

Jordskjelvbeklastning i stabilitetsberegninger

Freddy Yugsi
Sweco Norge AS



Sweco
6 yrs 1 mo

Engineering Geologist

Full-time

Jan 2019 – Present · 2 yrs 6 mos
Trondheim Area, Norway

Geotechnical Engineer

Jun 2015 – Present · 6 yrs 1 mo
Trondheim Area, Norway



Researcher

Geological Survey of Norway

Aug 2011 – Jun 2015 · 3 yrs 11 mos
Trondheim Area, Norway

Natural Hazards Division, Landslides Department



Freddy Yugsi

Engineering Geologist at Sweco



Postdoc

Norwegian Geotechnical Institute (NGI)
Jan 2011 – Aug 2011 · 8 mos



ETH Zurich

6 yrs 3 mos

Scientific Assistant

Jul 2006 – Dec 2010 · 4 yrs 6 mos
Geological Institute

PhD project: Structural evolution of slope instabilities in massive crystalline rocks (Matter Valley, Switzerland).

Guest Researcher

Oct 2004 – Jun 2006 · 1 yr 9 mos



Researcher

HIGEODES

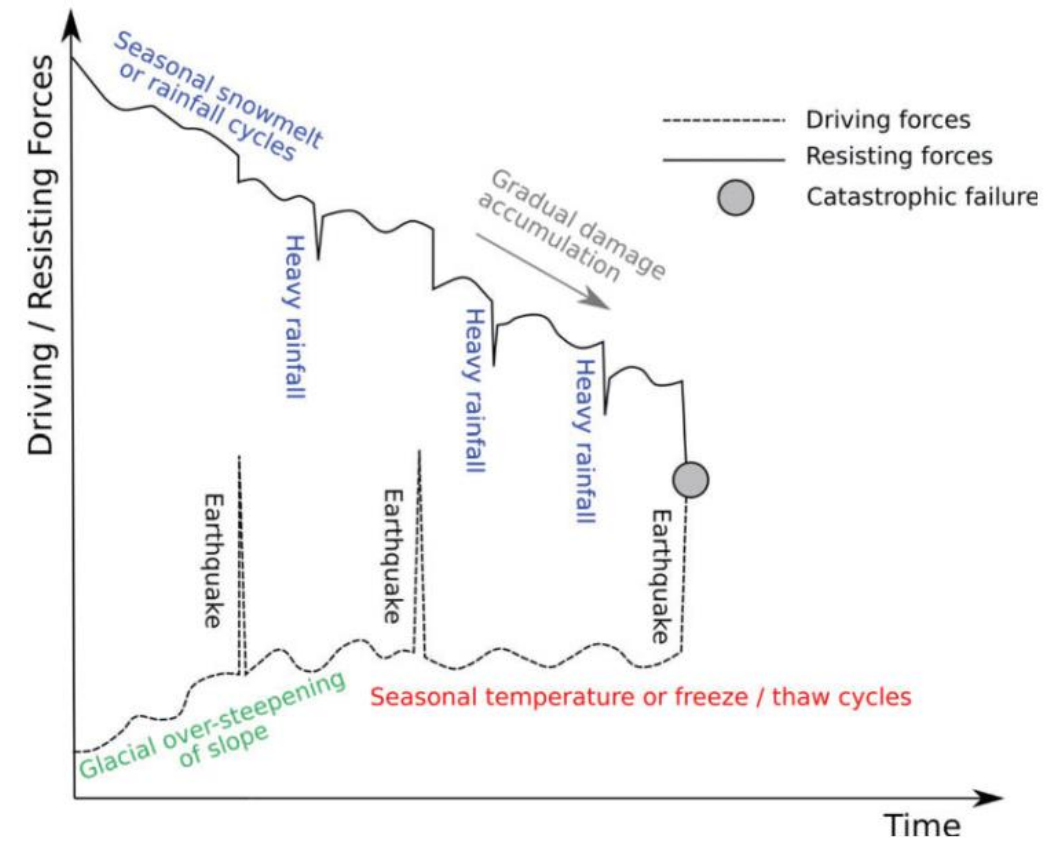
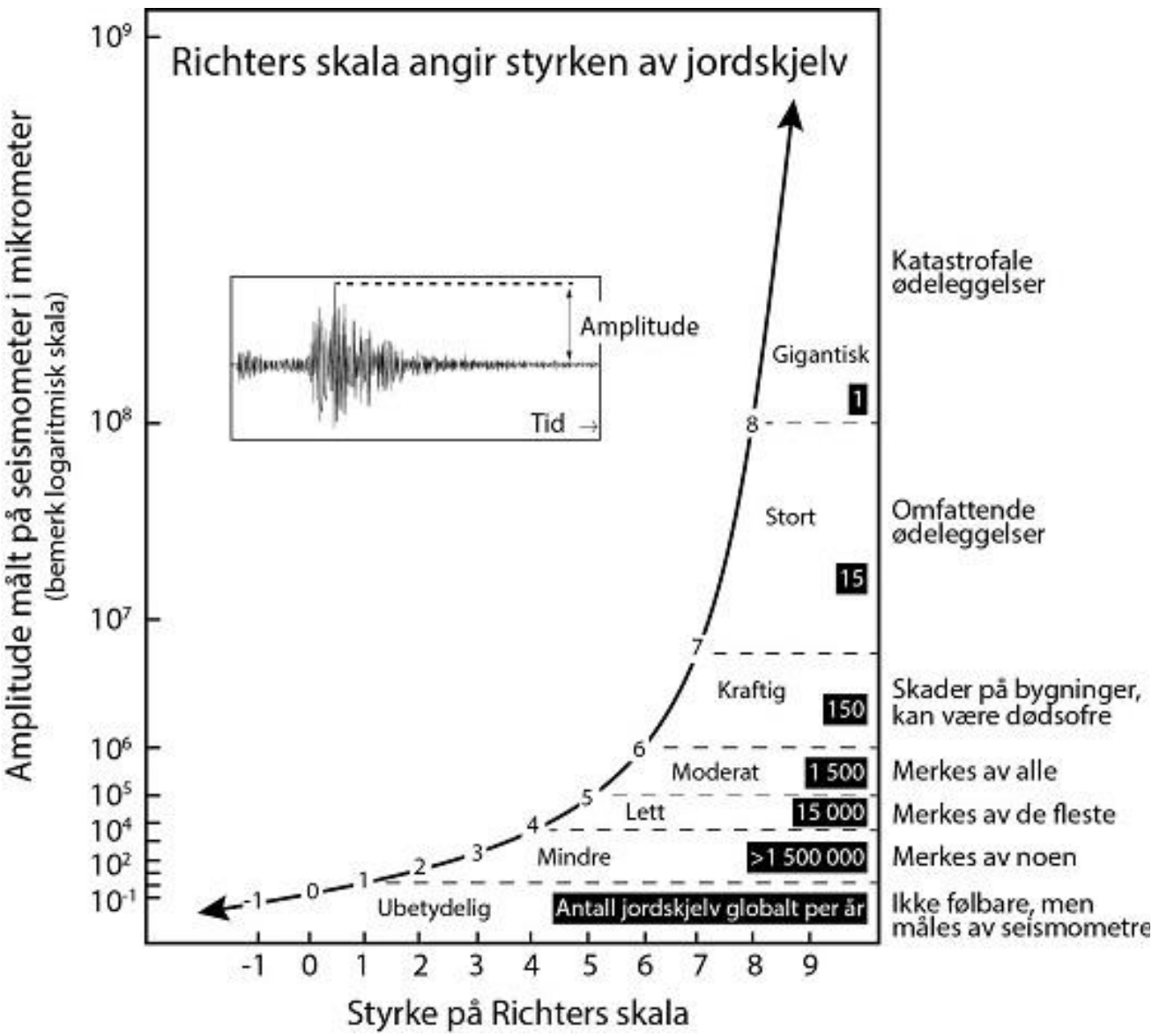
Aug 2000 – May 2004 · 3 yrs 10 mos

freddy.yugsi@sweco.no

Innhold

- Innledning
- Jordskelv i Norge
- Jordskjelv og skred/bergskråninger
- Regelverk
- Metoder
 - Grenselikevektmetode/pseudo-statisk metode
 - Newmark Analyse/Rigid blokk modell
 - Numerisk modellering

Jordskjelveffekter

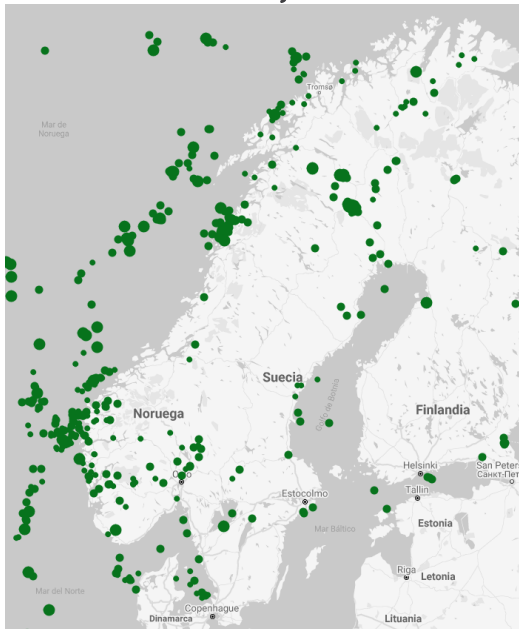


- Very abundant (>100,000 occurrences in 40 earthquakes) – rock falls and slides, and disrupted soil slides
- Abundant (10,000–100,000 occurrences in 40 earthquakes) – soil spreads/slumps
- Moderately common (1000–10,000 occurrences in 40 earthquakes) – soil falls, rapid soil flows, rock slumps
- Uncommon (100–1000 occurrences in 40 earthquakes) – subaqueous slides, slow earth flows, rock block slides, rock avalanches

