



## NOTAT

**AAU BUILD**  
AALBORG UNIVERSITET

INSTITUT FOR  
BYGGERI BY OG MILJØ  
THOMAS MANN'S VEJ 23  
9220 AALBORG Ø  
BUILD.DK  
CVR 29 10 23 84

jd@build.aau.dk  
jsn@build.aau.dk

DATO xx. juni 2024  
JOURNAL NR: xxx-xxx  
514-0050x

## Principper for fastlæggelse af sikkerhedsniveau

### Sammenfatning

Dette notat giver en overordnet introduktion til hvorledes sikkerhedsniveauer for konstruktioner defineres og fungerer. Notatet beskriver den overordnede proces for fastlæggelse af sikkerhedsniveauet i de reviderede danske nationale annekser. Notatet beskriver endvidere baggrund, forudsætninger og principper for det nuværende sikkerhedsniveau i de danske nationale annekser, DK NA EN1990:2006. Det nuværende danske niveau og det anbefalede sikkerhedsniveau i EN1990-1:2023 sammenlignes overordnet. Der foretages ikke beregninger af sikkerhedsniveauet som de nuværende partialkoefficienter resulterer i. Endelig beskrives forskellige muligheder for kalibrering af partialkoefficienter.



## 1 Introduktion til sikkerhedssystemet

Sædvanligvis anvendes partialkoefficientmetoden til eftervisning af tilstrækkelig bæreevne af konstruktioner. En konstruktions bæreevne er ifølge partialkoefficientmetoden tilstrækkelig, såfremt den regningsmæssige værdi af lastvirkningen (f.eks. et bøjningsmoment) ikke overstiger den regningsmæssige værdi af styrken/bæreevnen. Ved fastsættelse af de regningsmæssige værdier er det nødvendigt at tage hensyn til, at hverken styrken af konstruktionen eller størrelsen af belastningen kendes nøjagtigt, når konstruktionens dimensioner fastlægges. Dermed er estimatet af både styrke og belastning forbundet med usikkerheder.

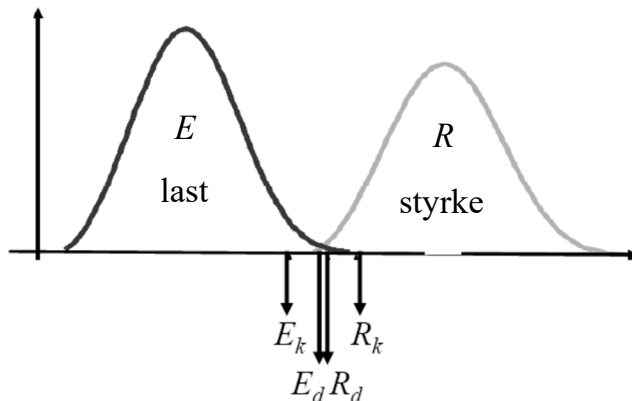
Usikkerhederne på styrken skyldes dels, at styrken af selve konstruktionsmaterialerne varierer, selvom de er fabrikeret efter samme specifikation. Desuden giver de matematiske modeller, som bruges til beregning af styrken, ikke en perfekt repræsentation af virkeligheden, og geometrisk set kan en konstruktion ikke udføres fuldstændig perfekt. Generelt sker der kun en begrænset variation af styrken over tid, selvom nedbrydningsprocesser kan give anledning til tab af styrke. Belastningen på konstruktioner kommer fra forskellige bidrag, hvor de vigtigste sædvanligvis er:

- Egenlast (tyngden af selve konstruktionen) og permanent last fra installationer mm
- Nyttelast (tyngden af personer, køretøjer og genstande, der befinder sig i konstruktionen)
- Snelast (tyngden af sne)
- Vindlast (tryk og sug på konstruktionens flader pga. vinden)
- Jordtryk, som er afhængig af jordens styrkeparametre og konstruktionens bevægelser (mod eller væk fra jorden)
- Vandtryk, hydrostatisk (stillestående) eller influeret af strømning (i jorden)

Fastsættelse af egenlast og permanent last er typisk kun forbundet med små usikkerheder, mens der vil være stor variation over tid af størrelsen på belastningen fra nyttelast, snelast, vindlast og jordtryk. Jordtrykket vil være afhængig af dræningstilstand, som også er tidsafhængigt. Sand dræner hurtigt. Ler dræner langsomt. Ligeledes er der stor usikkerhed forbundet med fastlæggelsen af, hvor store belastninger en konstruktion udsættes for i løbet af et år og i løbet af konstruktionens levetid.

