

Selvom byen stort set er jævnet med jorden ved jordskælvet den 12. januar 2010 går livet videre i Port-Au-Prince, Haiti.  
Foto: Shutterstock.



# TEKNOLOGI BEGRÆNSER KLODENS FARLIGSTE NATURKATASTROFE

Trods århundreders forskning er det fortsat umuligt at fastslå, præcis hvornår jordskælv rammer. Men ny viden om, hvor spændinger hober sig op i jordskorpen, og med moderne teknologi til at slå alarm med lysets hast, kan geologerne alligevel hvert år redde tusindvis af liv.

**Om forfatteren:**  
Niels Halfdan Hansen er geolog og videnskabsjournalist.  
formidling@gmail.com

**S**ammen med sine arbejdskammerater har 23-årige Oranel Mettelus netop afsluttet opførelsen af et hus i den velhavende enklave Pétion-Ville i Haitis hovedstad Port-au-Prince.

Pludselig ryster jorden, og bygningen styrter i grus omkring dem. Oranel bliver fanget under resterne af villan, indtil en bulldozer dagen efter får ham gravet ud. Efter sin redning begiver Oranel sig gennem Port-au-Prince mod familiens hjem. Men i stedet for den sædvanlige time, varer turen to døgn. Og da han endelig når frem, ligger huset i ruiner – og under murbrokkerne er hans forældre og seks søskende omkommet. Kun en lillebror på 15 er i live.

Jordskælvet, der ramte Haiti på øen Hispaniola i Caribien den 12. januar 2010 og kostede næsten hele Oranel Mettelus' familie livet, er gået over i historien som et af klodens mest dødbringende med godt 220.000 ofre ifølge FN. Så store tal hører heldigvis til sjældenhederne, men jordskælv er faktisk uden sammenligning den farligste naturkatastrofe på kloden.

## Forskerne kender faren

I gennemsnit omkommer 37.500 hvert år, og dermed kræver jordskælv flere liv end alle andre typer naturkatastrofer tilsammen. Derudover kommer flere end seks millioner mennesker hvert år til skade på grund af et jordskælv, mister

hus og hjem eller må evakueres i en længere periode. Men faktisk ramte skælvet ikke Haiti helt uden forvarsel.

For eksempel fremlagde fem seismologer i 2008 en artikel på den 18. caribiske geologiske konference i Den Dominikanske Republik, hvor den forkastning med det poetiske navn Enriquillo beskrives som "a major seismic hazard", altså en alvorlig jordskælvsrisiko. Og netop Enriquilloforkastningen brød op allerede to år senere og skabte katastrofen. Forkastningen, der løber østvest gennem Hispaniola, indgår i et brudsystem, som adskiller to af jordens skorpeplader, nemlig den nordamerikanske og den caribiske. Den type

store brudsystemer, hvor forkastningerne løber tæt under overfladen, er særligt farlige. Derfor har de fået stor videnskabelig opmærksomhed, og geologerne har efterhånden fået godt styr på, hvor de ligger, og hvor farlige de er, forklarer Bo Holm Jacobsen, geofysiker og lektor ved Institut for Geoscience på Aarhus Universitet.

»Videnskaben er kommet meget langt med at forudsige den gennemsnitlige jordskælvsrisiko over en periode på 100-200 år. For eksempel tillader stadig flere og mere præcise GPS-stationer os, der forsker i jordskælv, i stor detalje at følge, hvordan spændingerne mellem pladerne bygges op. Dermed ved vi nu meget præcist, hvor meget energi, der så at sige sættes i banken i de enkelte brudzoner hvert år.«