Jordskjelv i Norge



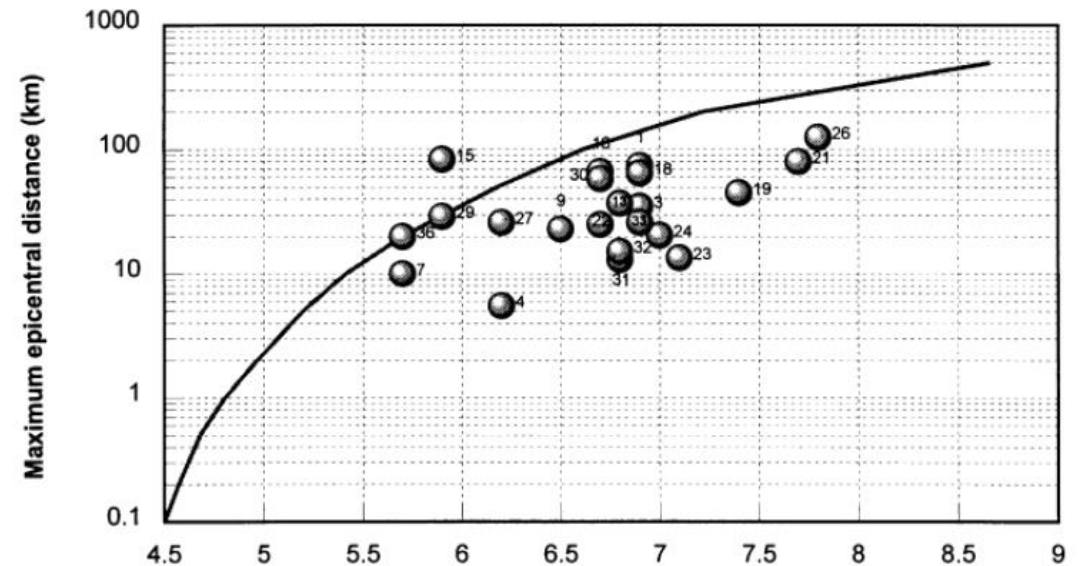
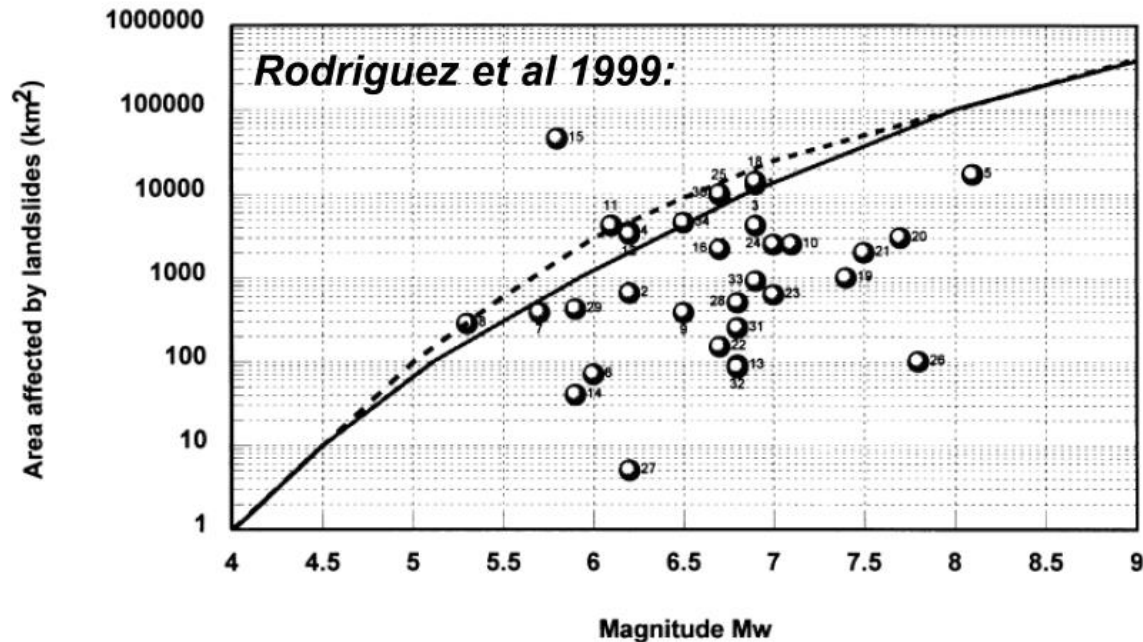
- Det største jordskjelvet i historisk tid skjedde i den ytre del av Ranafjorden på Helgelandskysten i 1819. Jordskjelvet utløste steinsprang fra fjellssidene og jordskred, samt stående bølger i fjorden. Skjelvet ble følt så langt borte som i Troms og Finland. Jordskjelvet hadde en styrke på omkring 5,8, og er sannsynligvis det største skjelvet som har skjedd på fastlandet i det nordlige Europa i historisk tid.
- I 2017 ble det registrert mer enn ti jordskjelv i og utenfor kysten av Norge, blant annet et skjelv i Nordsjøen med styrke 4,5.
- Faren for et stort jordskjelv i Norge er lav. Det forrige store skjelvet i Oslo var i 1904 og målte 5,4 på Richters skala og medførte betydelige materielle skader.
- Oslo ligger i graben, og dette øker sannsynligheten for at det oppstår jordskjelv. I Oslo-graben er det potensial for jordskjelv med styrke på over 5 på Richters skala. Det samme er tilfelle ved Øygarden utenfor Bergen.
- Sjansen for et nytt, stort skjelv i Oslo-området er definitivt tilstede, men det er ikke nok informasjon om returperiodene for jordskjelv i Oslo til å si noe om når det vil skje.



Jordskjelv katalog 1998-2021; www.jordskjelv.no



Jordskjelv og skred



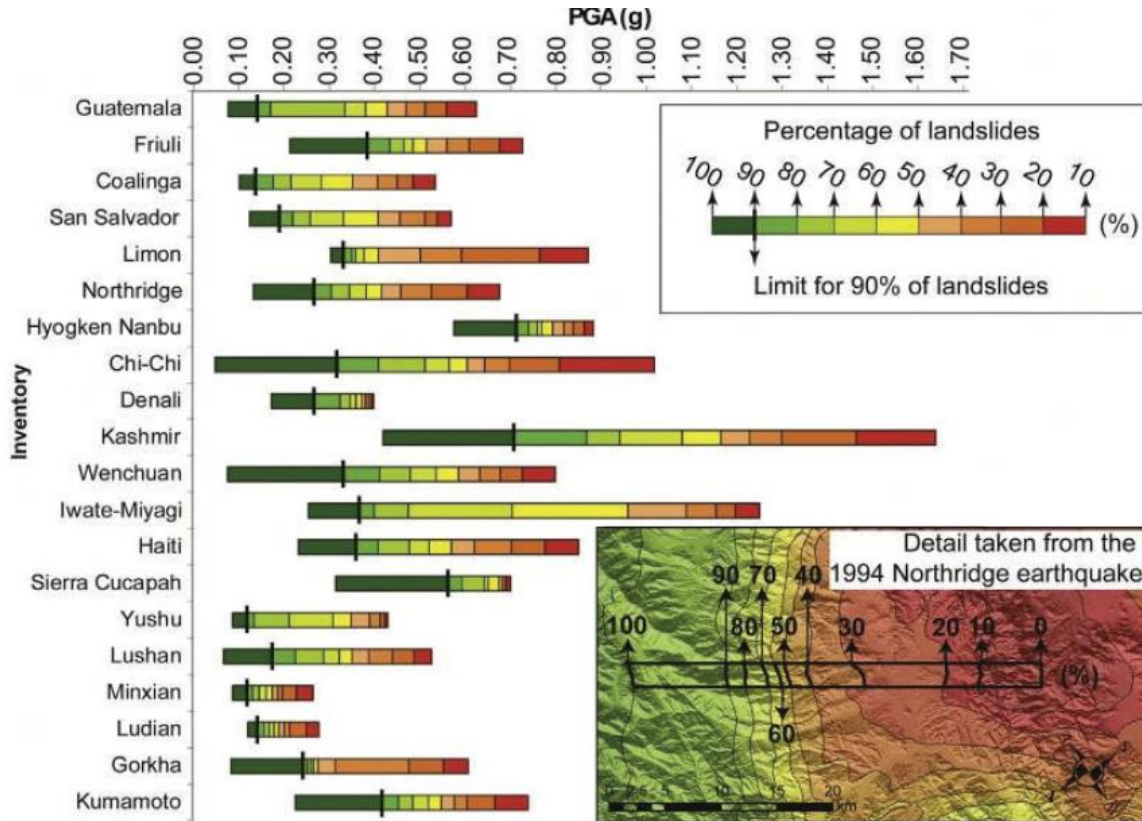
Malamud et al., 2004:

«... we estimate that the minimum earthquake magnitudes that will generate landslides is $M=4.3\pm0.4$.»

Rodriguez et al., 1999:

«... The smallest earthquake to have induced landslides (...) the Ledu (Qinghai, China) earthquake of 7 March 1984, with **M2.9**. (...) triggered due to the shallow earthquake source.»

Jordskjelv og skred



Tanyaş and Lombardo, 2017

Jibson and Harp, 2016

« ... the minimum PGA values associated with farthest landslide limits ranged from 0.02g to 0.08g.»

Tanyaş and Lombardo, 2017:

«... we identify the 0.12 g as the global minimum PGA (common PGA contour) containing at least 90% of the landslides...»

« ... the outermost 0.05 g contour is the minimum PGA value covering the entire landslide population considered among all the investigated inventories... »