I partialkoefficientmetoden tages der højde for usikkerhederne på styrke og belastning ved anvendelse af karakteristiske værdier og partialkoefficienter for styrker og laster. Typisk bruges 5% fraktilen som karakteristisk værdi for styrker, således at styrken i 5% af tilfældene vil være mindre end denne værdi. For lasterne benyttes typisk en karakteristisk værdi med en returperiode på 50 år, dvs. den last der gennemsnitligt overskrides én gang i løbet 50 år. (Dette svarer til at den karakteristiske lastvirkning overskrides med en årlig sandsynlighed på 2%.) Hvis man blot dimensionerede efter, at den karakteristiske værdi af belastningen ikke overstiger den karakteristiske værdi af bæreevnen, ville der meget hyppigt ske svigt af konstruktioner. Dette ville naturligvis medføre store tab af menneskeliv, økonomiske og samfundsmæssige konsekvenser, samt unødigt stort ressourceforbrug til genopførelse af svigtede konstruktioner.

For at sikre, at konstruktionerne har et mere passende sikkerhedsniveau, anvendes der partialkoefficienter. Belastningen ganges typisk med en partialkoefficient større end 1,0, så den øges i forhold til den karakteristiske værdi, mens bæreevnen divideres med en partialkoefficient større end 1,0, så den mindskes i forhold til den karakteristiske værdi. Dette er illustreret på Figur 1.



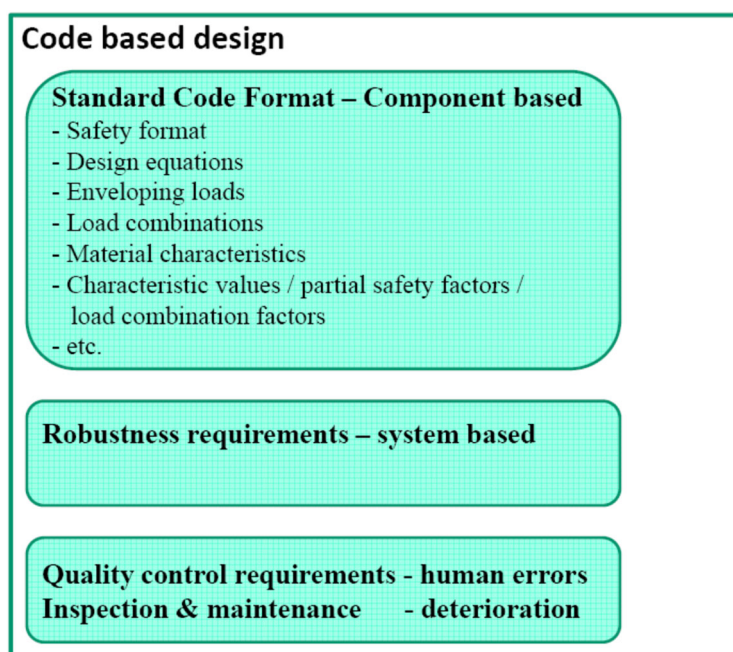
Figur 1. Sandsynlighedsfordelinger for last  $E$  og styrke  $R$ , samt karakteristiske værdier  $E_k$  og  $R_k$  og regningsmæssige værdier  $E_d$  og  $R_d$ .

Jo større partialkoefficienter, der anvendes, jo mere sikker er konstruktionen, men jo større ressourceforbrug er opførelsen af konstruktionen forbundet med. I princippet vil der altid være en sandsynlighed for svigt, uanset hvor store partialkoefficienter, der anvendes. Partialkoefficienterne skal derfor fastsættes i en afvejning mellem sandsynligheden for svigt med de økonomiske konsekvenser, det medfører, inkl. værdi af tab af menneskeliv og ressourceforbrug til opførelsen af konstruktionen. Det er essentielt at forstå, at både et meget højt sikkerhedsniveau og et meget lille sikkerhedsniveau medfører et meget højt ressourceforbrug. Et højt sikkerhedsniveau medfører et højt ressourceforbrug på kort sigt - når bygningen skal opføres. Et lavt sikkerhedsniveau kan medføre et højt ressourceforbrug på langt sigt. Optimalt set tilpasses partialkoefficienterne, så det forventede økonomiske ressourceforbrug er mindst muligt på lang sigt, samtidig med det sikres at sandsynligheden for tab af menneskeliv er på et acceptabelt niveau, dvs. et minimum sikkerhedsniveau knyttet til tab af menneskeliv (human safety). I praksis foregår fastlæggelsen af partialkoefficienter i normer på den måde, at der først fastlægges et målsikkerhedsniveau (givet ved den årlige sandsynlighed for svigt eller sikkerhedsindeks), hvorefter partialkoefficienterne kalibreres således, at konstruktioner teoretisk set gennemsnitligt opnår det ønskede sikkerhedsniveau, og afvigelsen fra målsikkerhedsniveauet søges minimeret.

