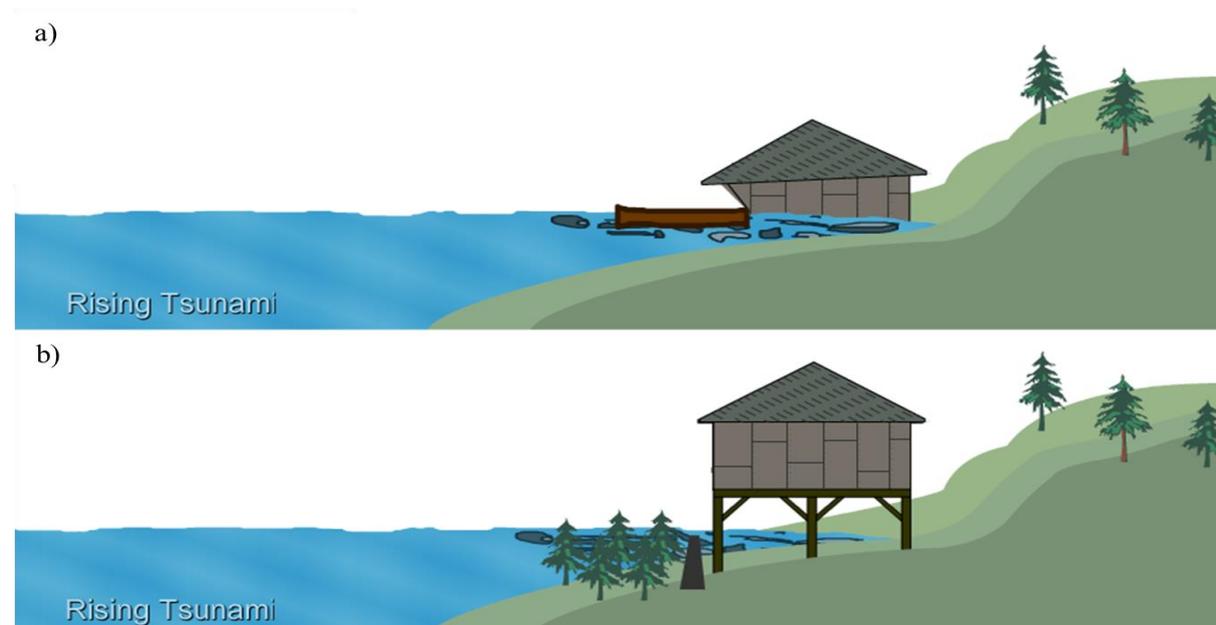


Abb. 4.9: Aufprall Kräfte (Internetquelle 53) : a) vorher, b) nachher

**Unterspülungen** sind meistens in Gebäudeecken und um Pfosten herum vorzufinden (s. Abb. 4.10 a). Um dem entgegenzuwirken, sollten die Pfosten ausreichend lang in tragfähigen Boden reichen (s. Abb. 4.10 b) (Internetquelle 53).

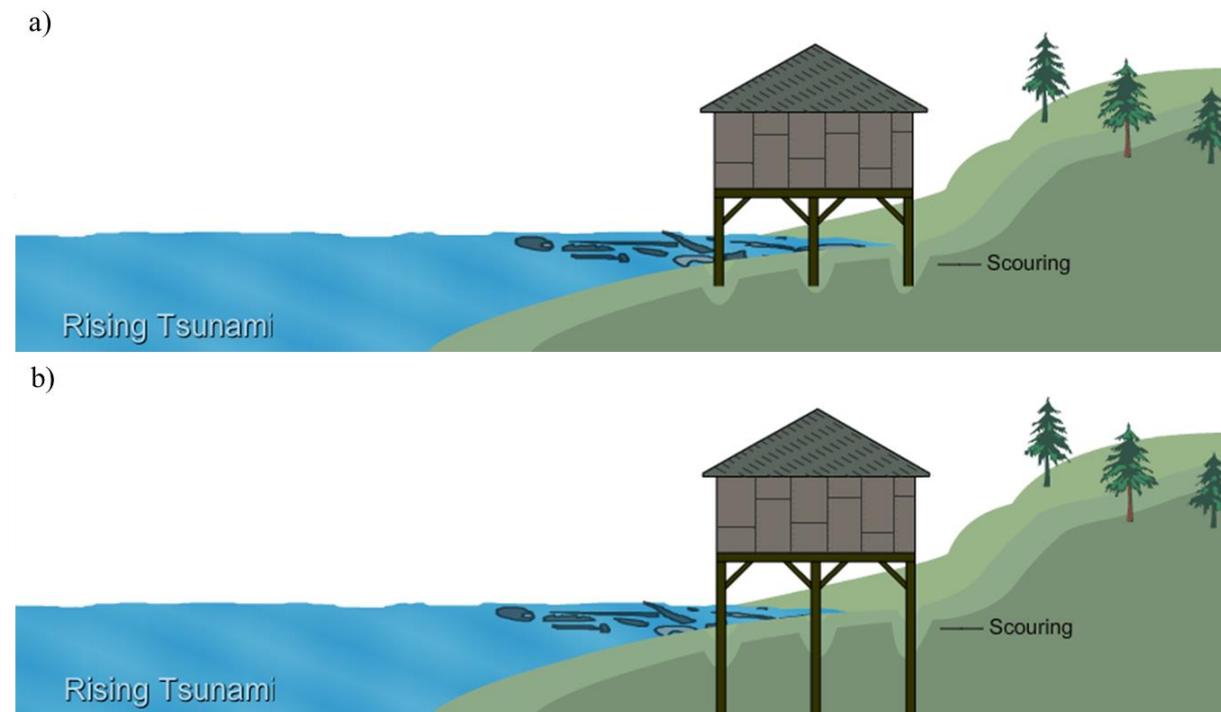


Abb. 4.10: Unterspülungen (Internetquelle 53): a) vorher, b) nachher

### 4.3 Richtlinien und Normen zur Berechnung der Tsunamibelastung

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die wichtigsten Richtlinien und relevanten Kapitel der Werke in Bezug auf tsunamisicheres Bauen (Kapitel 4.3.1) und Unterschiede in der Berechnung (Kapitel 4.3.2).

#### 4.3.1 Überblick der wichtigsten Richtlinien

Nachfolgend sind die wichtigsten Richtlinien zur Berechnung der Tsunamibelastung aufgelistet, die überwiegend aus den USA stammen, aber international verwendet werden.

- **Federal Emergency Management Agency (FEMA) P646** - Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis (2008)
- **Federal Emergency Management Agency (FEMA) P55** - Coastal Construction Manual (2011)
- **The City and Country of Honolulu Building Code (CCH)** –
  - **The 2003 International Building Code (IBC)**
- **Okada et al., the Building Centre of Japan** - Structural Design Method of Buildings for Tsunami Resistance (SMBTR) (2005)

- **Yeh et al.** - Development of Guidelines for Structures that Serve as a Tsunami Vertical Evacuation Sites (2005)
- **American Society of Civil Engineers (ASCE) 7** - Minimum Design Loads for Buildings and other Structures
- **National Building Code of India (NBC 2005)**

Der **Honolulu Building Code (CCH)** ist dabei Teil (Kapitel 16) des **Revised Ordinances of Honolulu (ROH)**. Relevant für diese Arbeit sind vor allem Artikel 11 “Regulations Within Flood Hazard Districts and Development Adjacent to Drainage Facilities” und der im Honolulu Building Code (CCH) enthaltene **International Building Code**. Beim CCH handelt es sich eher um ein allgemeines Richtlinienwerk, das sämtliche auftretende Belastungen aufführt. Themenrelevante Kapitel sind **Anhang G “Flood resistant constructions“** und **Kapitel 31 über “special construction“** in dem Begriffsdefinitionen und Verhaltensmaßnahmen behandelt werden.

Dagegen behandeln die Richtlinien **FEMA- P646** und **FEMA P55** gezielter die auftretenden Kräfte auf Gebäude, sowie deren Berechnung und umfassende Vorgehensweisen zur Errichtung und Aufrechterhaltung von Küstenkonstruktionen.

**Okada et al. (2005)** schlagen konstruktive Methoden für Evakuierungsgebäude auf Basis von experimentellen Studien von Tsunami Belastung auf Hafenkonstruktionen vor.

**Yeh et al. (2005)** und die **American Society of Civil Engineers (ASCE) 7** behandeln vor allem Tsunamikräfte auf Gebäude, Flut- und Wellenbelastungen sowie ihre Berechnung und beziehen sich u.a. auf die oben genannten Werke.

Der **National Building Code of India (NBC 2005)** beinhaltet insgesamt zehn Kapitel, von denen Kapitel 5 über Baumaterialien und Kapitel 6 zu Baukonstruktionen für diese Arbeit relevant sind. Kapitel 6 behandelt Einwirkungen, Kräfte und Einflüsse sowie Böden und Gründungen. Auf verschiedene Bauweisen (Holz, Bambus, Mauerwerk, Stahlbeton, Spannbeton, Stahl) wird ebenfalls eingegangen. Es werden ebenfalls vorgefertigte Systeme, wie Spannbeton-, Systembau- und Verbundstoffkonstruktionen aufgeführt.

#### 4.3.2 Unterschiede in den Berechnungsansätzen zwischen den Richtlinien

Bei der Abschätzung der Gebäudebelastung durch die in Kapitel 4.1 beschriebenen Tsunamikräfte gibt es in einigen Fällen Unterschiede zwischen den einzelnen Publikationen bei der Berechnungsformel oder den verwendeten Koeffizienten. Einige Unterschiede wurden bereits in Kapitel 4.1 kurz angesprochen.

Nouri (2008) veranschaulicht, dass es erhebliche Unterschiede in der Abschätzung der Kräfte gibt, die sowohl durch Tsunami-Boren auf Bauwerke ausgeübt werden, als auch durch Schuttaufpralle. Das ist darauf zurückzuführen, dass es Unterschiede in der Abschätzung der Borengeschwindigkeit (*bore velocity*) gibt. Dadurch, dass in der Berechnungsformel der hydrodynamische Kraft die Geschwindigkeitskomponente auf die Wand  $u_p$  quadriert wird, führen Unsicherheiten in der Abschätzung der Geschwindigkeitskomponente zu großen Differenzen

der berechneten Kräfte. Bei einer großen Überflutung können die Geschwindigkeiten und Richtungen einer Bore während eines Tsunamis erheblich variieren. Da die aktuellen Schätzungen von Bore-Geschwindigkeiten noch recht unausgereift sind, wird in der Regel von einer hohen Fließgeschwindigkeit ausgegangen, die in senkrechtem Winkel auf die Konstruktionen aufprallt.

Laut Nouri (2008) werden die Effekte von maximalen Auflaufhöhen der Welle an der Küste, Wellenrückströme (*backwash*) und die Richtungen der Geschwindigkeit nicht in aktuellen Richtlinien behandelt. Zwar gibt es gewisse Übereinstimmungen in der allgemeinen Form der Berechnungsgleichung für Hydrodynamische Kräfte, allerdings empfehlen die Wissenschaftler unterschiedliche erfahrungsmäßige Beiwerte. Die allgemeine Form zur Berechnung der Bore-Geschwindigkeit zeigt die nachfolgende Gleichung (Formel 27):

$$u = C\sqrt{gd_{s2}}, \quad (27)$$

- mit:
- u: Bore-Geschwindigkeit [m/s],
  - C: konstanter Beiwert [-],
  - g: Gravitationskonstante [ $\text{m/s}^2$ ],
  - $d_{s2}$ : Überflutungshöhe [m].

Für die Abschätzung der Geschwindigkeit einer Tsunami-Bore unter dem Aspekt der Überflutungshöhe gibt es verschiedene Berechnungsansätze durch FEMA-P55 (basierend auf den Untersuchungen von Dames und Moore (1980)), Iizuka and Matsutomi (2000), CCH, Kirkoz (1983), Murty (1977), Bryant (2001) sowie Camfield (1980). Abb. 4.11 vergleicht die unterschiedlichen Berechnungsansätze für die Geschwindigkeit von Tsunami-Boren. Die obere und untere Grenze der errechneten Geschwindigkeiten bilden die Abschätzungen durch FEMA-P55 und CCH (Nouri, 2008).

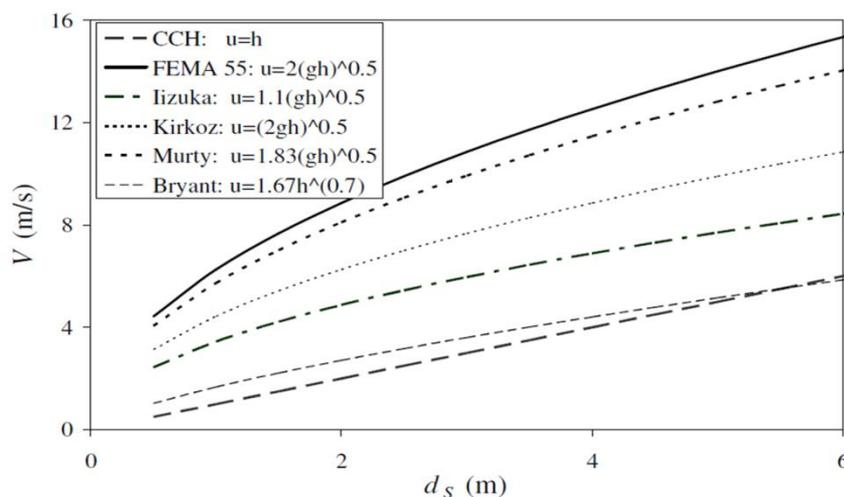


Abb. 4.11: Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsansätze für die Geschwindigkeit von Tsunami-Boren (Nouri, 2008)

## 4.4 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen zur Belastung der Gebäude von Tsunamis

In diesem Kapitel werden zwei Modellversuche zur Belastung von Gebäuden durch Tsunamis vorgestellt. Die vorgestellten Studien verfolgen unterschiedliche Ansätze: Die 1. Studie behandelt Auswirkung von Öffnungen, geometrischer Formen und Gründungen auf Modellhäuser während die 2. Studie vergleicht den maximalen Wellenauflauf bei einem tsunamiresistentem mit einem typischem Küstenhaus Sri Lankas.

### 1. Studie: Auswirkung von Öffnungen, geometrischer Formen und Gründungen auf Modellhäuser

Meyyappan, et al (2013) vergleichen zunächst insgesamt 9 Modelle, 3 verschiedener geometrischer Formen, rund, rechteckig und quadratisch (s. Abb. 4.12 a bis c), mit jeweils 0 %, 25 % und 50 %-igen Öffnungen, auf Dauer und Anzahl der Wellenaufpralle bis zum Versagen. Alle Versuche wurden direkt an der Meeresküste bei Ebbe und Flut anstelle eines Versuchskanals in **Tamil Nadu, Indien** durchgeführt. Getestet wurde vor allem, wie sich die Konstruktionen bei einer Reihe von Tsunamiwellen verhalten bevor es zum Versagen kommt und inwiefern die geometrische Form von Gebäuden Einfluss darauf hat, einem Tsunami standzuhalten.



Abb. 4.12: Modellhäuser der ersten Versuchsreihe (Meyyappan, et al., 2013): a) rundes Modell, b) rechteckiges Modell c) quadratisches Modell

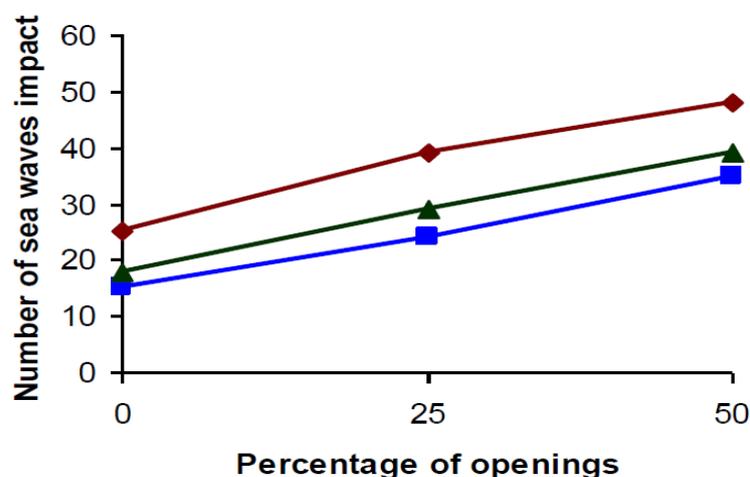


Abb. 4.13: Grafischer Vergleich von rundem (rot), rechteckigen (blau), und quadratischem (grün) Modell bei 0, 25 und 50 % Öffnungen (Meyyappan, et al., 2013)

Beim runden Versuchsmodell wurde durch 50%-ige Öffnung die Anzahl der überstandenen Wellenaufpralle von 25 auf 52 mehr als verdoppelt, ebenso wie die Zeitdauer bis zum Versagen durch Kippen von 3.39 min auf 6.48 min gesteigert wurde. Grundsätzlich haben die Modellhäuser mit der größten Öffnung von 50 % unabhängig von ihrer Form am besten den Wellen standgehalten. Allerdings waren die Ergebnisse bei 50 %-iger Öffnung bei dem runden, vor dem quadratischen Modell am besten (s. Abb. 4.13).

