



Scan to add to class
Spotify playlist

Lecture 11

Safety and Reliability in Civil Engineering

CIVIL-239: Engineering a sustainable built
environment

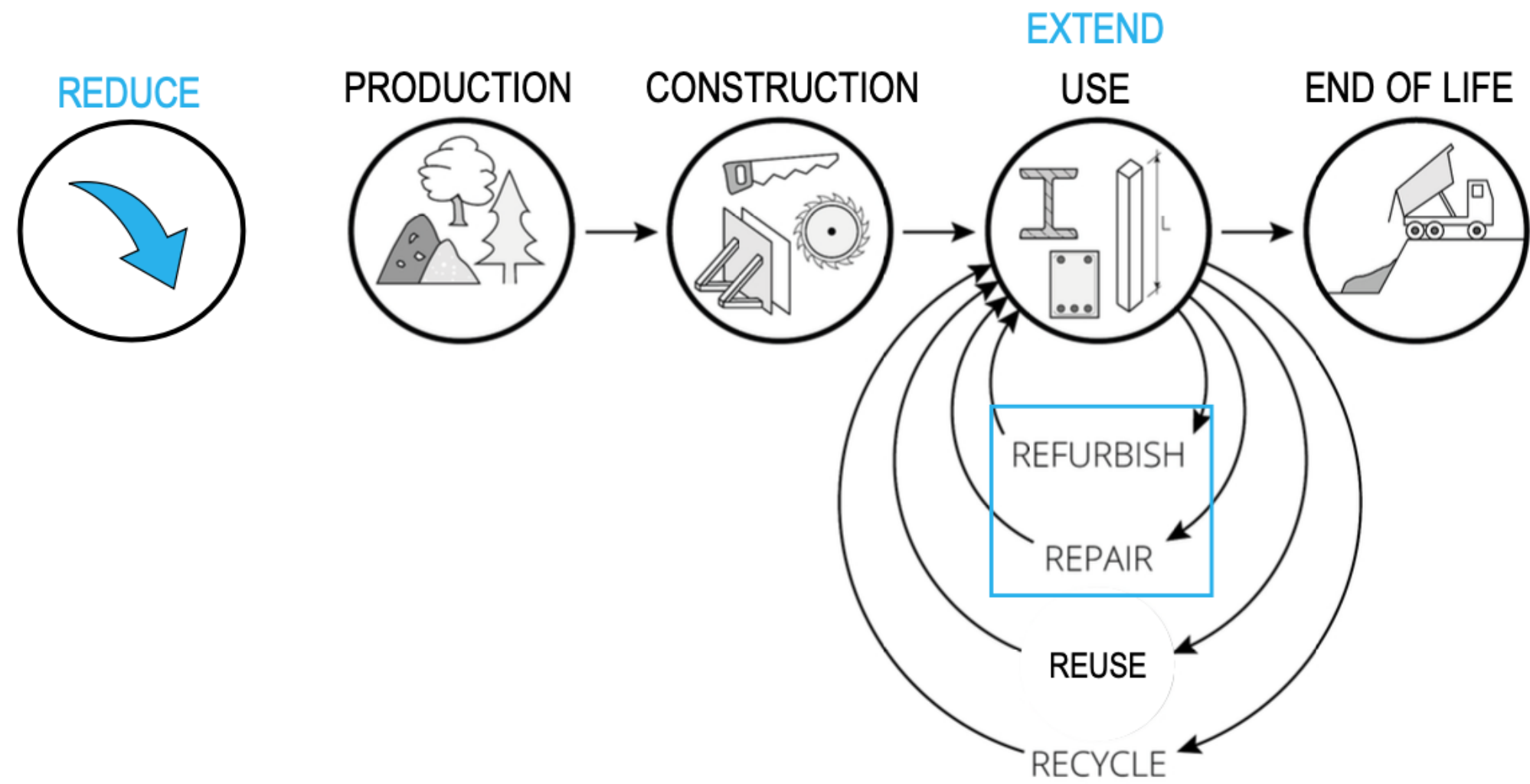
David Ruggiero (and Andrew Sonta)

Housekeeping

- Assignment 5 due December 17
- Today: Guest lecture from Prof. David Ruggiero
- Next week: Industry Guest Lecture from Benoit Klein from Implenica

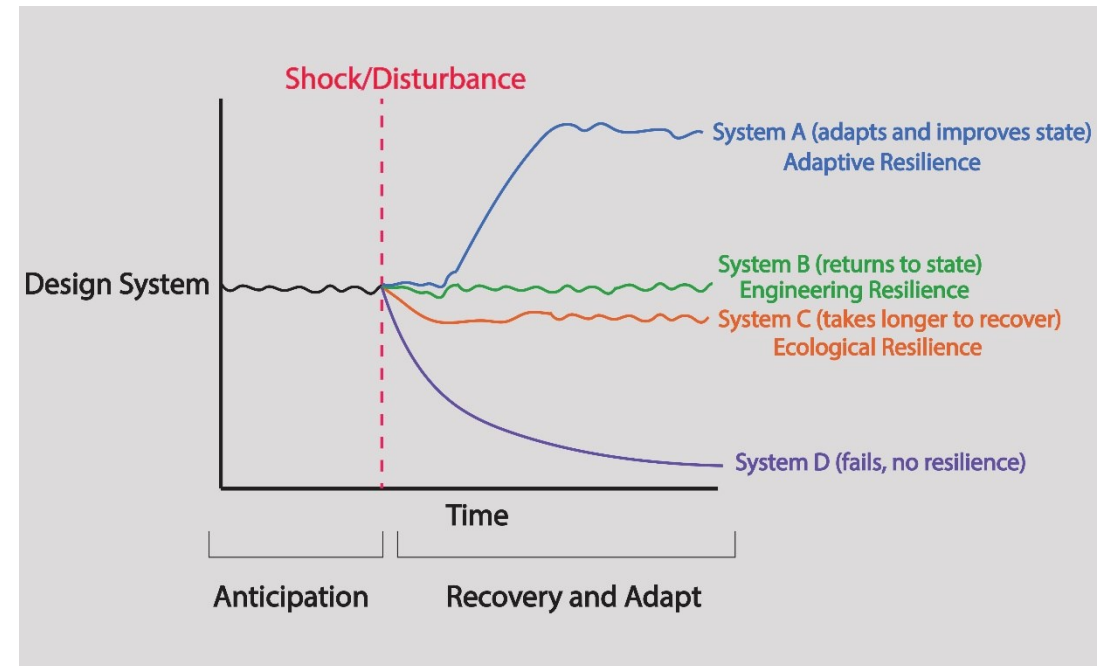
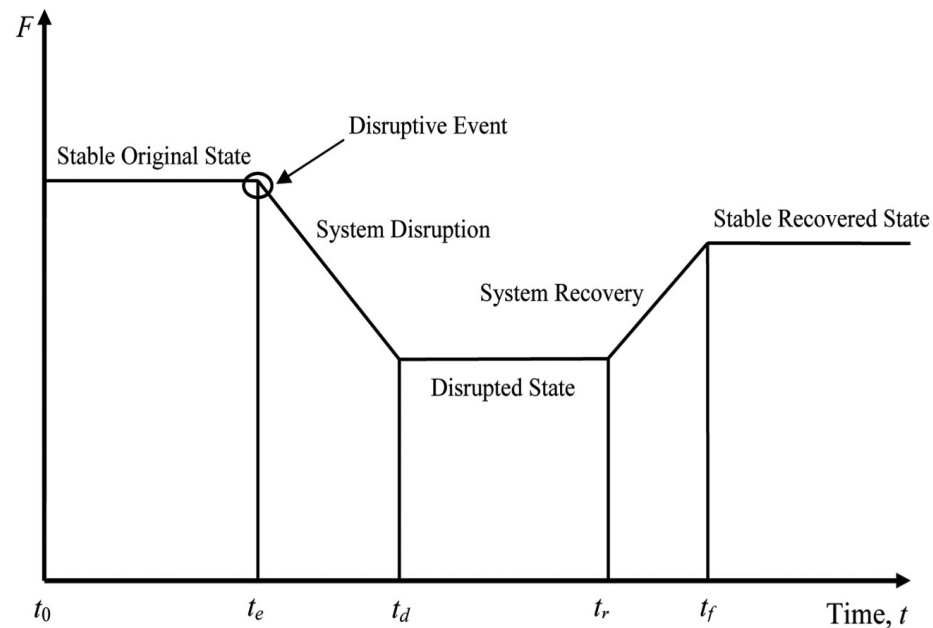
Materials, structures, and life-cycle assessment				
9	5-Nov	Guest lecture: Embodied carbon emissions and materials	The phases of infrastructure life cycles	
10	12-Nov	Life-cycle assessment	Environmental LCA; Safety factors	
Civil engineering and natural systems				
11	19-Nov	Guest lecture: Assigning value to natural systems	Sustainability in natural systems; Engineering and sustainability economics	
12	26-Nov	Engineering with natural systems; geotechnical engineering, water resources engineering	Multi-criteria decision-making, resilience, sensitivity analysis, nature-based solutions	Assignment 4
Sustainability in the civil engineering profession				
13	3-Dec	Guest lecture: Safety and reliability in civil engineering	Load combinations, safety and reliability	
14	10-Dec	Guest lecture: Sustainable engineering in the industry	Practical issues	
15	17-Dec	Course wrap up Thinking in systems Tentative: class debate		Assignment 5

Circular economy in civil engineering (week 7)



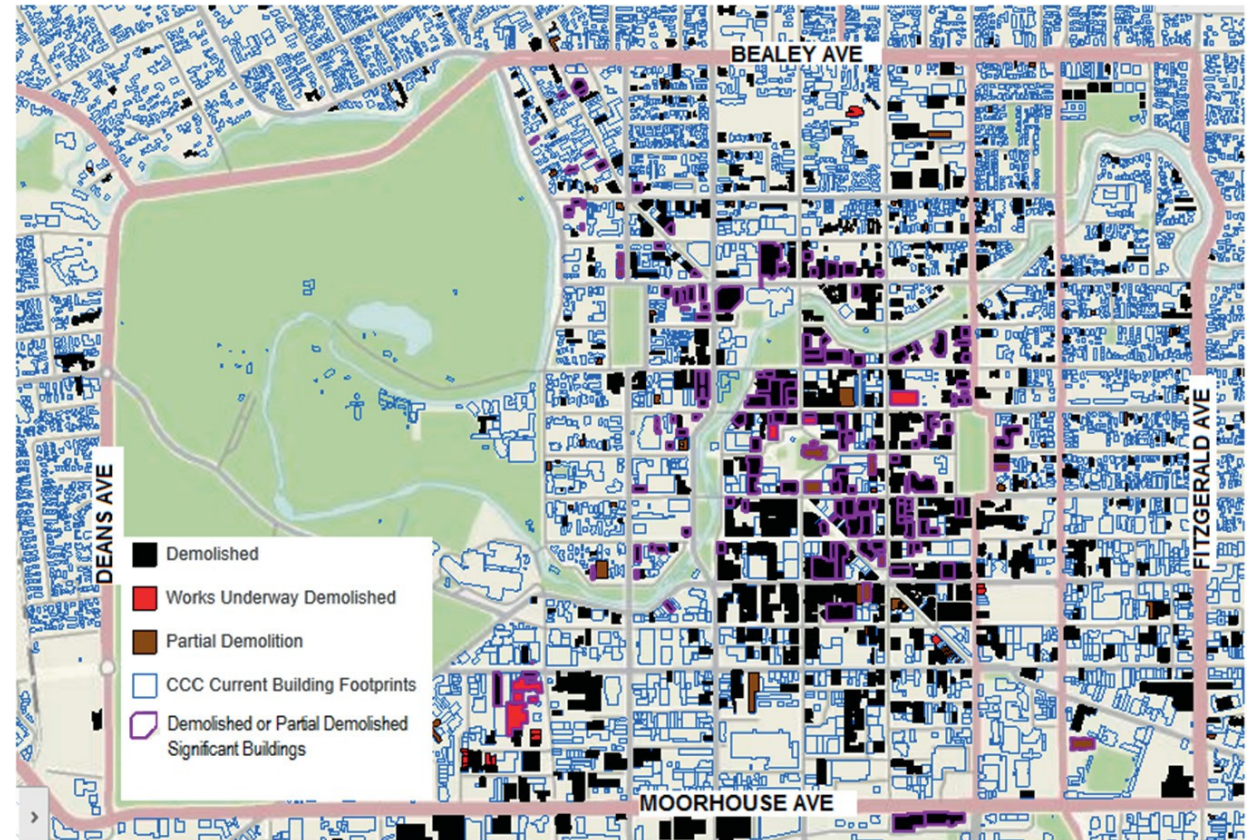
Resilience (week 10)

- Resilience is the capacity of a system to recover and reconstitute critical services with minimal damage to public safety, health, and security
- Resilience vs sustainability?



Example: Christchurch Earthquake

- 6.2 magnitude earthquake near Christchurch, New Zealand
- 185 fatalities
- Following the earthquake, over 60% of concrete buildings in central business district with 3+ stories were demolished
- “... a significant number of buildings with relatively low damage were demolished”





SAFETY AND RELIABILITY IN CIVIL ENGINEERING



Agenda

Introduction

- Risk in the built environment

Risk

- What is risk?

Design philosophy

- Probabilistic background

Structural verification

- Code format

Actions

- Different types



1. INTRODUCTION

Preamble



TABLE 1 *Average annual risk of death as a consequence of an activity*

Activity associated with death	Risk of death per person-year
Voluntary	
Motorcycling	2000.0×10^{-5}
Smoking (20 cigarettes per day)	500.0×10^{-5}
Car racing	120.0×10^{-5}
Scuba diving	60.0×10^{-5}
Surgical anaesthesia	50.0×10^{-5}
Car driving	17.0×10^{-5}
Pregnancy	9.8×10^{-5}
Drinking (one bottle of wine per day)	7.5×10^{-5}
Rock climbing	4.0×10^{-5}
Involuntary	
Quarry accidents	18.0×10^{-5}
Rail travel accidents	6.0×10^{-5}
Work in the service industry	0.4×10^{-5}
Floods (USA)	0.22×10^{-5}
Tornadoes (Mid west USA)	0.22×10^{-5}
Earthquake (California)	0.17×10^{-5}
Storms (USA)	0.08×10^{-5}
Lightning	0.01×10^{-5}
Aircraft accidents	0.01×10^{-5}
Release from nuclear power station	0.01×10^{-5}
Explosion of pressure vessel	0.005×10^{-5}
Transport of petrol and chemicals (USA)	0.005×10^{-5}
Leukemia	8.0×10^{-5}
Influenza	20.0×10^{-5}
Meteorite	$0.000\ 006 \times 10^{-5}$
Cosmic rays from explosion of supernova	Less than $0.000\ 000\ 01$

“Acceptable” risk of death in structures

0.1×10^{-5} to 0.3×10^{-5}

International Organization for Standardization (ISO). *ISO 2394: General Principles on Reliability for Structures*. Geneva: ISO, 2015.

Nivolianitou, Zoe. (2002). Risk analysis and risk management: a European insight. *Law, Probability and Risk*. 1. 10.1093/lpr/1.2.161.