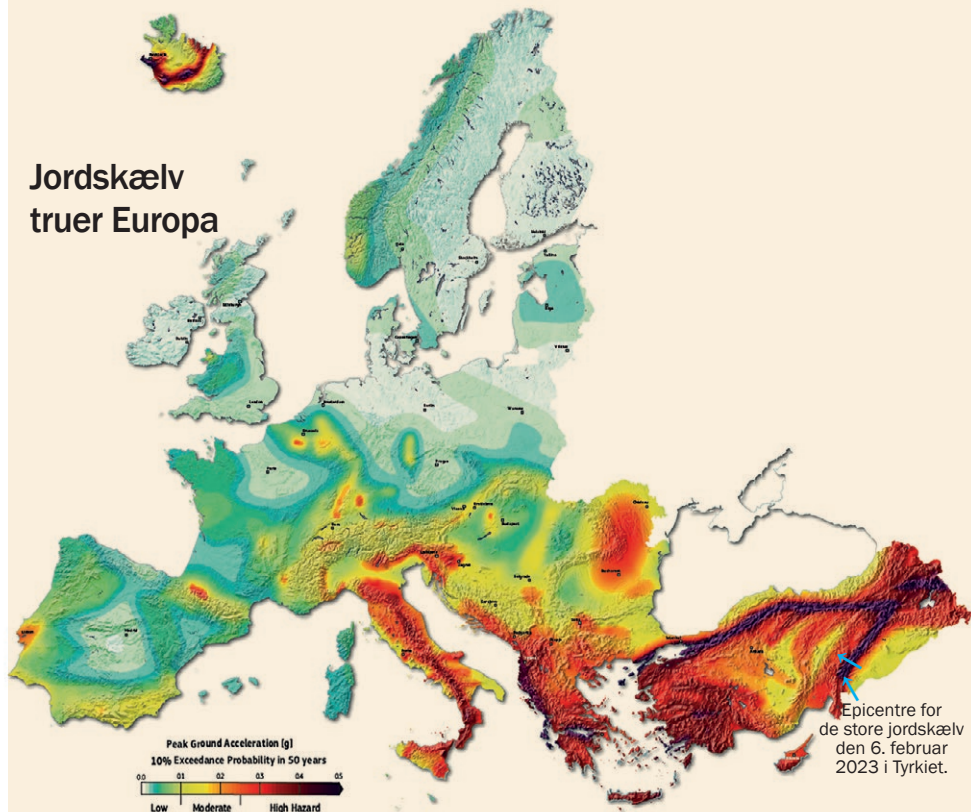
Alligevel var ingen i praksis forberedt på de enorme ødelæggelser, skælvet medførte. For det er ikke nok at udpege en forkastning som en risiko indenfor en periode på for eksempel 100 år, 50 eller 20 år. Før en varsling er brugbar, kræver det, at befolkning bliver advaret på en måde, så de ved, præcis hvad de skal gøre og hvornår.

»Udfordringen er at forudsige, præcist hvornår energien kommer til udbetaling i form af et jordskælv,« siger Bo Holm Jacobsen. »Det kan sammenlignes med gradvist at bøje en lasagneplade. Vi ved, at den vil knække på et tidspunkt. Men den knækker på nye og uforudsigelige måder hver gang. Sådan er jordskælvszonerne i endnu højere grad.«

### Data kortlægger risikoen

For at udpege stederne med størst risiko og indsnævre tidsvinduet så meget som muligt, har seismologerne, der ofte er geologer eller geofysikere, indsamlet en vifte af nye data over de seneste årtier. Blandt leverandørerne er nu satellitter, der kan hjælpe forskerne med at overskue store områder og samtidig måle de samme parametre igen og igen. På den måde bliver det muligt at sammenligne selv små ændringer over lang tid.

## Jordskælv truer Europa



EFEHR, European Facilities for Earthquake Hazard and Risk, er et non-profit netværk af europæiske geofysiske institutioner, som arbejder for at udbrede viden om risikoen for jordskælv i Europa og omkring Middelhavet. EFEHR driver bl.a. en avanceret model for jordskælvsrisiko kaldet ESHM20, 2020 European Seismic Hazard Model. Modellen kan bl.a. beregne det forventede niveau af jordrystelser som følge af et fremtidigt jordskælv. Det sker med afsæt i jordskælvs-historien de seneste 1.000 år, viden om aktive forkastninger, hastigheden af deformation af jordskorpen og målinger af jordrystelser ved tidligere jordskælv.

