

# Levetidsmodellering for bygningsdele

Udkast version **Fejl! Ukendt argument for parameter.**

Morten Hjorslev Hansen, Kim Haugbølle & Erik Brandt

Titel Levetidsmodellering for bygningsdele  
Undertitel undertitel  
Serietitel  
Udgave 1. udgave  
Udgivelsesår 2003  
Forfatter Morten Hjorslev Hansen, Kim Haugbølle & Erik Brandt  
Redaktion  
Sprog Dansk  
Sidetal  
Litteratur-  
henvisninger  
English  
summary  
Emneord  
  
ISBN  
ISSN  
  
Pris  
Tekstbehandling Morten Hjorslev Hansen  
Tegninger  
Fotos  
Omslag  
Tryk  
  
Udgiver By og Byg  
Statens Byggeforskningsinstitut,  
P.O. Box 119, DK-2970 Hørsholm  
E-post [by-og-byg@by-og-byg.dk](mailto:by-og-byg@by-og-byg.dk)  
[www.by-og-byg.dk](http://www.by-og-byg.dk)

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen: XXXXX: *Levetidsmodellering for bygningsdele. (2003)*



# Indhold

Indhold .....	4
Levetid .....	5
Deterministiske metoder .....	6
Levetidstabeller .....	6
Forsikring og Pension.....	6
BUR Planlægning af driftsvenligt byggeri.....	7
Årskostnadsanalyse .....	8
ABF-Håndbogen.....	8
Nedbrydningsmodeller .....	9
ISO faktormetoden .....	10
Neurale netværk .....	11
Probabilistiske metoder .....	12
Elementmetoden .....	12
Markovkæder .....	13
MEDIC.....	14
Betingede sandsynligheder.....	17
Bestemmelse af den sandsynlige restlevetid.....	17
Diskussion .....	19
Litteratur.....	20

# Levetid

Denne rapport beskriver modellering af levetid for bygningsdele. Dele af rapporten er baseret på (Brandt, 2003).

Levetid defineres som den tid et materiale eller en konstruktions essentielle egenskaber opfylder de ydeevnekrav, der er stillet. Ydeevnekravet til et tag kan fx være at det er tæt overfor nedbør.

# Deterministiske metoder

Deterministiske metoder giver et fast tal for levetiden, fx 55 år. Deterministiske metoder suppleres af de probabilistiske metoder, der beskrives i næste kapitel.

## Levetidstabeller

Brugen af levetidstabeller er nok den mest anvendte metode til forudsigelse af bygningsdeles levetid. I det efterfølgende beskrives en række ofte anvendte levetidstabeller

### Forsikring og Pension

I Danmark benyttes bl.a. Forsikring og Pensions levetidstabeller (Forsikring og Pension, 2001). Tabellerne angiver skønnede restlevetider i procent i forhold til nyt, se **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Optegnes de skønnede restlevetider som funktion af alderen fås et indtryk at de anvendte levetidskurver, se **Fejl! Ukendt argument for parameter..**

Tabel **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Skønnede restlevetider i procent for vinduer af træ. Efter (Forsikring og Pension, 2001)

Alder (antal år)	Almindelig vedligehold/ beskyttet miljø (pct.)	Almindelig vedligehold/ udsat miljø (pct.)	Mangelfuld vedligehold/ udsat miljø (pct.)
0	100	100	100
5	97	95	60
10	93	92	20
15	89	87	20
20	85	82	20
25	82	79	20
30	79	75	20
35	75	61	20
40	66	50	20
45	59	32	20
50	50	22	20
55	41	20	20
60	34	20	20
65	25	20	20
70	22	20	20
75	20	20	20
80	20	20	20
85	20	20	20
90	20	20	20
95	20	20	20
100	20	20	20

**Eksempler på mangelfuld vedligehold:**

Manglende overfladebehandling og efterimprægnering.

Manglende udskiftning af defekte fuger, topforseglinger og glaslister.

Manglende udskiftning af nedbrudt træ

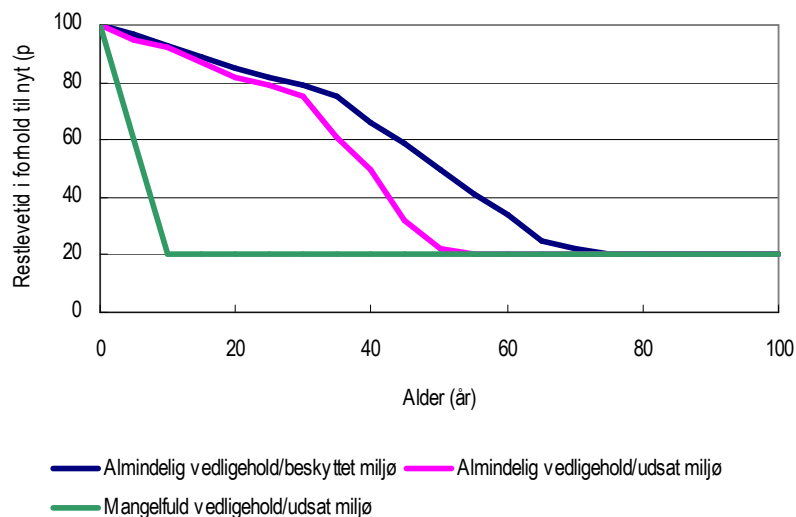
### Eksempler på udsat miljø:

Manglende vandafvisning med oversidefald og drypkanter.

Uhensigtsmæssig konstruktiv beskyttelse, store temperaturpåvirkninger.

Vindueskonstruktion og placering har betydning (eksempelvis vinduer placeret tæt ved forkant facade og vinduer orienteret mod syd og vest).

Mangel på tilførsel af udeluft til vinduesmellemrum ved koblede vinduer eller forsatsruder, således at karmtræ kan have vredet sig, og der er risiko for råd og svampedannelse pga. opfugtet træ.



Figur Fejl! Ukendt argument for parameter.. Vinduers restlevetid i forhold til nyt som funktion alder. Baseret på data fra (Forsikring og Pension, 2001).

