

Hemel hoogten

Ruim twee kilometer. Zo hoog willen projectontwikkelaars in Dubai graag bouwen. Maar kunnen we eigenlijk wel zo ver de lucht in?

Drie doorbraken

De ontwikkeling van hoogbouw is versneld door drie technische doorbraken.

1. Veilige liften

Een uitvinding van liftfabrikant Otis. De innovatie voorkwam dat een lift naar beneden viel als er een kabel brak. In 1854 had het Crystal Palace in New York de eer om de eerste Otis-lift te gebruiken.

2. Stalen skeletten

In 1870 kwamen die in de plaats van constructies van gietijzer. Staal is minder brandgevaarlijk en de indeling ervan blijkt makkelijker te veranderen. Het eerste gebouw met zo'n stalen raamwerk was het Home Insurance Building in 1885. Pas veel later, rond 1970, kregen veel wolkenkrabbers een betonnen kern in het midden en werd staal ook in de hele gevel gebruikt. Daarvan werden gebouwen stijver en dus nog hoger.

3. Hoge-sterktebeton

Voor het eerst toegepast in 1996 in de vloeren en verticale constructies van de Petronas Towers in Kuala Lumpur. Hoge-sterktebeton is zo sterk als staal, maar dan goedkoper. Bovendien behoudt het zijn sterkte bij brand. Ook is bouwen met beton gemakkelijker: staal moet met een kraan of helicopter omhoog worden getild, terwijl beton omhoog kan worden gepompt.

• Een gigantische stalen bal van 5,5 meter in doorsnee, hangt in het hoogste gebouw ter wereld: de Taipei 101 in Taiwan. De bal dempt de bewegingen van het gebouw, wanneer het door harde wind en aardbevingen heen en weer wordt geschud.



■ STEEDS HOGER EN hoger willen we, tot we tussen de sterren wonen. Die wens is al zo oud als de toren van Babel. Inmiddels zijn we al een heel eind opgeschoten: 508 meter om precies te zijn. Zo hoog is althans de Taipei 101 in Taiwan, het allerhoogste gebouw ter wereld. Maar niet lang meer. Als volgend jaar de Burj Dubai in de Verenigde Arabische Emiraten af is, reikt deze 818 meter de lucht in. Daarna begint de bouw van de Nakheel Tower, die met ruim één kilometer hoogte zijn concurrent aan de andere kant van de stad Dubai moet overtreffen. En er zijn zelfs al ideeën om in 2015 een verticale stad van 2,4 kilometer hoog te bouwen: de Dubai City Tower. "Eigenlijk is een stad van 2,4 kilometer hoogte nog een beetje tam", relativeert Joop Paul, leider van de Nederlandse afdeling van ingenieursbureau Arup, gespecialiseerd in hoogbouwprojecten. "In 1994 bedacht een architect van het bureau Taisei een bouwwerk van vier kilometer hoog. De X-Seed 4000 zou in Tokio komen en was zelfs hoger dan de berg Fuji. Dat was pas ambitieus."

In diezelfde jaren negentig maakte Japan veel meer van dit soort superhoogbouw-ontwerpen, maar veel van de dromen over de stad van de toekomst kwamen niet verder dan de tekentafel. Waarom eigenlijk? "Technisch zijn er geen beperkingen", volgens Paul. "Het gaat erom wat mensen ervoor willen betalen." Hij legt uit: "Rond 1990 stortte de Aziatische economie in,

Foto's ANP

waardoor in Japan de huurprijzen halveerden en de plannen voor kilometershoge wolkenkrabbers niet meer rendabel waren. Omdat er geen afzetmarkt was heeft ook de bouw van het World Trade Center in Shanghai (492 meter hoog en eind augustus geopend, red.) maar liefst acht jaar stil gelegen. Er is alleen hoogbouw als er ook echt vraag naar is. De bepalende factoren daarvoor zijn de verkoop van woningen en de verhuur van kantoren."

