AALBORG UNIVERSITET

STRUCTURAL AND CIVIL ENGINEERING

Pålidelighed af Fiberforstærkede Polymer Konstruktioner

Master Thesis

10-06-2020

Forfatter:
Casper Sort Nielsen

Vejledere:
John Dalsgaard Sørensen
Jannie Sønderkær Nielsen

AALBORG UNIVERSITY
STUDENT REPORT

Second Masters year at Department of the Built Environment
Structural and Civil Engineering
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg
https://www.build.aau.dk/

Titel:

Pålidelighed af Fiberforstærkede Polymer Konstruktioner

Projekt:

Master Thesis
Structural and Civil Engineering

Projektperiode:

1. Februar 2020 - 10. Juni 2020

Forfatter:

Casper Sort Nielsen

Vejledere:

John Dalsgaard Sørensen
Jannie Sønderkær Nielsen

Sider: 81
Afleveringsdato 10-06-2020

Synopsis:

Dette projekt omhandler pålidelighed af fiberforstærkede polymer (FRP) konstruktioner. Brugen af FRP er stigende, hvilket har startet ideen om at anvende FRP i flere projekter herunder også som bærende konstruktionsdele i bygninger. Pålideligheden af det relative nye materiale brugt til bygninger er dog uvis, og udarbejdelse af en ny Eurocode omhandlende FRP er stadig igangværende.
Metoder til bestemmelse af pålideligheden vil blive beskrevet, hvor brudscenarier som boltesamlinger og stabilitetsbrud for søjler vil blive anvendt som eksempelkonstruktioner. I tilknytning hertil vil tilførende partialkoefficienter blive kalibreret ved forskellige metoder.
Projektet anvender andre rapporter, der har udført forsøg på de undersøgte brudscenarier og anvender det tilhørende data, såsom materialeparametre, materialeusikkerheder og forsøgsresultater.

Forord

Dette projekt er udarbejdet i løbet af fjerde semester på kandidatuddandelsen i Structural and Civil Engineering (Bygge- og Anlægskonstruktion) på Aalborg Universitet fra Februar 2020 til Juni 2020.

Projektet omhandler brugen af FRP (Fiber Reinforced Polymer) som bærende konstruktionsdele i bygninger. Dette emne er relevant, da efterspørgslen af FRP er stigende grundet materialets gunstige egenskaber, såsom materialets lave vægt i forhold til traditionelle materialer, som f.eks. stål, uden forringelse af styrken. Ydermere har FRP fordele i forhold til traditionelle materialer med henblik på materialernes kemikaliebestandighed samt elektrisk og termisk isoleringsevne. Emnet er desuden aktuelt, da en ny Eurocode for FRP er under udarbejdelse.

Projektet vil omhandle aspekter knyttet til last og sikkerhed for FRP, med fokus på bestemmelse af usikkerheder af FRP's materialeparametre, modelusikkerheder for udvalgte brudscenarier, estimering af pålidelighed for generiske konstruktionselementer i FRP og i tilknytning hertil kalibrering af partialkoefficienter.

Læseguide

Denne rapport er opbygget af en hovedrapport med tilhørende appendiks. Appendiks indeholder nærmere forklaring af indhold præsenteret i hovedrapporten og data fra forsøg. Henvisninger til appendiks vil komme i løbet af rapporten.

Kilder er gennem rapporten angivet ved brug af Havard Metoden og er præsenteret i litteraturlisten i alfabetisk rækkefølge i forhold til forfatternes efternavn. Kilder brugt til en specifik sætning er præsenteret før punktum, mens kilder for hele afsnittet er præsenteret efter punktum.

Figurer, tabeller og formler er nummereret af kapitel og rækkefølge. Som f.eks. er Figur 2.3 tredje figur i kapitel 2. Referencer til formler er indikeret ved parenteser omkring dem.

Casper Sort Nielsen

Abstract

This project concerns reliability of fibre reinforced polymer (FRP) structures. The use of FRP is growing which have meant more different projects look for the use of FRP in e.g. buildings. Because of the for now limited use of FRP in buildings the reliability of the new type of structure is fairly unknown, and a new Eurocode concerning the use of FRP is under development.

Methods for determining the reliability of FRP structures are described and based on experiments on failure in bolt connections and stability failure in columns. In association determining the partial safety factors with method suggested in The Danish National Annex EN1990, *The Design Value Method*, and calibrating the partial safety factors directly based on the reliability method.

Results from other projects which have performed experiments on the investigated failure types. The obtained data is used to perform an uncertainty analyse based on the strength capacity determined in the experiments and the theoretical strength capacity determined by different suggested design equations.

To consider the importance of the ratio between permanent and variable load, partial safety factors is determined both for two scenarios. One scenario where the ratio is between 0,1-0,5 meaning that the permanent load is high and another scenario where the ratio is between 0,5-0,9 meaning that the variable load is high. A low load ratio could represent a existing building where the permanent load typically would be higher compared to a new building where FRP is used as the main material. A high load ratio could therefore represent a new building in FRP.

The results showed that partial safety factors determined by method in DK NA EN1990 give the most conservative reliability index and that partial safety factors determined by The Design Value Method give results close to the target reliability but occasionally give result lower than the target reliability. This could be due to the fact that in The Design Value Method partial safety factors was only determined for the strength parameters while partial safety factors for the load parameters was determined from values recommended in Eurocode. The most accurate method was by calibrating the partial safety factors directly based on the reliability method, but this method was also the most time-consuming method.

Indholdsfortegnelse

I Indledning

1 Introduktion 15

1.1 Pultrudering 15

1.2 Armering i FRP 16

1.3 Pålidelighed af FRP konstruktioner 17

1.4 Problemformulering 18

II Hoveddel

2 Pålidelighed af FRP konstruktioner 21

2.1 Structural Reliability Methods 21

2.2 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af DK NA EN1990 24

2.3 Designværdimetoden 25

2.4 Bestemmelse af de stokatiske variables vigtighed 27

3 Boltsamlinger 31

3.1 Bæreevnemodeller 32

3.1.1 Bæreevnemodel af Matthias Oppe 32

3.1.2 Bæreevnemodel i Eurocode 33

3.2 Forsøgsopstilling 35

3.3 Materialedata 36

3.4 Statistisk Vurdering af Bæreevnemodel af Matthias Oppe 36

3.4.1 Bestemmelse af Bias og Variationskoefficient for Modelusikkerheden 36

3.4.2 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af DK NA EN1990 37

3.4.3 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af Designværdimetoden 39

3.4.4 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra DK NA 40

3.4.5 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra Designværdimetoden 42

3.4.6 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Direkte Anvendelse af Sikkerhedsindeksmetoden 43

3.5 Statistisk Vurdering af Bæreevnemodel i Eurocode 45

3.5.1 Bestemmelse af Bias og Variationskoefficient for Modelusikkerheden 45

3.5.2 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af DK NA EN1990 46

3.5.3 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Designværdimetoden 46

3.5.4 Bestemmelse af α-vektor 47

3.5.5 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra DK NA 48

3.5.6 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra Designværdimetoden 50

3.5.7 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Direkte Anvendelse af Sikkerhedsindeksmetoden 51

4 Stabilitetsbrud 53

4.1 Bæreevnemodel 53

4.2 Forsøgsopstilling 54

4.3 Statistisk Vurdering af Bæreevnemodel 55

4.3.1 Bestemmelse af Bias og Variationskoefficient 55

4.3.2 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af DK NA EN1990 57

4.3.3 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af designværdimetoden 57

4.3.4 Bestemmelse af α-vektor 58

4.3.5 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra DK NA 59

4.3.6 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra Designværdi-metoden 60

4.3.7 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Direkte Anvendelse af Sikkerhedsindeksmetoden 61

III Konklusion

5 Konklusion 65

Litteraturliste 66

IV Appendiks

A Statistisk vurdering af bæreevnemodeller 71

A.1 Bestemmelse af Bias og Variationskoefficient for Modelusikkerhed 72

B Data for boltsamlingsforsøg 75

C Data for stabilitetsbrudsforsøg 79

Indledning

1 Introduktion 15
1.1 Pultrudering
1.2 Armering i FRP
1.3 Pålidelighed af FRP konstruktioner
1.4 Problemformulering

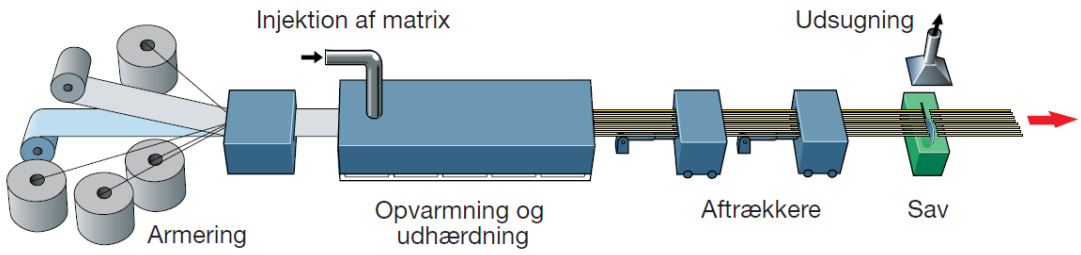
1. Introduktion

Et kompositmateriale er et materiale, der er sammensat af flere forskellige materialer. Disse materialer er hver for sig nødvendigvis ikke altid egnet til konstruktioner, men kombineret kan det resultere i et materiale med høj styrke og stivhed. Et eksempel på et kompositmateriale kunne være armeret beton, hvor trækbelastningen optages i stålarmeringen, mens trykbelastningen optages i betonen.

Et andet eksempel er fiberforstærket polymer eller forkortet FRP (fiber-reinforced polymer). FRP er plast forstærket med forskellige former for fibre og er ofte anvendt til større konstruktioner såsom skibe, tryktanke og vinger til vindmøller. Optagelse af belastninger er ligesom armeret beton opdelt i de enkelte materialer, hvor fibrene optager træk- og trykbelastninger, mens plasten, også kaldet matrixmaterialet, optager forskydningsbelasninger.

1.1 Pultrudering

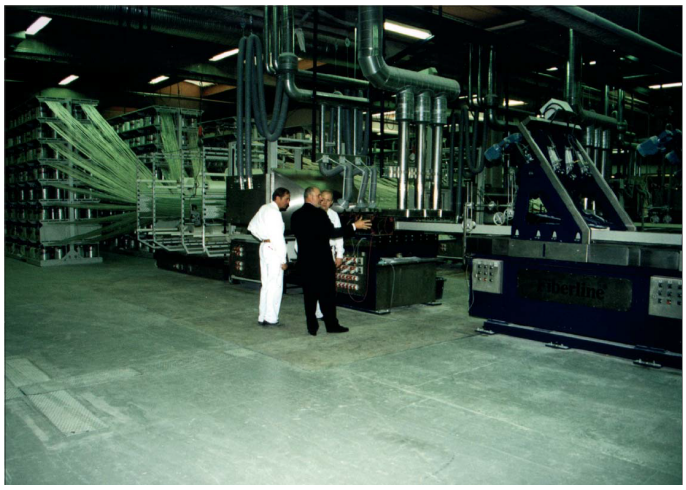
Pultrudering er processen, hvorpå kompositprofiler med konstant tværsnit og materialeegenskaber bliver fremstillet kontinuert. Metoden sikrer en konstant og reproducerbar kvalitet, som øger pålideligheden af de individuelle elementer. Princippet bag processen er enkel og har i sin grundudformning været anvendt siden 1950'erne. Pultruderingprocessen er illustreret på Figur 1.1.