Farverne på kortet beskriver parameteren Peak Ground Acceleration (PGA), altså hvor voldsomt jorden kan bevæge sig. PGA er en god indikator for, hvor store skader et skælv medfører. De værdier, der er afbildet på kortet, når helt op over 0,5 g, hvor 1 g er tyngdeaccelerationen på jordens overflade. På kortet er områder med lav risiko farvet i hvid til grøn, områder med moderat risiko er farvet i gul til orange, og områder med høj risiko er farvet i mørkerød til lilla. Ifølge EFEHR er Tyrkiet, Grækenland, Albanien, Italien og Rumænien landene med den største risiko i Europa, efterfulgt af de resterende Balkanlande.

Se mere på [efehr.org](http://efehr.org)

### To kraftige jordskælv i 2023:

Den 6. februar 2023 ramte to voldsomme jordskælv på Mw 7,8 og 7,7 det sydlige og centrale Tyrkiet samt det nordlige og vestlige Syrien. Syv døgn senere passerede antallet af omkomne 33.000 og blev ved med at stige. Det gør skælvne til de mest dødbringende på kloden siden skælvet i Haiti i 2010. Regionen, hvor skælvne skete, har været tektonisk stille de seneste 100 år med blot tre skælv over Mw 6, men blev alligevel betragtet som højrisikoområde af jordskælvsforskere. Skælvne udsprang nemlig tæt på punktet, hvor hele tre tektoniske plader mødes: den anatolske, den arabiske og den afrikanske.

Satellitter er interessante, fordi de plader, Bo Holm Jacobsen omtaler, altså er sektioner af selve jordskorpen. Sektionerne – skorpepladerne – bevæger sig rundt mellem hinanden som isflager på havet, drevet af bevægelser i Jordens indre og af deres egen vægt. Plader udgør både kontinenter og havbund, og særligt på grænsen mellem pladerne, hvor de enten presser sig ind over hinan-

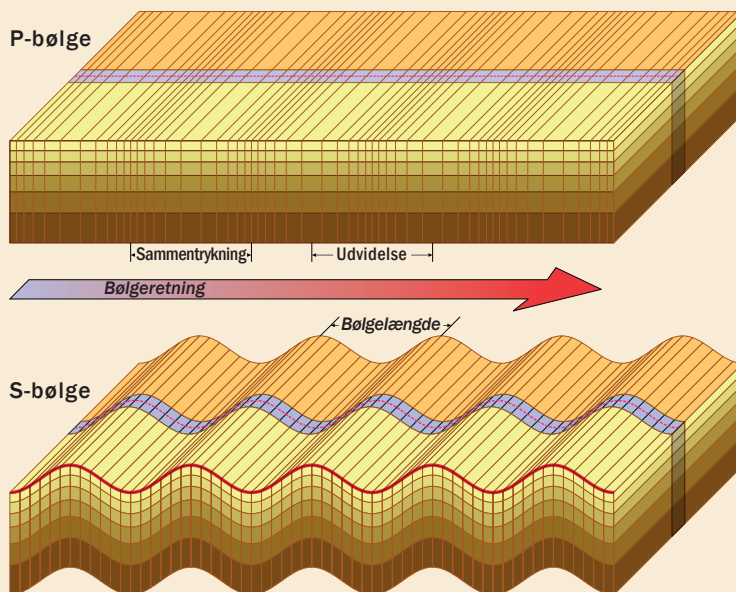
den eller passerer forbi hinanden, opstår der spændinger og dermed jordskælv.