### BUR Planlægning af driftsvenligt byggeri

En anden ofte citeret dansk levetidstabel findes i BUR rapporten om planlægning af driftsvenligt byggeri (Byggeriets udviklingsråd, 1985). Rapporten er baseret på et projektet støttet af BUR. Initiativtagerne til projektet var P&T's bygningstjeneste og Undervisningsministeriets Byggedirektorat. I **Fejl! Ukendt argument for parameter.** er der gengivet et uddrag af levetidstabellen i rapporten. I bemærkningerne til tabellen understreges det, at *...De anførte levetider kan anvendes ved totaløkonomiske sammenligninger mellem alternativer, men ikke ved beregning af de faktiske levetidsomkostninger.*

Tabel Fejl! Ukendt argument for parameter.. Levetid for vinduer m.m. (Efter Byggeriets Udviklingsråd, 1985)

Vinduer	SfB (31)
VINDUER AF TRÆ, imprægneret og malebehandlet Vedligehold i henhold til MBK	40 år
VINDUER AF PLAST Rengøring efter behov	40 år
VINDUER AF METAL Rengøring efter behov	40 år
MØRTELFUGE OMKRING VINDUER Levetiden kan forlænges væsentlig ved eftersyn med få års mellemrum og (om nødvendigt) efterfølgende opretning.	10 år
ELASTISK FUGE OMKRING VINDUER UDVENDIG	5 år

Levetiden kan forlænges væsentligt ved periodisk eftersyn og (om nødvendigt) efterfølgende vedligehold.

### Årskostnadsanalyse

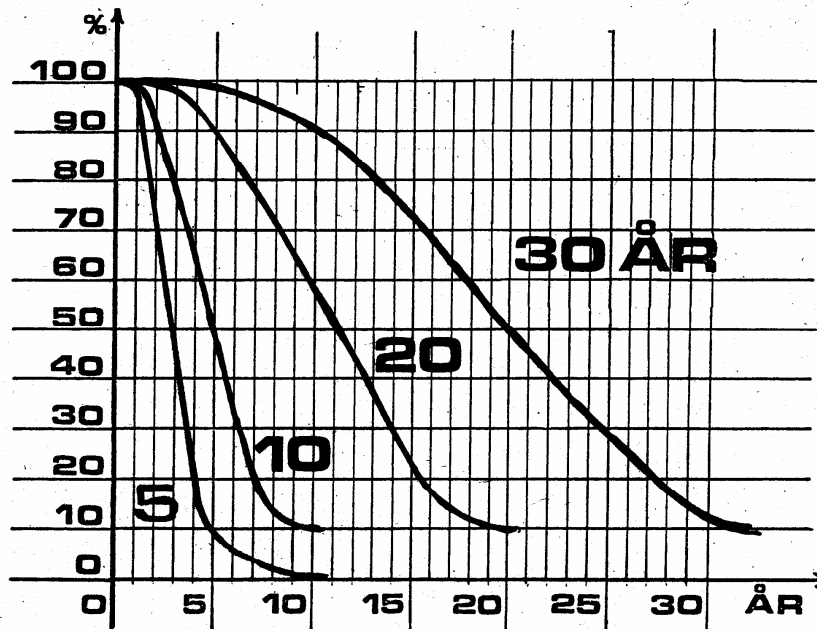
Den norske stats ejendomsselskabs Statsbygg har i samarbejde med Teknologisk institutt i Norge udviklet IT-værktøjet *Årskostnadsanalyse* til beregning af huslejen for de ejendomme, som Statsbygg udlejer til offentlige lejere. Værktøjet indeholder tabeller, der beskriver vedligeholdelsesinterval og levetid, se **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Værktøjet er oversat til dansk og udgivet af Byggeriets Udviklingsråd (Byggeriet Udviklingsråd, 2000).

Tabel **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Uddrag af tabel over vedligeholdelsesinterval og udskiftningsinterval/levetid fra værktøjet *Årskostnadsanalyse* (Byggeriets Udviklingsråd, 2000).

Kode	Bygningsdel	Vedligeholdelsesinterval			Udskiftning/levetid		
		Lav	Normal	Høj	lav	normal	høj
2	Bygning						
23	YDERVÆGGE						
	Vinduer og døre						
	af træ	4	6	8	30	40	50
	af plast				30	40	50
	af aluminium				30	40	50

### ABF-Håndbogen

ABF-håndbogen (ABFnyt, 1991) indeholder afskrivningsprofiler for bygningsdele, der anvendes i forbindelse med overdragelse af andele til fastsættelse af de afskrivninger, der foretages ved vurdering af værdien af individuelle forbedringer, se **Fejl! Ukendt argument for parameter..**



Figur **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Afskrivningsprofiler. Tallene på kurver angiver, over hvor mange år afskrivningen foretages. Fra (ABF-nyt, 1991).



Afskrivningskurverne anvendes sammen med en tabel, der angiver over hvor mange år afskrivningen skal foretages, se **Fejl! Ukendt argument for parameter..**

Tabel **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Afskrivningsår for bygningsdele. Efter(ABF-nyt, 1991).

VINDUER	Afskrivningsår
Opr. vinduer håndværksmæssigt oprettet	5 år
Opr. vinduer, rammer udskiftet til 1-lag glas	10 år
Vinduer udskiftet til termo	30 år
Tætningslister	5 år

## Nedbrydningsmodeller

Der findes en lang række teorier og matematiske modeller der beskriver, hvorledes materialer og konstruktioner nedbrydes under givne påvirkninger. Disse modeller er vid udstrækning af empirisk natur og beskriver i almindelighed kun et enkelt nedbrydningsmekanisme ad gangen. I eksemplet herunder beskrives en model for armeringskorrosion i beton forårsaget af indtrængende chlorid.

### Eksempel

Et eksempel på en matematisk nedbrydningsmodel er en hyppigt anvendt model for chloridindtrængning i beton. Et stykke armeringsjern der anbringes i fri luft korroderer på grund af fugtigheden i luften og adgangen til ilt. Anbringes det samme armeringsjern i en armeret betonkonstruktion, fx en altangang, vil betonen beskytte armeringen mod korrosion på grund af den høje pH-værdi i betonen, der passiverer armeringsjernenes overflade.

Tilføres beton chlorid fx fra tørsaltning vil det passive lag på armeringsjernenes overflade nedbrydes lokalt og der opstår grubetæringer, der lokalt kan reducere armeringsjernenes tværsnit kritisk.

