

## **SCREENING ANALYSIS STABILITAS LERENG BENDUNGAN URUGAN AKIBAT GEMPA DI INDONESIA**

### **SCREENING ANALYSIS OF SEISMIC SLOPE STABILITY OF EMBANKMENT DAM IN INDONESIA**

**Mahdi Ibrahim Tanjung<sup>1)</sup> Reza Nirwana Sari<sup>1)</sup> Ranisa Ghafara<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Balai Litbang BHGK, Puslitbang Sumber Daya Air, Jl. Ir. H. Juanda No. 193 Bandung

Email: [mahdian\\_ebrahim@yahoo.com](mailto:mahdian_ebrahim@yahoo.com)

#### **ABSTRAK**

Peta bahaya gempa 2010 menunjukkan percepatan gempa skenario gempa desain maksimum (MDE) mengalami peningkatan sekitar 2 kali lipat. Hal ini menimbulkan pertanyaan bagaimana dengan bendungan yang didesain dengan beban gempa terdahulu. Saat ini Indonesia memiliki lebih dari 210 bendungan besar. Oleh karena itu perlu dilakukan *screening analysis* untuk mengetahui mana bendungan yang perlu analisis lebih detail dan mana yang tidak. *Screening analysis* dilakukan pada bendungan urugan dengan kondisi tidak berada pada tanah lunak, atau pada tubuh atau fondasi bendungan terdapat material yang dapat kehilangan kuat geser akibat beban dinamik. *Screening analysis* dimulai dari menentukan tipikal bendungan untuk digunakan dalam parametrik studi pengaruh parameter timbunan, kemiringan lereng, dan beban gempa terhadap keamanan stabilitas lereng akibat gempa. Hasil dari parametrik studi ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam *screening analysis* stabilitas lereng bendungan urugan akibat gempa. Dari 38 bendungan urugan batu yang dianalisis seluruhnya lolos *screening* pada kondisi beban MDE, dan dari 55 bendungan urugan tanah 40 % diantaranya tidak lulus *screening* pada persyaratan deformasi 50 % dari tinggi jagaan akibat kondisi beban MDE sehingga butuh analisis lebih lanjut.

**Kata kunci:** Bendungan urugan, *Screening Analysis*, Stabilitas Lereng, Gempa, MDE.

#### **ABSTRACT**

*The 2010 seismic hazard map shows the acceleration of the maximum design earthquake (MDE) scenario has increased approximately 2 fold, this case raises the question of how the dam designed by the pervious seismic load. Today Indonesia has more than 210 large dams. Therefore it is necessary to do screening analysis to find out which dam needs to be more detailed analysis and which are not. Screening analysis is done for embankment dam with fondation not on soft soil, or on the body or foundation of the dam there is a material that can lose shear strentgh due to dynamic load. Screening analysis begins with determining a typical dam for use in parametric studies of embankment parameters, variation of slope, and seismic loads on the safety of slope stability due to earthquake. The parametric study were then used as a basis for screening of embankment dam seismic slope stability. From 38 rockfill dam analyzed, all of them passed the screening under MDE scenario, and from 55 earthfill dam 40% of them not pass the screening on the 50% remaining free board requirement due to MDE scenario so that further analysis was needed. Previously to know the seismic slope stabilit of embankment dam doe to seismic hazard map revision, usually done one by one analysis with pseudostatic method, in this paperfor the first time in Indonesia applied screening analysis for slope stability analysis of dam due to earthquake.*

**Keywords:** Embankment dam, *Screening Analysis*, Slope stability, earthquake, MDE.

## PENDAHULUAN

Sebagian besar bendungan direncanakan menggunakan kriteria desain gempa dan metode analisis dinamik yang sudah kadaluarsa untuk saat ini. Hal ini menunjukkan pentingnya mengevaluasi ulang keamanan bendungan akibat gempa (Weiland, 2012), maka dari itu perlu dilakukan beberapa kali analisis dinamik selama umur bendungan. Beberapa bendungan telah melakukan analisis ulang, tetapi sebagian besar bendungan belum melakukannya.

Sejak peta bahaya gempa 2010 diterbitkan, belum seluruh bendungan diperiksa kembali berdasarkan standar beban yang baru, sehingga keamanan bendungan akibat gempa tidak diketahui berapa bendungan yang masih memenuhi persyaratan keamanan dan mana yang tidak memenuhi. Salah satu persyaratan keamanan bendungan adalah bendungan harus aman terhadap masalah stabilitas struktur, diantaranya akibat beban gempa. Peta bahaya gempa rutin diperbaharui sesuai dengan perkembangan keilmuan kegempaan. Hasil revisi peta bahaya gempa 2010 menunjukkan percepatan gempa pada skenario MDE mengalami kenaikan hingga 2 kali lipat, hal ini menimbulkan pertanyaan mengenai bendungan yang didesain dengan beban gempa terdahulu. Saat ini Indonesia memiliki lebih dari 210 bendungan besar, untuk menganalisis seluruh bendungan itu diperlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit. Oleh karena itu perlu dilakukan *screening analysis* untuk mengetahui bendungan-bendungan yang perlu analisis lebih detail dan yang tidak.

Pada penelitian ini *screening* hanya dilakukan untuk kondisi gempa ekstrem yaitu skenario kondisi gempa MDE, sehingga analisis ini fokus terhadap masalah keamanan bendungan. Sebelum melakukan *screening* terlebih dahulu menentukan prosedur dan kriteria *screening* kemudian dievaluasi hasil *screening* tersebut. Prosedur *screening* pada penelitian ini dibuat berdasarkan potongan tipikal bendungan untuk tipe urugan batu, dan urugan tanah. Potongan tipikal tersebut digunakan untuk mempermudah menghitung koefisien gempa yang mengakibatkan faktor keamanan stabilitas lereng sama dengan satu ( $k_y$ ). Nilai koefisien gempa kritis ( $k_y$ ) dibandingkan dengan beban gempa yang masuk ke tubuh bendungan kemudian didapat nilai faktor keamanan bendungannya. Bendungan yang memiliki faktor keamanan kurang dari satu kemudian dilanjutkan ke perhitungan deformasi permanen dengan metode simplifikasi Makdisi dan Seed (1978). Kriteria *screening* diambil berdasarkan pedoman analisis

dinamik keamanan bendungan akibat gempa (2004), bendungan pada kondisi skenario gempa MDE boleh terdeformasi tetapi tidak diizinkan lebih dari 50% tinggi jagaan. Bendungan yang hasil *screening* menunjukkan deformasi lebih dari 50 % tinggi jagaan perlu dilanjutkan ke analisis dinamik dengan metode riwayat waktu.