Structures

Buildings



Industry



Infrastructure



Environment



Structures

- Fulfill some purpose
 - Shelter, connection, production, etc.
- “Structural failure”
 - Failure to serve this purpose
 - Can be catastrophic, but not necessarily



Codes, standards, norms

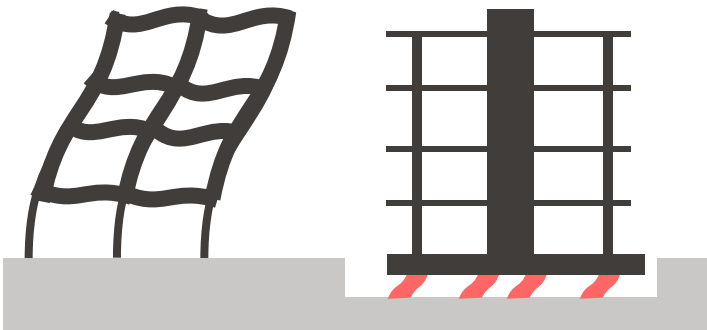
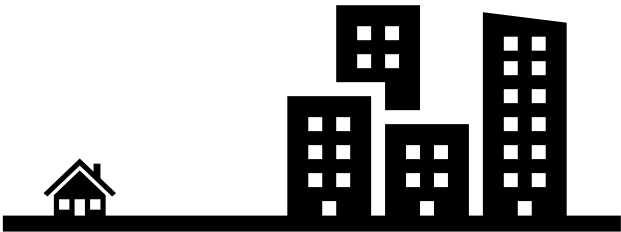
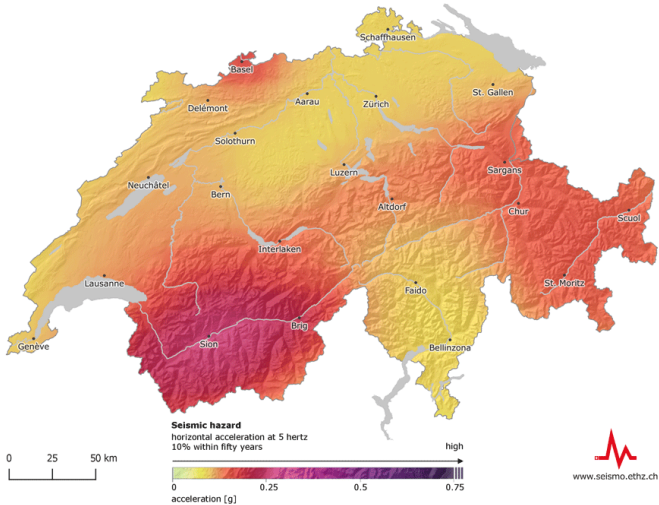
- Switzerland
 - SIA (Swiss Society of Engineers and Architects)
 - SIA 260 – Basis of Structural Design
 - SIA 261 – Actions on Structures
- Europe
 - Eurocodes
 - EN 1990 – EN 1999



2. RISKS

Risk

$$Risk = Hazard \times Exposure \times Vulnerability$$



Environmental hazards

Wind



Snow



Earthquake



Flood



etc.

Human hazards

Design error



Overload



Fire



etc.

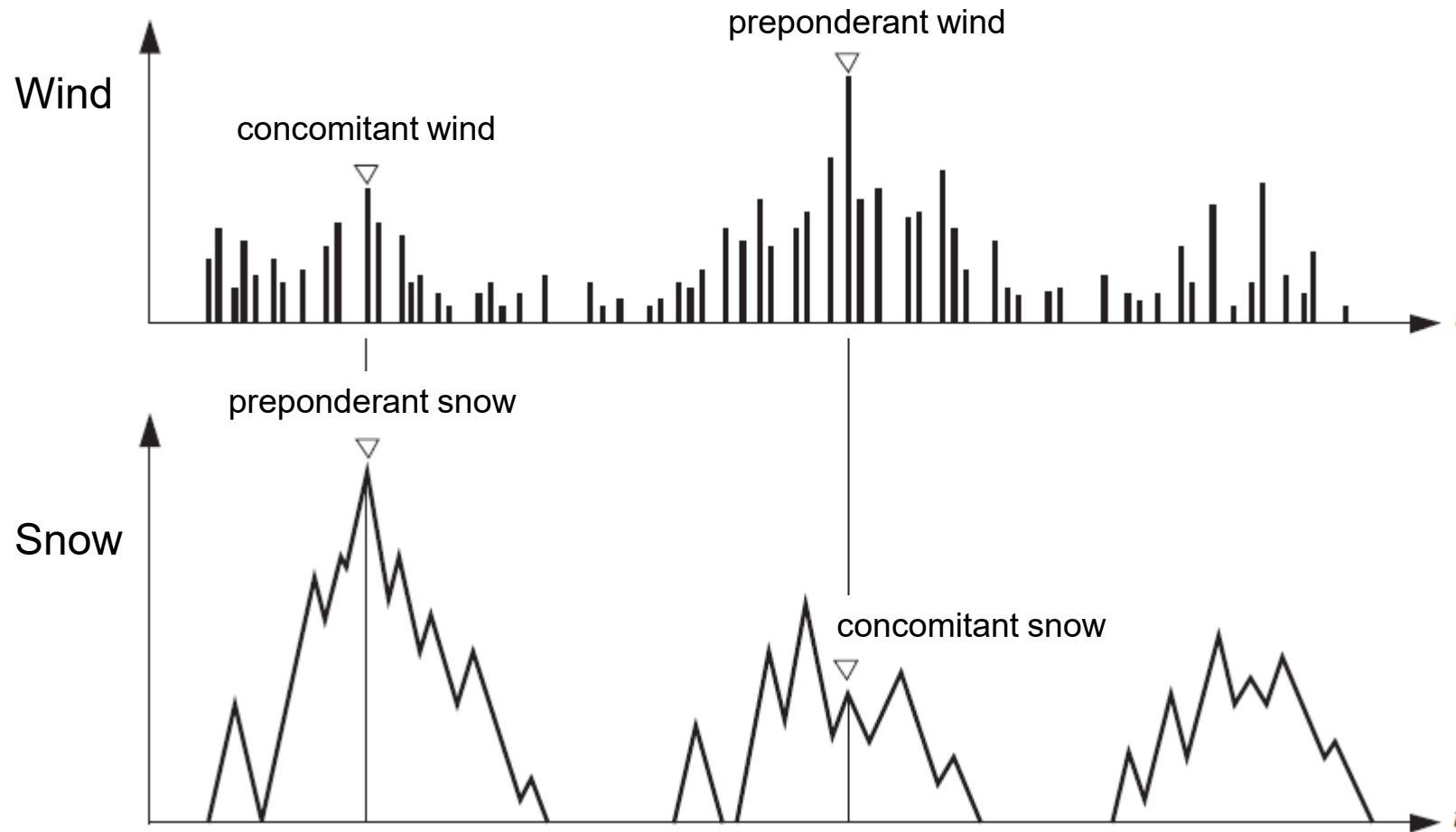
Durability hazards



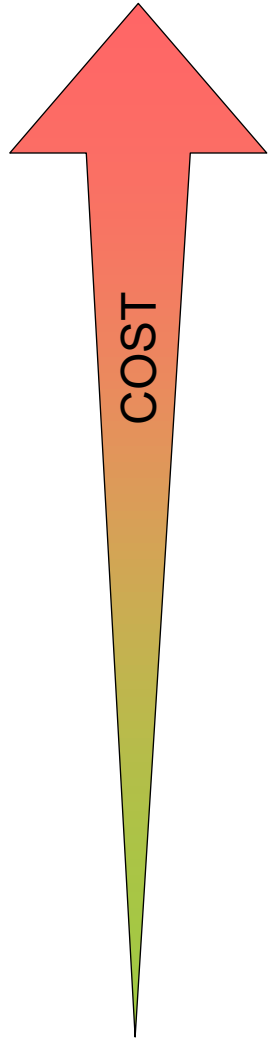
etc.

Risk scenarios

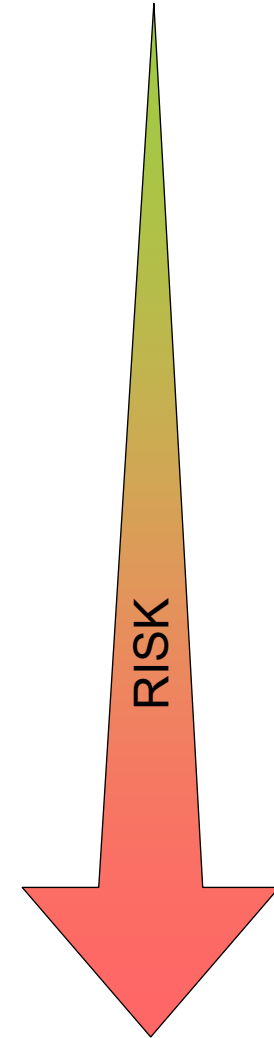
- Multiple hazards can occur at the same time



Managing hazards



- Eliminate the hazard by addressing its source
- Avoid the hazard by circumventing dangerous situations
- Overcome the hazard by planning for monitoring, controls, or alarm systems
- Control the hazard by providing sufficient reserves
- Consciously accept the hazard as unavoidable or as a sufficiently small risk to be considered within acceptable limits



3. DESIGN PHILOSOPHY

Main idea

Resistance \geq *Action Effects*

$$R \geq E$$

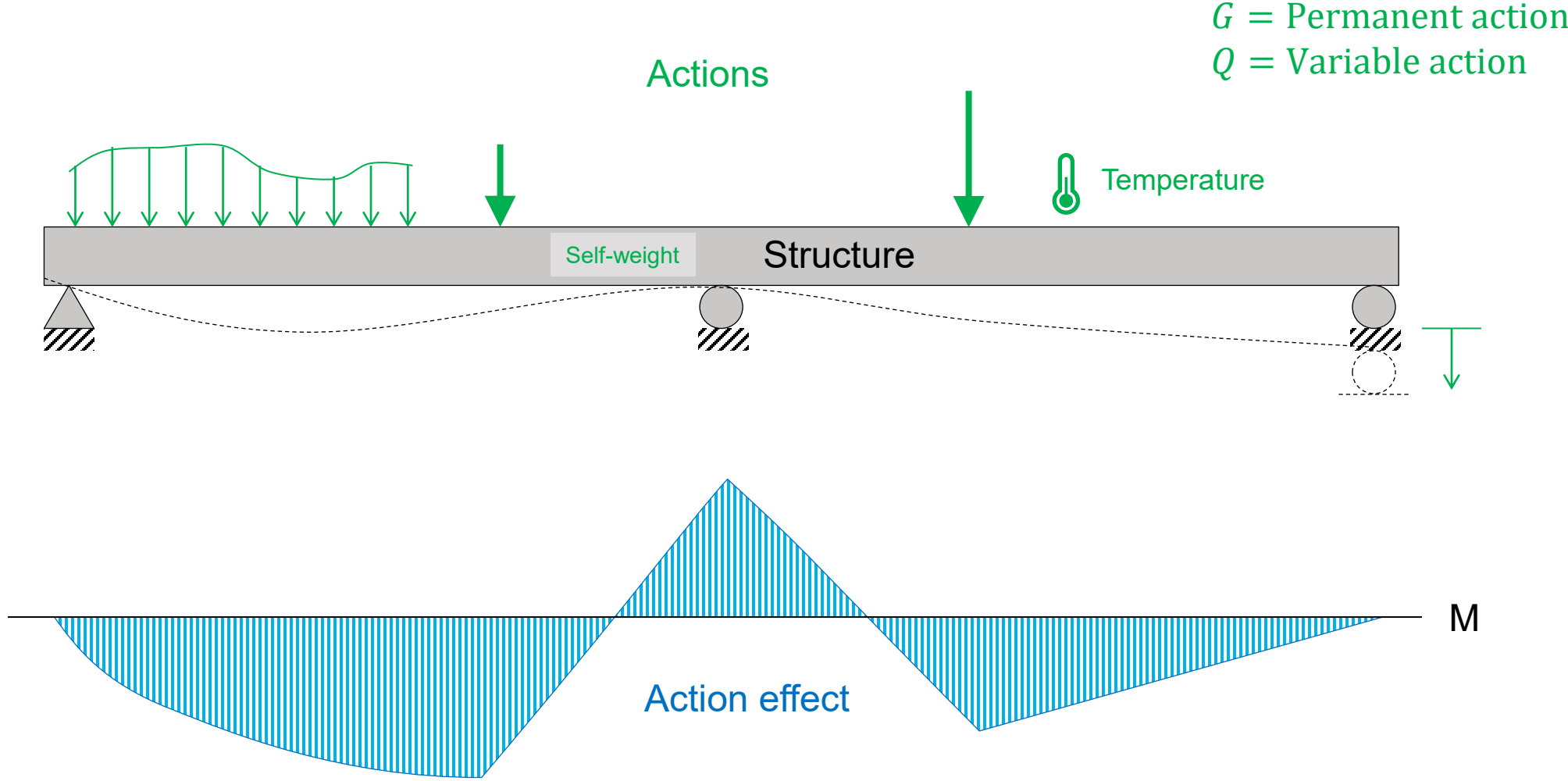
Example:

$$M_R \geq M_E$$

Moment capacity

Moment demand

Action effects



Probabilistic approach

- Want:

$$R \geq E$$

- Issue: capacity (R) and demand (E) are actually random variables
- Probabilistic statement:

$$P(R < E) < \text{acceptable limit}$$

Sources of variability

Variability of resistance

- Imprecise modelling of local resistance
- Material properties influencing local resistance
- Geometric properties influencing local resistance