Im Zweiten Schritt wurde aus den 9 Modellen das widerstandsfähigste Modell ermittelt und die Auswirkung von 5 unterschiedlichen **Gründungen** an dem verbesserten Modelltyp getestet, der mit Ferrozement (Zement, Sand, Wasser) und Maschendraht verputzt wurde (s. Abb. 4.14):

- a) 4 Säulen an den Eckpunkten der Grundplatte,
- b) 4 Säulen sowie zusätzliche Verstärkung durch gekreuzte Aussteifungen mittig und am Fußpunkt der Säulen in horizontaler Ebene,
- c) Konstruktion wie in b) sowie jeweils zwei zusätzliche waagerechte Verstreben zwischen den Säulen,
- d) 4 Säulen sowie zusätzliche Verstärkung durch diagonal-gekreuzte Aussteifungen in vertikaler Ebene jeweils zwischen den Säulen
- e) Konstruktion wie in b) sowie jeweils vier zusätzliche schräge Pfeiler, die vertikal im 45 Gradwinkel zu den Säulen angeordnet sind.



Abb. 4.14: Modellhäuser der zweiten Versuchsreihe mit unterschiedlichen Gründungstypen, geordnet nach steigender Widerstandsfähigkeit von links nach rechts (Meyyappan, et al., 2013)

Bei der zweiten Versuchsreihe wurde eine ungefähr 5-fache Steigerung bei der **Anzahl der Wellenaufpralle** und der **Dauer bis zum Versagen** (in Minuten) von Modell a) (17/2.01min) zu Modell e) (84/10.03 min) gemessen.

## 2. Studie: Vergleich des maximalen Wellenaufbaus bei tsunamiresistentem und typischem Küstenhaus Sri Lankas

Erklärtes Ziel der Testreihe von Thusyanthan & Madabhushi (2008) bestand in der Erfassung des maximalen Wellenaufbaus bei unterschiedlichen Modellhäusern. Einwirkungen durch Schuttaufprall und Unterspülung der erhöhten Fundamente wurde vernachlässigt.

Verglichen wurde der Tsunamiwellenaufprall zwischen einem in den USA entwickelten (Studenten Initiative der Harvard Design School in Zusammenarbeit mit der Massachusetts Institute of Technology (MIT) tsunamiresistenten Haus und einem typischen Küstenhaus Sri Lankas. Bei dem tsunamiresistenten Haus wurden die Türen zentral in einer Flucht seeseitig zugewandt positioniert. Die Eckwände wurden mit Stahlbeton versehen. Dadurch sollte der Durchfluss von Tsunamiwellen durch die Zentralachse des Hauses gewährleistet werden ohne dabei zu große Hydrodynamische Kräfte hervorzurufen.

### Versuchsaufbau

Die Experimente wurden in einem Versuchskanal (L 4.5 m x T 1.5 m) mit einem Neigungswinkel von  $15^\circ$  durchgeführt (s. Abb. 4.15). Auf der Grundfläche des Beckens wurden Porendruckmessgeräte installiert. Die Tsunamiwellen wurden durch das Fallenlassen eines rechteckigen, 100 kg schweren Blocks (0.40 m x 0.52 m) erzeugt. Es wurden am tiefst gelegenen Ende des Beckens Wellenhöhen von ca. 0.10 m bei Wellenperioden von 1.5 s. erzeugt. Bei den Wellen handelte es sich um Druckwellenkräfte.

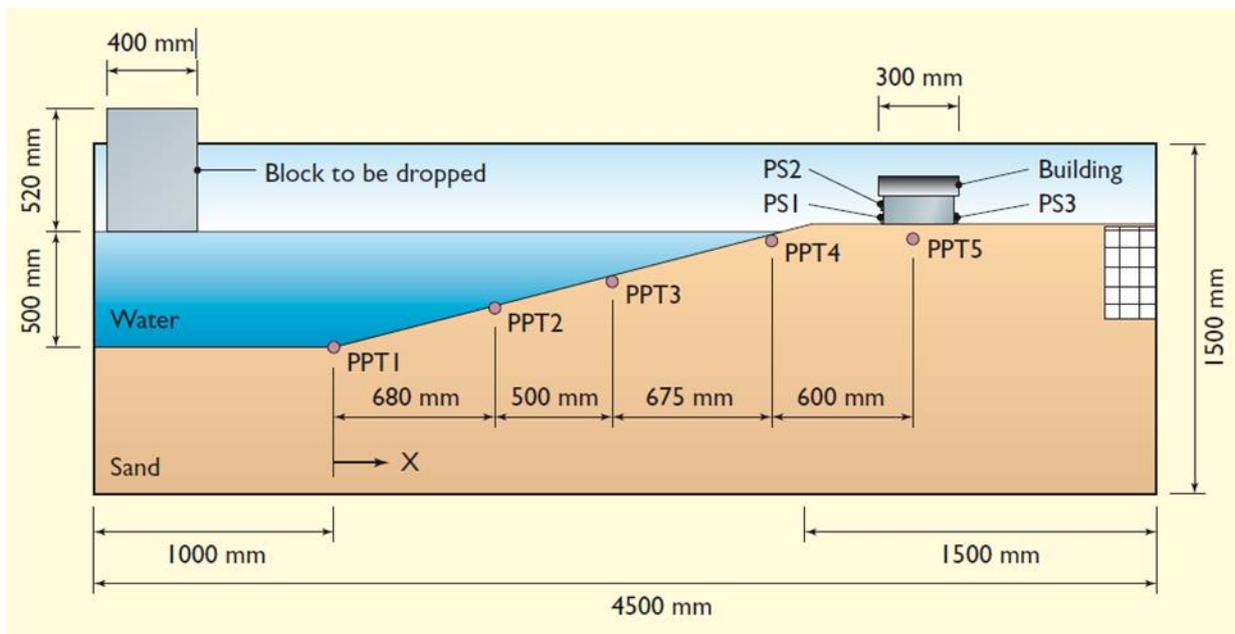


Abb. 4.15: Versuchsaufbau (Thusyanthan & Madabhushi, 2008)

### Modellhäuser

Das tsunamiresistente Haus wurde mittels Holzleisten auf eine Holzplatte geleimt. Die Grundfläche betrug 0.20 m x 0.30 m, bei einem Gewicht von 3,1 kg. Die Erhöhung oberhalb des Bodens wurde mit 20 cm angesetzt. Für das typische Küstenhaus wurden maßstabsgetreue Ziegelsteine und Mörtelpaste verwendet. Die Grundfläche betrug 0.20 m x 0.20 m, bei einem Gewicht von 1,7 kg (s. Abb. 4.16).

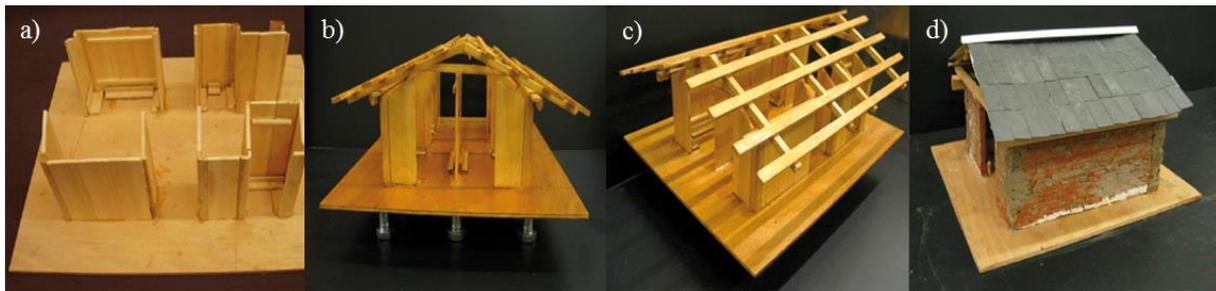


Abb. 4.16: Modellhäuser (Thusyanthan & Madabhushi, 2008): a), b) und c) tsunamiresistentes Haus, c) typisches Küstenhaus

Es wurden jeweils 3 Drucksensoren, zwei an der Vorderseite und einer an der Rückwand angebracht. Insgesamt wurden 5 Testreihen an den Modellen durchgeführt: tsunamiresistentes Haus ohne Dach, tsunamiresistentes Haus mit Dach, typisches Küstenhaus ohne zweckmäßige Gründung und typisches Küstenhaus mit zweckmäßiger Gründung.

Es wurde eine einzige Welle simuliert, anhand dessen Porendruck und Wellenschnelligkeit gemessen wurden. Der erzeugte Wasserschwall war bei dem tsunamiresistentes Haus ohne und mit Dach deutlich kleiner als bei der typischen Bauweise ohne Gründungsplatte.

### Testergebnisse

Insgesamt wurde festgestellt, dass das tsunamiresistente Haus gute Resultate erzielt hat, während das Küstenhaus stark beschädigt wurde, wobei das typische Modellhaus mit fester Gründungsplatte deutlich besser abgeschnitten hat. Die Wandfläche des resistenten Hauses wies 42 % weniger Fläche als die des Küstenhauses auf. Ein Prototyp des getesteten Hauses wurde im September 2005 in Balapitiya in Sri Lanka fertiggestellt. Die Hausdächer wurden durch Auftriebskräfte und hoch spritzendes Wasser belastet, das aufwärts an den Wänden hochstieg. Die Modellhäuser konnten sich bewegen oder kippen, wenn die Gründungsplatte nicht gut mit der Konstruktion verbunden war.

## 4.5 Zusammenfassung

Durch das Wissen über die **auf tretenden Tsunami kräfte** und deren Wirkungsweise (s. Kapitel 4.1), ist es möglich **gezielte Verbesserungen** an Gebäuden vorzunehmen (s. Kapitel 4.2), um entsprechende Zerstörungen an der Bausubstanz zu minimieren oder auszuschließen. Die Unterschiede in den **Richtlinien** bezüglich einiger Berechnungsformeln, zeigen die bestehenden Unstimmigkeiten auf dem Gebiet der Tsunami einwirkungen auf Gebäude.

Die in Kapitel 4.4 vorgestellten **experimentellen Untersuchungen** zur Gebäudebelastung haben ergeben, dass Modellhäuser mit den größten Öffnungen, unabhängig von ihrer Form, den Wellen am besten standgehalten. Bei gleich großen Öffnungen haben die runden, vor den quadratischen Modellhäuser en Tsunamiwellen am besten standgehalten. Dieses Ergebnis lässt sich auf die geringere Wandangriffsfläche zurückführen.

Die zweite Studie kommt ebenfalls zu dem Schluss, dass das Modellhaus dem Tsunami durch die größere Dimensionierung der Öffnungen und der geringeren Wandangriffsfläche besser widerstanden hat. Eine gute Verbindung von der Gründungsplatte mit dem Bauwerk ist ebenfalls entscheidend, damit das Haus nicht durch Kippen oder Unterspülungen versagt.

## 5 Zusammenstellung und Analyse von Tsunamischäden auf Gebäude

In Kapitel 3.1 wurde bereits auf typische Bauweisen in den jeweiligen Ländern eingegangen. Auf dieser Basis erfolgt in Kapitel 5.1 eine Zusammenstellung der Tsunamischäden von den in Kapitel 1.3 genannten Ländern, nach Art des Baumaterials und wenn vorhanden, der Stärke der Gebäudeschäden. Kapitel 5.2 knüpft an die Thematik von Kapitel 5.1 an und schildert detaillierter welche Ursachen zu der Zerstörung oder dem Versagen des Bauwerks geführt haben. In Kapitel 5.3 wird auf Basis von Felduntersuchungen ausgewählter Orte untersucht welchen Einfluss Lage und Standortbedingungen auf die Zerstörung der jeweiligen Gebäude haben. Kapitel 5.4 beinhaltet eine statistische Auswertung der zuvor behandelten Kapitel.

Nahezu jede Publikation verwendet eine eigene Bezeichnung und unterschiedlich detaillierte Differenzierungen zur Definition der Schäden. Da man die verwendeten Schadensskalen schlecht vergleichen kann, wird in den folgenden Kapiteln auf die bezogene Schadensskala verwiesen und die gewählte Bezeichnung der Publikation übernommen.

### 5.1 Tsunamischäden bei Gebäudetypen unterschiedlichen Baumaterials

Kapitel 5.1 gibt einen kurzen Überblick über die Schäden an Bambus- und Holzgebäuden, Gebäuden aus Mauerwerk und Stahl- und Stahlbetongebäuden die durch die Tsunamis der Jahre 2004 und 2011 verursacht wurden. Suppasri et al. (2012 a) stellen allgemein fest, dass Stahlbeton- oder Stahlkonstruktionen grundsätzlich belastbarer gegenüber Tsunamiwellen sind als Holz- oder Klinkerkonstruktionen. Gebäude, bei denen die Etagenanzahl über 3 Etagen beträgt sind standsicherer als 1- bis 2-etagige. Die grundlegend zu erwartenden Schäden nach Baumaterialgruppen im Verhältnis zur Überflutungshöhe zeigt Abb. 5.1. Nach Shuto (1993) ist bereits bei Überflutungshöhen von 2 m davon auszugehen, dass Holzgebäude vollständig zerstört werden. Bei Ziegelsteinhäusern und Stahlbetongebäuden wird erst bei Überflutungshöhen von 8 m bzw. 16 m eine vollständige Zerstörung erwartet.

Inundation Depth (m)	1	2	3	4	6	8	9	16	
Wooden house	Some part damage		Completely damage						
Stony house	Safe		No report			Completely damage			
Reinforced Concrete Building	Safe		No report			Completely damage			
Effect of Wind (wave) Break Forest	Blocking drainage			No effect					

Abb. 5.1: Überflutungshöhe im Verhältnis zu Schäden an unterschiedlichen Bauweisen nach Shuto (1993) (Pomonis, et al., 2006)

### 5.1.1 Bambus- und Holzgebäude

Einfache Bambus- und Holzgebäude in Küstengebieten bilden in Entwicklungsländern die Gruppe der einfachsten und kostengünstigsten Bauart. Dagegen wurde die Holzbauweise in Japan, als Industrieland, nicht ausschließlich wegen geringer Baukosten, sondern auch unter dem traditionellen Aspekt beibehalten. In **Japan** wurden entlang der Sanrikuküste sämtliche Wohngebäude aus Holz zerstört, die sich innerhalb des Überflutungsgebietes befanden (s. Abb. 5.2).



Abb. 5.2: Wohngebiet in Taro, Iwate in Japan: a) vor dem Tsunami von 2011 (Internetquelle 54), b) unmittelbar nach dem Tsunami 2011 (Internetquelle 55), c) nach Beseitigung von Schutt (Internetquelle 56)

In **Indonesien** ist bei einer Überschwemmungshöhe von 1,5 m bis 2 m bereits von einer ~70-prozentigen Zerstörung bei Holz und Bambuskonstruktionen auszugehen (Reese, et al., 2007). Abb. 5.3 zeigt die Zerstörung von einem der typischen Wohntypen auf Java, einem Gebäude aus Holz- und Bambus.



Abb. 5.3: Zerstörung eines Wohngebäudes aus Bambus auf Java, Indonesien (Reese, et al., 2007)

In **Thailand** gab es vergleichsweise wenig dauerhafte Schäden ziviler Hauptinfrastrukturen. In **Patong Beach** waren beispielsweise überwiegend am Strand gelegene Konstruktionen betroffen, die in verhältnismäßig kurzer Zeit von einigen Wochen wieder in Betrieb genommen werden konnten (s. Abb. 5.4).



Abb. 5.4: Zerstörung von 1-geschossigen Holzgebäuden in Thailand (Saatcioglu, et al., 2005): a) und b) Kata Beach, c) und d) Patong Beach

Dennoch wurden insbesondere tiefliegende Küstenferienorte, Unternehmen und Privathäuser stark beschädigt, darunter auch Fischerdörfer wie **Baan Nam Kem**. In **Khao Lak**, einem beliebten Touristenort mit tief liegender Küstenebene, wurden besonders starke Zerstörungen durch eine sich die 1,5 km landeinwärts bewegende Bore verzeichnet. Dadurch wurden nahezu alle Holzkonstruktionen mit einigen Ausnahmen zerstört und als Schutt vom Wasser mitgerissen. Die meisten Holzgebäude in den Überschwemmungszonen in **Ko Phi Phi** wurden ebenfalls niedergerissen (s. Abb. 5.5).