Sebagian besar bendungan di Indonesia yang dibangun sampai dengan tahun 2010 direncanakan dengan menggunakan kriteria desain gempa dan metode analisis dinamik berdasarkan standar atau pedoman yang berlaku pada saat itu. Sejak peta bahaya gempa 2010 diterbitkan, belum seluruh bendungan diperiksa kembali berdasarkan standar beban yang baru, sehingga keamanan bendungan akibat gempa tidak diketahui berapa bendungan yang masih memenuhi persyaratan keamanan dan mana yang tidak memenuhi persyaratan. Salah satu persyaratan keamanan bendungan adalah bendungan harus aman terhadap masalah stabilitas struktur, diantaranya akibat beban gempa.

Peta bahaya gempa rutin untuk Indonesia telah diperbaharui sesuai dengan perkembangan keilmuan kegempaan. Hasil revisi peta bahaya gempa 2010 menunjukkan percepatan gempa pada skenario MDE mengalami kenaikan hingga 2 kali lipat. Hal ini menimbulkan pertanyaan mengenai bendungan yang didesain dengan beban gempa terdahulu, sehingga melakukan evaluasi ulang keamanan bendungan akibat gempa menunjukkan hal yang penting (Weiland, 2012). Analisis dinamik perlu dilakukan beberapa kali selama umur bendungan. Indonesia saat ini memiliki lebih dari 210 bendungan besar, untuk menganalisis seluruh bendungan itu diperlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit. Oleh karena itu perlu dilakukan *screening analysis* untuk mengetahui bendungan-bendungan yang perlu analisis lebih detail dan yang tidak. Beberapa bendungan telah dilakukan analisis ulang, tetapi sebagian besar bendungan belum dilakukannya.

## KAJIAN PUSTAKA

Goncangan gempa untuk desain dan evaluasi bendungan harus mencakup goncangan tanah *Operating Basis Earthquake* (OBE) dan *Safety Evaluation Earthquake* (SEE) atau dalam terminologi sebelumnya adalah gempa desain maksimum (MDE) (ICOLD 2010). Gaya gempa yang terkait dengan OBE adalah yang mempertimbangkan kondisi beban tidak biasa, sedangkan yang berkaitan dengan SEE adalah mempertimbangkan skenario beban ekstrim. Beban gempa kemudian dikombinasikan dengan

beban yang diperkirakan akan ada selama operasi rutin.

OBE adalah suatu *level ground motion* yang rasional diperkirakan terjadi selama umur layanan bendungan, yaitu, dengan kemungkinan terlampaui 50 persen selama masa layan. Hal ini sesuai dengan periode ulang 144 tahun untuk sebuah bendungan dengan masa layan 100 tahun. SEE atau MDE adalah *level ground motion* maksimum untuk disain atau evaluasi sebuah struktur. Sebagai nilai minimum, untuk selain struktur yang bersifat kritis, *ground motion* MDE diambil pada nilai 1 persen kemungkinan terlampaui pada periode 100 tahun, atau setara dengan periode ulang 10000 tahun. Untuk struktur kritis, *ground motion* MDE diambil sama dengan *ground motion Maximum credible earthquake* (MCE). Struktur kritis didefinisikan sebagai struktur yang merupakan bagian dari suatu proyek bahaya tinggi dan apabila terjadi kegagalan akan mengakibatkan kehilangan jiwa. MCE didefinisikan sebagai gempa terbesar yang rasional yang diperkirakan akan terjadi pada suatu sumber tertentu, berdasarkan seismologis dan tanda-tanda geologi.

Ada dua kasus yang memerlukan evaluasi keamanan bendungan eksisting akibat gempa (Wieland, 2006): Ketika gempa kuat terjadi, instrumen pencatat gempa pada bendungan mencatat guncangan tersebut dan pemeriksaan pasca gempa menunjukkan beberapa kerusakan, dan ketika kriteria desain gempa atau kriteria kinerja akibat gempa telah berubah dan/atau ada perkembangan baru dalam penilaian bahaya gempa, metode analisis dinamik, perilaku material akibat beban dinamik, dll.

Sementara ini di Indonesia belum terdapat kejadian kegagalan atau kerusakan yang signifikan pada bendungan akibat gempa, namun bukan berarti bendungan di Indonesia sudah seluruhnya tahan terhadap gempa. Beberapa kejadian gempa di dunia yang mengakibatkan kerusakan yang signifikan terhadap bendungan adalah gempa Tohoku dan gempa Wenchuan. Selama gempa Tohoku pada tanggal 11 Maret 2011, Bendungan Fujinuma-ike dengan tinggi 18,5 m runtuh dan mengakibatkan gelombang banjir yang menewaskan 8 orang. Ini adalah kasus pertama kegagalan bendungan yang disebabkan gempa menyebabkan kehilangan jiwa. Fujinuma-ike adalah bendungan urugan tanah yang selesai dibangun tahun 1949, volume tampungan 1,5 juta m<sup>3</sup>, yang pada saat gempa pada kondisi hampir penuh (Matsumoto dkk., 2011). Gempa kuat dapat mempengaruhi area yang luas dan banyak bendungan dapat

mengalami guncangan tanah yang kuat. Hal ini terjadi pada gempa Wenchuan dan Tohoku.