Variability of action effect

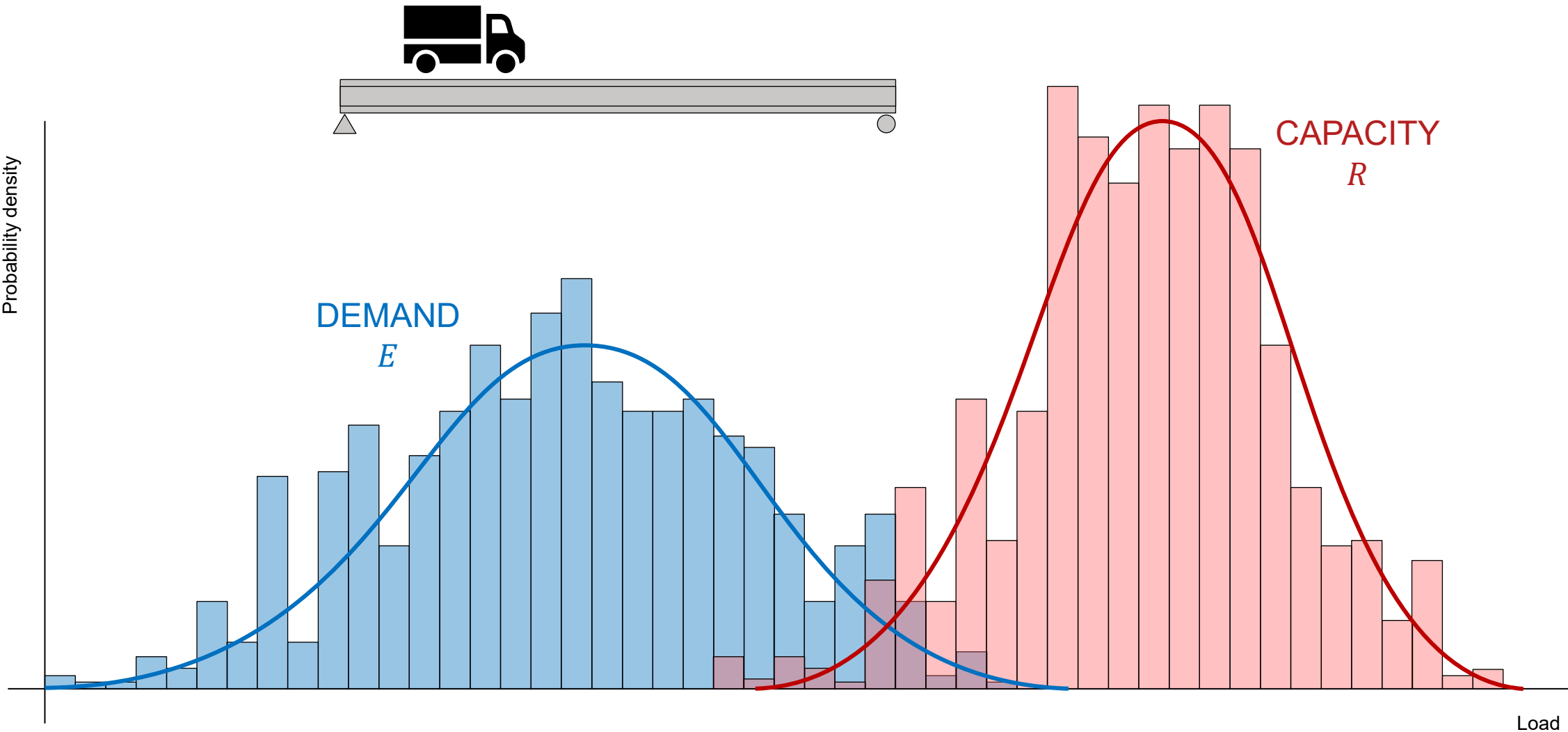
Uncertainty of actions themselves

- Environmental uncertainty
- Imprecise modelling of actions
- Geometric properties influencing actions

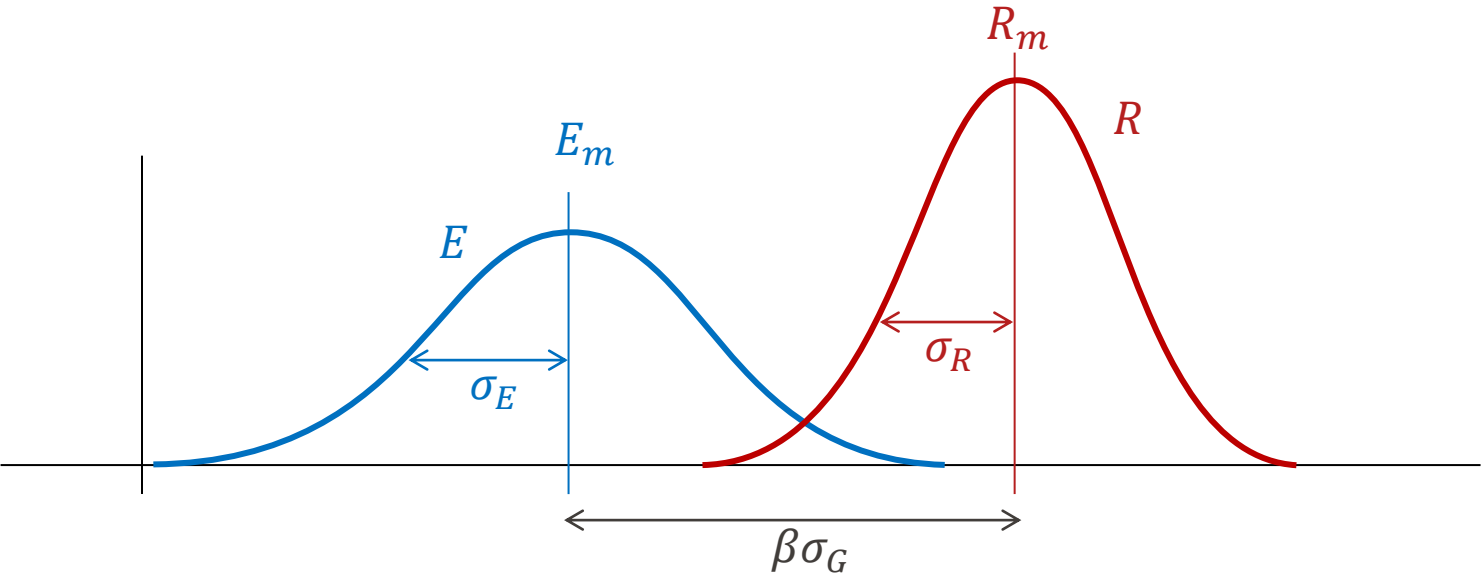
Uncertainty of action effects given actions

- Mechanical behaviour
- Modelling choices
- Material properties influencing action effects
- Geometric properties influencing action effects

Probabilistic approach



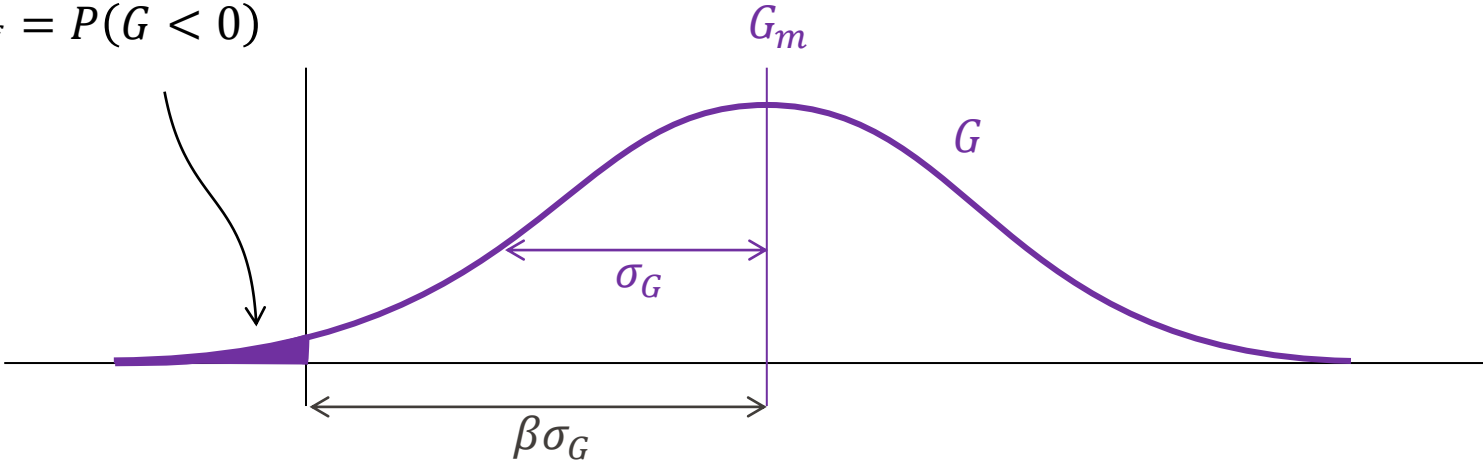
Reliability index β



- Define limit state function: $G = R - E$

Probability of failure = $p_f = P(G < 0)$

Assume G is normal:
 $p_f = \Phi(-\beta)$



Reliability index β

- By properties of Normal random variables:

$$G = R - E$$

$$G_m = R_m - E_m$$

$$\sigma_G^2 = \sigma_R^2 + \sigma_E^2$$

$$\therefore \beta = \frac{R_m - E_m}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

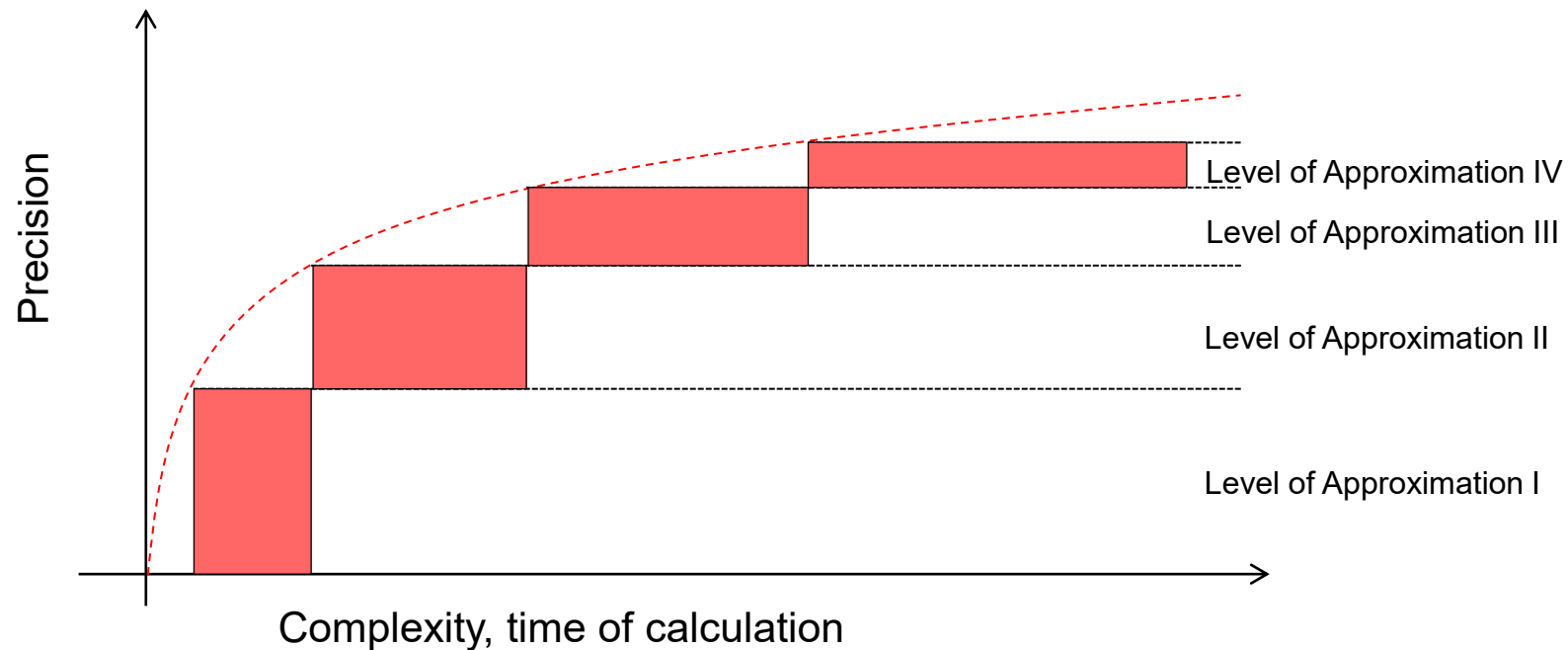
Reliability index β

Example: Recommended target reliability indices according to *fib* Model Code 2010
(1 year reference period):

Limit state	β	p_f	1 in ...
Serviceability	3.0	0.135%	741
Ultimate – Low consequence	4.1	0.00207%	48 409
Ultimate – Medium consequence	4.7	0.000130%	768 753
Ultimate – High consequence	5.1	0.0000170%	5 888 354

Practicality

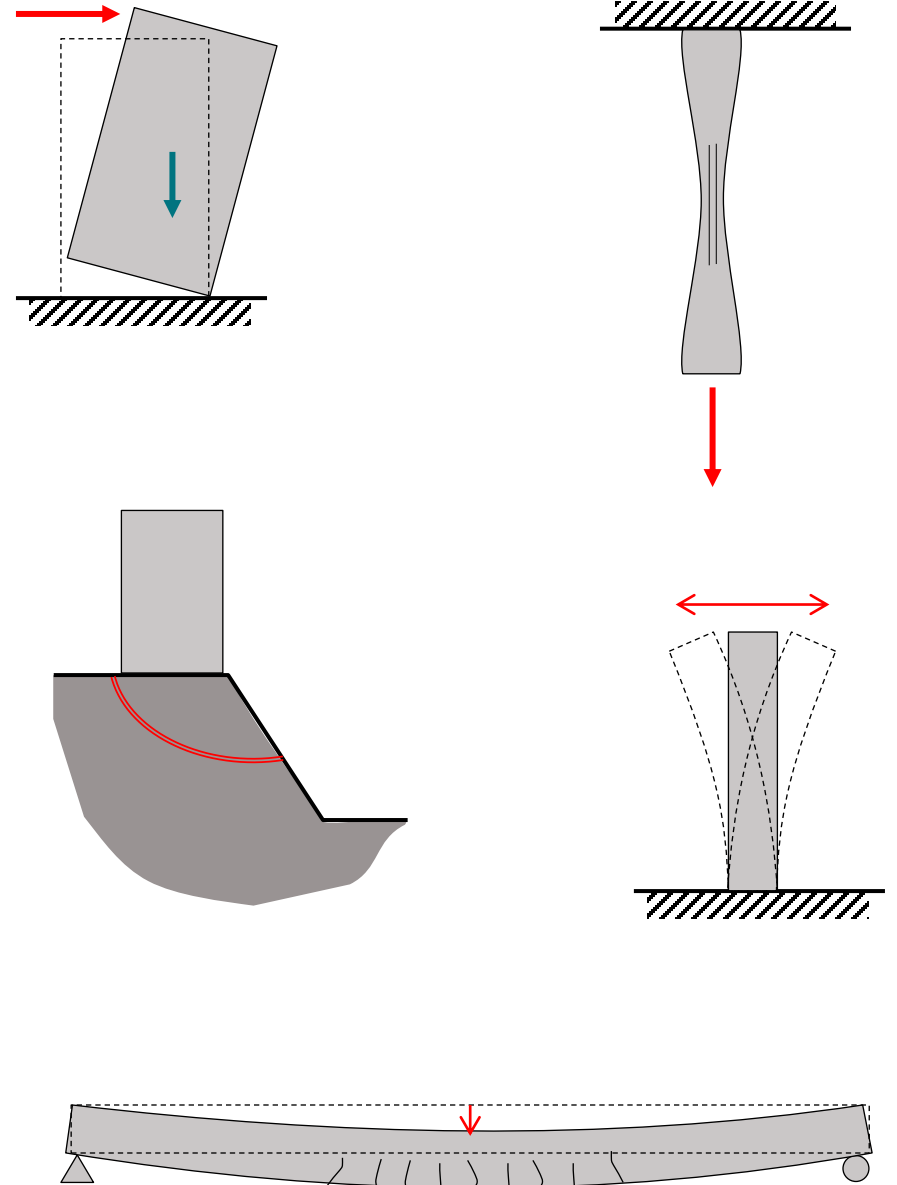
- Full probabilistic method is hard to use in practice
- We rarely have enough information about the variability to quantify both resistance and action effect accurately
- Simplified methods used for “everyday” design



4. STRUCTURAL VERIFICATION

Limit states

- Ultimate limit states (ULS) – Life-safety
 - Stability
 - Resistance
 - Soil/terrain
 - Fatigue
- Serviceability limit states (SLS) – Utilization
 - Deflection, cracking, comfort, etc.