Figur 1.1: Pultruderingprocessen. [Fiberline Composites A/S, 2003]

Pultrudering kan foregå ved, at kontinuerlige fibre trækkes gennem huller, der placerer fibrene i profiltværsnittet. Placeringens præcision har betydelig indflydelse på det færdige profils egenskaber og kvalitet. Fibrene ledes igennem næste del, hvor fibrene imprægneres med matrixmaterialet og opvarmes for at fremskynde hærdningsprocessen. Efter denne proces er elementet udhærdet, formstablit og kan til sidst skæres i definerede længder. Der er derved ikke en længere hærdningsprocess, som der eksempelvis er ved fremstilling

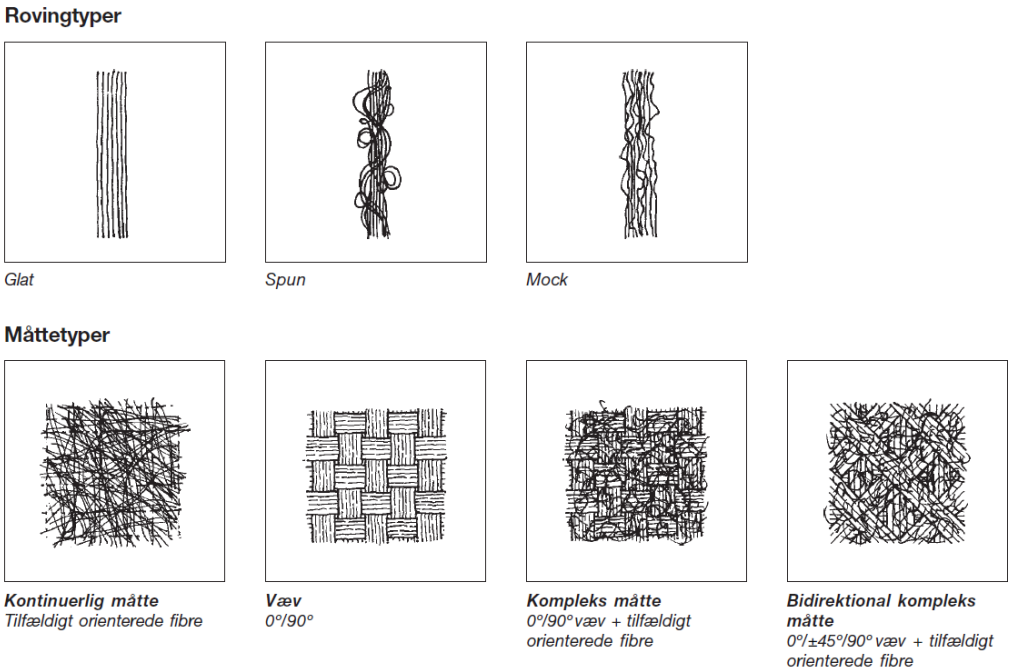
af beton. Foto af Fiberline Pultruderingsanlæg kan ses på Figur 1.2.



Figur 1.2: Pultruderingprocessen. [Fiberline Composites A/S, 2003]

1.2 Armering i FRP

Armeringens rolle er hovedsageligt at tilføje kompositmaterialet styrke og stivhed. De mest almindelige typer af armering er glas-, kul- og aramidfibre. Orienteringen af armeringen har markant betydning for elementets egenskaber, og der kan derfor anvendes forskellige typer af armering, som er illustreret på Figur 1.3.



Figur 1.3: Armeringstyper. [Fiberline Composites A/S, 2003]

Konstruktionsprofiler er ofte udsat for belastninger på tværs af profilets længde- og pultruderingsretning, og derfor kan der også anvendes andre typer end glatte rovings,

for at en del af fibrene orienteres i tværgående retning. Derudover anvendes også måtter og væv, som gør at mange forskellige kombinationer kan anvendes, for at kunne tilpasse konstruktionsprofilerne til behovet.

1.3 Pålidelighed af FRP konstruktioner

I dag bliver FRP hovedsageligt anvendt til vindmøllevinger, men anvendes også til mindre broer, hvor FRP's lave egenvægt har sine fordele. Ydermere bliver FRP også anvendt til flere offshore projekter, grundet modstandsdygtigheden overfor korrosion.

Fordelene ved anvendelse af FRP i stedet for traditionelle materialer består blandt andet af en betydelig vægtbesparelse, grundet FRP's specifikke egenskaber og lave egenvægt, kemikaliebestandighed af FRP, samt FRP's elektrisk og termisk isoleringsevne. Grundet den mere alsidige viden om FRP's grundlæggende egenskaber og lange holdbarhed, er udbredelsen af materialet blevet større, samtidig med at basismaterialernes generelle egenskaber er blevet forbedret i sådan en grad, at anvendelsen er mere målrettet og at sikkerhedsfaktorerne er reduceret til et anvendeligt niveau. [Fiberline Composites A/S, 2003]

Grundet den stigende anvendelse af FRP, har det været nødvendigt at udarbejde en standard både for produktionen af FRP konstruktionselementer og design af FRP bygningskonstruktioner. Erfaringen fra allerede opførte FRP konstruktioner i flere europæriske og ikke-europæriske lande, samt den teoretiske og ekperimentielle forståelse for FRP har gjort det muligt at udarbejde en standard, der i dag er under udarbejdelse. Dette betyder dog, at der i dag ikke er nogle egentlig norm for anvendelse af FRP. [Luigi Ascione, 2016]

ISO 2394 [2015] giver dog retningslinjer for, hvordan dimensioneringen af en konstruktion kan være baseret på, at pålideligheden er tilstrækkelig og beskriver hvordan pålideligheden af konstruktionen kan bestemmes f.eks. via Monte Carlo simulering.

For at kunne vurdere, hvor pålidelig en konstruktion skal være, bør der tages hensyn til mulige konsekvenser ved brud i FRP konstruktionen, de tilhørende omkostninger, og mængden af tiltag, der er nødvendige for at reducere risikoen for brud og skader opstår. I Tabel 1.1 er der vist et eksempel på tilsigtede sikkerhedsindekser, β, for forskellige konsekvensklasser og relative omkostninger for sikkerhedstiltag. Sikkerhedsindekset er anvendt til at indikere pålideligheden af en konstruktion, og er anvendt i Eurocodes ved et tilsigtet sikkerhedindeks er krævet for konstruktioner. Værdien af sikkerhedsindekset er eksempelvis vurderet ud fra en risikovurdering. De præsenteret sikkerhedsindekser i Tabel 1.1 er dog ikke de anvendte sikkerhedsindekser i DK NA, men blot eksempler på hvordan konsekvensklasser og relative omkostninger for sikkerhedstiltag har indflydelse på det tilsigtet sikkerhedsindeks.

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

Tabel 1.1: Tilsigtet pålideligheder for ULS baseret på monetær optimatisering. [ISO 2394, 2015, Table G.4]

Det kan ses, at ved høje relative omkostninger for sikkerhedstiltag kan det tilsigtet sikkerhedsindeks sænkes. Dette kunne f.eks være en eksisterende konstruktion, hvor omkostningerne for sikkerhedstiltag typisk vil være højere end ved nye konstruktioner, hvor sikkerhedstiltag kan planlægges allerede i designprocessen.

1.4 Problemformulering

Da erfaring ved brug af FRP i konstruktioner ikke er i så høj i forhold til traditionelle materialer som stål og beton, er der uvished omkring FRP konstruktioners pålidelighed. Den øgede brug af FRP har fremmet den alsidig viden om materialet, og gjort det muligt at forbedre produktionen, hvilket har mindsket variationen af de individuelle komponenters egenskaber, som derved øger pålideligheden af FRP konstruktioner. Hvis usikkerheden for styrken af et material er stor, kan den øgede sikkerhed, der skal tilføjes for at materialet er sikkert at anvende, gøre at materialet bliver dyrere at anvende i forhold til mere pålidelige alternative materialer. Problemformuleringen for denne rapport er som følgende:

- *Hvor store er usikkerhederne på bæreevnemodellerne ved brug af FRP i bygningskonstruktioner, og hvilke metoder kan anvendes til bestemmelse af partialkoefficienter for diverse bæreevnemodeller og brudscenarier for at sikre tilstrækkelig sikkerhed?*

II Hoveddel

2 Pålidelighed af FRP konstruktioner 21

2.1 Structural Reliability Methods

2.2 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af DK NA EN1990

2.3 Designværdimetoden

2.4 Bestemmelse af de stokatiske variables vigtighed

3 Boltsamlinger 31

3.1 Bæreevnemodeller

3.2 Forsøgsopstilling

3.3 Materialedata

3.4 Statistisk Vurdering af Bæreevnemodel af Matthias Oppe

3.5 Statistisk Vurdering af Bæreevnemodel i Eurocode

4 Stabilitetsbrud 53

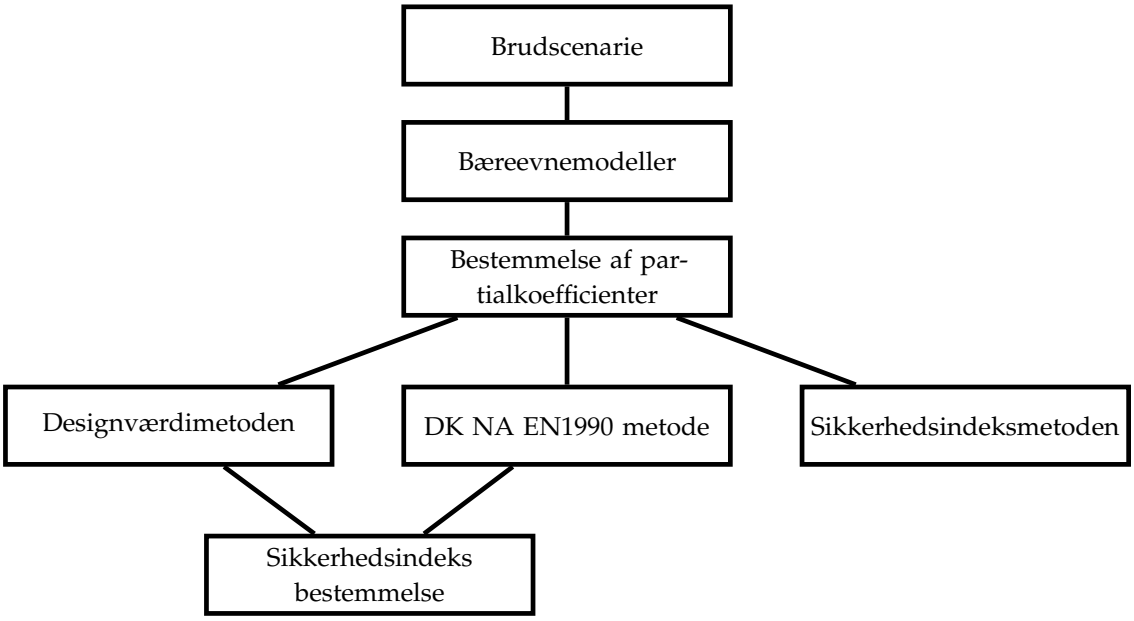
4.1 Bæreevnemodel

4.2 Forsøgsopstilling

4.3 Statistisk Vurdering af Bæreevnemodel

2. Pålidelighed af FRP konstruktioner

I dette afsnit præsenteres fremgangsmåden for bestemmelse af pålidelighed af FRP konstruktioner, der anvendes i dette projekt, og nærmere beskrivelse af nogle af de anvendte metoder. Forskellige brudscenarier benyttes til bestemmelse af usikkerheder af materialeparametre og bærrevnemodeller. På baggrund af disse usikkerheder anvendes metode i DK NA EN1990, designværdimetoden og en direkte kalibrering ved sikkerhedsindeksmetoden til at bestemmes partialkoefficienter for bæreevnens styrkeparametre og modelusikkerhed. Via sikkerhedsindeksmetoden bestemmes sikkerhedsindekset for bæreeevnemodellen ved anvendelse af de bestemte partialkoefficienter. En illustration af fremgangsmåden kan ses på Figur 2.1.