En simpel model for levetiden for armerede betonkonstruktioners levetid i chloridholdigt miljø er baseret på en matematisk model for chloridens indtrængning fra betonoverfladen gennem dæklaget til armeringsjernene. Modellen, der kaldes Ficks anden lov, er en såkaldt partial differentialligning, der skrives som

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

hvor  $C$  er chloridkoncentrationen i betonen (kg chlorid/kg beton),  $t$  er tiden (s),  $D$  er betonens chloriddiffusionskoefficient ( $m^2/s$ ), og  $x$  er dybden under betonoverfladen (m).

Hvis det forudsættes, at

- chloridkoncentrationen i betonoverfladen (skillefladen mellem beton og luft)  $C_o$  er konstant (uafhængig af tiden) og kend
- chloridkoncentrationen inde i betonen  $C_i$  er konstant (den samme overalt) indtil det øjeblik, hvor betonen udsættes for klorid i overfladen
- chloriddiffusionskoefficienten  $D$  er en konstant, dvs. uafhængig af chloridkoncentration og temperatur
- betonen er vandmættet
- korrosionen begynder ved en given fast, kendt chloridkoncentration  $C_{krit}$
- levetiden er udtømt når korrosionen begynder

da kan ligningen løses og levetiden  $t$  beregnes som:

$$t = D \left( \frac{x}{2 \operatorname{erf}^{-1} \frac{C_{krit} - C_o}{C_i - C_o}} \right)^2$$

hvor  $erf^{-1}$  er den inverse fejlfunktion.

Denne levetidsmodel er meget anvendt ved bedømmelse af restlevetid for betonkonstruktioner, og er fx anvendt i forbindelse med fastlæggelse af betonrecepten til Storebæltsforbindelsen.

Virkeligheden er meget mere kompleks end ovenstående model. For en betonkonstruktion over havets overflade vil chloridkoncentrationen i betonens overflade vil variere over året. Betonen vandindhold, der er en forudsætning for at chloriden kan diffundere gennem dens porer vil også variere over året.

Hvad værre er, så vil flere nedbrydningsmekanismer kunne virke samtidigt. Fx vil luftens  $CO_2$  (kuldioxid) diffundere ind i betonen og reagere med  $Ca(OH)_2$  (calciumhydroxid) opløst i porevæsken. Det er  $OH^-$  i porevæsken, der giver den høje pH-værdi der passiverer armeringsjernenes overflade og derigennem beskytter mod korrosion. Når  $OH^-$  reagerer med  $CO_2$  dannes  $CaCO_3$  (calciumkarbonat) og  $OH^-$ -koncentrationen, og dermed også pH, falder. Denne proces kaldes betonkarbonatisering. Andre processer der kan nedbryde beton er fx frostnedbrydning og alkali-kiselreaktioner.

## ISO faktormetoden

ISO faktormetoden er baseret på anvendelse af en referencelevetid og en række faktorer, som benyttes til at modificere den, (International Organization for Standardization, 2000; 2001; 2002)

Man kan betragte faktormetoden som en måde at koble indflydelsen af hver af de indgående faktorer. Den kan derfor også bruges, hvis der er (mindre) afvigelser mellem de forudsete brugsområder og det aktuelle brugsområde. Den levetid der fremkommer som resultat af brugen, er ikke en endegyldig sandhed, men et empirisk estimat baseret på de tilgængelige oplysninger. Med det nuværende videnniveau er det måske mere korrekt at sige, at metoden giver mulighed for en mere objektiv sammenligning og analyse, end at den giver et retvisende billede af levetiden. Under alle omstændigheder vil et bedre og mere sikkert grundlag resultere i et mere korrekt resultat. Antallet af faktorer kan diskuteres, idet der med flere faktorer må forventes en bedre nøjagtighed, men samtidig vil brugen kompliceres. En mere tilbunds gående diskussion af faktormetoden er givet i (Hovde, 1998) og Hovde (2000).

Faktormetoden kan anvendes både til materialer, komponenter og sammensatte bygningsdele. Man skal være opmærksom på, at ved sammensatte bygningsdele vil der indgå samlinger/fuger, og der kan optræde forskellige brugspåvirkninger på de forskellige dele.

I ISO regi benyttes i **Fejl! Ukendt argument for parameter.** angivne modifikationsfaktorer.

Tabel **Fejl! Ukendt argument for parameter.** Modifikationsfaktorer anvendt i ISO 15686.

Faktorer knyttet til den iboende kvalitet	A	Kvalitet af materiale/komponent	Fremstilling, opbevaring, transport, materiale, overfladebehandling
	B	Design	Indbygning, konstruktiv beskyttelse
	C	Kvalitet af arbejdsudførelse	Kvalitet af arbejde på byggeplads, klimatiske forhold under udførelsen
Faktorer knyttet til eksponering til omgivelserne	D	Indendørs forhold	Aggressivitet af omgivelser, ventilation, kondensation
	E	Udendørs forhold	Højde af bygning, mikroklima, vejrforhold, forurening (trafik mv.)
Faktorer knyttet til påvirkninger som følge af den aktuelle brug	F	Brugspåvirkninger	Mekaniske påvirkninger, kategori af brugere, slid
	G	Vedligeholdsniveau	Kvalitet og frekvens af vedligehold, tilgængelighed

Alle de nævnte faktorer kan påvirke levetiden af et materiale eller en komponent. Levetiden kan derfor udtrykkes som:

$$L_{\text{est}} = L_{\text{ref}} \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \cdot G \quad (1)$$

Hvor  $L_{\text{est}}$  er den estimerede levetid og  $L_{\text{ref}}$  er referencelevetiden (i ISO 15686 benyttes henholdsvis betegnelserne ESLC og RSLC).

Faktorerne kan fastsættes på forskellig vis. Hvis der fx er erfaring for at samme type produkt anvendt et sted med hård belastning giver en reduktion i levetiden på 30% bør denne viden afspejle sig i valget af faktor F, som derfor kan vælges til 0,7. Tilsvarende vil det være naturligt at benytte den viden/erfaring der findes ved fastsættelse af de øvrige faktorer. En simpel måde er at sætte faktoren til 1 for "neutrale" forhold, 0,8 for faktorer der forventes at forkorte levetiden og 1,2 for faktorer der forventes at forlænge levetiden.