Abb. 5.5: Zerstörung von Holzgebäuden auf Phi Phi Island, Thailand (Saatcioglu, et al., 2005): a), b), c) und d) verschiedene Ansichten von Küstenkonstruktionen

### 5.1.2 Gebäude aus Mauerwerk

Mauerwerksbauten sind neben Holzkonstruktionen die gängigste und günstigste Bauart für Wohnhäuser in Indien, Thailand, Sri Lanka und Indonesien. Es werden häufig keine genormten Baustoffe verwendet, sondern oftmals Materialien, die gegenwärtig vor Ort verfügbar sind. Wohngebäude werden in der Regel nicht durch Fachleute, sondern in Eigenregie errichtet. Dadurch erfüllen die üblichen Mauerwerksbauten in Küstengebieten keine in Industrieländern üblichen Baustandards und auch nicht die höheren Anforderungen an tsunamisichere Gebäude.

Bauweisen aus unbewehrtem Ziegelstein in **Thailand**, darunter eingeschossige Läden und Wohnhäuser auf Betongründungen hielten dem Tsunami ebenso schlecht stand, wie Holzkonstruktionen. Bei Gebäuden aus Ziegelstein mit Stahlbetonsäulen, die ebenfalls aus einer einschichtigen Ziegelsteinreihe mit doppelseitiger Verputzung bestanden, konnten geringere Schäden festgestellt werden. Die meisten Gebäude hatten zwei Etagen, wodurch bei Überschwemmungshöhen von 1,5 m bis 2 m nur leichte bis mäßige Schäden an der Konstruktion sichtbar waren, die behoben werden konnten. Überflutungshöhen von mehr als 3 m führten zu gravierenden Schäden (Reese, et al., 2007). Bei Betongebäuden mit ausgefachten Wänden aus Ziegelsteinen, ohne Möglichkeit das Wasser durch Wandöffnungen abfließen zu lassen, traten häufig Zerstörungen der Wände und an tragenden Gebäudeteilen auf. Es wurden zahlreiche Schäden durch Unterspülung der Fundamente verzeichnet, da die typisch thailändischen Gebäudefundamente aus 1 m flachen Einzelfundamenten bestehend, eine zu geringe Höhe aufwiesen (Dalrymple & Kriebel, 2005). In Abb. 5.6 sind zerstörte Mauerwerksgebäude in Thailand und Indonesien dargestellt.



Abb. 5.6: Zerstörung von Gebäuden aus Mauerwerk: a) Java, Indonesien (Reese, et al., 2007) b) Khao Lak, Thailand (Saatcioglu, et al., 2005), c) Kamala Beach, Thailand (Saatcioglu, et al., 2005), d) Banda Aceh, Indonesien (Saatcioglu, et al., 2005)

Nahezu alle Häuser, der vom Tsunami betroffenen Gebiete **Indiens** waren nicht konstruierte Gebäude, meist aus verputztem Mauerwerk mit Ziegelstein- oder Schilfwänden (Borreo,

2005). Laut der Regierung **Tamil Nadas in Indien** wurden ca. 135.000 Häuser, überwiegend verputzte Mauerwerke mit Ziegelstein- oder Schilfwänden, durch den Tsunami zerstört (Barenstein & Pittet, 2007).

An der Süd- als auch Ostküste **Sri Lankas** waren unmittelbar nach dem Tsunami 2004 von den Ziegelsteinbauten in den meisten Fällen nur noch Gründungen vorzufinden, teilweise waren noch einige intakte Gebäudeabschnitte sichtbar (Borreo, 2005). Insgesamt gesehen haben die meisten kostengünstigen Mauerwerksbauten in Küstenregionen **Sri Lankas**, darunter in den Städten Galle, Matara und Hambantota, den Tsunami nicht überstanden und wurden vollständig zerstört (Wijeyewickrema, et al., 2006) (s. Abb. 5.7). Auf die in Abb. 5.7 verwiesenen Schadensklassen wird in Kapitel 5.3 eingegangen.



Abb. 5.7: Zerstörung von Mauerwerksgebäuden in Sri Lanka (Pomonis, et al., 2006): a) Paiyagala, b) Kahawa, c) Kahawa, d) Peraliya, e) Peraliya, f) Peraliya, g) Paiyagala, h) Paiyagala, i) Unawatuna, j) Kahawa, k) Paiyagala, l) Kahawa

### 5.1.3 Stahl- und Stahlbetongebäude

Stahlbetongebäude wurden insgesamt durch Tsunamieinwirkungen am wenigsten beschädigt. In Japan konnten sich einige der Menschen auf die verfügbaren Evakuierungsgebäude retten. Einige Stahl- und Stahlbetonkonstruktionen haben allerdings versagt (s. Abb. 5.8. a, b und f).



Abb. 5.8: Stahlbetongebäude in Japan, die dem Tsunami standgehalten haben (Fraser, et al., 2012): a) 3-geschossiges Stahlgebäude des Crisis Management Departments, b) Stahlbetongebäude in Shiomi-cho in Minami-Sanriku, c) Matsubara Apartment und Evakuierungsgebäude in Minami-Sanriku, d) Shizugawa Krankenhaus in Minami-Sanriku, e) Grundschule und Evakuierungsgebäude in Arahama, f) Stahlgebäude in Yamamoto

Es wurden nicht nur explizit ausgewiesene Evakuierungsgebäude als Zufluchtsort genutzt (s. Abb. 5.8. c und e), sondern beispielsweise auch das Shizugawa Krankenhaus in Minami-Sanriku (s. Abb. 5.8. d).

Sie sind überwiegend mehrgeschossig gebaut, was sie in Bezug auf Überflutungshöhen resistenter macht, als die überwiegend 1-geschossig gebauten Wohnhäuser. In **Sri Lanka** wurden beispielsweise weniger Schäden an 2-geschossigen Häusern (s. Abb. 5.9 und Abb. 5.10) mit bewehrten Betonsäulen und -balken festgestellt (Wijeyewickrema, et al., 2006).



Abb. 5.9: Krankenhaus in Galle, Sri Lanka, erlitt lediglich mäßige Schäden (Pomonis, et al., 2006)

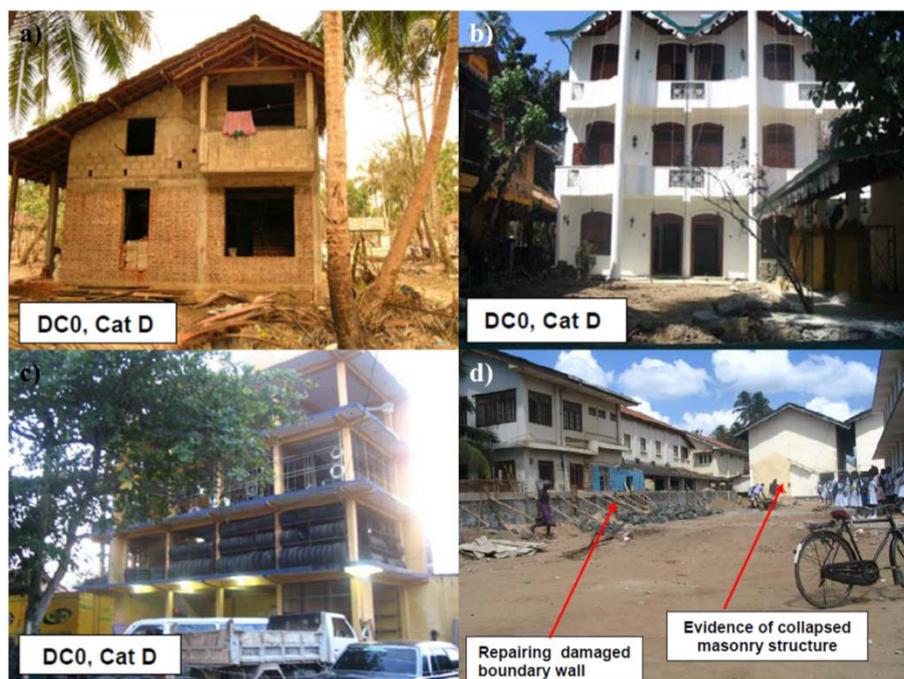


Abb. 5.10: Zerstörung von Stahlbetongebäuden in Sri Lanka (Pomonis, et al., 2006): a) Peraliya, b) Unawatuna, c) Galle, d) Matara

Die überwiegende Anzahl der Stahlbetonbauten in **Thailand** hat dem Tsunami standgehalten, obwohl sie nicht den Baustandards für tsunamisichere Bauweisen entsprochen haben. Dieser Umstand ist allerdings mehr auf das schwächere Erdbeben in Thailand im Vergleich zu den

anderen tsunamibetroffenen Ländern zurückzuführen (Leonard, et al., 2011). Erhöhte Gebäude konnten den Wellen ebenfalls standhalten, da durch die erhöhte Bauweise ein Passieren des Wassers unterhalb der Bodenplatte ermöglicht wurde, ebenso wie bei Gebäuden, deren Konstruktion das Abfließen des Wassers durch die 1. Etage zuließ. Dadurch entstanden an der Konstruktion selbst kaum Schäden (Dalrymple & Kriebel, 2005) (s. Abb. 5.11). Abb. 5.12 zeigt eine Moschee, die als einziges Gebäude in **Lambuuk Beach, Indonesien**, dem Tsunami standgehalten hat. Die Überflutungshöhe betrug 15 m.



Abb. 5.11: Zerstörung von Stahlbetonbauten: a) Khao Lak, Thailand (Rosetto, et al., 2006), b) Khao Lak, Thailand (Saatcioglu, et al., 2005), c) Phi Phi Island, Thailand (Saatcioglu, et al., 2005), d) Banda Aceh, Indonesien (Saatcioglu, et al., 2005)

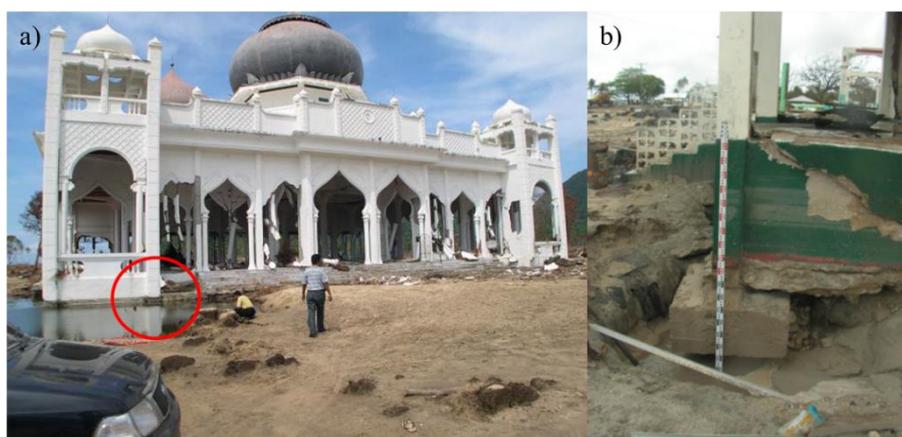


Abb. 5.12: Durch Unterspülung belastete Moschee in Lambuuk Beach, Indonesien (Leonard, et al., 2011)

## 5.2 Versagensursachen und Schadensbilder

In diesem Kapitel werden knapp verschiedene Versagensursachen beschrieben und Schadensbilder auf Basis von Fukuyama et al. (2011) gezeigt, die anhand der Schadensskala nicht differenziert werden. Oftmals haben auch mehrere Ursachen zu den Beschädigungen an Gebäuden geführt, die im Nachhinein nicht mehr differenziert werden können. Verschiedene Schadensarten lassen sich vor allem bei Stahl- und Stahlbetongebäuden feststellen, da vor allem Holz, aber auch Mauerwerksgebäude durch fehlende Bewehrung in sich nicht so stabil gebaut sind. Dadurch überstehen Holz- und Mauerwerksbauten viel geringere Belastungen und versagen viel schneller.

Unter einem **pfannkuchenartigen Einsturz** versteht man ein Zusammenbrechen über mehrere Etagen. Oftmals ist die Struktur noch nicht nach den geltenden Richtlinien konstruiert worden. Abb. 5.13 a zeigt ein 2-etagiges Stahlbetongebäude, dessen verbogene Säulenkonstruktionen der ersten Etage ein Anzeichen für durch den Tsunami verursachte Scherkräfte sind, die die Tragfähigkeit der seitlichen Belastungen überschritten haben. Ein **Zusammenbruch der 1.Etage** wird ebenfalls durch Biegekräfte verursacht. Durch niedrige Festigkeit und geringe Steifigkeit der Stahlsäulenrahmen in der ersten Etage kommt es zum Versagen (s. Abb. 5.13 b).



Abb. 5.13: Versagensursachen und Schadensbilder (Fukuyama, et al., 2011): a) pfannkuchenartiger Einsturz und b) Zusammenbruch der 1.Etage

Eine Zerstörung des Gebäudes durch **Kippen und Bewegung** wurde vor allem bei Gebäuden mit weniger als vier Etagen festgestellt. Ein Gebäude versagt durch Kippen, wenn ein durch Tsunamiwellen induziertes Kippmoment die Kraftkomponente des Gebäudeeigengewichts übersteigt (s. Abb. 5.14 a). Strömungen, die durch Tsunamiwellen hervorgerufen werden, verursachen Unterspülungen an den Fundamenten, die zu **Schiefstellungen oder treibenden Gebäuden** führen (s. Abb. 5.14 b).

Durch seitliche Kräfte sowie Unterspülungen können Gebäude **Rutschen** und einen anderen Standort einnehmen (s. Abb. 5.15 a). Wenn Tsunamiwellen auf Gebäudeöffnungen treffen und die gegenüberliegenden Öffnungen kleiner dimensioniert sind als die Eintrittsöffnungen, entstehen Strömungs- und Druckkräfte, die **Abbruchstellen an Wänden und Öffnungen** zur Folge haben (s. Abb. 5.15 b).

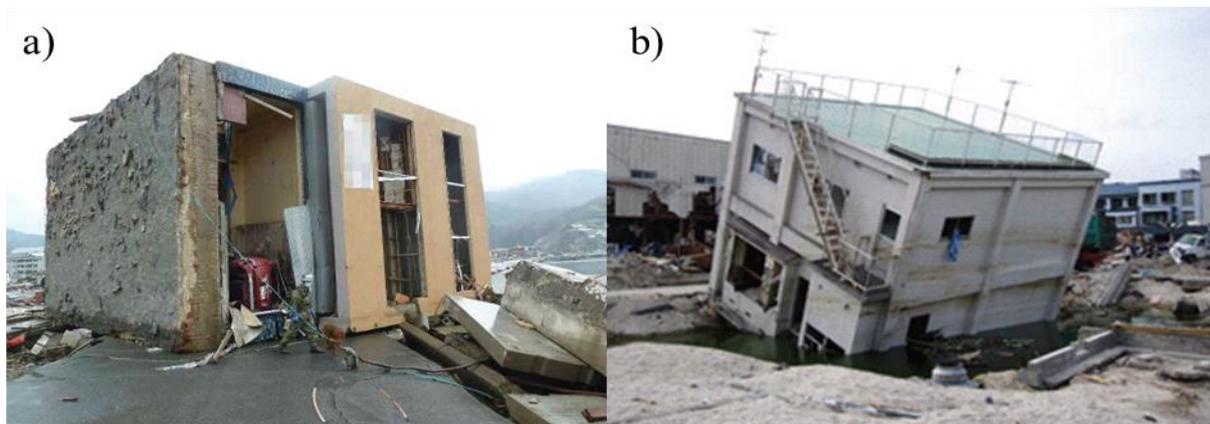


Abb. 5.14: Versagensursachen und Schadensbilder (Fukuyama, et al., 2011): a) Kippen und Bewegung und b) Schiefstellungen oder treibenden Gebäuden



Abb. 5.15: Versagensursachen und Schadensbilder (Fukuyama, et al., 2011): a) Rutschen und b) Abbruchstellen an Wänden und Öffnungen

**Schutttaufpralle** werden durch schwimmende Trümmerteile hervorgerufen, die auf Gebäude treffen (s. Abb. 5.16 a). Durch die Wucht von Tsunamiaufprallen können sämtliche **Verkleidungsmaterialien** des Innenausbaus und der Fassade von den Wellen als Schutt **mitgerissen** werden (s. Abb. 5.16 b).