I praksis betyder det, at op mod 80 procent af verdens jordskælv forekommer omkring Stillehavet, hvor de to typer pladegrænser er udbredt. Jordskælv på Hispaniola er tilsvarende koblet til en brudzone, hvor den nordamerikanske og den

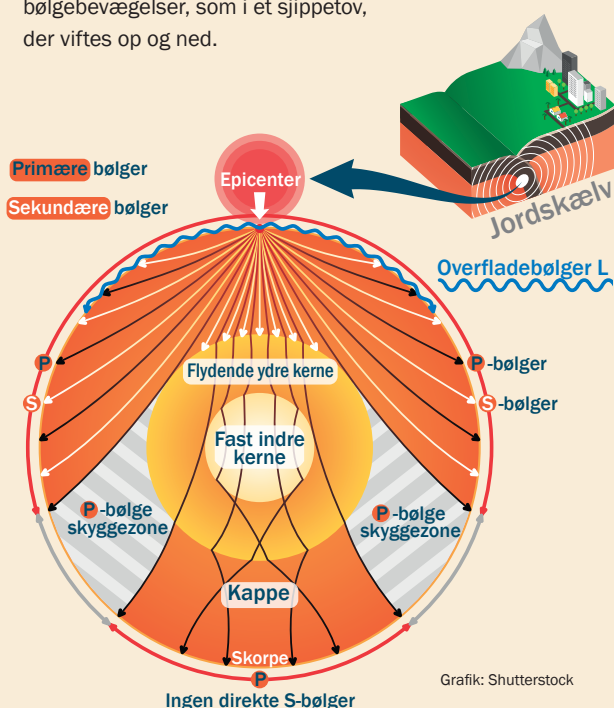
## Jordskælv afslører klodens opbygning

Geologerne bruger rystelserne fra jordskælv, de såkaldte jordskælvsbølger, til at kigge ned i jorden. Først fastlægger de styrken og stedet på overfladen, hvor jordskælvet udsprang, kaldet epicenteret. Derefter kan målinger af rystelserne ved forskellige jordskælvs-målere - seismometre - rundt om i verden omregnes til, hvordan rystelserne har bevæget sig igennem jorden og dermed, hvilke typer af materialer de har passeret igennem. Teknikken kaldes seismologi.

Bølgerne fra store jordskælv breder sig igennem Jorden som tredimensionelle ringe i vandet. Der er to grundlæggende forskellige bølger. P-bølger, der udbreder sig ved at trække i og trykke på klippen som en harmonika, og S-bølger, der udbreder sig ved bølgebevægelser, som i et sjippetov, der viftes op og ned.



Grafik: AN & Shutterstock



Grafik: Shutterstock

For både P- og S-bølger gælder det, at der er zoner på kloden, som ligger i en slags skygge, hvor bølgerne ikke ankommer direkte. De skyggezoner afslører Jordens sammensætning og tilstandsformen af jordens forskellige lag for geologerne. Fx er det kun ved vinkler mindre end 105 grader mellem epicenter og seismograf, at P-bølgerne ankommer direkte efter en tur gennem skorpen og kappen. Ved større vinkler må de en tur gennem kernen. Det afbøjer bølgerne, så de først når jordoverfladen igen ved vinkler større end 140 grader. Det forhold giver forskerne mulighed for at regne sig frem til kernens størrelse og til forskellen i massefylde mellem kappen og kernen. Direkte S-bølger måles derimod udelukkende ved vinkler mindre end 105 grader. Det fortæller forskerne, at den ydre kerne må være flydende, fordi S-bølger ikke kan udbrede sig i væsker. Nogle af den danske seismolog Inge Lehmann's bedrifter var at foreslå den indre kerne, samt at vise at der ikke er "perfekt ro" i de såkaldte skyggezoner.

caribiske tektoniske plade bevæger sig forbi hinanden.