Figur 2.1: Skematisk beskrivelse af fremgangsmåde for bestemmelse af pålidelighed af FRP konstruktioner.

2.1 Structural Reliability Methods

I dette afsnit beskrives bestemmelsen af sikkerheden ved anvendelse af Structural Reliability Methods. Metoden er baseret på "Realiability-based code optimization præsenteret i ISO 2394 [2015]. Til at beskrive sikkerheden af en konstruktionsdel anvendes sikkerhedsindekset, β. Sikkerhedsindekset bestemmes på baggrund af sandsynligheden for svigt, hvilket kan udføres ved simulering f.eks. via Crude Monte Carlo simulering. Ud fra partialkoefficienterne, γ_{X_i} og γ_R, bestemmes designparameteren, z ud fra designlignin-

gen (2.1.1). Den karakteristiske værdi af bæreevnefunktionen, R og modelusikkerheden X_R, bestemmes ved 5%-fraktilen af deres produkt, hvorved der tages højde for bias i bæreevnemodellen.

$$zR(X_{1,k}/\gamma_{X_1})X_{R,k}/\gamma_R - S_d \geq 0 \tag{2.1.1}$$

z	Designparameter
R	Den undersøgte konstruktionsdels bæreevnefunktion
$X_{1,k}, X_{2,k}, ..$	Karakteristiske værdier for styrkeparametre (5% fraktil)
$\gamma_{X_1}, \gamma_{X_2}, ..$	Partialkoefficienter for styrkeparametre
$X_{R,k}$	Karakteristisk værdi af modelusikkerhed
S_d	Designlastkombination
γ_R	Partialkoefficient, der er knyttet til modelusikkerheden

$$S_d = \max\{S_{da}, S_{db}\} \tag{2.1.2}$$

$$S_{da} = (1-\chi)\gamma_{Ga}G_k \tag{2.1.3}$$

$$S_{db} = ((1-\chi)\gamma_{Gb}G_k + \chi\gamma_Q Q_k) \tag{2.1.4}$$

χ	Modellerer forholdet mellem variabel og permanent last
G_k	Karakteristisk permanent last
Q_k	Karakteristisk variabel last
γ_G	Partialkoefficient for permanent last
γ_Q	Partialkoefficient for variabel last

I Tabel 2.1 er vist anvendte partialkoefficienter for laster på bygninger ved kalibrering af partialkoefficienter.

Partialkoefficienter		
Permanent last (2.1.3)	γ_{Ga}	1.2
Permanent last (2.1.4)	γ_{Gb}	1.0
Variabel last	γ_Q	1.5

Tabel 2.1: Partialkoefficienter for laster i designligning. [DK NA EN1990, 2013]

Sikkerhedsindekset estimeres ved at undersøge brud på den undersøgte konstruktionsdel repræsenteret ved følgende generelle formel for brudgrænsetilstand.

$$g = zX_R R(X_1, X_2, ..) - ((1-\chi)G + \chi Q) \tag{2.1.5}$$

X_R	Modelusikkerhed
$X_1, X_2, ..$	Stokastiske variable
G	Permanent last
Q	Variabel last

Sikkerhedsindekset bestemmes med varierende lastforhold, χ, hvor en højere χ, se (2.1.3) og (2.1.4), kan repræsentere en ny konstruktion med lavere permanent last, grundet FRP's lave egenvægt, og hvor en lavere χ kan repræsentere en eksisterende konstruktion med FRP som forstærkning. Der udføres derfor 2 separate bestemmelser af sikkerhedsindekset, hvor den ene er svarende til en eksisterende konstruktion med varierende χ på 0,1-0,5 og den anden er svarende til en ny konstruktion med varierende χ på 0,5-0,9. For eksisterende konstruktion kan det i nogle tilfælde accepteres at benytte et lavere sikkerhedsniveau end for nye konstruktioner, grundet den højere pris for at forstærke en eksisterende bygning i forhold til at erstatte komponenter allerede under projekteringen af en konstruktion [Pedersen, 2015]. Grundet dette er det tilsigtet sikkerhedsindeks for eksisterende og nye konstruktioner forskelligt.

Modelusikkerheden, X_R, modelleres som en lognormalfordelt stokastisk variabel med middelværdi, bias og variationskoefficient, V_r, der begge er beskrevet i afsnit A.1.

Følgende stokastiske modeller anvendes for laster. Disse er baseret på værdier fra [DS/INF 172, 2009]:

	Fordelingsfunktion	COV	Karakteristisk værdi
Permanent last G	Normal	10 %	1,0 (50% fraktil)
Variabel last Q	Gumbel	40 %	1,0 (98% fraktil)

Tabel 2.2: Anvendte fordelingsfunktioner for kalibrering af sikkerhedsfaktor. [DS/INF 172, 2009]

Ved g< 0 er der brud for den undersøgte konstruktionsdel. Sandsynligheden for brud i en konstruktionsdel kan bestemmes ved:

$$P_f = \frac{\sum_{i=1}^{N} I[g(u_j)]}{N} \tag{2.1.6}$$

P_f	Sandsynligheden for brud i en konstruktionsdel
N	Antal simuleringer
u_j	Realisation nr. j
$I[g(u_j]$	Indikatorfunktion

$$I[g(u_j] = \begin{cases} 0 \text{ hvis } g(u_j) > 0 \text{ (sikker)} \\ 1 \text{ hvis } g(u_j) \leq 0 \text{ (brud)} \end{cases} \tag{2.1.7}$$

For tilstrækkelig nøjagtighed af P_f, udføres simulationen med et tilstrækkeligt antal mulige udfald. Ved eksempelvis $P_f = 10^{-5}$, hvilket svarer til sikkerhedsindeks 4,3, bør $N \geq 10^7$.

En nærmere vurdering af nøjagtigheden af sikkerhedsindekset vil blive beskrevet senere i rapporten. Sikkerhedsindekset, β, kan estimeres ved:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \tag{2.1.8}$$

Φ	Standardnormalfordeling

2.2 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af DK NA EN1990

I dette afsnit vises hvordan partialkoefficienten for styrkeparametre, γ_m, og partialkoefficienten γ_R, der er knyttet til modelusikkerheden bestemmes ved anvendelse af DK NA EN1990.

Tabel 2.3 viser γ_m afhængig af variationskoefficienterne for målte styrkeparametre.

Variationskoefficienterne for målte styrkeparametre	$\leq 5\%$	10%	15%	20%	25%	30%
γ_m	1.15	1,20	1.25	1.30	1.35	1.40

Tabel 2.3: Partialkoefficienter, γ_m afhængig af variationskoefficienterne for målte styrkeparametre. Der kan interpoleres i denne tabel. [DS/INF 172, 2009, Tabel 1]

Partialkoefficienten af modelusikkerheden, γ_R, bestemmes ved:

$$\gamma_R = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \tag{2.2.1}$$

γ_1	Delpartialkoefficient afhængig af brud
γ_2	Delpartialkoefficient for usikkerhed på beregningsmodel
γ_3	Delpartialkoefficient afhængig af omfang af kontrol

Tabel 2.4 viser γ_1 afhængig af brudformen for den undersøgte konstruktionsdel.

Brudform	Varslet med bæreevnereserve	Varslet uden bæreevnereserve	Uvarslet
γ_1	0,90	1,00	1,10

Tabel 2.4: Delpartialkoefficient, γ_1 anhængig af brudform [DS/INF 172, 2009, Tabel 2].

Tabel 2.5 viser γ_2 afhængig af variationskoefficienten for beregningsmodel, V_r.

V_r	$\leq 5\%$	10%	15%	20%	25%
γ_2	1.05	1,10	1.15	1.20	1.25

Tabel 2.5: Delpartialkoefficient, γ_2 afhængig af V_r. Der kan interpoleres i denne tabel. [DS/INF 172, 2009, Tabel 3]

Tabel 2.6 viser γ_3 afhængig af kontrolklasse.

Kontrolklasse	Skærpet	Normal	Lempet
γ_3	0,95	1,00	1,10

Tabel 2.6: Delpartialkoefficient, γ_3 afhængig af kontrolklasse [DS/INF 172, 2009, Tabel 4].

2.3 Designværdimetoden

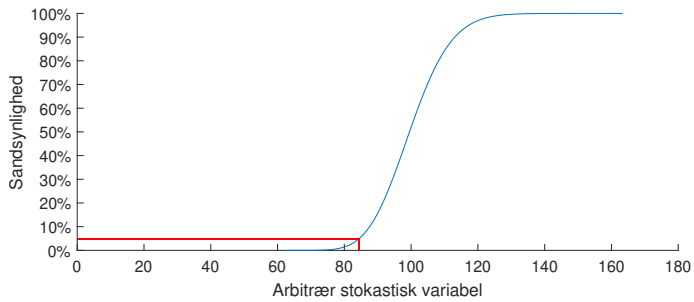
I dette afsnit beskrives generelt designværdimetoden, der kan anvendes til bestemmelse af partialkoefficienter, og det forklares hvilke antagelser, som anvendes ved metoden. Ved metoden bestemmes partialkoefficienten ud fra den stokastiske variabels designværdi, x_d og karakteristiske værdi, x_k. Partialkoefficienter for styrkeparametre er i designværdimetoden bestemt ved (2.3.1) og for laster bestemt ved (2.3.2).

$$\gamma = \frac{x_k}{x_d} \tag{2.3.1}$$

$$\gamma = \frac{x_d}{x_k} \tag{2.3.2}$$

x_k	Karakteristisk værdi af stokastisk variabel
x_d	Regningsmæssig værdi af stokastisk variabel

Den karakteristiske værdi for styrkeparametre og modelusikkerheder antages at kunne bestemmes som 5%-fraktilen af deres tilhørende antaget lognormalfordeling. En illustration af dette kan ses på Figur 2.2, hvor en lognormal fordelingsfunktion for en arbitrær stokastisk variabel med middelværdi og variationskoefficient på hhv. 100 og 0,1. I dette eksempel bliver den karakteristiske værdi bestemt til 85.



Figur 2.2: Illustration af bestemmelse karakteristiske værdi ved 5% fraktil for arbitrær lognormalfordelt stokastisk variabel.