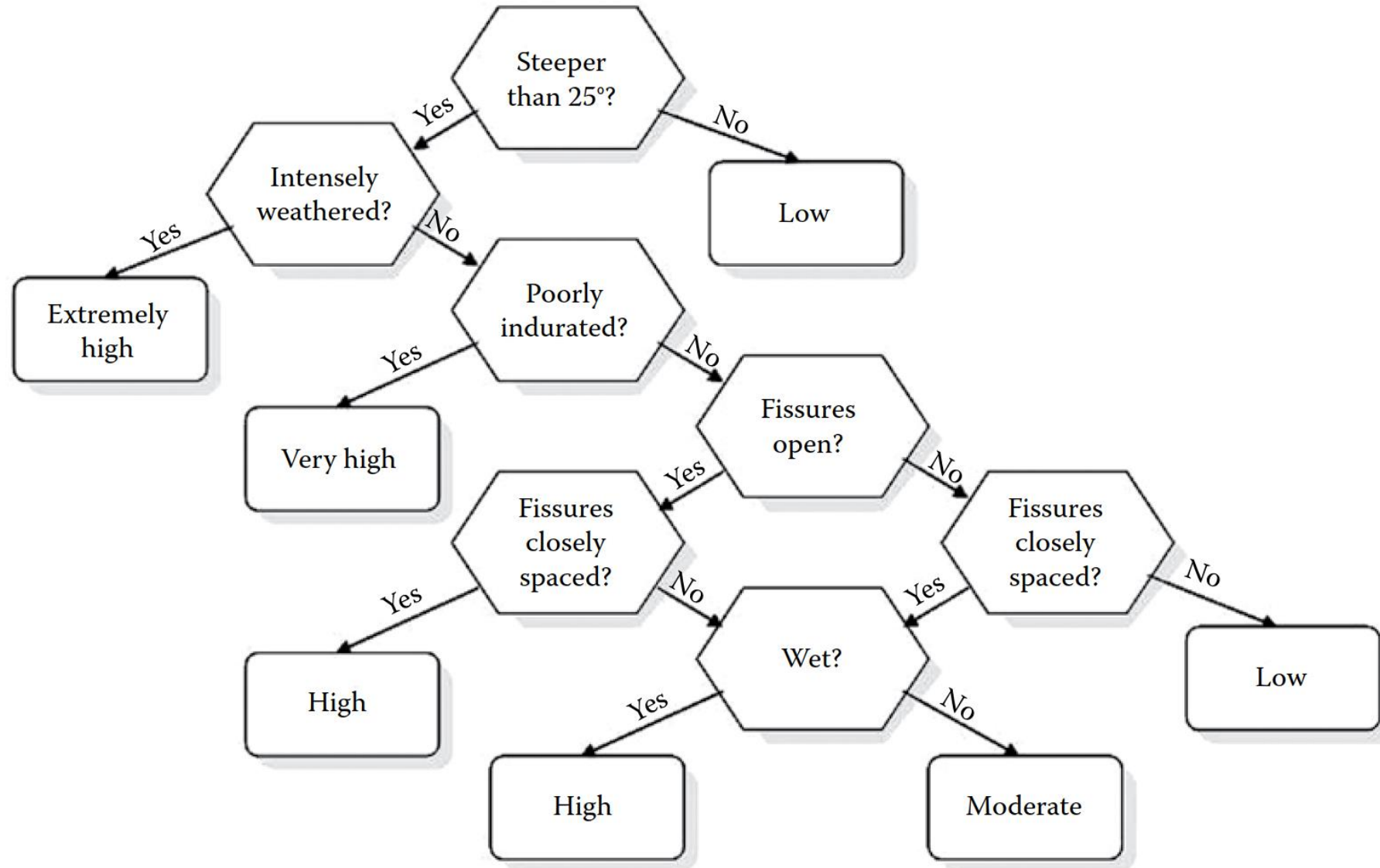
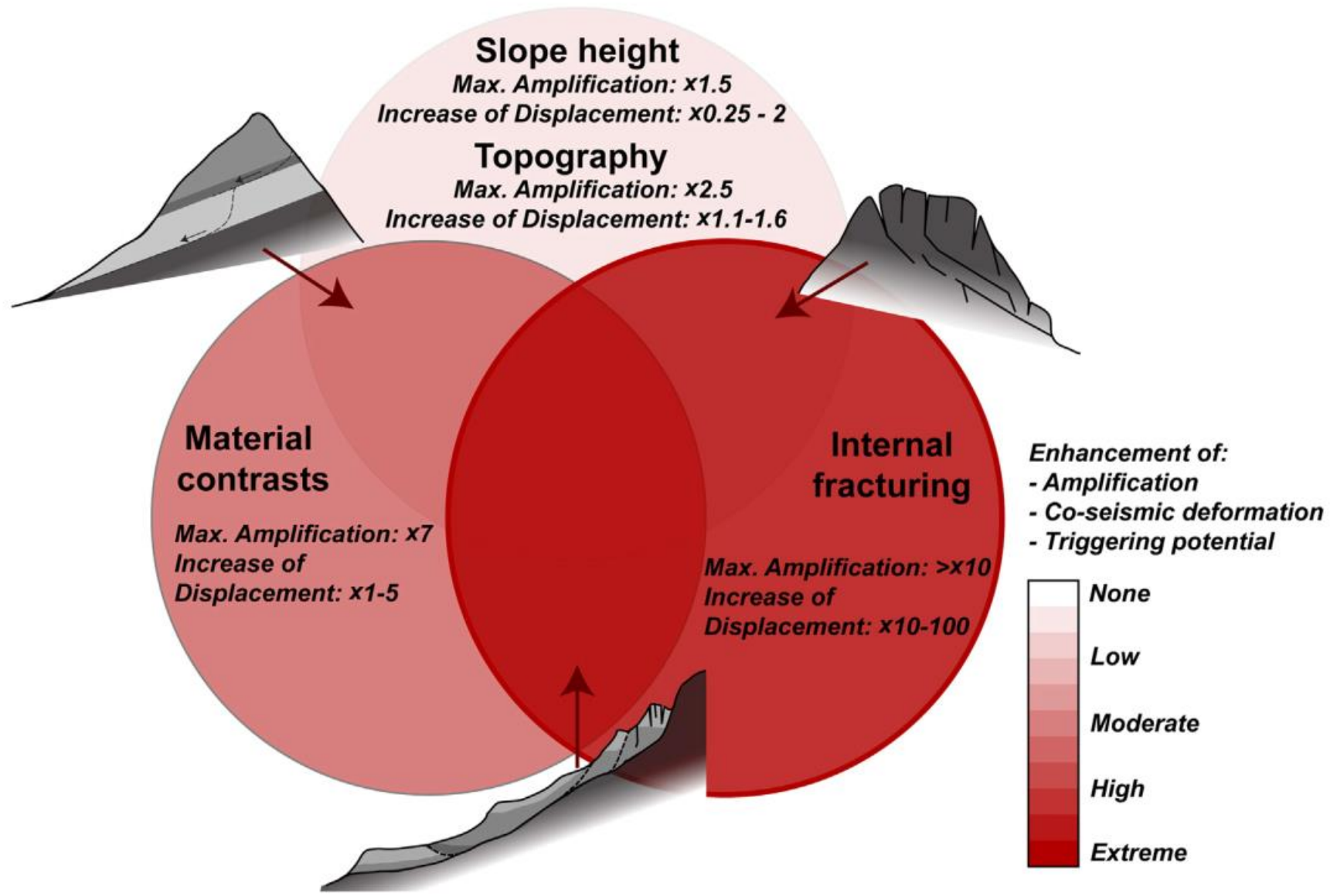


Figure 11.2 Decision tree for susceptibility of rock slopes to earthquake-induced failure (Keefer, 1992).



Jordskjelvdesign i Statens vegvesen

Anbefalinger for geoteknisk prosjektering av vegger og samvirke jord-konstruksjoner

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 604



«Dokumentet er basert på allmenne regler og spesielle krav i relevante deler av Eurokode 8; dvs. NS-EN 1998-1:2004, Del 1 (Allmenne regler, seismiske laster og regler for bygninger) og Del 5 (Fundamenter, støttekonstruksjoner og geotekniske forhold), med tilhørende Nasjonale Tillegg»

«Samferdselsanlegg som veg, fyllinger, **skjæringer** og andre jordkonstruksjoner generelt er ikke nevnt i denne standarden (EC8)»

«Denne rapporten er først og fremst tenkt som et hjelpemiddel og supplement til Eurokode 8 for geoteknikere som jobber med praktisk prosjektering og planlegging av veganlegg og jordkonstruksjoner»

Grensetilstand: «Ulykkes- eller seismisk last beskriver en bruddgrensetilstand»

Lastkombinasjoner for seismiske situasjoner:

En seismisk situasjon beskrives ved en dimensjonerende last som kombinasjon av (jf. EC0, kap. 6.4.3.4):

- A. faktorisert karakteristisk verdi for seismisk påvirkning (partialfaktor/seismisk faktor γ_1 , jf. EC8-1, kap. NA.4.2.5).
- B. faktoriserte variable laster¹⁾, dvs. trafikklaster og snølaster (faktor $\psi_i < 1,0$ jf. EC0, tabell NA.A1.1).
- C. karakteristiske permanente laster og forspenningslaster.

Når flere variable laster kan opptre samtidig, tas alle med i aktuelle lastkombinasjoner (EC0, NA.A1.2.1(1)).

¹⁾ bare de ikke-dominerende variable lastene tas med i lastkombinasjonen



STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 604

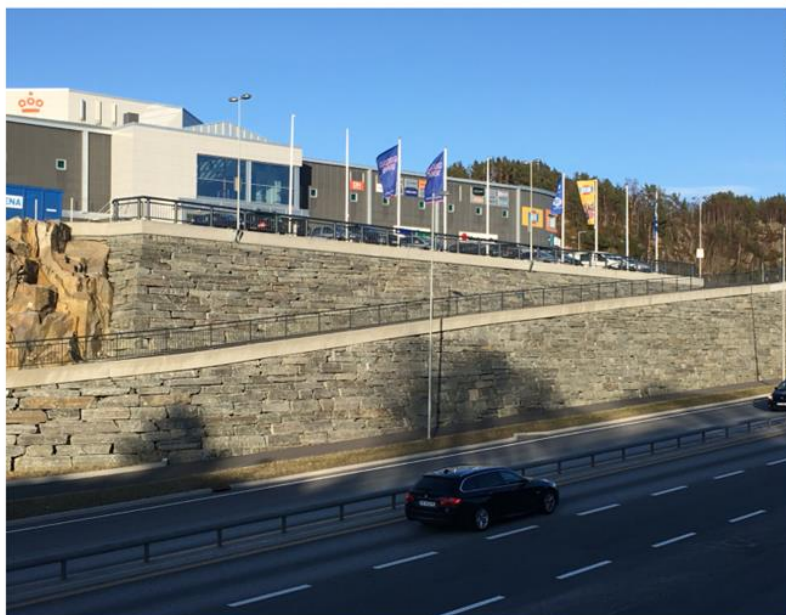


Jordskjelvdesign i Statens vegvesen

Anbefalinger for geoteknisk prosjektering av vegger og samvirke jord-konstruksjoner

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 604



Seismisk klasser

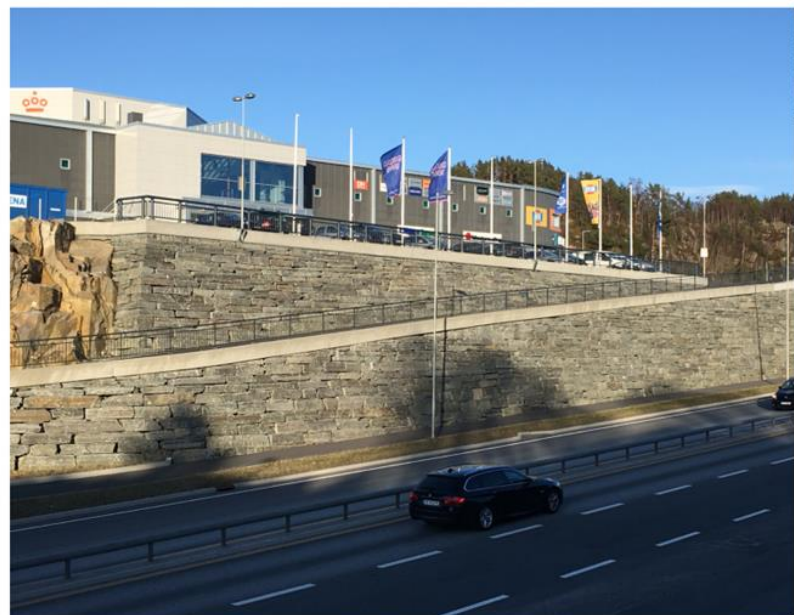
Byggverk	I	II	III	IV
Byggverk der konsekvensene av sammenbrudd er særlig store				X ¹⁾
Viktig infrastruktur: sykehus, brannstasjoner, redningsentraler, kraftforsyning og lignende			(X)	X
Høye bygninger, mer enn 15 etasjer		(X)	X	
Jernbanebruer ²⁾			X	(X)
Veg- og gangbruer ²⁾		(X)	X	(X)
Byggverk med store ansamlinger av mennesker (tribuner, kinosaler, sportshaller, kjøpesentre, forsamlingslokaler osv.)		(X)	X	
Kaier og havneanlegg		X	(X)	
Landbaserte akvakulturanlegg for fisk		X	(X)	
Tårn, master, skorsteiner, siloer	(X)	X	(X)	
Industrialbygg		X	(X)	
Skoler og institusjonsbygg		(X)	X	
Kontorer, forretningsbygg og boligbygg		X	(X)	
Småhus, rekkehus, bygg i én etasje, mindre lagerhus osv.	X	(X)		
Støttemurer med høyde lavere enn 3 m langs vegger i klasse II ³⁾	X	(X)		
Kulverter	X	(X)	(X)	
Landbruksbygg	(X)			
Kaier og fortøyningsanlegg for sport og fritid	(X)			



Jordskjelvdesign i Statens vegvesen

Anbefalinger for geoteknisk prosjektering av veger og samvirke jord-konstruksjoner