Selama gempa Wenchuan gerakan tanah dan longsor waduk merupakan bahaya baru yang tidak dipertimbangan sebelumnya dalam perencanaan bendungan dan bangunan pelengkap. Selain itu, sejumlah besar bendungan dan pembangkit listrik terpengaruh oleh gempa ini. Gempa Wenchuan mengkonfirmasi dan menunjukkan bahwa bendungan, pelimpah dan bangunan pelengkap harus dapat menahan berbagai efek dari guncangan gempa, khususnya beberapa faktor penting yaitu (Wieland and Chen, 2009):

- a) Setelah gempa kuat, pedoman bahaya gempa pada lokasi bendungan dan pedoman desain gempa harus dinilai ulang, dikaji ulang, dan diperbaharui;
- b) Di daerah pegunungan, gerakan tanah harus diperkirakan, yang menghambat akses bendungan setelah gempa bumi selama beberapa bulan, dan runtuh batu yang dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan pada bangunan pelengkap dan peralatan hidromekanikal;
- c) Bahaya gempa memiliki beberapa kondisi lapangan yang spesifik, yang harus dipertimbangkan dalam desain bendungan baru atau evaluasi keamanan bendungan eksisting;
- d) Keamanan yang berkaitan dengan pintu dan struktur pintu harus tetap dapat beroperasi setelah gempa kuat;
- e) Lapisan beton permukaan bendungan CFRD rentan terhadap guncangan tanah yang kuat terutama karena gaya yang besar pada pelat beton. Hal ini dapat dikurangi secara signifikan dengan menyediakan lebar *joint* dan *detailing joint* sebagaimana tulangan dari pelat beton;
- f) Instrumentasi gempa masih kurang pada kebanyakan bendungan besar;
- g) Metode penilaian keamanan lereng akibat gempa masih perlu pengembangan lebih lanjut;
- h) Setiap gempa kuat terjadi, fenomena baru memperlihatkan hal yang diabaikan oleh desainer bendungan masa lalu.

Efek dari 2011 *Great East Japan Earthquake* pada bendungan, terutama bendungan urugan, dan karakter gerakan gempa yang diamati pada fondasi bendungan saat gempa dirangkum sebagai berikut:

- a) Sebagai hasil dari inspeksi keamanan bendungan khususnya yang dilakukan segera setelah gempa, lebih dari 10 % dari semua bendungan yang diperiksa melaporkan

kerusakan. Rasio ini naik menjadi 18 % untuk bendungan urugan;

- b) Kerusakan akibat gempa kuat pada bendungan urugan mencakup retakan lebar dan panjang pada puncak bendungan dan retak pada tubuh bendungan urugan, retakan pada permukaan kedap pada bendungan AFRD dan sementara terjadi peningkatan bocoran;
- c) Pemeriksaan khusus dan penyelidikan rinci selanjutnya memastikan bahwa tidak satu pun bendungan yang mengalami kerusakan cukup parah yang mempengaruhi keamanan bendungan;
- d) Karakter utama dari guncangan gempa yang teramati pada fondasi bendungan selama gempa adalah durasi guncangan yang sangat panjang. Selain itu, ada kemungkinan bahwa komponen gerakan gempa dengan periode lebih pendek tidak teredam dengan baik bahkan sampai jarak tertentu dari sumber gempa akibat skala gempa yang sangat besar. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut;
- e) Besarnya penurunan dan perubahan jumlah rembesan setelah ditinjau kembali dengan membandingkan data gempa masa lalu, hasilnya menunjukkan bahwa dampak gempa di bendungan urugan adalah tidak kecil untuk beberapa bendungan, meskipun percepatan puncak guncangan gempa yang diamati pada fondasi bendungan selama gempa tidak lebih kuat dari gempa di masa lalu yang terjadi lebih dekat. Studi lebih lanjut diperlukan untuk mengklarifikasi perilaku dinamik bendungan urugan untuk guncangan gempa dengan durasi yang lama (Yamaguchi, 2012).

Dari keruntuhan Bendungan Fujinuma (Gambar 1) dapat ditarik pelajaran pentingnya memastikan tidak adanya material organik (Gambar 2) pada fondasi bendungan, dan apabila ada lapisan lunak pada fondasi bendungan perlu mempertimbangkan beban dinamik pada saat desain tubuh bendungan.



**Gambar 1** Keruntuhan Bendungan Fujinuma Akibat Gempa (Pradel, 2013)



**Gambar 2** Tanah Organik Pada Fondasi (Pradel, 2013)

### Bendungan di Indonesia

Saat ini di Indonesia telah dibangun lebih dari 210 bendungan, tipe bendungan yang paling banyak adalah bendungan dengan timbunan tanah (*earth-fill dam*). Adapun jumlah untuk masing-masing tipe bendungan adalah:

- a) 146 bendungan urugan tanah;
- b) 56 bendungan urugan batu (termasuk *Rockfill* dengan inti dan CFRD);
- c) 8 bendungan beton.

Setiap tipe bendungan memiliki respon yang berbeda-beda terhadap gempa, hal ini dipengaruhi oleh karakteristik material timbunan, bentuk zona, dan ketinggian bendungan. Berikut ini adalah contoh bentuk geometri dari bendung/bendungan tipe urugan tanah yang ada di Indonesia.

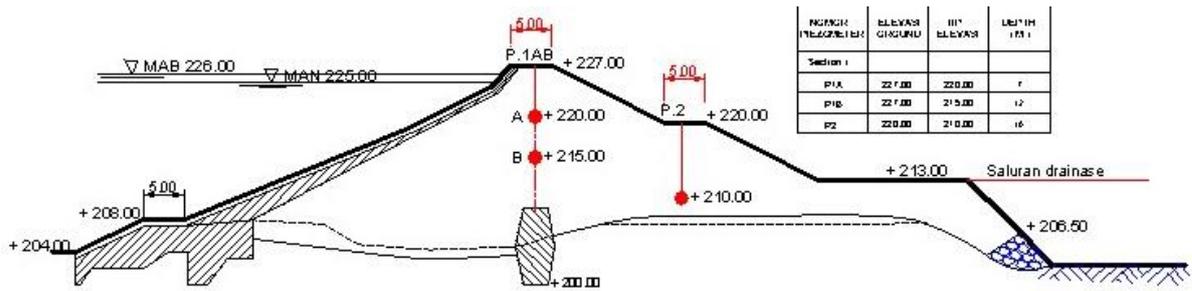
Bendungan Plumbon (Gambar 3) terletak di Desa Puloarjo, Kecamatan Eromoko, Kabupaten Wonogiri, Provinsi Jawa Tengah. Bendungan ini didirikan tahun 1928 dengan tinggi 28,80 m.

Bendungan Nawangan (Gambar 4) yang terletak di kota Wonogiri Jawa Tengah, bendungan ini didirikan pada tahun 1976 dengan tinggi 25 m.