Den regningsmæssig værdi, R_d, kan bestemmes ved sammenhængen mellem X og U-rum. Som et simpelt eksempel kan transformationen fra U til X-rum for en normalfordelt stokastisk variabel ses i (2.4.4), hvor der også i det tilhørende afsnit 2.4 kan læses mere om sammenhængen mellem X og U rum. Ved indsættelse af R som stokastisk variabel X og R_d som det tilgørende punkt U_R^*, som repræsenterer designkoordinatet for bæreevnen i U-rum, kan R_d bestemmes ved følgende:

$$R_d = \mu_R + u_R^* \sigma_R \tag{2.3.3}$$

Ved anvendelse af (2.4.1), der beskriver sammenhængen mellem α, β og U, kan R_d bestemmes ved:

$$R_d = \mu_R - \alpha_R \beta \sigma_R \tag{2.3.4}$$

Dette er funktionen som den regningsmæssige værdi for en normalfordelt stokastisk variabel bestemmes ved. Bestemmelse af α_R gøres normalt som beskrevet i afsnit 2.4 eller ved anvendelse af First-Order Reliability Method, hvor i designværdimetoden vælges α konservativt for til 0,8 for dominerende styrkeparametre og 0,8·0,4 for ikke-dominerende styrkeparametre. Ved designværdimetoden vælges α for dominerende og ikke dominerende laster til hhv. -0,7 og -0,7·0,4, hvilket resulterer i at længden af α-vektoren er mere en 1 og derved konservativ. En forudsætning, for disse standardiserede værdier er anvendelige, er at følgende udtryk skal være opfyldt. Dette er dog ikke undersøgt i dette projekt.

$$0{,}16 \leq \frac{\sigma_E}{\sigma_R} \leq 7{,}6 \tag{2.3.5}$$

σ_E	Spredningen af lasten
σ_R	Spredningen af bæreevnen

Da styrkeparametre antages at være lognormalfordelte, gøres tilsvarende for transformation fra U til X-rum, dog ved anvendelse af (2.4.6). Den regningsmæssige værdi for en lognormalfordelt stokastisk variabel kan bestemmes ved:

$$x_d = \mu_X \exp\left(-\alpha\beta^t \sqrt{\ln(V^2+1)} - \ln\sqrt{V^2+1}\right) \tag{2.3.6}$$

μ_X	Middelværdi af styrkeparameter
α	0,8 for styrkeparametre
V	Variationskoefficient af styrkeparameter

Ved små variationskoefficienter kan, x_d, bestemmes ved:

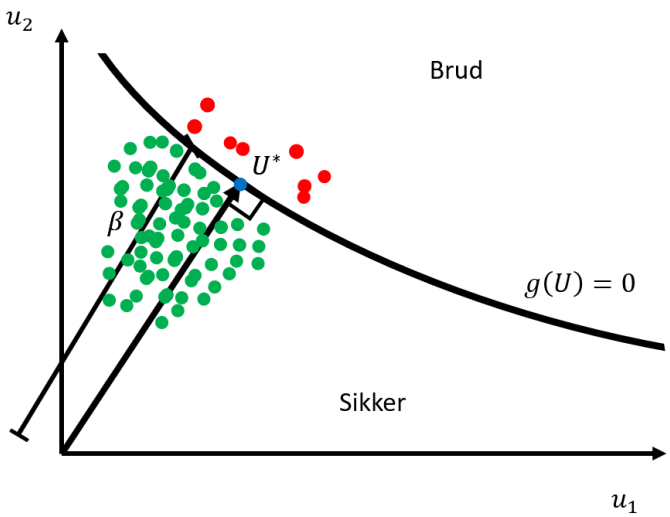
$$x_d = \mu_X \exp\left(-\alpha\beta^t V\right) \tag{2.3.7}$$

2.4 Bestemmelse af de stokatiske variables vigtighed

For at bedømme vigtigheden af de stokastiske variabler bestemmes α-vektoren ved:

$$\alpha = \frac{U^*}{\beta} \tag{2.4.1}$$

På Figur 2.3 er illustreret sammenhængen mellem U^* og β. De røde og grønne punkter illustrerer hver en realisation i U-rum, hvor de grønne punkter illustrerer realisationer i det sikre og røde det usikre område. Det kan ses, at det blå punkt, U^*, definerer designpunktet i U-rum og er vektoren, som går fra origo og til det nærmeste punkt på brudlinjen, $g(U) = 0$. Afstanden, β, definerer længden af U^*. Enhedsvektoren af U^*-vektoren defineres som α-vektoren.



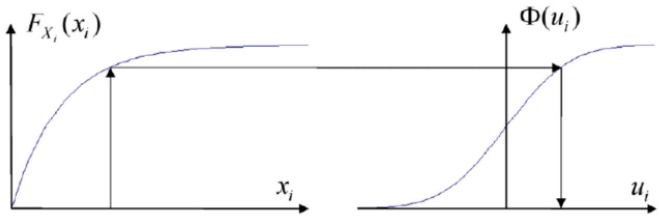
Figur 2.3: Illustration af U^* og β i U-rum.

U-vektoren beskriver de stokastiske variabler efter de er normaliseret og normalfordelte i U-rum. Transformationen fra X til U-rum gøres ved:

$$F_x(X) = \Phi(U) \tag{2.4.2}$$

F_x	Den stokastiske variables fordelingsfunktion i X rum
Φ	Standard normalfordelingsfunktion

Transformationen kan illustreres som på Figur 2.4.



Figur 2.4: Transformation til normaliseret normalfordelt variable. [Sørensen, 2011]

Det mest simple eksempel er for normalfordelte stokastiske variable, såsom permnent last, hvor fordelingsfunktionen ser ud på følgende måde:

$$F_x(X) = \Phi(\frac{X - \mu_X}{\sigma_X}) \tag{2.4.3}$$

hvorved U via (2.4.2) kan bestemmes til:

$$U = \frac{X - \mu_X}{\sigma_X} \tag{2.4.4}$$

For lognormalfordelte stokastiske variable, såsom styrkeparametre eller modelusikkerheder, ser transformationen ud på følgende måde:

$$F_x(X) = \Phi(\frac{\ln X - \mu_L}{\sigma_L}) \tag{2.4.5}$$

$$U = \frac{\ln X - \mu_L}{\sigma_L} \tag{2.4.6}$$

hvor σ_L og μ_L bestemmes ved:

$$\sigma_L = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2} + 1\right)} \tag{2.4.7}$$

$$\mu_L = \ln \mu - \frac{1}{2}\sigma_L^2 \tag{2.4.8}$$

For Gumbelfordelte stokastiske variable, såsom variable last, ser transformationen ud på følgende måde:

$$F_X(x) = \exp\{-\exp\{-a(x - b)\}\} \tag{2.4.9}$$

hvor a og b bestemmes ved:

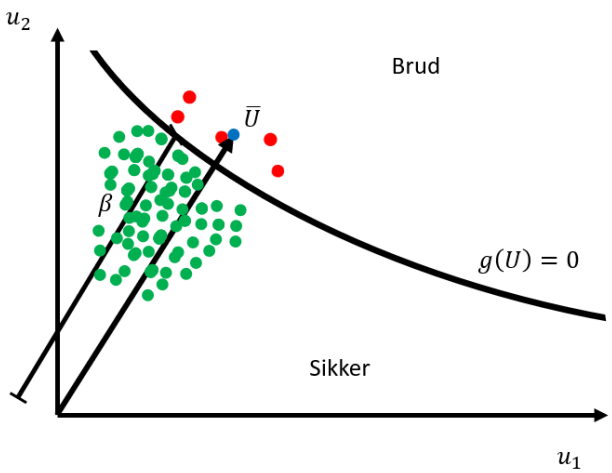
$$a = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma_X} \tag{2.4.10}$$

$$b = \mu_X - \frac{0.5772}{a} \tag{2.4.11}$$

og U derved kan bestemmes ved:

$$U = \Phi^{-1}(\exp\{-\exp\{-a(X-b)\}\}) \tag{2.4.12}$$

Da den præcise placering af designpunktet, U^*, ikke er tilgængelig i forbindelse med simulering, udføres der i stedet en tilnærmet metode. Her bestemmes designpunktet som middelværdien for U-koordinaterne for alle simuleringer, hvor $g(U) < 0$. En illustration af denne metode er vist på Figur 2.5.

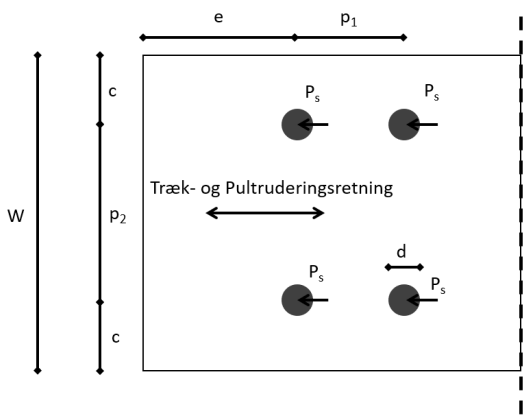


Figur 2.5: Illustration af U^* og β i U-rum.

Enhedsvektoren for den tilnærmede $\bar{U}$-vektor er derved den tilnærmede α-vektor.

3. Boltsamlinger

I dette afsnit undersøges bæreevnemodeller for boltsamlinger med forskellige konfigurationer. For at kunne statistisk vurdere bæreevnemodellerne, sammenlignes resultaterne fra bæreevnemodellerne med resultater fra eksperimentelle forsøg på FRP plader med forskellige tykkelser og bredder, og med forskellige konfigurationer for placering af bolte. På Figur 3.1 er vist definitioner på diverse variabler i forsøgene. Udover de viste variabler, varieres tykkelsen af pladen, t, og diameter af bolten, d_0, ligeledes. Alle forsøg er udført ved træk i FRP pladernes pultruderingsretning.



Figur 3.1: Variable konfigurationer for boltsamlinger

w	Bredde af pladen
e	Afstand fra belastet kant til nærmeste bolt
c	Afstand fra ubelastet kant til nærmeste bolt
d	Diameter af hul
p_1	Afstand mellem bolte parallel med kraftretningen
p_2	Afstand mellem bolte vinkelret på kraftretningen
p_s	Trækkraft virkende på bolt

3.1 Bæreevnemodeller

Der undersøges to bæreevnemodeller for denne type brudscenarie, hvor en model er præsenteret af Oppe [2008] og en anden model beskrevet i Eurocode [2020].

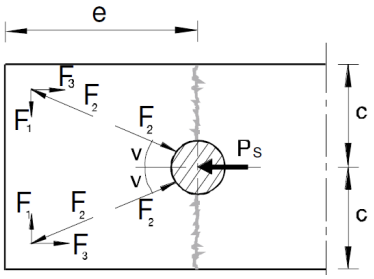
3.1.1 Bæreevnemodel af Matthias Oppe

Bæreevnen af boltesamlingen bestemmes på basis af følgende spændingsbetingelser [Oppe, 2008].

Ved brudmåde 1 opstår bruddet ved at trækspændingen mellem boltehullerne overstiger pladens trækstyrke.

Bæreevne for brudmåde 1:

$$
\begin{aligned}
P_s \leq & 2\,(c - d_0/2) \cdot t \cdot f_{t,0^\circ}/k_{tc} \\
& k_{tc} = C \cdot (k_{te} - 1) + 1{,}1 \\
& k_{te} = 2 + (w/d_0 - 1) - 1.5\frac{w/d_0 - 1}{w/d_0 + 1}\theta \\
& \theta = 1.5 - 0.5/(e/w)
\end{aligned}
\tag{3.1.1}
$$



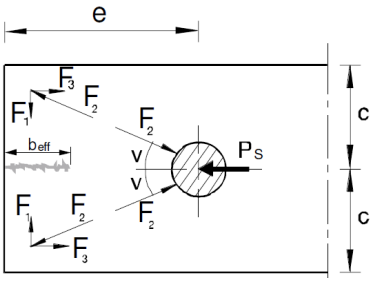
Figur 3.2: Træk i længderetning ved siden af bolt.

$f_{t,0^\circ}$	Axialtrækstyrke
k_{tc}	Spændingsintensitetsfaktor
d_0	Huldiameter
C	0,12

Ved brudmåde 2 opstår bruddet ved at pladen spaltes i området foran en bolt.

Bæreevne for brudmåde 2:

$$
\begin{aligned}
P_s \leq & 2 \cdot b_{eff} \cdot t \cdot f_{t,90^\circ}/\tan\nu \\
& \tan\nu = (c/2 + d/4)\,/\,(e - d_0/2) \\
& b_{eff} = 2e - \frac{c + d_0/2}{\tan\nu} \geq d
\end{aligned}
\tag{3.1.2}
$$



Figur 3.3: Spaltning i område foran bolt.

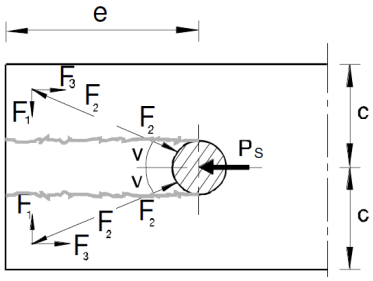
b_{eff}	Effektive spaltebredde
$f_{t,90^\circ}$	Tværgående trækstyrke
d	Boltdiameter

Ved brudmåde 3 opstår bruddet ved at forskydningsspændingen i pladen foran bolten overstiger pladens forskydningsstyrke i to linjen foran bolten.