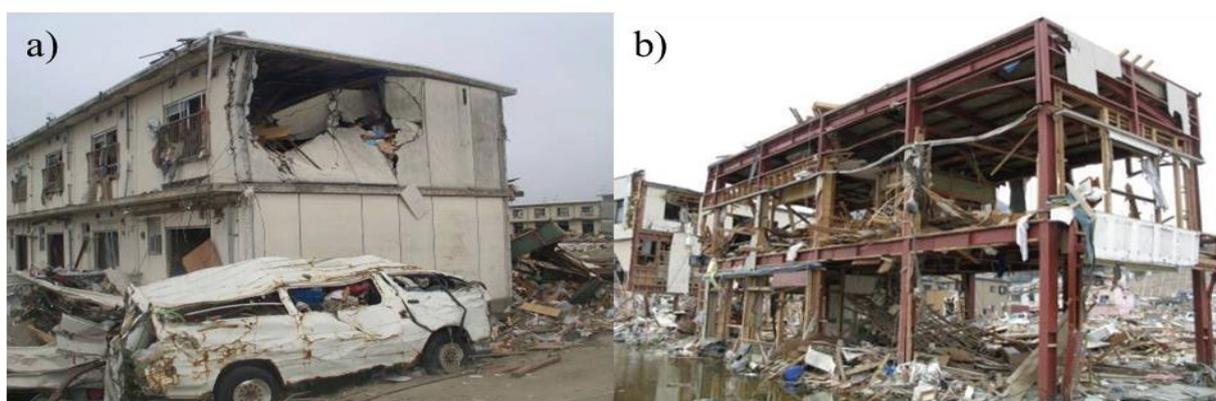


Abb. 5.16: Versagensursachen und Schadensbilder (Fukuyama, et al., 2011): a) Schutttaufpralle und b) mitgerissene Verkleidungsmaterialien

### 5.3 Zusammenhänge zwischen dem Zerstörungsgrad in Abhängigkeit von Lage und Standort der Gebäude

Anhand der Feldstudien an der Südwestküste Sri Lankas (Thotagamuwa, Unawatuna, Weligama) (Pomonis, et al., 2006) lassen sich Zusammenhänge zwischen dem Zerstörungsgrad in Abhängigkeit von der Lage zur Küste und dem verwendeten Baumaterial zeigen.

Beide Studien beziehen sich auf eine **Schadensskala**, die das Zerstörungsausmaß in 5 Klassen von D 0 bis D 4 unterteilt (s.

Tab. 8). Pomonis et al. (2006) unterteilen die untersuchten Gebäude Sri Lankas nach Art des verwendeten Baumaterials zusätzlich in weitere 5 Kategorien A bis E (s. Tab. 7), betrachten aber die Art der Zerstörung für alle Gebäudekategorien gleich, unabhängig von dem verwendeten Baumaterial. Fraser et al. (2012) unterteilen die Gebäudetypen Japans lediglich in 3 in Kategorien: Stahlbeton-, Stahl- und Holzgebäude, beschreiben aber den Schadensgrad für jede Kategorie individuell, dem Baumaterial entsprechend. Nachfolgend werden die Schäden in drei Städten Sri Lankas beschrieben, die besonders vom Tsunami betroffen waren.

Tab. 7: Gebäudekategorien nach Baumaterial (Pomonis, et al., 2006)

A	Holz und Leichtrahmenbauweise ( <i>Timber Light Frame Housing</i> )
B	Unbewehrte freistehende Mauerwerksbauten – schlechte Qualität ( <i>Unreinforced Masonry Detached Housing</i> )
C	Unbewehrte freistehende Mauerwerksbauten – gute Qualität ( <i>Unreinforced Masonry Detached Housing</i> )
D	Flache freistehende Stahlbetonbauten und kleine gewerbliche Gebäude ( <i>Low-rise Reinforced Concrete (RC) Detached Housing and Small Commercial Buildings</i> )
E	Mittelhohe Stahlbetonbauten und gewerbliche Gebäude ( <i>Mid-rise Reinforced Concrete (RC) Non-residential Buildings</i> )

Tab. 8: Schadens- und Intensitätsskala (Pomonis, et al., 2006)

	Stärke der Zerstörung	Art der Zerstörung (nach Pomonis et al.)	farbliche Markierung
DM0	Keine Beschädigung ( <i>No Damage</i> ),	keine sichtbaren Schäden	Blau
DM1	Geringfügige Beschädigung ( <i>Light Damage</i> ),	abgeplatzter Putz, kleine Risse, beschädigte Türen und Fenster	Grün
DM2	Mäßige Beschädigung ( <i>Moderate Damage</i> ),	Versagen oder Zusammenbruch von Wandabschnitten, Unterspülung an Gebäudeecken,	gelb
DM3	Bedeutende Beschädigung ( <i>Heavy Damage</i> ) und	Versagen oder Zusammenbruch von den meisten Wänden, starke Schiefstellung und Kippen der Gründung	Orange
DM4	Zusammenbruch ( <i>Collapse</i> ).	Vollständiger Bauschaden, Zusammenbruch großer Teile der sichtbaren Fundamente	Rot

### Thotagamuwa

Der Ort liegt im Südwesten Sri Lankas zwischen den beiden Städten Seenigama und Hikkaduwa. In dem Ort herrscht eine hohe Bebauungsdichte. Die überwiegende Anzahl der Häuser in dem untersuchten Gebiet gehörten der Kategorie B - unbewehrte Mauerwerksbauten, die schlecht konstruiert waren - an. Etliche Gebäude der Kategorie B, die sich etwa 30 m entfernt von der Küstenlinie befanden, erlitten mitunter starke Beschädigungen der Schadensklassen DM 3 und DM 4. Bei einer Entfernung von 40 m wurden bei Mauerwerksbauten nur noch geringfügige Beschädigungen (DM 1) festgestellt. Hinter der eingezeichneten 150 m entfernten Eisenbahnlinie wurden keine Beschädigungen registriert. Häuser der Kategorie C haben weniger Schäden als die der Kategorie B erlitten. Neben eingestürzten Wänden wurden die Zerstörungen vor allem durch Unterspülung hervorgerufen.

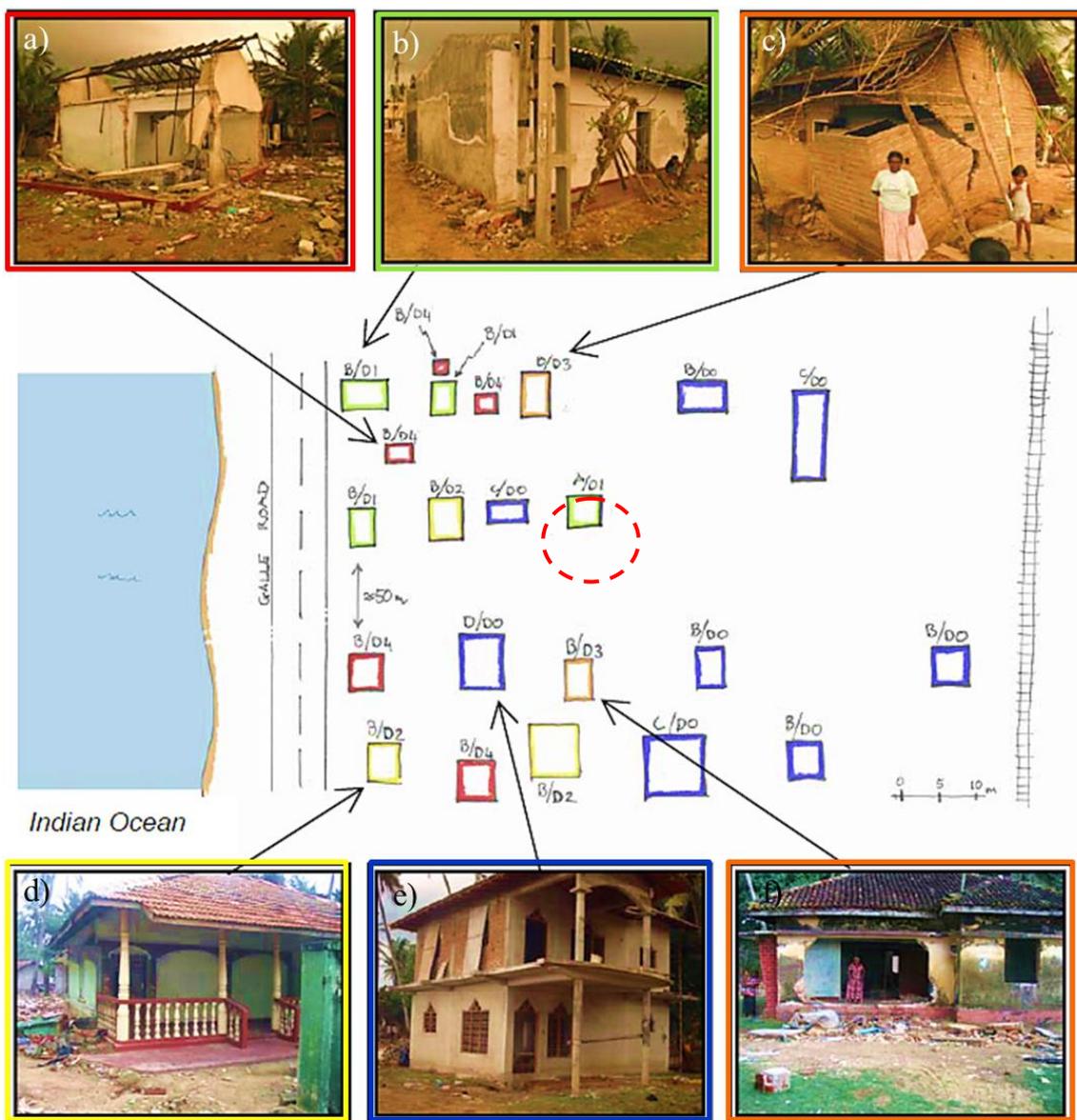


Abb. 5.17: Thotagamuwa (Pomonis, et al., 2006)

Abb. 5.17 zeigt einen Ausschnitt des untersuchten Gebietes: Bei Gebäuden der Kategorie B, die unmittelbar hinter der Straße gebaut wurden, erstreckt sich die Zerstörung von D1 - geringfügige Beschädigung bis D4 - Zusammenbruch. Das einzig dargestellte Holzgebäude (roter Kreis) könnte aufgrund der Lage hinter einem gut konstruierten Mauerwerksbau wenig Schaden erlitten haben. Gebäude, die über 60 m von der Küstenlinie entfernt waren, erlitten ebenso wie Gebäude der Kategorie C und D keine Beschädigungen.

### Unawatuna

Unawatuna liegt geographisch östlich von Galle. Die Küste des Ortes besteht aus flachen Sandstränden mit Kokospalmen und weist flache, dichte Vegetation am Boden auf. In Küstennähe sind eine Mischung aus 1 bis zu 3-etagigen Stahlbeton- und Plattenkonstruktionen zu finden.

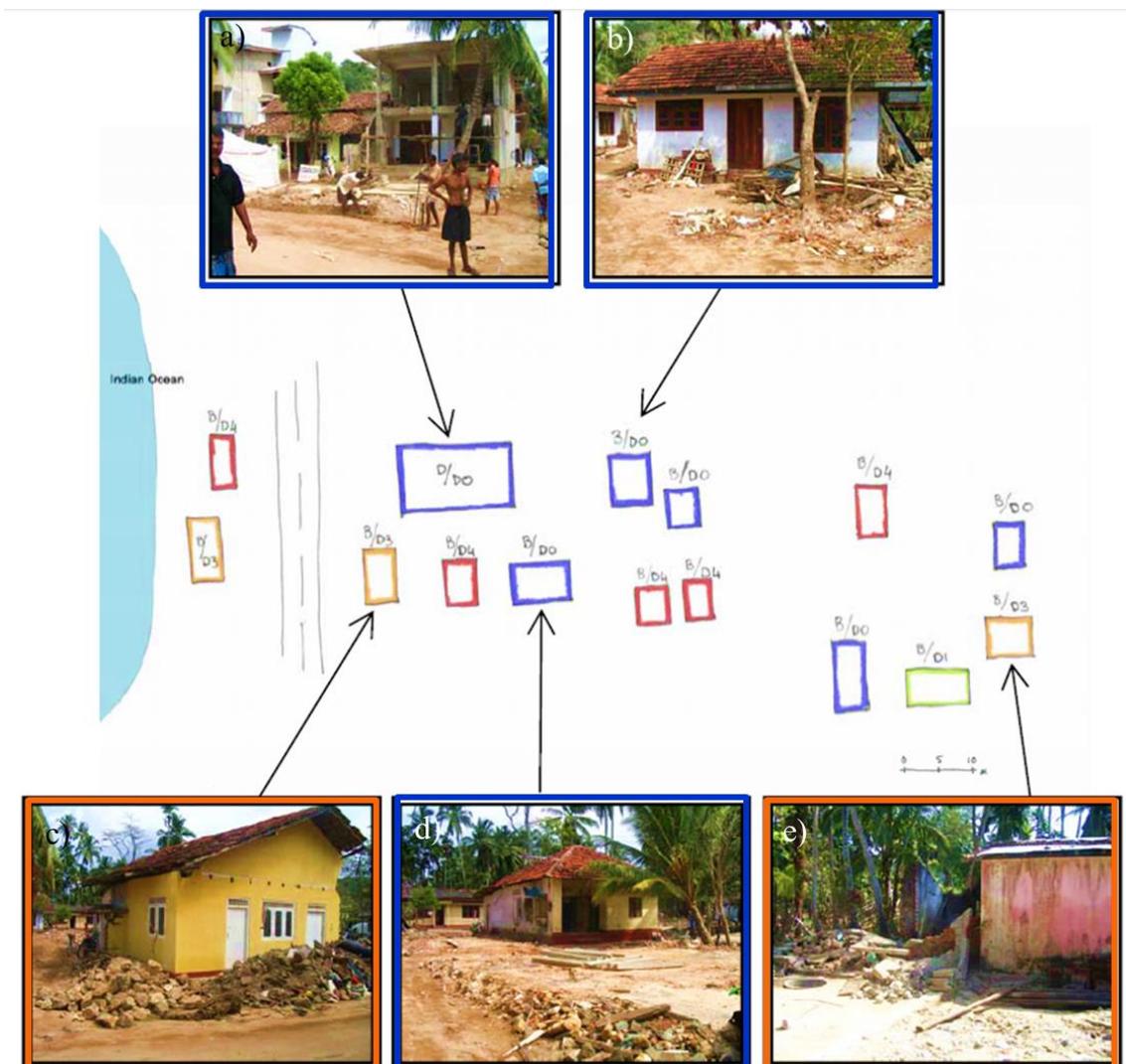


Abb. 5.18: Unawatuna

Die Wohnhäuser befinden sich meist nicht unmittelbar an der Küste. In Abb. 5.18 sind einige der untersuchten Gebäude und ihre Lage abgebildet. Die dargestellte Straße befindet sich 2 m

über dem Meeresspiegel. Die meisten Häuser gehören wie in Thotagamuwa der Kategorie B an. Die Schäden verringern sich mit Abstand zur Küste. Anhand der Vegetationsdichte konnte man feststellen, dass die Überflutung bis ca. 120 m landeinwärts ging. Auffällig ist, dass 8 der insgesamt 14 abgebildeten Mauerwerksbauten, unabhängig von ihrer Lage, großen Schaden erlitten (5 Gebäude DM 4 und 3 Gebäude DM 3), während 5 Gebäude keine Beschädigungen vorwiesen. Gebäude b) erlitt vermutlich keine Beschädigungen wegen seiner geschützten Lage hinter dem 2-etagigen Stahlbetongebäude a). Gebäude c) hat eine größere Frontwandfläche als Gebäude d).

### **Weligama**

Weligama liegt zwischen Galle und Matara. Die Bucht des Ortes diente als Anlegestelle für Fischer. Zwischen der Straße und dem Uferbereich sind spärliche Vegetation und einzelne Kokospalmen zu finden. Das Gelände befindet sich in Ufernähe, 2,5 m oberhalb des Meeresspiegels.