### 1.1 Realiseret sikkerhedsniveau

Målsikkerhedsniveauet skal dog ses som et nominelt sikkerhedsniveau, og normalt vil det realiserede sikkerhedsniveau (inkl. svigt der skyldes bl.a. menneskelige fejl) være forskelligt fra dette. Således vil den observerede årlige svigt-rate i praksis være større end den nominelle sandsynlighed for svigt pr. år. Årsagen hertil er bl.a. at modellerne, der benyttes til at kalibrere partialkoefficienter i normerne ikke inkluderer menneskelige fejl ved projektering og udførelse,

så kaldte grove fejl. De væsentlige af disse fejl forudsættes fundet og korrigeret for i kvalitetskontrollen, men det sker ikke altid. Derudover eftervises bæreevnen separat for hvert enkelt element og for hver svigtform, og der tages ikke direkte hensyn til om hele systemet svigter, hvis blot et enkelt element svigter, eller om systemet er mere robust og flere elementer skal svigte før konstruktionen svigter. Således er målsikkerhedsniveauet typisk knyttet til enkelte elementer og svigtformer og ikke til hele konstruktioner modelleret som systemer af svigtformer. I normerne tages der hensyn til dette ved hjælp af krav til robustheden, idet svigtsandsynligheden for et ikke-robust system kan være væsentligt højere end svigtsandsynligheden af det enkelte element. Dermed afhænger det realiserede sikkerhedsniveau for konstruktioner projekteret efter normer af tre komponenter, som illustreret i Figur 2: kvalitetskontrol, robusthedskrav og eftervisning af tilstrækkelig sikkerhed ved standard normformatet med partialkoefficienter kalibreret til et nominelt sikkerhedsniveau.



Figur 2. Normbaseret projektering, se f.eks. (Sørensen 2011)

## 2 Sikkerhedssystem i Eurocodes

I Europa anvendes der i dag et fælles system af normer: Eurocodes. Disse normer fastlægger fælles regler for, hvordan nye konstruktioner skal projekteres. På en del punkter har de enkelte lande mulighed for at tilpasse reglerne til nationale forhold, hvilke gøres i de Nationale annekser. Således er der i Eurocode 0 – Grundlag for strukturelt og geoteknisk design (EN1990-1:2023) blot anført anbefalede værdier til den maksimale svigtsandsynlighed, mens de enkelte lande kan angive niveauet i det nationale annekse. Dette gælder også for den nugældende Eurocode 0 – Projekteringsgrundlag for bærende konstruktioner (EN1990:2002).

Sikkerhedsniveauet angivet i Eurocodes og de tilhørende nationale annekser er anført som supplerende information, mens de kalibrerede partialkoefficienter er

normative. Det betyder, at bæreevneeftersvisning sædvanligvis skal foretages ved partialkoefficientmetoden. I EN1990:2023 er der i Anneks C dog angivet tre niveauer til projektering af konstruktioner, som vist i Figur 3, og beskrevet herunder:

1. Projektering foretages sædvanligvis vha. partialkoefficientmetoden hvor tilstrækkelig sikkerhed sikres ved anvendelse af partialkoefficienter og karakteristiske værdier for laster og materialer. Partialkoefficientmetoden i Eurocodes er en såkaldt semi-probabilistisk metode.
2. Den pålidelighedsbaserede metode er en probabilistisk metode, hvor det eftervises eksplicit, at sandsynligheden for svigt i forhold til brudgrænse er mindre end den maksimalt accepterede svigtsandsynlighed. Denne metode anvendes til at kalibrere partialkoefficienter til brug i den semi-probabilistiske metode, hvor disse kalibreres til målsikkerhedsniveauet således at ca. halvdelen af konstruktionerne (konstruktionselementer) har en sikkerhed lavere end målsikkerhedsniveauet og den anden halvdel et højere sikkerhedsniveau. Den kan desuden bruges i tilfælde, hvor svigtformer, materialer, laster og usikkerheder er usædvanlige.
3. I den risiko-baserede metode træffes beslutninger under hensyntagen til de totale forventede omkostninger til materialer, opførelse m.m. og konsekvenser af svigt inkl. tab af menneskeliv. Den acceptable svigtsandsynlighed i den pålidelighedsbaserede metode kan kalibreres ved anvendelse af den risiko-baserede metode, så det acceptable sikkerhedsniveau baseres på økonomisk optimering inkl. forventede omkostninger ved tab af menneskeliv.

Method	Description	Applied when
Semi-probabilistic approach	Safety format prescribing the design equations and the analysis procedures to be used	Default method in the Eurocodes, i.e. to be used for usual design situations
Reliability-based design and assessment	Reliability requirements to fulfil	Unusual design situations in regard to uncertainties Code calibration
Risk-informed decision making	Decisions are taken with due consideration of the total risks (e.g. loss of lives, injuries, environmental and monetary losses, etc.)	Exceptional design situations in regard to uncertainties and consequences Derivation of reliability requirements

Figur 3. Niveauer for design / beslutningstagen fra EN1990:2023 Anneks C.

## 2.1 Partialkoefficientmetoden

I partialkoefficientmetoden eftervises tilstrækkelige bæreevne ved separat eftersvisning af hhv. brudgrænsetilstande og anvendelsesgrænsetilstande for de enkelte elementer i konstruktionen.

I brudgrænsetilstanden undersøges det, om konstruktionselementerne har tilstrækkelig bæreevne til at undgå et svigt. Overskridelse af brudgrænsetilstanden kan medføre et kollaps af hele eller dele af konstruktionen.



I anvendelsesgrænsetilstanden undersøges om konstruktionen opfører sig acceptabelt under brug, herunder om der forekommer store deformationer, som kan være ubehagelige for mennesker, eller som kan forårsage nedbrydning af konstruktionen på længere sigt.

I brud- og anvendelsesgrænsetilstanden tages der hensyn til almindeligt forekommende laster som permanent last, nyttelast, snelast, vindlast, jordtryk og vandtryk. I brudgrænsetilstanden opstilles der endvidere ulykkeslasttilfælde, hvor der ses på usædvanlige forhold som brand, påkørsel, påsejling, eksplosioner og ekstreme vandtryk, samt seismiske lasttilfælde, hvor der ses på belastninger som følge af jordskælv.

I både brud- og anvendelsesgrænsetilstanden opstilles der lastkombinationer, hvor karakteristiske værdier, partialkoefficienter og lastkombinationsfaktorer er tilpasset, så hyppigheden for overskridelse overholder det ønskede sikkerhedsniveau. For permanente laster bruges ofte middelværdien som karakteristisk last, mens der for variable laster som nævnt anvendes en last med en returperiode på 50 år som karakteristisk værdi.

I Danmarks anvendes der for almindeligt forekommende laster to lastkombinationer for brudgrænsetilfælde; en med dominerende permanent last og en med én dominerende variabel last.

Den første er relevant for situationer, hvor egenvægten er den dominerende last, f.eks. en betonkonstruktion, mens den anden er relevant hvor variabel last er dominerende, f.eks. en stålkonstruktion. I den første kombination indgår kun permanent last, som til gengæld øges med en partialkoefficient større end 1,0. I den anden kombination indgår permanent last med partialkoefficienten én sammen med de variable laster, og der opstilles en lastkombination med hver af de variable laster som dominerende last. Alle variable laster multipliceres med en partialkoefficient større end 1,0, men de ikke-dominerende variable laster reduceres ved at multiplicere med en lastkombinationsfaktor mindre end én. Lastkombinationsfaktorerne sørger for, at der anvendes kombinationer af lasterne, som har den ønskede returperiode. For eksempel vil den kombinerede hændelse af en storm med en returperiode på 50 år og en snelast med en returperiode på 50 år have en meget større returperiode. For ulykkeslasttilfælde anvendes en dominerende ulykkeslast sammen med reducerede variable laster samt middelværdi af permanent last. Endvidere undersøges udmattelsesgrænsetilstande.