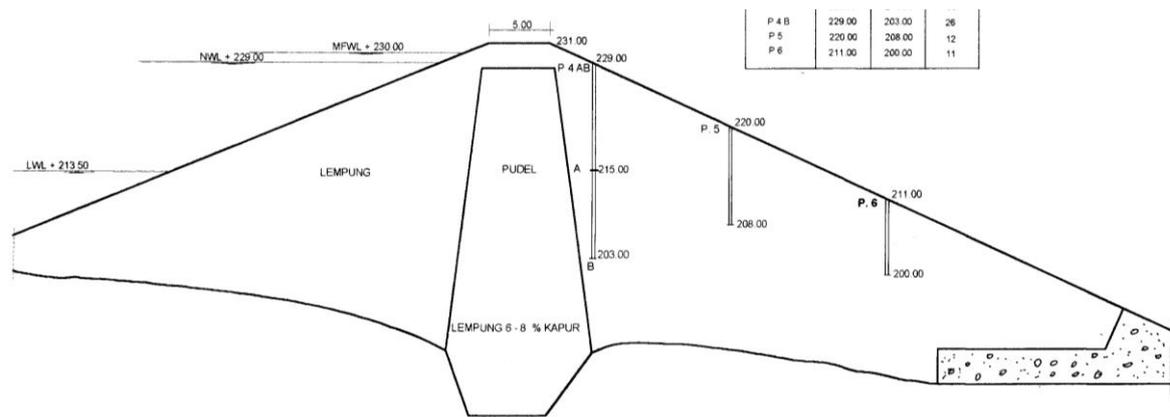
Bendungan Riam Kanan (Gambar 5) terletak di Desa Aranio, Kecamatan Aranio, Kabupaten Banjar, Propinsi Kalimantan Selatan, bendungan ini didirikan pada tahun 1973 dengan tinggi 57 m.

Bendungan Batu Bokah (Gambar 6) terletak di kota Praya Barat Nusa Tenggara Barat, bendungan ini didirikan pada tahun 1994 dengan tinggi 24,5 m.

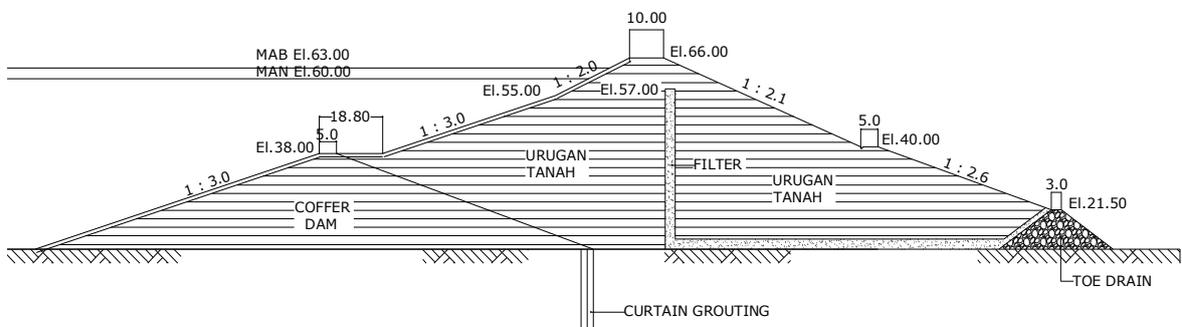
Screening Analysis Stabilitas Lereng Bendungan Urugan Akibat Gempa di Indonesia (Mahdi Ibrahim Tanjung, dkk)



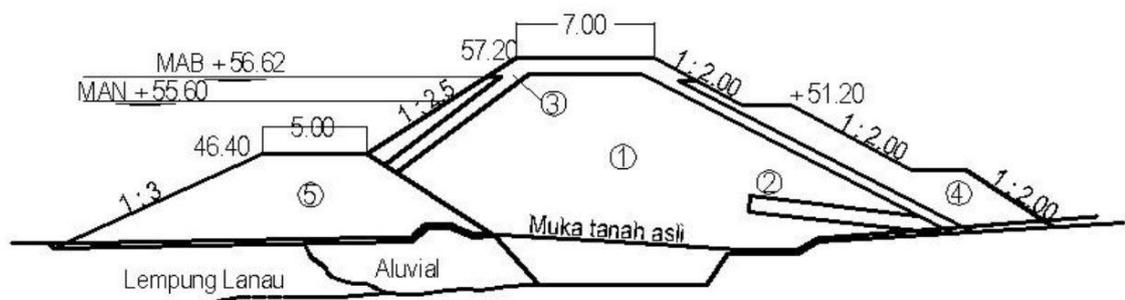
Gambar 3 Bendungan Plumbon (Kasiro, 1995)



Gambar 4 Bendungan Nawangan (Kasiro, 1995)



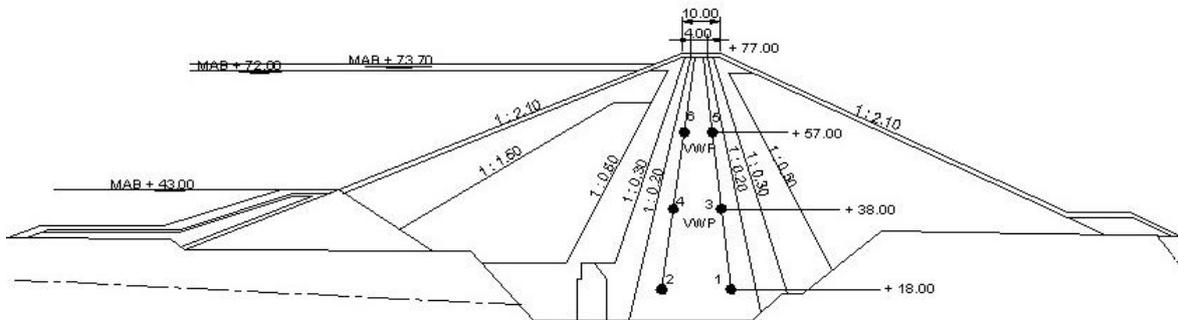
Gambar 5 Bendungan Riam Kanan (Kasiro, 1995)



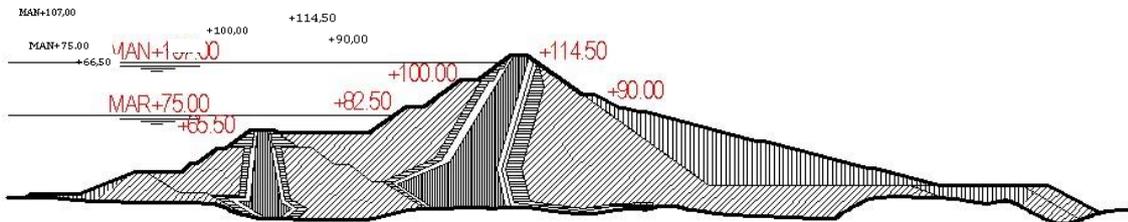
Gambar 6 Bendungan Batu Bokah (Kasiro, 1995)

Berikut ini adalah contoh bentuk geometri dari bendungan tipe urugan batu yang ada di Indonesia:  
 Bendungan Sempor (Gambar 7) terletak di kota Kebumen Jawa Tengah, bendungan ini didirikan pada tahun 1978 dengan tinggi 58 m.