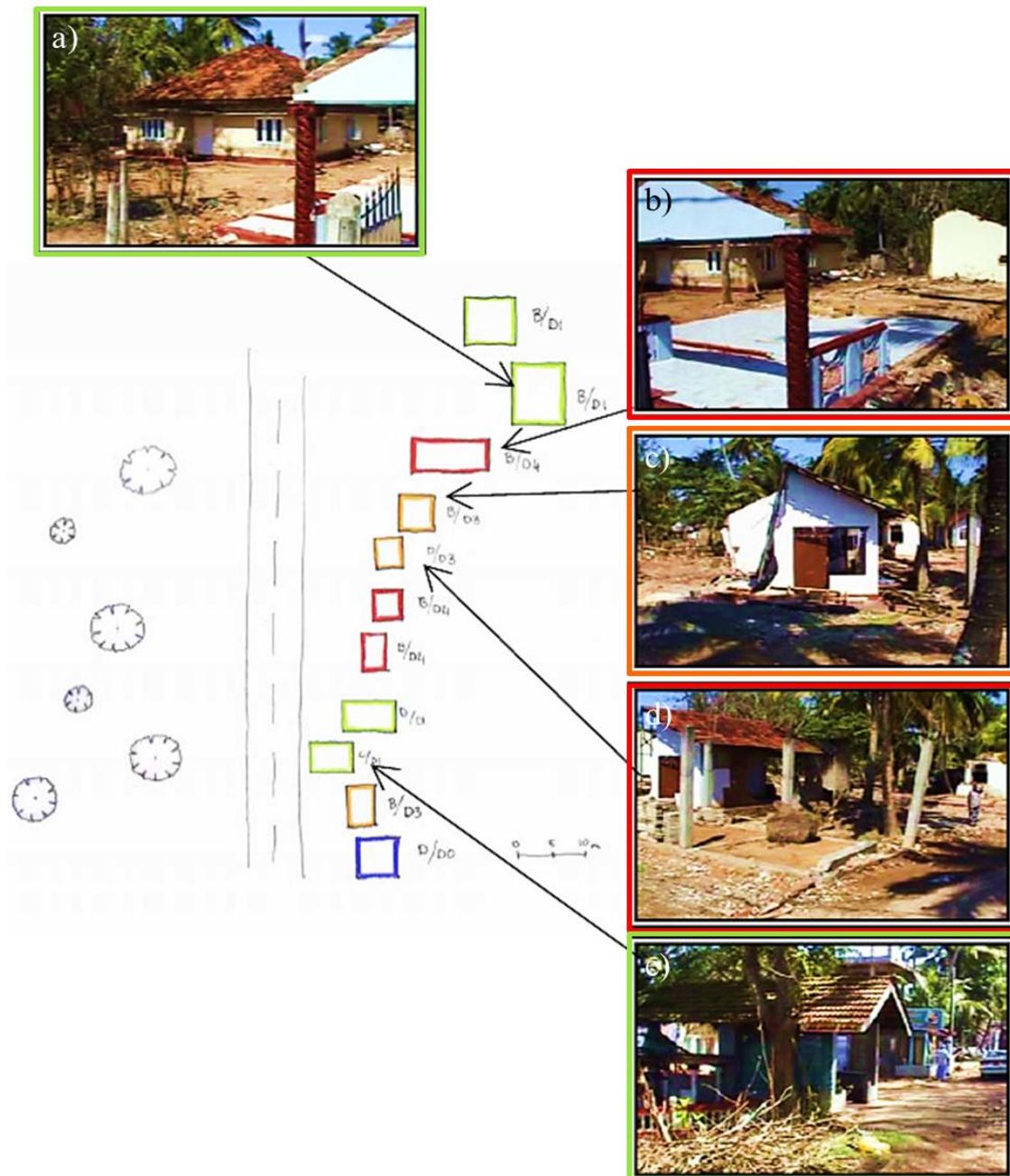


Abb. 5.19: Weligama

Die Größe und die Bauart der 11 untersuchten Gebäude reichten in Weligama im Gegensatz zu den beiden anderen untersuchten Orten von Kategorie B bis D. Dadurch wurden große Unterschiede des Zerstörungsgrades festgestellt. Die Abb. 5.19 zeigt, dass die beiden größten Gebäude im Norden nur geringfügig zerstört wurden (DM1), während von einem Gebäude in unmittelbarer Nähe nur noch die Grundmauern zu sehen sind. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass einige Mauerwerksgebäude den Tsunamiwellen widerstanden haben, während andere komplett zerstört wurden.

## 5.4 Statistische Auswertung der Gebäudeschäden

In diesem Kapitel werden statistische Erkenntnisse dargestellt. Suppasri et al. (2012) haben die Zerstörung **Japans 2011** unter vier wichtigen Gesichtspunkten auf Datenbasis des Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) untersucht: **dem Zerstörungsgrad aller Gebäude, dem Zerstörungsgrad je nach Baumaterial, der Etagenanzahl und der Küstentopographie.**

Tab. 9: Zerstörungsgrade nach MLIT (Suppasri, et al., 2012 a)

Zerstörungs- Grad (ZG)	Klassifizierung
1	Geringfügige Beschädigung ( <i>minor damage</i> )
2	Mäßige Beschädigung ( <i>moderate damage</i> )
3	Bedeutende Beschädigung ( <i>major damage</i> )
4	Komplette Beschädigung ( <i>complete damage</i> )
5	Zusammengebrochen ( <i>collapsed</i> )
6	Weggespült ( <i>washed away</i> )

Insgesamt wurden die Daten von 251.301 Gebäuden aus sieben Provinzen (Hokkaido, Aomori, Iwate, Miyagi, Fukushima, Ibaraki und Chiba) für die Statistiken verwendet. Die Beurteilung der Schäden erfolgte nach einer Skala von 1 bis 6 (s. Tab. 9) und setzt die Schadenswahrscheinlichkeit in Verhältnis zu der Überflutungshöhe.

In diesem Kapitel werden statistische Erkenntnisse dargestellt. Suppasri et al. (2012) haben die Zerstörung **Japans 2011** unter vier wichtigen Gesichtspunkten auf Datenbasis des Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) untersucht: **dem Zerstörungsgrad aller Gebäude, dem Zerstörungsgrad je nach Baumaterial, der Etagenanzahl und der Küstentopographie.**

Tab. 9Abb. 5.20 zeigt den **Zerstörungsgrad aller Gebäude**. Ab einem Überflutungslevel von 10 m ist der Höchstwert für alle Gebäudetypen erreicht.

### Zerstörungsgrad je nach Baumaterial

Anhand der Schadenskurven lässt sich deutlich zeigen, dass die Schadensanfälligkeit von Holz > Mauerwerk > Stahl > Stahlbeton ist. Es wurde festgestellt, dass der Stichprobenumfang an begutachteten Mauerwerk-, Stahl- und Stahlbetongebäuden ab Überflutungshöhen >15 m vergleichsweise gering waren. In einigen Fällen wurden die Daten von höheren Überflutungshöhen nicht berücksichtigt, um zu vermeiden, dass die Schadenswahrscheinlichkeit unterschätzt werden würde.

Abb. 5.21 zeigt, dass alle Holzgebäude ab einer Überflutungshöhe von 10 m weggespült wurden. Mauerwerksgebäude haben der Überflutung nur geringfügig besser standgehalten: 80 % bis 90 % sind zusammengebrochen oder wurden weggespült. Bei den Stahl- und Stahlbeton-

gebäuden lag der Anteil lediglich bei 30 % bis 60 % bzw. 50 % bis 80 %. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Zusammenhänge zwischen verwendetem Baumaterial und einem Versagen des Gebäudes. Stahl und Stahlbeton halten einem Versagen durch Zusammenbruch oder Wegspülen deutlich besser stand (Suppasri, et al., 2012 a) (Abb. 5.21).

### **Etagenanzahl**

Abb. 5.22 zeigt, dass die Unterschiede zwischen 1- und 2-etagigen Gebäuden innerhalb des verwendeten Baumaterials minimal sind. Sowohl bei Holz- als auch Stahlbetonkonstruktionen sieht man, dass Gebäude mit 3 oder mehr Etagen deutlich widerstandsfähiger gegenüber Überflutung sind. Bei Stahlbetongebäuden wird der Prozentsatz der zusammengebrochenen und weggespülten Gebäude bei einer Überflutungshöhe von 10 m, von 50 % bis 80 % (1 Etage) auf 20 % bis 50 % (3 oder mehr Etagen) reduziert. Bei Holzgebäuden wurde bei einer Überflutungshöhe von 4 m ebenfalls eine Verringerung von 60 % bis 80 % bei 1 Etage auf 20 % bis 60 % bei drei oder mehr Etagen, festgestellt. Die Schadenskurven veranschaulichen, dass Stahlbetongebäude Überflutungshöhen insgesamt deutlich besser standhalten. Der Zerstörungsgrad hängt also nicht alleine vom Material und der Überflutungshöhe ab, sondern auch von der Etagenanzahl.

### **Küstentopographie**

Abb. 5.23 und Abb. 5.24 vergleichen die Schäden an Stahlbeton-, Stahl-, Holz- und Mauerwerksbauten zwischen flacher Küstenlandschaft - grün dargestellt - und Riaküste - rot dargestellt - bezüglich weggespülter (ZG 6) und zusammengebrochener Gebäude (ZG 5). Riaküsten bestehen aus langen, tiefen Buchten, die an Gebirge gekoppelt sind. Sie sind in Japan entlang der Sanrikuküste zu finden, die die Präfekturen Iwate und den Norden der Präfektur Miyagi betreffen. Der Süden der Präfekturen Miyagi und die Präfektur Fukushima zählen zur flachen Küstenlandschaft.

Die durchschnittliche Schadenswahrscheinlichkeit bei gleicher Überflutungshöhe von 4 m ist für weggespülte (Abb. 5.23) und zusammengebrochene Gebäude (Abb. 5.24) je nach verwendetem Baumaterial unterschiedlich: Sie liegt für Stahlbeton bei 10 %, Stahl 35 %, Holz 25 % und Mauerwerk ebenfalls 25 %.

In der Stadt Ishinomaki sind beide Küstenformen vertreten, sodass die Schadenskurven aller Gebäudetypen für flache Küstenlandschaft und Riaküste gut zu vergleichen sind (Abb. 5.25).

Die Schadenswahrscheinlichkeit für weggespülte Gebäude bei einer Überflutungshöhe von 2 m unterscheidet sich deutlich: Während in flacher Küstenlandschaft nur 10 % der Häuser betroffen sind, sind an der Riaküste 40 % betroffen. Bei einer Überflutungshöhe von 5 m beträgt die Schadenswahrscheinlichkeit in (Abb. 5.25 a) lediglich 50 %. In (Abb. 5.25 b) beträgt die Schadenswahrscheinlichkeit 80 %. Die Wahrscheinlichkeitskurve der flachen Küstenlandschaft Ishinomakis sinkt deutlich ab einer Überflutungshöhe von 5 m bis 7 m, wohingegen der Graph der Riaküste bei Überflutungshöhen von 1 m bis 2 m deutlich ansteigt und ab 5 m abflacht. Die dargestellten Graphen zeigen, dass unterschiedliche Topographien ebenfalls Auswirkungen auf den Zerstörungsgrad haben. Für Gebäude, die sich an Riaküsten befinden, ist die Schadenswahrscheinlichkeit höher als in flachen Küstenlandschaften.

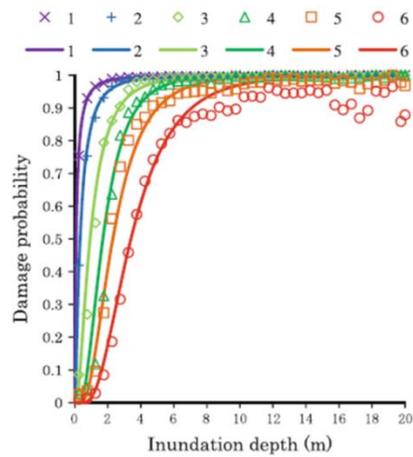


Abb. 5.20: Schadenskurve für alle erfassten Gebäude (Chiba bis Aomori) in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a)

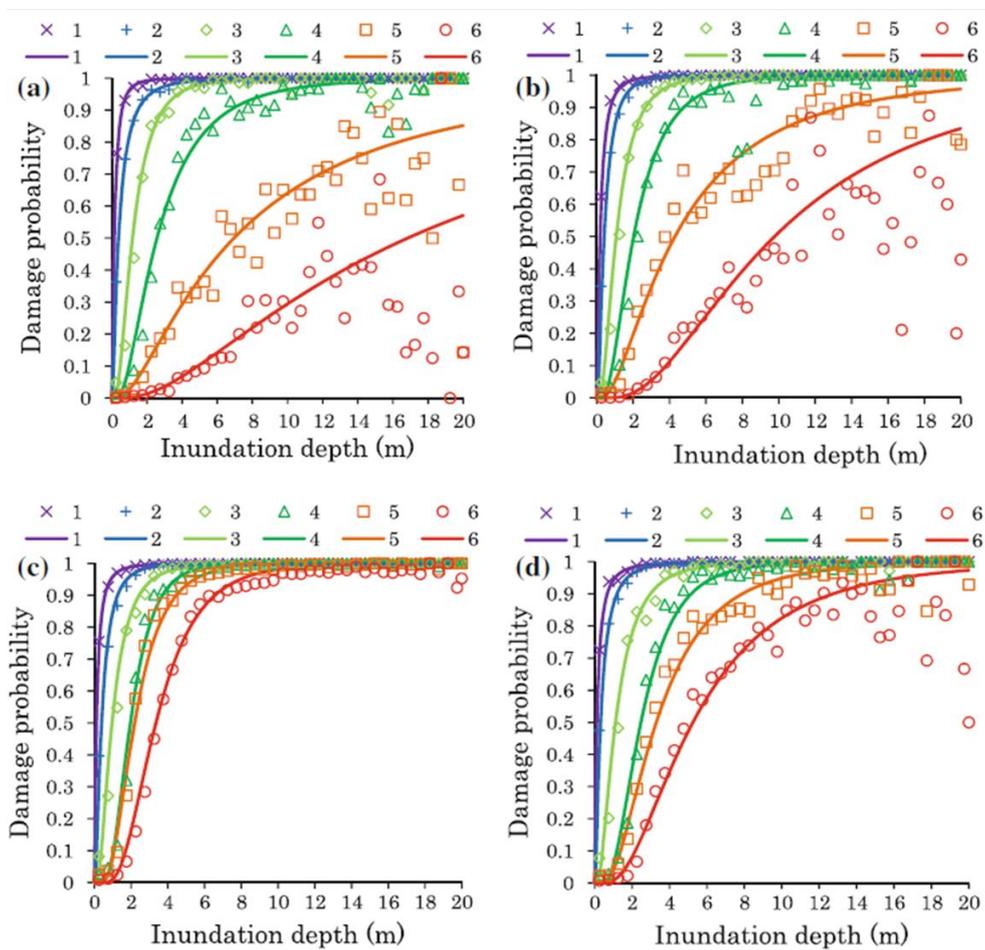


Abb. 5.21: Schadenskurve unterteilt nach Baumaterial von Chiba bis Aomori in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a): a) Stahlbeton, b) Stahl, c) Holz, d) Mauerwerk

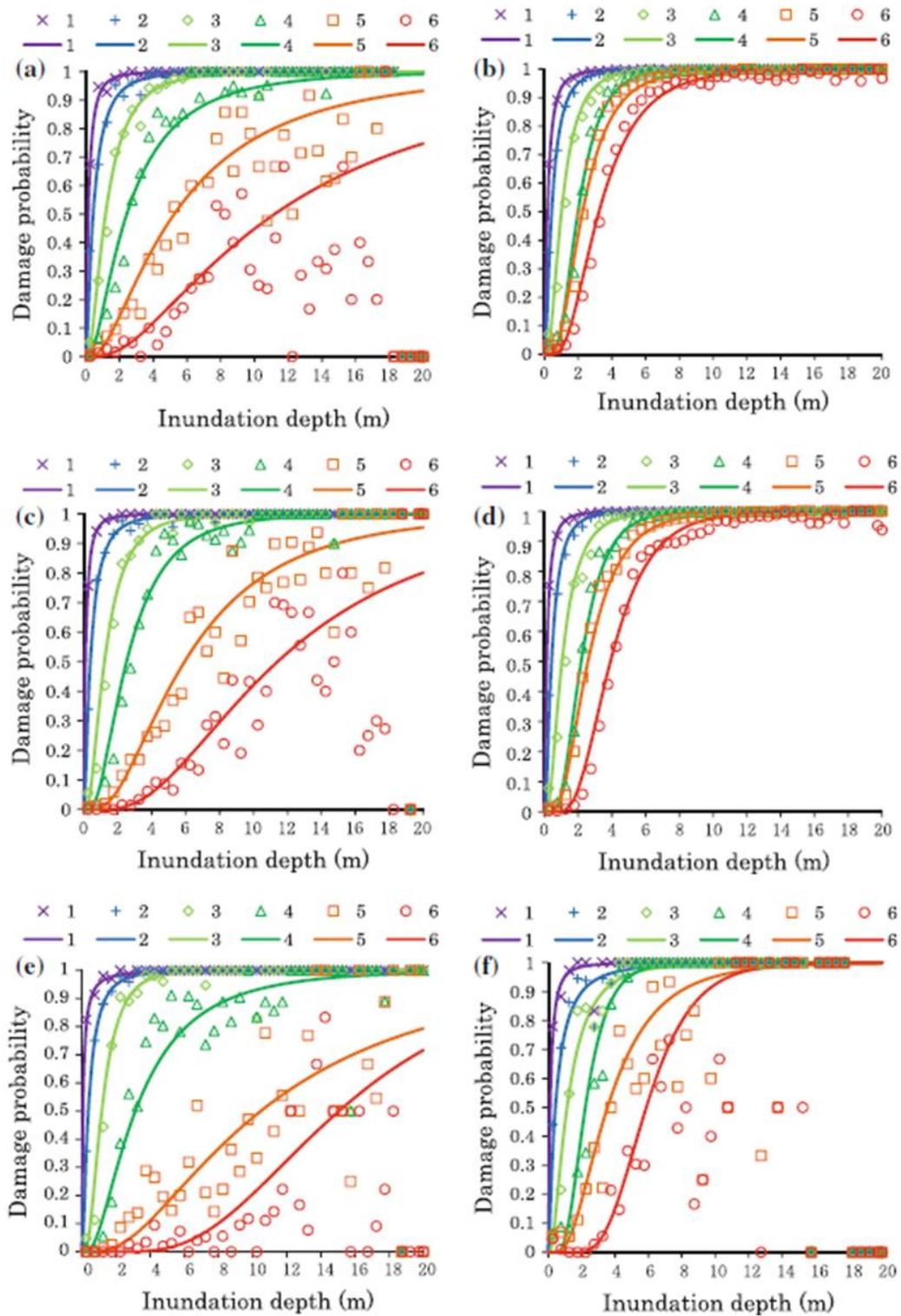


Abb. 5.22: Schadenskurve von Stahlbeton- und Holzgebäuden mit 1, 2 und 3 oder mehr Etagen von Chiba bis Aomori in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a): a) Stahlbeton-1 Etage, b) Holz-1 Etage, c) Stahlbeton-2 Etagen, d) Holz-2 Etagen, e) Stahlbeton-3 oder mehr Etagen, f) Holz-3 oder mehr Etagen