Deze mening wordt gedeeld door de auteur van het boek *Form Follows Finance*. Hoogleraar architectuurhistorie Carol Willis van de Columbia-universiteit in de VS zet daarin uiteen dat de hoogte van wolkenkrabbers in Chicago en New York werd bepaald door de financiële haalbaarheid: "Het gaat om commerciële architectuur, waarbij economische overwegingen de ontwerpbeslissingen bepalen."

Riolering De grens van hoogbouw ligt tussen de 600 en 800 meter. Althans, dat concludeert civiel-ingenieur Arne Dijkstra, die onlangs afstudeerde bij hoogleraar draagconstructies Jan Vambersky aan de TU Delft. Dat klinkt merkwaardig – in Dubai zijn immers hogere wolkenkrabbers in aanbouw – maar Dijkstra stelde bepaalde voorwaarden aan hoge gebouwen. De belangrijkste eis is die aan het netto vloeroppervlak, ofwel de hoeveelheid praktisch bruikbare ruimte, vindt Vambersky: "Hoe hoger, des te meer vierkante meters verloren gaan aan verticaal transport," stelt hij. "Niet alleen van liften, maar ook van zaken als lucht, airconditioning, water en riolering en van calamiteitenvoorzieningen zoals noodtrappenhuizen. Per twintig etages is er zelfs een deel van de verdieping nodig als installatieruimte; een complete, indrukwekkende fabriek. En dan heb je natuurlijk nog het transport van de verticale krachten, want de kolommen en wanden krijgen ook grotere afmetingen. Eigenlijk is hoogbouw één brok verticaal transport." De eis die Dijkstra aan het netto vloeroppervlak stelt is 80 procent, maar bij gebouwen hoger dan zes- tot achthonderd meter is volgens Vambersky vaak maar 60 procent of minder bruikbaar: "Dan rijzen de kosten per vierkante meter de pan uit en wordt het heel duur om hoog te bouwen. Meer dan twee kilometer hoog bouwen is dus wel mogelijk, maar het zal extreem duur zijn."

Voor de Burj Dubai heeft projectontwikkelaar Emaar Properties 1,4 miljard Ameri-



• Sinds 2004 staat het hoogste gebouw ter wereld in Taiwan: de Taipei 101 is 508 meter.

kaanse dollar begroot, waarbij de huur van kantoorruimte 43.000 dollar per vierkante meter is. Mensen die het hoog in hun bol hebben, moeten daar dus wel hoge prijzen voor betalen. "Hoe dieper de zakken, des te hoger het gebouw", reageert Jan Klerks van de Stichting Hoogbouw dan ook, een stichting die zich inspant voor meer hoogbouw in Nederland. Blijkbaar heeft men in Dubai dat ervoor over.