I anvendelsesgrænsetilstanden anvendes ikke partialkoefficienter, men der anvendes lastkombinationsfaktorer til at tilpasse lasterne til en passende hyppighed for overskridelse. Almindeligt anvendte kombinationer i anvendelsesgrænsetilstanden er en karakteristisk kombination (50 års returperiode), en hyppig kombination (overskrides 1% af tiden), og en kvasi-permanent kombination (overskrides 50% af tiden).

I forbindelse med eftervisning af en konstruktions bæreevne påføres beregningsmodellen i princippet lasterne med faktorer fra lastkombinationerne én lastkombination ad gangen. For brudgrænsetilstande undersøges det, at denne regningsmæssige lasteffekt i hvert konstruktionselement ikke overstiger den

regningsmæssige bæreevne, og for anvendelsesgrænsetilstande at f.eks. deformationer eller revnevidder er acceptable.

## 2.2 Kalibrering af partialkoefficienter ved pålidelighedsbaseret tilgang

I partialkoefficientmetoden anvendes der som nævnt partialkoefficienter på både laster og bæreevner, og disse kan kalibreres vha. en probabilistisk tilgang, hvor laster og bæreevner modelleres som stokastiske variable, og svigtsandsynligheden bestemmes med metoder til bestemmelse af pålideligheden af konstruktioner (structural reliability methods). Svigtsandsynligheden kan angives som den årlige svigtsandsynlighed eller som en sandsynlighed for svigt i løbet af levetiden af konstruktionen, som i den forbindelse ofte sættes til 50 år. For konstruktioner, hvor der skal tages hensyn til risikoen for tab af menneskeliv, bør altid anvendes et årligt sikkerhedsniveau.

Hvis partialkoefficienterne for styrker og laster kalibreres individuelt for hver kombination af materialer, laster og typer af konstruktioner, kan målsikkerhedsniveauet opnås nøjagtigt for alle kombinationer. Af praktiske grunde ønskes det dog at samme lastpartialkoefficienter anvendes på tværs af materialer, og at samme materialepartialkoefficienter anvendes på tværs af laster. Partialkoefficienterne kalibreres, så der gennemsnitligt, på tværs af materialer, laster og typer af konstruktioner, opnås det nominelle målsikkerhedsniveau. Dette betyder, at sikkerhedsniveauet for nogle kombinationer af materialer, laster og konstruktionstyper vil være større end målsikkerhedsniveauet, mens det for andre vil være mindre. Den mindste variation fra målsikkerhedsniveauet kan opnås ved frit at kalibrere alle partialkoefficienter i én optimeringsprocedure, hvor variationen søges minimeret. Ofte er det dog mere praktisk først at kalibrere partialkoefficienterne på lasten, og derefter på styrken.

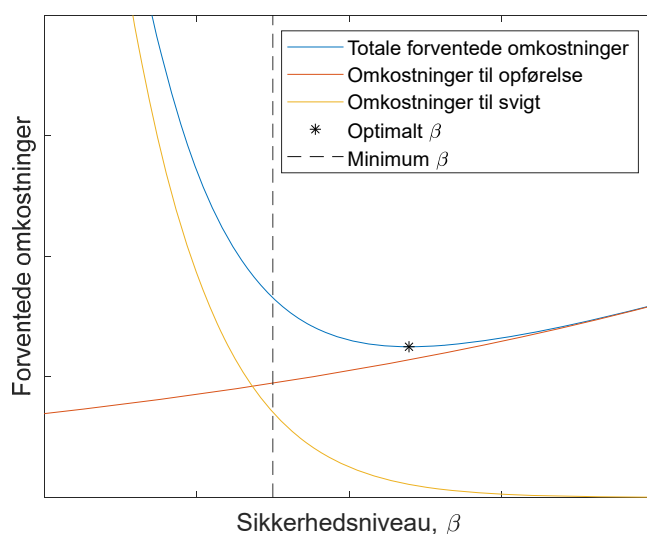
## 3 Principper for fastlæggelse af sikkerhedsniveau

Sikkerhedsniveauet i normer fastsættes i en afvejning mellem konsekvenserne ved et svigt og ressourceforbruget ved opførelsen af konstruktionen. Herunder er det relevant at medtage aspekter relateret til økonomi, risiko for tab af menneskeliv samt bæredygtighed, som dog ikke er medtaget eksplicit i nuværende sikkerhedsniveau i Eurocodes. Endvidere kan sociale og miljømæssige aspekter inkluderes.