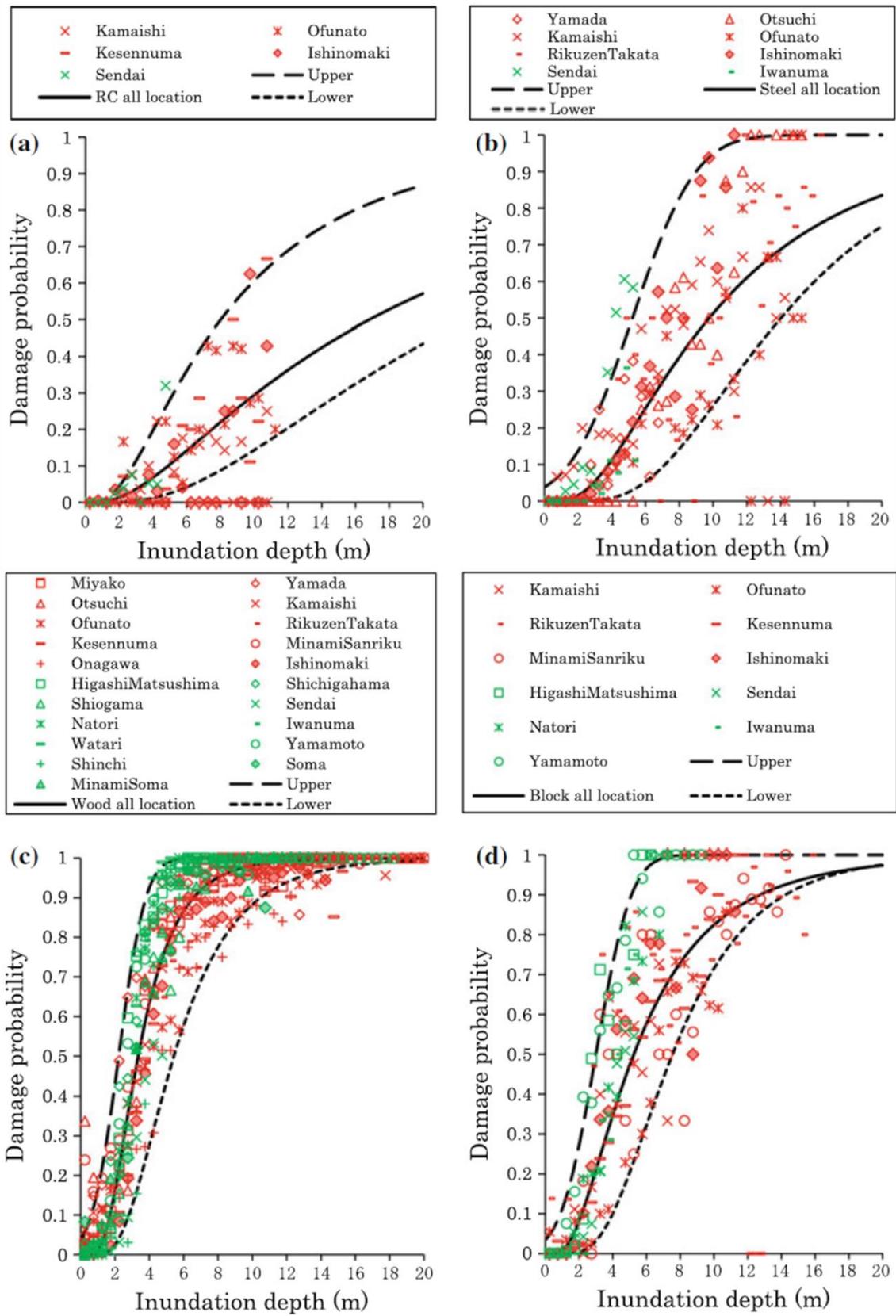


Abb. 5.23: Vergleich der Schäden zwischen flacher Küstenlandschaft und Riaküste bei weggespülten Gebäuden (ZG 6) in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a): a) Stahlbeton , b) Stahl, c) Holz, d) Mauerwerk

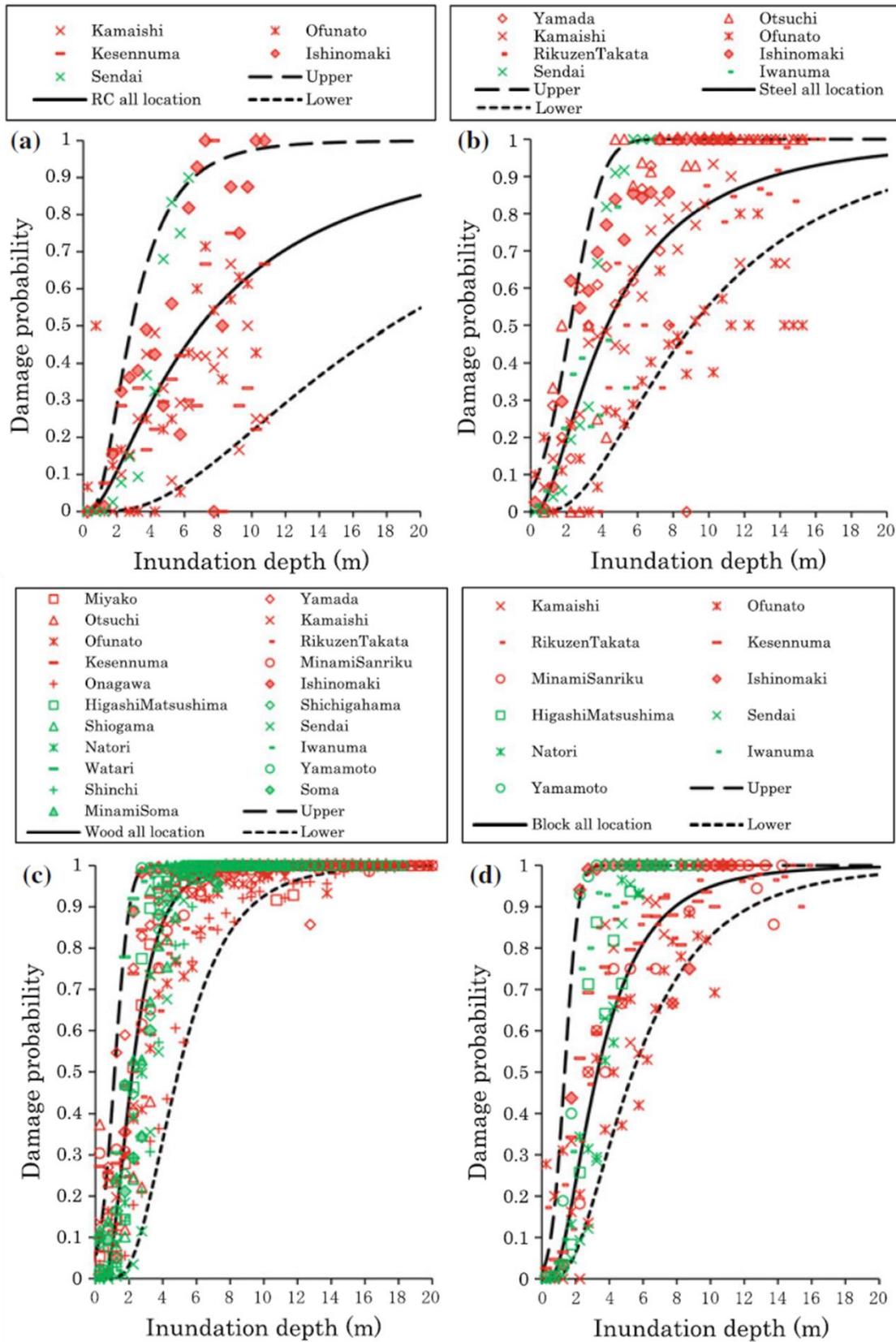


Abb. 5.24: Vergleich der Schäden zwischen flacher Küstenlandschaft und Riaküste bei zusammengebrochenen Gebäuden (ZG 5) in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a): a) Stahlbeton , b) Stahl, c) Holz, d) Mauerwerk

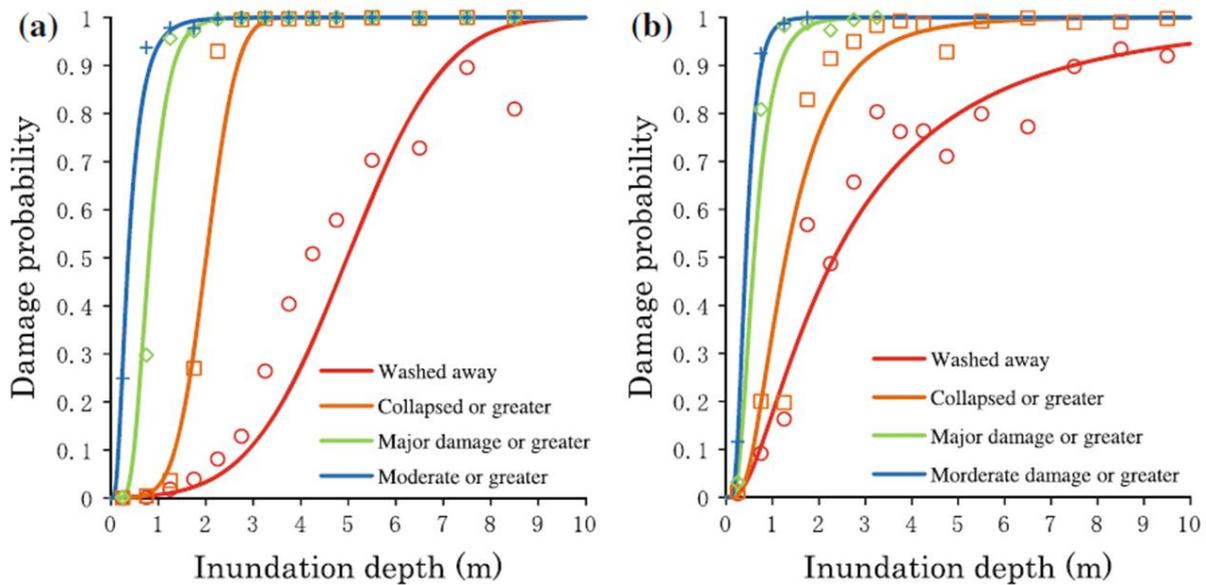


Abb. 5.25: Vergleich der Schäden in der Stadt Ishinomaki für alle Baumaterialien in Japan 2011 (Suppasri, et al., 2012 a): a) flache Küstenlandschaft, b) Riaküste

Abb. 5.26 vergleicht die Schäden in **Khao Lak in Thailand, Banda Aceh in Indonesien und Okushiri in Japan** ohne zwischen den verschiedenen Bauweisen zu differenzieren. Ausgangspunkt für die Auswertung waren deshalb typische Bauweisen der jeweiligen Städte.

In Khao Lak zählen überwiegend nicht konstruierte Holz- und Mauerwerksgebäude sowie einige Stahlbetongebäude zu den typischen Bauweisen. Die in Banda Aceh verwendeten Baukonstruktionen belaufen sich überwiegend auf nicht konstruierte Holz- und Mauerwerksgebäude. Die Gebäude in Okushiri wurden überwiegend aus Holz gefertigt.

Die Abb. 5.26 zeigt anschaulich, dass bei einer Überflutungshöhe von 5 m die Schadenswahrscheinlichkeit in Okushiri und Banda Aceh bei nahezu 100 % liegt, in Thailand bei 90 %. Bei geringerer Überflutungshöhe von 2 m sind die Konstruktionen in Banda Aceh deutlich widerstandsfähiger, die Schadenswahrscheinlichkeit liegt bei lediglich 20 %, in Khao Lak (40 %) und Okushiri (70 %).

### Indonesien Java

Traditionelle, unbewehrte Mauerwerksgebäude auf **Java in Indonesien** wurden bereits bei einer Überflutungshöhe von 2 m bis 2.50 m zerstört. Durch Verwendung von Stahlbetonsäulen konnte der Schaden um 33 % reduziert werden. Mehrstöckige Gebäude haben insgesamt gesehen sehr geringe Zerstörungen erlitten. 50 % aller unbewehrten Mauerwerksbauten in **Sri Lanka** waren nach einer Überflutungshöhe von 3 m unbrauchbar und 90 % nach 5 m. Auf Java erlitten  $\leq 20$  % der Mauerwerksgebäude mit Stahlbetonsäulen, die geschützt standen, Beschädigungen, während die Schäden an freistehende Gebäude 40 % betragen (Abb. 5.27).

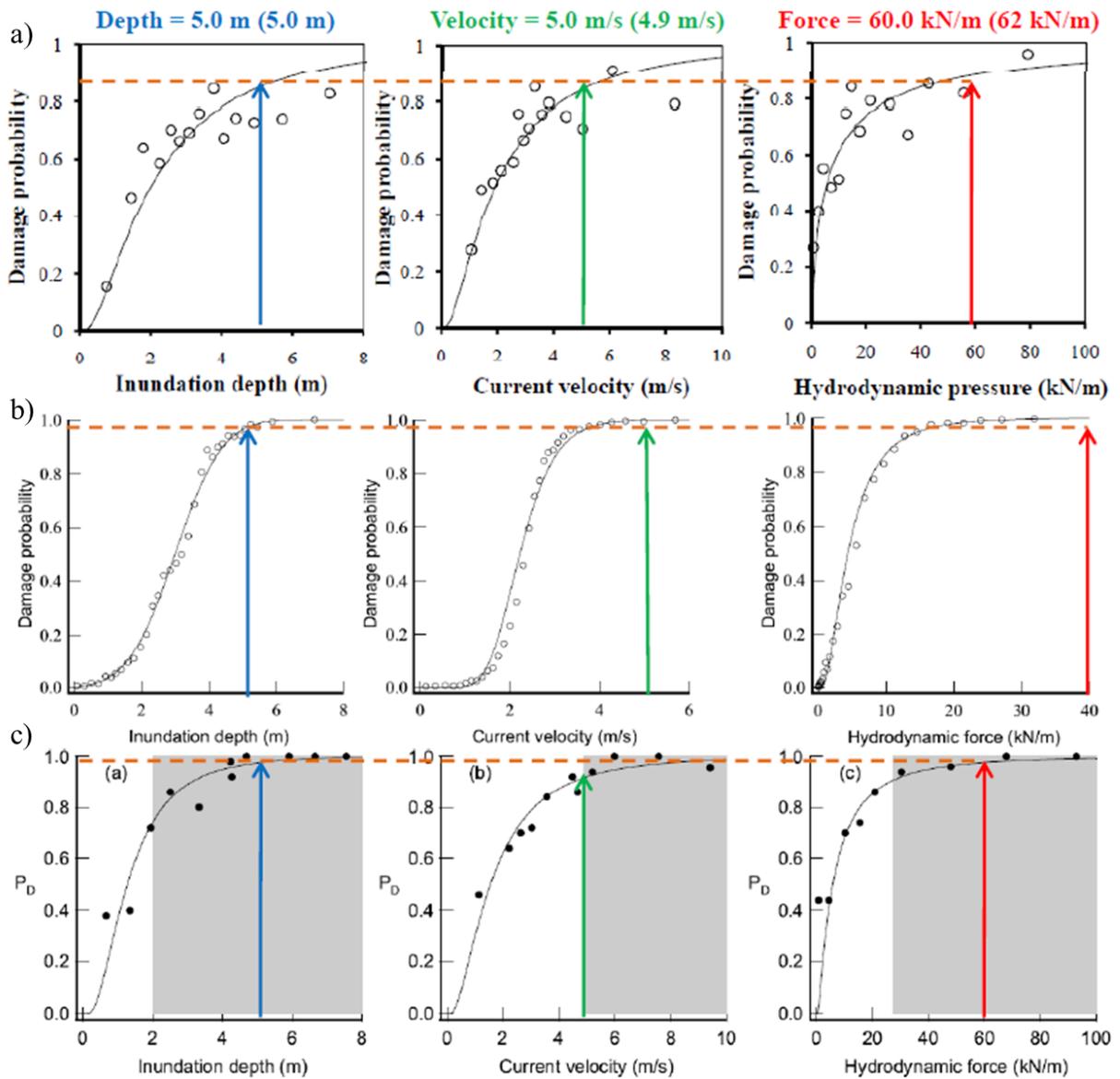


Abb. 5.26: Schadensanfälligkeit verschiedener Bauweisen und Städte im Vergleich: a) Khao Lak (Thailand), b) Banda Aceh (Indonesien), c) Okushiri (Japan)