STATENS VEGVESENS RAPPORTER Nr. 604



Lastfaktorer:

(A) seismisk last: (EC8-1, tabell NA.4(901))

Seismisk klasse	Seismisk faktor γ
I	0,7
II	1,0
III	1,4
IV	2,0

(B) variable laster for bygninger (tabell EC0, NA.A1.1)

Nyttelast /last	Faktor ψ_2
Boliger, kontorer	0,3
Forsamlingslokaler, forretningsarealer	0,6
Lagerarealer	0,8
Trafikk- og parkeringsarealer, kjøretøyvekt ≤ 30 kN	0,6
Trafikkarealer-, kjøretøyvekt ≤ 160 kN på to akslinger	0,3
Snølaster på bygninger	0,2

(C) Permanente laster: $\gamma_G=1,0$ (EC0, A1.3.2 (1))



Jordskjelvdesign i Statens vegvesen

Anbefalinger for geoteknisk prosjektering av veger og samvirke jord-konstruksjoner

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 604



Fasthetsparameter og Materialfaktor:

Massetype	Parameter	Materialfaktor	Verdi
Friksjonsmasser	Syklisk udrenert skjærfasthet / Friksjonsvinkel	$\gamma_{Tcu} / \gamma_{\phi'}$	1,1 / 1,1
Kohesjonsmasser	Udrenert skjærfasthet	γ_{cu}	1,1
Kvikkleire	Udrenert skjærfasthet	γ_{cu}	1,2
Fyllmasser	Syklisk udrenert skjærfasthet / Friksjonsvinkel	$\gamma_{Tcu} / \gamma_{\phi'}$	1,2 / 1,2
Berg	Trykkfasthet	γ_{qu}	1,3

Grunntyper:

Tabell NA.3.1 – Grunntyper ¹⁾

Grunntype	Beskrivelse av stratigrafisk profil	Parametere ^{2) 3)}		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (slag/30cm)	c_u (kPa)
A	Fjell eller fjell-liknende geologisk formasjon, medregnet høyst 5 m svakere materiale på overflaten.	> 800	–	–



Norsk Standard
NS-EN 1998-1:2004+A1:2013+NA:2014

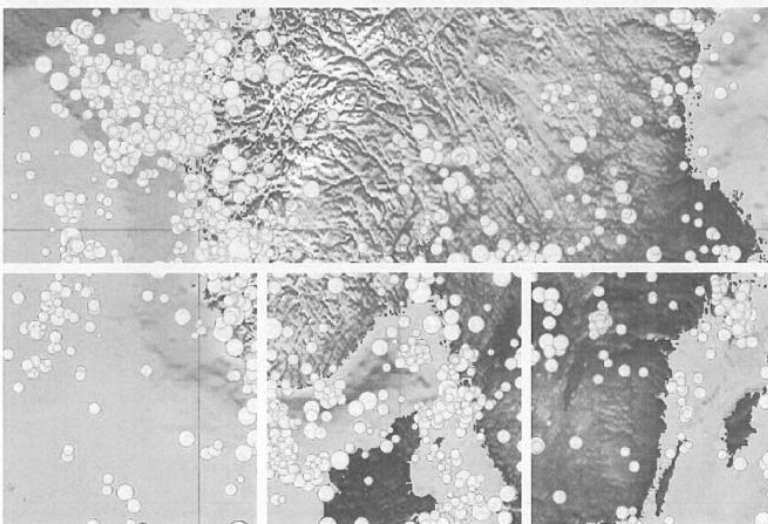
ICS 91.120.25
Språk: Norsk

Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning Del 1: Allmenne regler, seismiske laster og regler for bygninger

Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance
Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings

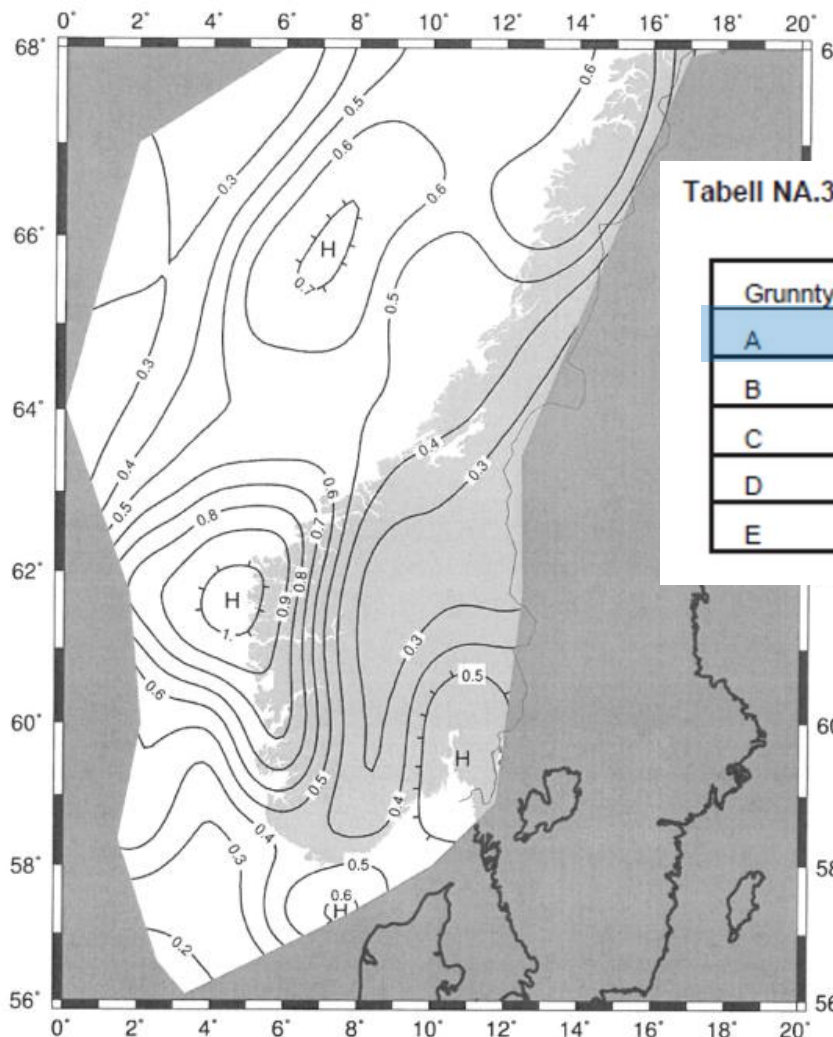
Innarbeidet i standarden: / Incorporated in this standard
Rettelsesblad / Corrigendum NS-EN 1998-1:2004/AC:2009

eurokoder



Provided by Standard Online AS for SWECO Norge AS 2016-05-30

© Standard Norge. Henvisning om gjengivelse rettes til Standard Online AS. www.standard.no



Figur NA.3(901) – Seismiske soner i det sørlige Norge, a_{g40Hz} i m/s^2

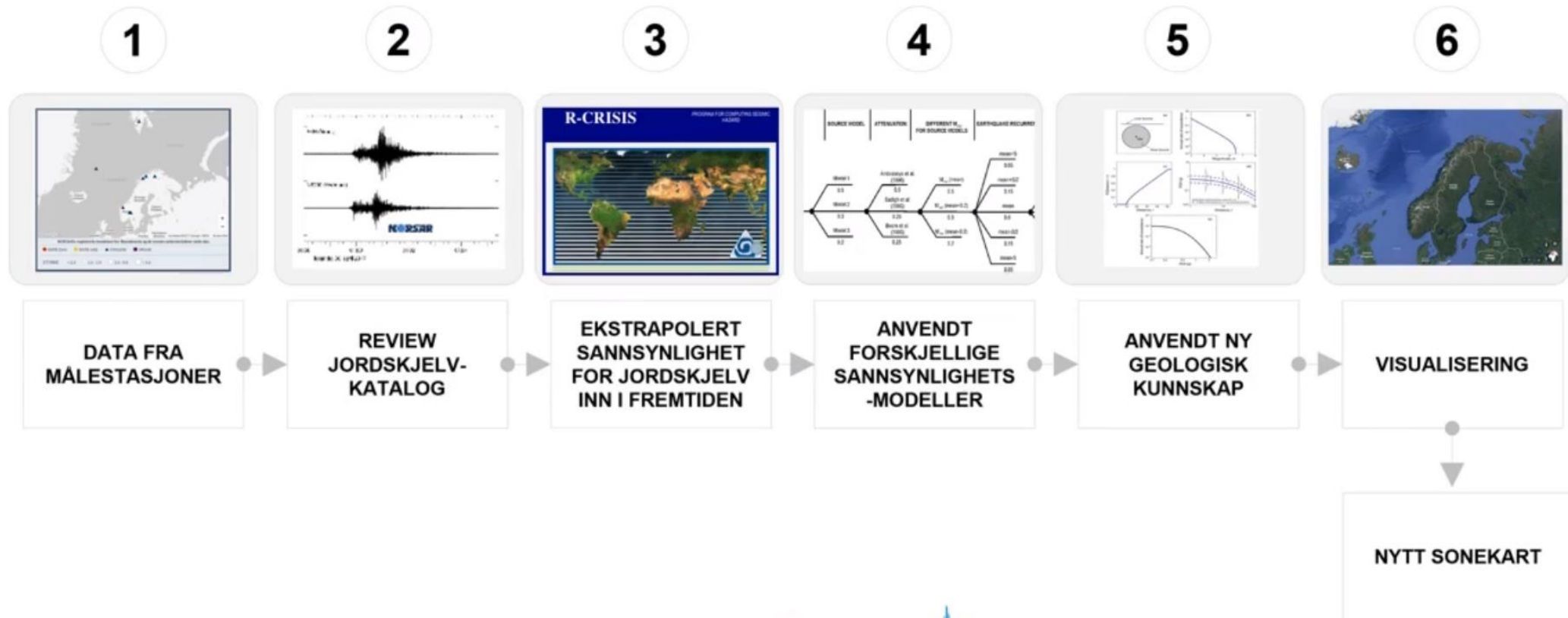
Tabell NA.3.3 – Verdier for parametere som beskriver de anbefalte elastiske responspektrene

Grunntype	S	T_E (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,0	0,10	0,20	1,7
B	1,3	0,10	0,25	1,5
C	1,4	0,10	0,30	1,5
D	1,55	0,15	0,40	1,6
E	1,65	0,10	0,30	1,4

Spissverdi for berggrunnens akselerasjon a_{g40Hz} med en returperiode på 475 år for sørlige Norge.
Referansespissverdien for berggrunnens akselerasjon, a_{gR} , settes lik $0,8 a_{g40Hz}$



Nytt soneringskart – hva er gjort?