Herunder gengives et lettere modificeret eksempel fra udkastet til ISO 15686-1.

Eksempel: Trævindue

Eksemplet omhandler et trævindue. De væsentlige faktorer af betydning for nedbrydning antages at være vinduets kvalitet, vedligehold (malebehandling), indbygningen.

Reference levetiden anslås til 40 år.

- A. Vacuumimpregneret vindue med god geometri, fabriksfremstillet under DVK ordningen. Faktor 1,2
- B. Anbragt i facadeplan uden konstruktiv beskyttelse. Faktor 0,8
- C. Arbejdsudførelse som almindelig standard. Faktor 1,0
- D. Ingen særlige påvirkninger indefra. Faktor 1,0
- E. Udendørs påvirkning svarende til beskyttet beliggenhed. Faktor 1,2
- F. Brugspåvirkninger svarende til almindelig boligbrug. Faktor 1,0
- G. Vedligehold forudses udført efter behov (tilstandsvurdering). Faktor 1,2

$$L_{\text{est}} = 40 \text{ år} \cdot 1,2 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,2 = 55,3 \text{ år}$$

Under hensyntagen til den store usikkerhed der er forbundet med at estimere levetiden er det ikke rimeligt at angive levetiden nøjagtigt, så det foreslås, at der i det mindste rundes af til nærmeste hele tal. I stedet kunne ovenstående vurdering suppleres med en "statistisk" vurdering af resultatet. I (Aarseth og Hovde, 1999) er der foreslået en simpel metode til at fastlægge estimatet som et interval i stedet for som en enkelt værdi.

## Neurale netværk

Neurale netværker har været forsøgt anvendt til bl.a. forudsigelse af betonkonstruktioners egenskabsudvikling over tid (Hansen, Enevoldsen & Munch-Petersen, 1993). I dette pilotprojekt blev et neuralt netværk trænet til at forudsige revneskadeomfanget i betonkonstruktionsdele i motorvejsbroer. Overensstemmelsen mellem revneskadeomfanget forudsagt af det neurale netværk og det observerede revneskadeomfang var ikke god.

Betons modstandsevne overfor frostnedbrydning er blevet forsøgt modeleret vha. et neuralt netværk (Hasholdt, 2002). Erfaringerne fra projektet viste, at det neurale netværk havde problemer at forudsige ekstreme værdier. Overensstemmelsen mellem frostbestandigheden forudsagt af det neurale netværk og det i laboratoriet målte frostbestandighed var ikke god.

# Probabilistiske metoder

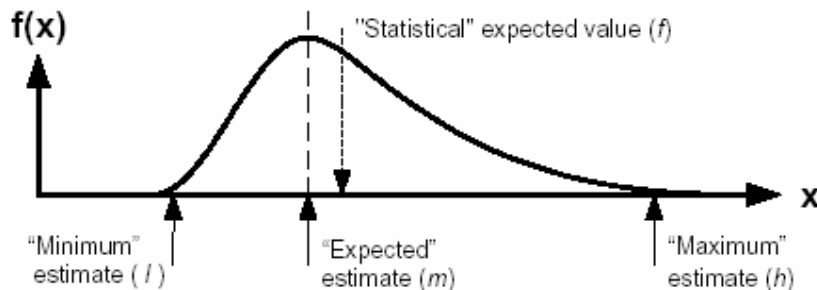
Probabilistiske giver i stedet for en fast værdi for levetiden af en bygningsdel (fx 55 år) en værdi, der ikke kan fastlægges eksakt men kan karakteriseres vha. af statistiske begreber som middelværdi, spredning og sandsynlighed.

## Elementmetoden

Beregningsmetoden successiv kalkulation er på elegant vis foreslået benyttet til beregning af levetid af bygningsdele (Aarseth og Hovde, 1999). Successiv kalkulation (Lichtenberg, 1990, 2000) er en beregningsmetode der ved projektpåtegning anvendes til estimering af projektkostninger (fx kan metoden benyttes ved afgivelse af tilbud i forbindelse med licitationer).

Metoden adskiller sig fra ISO faktormetoden ved at levetiden nedbrydes i elementer. Betegnelsen elementer benyttes da de skal adderes og ikke multipliceres således som faktorerne skal. Der benyttes en elementopdeling svarende til opdelingen i faktorer i ISO faktormetoden, se **Fejl! Ukendt argument for parameter..**

En vigtig bestanddel af elementmetoden består i et tredobbelt skøn over de indgående elementers størrelse, i form af en mindste værdi af elementet, en største værdi af elementet og den mest sandsynlige værdi af elementer, se **Fejl! Ukendt argument for parameter..**



Figur **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Antaget fordelingsfunktion i elementmetoden og placering af tredobbelt skøn. Fra (Aarseth og Hovde, 1999).

Ud fra det tredobbelte skøn kan middelværdien kan beregnes som

$$f = \frac{l + 2,95m + h}{4,95}$$

og spredningen kan beregnes som

$$s = \frac{h-l}{4,6}$$

hvor

$l$  = den mindste værdi af elementet

$h$  = den største værdi af elementet

$m$  = den mest sandsynlige værdi af elementet

Metoden har følgende fremgangsmåde

- 1 Fastlæg bygningsdelens referencelevetid, RSLC (år).
- 2 For hvert af de indgående elementer foretages et tredobbelt skøn ( $l$ ,  $h$  og  $m$ ) på hvor mange år elementet ændrer (forkorter og/eller forlænger) referencelevetiden. Der skønnes i følgende rækkefølge.

- 2.1. Skøn den mindste værdi,  $l$ , af elementet.
- 2.2. Skøn den største værdi,  $h$ , af elementet.
- 2.3. Skøn den mest sandsynlige værdi,  $m$ , af elementet.
3. Beregn  $f$  og  $s$  for hvert element
4. Summér  $f$
5. Beregn levetiden ESLC som  $ESCL = RSLC + \text{sum } f$
6. Beregn spredningen på levetiden som  $\sqrt{\sum s^2}$

Tabel **Fejl! Ukendt argument for parameter.** viser et eksempel på en beregning af levetiden for et vindue med elementmetoden.

Tabel **Fejl! Ukendt argument for parameter.** Beregning af levetiden af et vindue af nåletræ med elementmetoden. Fra (Aarseth & Hovde, 1999).