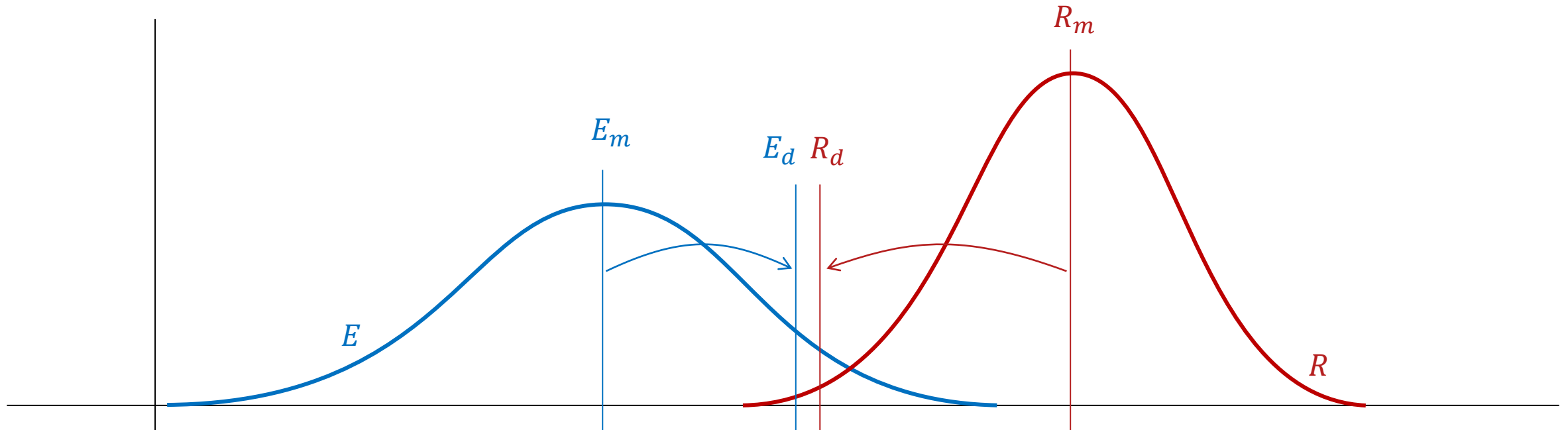
ULS Resistance – Deterministic method

- Check **limit states** using **design values**
- Does not explicitly take into account statistical distributions – single values

Design resistance

Design action effects

$$R_d \geq E_d$$



Design values

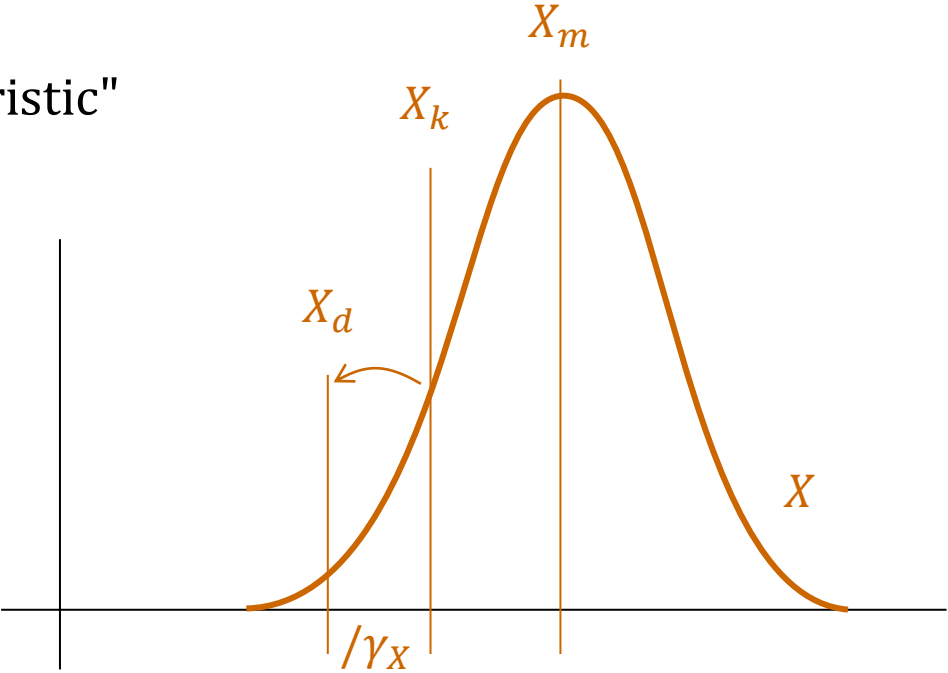
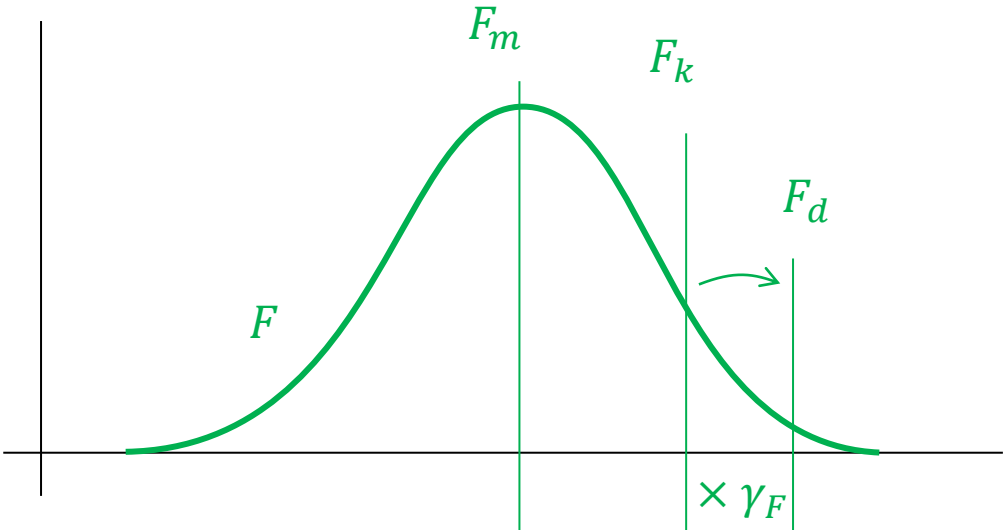
$$E_d = E\{F_d, \dots\} \quad \text{where} \quad F_d = \gamma_F F_k$$

F = action

$$R_d = R\{X_d, \dots\} \quad \text{where} \quad X_d = \frac{\eta X_k}{\gamma_X}$$

X = material property
 η = modification factor

γ = partial safety factor
 d = "Design"
 k = "Characteristic"



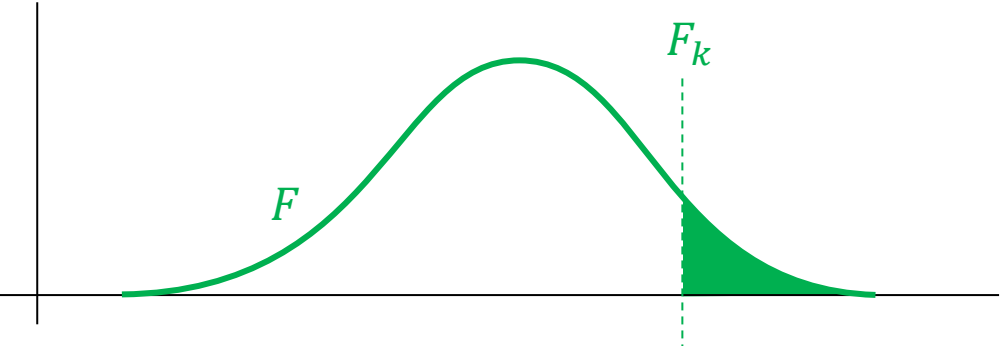
Note: this is a bit of a simplification; for certain types of verifications the safety factors are included differently, there are other parameters, etc.

Characteristic values

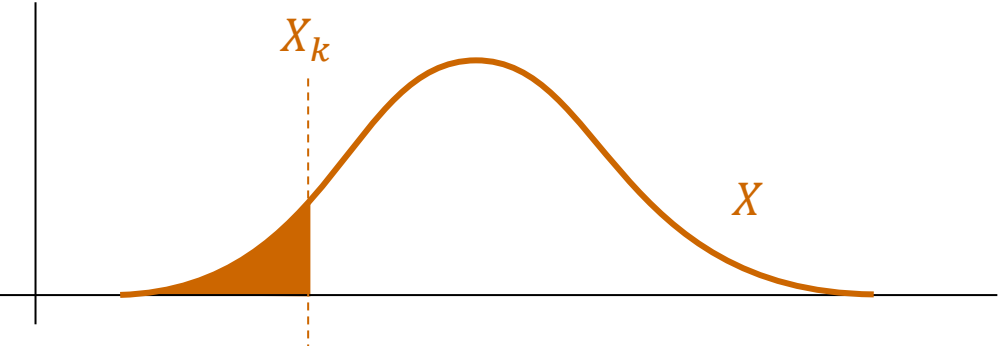
- Often represent statistical values

Examples:

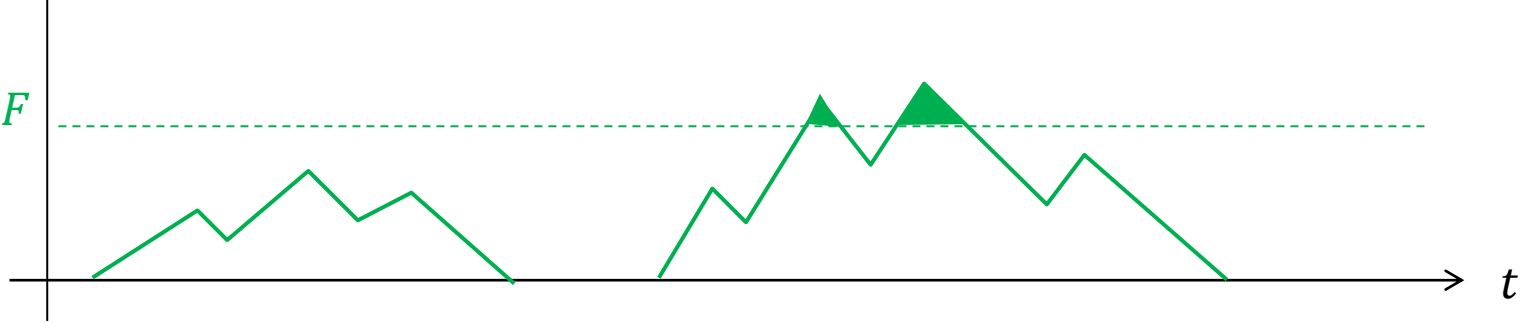
Permanent loads – Given fractile value



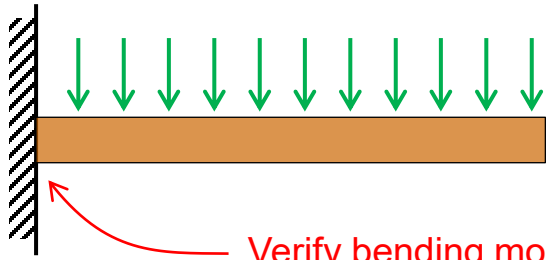
Materials – Given fractile value (often 5%)



Variable loads – Given probability of exceedance (over time span)



Example



Verify bending moment at support

Action: distributed load of $F_k = 2 \text{ kN/m}$

Material: wood beam with strength of $X_k = 15 \text{ MPa}$

Partial safety factors:

$$\gamma_F = 1.5$$

$$\gamma_X = 1.7 \quad \eta = 1.0$$

Geometry:

Length $L = 3 \text{ m}$

Section modulus $W = 5\,000\,000 \text{ mm}^3$

Design action effect:

$$M_{Ed} = \frac{F_d L^2}{2} = \frac{\gamma_F F_k \cdot L^2}{2} = 13.5 \text{ kNm}$$

Design resistance:

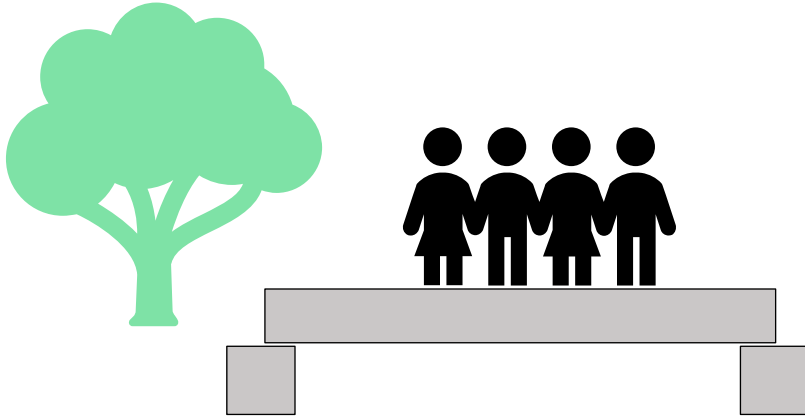
$$M_{Rd} = W X_d = W \cdot \frac{X_k}{\gamma_X} = 17.6 \text{ kNm}$$

$M_{Rd} > M_{Ed}$ so resistance is OK!

Partial safety factors vs. single safety factor

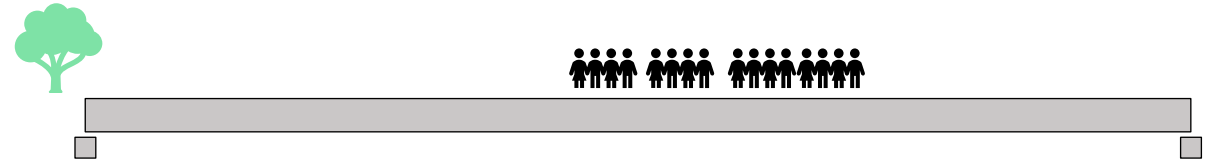
- Why not? Historically a single safety factor was used (“Allowable Stress Design”)

Counterexample:



Short bridge

- Action dominated by live load (high variability)
- Safety factor tends to be unconservative



Long bridge

- Action dominated by dead load (low variability)
- Safety factor tends to be overconservative

Partial safety factors

- Type 2 = resistance check
- Dead load is considered with upper and lower bounds to find worst case
- Live load may need to be patterned to find worst case (discussed later)

SIA260 Table 1

Actions	γ_F	État-limite		
		Type 1	Type 2	Type 3
Actions permanentes – avec effet défavorable – avec effet favorable	$\gamma_{G,sup}$	1,10 ¹⁾	1,35 ¹⁾	1,00
	$\gamma_{G,inf}$	0,90 ¹⁾	0,80 ¹⁾	1,00
Actions variables – en général – charges dues au trafic routier – charges dues au trafic ferroviaire – modèles de charge 1, 2, 4 à 7 – modèle de charge 3	γ_Q	1,50	1,50	1,30
	γ_Q	1,50	1,50	1,30
	γ_Q	1,45	1,45	1,25
	γ_Q	1,45	1,20	1,25
Actions du terrain de fondation Charges de terre – avec effet défavorable – avec effet favorable	$\gamma_{G,sup}$	1,10	1,35 ^{2) 3)}	1,00
	$\gamma_{G,inf}$	0,90	0,80	1,00
Poussée des terres – avec effet défavorable – avec effet favorable ⁴⁾	$\gamma_{G,Q,sup}$	1,35	1,35	1,00
	$\gamma_{G,Q,inf}$	0,80	0,70	1,00
Pression hydraulique – avec effet défavorable – avec effet favorable	$\gamma_{G,Q,sup}$	1,05	1,20 ³⁾	1,00
	$\gamma_{G,Q,inf}$	0,95	0,90	1,00
¹⁾ G est multiplié par $\gamma_{G,sup}$ ou par $\gamma_{G,inf}$, selon que l'effet d'ensemble de l'action est défavorable ou favorable. ²⁾ Pour des hauteurs de remblai de 2 à 6 m, $\gamma_{G,sup}$ peut être réduit linéairement de 1,35 à 1,20. ³⁾ Lors de l'application de la méthode observationnelle, des valeurs réduites sont admises dans certains cas, selon la norme SIA 267. ⁴⁾ Pour la butée des terres exerçant une action favorable, on a $F_d = R_d$, selon la norme SIA 267.				