I perioden mellem to jordskælv, arbejder pladerne i forhold til hinanden. Det får dem til at deformere ved at fortykkes, krølle, bule eller slå revner som forløber for det næste skælv, hvor spændingerne udløses igen. Og de bevægelser kan for eksempel jordstationer se med hjælp fra GPS-satellitter, når GPS-stationen flytter sig eller afstanden mellem to gps-stationer ændres. GPS er dog bedst til vandrette bevægelser og knapt så god til lodrette. Her kommer andre satellitter på banen, for eksempel satellitter, der bruger

radar til at analysere jordoverfladen, som de europæiske Sentinel-1. En Sentinel-1-satellit dækker hele kloden på 12 dage og kan måle med en præcision på 5 x 5 meter. Ved at lade computere sammenligne data fra overflyvning efter overflyvning kan geologerne se både de meget langsomme bevægelser, der finder sted, mens spændingerne bygger op, og effekterne af selve jordskælvet, der udløser spændingerne igen.

### Truende forkastninger udsponeres

Men selv om spændingsopbygninger kan følges i detaljer, er det stadig langt fra nok til en varsling, hvor for-

skerne med rimelig sikkerhed kan pege på, at et jordskælv rammer om uger eller dage. Og måske bliver det aldrig muligt, vurderer Bo Holm Jacobsen.

»En egentlig forudsigelse af jordskælv tror jeg ikke på. Ligesom med hvornår lasagneplader knækker, vil præcise forudsigelser af jordskælv være tæt på umulige«, siger han. Til gengæld kan alene viden om, hvor jordskælv formentlig rammer, redde mange liv. Den indsigt kan nemlig indgå, når arkitekter designer boliger i udsatte områder, og når myndighederne installerer varslings-systemer til akut alarmering.

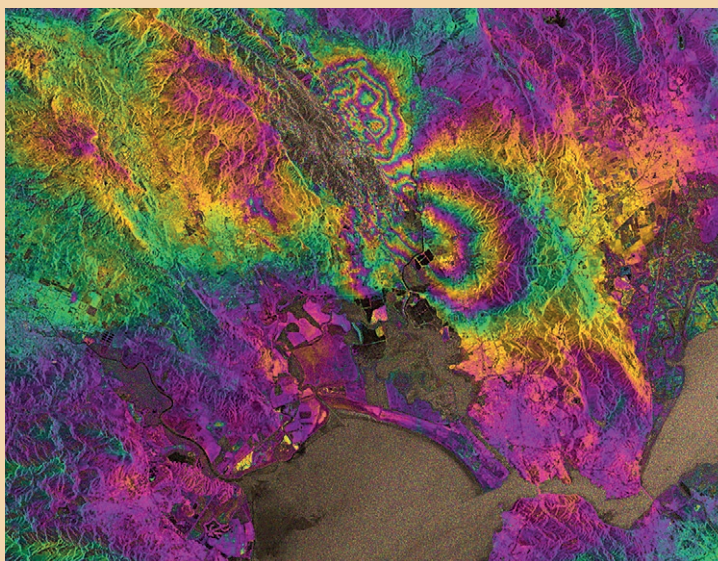
## Interferogrammer viser før og efter

Satellitter sikrer geologerne det store overblik, så de for eksempel kan kortlægge de præcise bevægelser under et jordskælv.

Satellitter bidrager til forskningen i jordskælv på flere måder. En af dem er at sammenligne sæt af meget detaljerede satellitbaserede kort over jordoverfladen optaget på forskellige tidspunkter. Resultatet er et såkaldt interferogram, der viser forskellen mellem de to kort som et enkelt kort. Interferogrammet viser altså for eksempel, hvor store bevægelser, der skete ved et jordskælv, eller det kan vise, hvordan spændinger langsomt bygger op mod det næste skælv.

Den 24. august 2014 blev Napa Valley i Californien ramt af det største jordskælv i 25 år, som påvirkede et område på mere end 30 x 30 km.

Europas Sentinel-1A-satellit, der udsender og modtager radarsignaler, var sendt op få måneder før og havde passeret over Napa Valley både den 7. og 31. august. Ud fra de to billeder er der beregnet et interferogram, som viser, hvordan jorden



bevægede sig under jordskælvet. Deformation på jorden forårsager faseændringer i radarsignalet, der vises som regnbuemønstre, for eksempel de runde former omkring Napa-dalen i den centrale del af billedet. Hver farvecyklus svarer til en bevægelse på 28 mm, og den maksimale bevægelse er på mere end 10 cm. Interferogrammet er mest intenst omkring forkastningen, som derfor kunne kortlægges i detaljer. Det var for øvrigt en forkastning, der

ikke blev betragtet som farlig før jordskælvet den 24. august 2014.