Metoder for stabilitetsberegning

- Grenselikevektanalyse/pseudo-statisk metode
Forenklet forutsetninger av jordskjelvseffekter for dimensjonering av sikring
- Newmark Analyse/Rigid blokk modell
Hensynet til hele jordskjelvbølgen, forenklet vurdering av skråningsforhold
- Numerisk modellering/spenning-deformasjon analyser
Saksspesifikke detaljerte analyser. Vurdering av jordskjelv-skråningsinteraksjon

Kompleksitet



Pseudo-statisk metoden

$$FS = \frac{\text{Resisting force}}{\text{Driving force}}$$

$$FS = \frac{c \cdot A + (W \cdot \cos \psi_p - U - V \cdot \sin \psi_p) \tan \phi}{W \cdot \sin \psi_p + V \cdot \cos \psi_p}$$

$$A = (H + b \cdot \tan \psi_s - z) \operatorname{cosec} \psi_p$$

W: vekt av utglidningsmasse

ψ_p : Vinkel utglidningsflate

ψ_f : Vinkel bergskrent

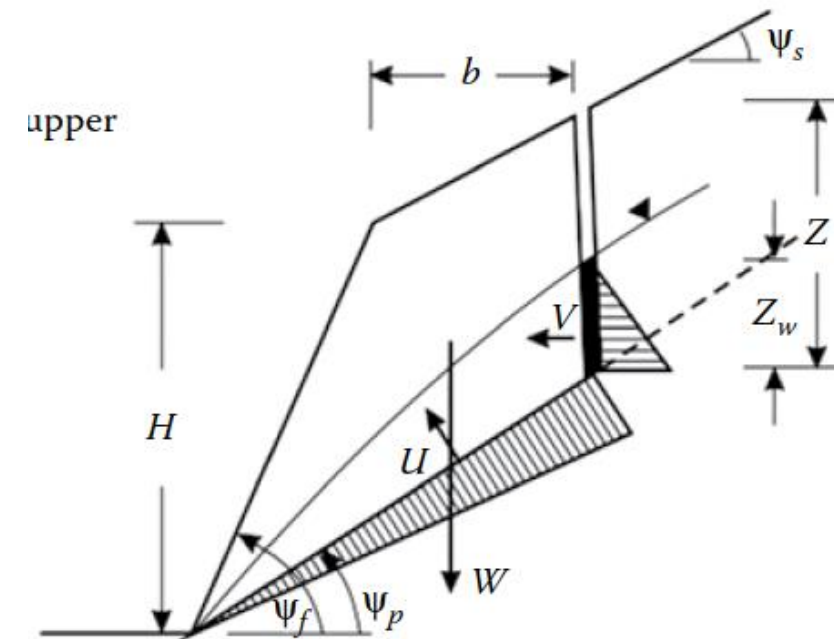
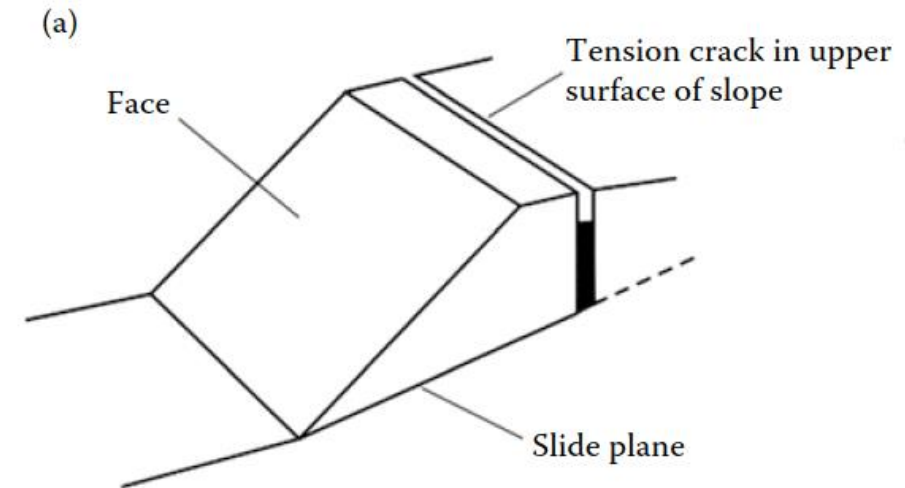
ψ_s : Vinkel toppflate

ϕ : Friskjonsvinkel

c: Kohesjon

U,V: Poretrykk

H: Blokkhoyde



Pseudo-statisk metoden

$$FS = \frac{c \cdot A + (W(\cos \psi_p - k \cdot \sin \psi_p)) \cdot \tan \phi}{W(\sin \psi_p + k \cdot \cos \psi_p)}$$

K: Pseudostatisk/seismisk koeffisient

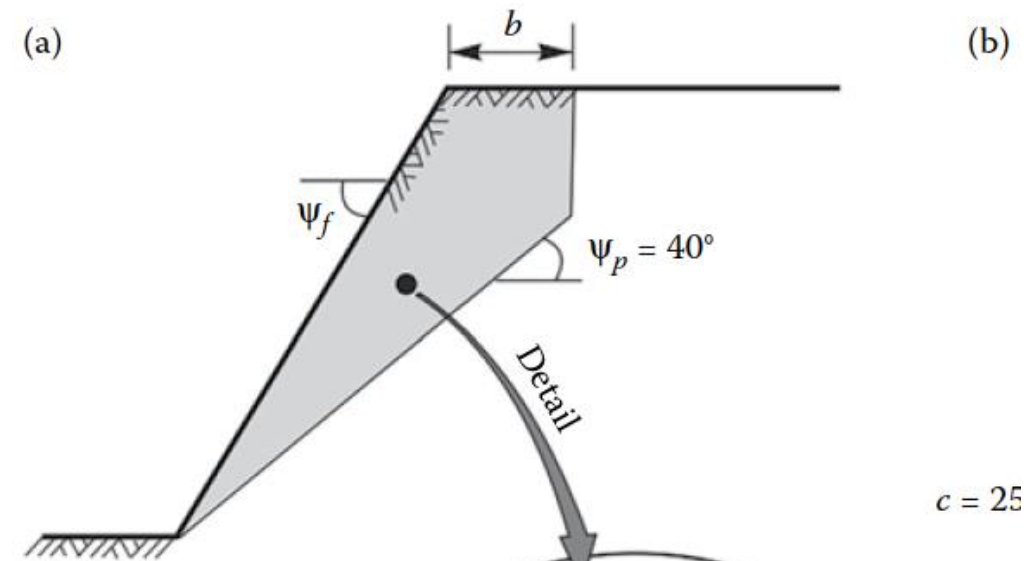
$$k = \left(\frac{PGA \cdot F_{PGA} \cdot \alpha}{2} \right) \cong F_H = 0,5 \cdot \alpha \cdot S \cdot W$$

W= vekt av potensielle utglidningsmassene

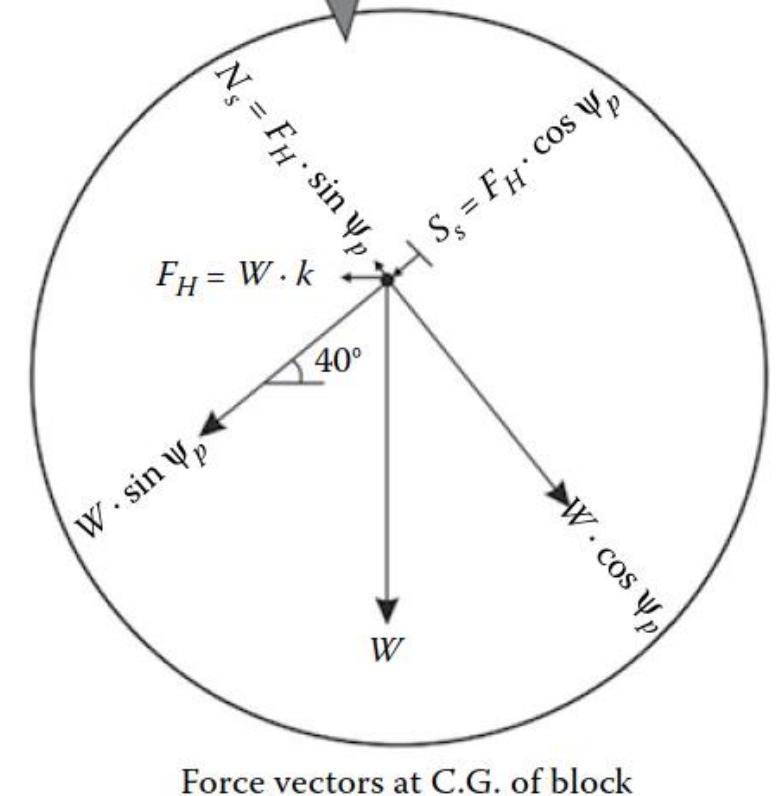
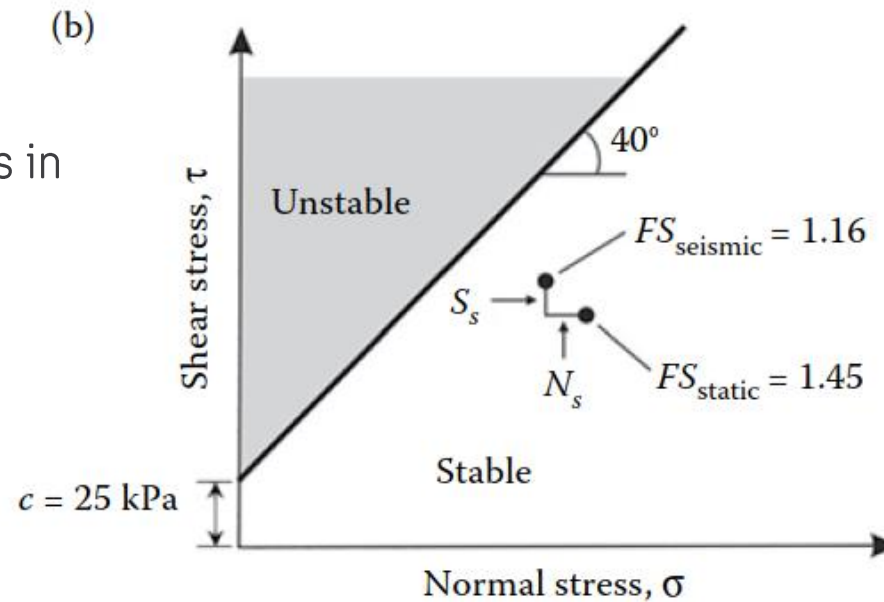
S = Forsterkningsfaktor (S=1)

$$\alpha = a_g/g$$

Ifølge Wyllie (2018): “In general, slopes in brittle rock have little capacity for deformation and the factor of safety is probably the better measure of slope stability than the magnitude of the deformation”.