SLS – Serviceability

- Similar to ULS, we compare load effects (e.g. deflection) with a limit value

$$E_{ser} \leq C_{ser}$$

- Different limit states may be considered depending on specific requirements (deflection, crack width, vibration, etc.)



SLS limits

- Different serviceability limits need to be checked; e.g. deflection limits below

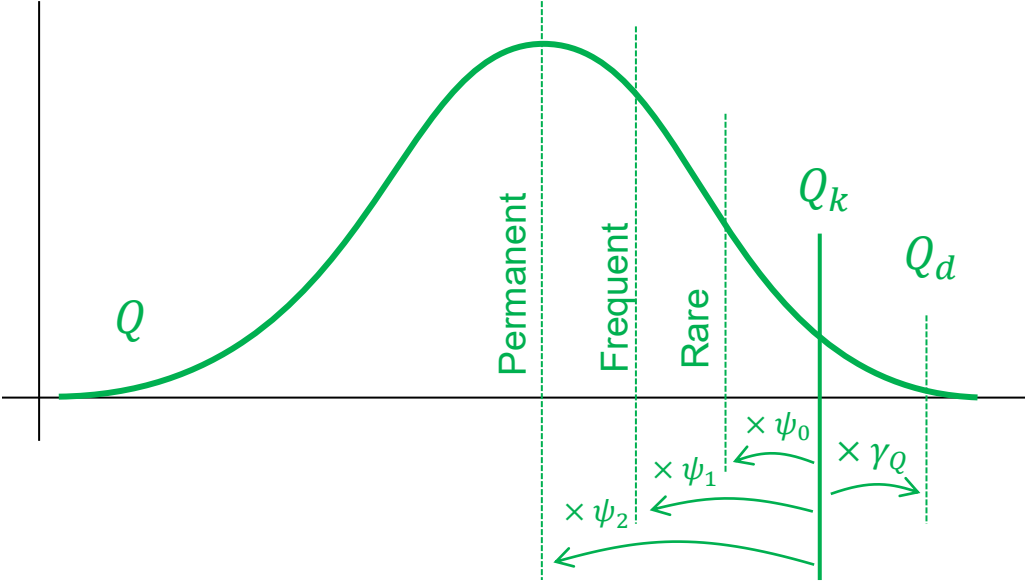
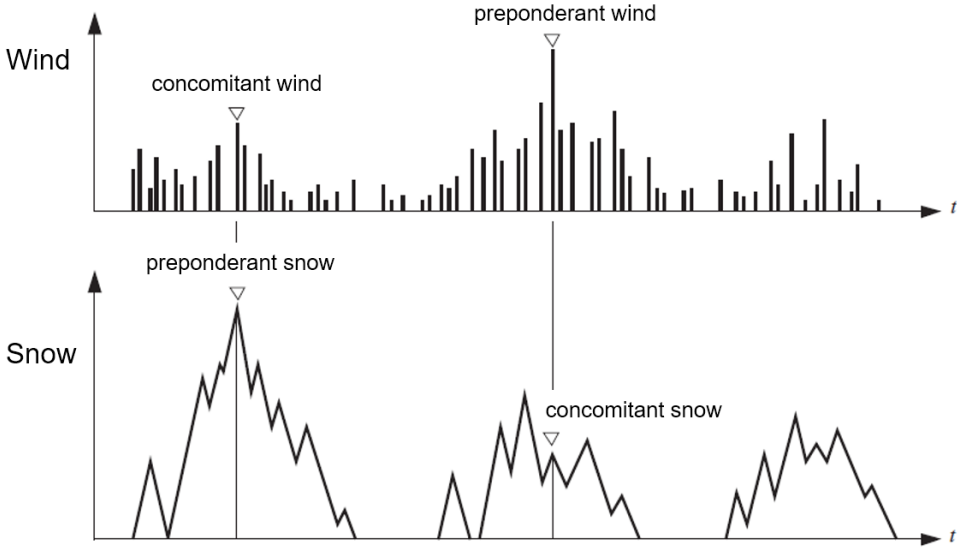
SIA260 Annex A Table 3 (buildings)

État-limite	Conséquences des effets des actions		
	irréversibles	réversibles	réversibles
	Cas de charge		
	rare (20)	fréquent (21)	quasi permanent (22)
Aptitude au fonctionnement – Éléments incorporés à caractère fragile – Éléments incorporés à caractère ductile – Utilisation et exploitation	$w \leq l/500$ ^{1) 2)}	$w \leq l/350$ ¹⁾ $w \leq l/350$ ³⁾	
Confort		$w \leq l/350$ ³⁾	
Aspect			$w \leq l/300$ ⁴⁾
¹⁾ Flèche due aux actions, en particulier aux actions à long terme, après le montage de tous les éléments de construction secondaires et la mise en place de l'équipement technique. ²⁾ Si des éléments incorporés réagissent de manière particulièrement sensible aux déformations de la structure porteuse, il faut avant tout prévoir des mesures constructives contre les dommages, en plus ou à la place des mesures découlant de la procédure de dimensionnement. ³⁾ Flèche due uniquement aux actions variables. ⁴⁾ Flèche, après déduction d'une éventuelle contreflèche. Les éventuels effets à long terme doivent être pris en considération.			
Les flèches seront déterminées selon les indications des normes SIA 262 à 266. Des valeurs limites différentes pour les flèches peuvent être convenues en accord avec les exigences d'utilisation. Elles seront consignées dans la base du projet. Des exigences réduites sont envisageables spécialement pour les éléments de construction secondaires.			

SIA260 Annex B Table 7 (road bridges)

État-limite	Conséquences des effets des actions		
	irréversibles	réversibles	réversibles
	Cas de charge		
	rare (20)	fréquent (21)	quasi permanent (22)
Aptitude au fonctionnement – Déplacement vertical relatif au joint de transition de la chaussée		$\delta_v \leq 5 \text{ mm}$ ^{1) 2) 3)}	
Confort		$w \leq l/500$ ⁴⁾	
Aspect			$w \leq l/700$ ^{1) 2)}
¹⁾ Flèche après déduction d'une éventuelle contreflèche. Les éventuels effets à long terme dus au retrait, à la relaxation ou au fluage doivent être pris en considération. ²⁾ Flèche due aux actions, en particulier aux actions à long terme, après le montage de l'équipement technique principal ³⁾ Si des éléments incorporés réagissent de manière particulièrement sensible aux déformations de la structure porteuse, il faut avant tout prévoir la prise de mesures techniques contre les dommages, en plus ou à la place des mesures découlant de la procédure de dimensionnement. Les directives émises par les fabricants et les soumissionnaires des produits de construction doivent être respectées. ⁴⁾ Flèche due à la valeur fréquente du modèle de charge 1.			
Les flèches seront déterminées selon les indications des normes SIA 262 à 266. Des valeurs limites différentes pour les flèches peuvent être convenues en accord avec les exigences d'utilisation. Elles seront consignées dans la base du projet. Des exigences réduites sont envisageables spécialement pour les éléments de construction secondaires.			

Load combinations



- Turkstra's rule: check with one preponderant variable load + concomitant variable loads

Load combinations

- ULS (permanent and variable)

$$\gamma_G G_k + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum \psi_{0i} Q_{ki}$$

- ULS (accidental)

$$G_k + A_d + \sum \psi_{2i} Q_{ki}$$

- SLS (rare)

$$G_k + Q_{k1} + \sum \psi_{0i} Q_{ki}$$

- SLS (frequent)

$$G_k + \psi_{11} Q_{k1} + \sum \psi_{2i} Q_{ki}$$

- SLS (quasi-permanent)

$$G_k + \psi_{2i} Q_{ki}$$

SIA260 Annex A Table 2 (buildings)

Actions	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Charges utiles dans les bâtiments			
– Catégorie A Locaux habitables	0,7	0,5	0,3
– Catégorie B Locaux administratifs	0,7	0,5	0,3
– Catégorie C Locaux de réunion	0,7	0,7	0,6
– Catégorie D Locaux de vente	0,7	0,7	0,6
– Catégorie E Entrepôts	1,0	0,9	0,8
Charges dues au trafic dans les bâtiments			
– Catégorie F Véhicules en dessous de 3,5 t	0,7	0,7	0,6
– Catégorie G Véhicules de 3,5 t à 16 t	0,7	0,5	0,3
– Catégorie H Toits	0	0	0
Charges de neige	$1 - 60/h_0$	$1 - 250/h_0$	$1 - 1000/h_0$
Forces dues au vent	0,6	0,5	0
Effets de la température	0,6	0,5	0
Actions du terrain de fondation			
– Poussée des terres	0,7	0,7	0,7
– Pression hydraulique	0,7	0,7	0,7

SIA260 Annex B Table 6 (road bridges)

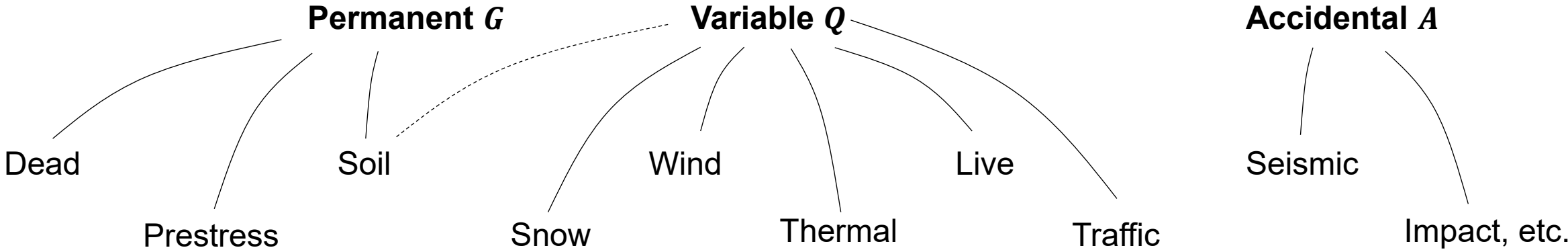
Actions	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Charges verticales			
– Modèle de charge 1	0,75	0,75	0
– Modèle de charge 3	0	0	0
Forces horizontales ¹⁾	0,75	0,75	0
Charges de neige ²⁾	0,6	0,2	0
Forces dues au vent	0,6	0,2	0
Effets de la température	0,6	0,6	0,5
Actions du terrain de fondation			
– Poussée des terres	0,7	0,7	0,7
– Pression hydraulique	0,7	0,7	0,7
¹⁾ On admettra que les forces horizontales agissent simultanément avec le modèle de charge 1.			
²⁾ Les charges de neige ne seront considérées comme action concomitante que pour les ponts couverts.			

Note: prestress load omitted here for simplicity

5. ACTIONS

Generalities

- What follows is not a complete summary – just a taste
- Actions are specified in standard SIA 261



Dead load

- Self-weight of structural materials (concrete, steel, timber, etc.)
- Quasi-permanent non-structural material (roofing, partition walls, etc.) sometimes called “Superimposed Dead Load” (SDL)
- Calculate based on mean density and nominal volume

SIA261 Annex A Table 28

Matériau	Charge volumique kN/m ³	Matériau	Charge volumique kN/m ³
Aluminium	27	Maçonnerie montée sans crépi	
Acier	78,5	briques de terre cuite pleines	18
Béton		briques de terre cuite perforées	13
non armé	24	briques à haute isolation phonique	17
armé	25	briques apparentes perforées	15
Béton léger (à déterminer de cas en cas)		agglomérés de béton pleins	22
Bois		agglomérés de béton perforés	18
résineux en général	5	agglomérés isolants phoniquement	20
feuillus en général	7,5	briques silico-calcaires pleines	20
bois résineux collés	5	briques silico-calcaires perforées	18
panneaux en bois aggloméré	8	agglomérés de béton cellulaire, qualité normale	6
Maçonnerie en pierre		agglomérés de béton cellulaire, haute qualité	7
moellons (calcaire)	24	briques de verre pleines	25
granite	27	briques de verre creuses	14
basalte	30	plaques d'argile cellulaire	12
molasse, grès	24	plaques de plâtre	12
Enduits et crépis		Revêtements de sols	
mortier de chaux	19	dallage en céramique	20
mortier de ciment	22	pierre naturelle	30
mortier de plâtre	12	parquet en bois collé	8
crépis muraux extérieurs	18	linoléum	15
crépis muraux intérieurs	14	Revêtements bitumineux	
		asphalte coulé	24
		revêtement bitumineux (HMT)	24