Elements	Estimates			Statistical calculation	f	s	Part of s
	l	m	h				
A Material and components	0	5	10	$f =$	5.00	2.17	14 %
B Design	0	5	10	$(l+2.95 \times m+h)$	5.00	2.17	14 %
C Sitework/execution	0	5	10	$/4.95$	5.00	2.17	14 %
D <sub>1</sub> Indoor environment	-5	0	5	$s =$	0.00	2.17	14 %
D <sub>2</sub> Outdoor environment	0	5	10	$(h-l)/4.6$	5.00	2.17	14 %
E Operating characteristics	-5	0	5		0.00	2.17	14 %
F Maintenance level	0	5	10		5.00	2.17	14 %
G General conditions	0.0	0.0	0		0.00	0.00	0 %
	Sum l, m, h =	-10	25	60	Sum f =	25.0	100 %
	RSLC + sum l, m, h =	15	50	85	Sqrt-sum =	5.8	
	ESLC, "statistical values" =	44	50	56	RSLC + sum f =	50.00	ESLC = 50 years
	RSLC =	25 years			Result	+/- 6 years	

## Markovkæder

Den efterfølgende beskrivelse af Markovkæder stammer fra (Abraham & Wirahadikusumah, 1999).

Stokastiske processer er processer der udvikler sig over tid på en måde der beskrives vha. af sandsynlighedsbegrebet. I en nedbrydningsmodel, kan de stokastiske processer  $X_1, X_2, X_3, \dots$  repræsentere samlingen af tilstandskarakterer af en bygningsdel fremkommet ved tilstandsvurdering ved jævne mellemrum, fx 5 år. Til ethvert tidspunkt  $t$  kan bygningsdelens tilstand beskrives ved én og kun en af et endeligt antal indbyrdes forskellige og udtømmende kategorier eller tilstande. Der kan, som i det efterfølgende, fx benyttes 5 tilstande svarende til tilstandsvurderinger med karakteren 1-5, hvor karakteren 1 er den optimale tilstand af bygningsdelen og 5 svarer til en kritisk tilstand.

En stokastisk proces kaldes en Markovkæde, hvis den besidder Markovegenskaben, dvs. den betingede sandsynlighed af enhver fremtidig hændelse, givet enhver tidligere hændelse og den aktuelle tilstand  $X_t = i$ , er uafhængig af den tidligere hændelse og kun afhænger af den nuværende tilstand.

Markovegenskaben kan matematisk udtrykkes som

$$P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t, X_{t-1} = i_{t-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0) = P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t) \quad (2)$$

For at reducere kompleksiteten af analysen antages den fremtidige tilstand af bygningsdelen kun at afhænge af den nuværende tilstand og at være uafhængig af den hidtidige tilstand. Det antages endvidere at for alle tilstande  $i$  og  $j$  og alle  $t$  er  $P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t)$  uafhængig af  $t$ . Sandsynligheden  $p_{ij}$ , for at bygningsdelens tilstand er  $i$  tilstand  $i$  til tiden  $t$  og at den til være  $i$  til

standen  $j$  til tiden  $t+1$  ændrer sig ikke over tid (dvs. forbliver stationær, med mindre genopretning foretages eller andre eksterne faktorer ændrer sig. Denne stationære antagelse udtrykkes matematisk ved ligning (3)

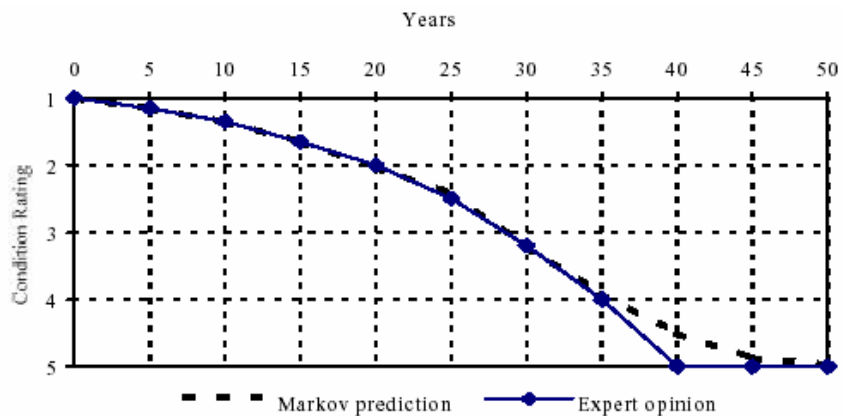
$$P(X_{t+1} = j | X_t = i) = p_{ij} \quad (3)$$

Begrebet overgang benyttes, når systemet flytter sig fra tilstand  $i$  i én periode til tilstand  $j$  gennem den næste periode. Tilsvarende betegnes sandsynlighederne  $p_{ij}$ , for overgangssandsynlighederne. Overgangssandsynlighederne vises sædvanligvis som en  $m \times n$  matrix kaldet overgangssandsynlighedsmatricen  $P$ . For at forenkle beregningerne antages det af bygningsdelen nedbrydes med en tilstand  $i$  en overgangsperiode. Derfor er overgangssandsynlighedsmatricen givet ved

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & p_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & p_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Den førnævnte overgangssandsynlighedsmatrix er for ét-trinsovergang (en periode) overgang.  $n$ -trinsovergangssandsynlighedsmatricen  $P^{(n)}$  for en proces der er i tilstand  $i$  og kommer i tilstand  $j$  efter  $n$  perioder (i modsætning til i næste periode) beregnes ved anvendelse af Chapman-Kolmogorovligningen:  $P^{(n)} = P^n$ .  $n$ -trinsovergangssandsynlighedsmatricen findes ved at tage den  $n$ 'te rod af éttrinsovergangsmatricen.

Markovmetoder har bl.a. været anvendt til beskrivelse af udviklingen af tilstandskarakter for afløbsrør i plast, se **Fejl! Ukendt argument for parameter..**



Figur **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Tilstandskarakterens udvikling med tiden for afløbsrør i plast i friktionsjord, højt grundvandsspejl og tykt dæklag. Fra (Abraham & Wirahadikusumah, 1999).

## MEDIC

I EU-projektet EPIQR (Energy Performance and Indoor Environmental Quality Retrofit) benyttes levetidsmodellen MEDIC (Flourentzou, Brandt, & Wetzel, 1999). EPIQR er en metode der er udviklet til at hjælpe arkitekter, ingeniører og andre der arbejder med renovering og genopretning af boligbyggeri.