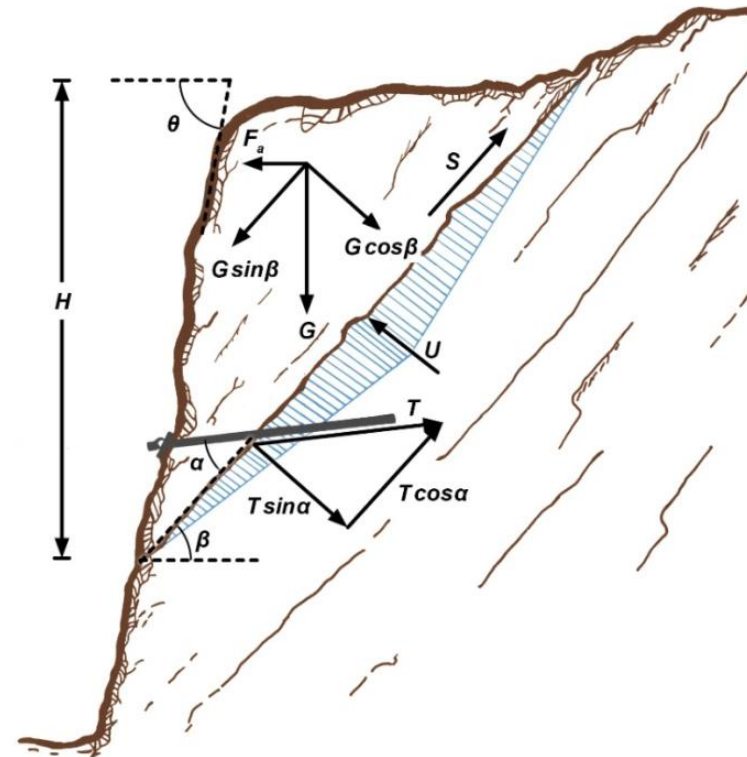
c = 25





Seismisk påvirkning:

- Seismisk påvirkning/jordskjelvpåvirkning i utgangspunktet vanskelig å bestemme
- Det kan gi et vesentlig bidrag til stabilitetsvurderingen.
- Regelverket er ikke konsistent på hvordan seismisk påvirkning beregnes.



H	Blokkens høyde
G	Blokkens masse
S	Svakhetsplanets skjærstyrke
U	Sprekkevannstrykk
T	Boltekraft
α	Vinkel m. bolt og svakhetspl.
β	Svakhetsplanets fallvinkel
θ	Skjæringflatens fallvinkel
F_a	Jordskjelvkraft

Figur 5.2 Skisse av et potensielt ustabil part i en bergskjæring. Skravert område illustrerer vanntrykk.



- Kraften fra seismisk hendelse legges inn som en horisontal kraft i modellen (F_α).
- Akselerasjonen som brukes (a_{g40Hz}) finnes den på Nasjonalt Tillegg til Eurokode.
- Forsterkningsfaktor for berg - grunntype $A=1$.
- Partialfaktoren for seismisk akselerasjon (γ_I) varierer for ulike type konstruksjoner. Skjæringer er ikke blant konstruksjonene som er listet opp i EC8 tabell NA.4(902).

Dimensjonerende grunnakselerasjon a_g blir da:

$$a_g = \gamma_I \cdot a_{gR} = 0,8a_{g40Hz} \cdot \gamma_I \quad (12)$$

Dimensjonerende kraft i horisontalplanet blir da:

$$F_a = m \cdot a_g = \frac{G}{g} \cdot a_g \quad (13)$$

der F_a = dimensjonerende seismisk horisontal kraft
 m = massen av ustabil parti
 g = tyngdens gravitasjon

Videre blir bidraget i retningen i det ustabile planet:

$$F_s = F_a \cos \beta \quad (14)$$

der F_s = dimensjonerende seismisk kraft i skjærplanet

For virkningen på normalspenningen benyttes:

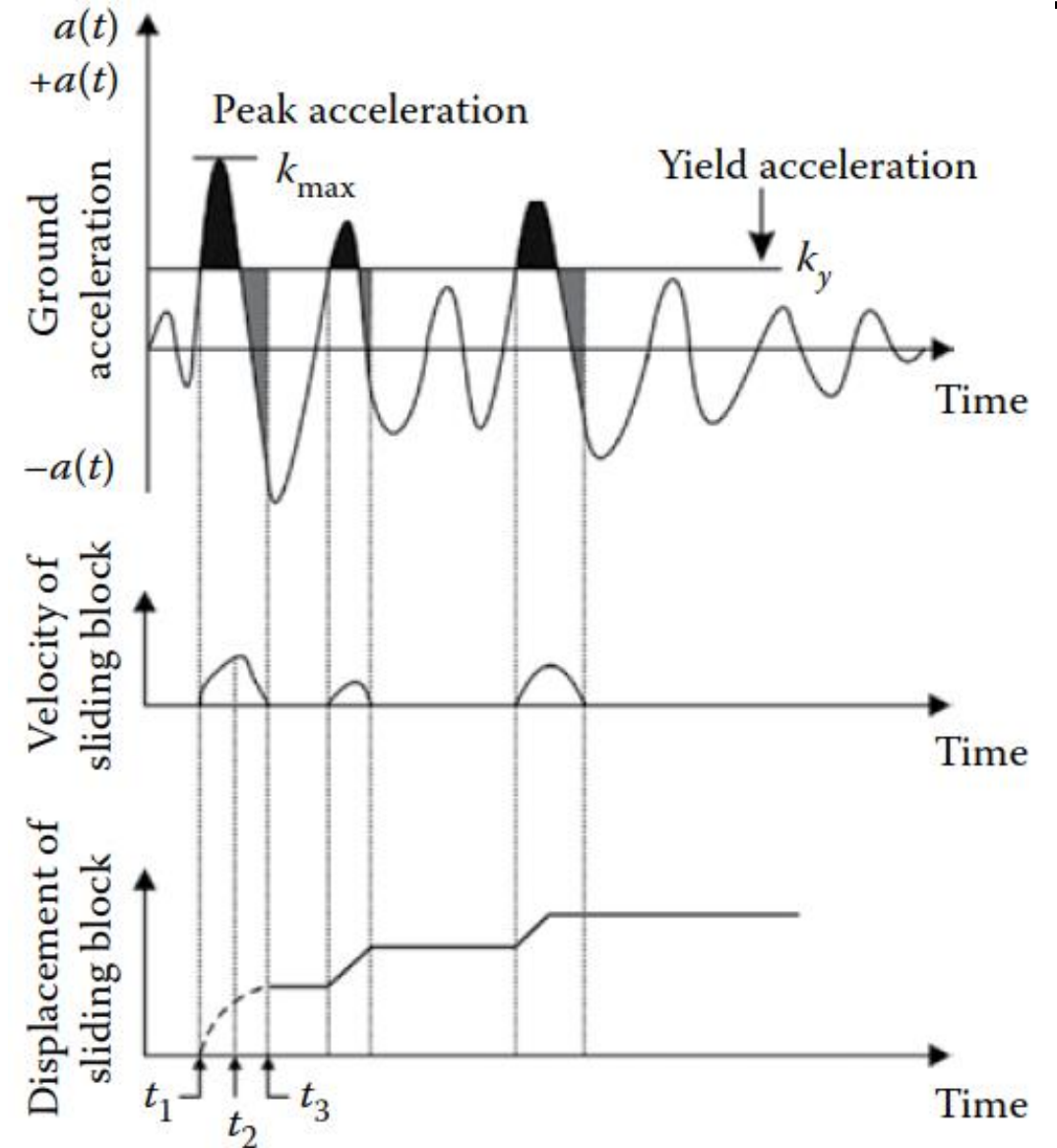
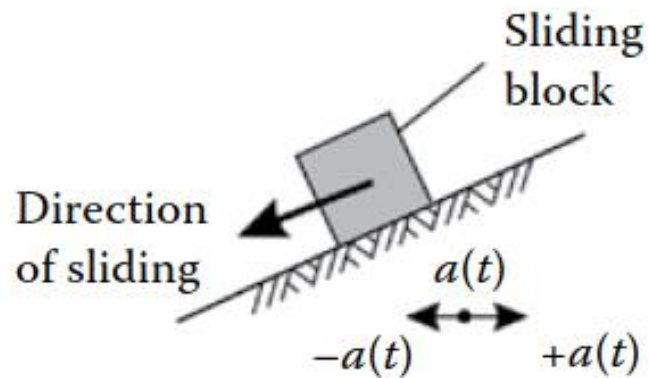
$$F_n = F_a \sin \beta \quad (15)$$

Newmark Analyse/Rigid blokk modell

Bygget ut over pseudo-statisk metoden.

Forutsetninger:

- Brudd ikke skjer alltid når dynamisk spenning er over skjærfasthet.
- Viktigere er å registrere permanent forskyvning forårsaket på perioder når $FS < 1,0$.
- Utglidningsmassen representerer som en blokk som ligger på en hellende flate.
- Blokken starter bevegelsen etter kritiske akselerasjon (yield acceleration) er oppnådd.





Newmark Analyse/Rigid blokk modell

$$a_c = (FS - 1)g \sin \alpha$$

a_c : Kritisk akselerasjon

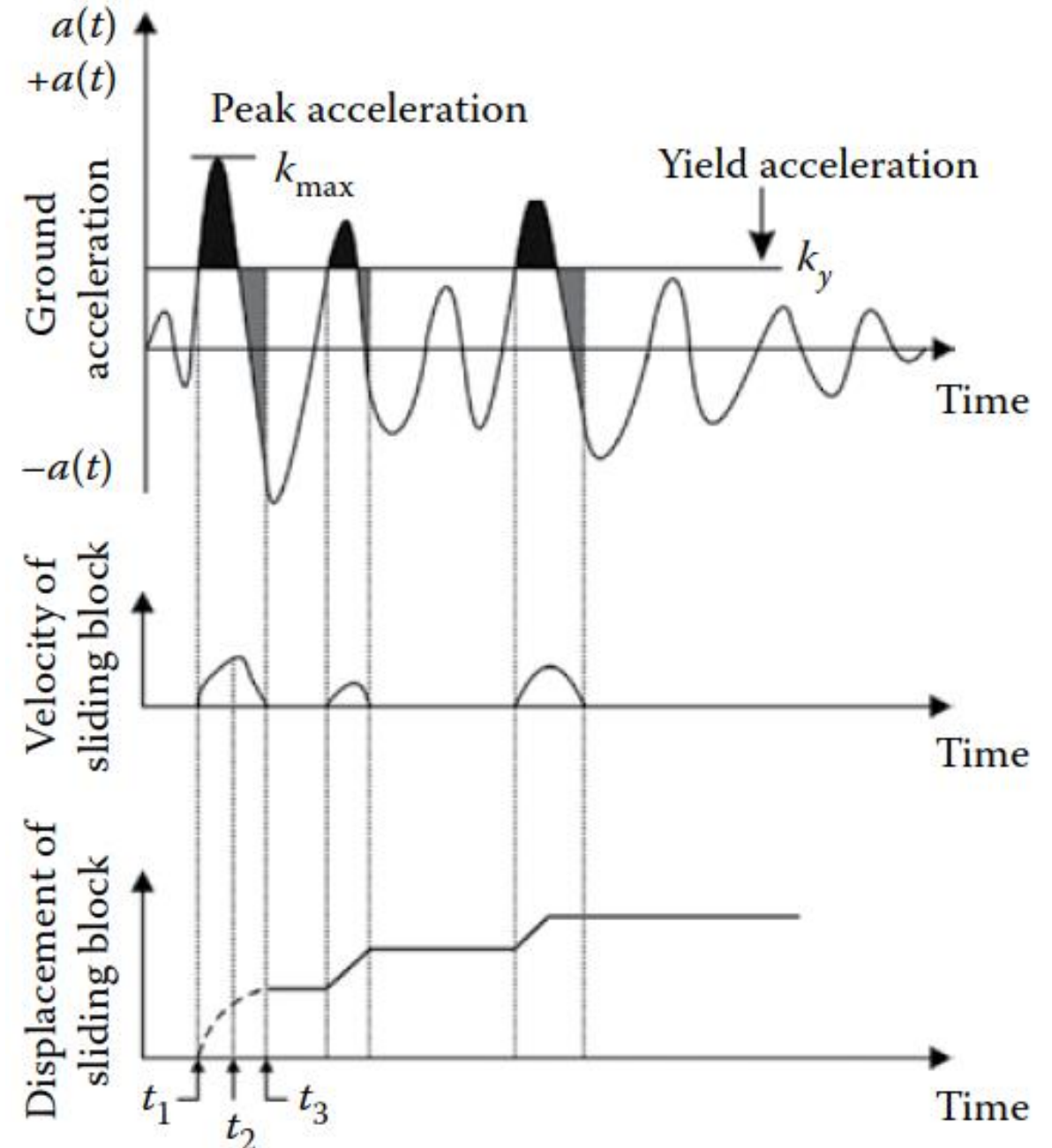
FS: Sikkerhetsfaktor (statisk metode)