Sentinel-1-satellitten kan se gennem både mørke og skyer og har gjort en kæmpe forskel for studiet af jordskælv. I 2016 fik Sentinel-1A selskab af Sentinel-1B, så dækningen blev fordoblet. Sentinel-1B blev dog pensioneret i august 2022 på grund af en fejl i strømsystemet. Bl.a. derfor bliver Sentinel-1C sendt op i første halvår af 2023.

»Når bruddet sker, udbreder rystelsen sig med nogle km i sekundet,« siger Bo Holm Jacobsen. »Seismometre måler rystelserne øjeblikkeligt nær bruddet. Dermed kan der udsendes varsel direkte til personer i området, så de har nogle sekunder til at kaste sig i sikkerhed under borde og lignende.«

Tidsforskellen skyldes, at varslet i modsætning til rystelserne bevæger sig med lysets hastighed eller 300.000 km i sekundet. For et skælv for eksempel langs Japan-graven betyder det, at advarslen når frem til hovedstaden Tokyo over et minut før rystelserne. Det giver myndighederne tid til at slukke for el og gas, der kan forårsage kortslutninger og eksplosionsagtige brande, bremse tog og sætte alle trafiklys på rødt, så bilerne stopper.

Men før sådan en varsling er effektiv, skal der placere seismometre meget tæt på det sted, hvorfra skælvet udspringer. Det kan enten være på landjorden, på havbunden eller endda i et borehul ned gennem selve brudzonen. Det har japanerne eksperimenteret med siden 2007 øst for østaten, hvor Stillehavspladen langsomt kryber ned under den plade, som Japan ligger på.

Projektet har fået navnet NanTro-SEIZE og foregår fra Japans eget superavancerede boreskib, Chikyū, der betyder jord. Chikyū har gentagne gange senest i 2019 boret igennem aktive jordskælvzoner og installeret avanceret observationsudstyr i dybe borehuller.

Udstyret tillader direkte observation

af tryk, bevægelser og minimale rystelser, som afslører, hvordan spændingerne, der i sidste ende udløses som jordskælv, bygger op. Og som en delikatesse for forskerne, så er målinger op til 100.000 gange mere præcise, når de foregår i et borehul, end hvis udstyret er placeret på et skib eller på havbunden. Samtidig er hele herligheden koblet til land i realtid – alle mistænkelige bevægelser registreres altså med det samme.

### Apps afbøder jordskælv

Varslerne går dog ikke kun til myndighederne, som slukker el og standser tog. I USA ryger de også til befolkningen gennem trådløse varslingsbeskeder, for eksempel ved at alle mobiltelefoner koblet til bestemte mobilmaster modtager et varsel som en popup eller ved,

## Japans boreskib studerer klodens største forkastninger

Jo bedre geologerne forstår, hvad der sker langs klodens allerstørste forkastninger, des bedre kan de forudsige jordskælv. Men de fleste af den type forkastninger ligger under havet, hvor en havbundsplade dykker ned i jordens kappe og skaber en dybhavsgrav. Bl.a. derfor har jordskælvsplagede Japan valgt at bygge verdens nok mest avancerede boreskib, Chikyū, der flere gange har boret ned gennem den enorme forkastning øst for østaten, der forårsagede det katastrofale skælv og den dødbringende tsunami 11. marts 2011.



Foto: © JAMSTEC, IODP. www.jamstec.go.jp

Chikyū er udstyret som intet andet boreskib med helikopterplatform, kraner i forskellige størrelser og et 30-etager højt stillads, hvorfra boregrev sænkes igennem skroget mod havbunden. Skibet har ikke færre

end syv skruer, der overflødiggør et rør, og holder Chikyū præcist over borehullet. Det sker med hjælp fra computere, gps-satellitter og små radiosendere på havbunden.