MEDIC metoden stammer fra Frankrig (MER-metoden) og er ifølge (Flourentzou, Brandt, & Wetzel, 1999) videreudviklet i Schweiz under navnet ME-BI (Genre, 1995; Mayer *et al.*, 1995).

I MEDIC-metoden skelnes mellem tre nedbrydningskurver for bygningsdele:

$L_{max}$  under gunstige forhold (god elementkvalitet, beskyttede beliggenhed, godt vedligehold, etc.)

$L_{\emptyset}$  under normale forhold

$L_{min}$  for ugunstige forhold (lav elementkvalitet, udsat beliggenhed, dårligt vedligehold, etc.)

Fire tilstandsklasser benævnt henholdsvis a, b, c og d benyttes ved tilstandsvurdering til beskrivelse af elementets tilstand:

a: god tilstand

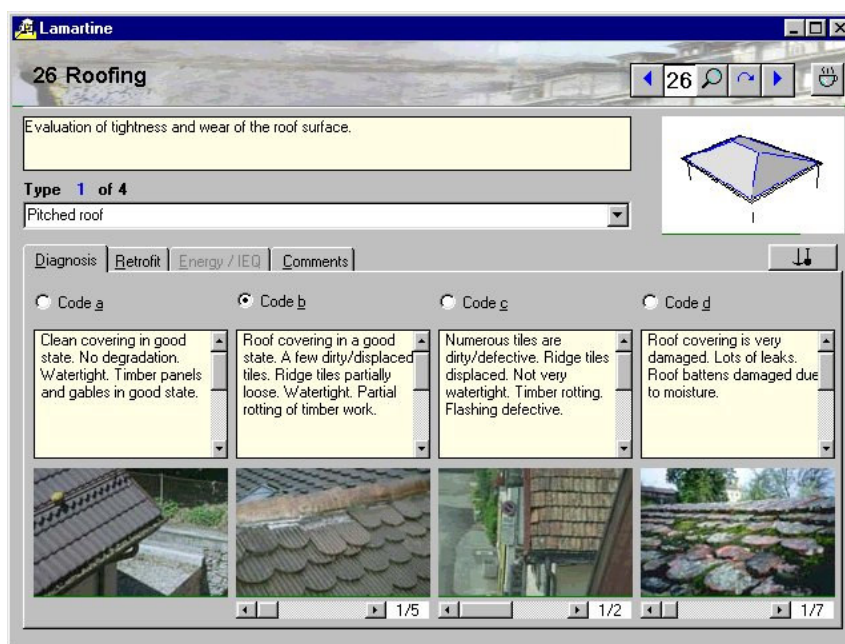
b: mindre nedbrydning

c: mere alvorlig nedbrydning

d: udskiftning nødvendig.

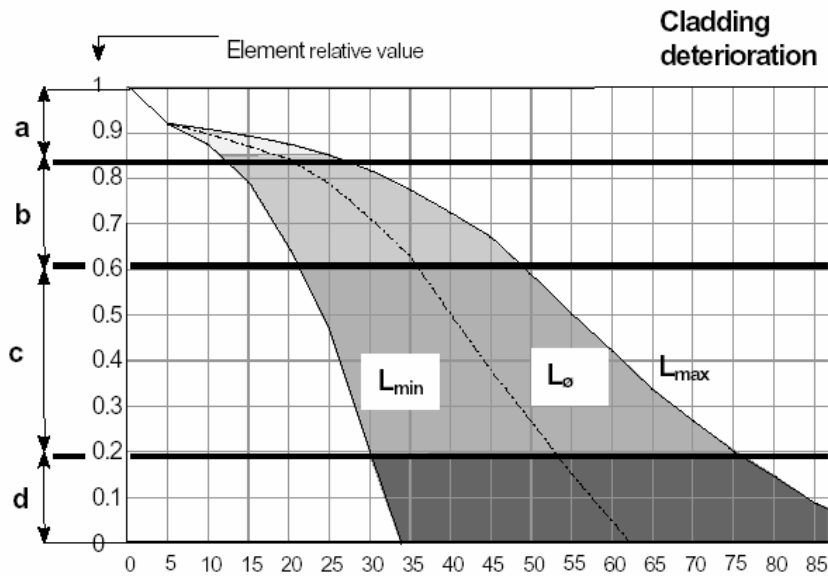
I EPIQR er der udviklet et edb-hjælpeværktøj der benyttes ved udførelse af tilstandsvurderinger, hvor tilstandsklassen for bygningsdelene i en bygning fastlægges. Værktøjet indeholder skærbilleder, der kan benyttes til beslutningsstøtte ved tilstandsvurderingen, se **Fejl!**

**Ukendt argument for parameter..** Skærbillederne viser typiske eksempler på tilstandsklasserne a-d for den aktuelle bygningsdel. Billedeksemplerne er ledsaget af beskrivende hjælpetekster, der letter fastlæggelsen af tilstandsklassen. Endelig giver skærbilledet mulighed for at inddatere den aktuelle tilstandsklasse, der gemmes i computeren og benyttes ved rapporteringen og vurdering af restlevetiden.



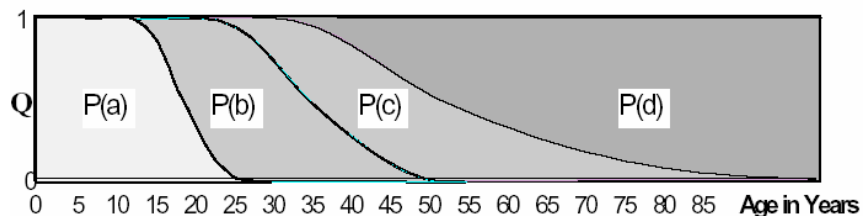
Figur **Fejl!** **Ukendt argument for parameter..** Skærbillede fra EPIQR. Skærbilledet viser billeder af typiske eksempler på tilstandsklasserne a-d, i det aktuelle tilfælde for et skråtag. Billedeksemplerne er ledsaget af beskrivende hjælpetekster. Endelig giver skærbilledet mulighed for at inddatere den aktuelle tilstandsklasse.