Bæreevne for brudmåde 3:

$$P_s \leq 2\left(e - d_0/2\right) \cdot t \cdot f_{\tau,0^\circ} \tag{3.1.3}$$

$f_{\tau,0^\circ}$ | Axial forskydningsstyrke



Figur 3.4: Udrivning af laminat foran bolt.

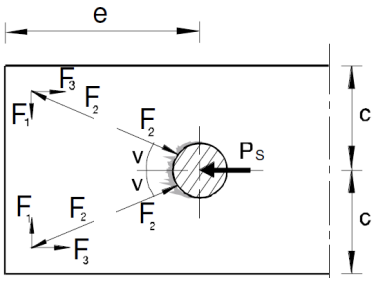
Ved brudmåde 4 opstår bruddet ved at trykspændingen foran bolten overstiger pladens trykstyrke, hvorved bolten trykkes ind i pladen.

Bæreevne for brudmåde 4:

$$P_s \leq d \cdot t \cdot f_{c,v}/k_{cc}$$

$$f_{c,v} = \min \begin{cases} f_{c,90^\circ} + f_{\tau,90^\circ} \cdot \cot v \\ f_{c,0^\circ} + f_{\tau,90^\circ} \cdot \tan v \end{cases} \tag{3.1.4}$$

$f_{\tau,90^\circ}$ | Tværgående forskydningsstyrke



Figur 3.5: Skråt fordelingstryk foran bolt.

Ved brudmåde 4 kan bæreevnen være højere ved bestemte randbetingelser. En af disse randbetingelser kunne være fastholdelse af pladens sider. Da forsøget er udført ved fastholdelse af pladens ender, er det vurderet af Matthias Oppe, at denne brudmåde vil have højere bæreevne end ud fra (3.5)[Oppe, 2008]. Denne brudmåde anvendes derfor ikke for dette forsøg.

3.1.2 Bæreevnemodel i Eurocode

Bæreevnemodellen præsenteret i *Design of fibre reinforced polymer structures*[Eurocode, 2020] består, ligesom tidligere bæreevnemodel, af 4 brudmåder, der skal verificeres. Disse brudmåder er beskrevet som:

- Net-tension
- Pin-bearing
- Shear-out
- Block-shear

hvor brudmåden for *Net-tension* er tilsvarende til brudmåden *Træk i længderetning ved siden af bolt*, *Pin-bearing* tilsvarende til *Skråt fordelingstryk foran bolt* og *Shear-out* tilsvarende til

Udrivning af laminat foran bolt fra tidligere bæreevnemodel.

Net-tension

Den karakteristiske bæreevne ved *Net-tension* brud bestemmes ud fra (3.1.5)

$$N_{x,nt,k} = \frac{1}{k_{tc}} \cdot (w - n_{b,1} \cdot d_0) \cdot t \cdot f_{t,0°,k} \tag{3.1.5}$$

$N_{x,nt,k}$	Karakteristiske bæreevne ved *Net-tension* brud
k_{tc}	Spændingsintensitetsfaktor
$n_{b,1}$	Antal bolte i række hvor brud opstår
$f_{t,0°,k}$	Karakteristiske trækstyrke i trækretningen

Spændingsintensitetsfaktoren, k_{tc}, bestemmes i Tabel 3.1 ud fra konfigurationen af boltesamlingen.

Boltsamlingskonfiguration	k_{tc}
Enkelt	2,0
1×2 (Enkelt række)	2,5
2×1 (Enkelt kolonne)	2,5
1×3	2,5
3×1	2,5
2×2	2,0
3×3	1,5
1×1 (Forskudt)	2,0
2×2 (Forskudt)	2,0

Tabel 3.1: Spændingsintensitetsfaktor. [Eurocode, 2020, Table 12.2]

Pin-bearing

Den karakteristiske bæreevne ved *Pin-bearing* brud bestemmes ud fra (3.1.6)

$$V_{x,br,k} = 1{,}5 \frac{1}{k_{tc}} \cdot dt \cdot f_{c,0°,k} \tag{3.1.6}$$

$V_{X,br,k}$	Karakteristiske bæreevne ved *Pin-bearing* brud
k_{cc}	Reduktionsfaktor $\left(\frac{d_0}{d}\right)^2$
$f_{c,0°,k}$	Karakteristiske trykstyrke i trækretningen

Shear-out

Den karakteristiske bæreevne ved *Shear-out* brud er afhængig af antal bolte i samlingen. Ved 1 bolt bestemmes bæreevnen ved (3.1.7).

$$V_{so,1,k} = 1{,}5(e_1 - 0.5d_0) \cdot t \cdot f_{\tau,k} \tag{3.1.7}$$

$V_{so,1,k}$	Karakteristiske bæreevne ved *Shear-out* brud
$f_{\tau,k}$	Karakteristiske plane forskydningsstyrke

Ved 2 bolte bestemmes bæreevnen ved (3.1.8).

$$V_{so,2,k} = 0{,}9(e_1 - 0.5d_0 + p_1) \cdot t \cdot f_{\tau,k} \tag{3.1.8}$$

Ved 3 eller 4 bolte bestemmes bæreevnen ved (3.1.9), hvor i er antallet af bolte.

$$V_{so,i,k} = 1{,}3\left[(i-1)p_1\right] \cdot t \cdot f_{\tau,k} \tag{3.1.9}$$

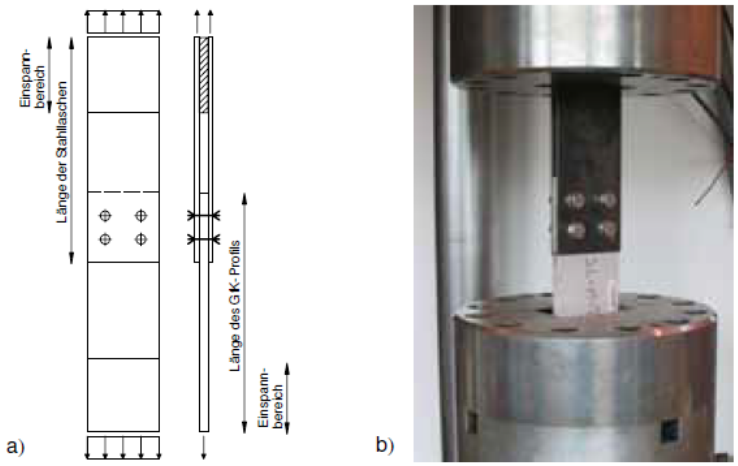
Block-shear

$$N_{bs,k} = 0{,}5\left(A_{ns} \cdot f_{\tau,k} + A_{nt} \cdot f_{t,0°,k}\right) \tag{3.1.10}$$

A_{ns}	Nettoareal påvirket af forskydning
A_{nt}	Nettoareal påvirket af træk

3.2 Forsøgsopstilling

Forsøget, som er udført af Matthias Oppe, udføres ved at en FRP plade med x antal huller monteres sammen med 2 andre plader via bolte. Pladerne fastgøres i deres ender som vist på følgende Figur 3.6.



Figur 3.6: Forsøgsopstilling for boltesamlingsforsøg af Oppe[Oppe, 2008].

Forsøget udføres ved at enderne trækkes fra hinanden indtil brud. Det sikres at både de benyttede bolte og de plader, der ikke er en del af forsøget, har tilstrækkelig bæreevne til, at der opstår brud i FRP pladen, før der opstår brud i boltene eller de andre plader.

3.3 Materialedata

I Tabel 3.2 er middelværdier af materialeegenskaber for de testede FRP plader præsenteret. Konfigurationer og resultater for hvert boltsamlingsforsøg er præsenteret i appendiks på Tabel B.1.

Materialeegenskab	Enhed	Middelværdi
Axial trækstyrke, $f_{t,0°}$	MPa	380
Tværgående trækstyrke, $f_{t,90°}$	MPa	54
Axial trykstyrke, $f_{c,0°}$	MPa	334
Tværgående trykstyrke, $f_{c,90°}$	MPa	117
Axial forskydningstyrke, $f_{\tau,0°}$	MPa	47
Tværgående forskydningsstyrke, $f_{\tau,90°}$	MPa	68

Tabel 3.2: Anvendte materialeegenskaber. [Oppe, 2008, Tabelle 6-1]

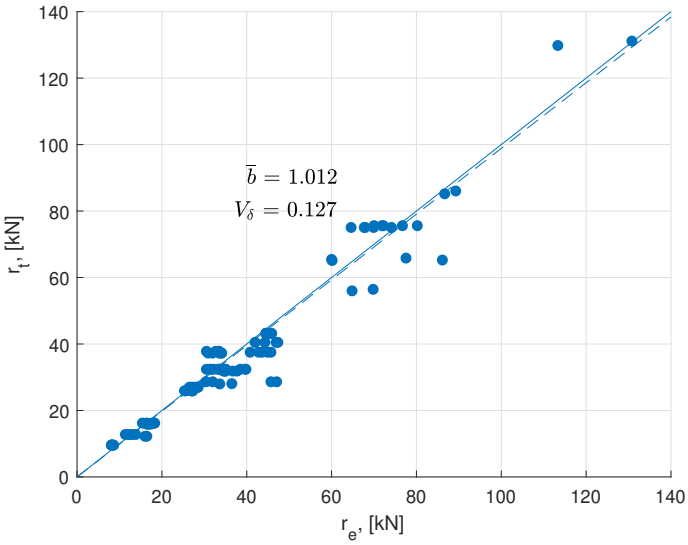
3.4 Statistisk Vurdering af Bæreevnemodel af Matthias Oppe

Der udføres en statistisk vurdering af bæreevnemodellen, som skal danne grundlag for bestemmelsen af de tilhørende partialkoefficienter ved anvendelse af plader af FRP i forbindelse med boltesamlinger.

3.4.1 Bestemmelse af Bias og Variationskoefficient for Modelusikkerheden

Bias af bæreevnemodellen bestemmes ved at plotte resultaterne fra eksperimentet og de tilsvarende teoretiske bæreevner og bestemme hældningen mellem punkterne ved mindste kvadraters metode. Den teoretiske bæreevne bestemmes som minimumsværdien af bæreevnerne bestemt ved (3.1.1), (3.1.2) og (3.1.3). Variationskoefficient for modelusikkerheden bestemmes ved ved antagelse af at den grundlæggende usikkerhed er lognormalfordelt. Fremgangsmåden for bestemmelse af bias og variationskoefficient for modelusikkerheden er nærmere beskrevet i Appendiks A.

På Figur 3.7 kan det ses at bæreevnemodellen af Oppe resulterer i en bias på omkring 1% i forhold til den eksperimentelle bæreevne, r_e, der er bestemt ved forsøg, og en variationskoefficient for modelusikkerheden på 0,127. variationskoefficient for modelusikkerheden er bestemt som Dette indikerer, at bæreevnemodellen er god til at estimere boltesamlingernes reelle bæreevne.



Figur 3.7: r_e-r_t-diagram for Oppe's model.

Da modellen består af flere brudmåder bestemmes, via (A.1.8), variationskoefficienten af bæreevnen, relateret til usikkerheder i de fysiske materialeparametre modelleret i **X**, for hver brudmåde. Variationskoefficienterne er bestemt ved bæreevnemodellens middelværdi og kan ses i Tabel 3.3.

	Brudmåde 1	Brudmåde 2	Brudmåde 3
V_{rt}	0,11	0,05	0,03

Tabel 3.3: Variationskoefficienterne for modellernes variable **X**.

Den totale variation for hver brudmåde bestemmes ved:

$$V_r = \sqrt{V_\delta^2 + V_{rt}^2} \tag{3.4.1}$$

Den totale variation for hver brudmåde er vist i Tabel 3.4.