α : Utglidningsflate vinkel

Opprinnelige metode:

- Statisk og dynamisk skjærfasthet er likt
- Kritisk akselerasjon er konstant
- Blokk er stiv
- Oppadgående bevegelse er ikke mulig
- Poretrykk ikke tas i betraktning

Resultater er nøyaktig når det foreligger god kunnskap om utglidningsgeometri, materialegenskaper og jordskelvs responsesspektren



Newmark Analyse/Rigid blokk modell

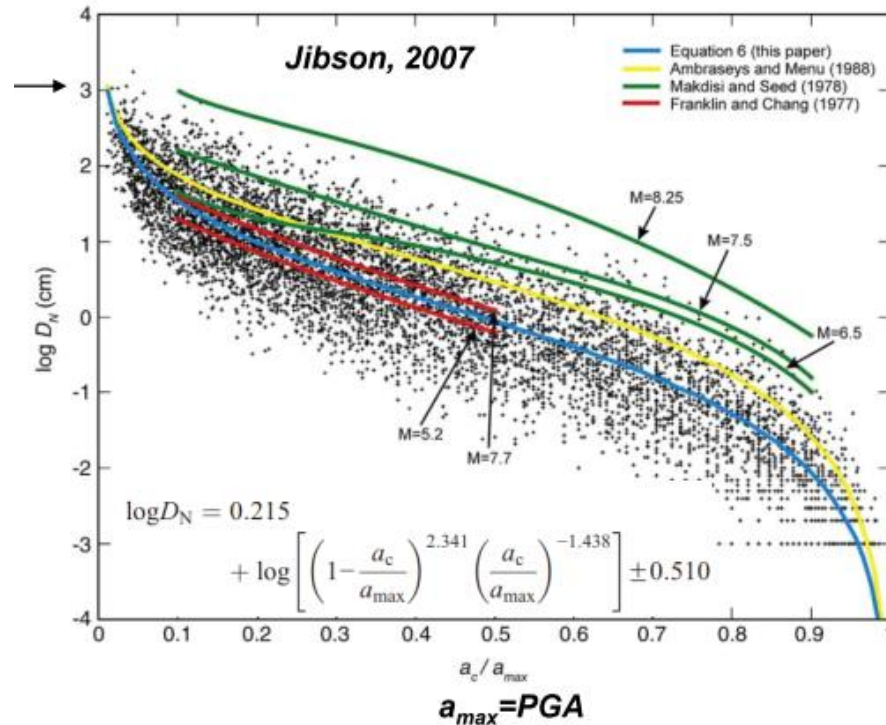
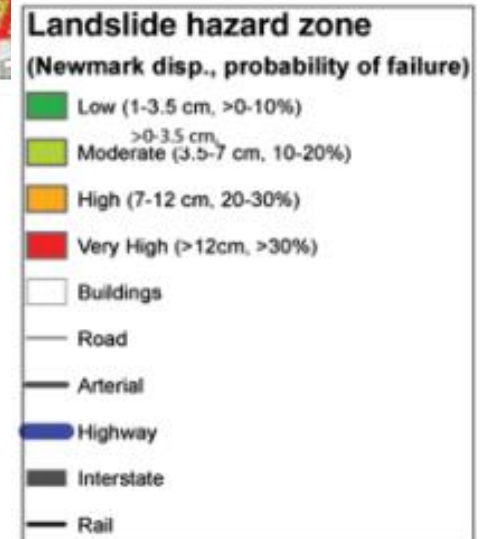
Table 11.3 Guidelines for relationship between slope displacement and likely slope instability

Calculated displacement	Slope stability condition
0–150 mm (0–6 in.)	Unlikely to correspond to serious landslide movement and damage to structures
150–1000 mm (6–40 in.)	Slope deformations may be sufficient to cause serious ground cracking or enough strength loss to result in continuing post-seismic failure
>1000 mm (>40 in.)	Damaging landslide movement and slopes should be considered unstable

Source: Adapted from California Division of Mines and Geology (CDMG). 1997. *Guidelines for Evaluating and Mitigating Seismic Hazards in California*. California Div. of Mines and Geology. Special Report 117. www.consrv.ca.gov/dmg/pubs/sp/117/

$$P(f) = 0.335 \left[1 - \exp\left(-0.048D_n^{1.565}\right) \right]$$

Jibson, 2011



- Det er kun behov for en dynamisk analyse når en pseudo-statisk metode gir for lav sikkerhetsfaktor.
- Dynamisk analyse trenger ikke å ha tilfredsstillende krav til sikkerhetsfaktor.
- Det er tilfredsstillende om de beregnede deformasjonene er små og kan aksepteres mht. skråningens eller konstruksjonens funksjonalitet.

Tabell 7-1 Fordeler og ulemper med forskjellige analysemetoder for skråninger

	Fordeler	Ulemper
Forenklet pseudo-statisk metode	Kan bruke samme verktøy som brukes i statiske stabilitetsanalyser (for eks. GeoSuite, og PLAXIS)	<ul style="list-style-type: none">- Det er krav på min. sikkerhetsfaktor, FS. Merk lavere materialfaktorer for seismisk situasjon.- Må vurdere å tas hensyn til seismisk topografisk forsterkningsfaktor S_T.
Dynamisk analyse	Grensetilstand er basert på akseptable forskyvninger mht konstruksjonens funksjonalitet og ikke min. FS .	<ul style="list-style-type: none">- Krever avanserte FE analyser.- Spesielle krav for valg av representative jordskjelvtidsserier i analyser.

Rock mass

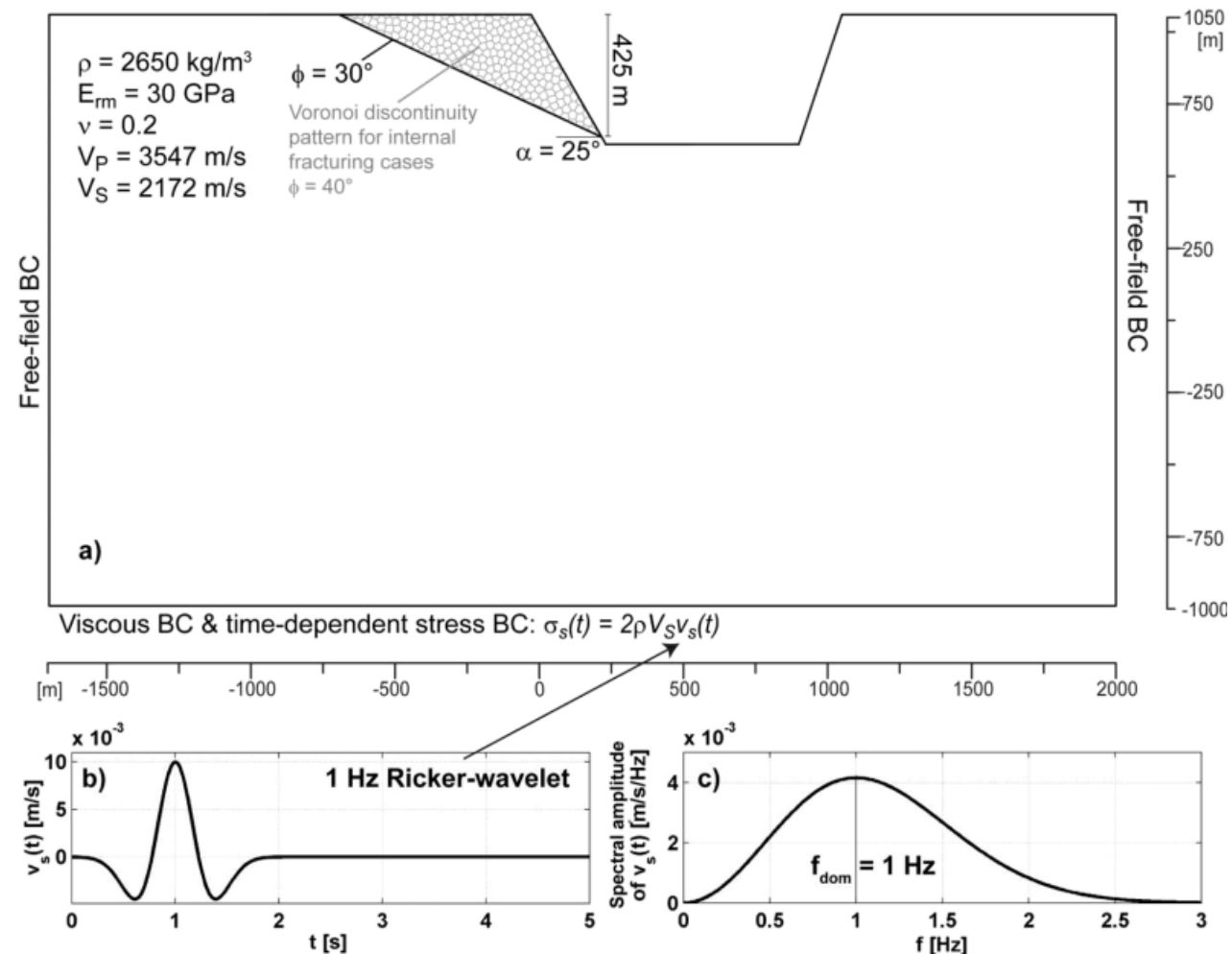
Density, ρ [kg/m ³]	2650
Young's modulus [GPa]	30 (10–90)
Poisson's ratio	0.2
P-wave velocity V_P [m/s]	3547
S-wave velocity V_S [m/s]	2172