SIA261 Annex A Table 29

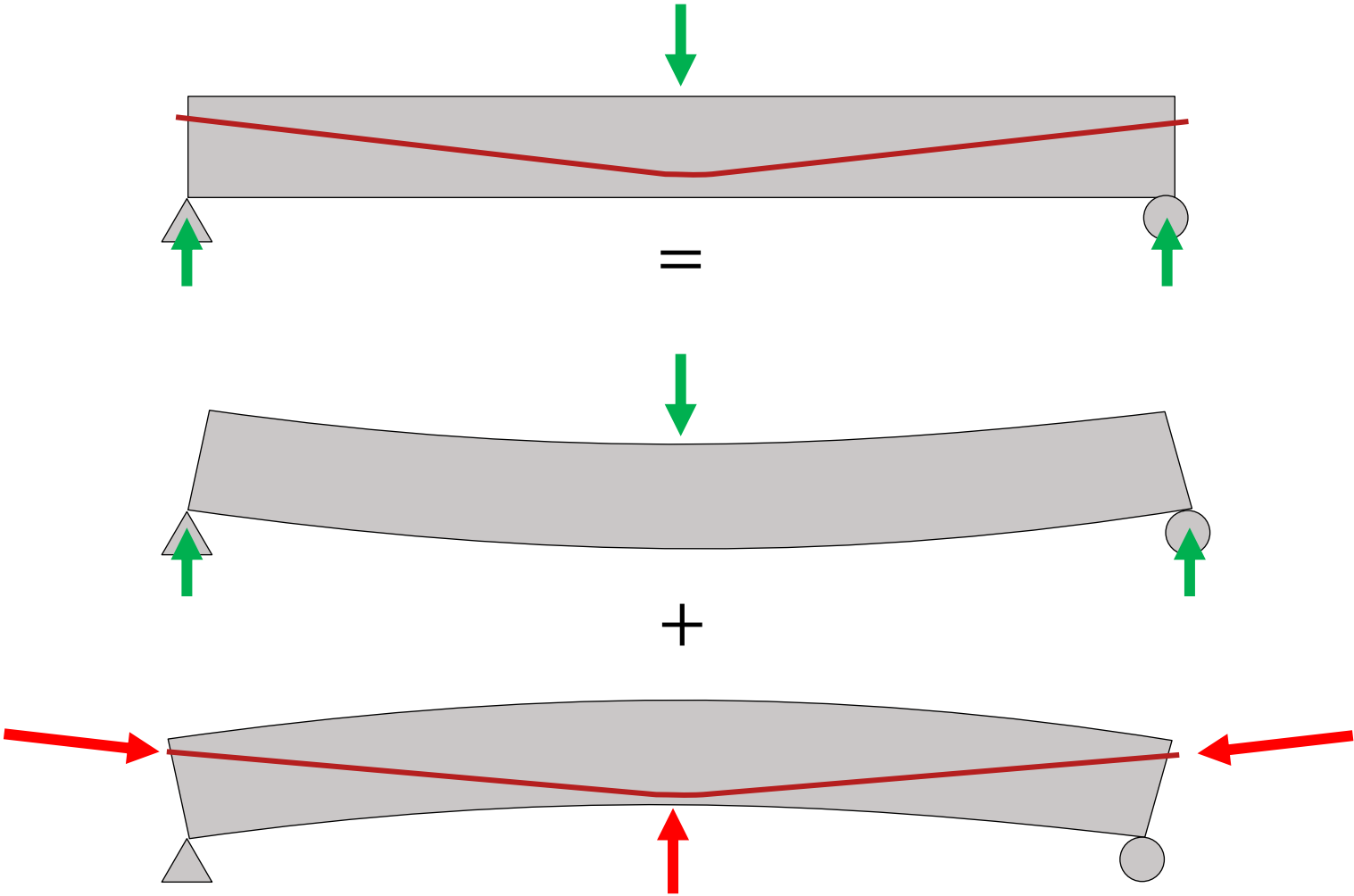
Couverture, revêtement	Charge de surface kN/m ²	Couverture, revêtement	Charge de surface kN/m ²
Ciment armé de fibres	0,18	Sous-toitures	
Tôles profilées, $h = 80 \text{ mm}$, $d = 0,8 \text{ mm}$		bardeaux	0,10
en acier	0,12	panneaux de fibres durs	0,05
en aluminium	0,04	panneaux en ciment armé de fibres	0,12
Couverture d'ardoise en ciment armé de fibres		lambris de 24 mm, y.c. une couche de carton bituminé ou une feuille plastique	0,14
recouvrement simple	0,23	Vitrage, y compris châssis	
recouvrement double	0,30	verre normal de 5 mm	0,25
Tuiles en terre cuite, y compris lattis		verre armé de 6 mm	0,35
tuiles plates, recouvrement double	0,75	Gravillon, par 10 mm d'épaisseur	0,20
tuiles flamandes	0,47	Carton bitumé, par couche	0,02
Tuiles en béton, y compris lattis		Feuille plastique	0,02
tuiles plates	0,55	Enduits de mortier	0,02
tuiles flamandes	0,48		

SIA261 Annex A Table 30

Matériau/denrée	Charge volumique kN/m ³	Angle de talus °	Matériau/denrée	Charge volumique kN/m ³	Angle de talus °
Terres et ballast			Liquides		
sable	15	35	essence	7,3	
tout venant, mélangé	20	27	pétrole, diesel et mazout	8,5	
ballast, concassé	18	35	goudron de houille, bitume	12	
terre, sèche	16	40 à 45	huile minérale de graissage	9,2	
terre, humide	21	20 à 25	huile végétale	9,5	
gravats (en moyenne)	14	30 à 35	Papier		
Combustibles			livres sur étagères	6	
houille	9	35	papier empilé	11	
briquettes, en vrac	9	30	papier en rouleaux	15	
briquettes, empilées	13,5		Fourrage		
coke, en vrac	5		céréales en vrac	7,5	30
bois en bûches:			pommes de terre, betteraves fourragères	7	30
conifère, sec	4,4	45	foin et paille en vrac	1,5	
conifère, humide	6,5	45	herbe en vrac	3,5	
feuillu, sec	7	45	Fumier	9,5	
feuillu, humide	10	45	Denrées alimentaires		
bois en copeaux, en vrac	1,5	25	farine en vrac	6	35
bois en copeaux, compacté	2,5	45	sucre en vrac	9,5	35
Liants			sel en vrac	12	40
chaux hydraulique	12	25	sel en sacs	10	
ciment en silo	16	30			
ciment en sacs	12				
clinker de ciment, en vrac	17	30			

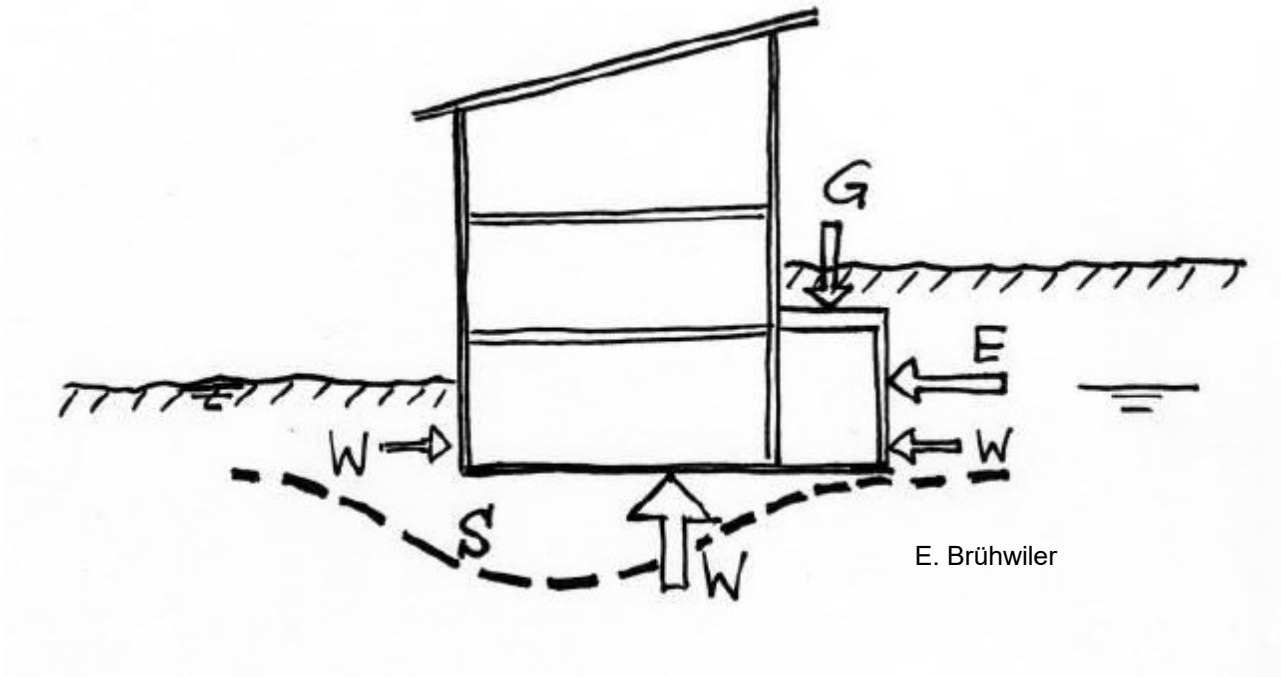
Prestress load

- Considered permanent load
- Given its own safety factor γ_p



Soil load

- Usually coordinated with geotechnical engineer
- Effective load depends on weight of soil and friction angle

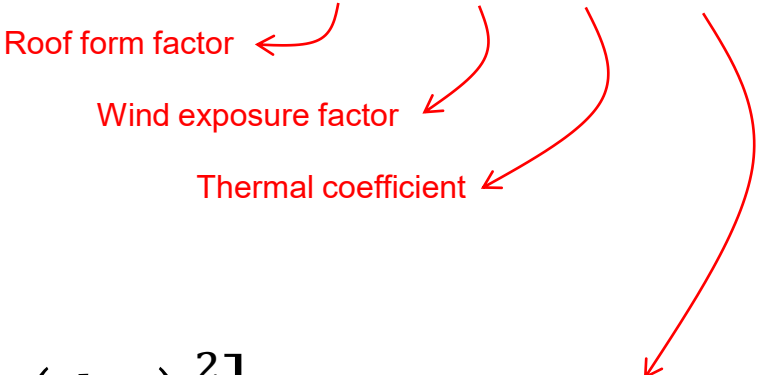


G = Surcharge
 E = Lateral earth pressure
 W = Hydraulic pressure
 S = Soil settlement

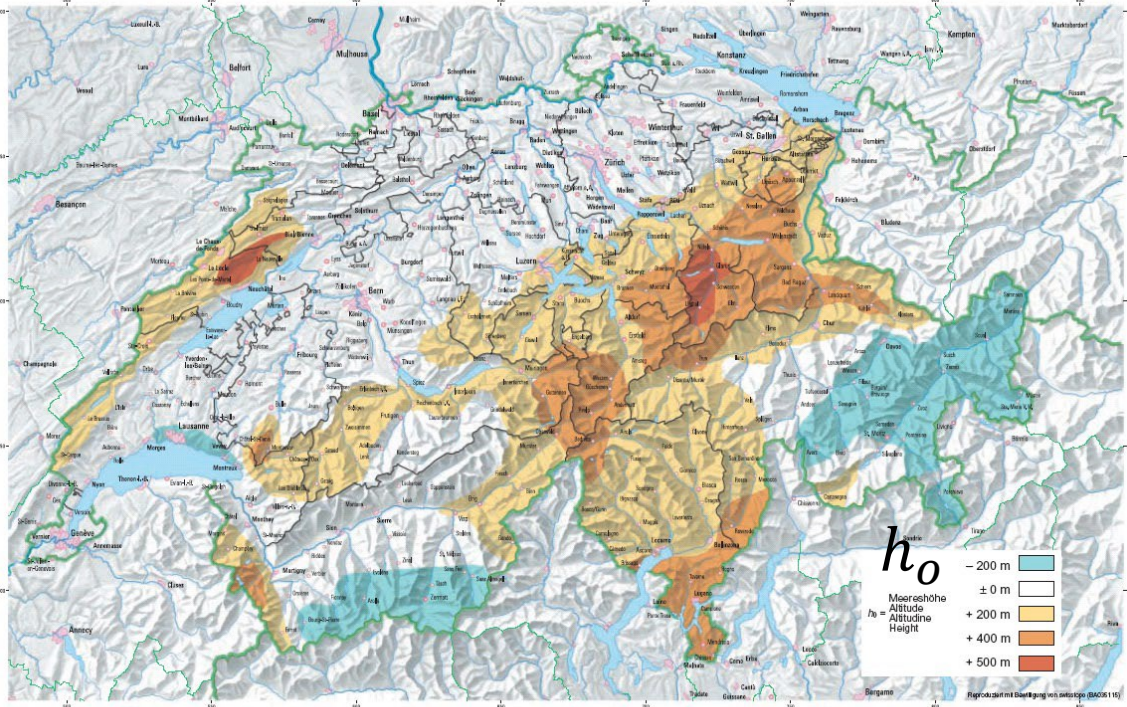
Snow load

- Generally a function of altitude
- Snow piling due to wind and shape of roof must be considered

$$q_k = \mu_i \cdot C_e \cdot C_T \cdot s_k$$



ANNEXE D ALTITUDE DE RÉFÉRENCE POUR LES CHARGES DE NEIGE



Anhang
Annexe
Annex

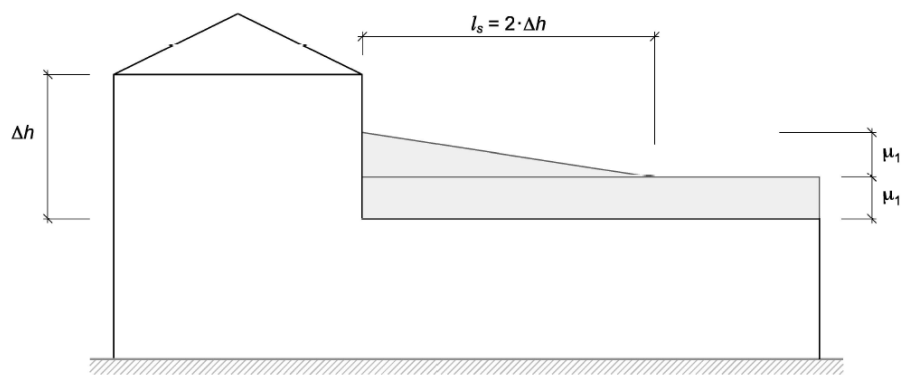
Bezugshöhe h_0
Altitude de référence h_0
Altitudine di riferimento h_0
Reference Height h_0

(nicht anwendbar auf Bauwerke über 2000 m Meereshöhe)
(pas applicable pour les constructions situées au-dessus de 2000 m d'altitude)
(non applicabile a costruzioni ubicate sopra 2000 m sul mare)
(not applicable for construction works at heights greater than 2000 m)

Reproduziert mit Duerfing (mit Genehmigung, 2002/116)

SIA 261, Copyright © 2003 by SIA Zurich

$$s_k = \left[1 + \left(\frac{h_o}{350} \right)^2 \right] \cdot 0.4 \text{ kPa} \geq 0.9 \text{ kPa}$$