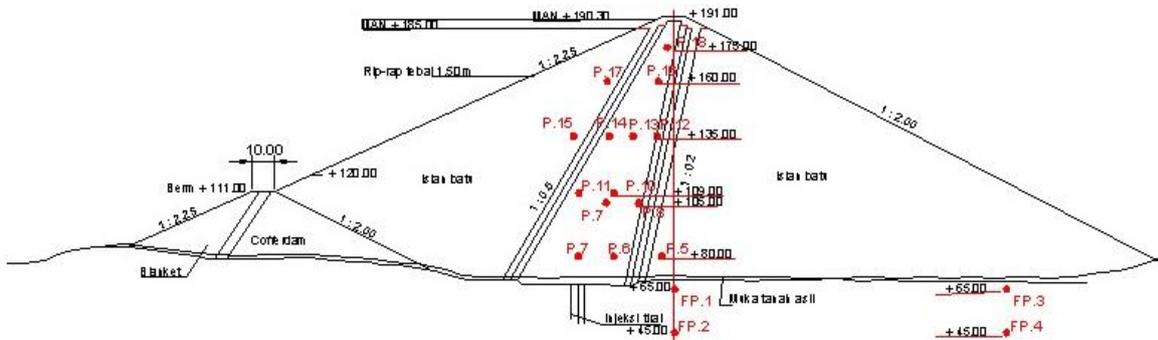
Bendungan Jatiluhur (Gambar 8) terletak di kota Purwakarta Jawa Barat, bendungan ini didirikan pada tahun 1967 dengan tinggi 105 m.



Gambar 7 Bendungan Sempor (Kasiro, 1995)



Gambar 8 Bendungan Jatiluhur (Bendungan Besar Indonesia, 1995)



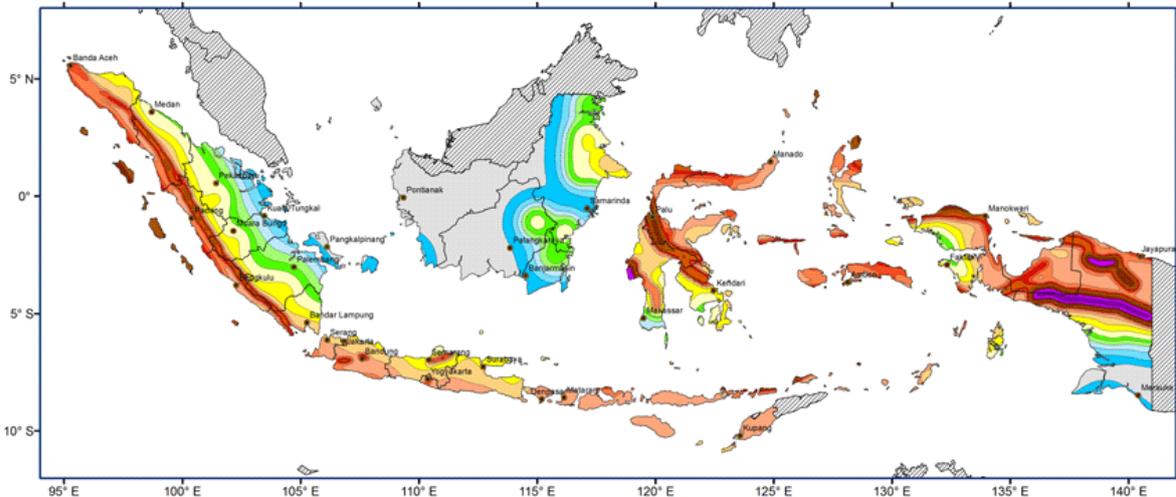
Gambar 9 Bendungan Wadaslintang (Kasiro, 1995)

Bendungan Wadaslintang (Gambar 9) terletak di kota Kebumen Jawa Tengah, bendungan ini didirikan pada tahun 1987 dengan tinggi 125 m.

**Beban Gempa**

Sebagian besar bendungan di Indonesia dibangun di daerah bahaya gempa tinggi, bahkan ada beberapa bendungan yang dibangun dekat dengan sesar aktif, bendungan lainnya yang dibangun di daerah dengan gempa rendah umumnya dibangun di lokasi dengan fondasi tanah lunak seperti di kalimantan timur dan batam. Beban gempa untuk desain bendungan

sebelumnya menggunakan peta bahaya gempa tahun 2004, hasil revisi peta bahaya gempa 2010 menunjukkan terjadi peningkatan percepatan di batuan dasar hingga 2 kali lipat untuk periode ulang gempa 10.000 tahun (skenario MDE) dibandingkan dengan peta 2004, untuk lokasi dekat dengan sesar aktif bahkan meningkat lebih dari 3 kali. Hal ini sebaliknya untuk periode ulang 100 tahun (skenario OBE), untuk skenario OBE percepatan gempa pada peta bahaya gempa 2010 cenderung lebih rendah dari peta bahaya gempa 2004. Peta bahaya gempa 2010 untuk periode ulang 10.000 tahun dapat dilihat dibawah.