Figur **Fejl!** **Ukendt argument for parameter.** viser den i MEDIC anvendte sammenhæng mellem tilstandsklasser og nedbrydningskurver for facadebeklædninger.



Figur **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Nedbrydningskurver anvendt i MEDIC-metoden for facadebeklædninger. Fra (Flourentzou, Brandt, & Wetzel,1999).

Videnbasen i metoden er implementeret i form af 4 sandsynlighedskurver for hver bygningsdelstype, som metoden kan behandle, se **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Kurverne viser til et givent tidspunkt i en bygningsdels liv sandsynligheden for at tilstandskarakteren er henholdsvis a, b, c eller d.



Figur **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Kumulerede sandsynligheder for tilstandskarakterer for facadebeklædninger.

Eksempler

Ifølge **Fejl! Ukendt argument for parameter..** vil en 10 år gammel facadebeklædning altid have tilstandskarakteren a, medens en 17 år gammel facadebeklædning har 50 % sandsynlighed for at have tilstandskarakteren a og 50 % sandsynlighed for at have tilstandskarakteren b. En 40 år gammel facadebeklædning har sandsynligheden 35 %, 40 % og 15 % for at have henholdsvis tilstandskarakteren b, c og d. En 95 år gammel facadebeklædning vil med 99 % sandsynlighed behøve udskiftning.

Rummet  $Q\{0, 1\}$  beskriver universet af alle bygningsdele i en given bygning. Ethvert specifikt element,  $q$ , befinder sig et eller andet sted imellem 0 eller 1 på y-aksen alt afhængigt af dets kvalitet. Når det forudsættes at nedbrydningen af en bygningsdel følger en kurve affin til  $L_{min}$ ,  $L_{max}$  eller  $L_0$  i **Fejl! Ukendt argument for parameter..**, og hvis tilstanden (placeringen på y-aksen) af bygningsdelen er kendt kan tidspunktet for overgang fra en tilstand til en anden aflæses Hvis  $q$  er en specifik bygningsdel,  $q \in Q$ , svarer værdien  $q = 0$  til en bygningsdel med en lang levetid, idet alle overgange fra én tilstand til en anden finder sted efter meget lang tid. Dette svarer til  $L_{max}$  i **Fejl! Ukendt argument for parameter..** En bygningsdel med værdien  $q = 1$  svarer i modsætning hertil til worst case. Det svarer til  $L_{min}$  i **Fejl! Ukendt argument for parameter..** Værdien  $q = 0,5$  svarer til  $L_0$ . Rummet  $Q = \{0, 1\}$  betegnes "kvalitetsrummet". I praksis er det umuligt at bestemme den præcise beliggenhed af en specifik bygningsdel i Q-rummet, men det er muligt at definere eller vurdere et område i hvilket det sandsynligvis befinder sig. En



bygningsdel med lav kvalitet vil fx høre til området  $q \in \{0,5, 1\}$  medens en bygningsdel med god kvalitet hører til området  $q \in \{0, 0,5\}$ .

### Betingede sandsynligheder

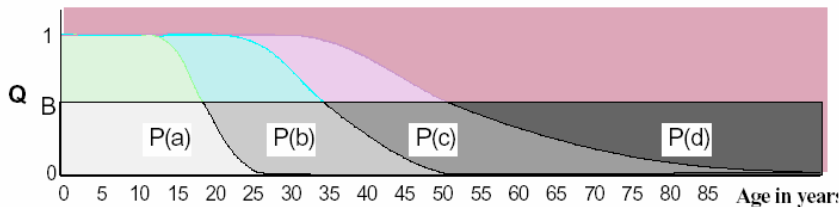
Hvis det vides, at  $q \in \{0, B\}$ , bliver den betingede sandsynlighed

$$P(\text{tilstand } i | q \in \{0, B\}) = P(\text{tilstand } i) / B \quad (5)$$

Hvis  $q \in \{B, 1\}$  bliver (5)

$$P(\text{tilstand } i | q \in \{B, 1\}) = \frac{P(\text{tilstand } i) - B}{1 - B} \quad (6)$$

$i \in \{a, b, c, d\}$ .



Figur Fejl! Ukendt argument for parameter.. Illustration af indflydelsen af kendskab til tilstandsklassen på kendskabet til overgangen til ny tilstandsklasse.

Af **Fejl! Ukendt argument for parameter.** ses det at det intervallet for den sandsynlige overgang fra tilstand a til tilstand b er fra det 12. til det 26. år, dvs. et interval på 14 år. Når det vides, at  $q \in \{0, B\}$  indsnævres det sandsynlige overgangstidspunkt til intervallet 18-26 år, dvs. et interval på 8 år. Det nye sandsynlige interval for overgang fra tilstand b til c er fra det 34. til det 50. år, og det nye sandsynlige interval for overgang fra c til d er fra det 50. til det 95. år. Det ses, at kendskab til  $q \in \{0, B\}$  formindsker spredningen på den sandsynlige restlevetid betragteligt.

### Bestemmelse af den sandsynlige restlevetid

Det forudsættes i det efterfølgende, at bygningsdelenes tilstandsklasse er kendt fra en tilstandsvurdering. Endvidere forudsættes det, at bygningsdelenes alder er kendte fra det generelle kendskab til bygningen, hvori de indgår. Ved at kombinere viden om tilstandsklassen og alderen er det muligt at fastlægge det underrum  $q$ , som bygningsdelene tilhører, se **Fejl! Ukendt argument for parameter.** For at gøre dette er tegnet en linie (pilen mærket 1) fra bygningsdelens alder til skæringen med kurven mellem arealet for elementets tilstandsklasse og naboarealet/naboarealerne. Derefter tegnes en linie (pilen mærket 2) fra skæringspunktet til y-aksen for at bestemme punktet  $B$ . For eksempel som vist i figuren for tilstandsklasse c skærer linien kurven mellem arealerne for tilstandsklasserne b og c. Kvalitetsunderrummet (quality subspace) bliver  $q = \{B, 1\}$ , se **Fejl! Ukendt argument for parameter.**, idet tilstandsklassen er ændret fra b to c. (I tilfælde af at der er to skæringspunkter tegnes to lodrette linier og underrummet bestemmes som "afstanden" mellem den mindste og den højeste værdi af  $y$ ). Eftersom der er valgt en probabilistisk tilgang, er den sandsynlige restlevetid ikke et enkelt tal men et interval. For at finde den sandsynlige restlevetid bestemmes punktet hvor sandsynligheden for at have tilstandsklassen d er 50 %, dvs. hvor  $y = (1+B)/2$  skærer den næste overgangskurve (kurven der adskiller  $P(c)$  og  $P(d)$ ). En linie (pilen mærket 3) tegnes lodret fra dette punkt til skæring med x-aksen. Forskellen mellem dette punkt og alderen af bygningsdelen giver den sandsynlige restlevetid  $L_{\text{mean}}$ . På kurven bestemmes den øvre og den nedre grænse for det sandsynlige interval for  $L$  som henholdsvis skæringen med kurven med  $y = B$  og  $Y = 1$ .