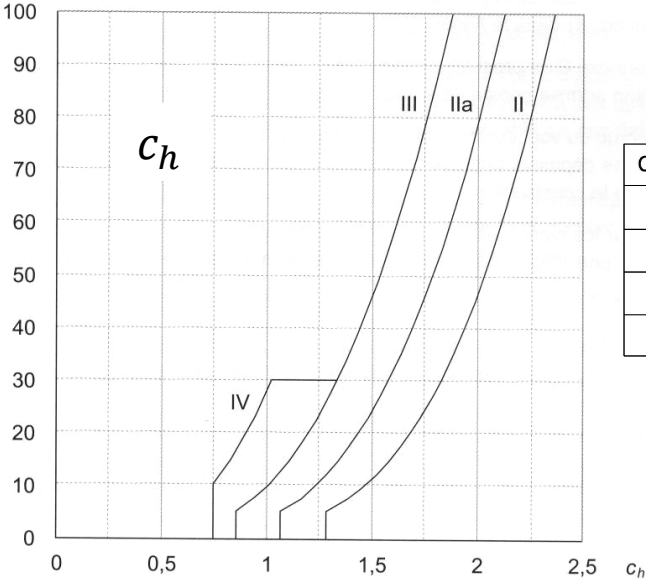
Wind load

- Pressure derives from wind speed

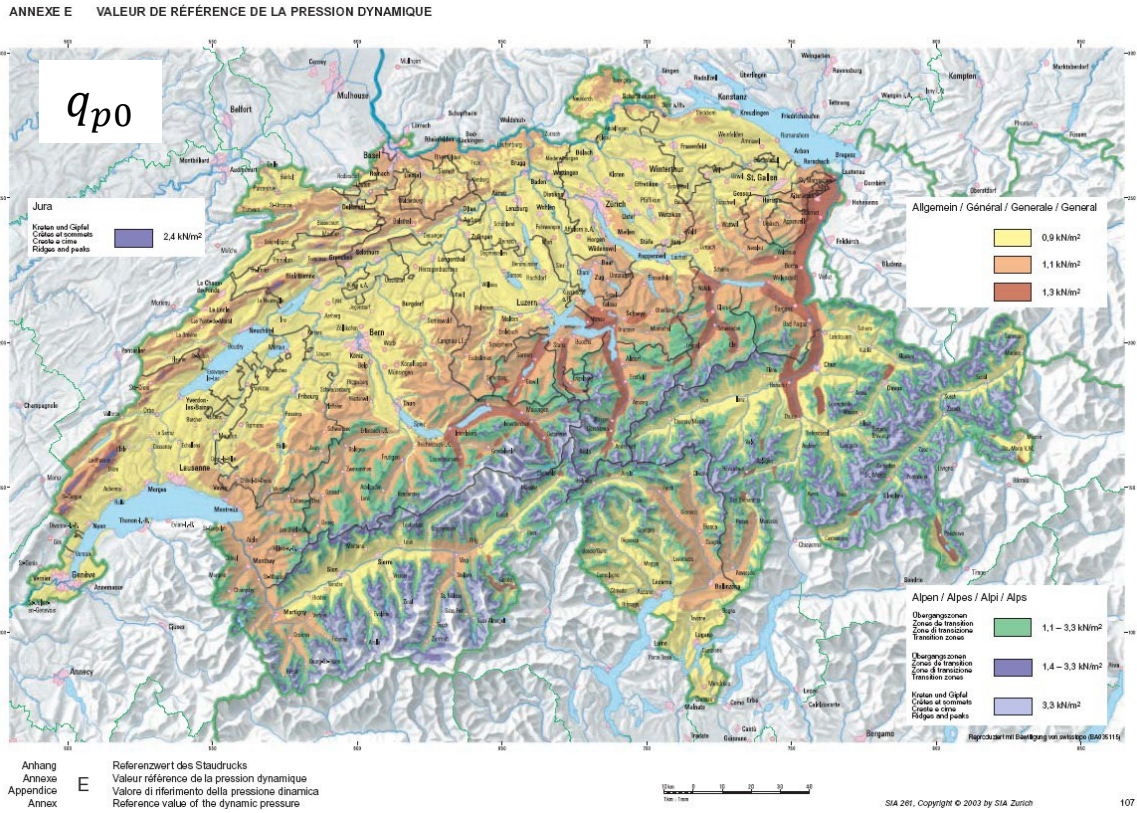
$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

- Dynamic pressure is function of height

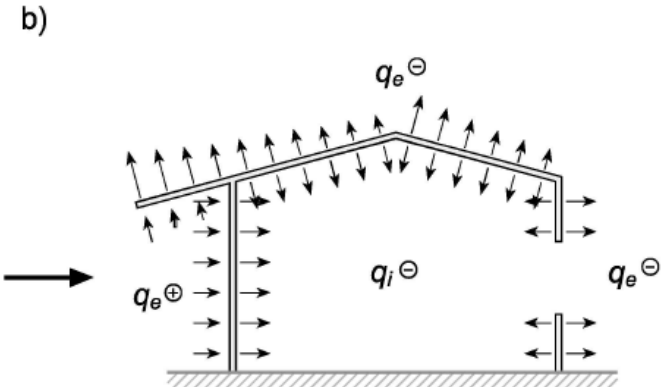
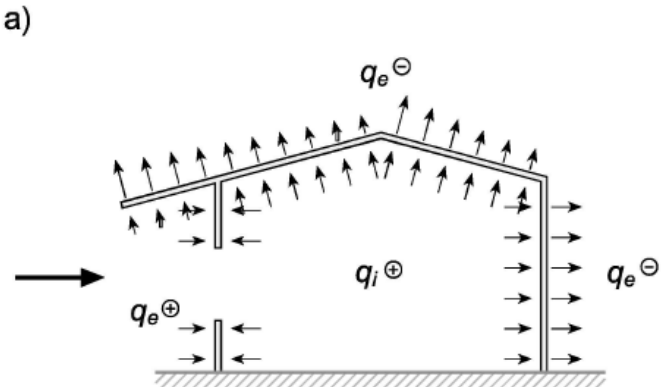
$$q_p = c_h \cdot q_{p0}$$



Catégorie de terrain	Exemples
II	rive lacustre
IIa	grande plaine
III	localité, milieu rural
IV	zone urbaine étendue



Wind load

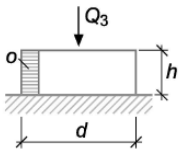


Local effect (e.g., cladding design)

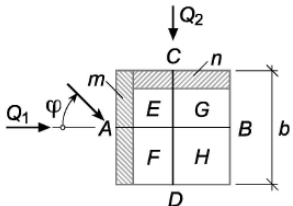
$$Q_{ek} = c_d \cdot c_{pe} \cdot q_p \cdot A_{ref}$$

$$Q_{ik} = c_d \cdot c_{pi} \cdot q_p \cdot A_{ref}$$

Dynamic factor



Example:



Global effect (e.g., structural stability)

$$Q_k = c_{red} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p \cdot A_{ref}$$

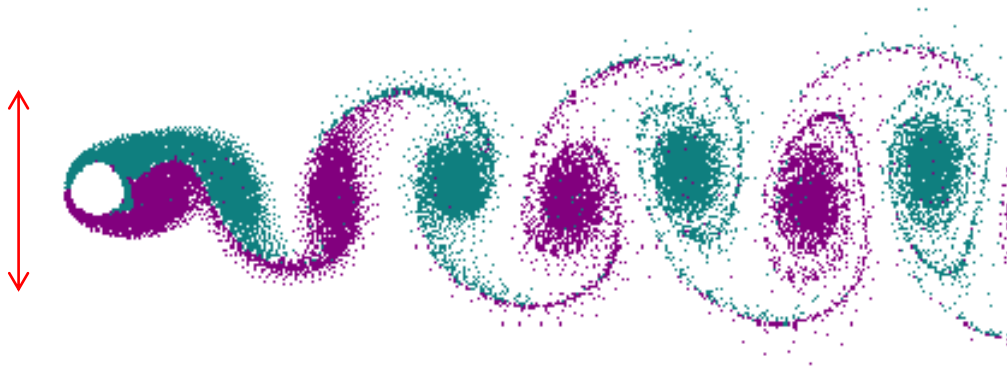
Reduction factor for large areas

Tableau 31 Coefficients pour $h : b : d = 0,3 : 1 : 1$ à $0,05 : 1 : 1$, toit plat

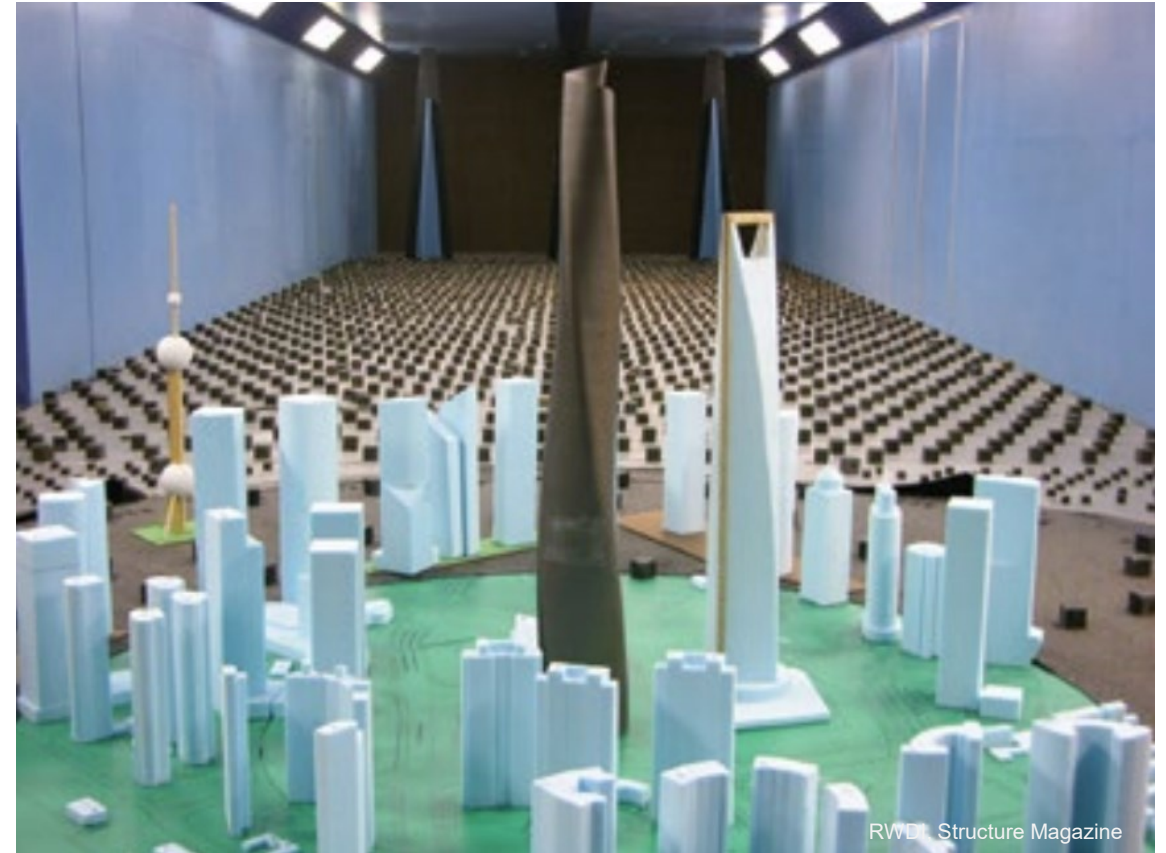
φ	Coefficients de pression														Coefficients de force				
	c_{pe}								c_{pe}		c_{pi}				c_{r1}	c_{r2}	c_{r3}		
	Surface d'application								Surface localisée		Ouvertures prépondérantes sur les côtés				Surface de référence				
	A	B	C	D	E	F	G	H	m	n	o	rép.	A	B	C	D	$b \cdot h$	$d \cdot h$	$d \cdot b$
0°	0,7	-0,25	-0,35	-0,35	-0,5	-0,5	-0,25	-0,25	-0,85	-0,45	-0,8	0,15/ -0,21	0,7	-0,25	-0,35	-0,35	0,95	0	-0,38
15°	0,55	-0,25	-0,2	-0,35	-0,5	-0,55	-0,25	-0,3	-0,85	-0,45	-1,0	$\pm 0,15$	0,55	-0,25	-0,2	-0,35	0,8	0,15	-0,4
45°	0,4	-0,4	0,4	-0,4	-0,45	-0,45	-0,45	-0,25	-0,85	-0,85	-0,45	$\pm 0,1$	0,4	-0,4	0,4	-0,4	0,8	0,8	-0,4
90°	-0,35	-0,35	0,7	-0,25	-0,5	-0,25	-0,5	-0,25	-0,45	-0,85	0,45	$\pm 0,15$	-0,35	-0,35	0,7	-0,25	0	0,95	-0,38
	$\hat{c}_{pe} = -2,0$														$c_{fr} = 0$				

Wind load

- In tall buildings a wind consultant usually provides input on design forces and pressures, as well as vibration criteria
- Phenomenon of “vortex shedding”

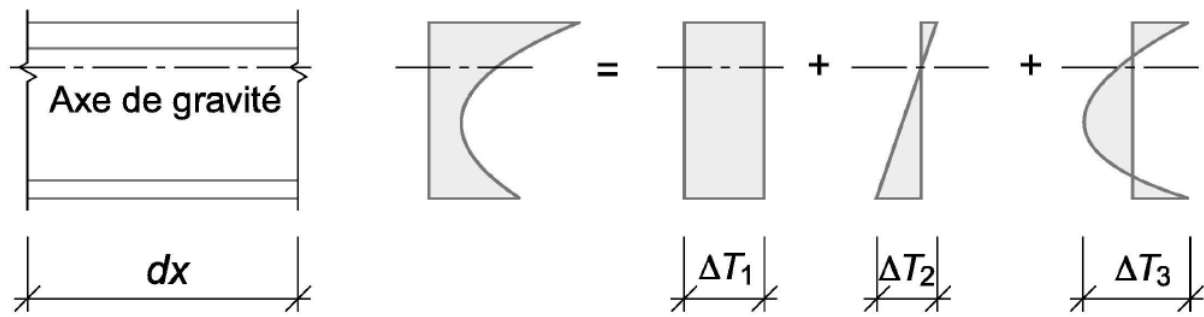


Wikipedia



RWD Structure Magazine

Thermal load



Mode de construction	ΔT_{1k} en °C
Béton non armé	± 15
Béton armé ou précontraint	± 20
Acier	± 30
Mixte acier-béton	± 25
Bois	± 20
Maçonnerie	± 15
Aluminium	± 30

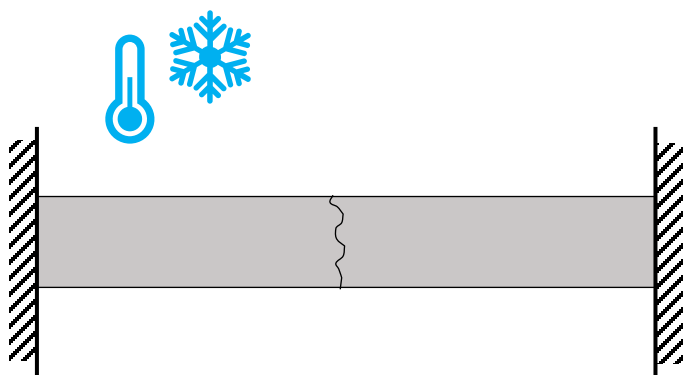
Seasonal variation

Short-term variation (e.g., direct sun)

Nonlinearity (usually ignored)

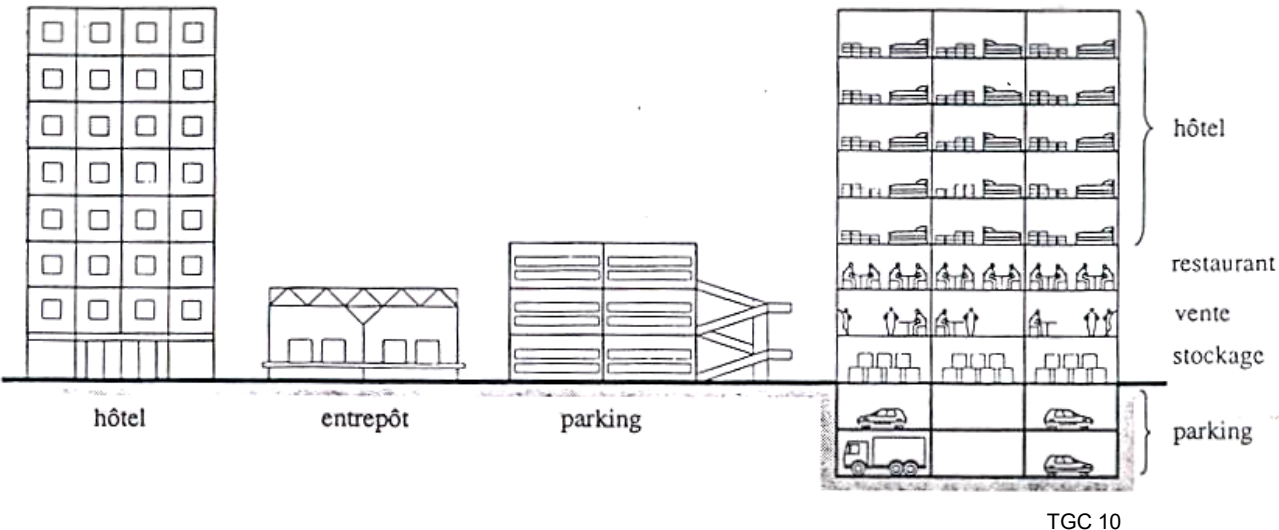
Type de structure	Face supérieure plus chaude ΔT_{2k} en °C	Face supérieure plus froide ΔT_{2k} en °C
Ponts métalliques	+ 10	- 6
Ponts en béton ¹⁾		
$h \leq 1,0$ m	+ 12	- 4
$h \geq 3,0$ m	+ 8	- 3
Ponts de construction mixte		
Dalle	+ 12	- 4
Poutre métallique	0	0

¹⁾ h = hauteur de la section ; pour des hauteurs entre 1 m et 3 m, les valeurs pourront être interpolées linéairement.