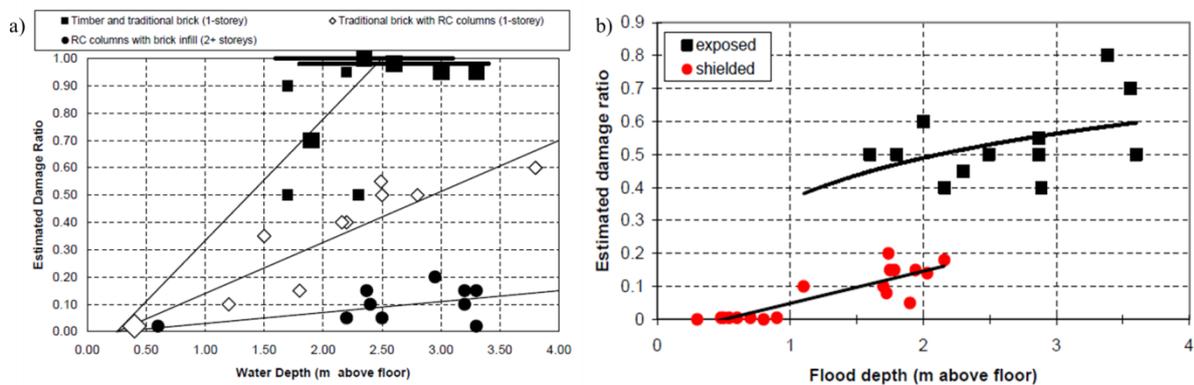


Abb. 5.27: Schadenskurve von Gebäuden in Java, Indonesien: a) Vergleich von drei ortstypischen Bauweisen, b) Vergleich von geschützten mit freistehenden Gebäuden

## 5.5 Zusammenfassung

Die Auswertung diverser Feldstudien in Kapitel 5.1 hat ergeben, dass **Stahlbetongebäude** von allen Baumaterialarten am belastbarsten gegenüber Tsunamiwellen sind. **Stahlgebäude** sind widerstandsfähiger als Mauerwerkskonstruktionen. Die Widerstandsfähigkeit von **Holzgebäuden** in Japan ist mit den **Mauerwerkskonstruktionen** in Thailand, Indonesien, Indien und Sri Lanka gleichzusetzen. **Bambus- und Holzgebäude** in den Anrainerstaaten des Indischen Ozeans waren deutlich schadensanfälliger. Der Großteil der **Wohngebäude** in allen erwähnten Ländern sind Leichtbauweisen aus Ziegelstein oder Holz und wurden größtenteils komplett zerstört. Hinzu kommt, dass viele Wohnhäuser mit Ausnahme Japans in Eigenregie, von Laien ohne Fachkenntnisse oder Baupläne errichtet wurden. In Thailand haben Überflutungshöhen von 1,5 m bis 2 m nur leichte bis mäßige Schäden an **Mauerwerksgebäuden** hervorgerufen. Dagegen wird die Zerstörungsrate von **Holz und Bambuskonstruktionen** in Indonesien bei gleicher Überflutungshöhe auf ca. 70 % geschätzt. **Öffentliche Gebäude mit Bewehrung** und ausgewiesene **Evakuierungsgebäude** in Japan wiesen deutlich geringere Schäden als Wohngebäude auf. Die in Kapitel 5.1.3 dargestellten Schäden an **Stahl- und Stahlbetonkonstruktionen** in Japan sind deutlich schwerwiegender, als beispielsweise in Sri Lanka. Das zeigt, dass der Zerstörungsgrad der Gebäude neben dem Baumaterial auch von der Stärke des Tsunamiaufpralls abhängt.

Die in Kapitel 5.2 vorgestellten Versagensursachen an Stahl- und Stahlgebäuden veranschaulichen, dass die Verwendung von widerstandsfähigerem Baumaterial alleine nicht ausreichend ist, sondern die Konstruktionsqualität ebenfalls gewährleistet werden muss.

Die Annahme, dass Gebäude, die mit einer geringeren Wandfläche zur Küste zeigen weniger zerstört werden, konnte anhand der beschriebenen Studie in Kapitel 5.3 nicht bestätigt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass Gebäude die im Schutz eines gut konstruierten und möglicherweise mehretagigen Hauses stehen, weniger zerstört werden.

Die abgebildeten Statistiken in Kapitel 5.4 haben veranschaulicht, dass es außer der Verwendung von **widerstandsfähigerem Baumaterial, guter Konstruktionsqualität** und der **Stärke des Tsunamiaufpralls** noch weitere Faktoren gibt, die sich auf den Zerstörungsgrad auswirken. Dazu zählen die **Etagenanzahl der Gebäude** und die **Küstentopographie**. Bei Vergleich von 1-, 2- und 3- oder mehretagigen Gebäuden wurde festgestellt, dass die Schadensanfälligkeit mit steigender Etagenanzahl, sowohl bei Holz als auch Stahlbetongebäuden abnimmt. Die Gegenüberstellung diverser Küstenstädte Japans hat ergeben, dass unterschiedliche Topographien ebenfalls Auswirkungen auf den Zerstörungsgrad haben. Für Gebäude, die sich an Riaküsten befinden, ist die Schadenswahrscheinlichkeit höher als in flachen Küstenlandschaften.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel beinhaltet eine abschließende kritische Zusammenfassung der neuen Strategien zum Aufbau der durch Tsunamis zerstörten Gebiete, den neuen Richtlinien zu tsunamisicheren Bauweisen und der Städteplanung, sowie Empfehlungen für das weitere Vorgehen.

### 6.1 Kritische Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die üblichen Bauweisen in tsunamigefährdeten Ländern vorgestellt, Tsunamibelastungen auf Gebäuden betrachtet, sowie die ermittelten Tsunamischäden auf Gebäude der Tsunamis 2004 und 2011 erläutert. Anhand dieser Grundlage können sowohl die neuen Strategien des Wiederaufbaus der Städte, als auch die neuen Richtlinien und Stadtplanungskonzepte bewertet werden.

Die in Kapitel 3.2 genannten Richtlinien finden sich teilweise in den vorgestellten Stadtplanungskonzepten wieder. Die meisten Konzepte konzentrieren sich allerdings auf die Erstellung und Umstrukturierung eines neuen Raumkonzeptes. Die Orientierung und Ausrichtung der Gebäude zur Küste ist beispielsweise in den Stadtplanungskonzepten Japans nicht vorhanden. Positiv ist die in Japan vorgesehene Erhöhung des Baugrundes und neue Lage der Wohngebiete in einiger Entfernung zur Küste zu bewerten. Dadurch bleibt einerseits mehr Zeit für eine Evakuierung und andererseits werden die Wohngebäude erst bei immenserer Überflutungshöhen beschädigt. Da die Wohnhäuser weiterhin als Holzrahmenbauweise gefertigt werden, sind sie zugleich erdbebensicher durch die Leichtbauweise, als auch tsunamisicher durch die Erhöhung des Baugrundes. Dieser Aspekt ist besonders wichtig, da Tsunamis zu 90 % durch starke Erdbeben verursacht werden.

Die in den Richtlinien beschriebene Einteilung in Zonen ist oftmals aufgrund der hohen Bevölkerungs- und Bebauungsdichte nicht umsetzbar. Eine Alternative zu dieser Problematik greift das Stadtplanungskonzept für Chile auf. Es sieht vor, nur die oberen Etagen als Wohnraum zu nutzen, wodurch im Erdgeschoss Freiflächen entstehen, die den Durchfluss von Wasser und schwimmendem Schutt gewährleisten. Für Thailand, Indonesien, Indien und Sri Lanka konnten keine vom Umfang vergleichbaren Stadtplanungskonzepte gefunden werden. Allerdings hat die Regierung Sri Lankas die Erlaubnis erteilt touristische Anlagen an den Küsten zu errichten und ein Verbot der Ansiedlung von Neubauten an der Küste ausgesprochen, wodurch der Bevölkerung die Lebensgrundlage genommen wurde. Grundsätzlich sollte darauf geachtet werden, dass keine Konflikte zwischen den einzelnen Nutzungsansprüchen entstehen, wie es in Sri Lanka der Fall war. Die unter Kapitel 3.4 vorgestellten wiederaufgebauten Wohnhäuser durch NGOs sind zwar konstruktiv hochwertiger gebaut, aber nicht zwangsläufig tsunamisicher.

Im Laufe dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass trotz zahlreich vorliegender Richtlinien zu tsunamisicheren Bauweisen, als auch einiger guter Stadtplanungskonzepte große Unterschiede zwischen den theoretischen Stadtplanungskonzepten und der praktischen Umsetzung, vor allem in den Entwicklungsländern bestehen. Abgesehen von einigen neuen Evakuierungsge-

bäuden in Phang Nga und Banda Aceh sind die Neubauten in den Entwicklungsländern nicht als tsunamisicherer zu bezeichnen. Insgesamt sind in den Entwicklungsländern geringfügige Fortschritte erkennbar die Sicherheitsvorkehrungen in tsunamigefährdeten Regionen zu erhöhen. Es sollten deshalb alternative Konzepte, wie beispielsweise die Nutzung der zahlreich vorhandenen Moscheen in Padang, Indonesien, weiterverfolgt werden, da erst ein Netz aus mehreren Evakuierungsgebäuden die nötige Kapazität bietet und von jedem Standort aus gut erreichbar ist. Außerdem werden für die Verbesserung vorhandener Strukturen weniger finanzielle Mittel und kein rar vorhandener Baugrund benötigt. Ein gut ausgebautes Netz an Evakuierungsgebäuden ist notwendig, zumal die Wohnhäuser der Bevölkerung nicht als tsunamisicher zu bewerten sind. Eine Doppelnutzung von Evakuierungsgebäuden, wie bereits in Japan etabliert, im Alltag als öffentliches Gebäude und im Notfall als Zufluchtsort, stellt die wirtschaftlichste Nutzungen dar.

## 6.2 Ausblick

Um die Frage „Wie sollten tsunamisichere Bauwerke beschaffen sein und konstruiert werden?“ detaillierter beantworten zu können, sollte eine größerer Umfang an Gebäuden und Versuchsstudien untersucht werden. In Kapitel 4.3 wurden beispielsweise nur zwei Studien verglichen. In den Studien sollten künftig unterschiedliche Belastungskombinationen getestet werden. Aufprall und Druckwellenkräfte wurden in den meisten Versuchsreihen beispielsweise vernachlässigt.

Innovative Projekte zum Wiederaufbau und tsunamisicheren Bauweisen sind noch nicht ausreichend in Form von Versuchsreihen getestet und erprobt worden. Zu diesen Projekten sollten künftig Versuchsreihen durchgeführt werden.

## Literaturverzeichnis

### Forschungsarbeiten und Berichte

Iwate Prefecture, 2011. Iwate Prefecture Great East Japan Earthquake and Tsunami Reconstruction Plan-Basic Reconstruction Plan.

ADPC, 2006?. The Economic Impact of the 26 December 2004 Earthquake & Indian Ocean Tsunami Thailand. *Asian Disaster Preparedness Center*, [http://www.adpc.net/maininforesource/dms/thailand\\_assessmentreport.pdf](http://www.adpc.net/maininforesource/dms/thailand_assessmentreport.pdf).

Anon., kein Datum Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis.

ATEP, 2006-2010. Visual Aid - Tsunami Sea Walls. *Alaska Tsunami Education Program*, [http://www.aktsunami.org/lessons/58/unit8/atep\\_58\\_StructuralCountermeasures\\_VA.pdf](http://www.aktsunami.org/lessons/58/unit8/atep_58_StructuralCountermeasures_VA.pdf).

Barenstein, J. D. & Pittet, D., 2007. Post-disaster housing reconstruction Current trends and sustainable alternatives for tsunami-affected communities in coastal Tamil Nadu. *Institute for Applied Sustainability to the Environment*.

Berrios, L. et al., 2005. tsunami-safe(r) house - a design for the prajnopaya foundation. <http://senseable.mit.edu/tsunami-prajnopaya/pdfs/SafeRhouse.pdf>.

Boen, T., 2006. RECONSTRUCTION OF HOUSES IN ACEH, TWENTY MONTHS AFTER THE TSUNAMI OF DEC 26, 2004.

Bormann, P., 2002. Was ist die Magniude und was ist die Intensität eines Erdbebens?, GFZ Potsdam. *GFZ Potsdam*.

Bormann, P., 2008 a. Infoblatt Tsunami, GFZ Potsdam.

Bormann, P., 2008 b. Merkblatt Tsunami, GFZ Potsdam.

Borreo, 2005. The Great Sumatra Earthquake and Indian Ocean Tsunami of December 26, 2004.

BRI, N. u., 2011. Summary of the Field Survey and Research on "The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake" (the Great East Japan Earthquake)7. Damage to Buildings in Inundation Areas by Tsunami. *National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) Building Research Institute (BRI)*.

Brückner, H. & Brill, D., 2009. Der Tsunami von 2004:fünf Jahre danach, Geographische Rundschau, Heft 12, S. 4-10.

Budiarjo, A., 2006. Evacuation Shelter Building Planning for Tsunami-prone Area; a Case Study of Meulaboh City Indonesia. *International Institute for Geo-Information science and esrth observation Enschede, Netherlands*.

- Costa, R., 2011. IMPACT OF TSUNAMI RISK MITIGATION IN URBAN AREAS. p. 70.
- Cuypers, 2004. *Breakwater stability under tsunami attack*, s.l.: s.n.
- Dalrymple, R. A. & Kriebel, D. L., 2005. Lessons in Engineering from the Tsunami in Thailand. *The Bridge*.
- FEMA-P646, 2008. Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis.
- Fraser, S. et al., 2012. Tsunami damage to coastal defences and buildings in the March 11th 2011 Mw 9.0 Great East Japan earthquake and tsunami.
- Frisch, W. & Meschede, M., 2011. *Plattentektonik-Kontinentverschiebung und Gebirgsbildung, 4.Auflage*. s.l.:s.n.
- Fujita, T., 2012. Tsunami impacting Eastern Japan and Preparedness for Extraordinary Natural Disaster.
- Fukuyama, H. et al., kein Datum STRUCTURAL DESIGN REQUIREMENT ON THE TSUNAMI EVACUATION BUILDINGS.
- Fukuyama, H. et al., 2011. CATEGORIZATION OF DAMAGE TO BUILDINGS CAUSED BY THE 3.11 TSUNAMI.
- Hyndman, D. & Hyndman, D., 2005. Tsunami: The Great Wave. In: s.l.:s.n.
- Inagaki, S. & Saito, R., 2012. Japan nach dem Tsunami - Wiederaufbau in Rikuzentakata. *Meiji University, Urban Planning Laboratory*.
- Kopp, H. & Weinrebe, W., 2009. Kopp,H.; Ursachen von Tsunamis, Geographische Rundschau, Heft 12, S. 20-26.
- Kujawski, G. R., 1972. *Traditionelles Wohnhaus - Japan*, s.l.: s.n.
- Lauterjung, J., Münch, U. & Rudloff, A., 2009. Geotechnik im Dienst der Menschheit, Geographische Rundschau, Heft 12, S. 36-41.
- Leonard, G. P. et al., 2011. Scoping study for evaluating the tsunami vulnerability of New Zealand buildings for use as evacuation structures. *GNS Science Consultancy Report 2011/36*.
- Levin, B. & Nosov, M., 2010. *Physics of Tsunamis*. s.l.:s.n.
- Meyyappan, P., Sekar, T. & Sivapragasam, C., 2013. Investigation on Behaviour Aspects of Tsunami Resistant Structures-An Experimental Study. *Disaster Advances, Vol.6(2) February 2013*.
- MLIT, 2011. WHITE PAPER ON LAND, INFRASTRUCTURE,TRANSPORT AND TOURISM IN JAPAN. *Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism* .
- Murao, O. & Nakazato, H., 2010. Vulnerability functions for buildings based on damage survey data in Sri Lanka after the 2004 Indian Ocean Tsunami.