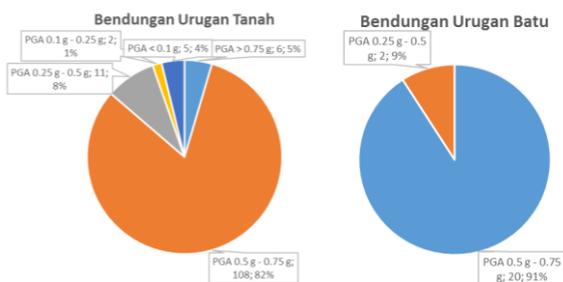
**Gambar 10** Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar, Peta Bahaya Gempa 2010 untuk periode ulang 10.000 tahun

Dari 210 bendungan, beban gempa untuk 154 bendungan mencakup bendungan urugan tanah dan bendungan urugan batu menunjukkan sebagian besar bendungan di Indonesia berada pada daerah gempa dengan percepatan puncak di batuan dasar untuk periode ulang 10.000 tahun ada pada kisaran 0,5 g sampai 0,75 g (Gambar 11). Ada sekitar 6 bendungan yang letaknya dekat dengan sesar sehingga nilai percepatan puncaknya lebih dari 0,75 g, dan ada beberapa yang berada pada lokasi gempa yang sangat rendah dengan percepatan puncak di batuan dasar lebih kecil dari 0,1 g. Beberapa bendungan yang berpotensi memiliki percepatan gempa di batuan dasar lebih dari 1 g pada periode ulang 10.000 tahun adalah Bendungan Situ Lembang, Bendungan Banyuwangi, dan Bendungan Grawan.

terlebih dahulu menentukan prosedur dan kriteria *screening* kemudian dievaluasi hasil *screening* tersebut.

Prosedur *screening* pada penelitian ini dibuat berdasarkan potongan tipikal bendungan untuk tipe urugan batu, dan urugan tanah. Potongan tipikal tersebut digunakan untuk mempermudah menghitung koefisien gempa yang mengakibatkan faktor keamanan stabilitas lereng sama dengan satu ( $k_y$ ). Nilai koefisien gempa kritis ( $k_y$ ) dibandingkan dengan beban gempa yang masuk ke tubuh bendungan kemudian didapat nilai faktor keamanan bendungannya. Bendungan yang memiliki faktor keamanan kurang dari satu kemudian dilanjutkan ke perhitungan deformasi permanen dengan metode simplifikasi Makdisi dan Seed (1978).

Kriteria *screening* diambil berdasarkan pedoman analisis dinamik keamanan bendungan akibat gempa (2004), bendungan pada kondisi skenario gempa MDE boleh terdeformasi tetapi tidak diizinkan lebih dari 50% tinggi jagaan. Bendungan yang hasil *screening* menunjukkan deformasi lebih dari 50 % tinggi jagaan perlu dilanjutkan ke analisis dinamik dengan metode riwayat waktu.



**Gambar 11** Distribusi PGA pada bendungan urugan tanah dan urugan batu

## METODOLOGI

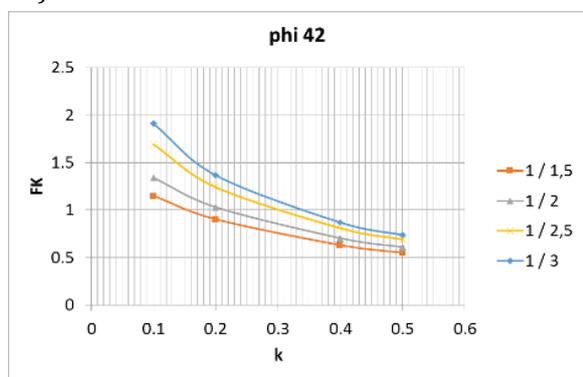
Pada penelitian ini *screening* hanya dilakukan untuk kondisi gempa ekstrem yaitu skenario kondisi gempa MDE, sehingga analisis ini fokus terhadap masalah keamanan bendungan. Sebelum melakukan *screening*

### Prosedur Screening

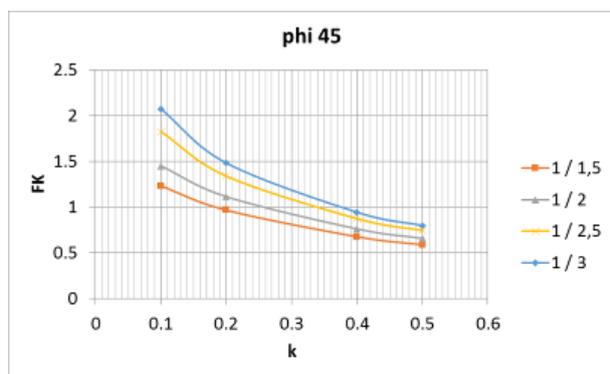
Setiap bendungan memiliki karakteristik material timbunan, fondasi, dan geometri yang unik sehingga perlu analisis khusus perbendungan untuk mengetahui karakteristik yang lebih akurat setiap bendungan. Untuk keperluan *screening* perilaku tersebut disimplifikasi berdasarkan tipe bendungan dan kemiringan lereng, sehingga hasil *screening* hanya menunjukkan gambaran kasar mengenai

performa bendungan akibat gempa. Hal ini perlu ditindak lanjuti dengan analisis bendungan akibat gempa yang lebih detail per bendungan.

Prosedur *screening* diawali pembuatan potongan bendungan tipikal untuk bendungan urugan tanah dan bendungan urugan batu. Tipikal bendungan ini kemudian divariasikan parameter timbunannya, kemiringan lerengnya, dan beban gempa. Untuk bendungan urugan batu parameter phi yang divariasikan, sedangkan untuk bendungan urugan tanah diambil parameter yang cukup konservatif. Hasil perhitungan tersebut kemudian diresumekan dalam grafik dibawah (Gambar 12 dan Gambar 13).