Expansion joints may be needed in monolithic structures

Live load (buildings)



- Consider distributed and/or point loads

SIA261 Table 8

Catégorie	Genre de surface utile	Exemples	q_k en kN/m ²	Q_k en kN
A	Surfaces d'habitation	A1: Locaux dans les immeubles et les maisons d'habitation, services des hôpitaux, chambres d'hôtel, cuisines et toilettes	2	2 ¹⁾
		A2: Balcons	3	2 ¹⁾
		A3: Escaliers	4	2 ¹⁾
B	Bureaux		3	2 ¹⁾
C	Locaux de réunion	C1: Surfaces avec tables et chaises	3	4 ¹⁾
		C2: Surfaces avec sièges fixes	4	4 ¹⁾
		C3: Surfaces librement accessibles, surfaces de sport et de jeu, surfaces pouvant accueillir des rassemblements de personnes	5	4 ¹⁾
D	Surfaces de vente	Grands magasins, commerces	5	4 ¹⁾
E	Surfaces d'entrepôt et de fabrication	Entrepôts, bibliothèques et leurs accès, halles de fabrication	2) ³⁾	2) ³⁾
F	Surfaces de stationnement et surfaces accessibles aux véhicules de poids < 3,5 t	Parkings à étages, surfaces de parc, garages	2 ³⁾	20 ³⁾⁴⁾
G	Surfaces de stationnement et surfaces accessibles aux véhicules de 3,5 t à 16 t	Rampes d'accès, zones de livraison, zones accessibles aux véhicules du service du feu	5 ³⁾	90 ³⁾⁴⁾
H	Toitures non accessibles ⁵⁾	Toits uniquement accessibles pour des travaux d'entretien	0,4	1 ¹⁾

¹⁾ Surface d'application 50 mm x 50 mm ; Q_k ne doit pas être combiné avec q_k . Pour les surfaces d'entrepôts équipées d'étagères ou les surfaces accessibles aux engins de levage, on fixera la valeur Q_k en tenant compte des spécificités du projet.

²⁾ Voir le chiffre 8.2.2.

³⁾ On admettra que Q_k et q_k agissent simultanément.

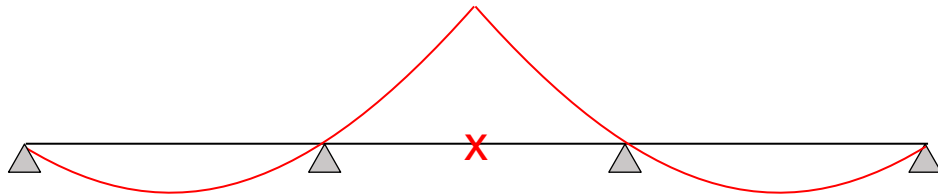
⁴⁾ Deux charges concentrées $Q_k/2$ distantes de 1,8 m sur des surfaces d'application de 200 mm x 200 mm.

⁵⁾ Selon leur utilisation, les toits accessibles aux personnes et aux véhicules seront considérés comme des surfaces des catégories A à G.

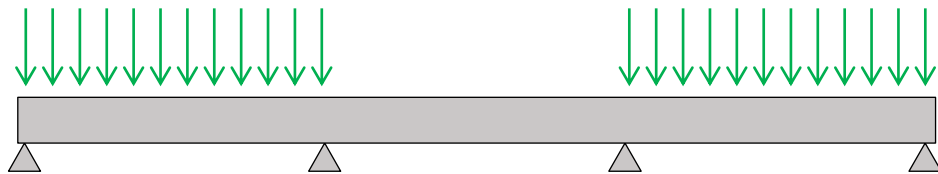
Live load (buildings)

- In general, live load should be applied where it is least favourable (patterning)

Influence diagram for negative moment in middle span



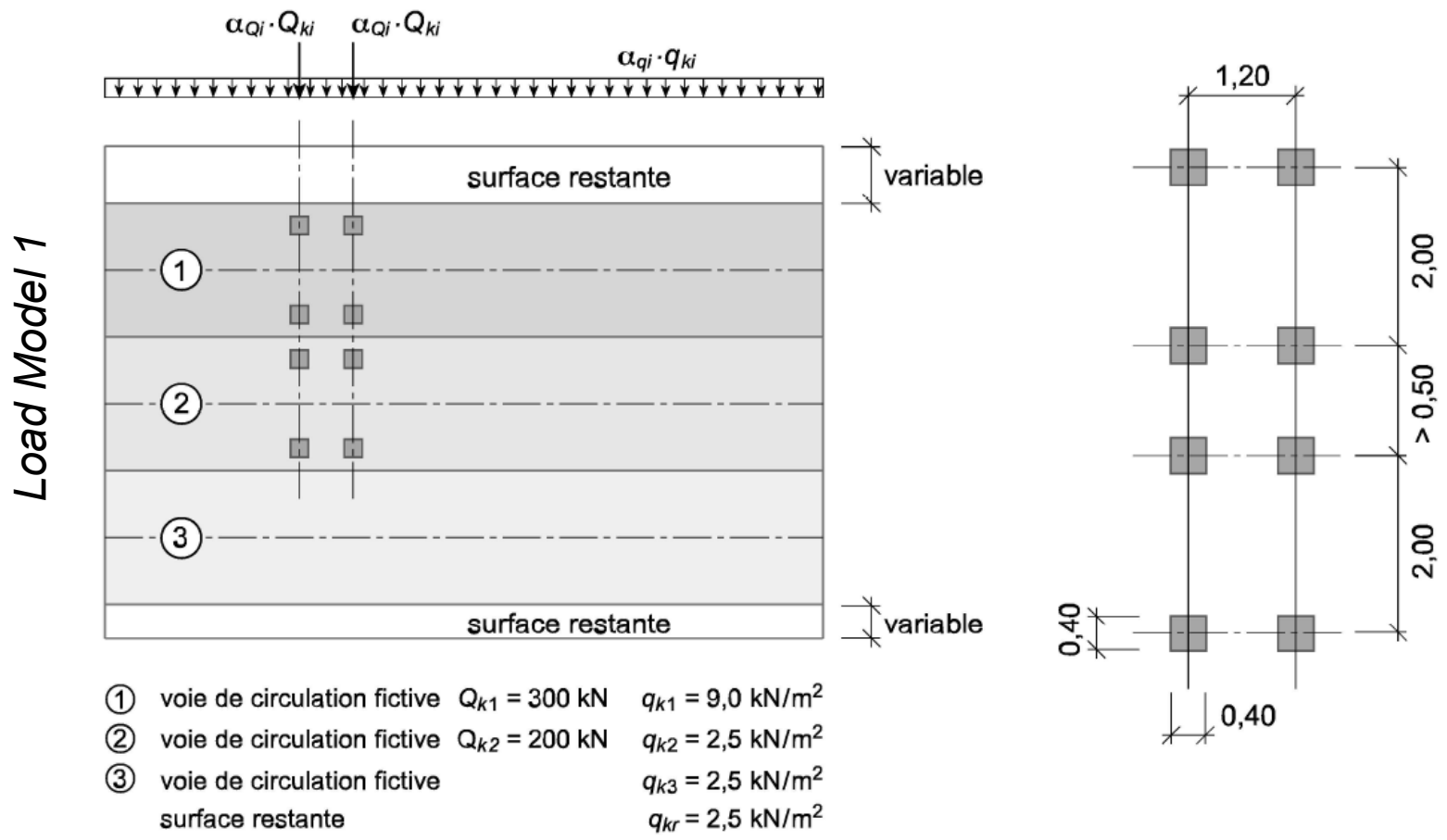
Load producing worst case negative moment



- For tall buildings, it is unlikely that all floors will be fully loaded; the load may be reduced according to the area loaded (live load reduction)
- Different codes take different approaches – SIA261 applies ψ_1 to all but 2 floors

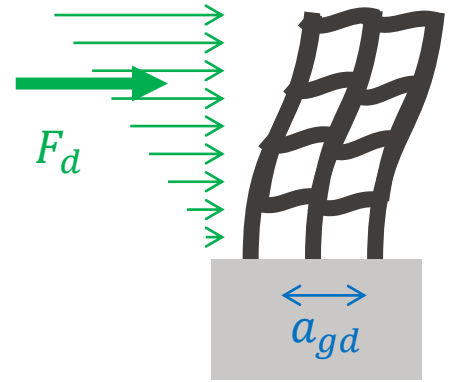
Traffic loads

- Represented by different idealized static load models (including dynamic effects)
- Braking, accelerating, and centrifugal forces also to be considered
- Similar for rail loads



Seismic load

- Earthquake is considered an accidental action
- Inertial forces from ground shaking are transformed into equivalent static loads

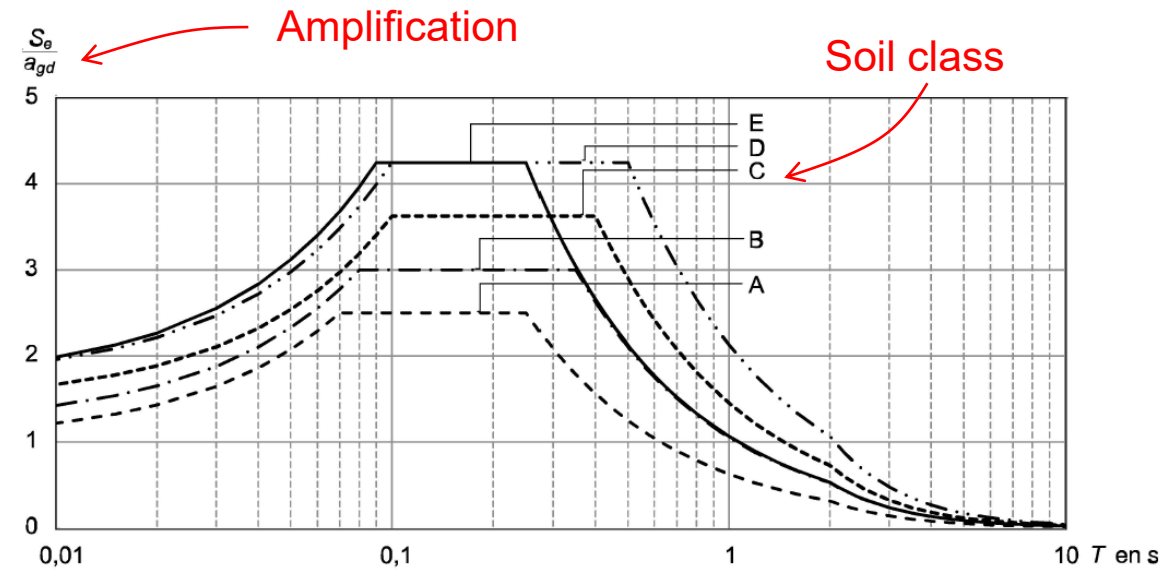
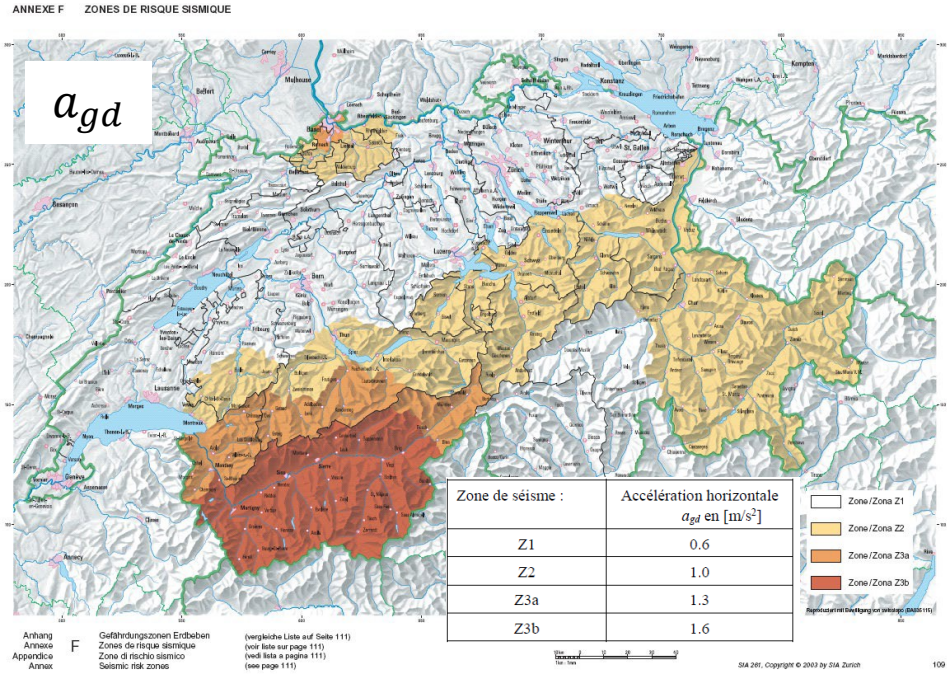


Importance factor γ_f Seismic weight W

$$F_d \cong \frac{\gamma_f \cdot S_e(T) \cdot W}{q}$$

Behaviour factor (ductility) q

* Not exactly correct for low and high period, see code!



Building fundamental period of vibration T

Impact, fire, explosion

- Preventative measures are usually more cost-effective than designing for very rare hazards
 - E.g., install physical bollards to prevent against vehicle impact
- Impact – Modelled as a static load applied at height of impact
- Fire – Safety ensured by time-based fire rating
- Explosion – Specific considerations where required



Wikimedia Commons

QUESTIONS?