### 3.1 Målsikkerhedsniveau (økonomisk optimalt)

Målsikkerhedsniveauet kan fastsættes på baggrund af økonomisk optimering der inkluderer omkostninger forbundet med tab af menneskeliv. Her opstilles en funktion for nutidsværdien af de totale forventede omkostninger til opførelsen af konstruktioner, konsekvenser ved svigt af konstruktioner i fremtiden samt genopførelse af konstruktioner pga. svigt eller forældelse. Det optimale sikkerhedsniveau er der, hvor de totale omkostninger har minimum, som illustreret på Figur 4. Det optimale sikkerhedsniveau afhænger dermed af konsekvenserne ved et svigt samt af, hvor meget det koster at gøre konstruktionen mere sikker. I

ISO2394:2015 er der opstillet en tabel med optimale sikkerhedsniveauer for forskellige kombinationer af disse (Tabel 1). Endvidere afhænger det optimale sikkerhedsniveauer af størrelsen af usikkerhederne, diskonteringsrenten, samt forældelsesraten. Det bemærkes at Class 2, 3 og 4 i tabellen svarer til CC1, CC2 og CC3 i Eurocodes.



Figur 4. Illustration af optimalt sikkerhedsniveau på baggrund af økonomisk optimering samt minimum sikkerhedsniveau.

Relative cost of safety measure	Consequences of failure		
	Class 2	Class 3	Class 4
Large	$\beta = 3,1 (P_f \approx 10^{-3})$	$\beta = 3,3 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-4})$	$\beta = 3,7 (P_f \approx 10^{-4})$
Medium	$\beta = 3,7 (P_f \approx 10^{-4})$	$\beta = 4,2 (P_f \approx 10^{-5})$	$\beta = 4,4 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-6})$
Small	$\beta = 4,2 (P_f \approx 10^{-5})$	$\beta = 4,4 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-6})$	$\beta = 4,7 (P_f \approx 10^{-6})$

Tabel 1. Optimale sikkerhedsniveauer i ISO2394:2015 med konsekvensklasser fra Tabel F1 i SO2394:2015.

### 3.2 Minimum sikkerhedsniveau (personsikkerhed)

Hvis sikkerhedsniveauet fastlægges alene på baggrund af økonomisk optimering, kan det medføre en større risiko for tab af menneskeliv, end hvad samfundet kan acceptere. Derfor bør det kontrolleres, at det optimale sikkerhedsniveau er større end det minimal acceptable sikkerhedsniveau.

Minimumssikkerhedsniveauet kan ifølge ISO2394:2015 fastlægges på baggrund af et SWTP-princip (Societal Willingness To Pay) som går ud på at tage hensyn til, hvor meget er samfundet villig til at betale for at redde et 'statistisk' menneskeliv. Acceptkriteriet kan fastlægges for de enkelte lande vha. et LQI-



kriterie (Life Quality Index). Ud fra dette kriterie kan anvendes et lavere sikkerhedsniveau i fattigere lande, idet samfundet i disse lande kan redde flere menneskeliv ved at investere midlerne i andet end mere sikre bygninger, f.eks. rent drikkevand. Princippet med et minimumsniveau for sikkerhedsniveauet er illustreret med en stiplede linje i Figur 4, mens Tabel 2 viser minimumssikkerhedsniveauer fra ISO2394:2015.

Relative life-savings costs	LQI target reliability
Large	$\beta = 3,1 (P_f \approx 10^{-3})$
Medium	$\beta = 3,7 (P_f \approx 10^{-4})$
Small	$\beta = 4,2 (P_f \approx 10^{-5})$

Tabel 2. Minimum sikkerhedsniveauer fra ISO2394:2015.