- Nistor, I., Palermo, D., Cornett, A. & Al-Faesly, T., 2010. *Experimental and numeral modeling of Tsunami loading on structures*, s.l.: s.n.
- Nouri, Y., 2008. The Impact of Hydraulic Bores and Debris on Free Standing Structures.
- NTHMP, 2001. Designing for Tsunamis - Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards. *National Tsunami Hazard Mitigation Program*.
- Ogasawara, T., Matsubayashi, Y. & Sakai, S. Y. T., 2012. characteristics of the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami and its impact on the northern Iwate coast. *u.a. Department of Civil and Environmental Engineering*.
- Okada, T. et al., 2005. Structural Design Method of Buildings for Tsunami Resistance. *The Building Letter, Nov., 2004 The Building Center of Japan - Building Technology Re-search Insti.*
- Oumeraci, H., 2010. Tsunamis-Eine Einführungsvorlesung.
- Palermo, D. & Nistor, I., 2008. Tsunami-Induced Loading on Structures. *STRUCTURE Magazine, März*.
- Palermo, D. & Nistor, I., 2008. Understanding Tsunami risk to structures: A Canadian perspective. *Science of Tsunami Hazards Vol 27, No. 4.*
- Patel, D. B., Patel, D. B. & Pindoria, K., 2001. Repair and strengthening guide for earthquake damaged lowrisedomestic buildings in Gujarat, India. *Gujarat Relief Engineering Advice Team (GREAT)*.
- Pomonis, A. et al., 2006. The Indian Ocean Tsunami of 26 December 2004:Mission Findings in Sri Lanka and Thailand. *Earthquake Engineering Field Investigation Team, Institution of Structural Engineers*.
- Pomonis, A. et al., 2011. THE Mw 9.0 TŌHOKU EARTHQUAKE AND TSUNAMI OF 11TH MARCH 2011 A FIELD REPORT BY EEFIT.
- Raskin, J. et al., 2009. *Tsunami Evacuation Buildings (TEBs): A New RiskManagement Approach to Cascadia Earthquakes and Tsunamis*. s.l., s.n.
- Reese, S. et al., 2007. Tsunami vulnerability of buildings and people in South Java – field observations after the July 2006 Java tsunami.
- Rosetto, T. et al., 2006. The Indian Ocean tsunami of December 26, 2004:observations in Sri Lanka and Thailand.
- Saatcioglu, M., Ghobarah, A. & Nistor, I., 2005. EFFECTS OF THE DECEMBER 26, 2004 SUMATRA EARTHQUAKE AND TSUNAMI ON PHYSICAL INFRASTRUCTURE. *ISSET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 457, Vol. 42, No. 4, December 2005, pp. 79-94*.

- Scheffers, A., Kelletat, D., Engel & M., 2009. Die Entwicklung der Tsunamiforschung nach der Katastrophe vom 26. Dezember 2004, *Geographische Rundschau*, Heft 12, S. 12-18.
- Schneider, G., 2004. *Erdbeben-Eine Einführung für Geowissenschaftler und Bauingenieure, 1.Auflage*. s.l.:s.n.
- Shibayama, T. et al., 2013. Classification of Tsunami and Evacuation Areas. *Nat Hazards* .
- Srivichai, S., Chid tong, Y., Supratid, S. & Shuto, N., 2005. The 2004 Sumatra tsunami : Deaths and damages to buildings at the Kamala beach, Phuket, Thailand (Powerpoint).
- Sterr et al., 2009. Tsunamigefährdung an den Küsten Thailands, *Geographische Rundschau*, Heft 12, S. 28-35.
- Sthapitanonda, N. & Mertens, B., 2006. Architecture of Thailand- A guide to Traditional and Contemporary Forms.
- Suppasri, A., Koshimura, S. & Imamura, F., 2010. Tsunami fragility curves and structural performance of building along the Thailand coast. *Tsunami Engineering Laboratory Disaster Control Research Center (DCRC) Tohoku University, 8th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Management*.
- Suppasri, A. et al., 2012 a. Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami.
- Suppasri, A. et al., 2012 b. Damage and reconstruction after the 2004 Indian Ocean tsunami and the 2011 Great East Japan tsunami. *Journal of Natural Disaster Science, Volume 34, Number 1, 2012, pp19-39*.
- Swiss Solidarity & Swiss Red Cross, 2008 a. Sustainable Reconstruction Initiative in Tsunami-affected Villages of Karaikal Pondicherry, India.
- Swiss Solidarity & Swiss Red Cross, 2008 b. Sustainable Reconstruction Initiative in Tsunami-affected Villages of Karaikal Pondicherry, India.
- Thusyanthan, N. & Madabhushi, S., 2008. Tsunami wave loading on coastel houses: a model approach. *CIVIL ENGINEERING 161, No.CE2*.
- Ulmer, S., 2006. Anhaltende Versalzung des Grundwassers-Folgen des Tsunami für die Trinkwasserversorgung auf Sri Lanka. *Neue Züricher Zeitung*, pp. <http://www.nzz.ch/aktuell/startseite/articleE4XB1-1.34672>.
- Ulmer, S., 24. Mai 2006. Anhaltende Versalzung des Grundwassers-Folgen des Tsunami für die Trinkwasserversorgung auf Sri Lanka. *Neue Züricher Zeitung*, pp. <http://www.nzz.ch/aktuell/startseite/articleE4XB1-1.34672>.
- UNEP & SKAT, 2007. After the Tsunami - Sustainable building guidelines for South-East Asia. p. 69.
- UNESCO-IOC, 2006. *Tsunami Glossary*, s.l.: s.n.

- van de Lindt, J. W., Gupta, R., Garcia, R. A. & Wilson, J., 2009. Tsunami bore forces on a compliant residential building model. *Engineering Structures* 31, pp. 2534-2539.
- Velotti, L. et al., 2012. Vertical Evacuation as an emergency manager strategy (Powerpoint).
- Ward, S., 2004. Tsunamis. *Encyclopedia of Physical Science and Technology- Academic Press*, [www.oceanonline.com/tsunami2004.htm](http://www.oceanonline.com/tsunami2004.htm).
- Wijeyewickrema, A. C. et al., 2006. Field Survey of the Tsunami Caused by the Sumatra-Andaman Earthquake of December 26, 2004 and the Restoration of Impacted Inland Water Bodies in Sri Lanka.
- Yeh, Robertson & Preuss, 2005. Development of Design Guidelines for Structures that Serve as Tsunami Vertical Evacuation Sites.
- Yey, H., 2011. *The East Japan Earthquake Disaster of March 11, 2011 Part 3: on Tsunamis*. NEES Annual Meeting, Buffalo NY, s.n.

## Internetquellen

- (1) <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/151030/umfrage/staerkste-erdbeben-weltweit-seit-1900/> (Stand Mai 2013)
- (2) [http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo\\_e.pdf](http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf) (Stand Mai 2013)
- (3) [http://www.mofa.go.jp/j\\_info/visit/incidents/two\\_years.html](http://www.mofa.go.jp/j_info/visit/incidents/two_years.html) (Stand April 2013)
- (4) <http://www.statistics.gov.lk/tsunami/census/Summarynew.pdf> (Stand April 2013)
- (5) [d-maps.com](http://d-maps.com) (Stand April 2013)
- (6) <http://www.taz.de/!112604/> (Stand Mai 2013)
- (7) [http://www.jma.go.jp/jma/en/News/2011\\_spring\\_tide.html](http://www.jma.go.jp/jma/en/News/2011_spring_tide.html) (Stand April 2013)
- (8) <http://www.umweltschutz-vegetation-agrar.de/information/tsunami/tsunami3.html> (Stand April 2013)
- (9) [http://www.tsunami-alarm-system.com/fileadmin/media/images/reseller/a3m\\_tsunami\\_risiko\\_h.jpg](http://www.tsunami-alarm-system.com/fileadmin/media/images/reseller/a3m_tsunami_risiko_h.jpg) Stand (Stand April 2013)
- (10) <http://www.pmel.noaa.gov/images/headlines/2004-ampmap.jpg> (Stand April 2013)
- (11) [http://montessorimuddle.org/wp-content/uploads/2011/03/Tectonic\\_plates\\_boundaries\\_detailed-en-conv.png](http://montessorimuddle.org/wp-content/uploads/2011/03/Tectonic_plates_boundaries_detailed-en-conv.png) (Stand Mai 2013)
- (12) <http://www.tsunami-alarm-system.com/phaenomen-tsunami/phaenomen-tsunami-entstehung.html> (Stand Mai 2013)
- (13) [http://www.age-of-the-sage.org/tectonic\\_plates/volcanoes\\_earthquakes.gif](http://www.age-of-the-sage.org/tectonic_plates/volcanoes_earthquakes.gif) (Stand Mai 2013)
- (14) <http://www.theatlantic.com/infocus/2013/03/japan-earthquake-2-years-later-before-and-after/100469/> (Stand Mai 2013)
- (15) [http://epmaps.wfp.org/maps/04683\\_20110312\\_JPN\\_A4\\_JRCGDACS\\_Inundation\\_Tsunami\\_in\\_Japan\\_on\\_11\\_03\\_2011.jpg](http://epmaps.wfp.org/maps/04683_20110312_JPN_A4_JRCGDACS_Inundation_Tsunami_in_Japan_on_11_03_2011.jpg) (Stand Juni 2013)
- (16) [http://www.klimadiagramme.de/all\\_as.html](http://www.klimadiagramme.de/all_as.html) (Stand Juni 2013)
- (17) [http://www.ella-guesthouse-srilanka.com/community\\_projects.html](http://www.ella-guesthouse-srilanka.com/community_projects.html) (Stand Juni 2013)
- (18) <http://www.flickr.com/search/?q=tsunami%20sri%20lanka> (Stand Mai 2013)
- (19) <http://www.flickr.com/search/?q=galle+sri+lanka> (Stand Juni 2013)
- (20) <http://www.chembakolli.com/blog/?cat=9> (Stand Juni 2013)
- (21) <http://www.flickr.com/photos/thomasbrauner/7107640933/sizes/c/in/photostream/aufgenommen+am+6.april+2012> (Stand Juni 2013)
- (22) <http://www.flickr.com/search/?q=nagapattinam> (Stand Mai 2013)
- (23) <http://www.flickr.com/photos/12805493@N07/3002949110/sizes/z/in/photolist-5zmU9E-5zmUyf-5Uzrhe-5UzrGa-5Uztk4-5UztBp-5UDNrC-5UDNjN-5UDP5U-5UDQkU-5UFV7Z-5UFWei-5UFWv4-5UFWVZ-5UFXSc-5ULgQu-5ULgZS-5ULhuw-5ULibq-5ULitf-5ULiSC-5ULiWA-5ULjsL-5ULjBo-5ULk95/> (Stand Juni 2013)

- (24) [http://images.travelpod.com/tripwow/photos2/ta-013e-5fd6-9b2d/car-nicobar-island-andaman-and-nicobar-islands-india+1152\\_13024518803-tpfil02aw-22837.jpg](http://images.travelpod.com/tripwow/photos2/ta-013e-5fd6-9b2d/car-nicobar-island-andaman-and-nicobar-islands-india+1152_13024518803-tpfil02aw-22837.jpg) (Stand Juli 2013)
- (25) <http://www.corbisimages.com/stock-photo/rights-managed/42-16095779/india-car-nicobar-islands-one-year-after> (Stand Juni 2013)
- (26) <http://www.chembakolli.com/blog/?cat=9> (Stand Juni 2013)
- (27) <http://fellfromtheskies.wordpress.com/2011/12/11/171/> (Stand Juni 2013)
- (28) [http://www.hobotraveler.com/169Tsunamikohphphi\\_05.shtml](http://www.hobotraveler.com/169Tsunamikohphphi_05.shtml) (Stand Mai 2013)
- (29) <http://www.asce.org/uploadedImages/copri/News/Headlines/2011/Picture7.jpg> (Stand Juni 2013)
- (30) [http://www.bugbog.com/images/beaches/Thailand-beaches/Khao-Lak-beaches/Tsunami\\_shelter\\_Khao\\_Lak-Roy-Googin.jpg](http://www.bugbog.com/images/beaches/Thailand-beaches/Khao-Lak-beaches/Tsunami_shelter_Khao_Lak-Roy-Googin.jpg) (Stand Juni 2013)
- (31) [http://www.stanford.edu/group/esw/cgi-bin/mediawiki/images/c/c2/GHI\\_Portfolio.pdf](http://www.stanford.edu/group/esw/cgi-bin/mediawiki/images/c/c2/GHI_Portfolio.pdf) (Stand August 2013)
- (32) <http://www.siegburg.de/serviceportal/dienstleistungen/005801/index.html>
- (33) <http://www.wortbedeutung.info/Wiederaufbau/> (Stand Juli 2013)
- (34) [http://web.mit.edu/12.000/www/m2009/finalwebsite/after\\_physicalrepair.html](http://web.mit.edu/12.000/www/m2009/finalwebsite/after_physicalrepair.html) (Stand Juli 2013)
- (35) <http://www.siegburg.de/serviceportal/dienstleistungen/005801/index.html> (Stand Juli 2013)
- (36) <http://www.reconstruction.go.jp/english/topics/2013/03/housing-redevelopment.html> (Stand Juli 2013)
- (37) <http://www.youtube.com/watch?v=DX0WQcO8-Ok> (Stand Juli 2013)
- (38) <http://www.wortbedeutung.info/Wiederaufbau/> (Stand Juli 2013)
- (39) <http://blog.goo.ne.jp/nishiizu-saigaivc> (Stand Juli 2013)
- (40) <http://www.skat.ch/activities/prarticle.2005-09-20.1264594682> (Stand Juli 2013)
- (41) [http://www.swisscooperation.admin.ch/srilanka/en/Home/Post\\_tsunami\\_Interventions/Cash\\_for\\_Repair\\_and\\_Reconstruction\\_Programme\\_CfRR](http://www.swisscooperation.admin.ch/srilanka/en/Home/Post_tsunami_Interventions/Cash_for_Repair_and_Reconstruction_Programme_CfRR) (Stand Juli 2013)
- (42) <http://www.flickr.com/photos/lindarodel/3623128342/sizes/z/in/photostream/> (Stand August 2013)
- (43) [http://www.habitatjp.org/enblog/2004/11/habitats\\_response\\_to\\_asian\\_tsunami.html](http://www.habitatjp.org/enblog/2004/11/habitats_response_to_asian_tsunami.html) (Stand Juli 2013)
- (44) <http://www.buildchange.org/aceh.html> (Stand Juli 2013)
- (45) <http://www.geohaz.org/projects/sumatra.html> (Stand Juli 2013)
- (46) <http://www.archiprix.org/2013/index.php?project=3140> (Stand Juli 2013)
- (47) [http://www.presidentsmedals.com/Project\\_Details.aspx?id=2883](http://www.presidentsmedals.com/Project_Details.aspx?id=2883) (Stand Juli 2013)
- (48) <http://www.fastcoexist.com/1681186/making-tsunami-proof-buildings-by-growing-them-from-the-ocean#5> (Stand August 2013)
- (49) <http://awrcompetitions.blogspot.de/2012/03/life-saving-first-prize-kogami.html> (Stand Juli 2013)

- (50) <http://www.designboom.com/architecture/sako-architects-tohoku-sky-village/> (Stand August 2013)
- (51) <http://www.wolfhilbertz.com/accretion.html> (Stand August 2013)
- (52) [http://construction.com/CE/CE\\_images/2012/Sep-Smart-Vent-2.jpg](http://construction.com/CE/CE_images/2012/Sep-Smart-Vent-2.jpg) (Stand Juli 2013)
- (53) [http://aktsunami.org/multimedia/autoformat/get\\_swf.php?videoSite=atep&videoFile=tsunami\\_loads\\_on\\_structures.swf%20%20&videoTitle=A%20House%20to%20Come%20Home%20To](http://aktsunami.org/multimedia/autoformat/get_swf.php?videoSite=atep&videoFile=tsunami_loads_on_structures.swf%20%20&videoTitle=A%20House%20to%20Come%20Home%20To) (Stand August 2013)
- (54) [https://lh6.googleusercontent.com/\\_xBoQyCkLUAY/TZN2bu04i8I/AAAAAAAAAUQ/NnOF7yqV2so/s640/Taro%2520Tsunami%2520Wall%25201.jpg](https://lh6.googleusercontent.com/_xBoQyCkLUAY/TZN2bu04i8I/AAAAAAAAAUQ/NnOF7yqV2so/s640/Taro%2520Tsunami%2520Wall%25201.jpg) (Stand August 2013)
- (55) <http://cache.daylife.com/imageserve/0d2afbY0uh8On/1200x.jpg> (Stand August 2013)
- (56) <http://www.flickr.com/photos/anaguma/5889160305/sizes/l/in/photostream/> (Stand August 2013)

### **Eidesstaatliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorstehende Bachelorarbeit selbstständig angefertigt und die benutzten Hilfsmittel sowie die befragten Personen und Institutionen vollständig angegeben habe.

Braunschweig, den 22.08.13

---