# Diskussion

I **Fejl! Ukendt argument for parameter.** er fordele og ulemper ved de præsenterede metoder sammenlignet.

Tabel **Fejl! Ukendt argument for parameter.** Sammenligning af fordele og ulemper ved de præsenterede levetidsmodeller.

Metode	Fordele	Ulemper
<b>Deterministiske metoder</b>		
Levetidstabeller	Enklest at anvende	Bagved liggende model usynlig Kombination af nedbrydningsfaktorer vanskelig/umulig Empirisk
Nedbrydningsmodeller	Giver en fysisk begrundet model	Sædvanligvis modelleres nedbrydningsfaktorerne enkeltvis (koblingen melle faktorer beskrives sjældent) Kompleks model
ISO faktormetoden	Enkel model Omfatter principielt alle væsentlige faktorer	Empirisk Modellen fastlåst
Neurale netværk	Kan udpege væsentlige faktorer Kan modellere meget komplekse problemer	Empirisk Kræver stort datagrundlag Eksempler på manglede succes
<b>Probabilistiske metoder</b>		
Elementmetoden	Enkel model Stor gennemsigtighed Nemt af identificere betydende faktorer Håndterer usikkerhed	Den fysiske betydning af de enkelte faktorer delvis uklar Modellen fastlåst Anvendes endnu ikke i praksis Empirisk
Markovkæder	Håndterer usikkerhed	Kræver stort datagrundlag fra tilstandsvurderinger Empirisk Kompleks model
MEDIC	Anvendes allerede i praksis Håndterer usikkerhed	Kræver stort datagrundlag tilstandsvurderinger Empirisk Kompleks model

## Litteratur

- Aarseth, L. I., & Hovde, P. J. (1999). A stochastic approach to the factor method for estimating service life. I Lacasse, M. A., & Vanier, D. J. (Eds.), Procs. 8<sup>th</sup> Int. Conf. Durability of Building Materials and Components, Vancouver May 30 - June 3, 1999. Vol. 2, pp. 1247-1256. Ottawa: NRC Research Press.
- ABFnyt (1991). ABF-Håndbogen. København.
- Abraham, D. M. & Wirahadikusumah, R. (1999). Development of prediction models for sewer deterioration. I Lacasse, M. A., & Vanier, D. J. (Eds.), Procs. 8<sup>th</sup> Int. Conf. Durability of Building Materials and Components, Vancouver May 30 - June 3, 1999. Vol. 2, pp. 1257-1267. Ottawa: NRC Research Press.
- Brandt, E. (2003). Levetid af materialer og komponenter. By og Byg Resultater. Under udgivelse.
- Byggeriets udviklingsråd (1985). Planlægning af driftsvenligt byggeri – en anvisning. København.
- Byggeriets udviklingsråd. (2000). Årsomkostningsanalyse – Beskrivelse og brugervejledning for beregningsmodellen. Hørsholm: Byggecentrum.
- Ditlevsen, O. & Madsen, H. O. (1990). Bærende konstruktioners sikkerhed (SBI-rapport 211). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Flourentzou, F., Brandt, E., & Wetzel, C. (1999). MEDIC – a method for predicting residual service life and refurbishment investments budgets. I Lacasse, M. A., & Vanier, D. J. (Eds.), Procs. 8<sup>th</sup> Int. Conf. Durability of Building Materials and Components, Vancouver May 30 - June 3, 1999. Vol. 2, pp. 1280-1288. Ottawa: NRC Research Press.
- Forsikring og Pension. (2001). Levetidstabeller – Bygningsforsikring for 1- og 2-familiehuse samt fritidshuse. København: Forsikring og Pension. Oktober 2001.
- Genre J.-L. (1995). MEBI - Méthode d'Evaluation de Budgets d'Investissements. Lausanne: LESO-PB, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Hansen, M. H., Enevoldsen, K., & Munch-Petersen, C. (1993). Pilotprojekt til belysning af mulighederne for anvendelse af et neuralt netværk til beskrivelse af betonkonstruktioners egenskabsudvikling. Hørsholm: DTI•Byggeteknisk Institut, Dansk Betoninstitut a/s og Vejdirektoratet. 29 pp.
- Hasholt, M. T. (2002). Modelling concrete frost resistance by using an artificial neural network. Tåstrup: Dansk Teknologisk Institut.
- Hovde P.J. (1998), Evaluation of the factor method to estimate the service life of building components, Proc. CIB World Building Congress, Gävle 1998.
- Hovde P.J. (2000). Factor methods for service life prediction. A state-of-the-art, Draft report NTNU, Trondheim.

International Organization for Standardization. (2000). ISO 15686-1:2000. Building and constructed assets – Service life planning. Part 1: General Principles. Geneve.

International Organization for Standardization. (2001). ISO 15686-2:2001. Building and constructed assets – Service life planning. Part 2: Service life prediction procedures. Geneve.

International Organization for Standardization. (2001). ISO 15686-3:2002. Building and constructed assets – Service life planning. Part 3: Performance audits and reviews. Geneve.

Lichtenberg, S. (1990). Projektplanlægning i en foranderlig verden. 2. udg. Lyngby: Polyteknisk forlag.

Lichtenberg, S. (2000). Proactive management of uncertainty using the successive principle – a practical way to manage opportunities and risks. Lyngby: Polyteknisk forlag.

Mayer P. *et al.* (1995). Vieillissement des éléments de construction et coûts d'entretien. Program PI BAT. Zurich: Swiss Federal Office for Economic Policy.