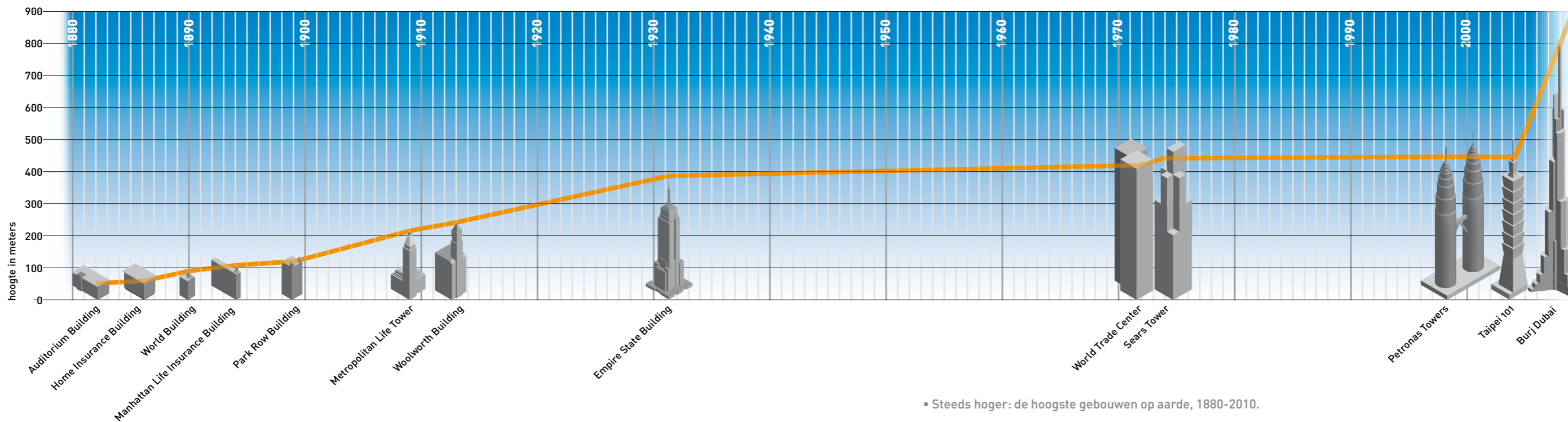
Stapelen En als kosten niet meer de belemmerende factor zijn voor extreem lange, verticale gebouwen, wat dan wel? De vorm. "Als we maar genoeg stenen op elkaar stapelen, kunnen we net zo hoog komen als de Mount Everest," zegt Jan Vambersky. Ofwel: als de basis maar breed genoeg is, kan een gebouw kilometers hoog worden. Vambersky nuanceert onmiddellijk: "Maar dan is het geen gebouw meer." Daarom streven ontwerpers ernaar om wolkenkrabbers zo slank mogelijk te maken. "De ideale verhouding van de doorsnee met de hoogte is die van één staat tot zes, tot maximaal acht", weet Joop Paul. Even

checken. Het hoogste gebouw van de VS, de Sears Tower in Chicago, is 442 meter lang en 66 meter breed, ofwel een verhouding van 6,7. Vrijwel dezelfde verhouding vinden we bij de in aanbouw zijnde Freedom Tower, het nieuwe World Trade Center in New York. Die wordt 61 meter breed en bereikt een dakhoogte van 417 meter: een verhouding van 6,8.

Maar hoge torens vangen veel wind. Daarom worden torens steeds slanker ontworpen naarmate ze hoger worden. Dan vangen ze minder wind en zal de bovenkant dus minder heen en weer zwaaien. Zo zal de top van Burj Dubai, de honderdste verdieping, straks ongeveer tweemaal de maximale uitwijking bij de maximaal te verwachten windsnelheid van 300 kilometer per uur. Op de hoogste voor publiek toegankelijke verdieping – nummer 124 – is de uitwijking dan slechts 75 centimeter. Voor het comfort van de gebruiker telt niet zozeer de uitwijking van een gebouw, weet Vambersky, maar de versnelling waarmee het gebouw beweegt. Die versnelling mag voor werken vaak hoger zijn dan voor wo-

nen. Bij werken voel je schommelingen met een versnelling die lager ligt dan 0,2 tot 0,4 meter per seconde kwadraat (m/s^2) nauwelijks; lekker slapen doe je pas bij een versnelling die niet hoger ligt dan 0,1 tot 0,2 meter per seconde kwadraat. Volgens Vambersky kan het voor sommige mensen onplezierig zijn om een gebouw te voelen, zien of horen bewegen. Je kunt er zelfs zeeziek van worden. "Maar dat zit allemaal tussen de oren", nuanceert hij.

Maar hoe houd je die horizontale versnelling binnen de perken, zowel bij stormen als aardbevingen? "De conventionele bouwtechnieken vangen die versnelling op met stijve constructies van beton en staal", zegt hoogleraar draagconstructies Rob Nijsse van de TU Delft, "al dan niet aangevuld met de techniek van een *tuned mass damper*, een demper in de vorm van een slinger met een zwaar gewicht, die bovenin een gebouw hangt. Bij een windstoot of aardbeving verplaatst de slinger zich in dezelfde richting als het gebouw. Maar als het gebouw weer terug beweegt, vertraagt de slinger zijn snelheid." ►



• Steeds hoger: de hoogste gebouwen op aarde, 1880-2010.