	Brudmåde 1	Brudmåde 2	Brudmåde 3
V_r	0,17	0,13	0,13

Tabel 3.4: Den totale variation af bæreevnemodellen.

3.4.2 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af DK NA EN1990

I dette afsnit bestemmes partialkoefficienter for styrkeparametre, der sikrer en tilstrækkelig sikkerhed. Sikkerheden er repræsenteret ved sikkerhedsindekset der ved denne brudform tilsigtes 4,3, som er anbefalet af DK NA EN1990, da der i denne rapport ses på anvendelse af FRP i bygninger og anvendelse af DK NA for bygninger. Der benyttes 3 metoder til bestemmelse af partialkoefficienter. Disse metoder består af en metode, hvori

partialkoefficienterne bliver bestemt baseret på metoden anvendt i DK NA EN1990, designværdimetoden og en direkte kalibrering ved anvendelse af sikkerhedsindeksmetoden.

For hver bæreevnemodel opskrives en formel for beregning af den regningsmæssige bæreevne, som kan bestemmes ved to metoder, (3.4.2) og (3.4.3). Disse er begge præsenteret i Eurocode[DS/INF 172, 2009]. Der vælges i denne rapport at benytte (3.4.2). Da der i (2.1.1) er taget højde for bias i bæreevneformlen justeres der ikke for bias i formel (3.4.2) og (3.4.3).

$$R_d = \frac{R(X_k/\gamma_m)}{\gamma_R} \tag{3.4.2}$$

$$R_d = R(\frac{X_k}{\gamma_M}) \tag{3.4.3}$$

Fremgangsmåden for metoden i DK NA EN1990 er tidligere beskrevet i afsnit 2.2. Ved anvendelse af DK NA EN1990 bestemmes Partialkoefficienterne, γ_m og γ_R baseret på hhv. bæreevnens stokastiske variablers variationskoefficient og modelusikkerhedens variationskoefficient. Det vælges at brudmådernes individuelle styrker, $f_{t,0°}, f_{t,90°}, f_{\tau,0°}$ modelleres som stokastiske variable, hvorved én partialkoefficient for styrken, γ_m og én partialkoefficient for modelusikkerheden, γ_R bestemmes for hver brudmåde. Variationskoefficienten for styrkerne er vist i Tabel 3.5.

$f_{t,0°}$	$f_{t,90°}$	$f_{\tau,0°}$
0,1124	0,0276	0,0187

Tabel 3.5: Variationskoefficienter for styrker anvendt i bæreevnemodel af Oppe. [Oppe, 2008, s. 154]

Da der kan interpoleres i Tabel 2.3 kan partialkoefficienterne for styrkerne bestemmes via værdier fra Tabel 3.5 til følgende værdier:

$f_{t,0°}$	$f_{t,90°}$	$f_{\tau,0°}$
1,17	1.13	1.12

Tabel 3.6: Partialkoefficienter, γ_m, for styrker anvendt i bæreevnemodel af Oppe. [Oppe, 2008]

Delpartialkoefficient, γ_1, fastsættes til 1,00 via Tabel 2.4. Via værdier fra Tabel 3.4 bestemmes én γ_2 for hver brudmåde til følgende:

	Brudmåde 1	Brudmåde 2	Brudmåde 3
γ_2	1,17	1,13	1,13

Tabel 3.7: Delpartialkoefficienter, γ_2, for bæreevnemodel af Oppe.

Grundet at der i dette projekt undersøges generel brug af FRP i konstruktioner antages der normal kontrolklassen, hvorved $\gamma_3 = 1,00$ og γ_R kan via (2.2.1) bestemmes for hver brudmåde til:

	Brudmåde 1	Brudmåde 2	Brudmåde 3
γ_R	1,17	1,13	1,13

Tabel 3.8: Partialkoefficienter, γ_R, for bæreevnemodel af Oppe.

3.4.3 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af Designværdimetoden

Fremgangsmåden for designværdimetoden er tidligere beskrevet i afsnit 2.3. Da variationskoefficienten for modelusikkerheden er højere end variationskoefficienterne for styrkeparametrene, som kan ses i Tabel 3.5 og Tabel 3.4, bestemmes partialkoefficienten γ_R som den dominerende partialkoefficient med $\alpha = 0{,}8$, mens γ_m bestemmes på tilsvarende måde som ikke-dominerende, hvor α i det tilfælde er $0{,}8 \cdot 0{,}4$. Da det tilsigtet sikkerhedsindeks for eksisterende og nye konstruktioner er forskelligt, bestemmes der ét par partialkoefficienter for hver type konstruktion. Værdier bestemt ud fra (2.3.7) er vist i Tabel 3.9 for eksisterende konstruktioner og Tabel 3.10 for nye konstruktioner.

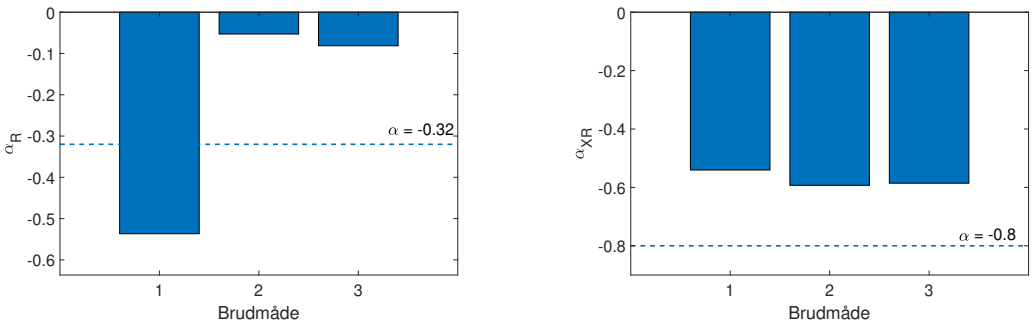
	Brudmåde 1	Brudmåde 2	Brudmåde 3
γ_R	1,26	1,21	1,20
γ_m	0,95	0,99	0,98

Tabel 3.9: Partialkoefficienter, γ_R og γ_m, for eksisterende konstruktioner bestemt ved designværdimetoden.

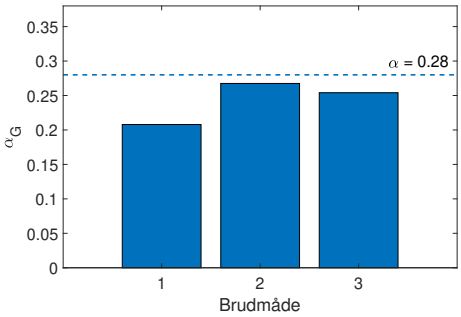
	Brudmåde 1	Brudmåde 2	Brudmåde 3
γ_R	1,35	1,27	1,26
γ_m	0,97	0,99	0,99

Tabel 3.10: Partialkoefficienter, γ_R og γ_m, for nye konstruktioner bestemt ved designværdimetoden.

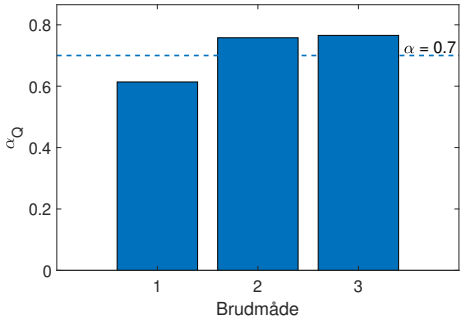
α-vektoren bestemmes både for eksisterende konstruktion ved lastforhold $\chi = 0{,}3$ og for nye konstruktion ved lastforhold $\chi = 0{,}7$. De tilnærmede α-værdier er vist i Figur 3.8 og Figur 3.9.



(a) R. **(b)** X_R.

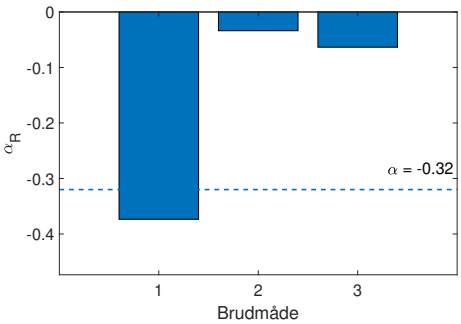


(c) G.

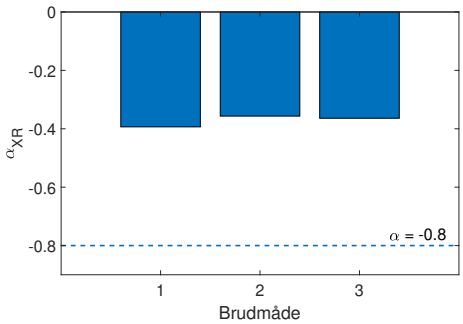


(d) Q.

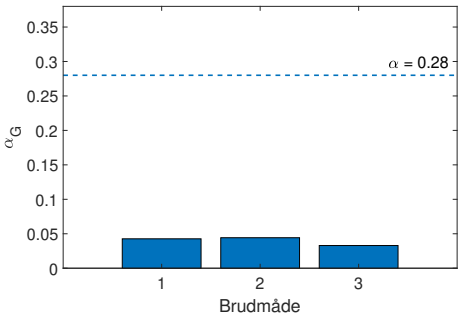
Figur 3.8: α værdier for de stokastiske variable for hver brudmåde for eksisterende konstruktioner. Den stiplede linje repræsenterer den standardiserede værdi brugt ved designværdimetoden.



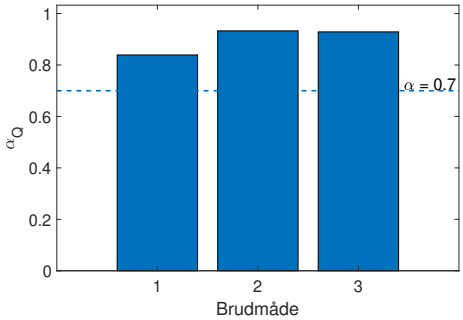
(a) R.



(b) X_R.



(c) G.



(d) Q.

Figur 3.9: α værdier for de stokastiske variable for hver brudmåde for nye konstruktioner. Den stiplede linje repræsenterer den standardiserede værdi brugt ved designværdimetoden.

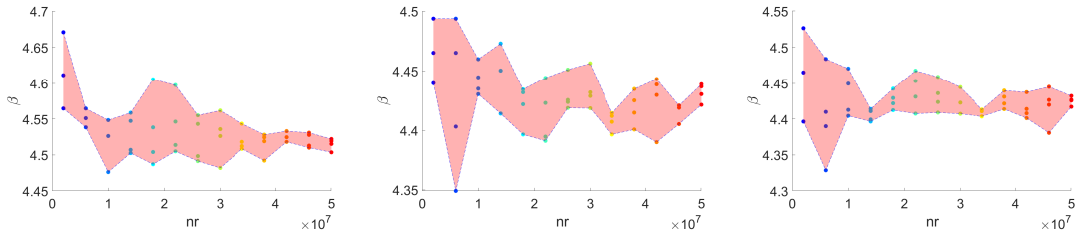
Det kan ses både på Figur 3.8 og Figur 3.9, at den tidligere antagelse om at modelusikkerhden er den dominerende stokastisk variabel på styrkesiden er korrekt baseret på størrelsen af deres tilhørende α værdier.

3.4.4 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra DK NA

For at bestemme sikkerhedsindekset på baggrund af disse partialkoefficienter anvendes *structural reliability methods* ved brug af Crude Monte Carlo simulering, hvilket er nærmere beskrevet i kapitel 2.1.