### 3.3 Baggrund for sikkerhedsniveau i Eurocodes

Ifølge EN1990:2023 er det grundlæggende mål for design af nye konstruktioner et sikkerhedsindeks lig 3,8 med en referenceperiode på 50 år. Som et alternativ angives i EN1990 årlige værdier med en konvertering baseret på uafhængige svigt i efterfølgende år. Ifølge (Vrouwenvelder, JRC 2023) blev sikkerhedsindekset på 3,8 (eller etårige værdier i intervallet 4,2 til 4,7) udledt på grundlag af kompromiser såvel som kalibreringsundersøgelser i slutningen af forrige århundrede. Kalibreringen havde hovedsageligt til formål at bestemme partialkoefficienter, der i gennemsnit fører til de samme strukturelle dimensioner som før indførelsen af Eurocodes, men med mindre spredning i pålidelighed.

### 3.4 Baggrund for sikkerhedsniveau i danske konstruktionsnormer og nationale annekser til Eurocodes

I det nuværende danske nationale annekset til Eurocode 0 (DK NA EN1990:2024) for bygninger er den acceptable svigtsandsynlighed af størrelsesordenen  $10^{-5}$  pr. år (svarende til svigt af én ud af 100.000 konstruktioner pr. år). Det tilhørende sikkerhedsindeks er 4.3.

I Danmark blev partialkoefficienterne for laster og materialer i 1998 normerne (DS409, DS410, ...) kalibreret til et nominelt sikkerhedsniveau svarende til en årlig svigtsandsynlighed lig  $10^{-6}$  (én ud af 1.000.000 pr. år) svarende til et sikkerhedsindeks lig 4.8, se (Sørensen et. al 2001). Dette sikkerhedsniveau blev bestemt som det gennemsnitlige sikkerhedsniveau opnået med partialkoefficienterne givet i konstruktionsnormerne fra 1982. Der var i 1998 normerne ikke specifikke krav til kvalitetskontrol og robusthed. I forbindelse med indførelse af Eurocodes og udarbejdelse af nationale annekser (2007-2008) blev det nominelle sikkerhedsniveau for bygninger sænket til en årlig svigtsandsynlighed på  $10^{-5}$  (sikkerhedsindeks lig 4.3) bl.a. begrundet i indførelse af robusthedskrav og kontrol af projektering i DK NA EN1990, se (Sørensen et. al, DS INF 172 2008).

Senere er der i DK NA EN1990 også indført krav til kontrol under udførelse (2018). Sikkerhedsniveauet for broer blev ikke sænket og er i de nuværende nationale annekser for broer svarende til et sikkerhedsindeks på 4.8.

Sikkerhedsniveauerne angivet ovenfor gælder for middel konsekvensklasse CC2 og varslet svigt. For høj konsekvensklasse CC3 øges sikkerhedsniveauet ved at den acceptable svigtsandsynlighed reduceres med en faktor 10. For lav konsekvensklasse CC1 øges den acceptable svigtsandsynlighed med en faktor 10. Tilsvarende henholdsvis reduceres og øges den acceptable svigtsandsynlighed med en faktor 10 for uvarslet svigt og for varslet svigt med bæreevnereserve. Ved bestemmelse af materialepartialkoefficienter i de danske nationale annekser indgår dette med en faktor 0,9, 1,0 og 1,1.

For eksisterende konstruktioner accepteres i DS 11990: 2024 at sikkerhedsniveauet reduceres med en faktor 10 bl.a. argumenteret i at det generelt er forholdsvis større omkostninger forbundet med at opnå et givet sikkerhedsniveau for en eksisterende konstruktion sammenlignet med en ny konstruktion, samfundsmæssige hensyn og bæredygtighedsovervejelser.

### 3.5 Bæredygtighed

Både det optimale og minimale sikkerhedsniveau fastsættes på baggrund af betragtninger vedrørende optimalt brug af ressourcer i samfundet, og dermed er det langt hen ad vejen de samme mekanismer, der gør sig gældende for bæredygtighed som for økonomisk optimering. Tilgangene der blev beskrevet i de foregående afsnit kan således udvides til mere eksplicit at inddrage flere aspekter relateret til bæredygtighed. For eksempel kan et større ressourceforbrug i dag medføre tab af menneskeliv i fremtiden pga. øgede effekter af klimaforandringer, hvilket muligvis kan retfærdiggøre et sænket sikkerhedsniveau.