De Babellimiet

Is er een grens aan de hoogte die een wolkenkrabber kan bereiken? Astronomen hanteren globale berekeningen over de maximale afwijking van de bolvorm die een hemellichaam kan hebben. Kleine planetoïden kunnen aardappel- of kubusvormig zijn, maar de aarde niet: geen enkel natuurlijk materiaal is stijf genoeg om te voorkomen dat zo'n vorm onder zijn eigen gewicht ineenstort tot een (bijna) perfecte

bol. Voor de aarde levert de berekening een maximaal hoogteverschil van zo'n twintig kilometer op, inderdaad het verschil tussen de diepste oceaantrog en de hoogste berg op aarde. Kan een door de mens gebouwde structuur die grens overtreffen? Vambersky heeft het nooit uitgerekend, en gaat desgevraagd niet verder gaan dan: "Ik houd het op wat de natuur ons voorschotelt. De hoogte van de Mount Everest

is de uiterste grens." Geheel op eigen gezag rekent *NWT* toch even wat aan het allersimpelste model van een wolkenkrabber: een massieve balk constructiestaal. Hoe hoger zo'n balk reikt, des te groter de druk door het eigen gewicht op de onderkant. Het staal moet die druk kunnen weerstaan. Die druk – simpelweg (hoogte) x (soortelijk gewicht) – mag de treksterkte van staal (440 miljoen pascal) niet te boven gaan. Daaruit volgt een hoogte van circa 6 kilometer. Hoe kan het dat zelfs de uit brosgesteente opgebouwde Mount Everest die hoogte overtreft? Ook niet moeilijk: omdat bergen puntig toelopen. Een vierzijdige piramide heeft slechts eenderde van het volume van een even hoog blok met dezelfde grondoppervlakte, en dus ook maar eenderde van het gewicht. Dat betekent dat een piramide van massief staal tot $3 \times 6 = 18$ kilometer hoog zou kunnen reiken – tweemaal zo hoog als de Mount Everest. Wil je nog hoger, dan moet het gebouw voor een gegeven grondoppervlak nog minder volume

Tekst Arnout Jaspers Foto ANP

hebben dan een piramide. Het meest efficiënt is dan een vorm waarbij de oppervlakte per verdieping hoger een vaste factor kleiner wordt. Het gewicht wordt dan zodanig over een steeds breder oppervlak verdeeld, dat de druk (gewicht per vierkante meter) op elke verdieping hetzelfde is (en lager dan de treksterkte van staal). Dat dwingt een vorm af die bovenin begint als een smalle spits en naar beneden toe steeds sneller uitloopt naar een zeer brede basis. De vorm die je krijgt als je de Eiffeltoren tot ver onder de begane grond voortzet. Ook de X-Seed 4000, het futuristische Japanse ontwerp voor een gebouw van vier kilometer hoog, heeft die vorm. Op een oneindig grote, platte aarde zou je zo onbeperkt hoge 'super-Eiffeltorens' kunnen neerzetten. Probleem is alleen dat de aarde rond is en dat de breedte van de basis exponentieel toeneemt met de hoogte van het gebouw. Relatief snel zou die basis groter worden dan de aardbol zelf, en dan is de Babellimiet, de uiterste grens van de hoogbouw op aarde bereikt.

Dit is ook het geval bij de Taipei 101, die precies in het aardbevingsgebied van Taiwan ligt. Daar neemt een goudkleurige pendule van 730 ton, bestaand uit 41 stalen platen, een groot deel van de bewegingsenergie van het gebouw op. Volgens Nijse kun je met zo'n demper maximaal 1000 meter hoog bouwen, maar zijn er voor 2000 meter en hoger andere technieken nodig, die nu alleen nog op papier bestaan. "Je kunt ook schokbrekers inbouwen in de demper, vergelijkbaar met het veersysteem van een auto. Daarmee kun je actief de beweging dempen, door een gebouw tegen de wind in of juist terug te duwen. Volgens Nijse is dat tot nu toe nog nooit toegepast. "Maar zodra we dat kunnen, kunnen we in principe onbeperkt de hoogte in bouwen," zegt hij. Joop Paul schat overigens in dat we nu al onbeperkt de hoogte in kunnen bouwen, omdat de bestaande dempingssystemen al voldoen.