Sliding surface

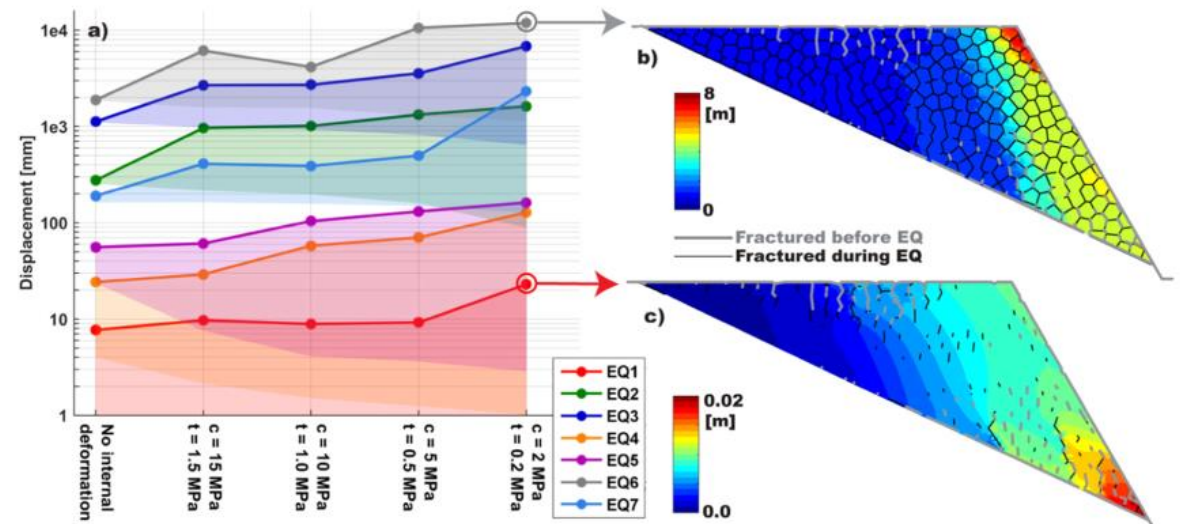
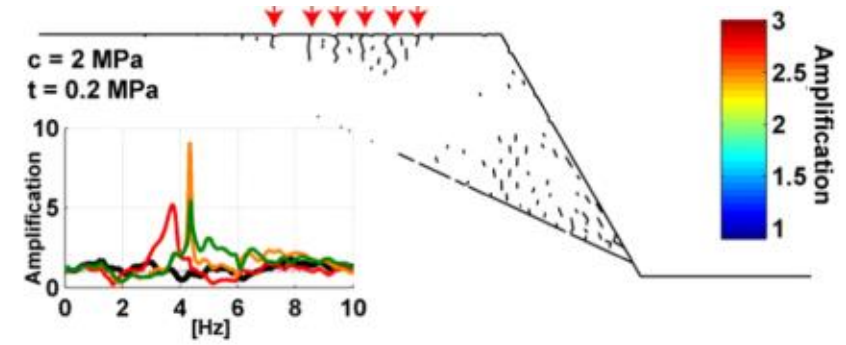
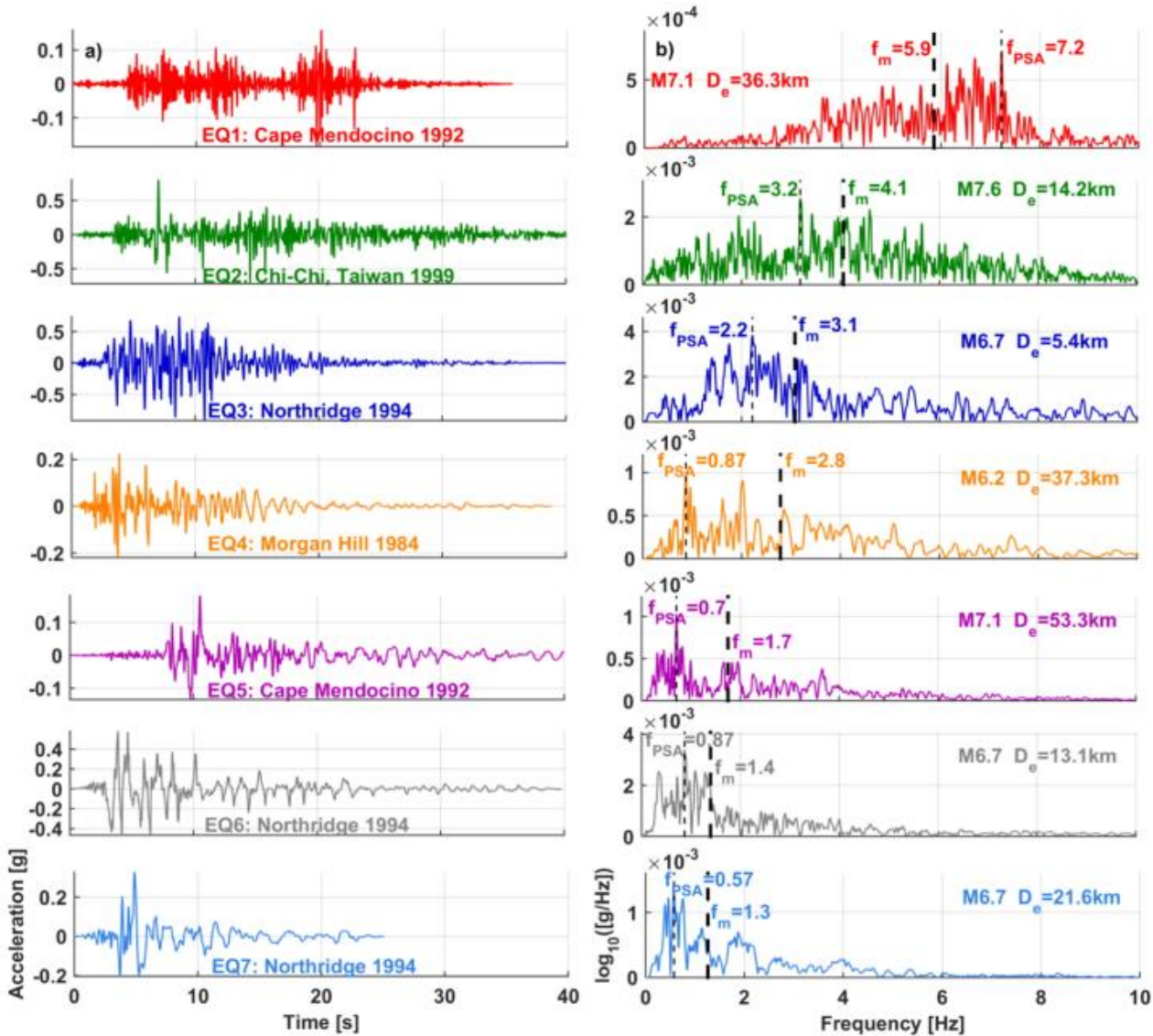
Friction angle, ϕ [°]	30
Cohesion [MPa]	0
Tensile strength [MPa]	0
Residual cohesion [MPa]	0
Residual tensile strength [MPa]	0
Fracture normal stiffness [GPa/m]	10
Fracture shear stiffness [GPa/m]	5

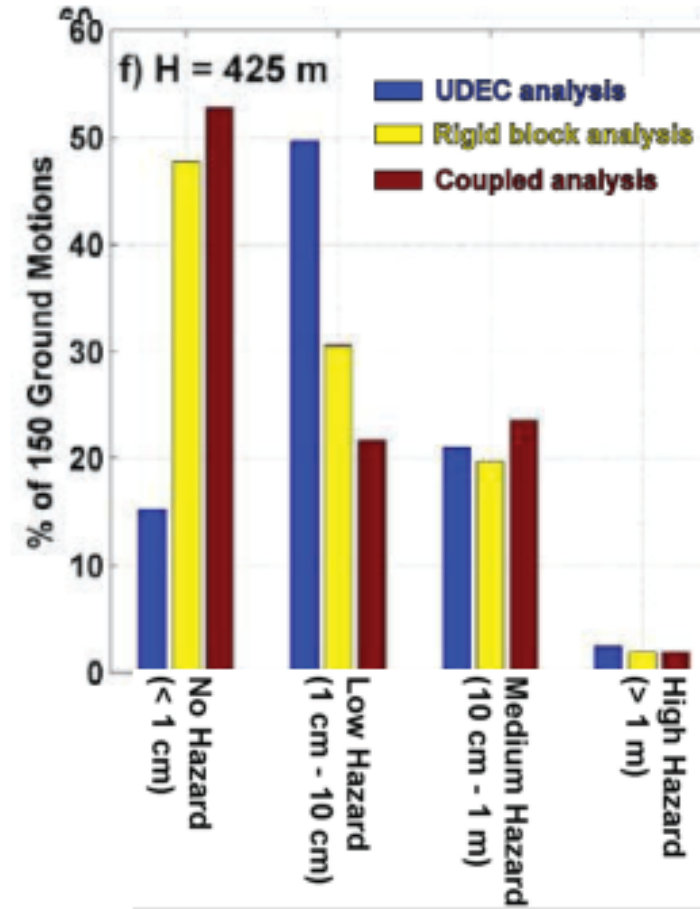
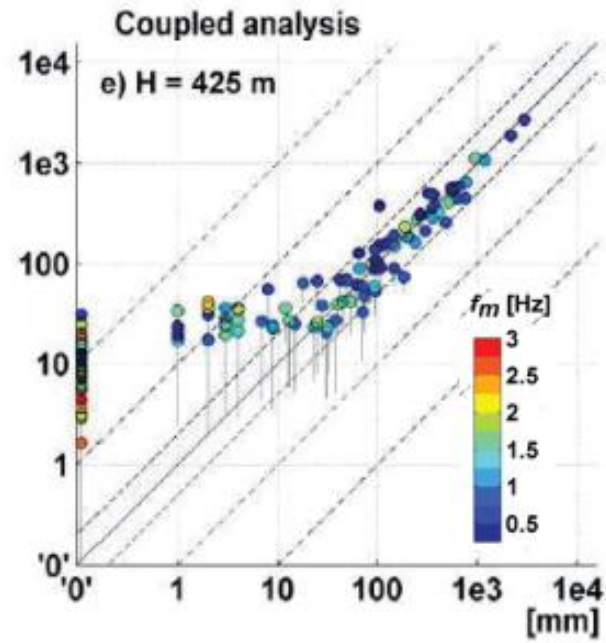
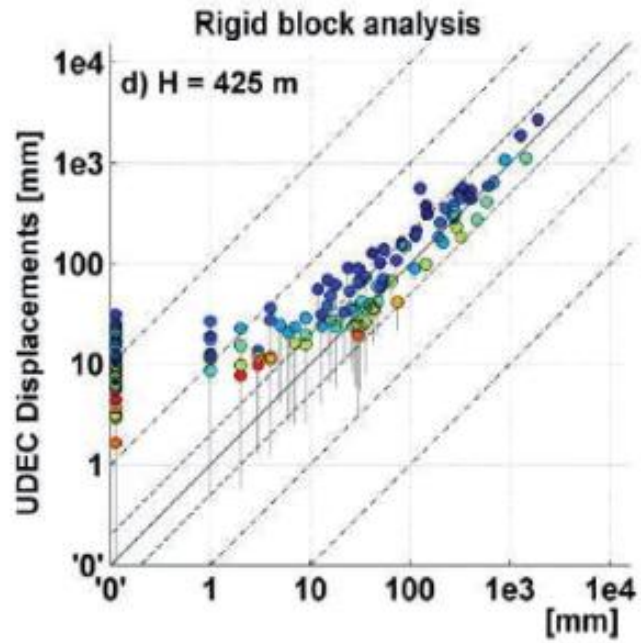
Voronoi discontinuities

Friction angle, ϕ [°]	40
Cohesion [MPa]	Variable (2, 5, 10, 15)
Tensile strength [MPa]	Variable (0.2, 0.5, 1, 1.5)
Residual cohesion [MPa]	0
Residual tensile strength [MPa]	0
Fracture normal stiffness [GPa/m]	10
Fracture shear stiffness [GPa/m]	5



Numerisk modellering/spenning-deformasjon analyse





SWECO