Systemet er så effektivt, at skibet kan holde sig helt i ro i tre til fire fire knob strøm, i vindhastigheder op til stormstyrke og i 4,5 meter høje bølger.

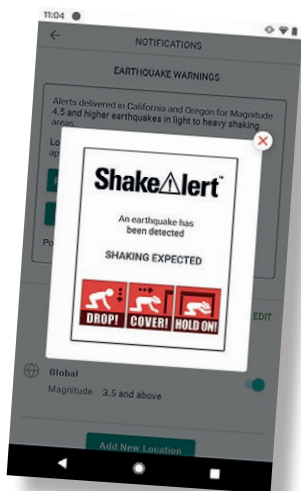
### Undervisningsmateriale: Forløb om jordskælv og bølger

Materiale til forløb om jordskælv og bølger med udgangspunkt i foredraget *Den inderste kerne* og udvalgte artikler fra *Aktuel Naturvidenskab*. Find det under *aktuel naturvidenskab.dk/undervisningsmateriale/naturgeografi*

### Artikel:

Søren Gregersen: Kan jordskælv forudsiges? *Aktuel Naturvidenskab* nr. 4-2000.

at befolkningen installerer en bestemt app, for eksempel MyShake. De første erfaringer fra rigtige varslinger viser, at op til 42 % af befolkningen på den måde bliver advaret direkte.



Appen MyShake er i drift langs USA's vestkyst. Hvis seismometre fx ud for kysten eller langs den berøgtede San Andreas-forkastning registrerer et jordskælv, der er kraftigt nok, så slår appen øjeblikkeligt alarm. Screenshot: UC Berkeley Seismological Laboratory. Læs mere på: [myshake.berkeley.edu](http://myshake.berkeley.edu)

»MyShake er i drift langs USA's vestkyst. Dette er meget effektivt i områder, hvor bygningerne er bygget til at modstå jordskælv, dvs. i rige lande,« siger Bo Holm Jacobsen.

Og netop fordi et varsel kun tillader en brøkdel af beboerne i en storby at nå ud på gaden, er for eksempel 87 % af bygningerne i Tokyo i dag konstrueret til at modstå et stort jordskælv.

Den grundlæggende idé er, at bygningen flekser med rystelserne i stedet for at synke i grus. Det sker for eksempel gennem bløde og elastiske byggematerialer, som tillader bygningen at svaje. Mange huse har desuden et fundament for eksempel med lag af gummi, der opsuger rystelsernes energi, eller tillader jorden at skvulpe under huset, uden bygningen selv bevæger sig. En tredje teknik arbejder med et netværk af støddæmpere på kryds og tværs mellem de bærende elementer af huset.

I dag koster jordskælvssikrede bygninger mellem 10 og 20 %

mere end almindelige bygninger. Det lyder som en god investering, men efter et katastrofalt skælv skal bygningerne ofte rives ned alligevel. Jordskælvssikring betyder nemlig blot, at de ikke styrter sammen. Lidt som en cykelhjelm skal kasseres efter et styrt, også selv om den ikke gik i stykker. En del af beskyttelsen ligger nemlig i, at interne strukturer bryder sammen. Derfor står bygningen stadig efter første skælv, men ikke nødvendigvis efter det næste.

Men i mange fattigere områder af verden er bygningerne endnu ikke bygget med jordskælvssikring. »I stedet styrter de sammen ved store jordskælv. Så nytter det ikke noget at kaste sig ind under et bord, og så nytter et varsel på for eksempel ti sekunder ikke meget,« understreger Bo Holm Jacobsen.

Han håber dog, at mange flere områder i verden får råd til at bygge jordskælvssikrede bygninger over de kommende 20 år. »Når det er på plads, vil systemer som MyShake blive meget mere nyttige – også globalt,« slutter han. ■