Topsnelheid De *sky* is dus echt de *limit*, al wordt een gebouw sneller onrendabel naar mate het hoger is en worden de breedte en de uitwijking steeds lastiger obstakels. Er is nog een aantal andere technische obstakels voor extreme hoogbouw. Zoals de tijd die mensen maximaal in een lift willen doorbrengen. Als er naast de kosten al een andere beperking bestaat, dan is dat hem wel, zo liet de Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH), een internationale non-profitorganisatie die onder meer bepaalt wat het hoogste gebouw van de wereld is, onlangs aan *de Volkskrant* weten. Maar dat lijkt tot nu toe geen probleem: liften worden namelijk steeds sneller. De snelste lift ter wereld bevindt zich – logisch – in het hoogste gebouw te wereld, de Taipei 101 in Taiwan. Daar haalt hij een in het *Guinness Book of Records* genoteerde topsnelheid van 16,8 meter per seconde (60,6 kilometer per uur). Bezoekers reizen volgens de officiële website binnen 37 seconden van de 5de naar de 89ste verdieping. Ter vergelijking: in het hoogste gebouw van Nederland, het 151

meter hoge kantoor van Nationale Nederlanden in Rotterdam, kunnen de liften maximaal 6 meter per seconde (21,6 kilometer per uur). In de Burj Dubai moeten de liften nog sneller gaan: 18 meter per seconde (64,8 kilometer per uur).

Plastisch Een andere hobbel is de kwetsbaarheid voor aanslagen. Sinds de aanslag op het World Trade Center zijn bouwers aan het bedenken hoe men wolkenkrabbers 'terrorisme-veilig' kan ontwerpen. De Freedom Tower, die nu op *ground zero* verrijst, krijgt daarom een stevige kern van beton in plaats van staal. "De toren zal bij een aanslag of een grote brand daarom niet voortschrijdend instorten", liet Carl Galioto, technisch architect bij Skidmore, Owings & Merrill, eerder weten aan tijdschrift *De Ingenieur*. Staal verliest bij een temperatuur van 600°C namelijk de helft van zijn draagkracht, waardoor de hoofdconstructie kan instorten. Beton heeft daarvan geen last. Uit veiligheidsoverwegingen krijgt het herdenkingsicoon ook bredere vluchttrappen en een betere ventilatie, om eventuele rook sneller naar buiten te krijgen. Naast de ontwerpuitdagingen is de bouw van de superwolkenkrabbers zelf minstens zo spannend. Want hoe hoger een gebouw, des te moeilijker is het voor constructeurs om al het materiaal de lucht in te krijgen. Hoofdconstructeur van de Belgische aannemer Besix, Ivan Bruyninckx, kan erover meepraten. Onlangs vestigde hij, samen met de aannemers Samsung en Arabtec, nog het wereldrecord beton omhoog pompen: 585 meter. Zijn geheim? "De kunst zit hem erin om geschikt beton te maken dat plastisch blijft", verklaart Bruyninckx desgevraagd. "Dan heb je nog een zware pomp nodig die de druk aankan. Wij gebruikten een Putzmeister-pomp onder druk van 300 bar, waarmee we tachtigduizend liter beton per uur naar boven konden brengen. En tenslotte moeten in het buizensysteem naar boven niet teveel bochten en draaiingen zitten." Bruyninckx denkt dat hij het beton nog hoger zou kunnen pompen. "Maar op den duur is het beton zo lang onderweg, dat het niet meer vloeibaar is", zegt hij. Dus een 2,4 kilometer hoge verticale stad is realistisch? Bruyninckx denkt van niet. "Voor de Dubai City Tower bestaan zeker nog geen bouwplannen. Het is nog niets anders dan een verre droom." ●