**Gambar 12** Penentuan faktor keamanan secara cepat untuk bendungan urugan batu ( $\phi 42^\circ$ )

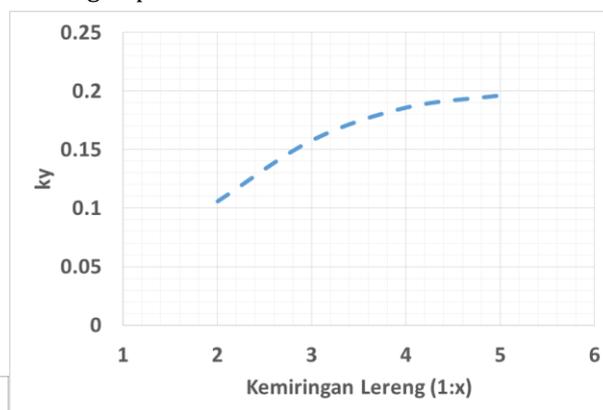


**Gambar 13** Penentuan faktor keamanan secara cepat untuk bendungan urugan batu ( $\phi 45^\circ$ )

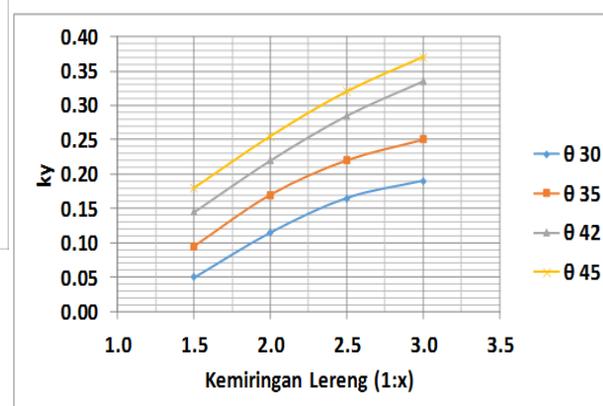
Setelah mendapatkan hubungan faktor keamanan terhadap variasi parameter, kemiringan lereng, dan beban gempa (k), analisis dilanjutkan ke proses penentuan koefisien gempa yang mengakibatkan faktor keamanan sama dengan 1 ( $k_y$ ). Hasil hubungan  $k_y$  terhadap variasi kemiringan lereng dapat dilihat pada gambar di bawah. Dari gambar tersebut menunjukkan hubungan  $k_y$  terhadap kemiringan

lereng tidak linear dan cenderung meningkat seiring dengan semakin landainya lereng.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 14 dan Gambar 15 di bawah ini, nilai  $k_y$  sangat berguna dalam analisis stabilitas lereng akibat gempa, hampir seluruh perhitungan deformasi permanen akibat gempa memerlukan  $k_y$  dalam perhitungannya. Pada penelitian ini  $k_y$  digunakan untuk memisahkan bendungan mana yang perlu dilanjutkan ke perhitungan deformasi permanen, dan mana yang tidak. Setiap bendungan memiliki nilai  $k_y$  yang berbeda-beda bergantung tinggi bendungan, kemiringan lereng dan parameter timbunannya. Nilai  $k_y$  ini dibandingkan dengan beban gempa, apabila beban gempa lebih besar dari dari nilai  $k_y$  maka bendungan tersebut berpotensi terdeformasi, sedangkan apabila beban gempanya lebih kecil maka kecil kemungkinan bendungan tersebut terdeformasi akibat gempa.



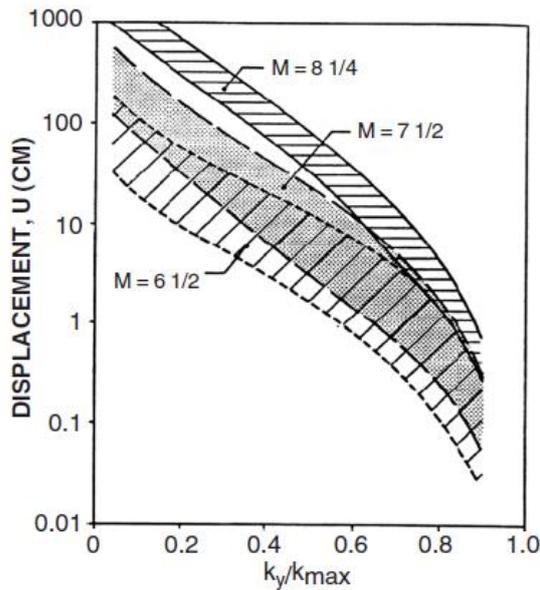
**Gambar 14**  $k_y$  Bendungan Urugan Tanah



**Gambar 15**  $k_y$  Bendungan Urugan Batu

Bendungan yang berpotensi terdeformasi akibat gempa kemudian dihitung deformasinya dengan metode simplifikasi Makdisi dan Seed (1978) seperti ditunjukkan pada Gambar 16, saat ini sudah banyak metode perhitungan deformasi yang lebih baru namun metode ini masih banyak

digunakan dalam dunia praktisi bendungan. Hasil perhitungan dengan metode ini tidak benar-benar menunjukkan deformasi yang sebenarnya dilapangan, hasil perhitungan metode ini hanya semacam indeks yang menunjukkan seberapa besar kemungkinan deformasi terjadi. Untuk dapat hasil perhitungan deformasi yang akurat perlu analisis dinamik dengan metode riwayat waktu.



**Gambar 16** Grafik Metode Simplifikasi Perhitungan Deformasi Makdisi dan Seed (1978)

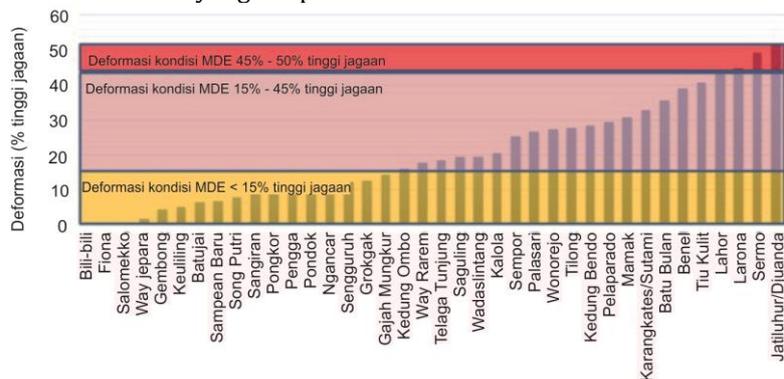
Dalam analisis *screening* ini diasumsikan tidak ada lapisan fondasi atau material timbunan yang berpotensi kehilangan kuat geser seperti terjadi likuifaksi atau terdapat lapisan organik. Apabila terjadi kehilangan kuat geser akibat gempa maka bendungan sudah hampir pasti akan mengalami deformasi yang besar akibat guncangan gempa kuat seperti kasus-kasus keruntuhan bendungan akibat gempa diluar negeri. Oleh karena itu setiap pembangunan bendungan harus menjamin tidak ada lapisan fondasi atau material timbunan yang berpotensi

kuat geser turun secara signifikan akibat beban dinamik.