For at sikre, at der er anvendt et tilstrækkelig antal realisationer i simuleringen, udfø-

res der en konvergensanalyse, hvor antallet af realisationer i simuleringen øges indtil at resultaterne konvergerer. For hvert simuleringstrin, f.eks. ved 500.000 realisationer, køres simuleringen 4 gange. Simuleringer ved samme simuleringstrin er på Figur 3.10 indikeret med ens farve. Vurderingen af opnået konvergens udføres udelukkende ved visuel undersøgelse af resultaterne og ved $\chi = 0{,}7$. Resultaterne af konvergensanalysen er illustreret på Figur 3.10.



(a) Brudmåde 1. **(b)** Brudmåde 2. **(c)** Brudmåde 3.

Figur 3.10: Konvergensanalyse af boltsamlingsmodel. Punkternes farver indikerer hvilke punkter der har samme antal realisationer.

Det er vurderet at nøjagtigheden af sikkerhedsindekset er tilstrækkeligt omkring 50.000.000 realisationer. Spredningen af P_f kan bestemmes ved:

$$s = \sqrt{\frac{P_f(1 - P_f)}{N}} \tag{3.4.4}$$

Ved anvendelse af 50.000.000 realisationer resulterer dette i en spredning, s, på $4{,}133 \times 10^{-7}$.

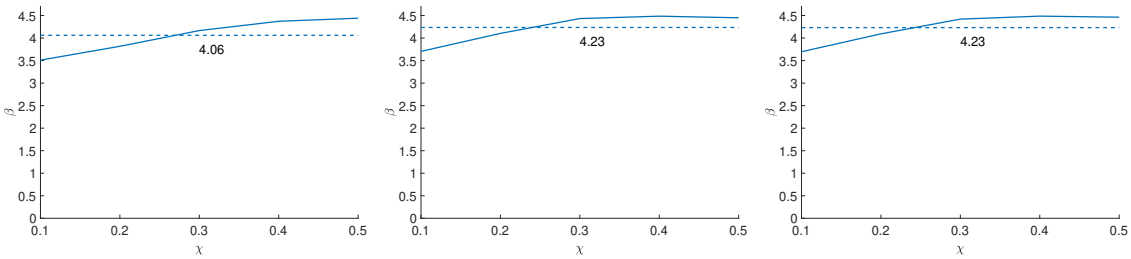
For at kunne vurdere nøjagtigheden, indsættes $P_f \pm s$ i (2.1.8) med $P_f = 10^{-5}$ for at se hvilken indflydelse spredning s har på sikkerhedsindekset.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f \pm s) = [4.29 \quad 4.31] \tag{3.4.5}$$

Nøjagtigheden af sikkerhedsindekset er derfor vurderet tilstrækkeligt ved 50.000.000 realisationer, hvilket vil blive anvendt for resterende simuleringer.

Sikkerhedsindeks for Eksisterende Konstruktioner

Sikkerhedsindekser med χ værdier mellem 0,1 og 0,5, hvilket kan svare til eksisterende konstruktioner med højere egenvægt, er vist på Figur 3.11. Da sikkerhedsindekset varierer med lastforholdet bestemmes det overordnede sikkerhedsindeks som middelværdien af sikkerhedsindekserne for lastforhold mellem 0,1 og 0,5.



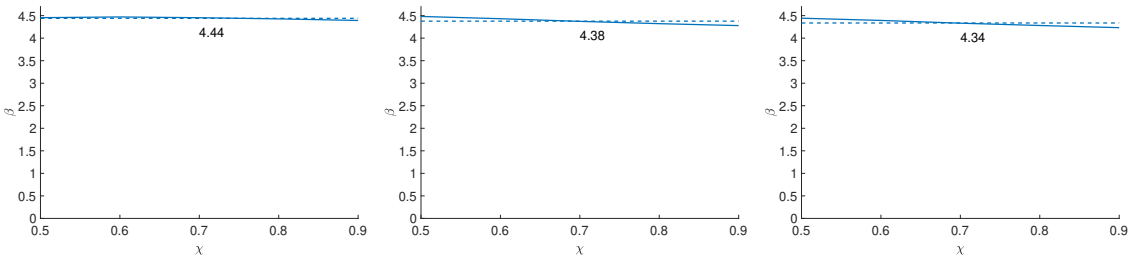
(a) Brudmåde 1. **(b)** Brudmåde 2. **(c)** Brudmåde 3.

Figur 3.11: Sikkerhedsindeks for eksisterende konstruktioner ved partialkoefficienter bestemt via [DS/INF 172, 2009]. Den stiplede linje illustrerer middelværdien.

På Figur 3.11 kan det ses at ved χ mellem 0,1 og 0,5 og partialkoefficienter bestemt ved DK NA EN1990 resulterer for brudmåde 2 og 3 i over det tilsigtet sikkerhedsindeks på 3,8, mens brudmåde 1 resulterer i lavere sikkerhedsindeks dog stadig over det tilsigtet.

Sikkerhedsindeks for Nye Konstruktioner

Samme fremgangsmåde gøres tilsvarende for χ i intervallet 0,5-0,9, hvilket kan svare til nye konstruktioner med, hvor der er anvendt FRP, hvilket vil resulterer i lavere egenvægt. Det tilsigtet sikkerhedsindeks er 4,3.



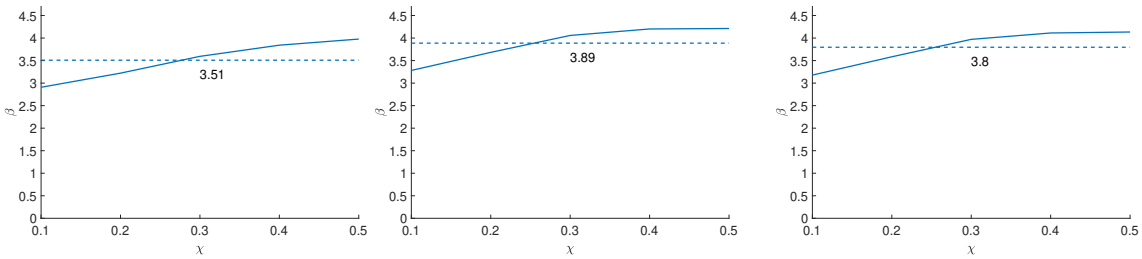
(a) Brudmåde 1. **(b)** Brudmåde 2. **(c)** Brudmåde 3.

Figur 3.12: Sikkerhedsindeks for nye konstruktioner ved partialkoefficienter bestemt via [DS/INF 172, 2009].

På Figur 3.12 kan det ses at ved χ mellem 0,5 og 0,9 og partialkoefficienter bestemt ved DK NA EN1990 resulterer alle brudmåder i et sikkerhedsindeks over det tilsigtet sikkerhedsindeks.

3.4.5 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra Designværdimetoden

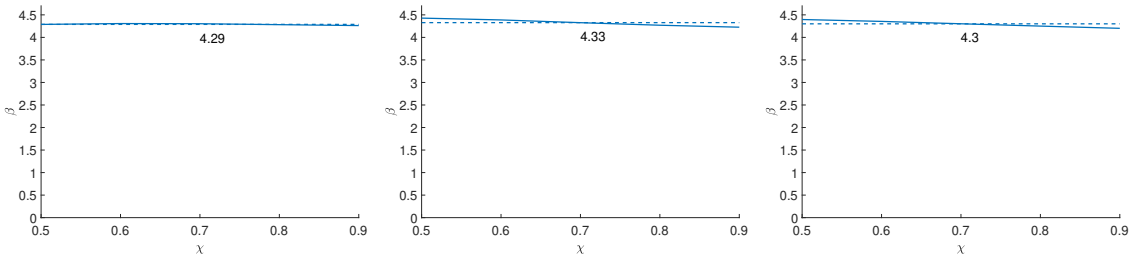
Sikkerhedsindekset bestemmes på baggrund af partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden, som er kan ses i Tabel 3.9 og Tabel 3.10. På Figur 3.13 og Figur 3.14 kan sikkerhedsindekset som funktion af lastforhold, χ, med partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden ses. Disse er som tidligere opdelt for eksisterende og nye konstruktioner.



(a) Brudmåde 1. **(b)** Brudmåde 2. **(c)** Brudmåde 3.

Figur 3.13: Sikkerhedsindeks for eksisterende konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, ved partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden.

For eksisterende konstruktioner kan det ses på Figur 3.13, at designværdimetoden for alle brudmetoder generelt resulterer i et sikkerhedsindeks under det tilsigtet, hvor brudmåde 2 dog resulterer i et sikkerhedsindeks over det tilsigtet.



(a) Brudmåde 1. **(b)** Brudmåde 2. **(c)** Brudmåde 3.

Figur 3.14: Sikkerhedsindeks for nye konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, ved partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden.

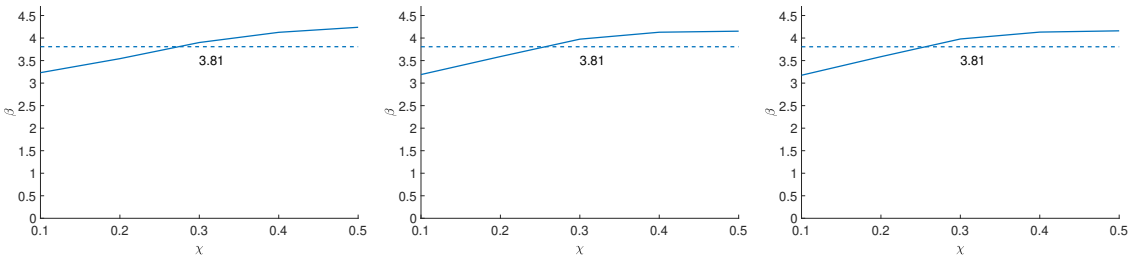
For nye konstruktioner kan det ses på Figur 3.14, at designværdimetoden for alle brudmåder resulterer i et sikkerhedsindeks omkring det tilsigtet.

3.4.6 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Direkte Anvendelse af Sikkerhedsindeksmetoden

Ved denne metode kalibreres partialkoefficienterne direkte ved anvendelse af sikkerhedsindeksmetoden. Der tages udgangspunkt i partialkoefficienter bestemt via DK NA EN1990, hvor partialkoefficienten γ_R fra DK NA EN1990 anvendes, mens partialkoefficienten γ_m øges/sænkes indtil det tilsigtet sikkerhedsindeks er opnået. Ved sænkning af γ_m til værdier givet i Tabel 3.11 og anvendelse af γ_R værdier givet i Tabel 3.8 opnås sikkerhedsindekser i Figur 3.15

$f_{t,0°}$	$f_{t,90°}$	$f_{\tau,0°}$
1,10	1.04	1.04

Tabel 3.11: Partialkoefficienter, γ_m, for styrker anvendt i bæreevnemodel af Oppe [Oppe, 2008] bestemt ved direkte kalibrering og for eksisterende konstruktioner.



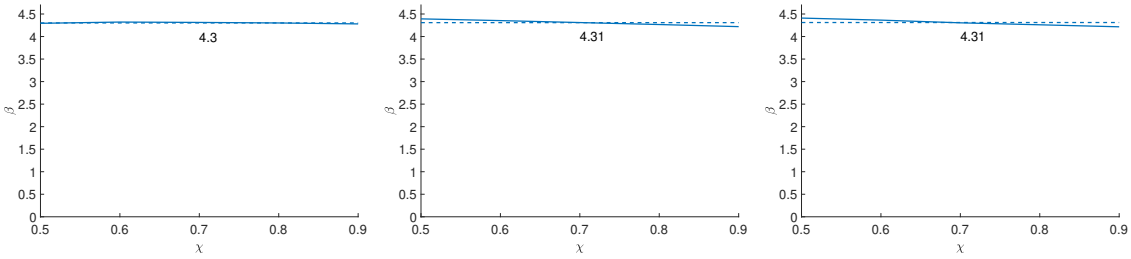
(a) Brudmåde 1. **(b)** Brudmåde 2. **(c)** Brudmåde 3.