Bæredygtigheden kan også øges ved at anvende flere (mere specifikke) partialkoefficienter, f.eks. ved at anvende forskellige partialkoefficienter for nyttelast og naturlaster. I dag anvendes samme partialkoefficient, hvilket giver en større variation af sikkerhedsniveauet omkring det optimale niveau. Som det kunne ses på Figur 4, bliver de forventede omkostninger større ved sikkerhedsniveauer der ligger både over og under det optimale niveau, idet en højere svigtsandsynlighed medfører behov for oftere at genopføre svigtede konstruktioner. De større omkostninger går i høj grad til et større ressourceforbrug, og derfor vil det medføre et højere ressourceforbrug på lang sigt, hvis der er større variation af sikkerhedsindekset omkring det optimale niveau.

## 4 Sammenfatning

Sikkerhedssystemet i Eurocodes og i de tilhørende danske nationale annekser bygger på anvendelse af partialkoefficientmetoden, hvor lastkombinationer, partialkoefficienter og lastkombinationsfaktorer er kalibreret til at konstruktionerne i gennemsnit opnår et målsikkerhedsniveau.

Målsikkerhedsniveauet er som udgangspunkt fastsat som ved en økonomisk optimering inkl. forventede omkostninger ved tab af menneskeliv, hvor de samlede omkostninger til materialeforbrug og konsekvenser af svigt minimeres. I Danmark svarer det nuværende målsikkerhedsniveau til en årlig svigtsandsynlighed på  $10^{-5}$  (årligt sikkerhedsindeks på 4.3) for middel konsekvensklasse. Ved fastsættelse af det nuværende sikkerhedsniveau i de danske nationale anekser til Eurocodes er der ikke direkte medtaget betragtninger om bæredygtighed.

Målsikkerhedsniveauet, der benyttes til at kalibrere partialkoefficienter, er et nominelt sikkerhedsindeks. I praksis vil det observerede sikkerhedsniveau være lavere bl.a. pga. menneskelige fejl i projektering og udførelse.

Det realiserede sikkerhedsniveau afhænger således direkte af det nominelle sikkerhedsniveau, der anvendes til kalibrering af partialkoefficienterne, men også af omfang af kontrol af projektering og udførelse, og endvidere af krav til robusthed. Betragtninger om bæredygtighed kan muligvis retfærdiggøre et reduceret nominelt sikkerhedsniveau. Derudover kan det realiserede sikkerhedsniveau påvirkes af:

- Øgede krav til kontrol af projektering, udførelse og drift
- Inddeling i samt definition af konsekvensklasser, herunder hensyntagen til duktilitet ifm. fastlæggelse af konsekvensklasse, partialkoefficient og robusthedskrav
- Øgede krav til robusthed

Endelig bemærkes at et reduceret sikkerhedsniveau og dermed reducerede partialkoefficienter knyttet til brudgrænsetilfælde kan medføre at anvendelsesgrænsetilstande hyppigere bliver dimensionsgivende og dermed at ressourceforbruget reduceres mindre.

## 5 Referencer

DK NA for DS/EN 1990, Eurocode 0: Projekteringsgrundlag for bærende konstruktioner, 2024.

DS 11990: Bæreevnevurdering af eksisterende konstruktioner. 2024.

DS/EN 1990, Eurocode 0: Projekteringsgrundlag for bærende konstruktioner, 2002.

DS/EN 1990-1, Grundlag for strukturelt og geoteknisk design, 2023.

ISO 2394: General principles on reliability for structures. 2015.

Köhler, J., J.D. Sørensen & B. Ellingwood: Codes and standards for structural design - developments and future potential. Structural Safety, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102495>.

Sørensen, J.D.: Framework for robustness assessment of timber structures. Engineering Structures, Vol. 33, 2011, pp. 3087-3092. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.025>.



**AAU BUILD**  
AALBORG UNIVERSITET

Sørensen, J.D., S.O. Hansen & T.A. Nielsen: Calibration of Partial Safety Factors and Target Reliability Level in Danish Structural Codes. Proc. IABSE Conf. 'Safety, Risk and Reliability – trends in Engineering', Malta, 2001, pp. 179-184.

Sørensen, J.D., J. Munch-Andersen, S.O. Hansen, F.O. Sørensen, H.H. Christensen, P. Lind & A. Poulsen: Baggrundsundersøgelser ifm. udarbejdelse af Nationale Annekser til EN1990 og EN1991. DS INF 172, Dansk Standard, 2008.

Aalborg den 31. oktober 2024

John Dalsgaard Sørensen (jdas@build.aau.dk),

Jannie Sønderkær Nielsen (jsn@build.aau.dk)