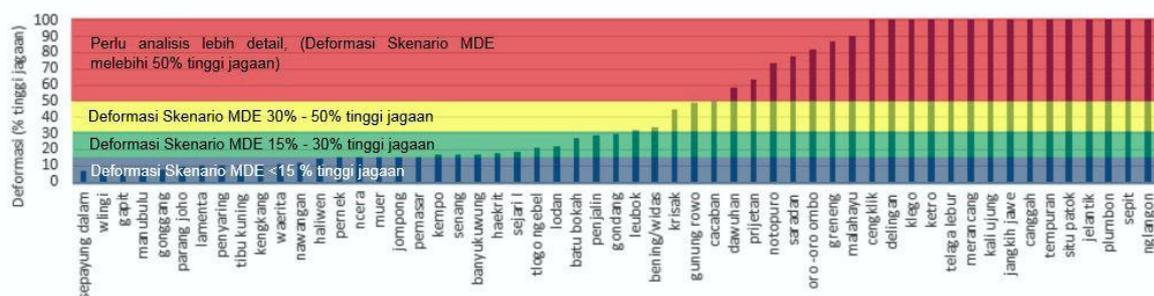
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Perhitungan stabilitas akibat gempa dalam analisis *screening* ini adalah berdasarkan metode pseudostatik, analisis pseudostatik ini tergolong konservatif karena mengasumsikan beban gempa sebagai koefisien beban gempa dikalikan massa tanah pada bidang gelincir sehingga seolah-olah beban gempa mendorong secara kontinu. Sedangkan untuk periode ulang gempa 10.000 tahun hampir seluruh bendungan di Indonesia memiliki percepatan lebih dari 0.5 g. Oleh karena itu hasil analisis menunjukkan hampir seluruh bendungan di Indonesia yang dianalisis memiliki faktor keamanan kurang dari satu akibat beban gempa periode ulang 10.000 tahun, namun setelah dilanjutkan dengan perhitungan deformasi untuk bendungan urugan batu semuanya lolos *screening*, atau dalam hal ini adalah masih memenuhi persyaratan keamanan deformasi akibat gempa kurang dari 50 % tinggi jagaan. Bendungan urugan material penyusunnya didominasi oleh material tanah sehingga secara kuat gesernya lebih rendah dari material urugan batu, oleh sebab itu hasil *screening* pada bendungan urugan tanah ada sekitar 22 bendungan yang tidak lulus *screening* sehingga perlu ada analisis lebih lanjut untuk memastikan keamanannya akibat gempa. Analisis lebih lanjut berupa analisis dinamik dengan metode *time histories*, dengan analisis ini diharapkan didapat hasil yang lebih akurat.

Analisis *Screening* ini sangat konservatif sehingga menghasilkan nilai deformasi yang relatif lebih besar dibandingkan dengan analisis dinamik. Dari hasil analisis *screening* ini diharapkan bendungan yang tidak lolos *screening* tidak hanya dilanjutkan ke analisis dinamik tetapi yang lebih penting adalah memastikan tidak ada material yang berpotensi penurunan kuat geser secara signifikan akibat beban gempa.



**Gambar 17** Resume *Screening* Bendungan Urugan Batu Akibat Gempa



Gambar 18 Resume Screening Bendungan Urugan Tanah Akibat Gempa

## KESIMPULAN

Dengan menggunakan beban gempa 2010 periode ulang 10.000 tahun, hampir semua bendungan di Indonesia memiliki  $FS < 1$ , dari 80 bendungan yang memiliki data yang relatif lengkap, hanya 5 bendungan yang memiliki  $FS > 1$ .

Deformasi Bendungan urugan batu di Indonesia akibat gempa memenuhi persyaratan deformasi, sedangkan bendungan urugan tanah lebih rentan terhadap gempa, hal ini ditunjukkan beberapa bendungan urugan mengalami deformasi akibat gempa yang melampaui 50% tinggi jagaan sehingga memerlukan analisis lebih lanjut.

Bendungan tua harus diperiksa menggunakan kriteria gempa terbaru, metode analisis dinamik, dan dipastikan tidak ada lapisan berpotensi terlikuifaksi atau material organik baik di tubuh bendungan maupun fondasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada kawan-kawan Laboratorium Geoteknik, Balai Bangunan Hidraulik dan Geoteknik Keairan atas semua bantuannya sehingga penelitian ini dapat terselesaikan.

## DAFTAR PUSTAKA

Pradel, D.F., J.M. Wartman, and B.M Tiwari, 2013, Failure of the Fujinuma Dams during the 2011 Tohoku Earthquake, *Geo-Congress* 2013: 1566-1580.

Dirjen SDA, 2008, Analisis Dinamik Bendungan Urugan, Departemen Pekerjaan Umum.

Dirjen SDA, 2014, Dams of Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum.

Irsyam, M., 2010, Peta Bahaya Gempa Bumi Indonesia, Kemen. PU.

ICOLD, 2010, Selecting seismic parameters for large dams. Guidelines, Revision of Bulletin 72, Committee on Seismic Aspects of Dam

Design, International Commission on Large Dams, Paris.

Kasiro, I., 1995, Bendungan Besar Indonesia, Departemen Pekerjaan Umum.

Matsumoto, N., T. Sasaki, and T. Ohmachi, 2011. The 2011 Tohoku earthquake and dams, *Proc. Int. Symp. On Dams and Reservoirs under Changing Challenges, Schleiss & Boes (Eds). 79th Annual Meeting of ICOLD, Swiss Committee on Dams, Lucerne, Switzerland, June 1.*

Makdisi, F.I., and Seed, H.B. (1978), "Simplified Procedure for Estimating Dam and Embankment Earthquake-Induced Deformations," *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 104, No. 7, pp. 849-867.*

Najoan, T.F., 2004, Analisis Stabilitas Bendungan Akibat Gempa, Kemen. Pemukiman dan Prasarana Wilayah.

Wieland, M., 2006, Earthquake safety of existing dams, keynote lecture, Proc. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 1ECEES, (a joint event of the 13th European Conference on Earthquake Engineering & 30th General Assembly of the European Seismological Commission), Geneva, Switzerland, 3-8 September.

Wieland, M. and Chen, H. (2009). Lessons learnt from the Wenchuan earthquake, *Int. Journal Water Power and Dam Construction*, September.

Wieland, M., 2012, Seismic Design and Performance Criteria for Large Storage Dams, *World Conference Earthquake Engineering* 15th, Lisboa 2012.

Yamaguchi, Y., et al., 2012, Safety inspections and seismic behavior of embankment dams during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake. *Soils and Foundations* 52: 945-955.