Figur 3.15: Sikkerhedsindeks for eksisterende konstruktioner ved partialkoefficienter bestemt ved direkte kalibrering.

Samme fremgangsmåde gøres for nye konstruktioner, hvor γ_m sænkes til værdier givet i Tabel 3.12, hvilket resulterer i sikkerhedindekser givet i Figur 3.16.

$f_{t,0°}$	$f_{t,90°}$	$f_{\tau,0°}$
1,12	1.10	1.11

Tabel 3.12: Partialkoefficienter, γ_m, for styrker anvendt i bæreevnemodel af Oppe bestemt ved direkte kalibrering og for nye konstruktioner.



(a) Brudmåde 1. **(b)** Brudmåde 2. **(c)** Brudmåde 3.

Figur 3.16: Sikkerhedsindeks for nye konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, ved partialkoefficienter bestemt ved direkte kalibrering.

3.5 Statistisk Vurdering af Bæreevnemodel i Eurocode

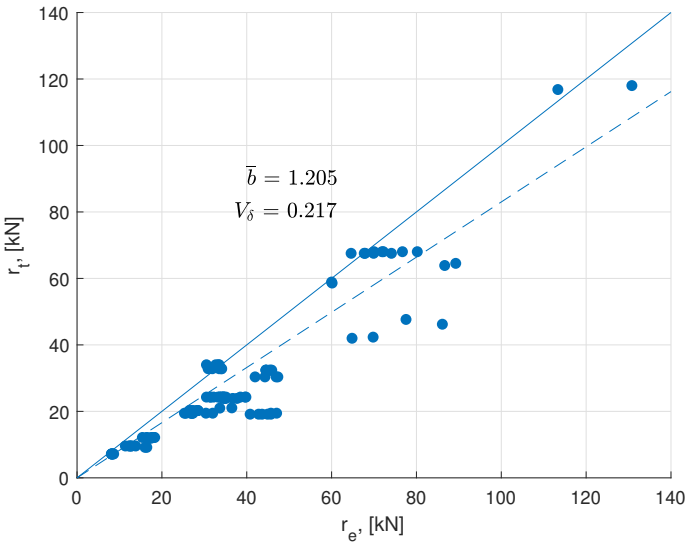
3.5.1 Bestemmelse af Bias og Variationskoefficient for Modelusikkerheden

Samme procedure, som afsnit 3.4, gøres for bæreevnemodellen i Eurocode, beskrevet i afsnit 3.1.2. Bias, $\bar{b}$, og variationskoefficient for modelusikkerheden, V_δ, for metoden i Eurocode bestemmes til:

$\bar{b}$	V_δ
1,21	0,22

Tabel 3.13: Bias, $\bar{b}$, og variationskoefficient for modelusikkerheden, V_δ, for metode i Eurocode.

Dette indikerer at denne metode både er mere konservativ og resulterer i større variationskoefficient end metoden af [Oppe, 2008]. På Figur 3.17 er vist r_t-r_e-diagrammet for metoden i Eurocode.



Figur 3.17: r_e-r_t-diagram for bæreevnemodel i Eurocode.

Da modellen består af flere brudmåder, bestemmes, via (A.1.8), variationskoefficienten af bæreevnen, relateret til usikkerheder i de fysiske materialeparametre modelleret i **X**, for hver stokastisk model i hver brudmåde:

	Net-tension	Pin-bearing	Shear-out	Block-shear
V_{rt}	0,11	0,08	0,03	0,07

Tabel 3.14: Variationskoefficienterne for modellernes variable **X**.

Den totale variation for hver brudmåde bestemmes ved:

$$V_r = \sqrt{V_\delta^2 + V_{rt}^2} \tag{3.5.1}$$

Den totale variation for hver brudmåde er vist i Tabel 3.4.

	Net-tension	Pin-bearing	Shear-out	Block-shear
V_r	0,25	0,24	0,22	0,23

Tabel 3.15: Den totale variation af bæreevnemodellen.

3.5.2 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af DK NA EN1990

I dette afsnit bestemmes partialkoefficienter for styrkeparametre, der sikrer en tilstrækkelig sikkerhed. Sikkerheden er repræsenteret ved sikkerhedsindekset, β, der ved denne brudform tilsigtes 4,3. Den nærmere beskrivelse af fremgangsmåden for de anvendte metoder er beskrevet i afsnit 3.4.

Den regningsmæssig bæreevne for hver brudmåde, se afsnit 3.1.2, opstilles som en funktion af bæreevnens styrkeparameter. Partialkoefficienten for styrken, γ_m, bestemmes ud fra Tabel 2.3 til værdier givet i Tabel 3.17, ud fra at variationskoefficienten for styrkeparametrene i Tabel 3.16.

Net-tension	Pin-bearing	Shear-out	Block-shear	
$f_{t,0°}$	$f_{c,0°}$	f_τ	$f_{t,0°}$	f_τ
0,1124	0,0843	0,0378	0,1124	0,0378

Tabel 3.16: Variationskoefficienter for styrkeparametre anvendt i bæreevnemodel i Eurocode. [Oppe, 2008]

$f_{t,0°}$	$f_{c,0°}$	f_τ
1,21	1,18	1,13

Tabel 3.17: Partialkoefficienter for styrkeparametre, γ_m, anvendt i bæreevnemodel i Eurocode.

Partialkoefficienten for modelusikkerheden, γ_R bestemmes ud fra (2.2.1), hvor delpartialkoefficienterne γ_1, γ_2 og γ_3 bestemmes ud fra Tabel 2.4-2.6. De bestemte værdier er givet i Tabel 3.18

Brudmåde	γ_1	γ_2	γ_3	γ_R
Net-tension	1,00	1,25	1,00	1,25
Pin-bearing	1,00	1,24	1,00	1,24
Shear-out	1,00	1,22	1,00	1,22
Block-shear	1,00	1,23	1,00	1,23

Tabel 3.18: Delpartialkoefficienterne, γ_1-γ_3, og partialkoefficienten for bæreevnemodellens modelusikkerhed, γ_R.

3.5.3 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Designværdimetoden

Alternativt kan partialkoefficienterne bestemmes ved designværdimetoden, der er beskrevet i afsnit 2.3. Ud fra denne metode bestemmes værdier vist i Tabel 3.19 og Tabel 3.20 for

hhv. eksisterende og nye konstruktion.

Styrkeparameter	Net-tension $f_{t,0°}$	Pin-bearing $f_{c,0°}$	Shear-out f_τ	Block-shear $f_{t,0°}$	f_τ
γ_m	0,95	0,96	0,98	0,95	0,98
γ_R	1,41	1,39	1.35	1.37	

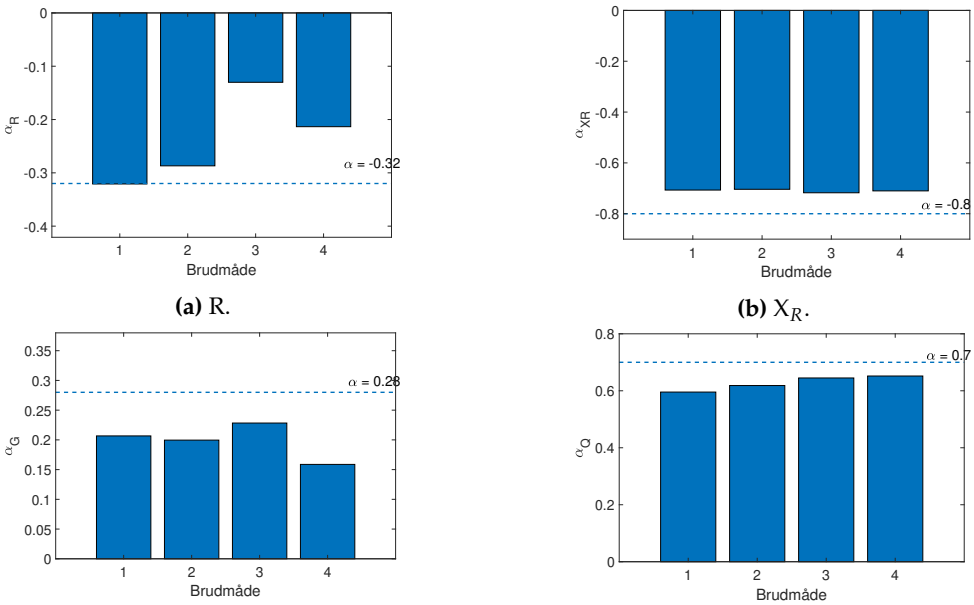
Tabel 3.19: Partialkoefficienter, γ_R og γ_m, for eksisterende konstruktioner bestemt ved designværdimetoden.

Styrkeparameter	Net-tension $f_{t,0°}$	Pin-bearing $f_{c,0°}$	Shear-out f_τ	Block-shear $f_{t,0°}$	f_τ
γ_m	0,97	0,98	0,99	0,97	0,99
γ_R	1,56	1,53	1,48	1,50	

Tabel 3.20: Partialkoefficienter, γ_R og γ_m, for nye konstruktioner bestemt ved designværdimetoden.

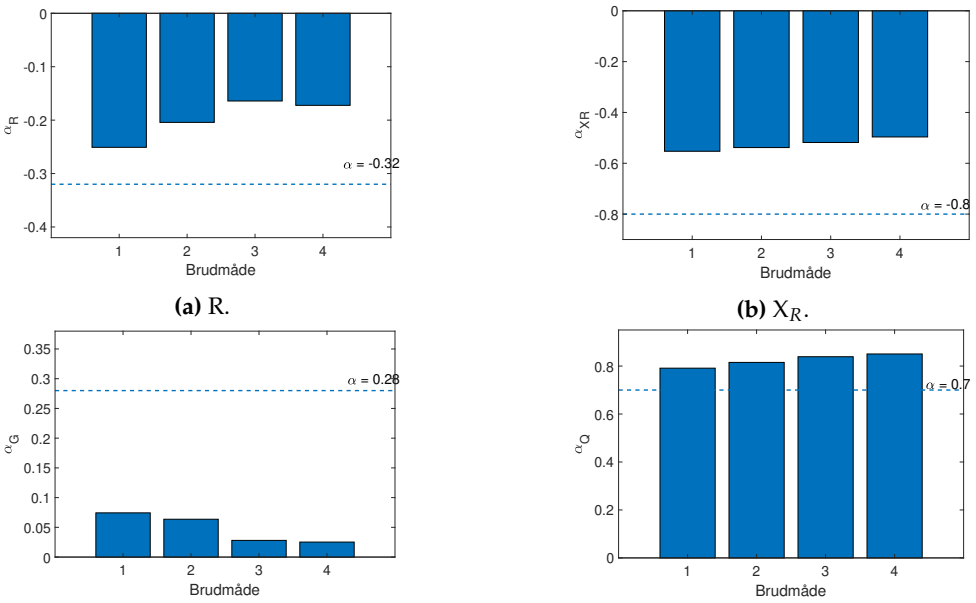
3.5.4 Bestemmelse af α-vektor

De tilhørende α værdier med lastforhold 0,3 og 0,7 for hhv. en eksisterende og en ny konstruktion er vist i Figur 3.18 og 3.19. Nærmere beskrivelse af bestemmelse af α værdier kan ses i afsnit 2.4. Anvendte partialkoefficienter ved bestemmelse af α værdier er fra DK NA EN1990.



(a) R. **(b)** X_R. **(c)** G. **(d)** Q.

Figur 3.18: α værdier for de stokastiske variable for hver brudmåde for eksisterende konstruktioner. Den stiplede linje repræsenterer den standardiserede værdi brugt ved designværdimetoden.



(a) R. **(b)** X_R. **(c)** G. **(d)** Q.

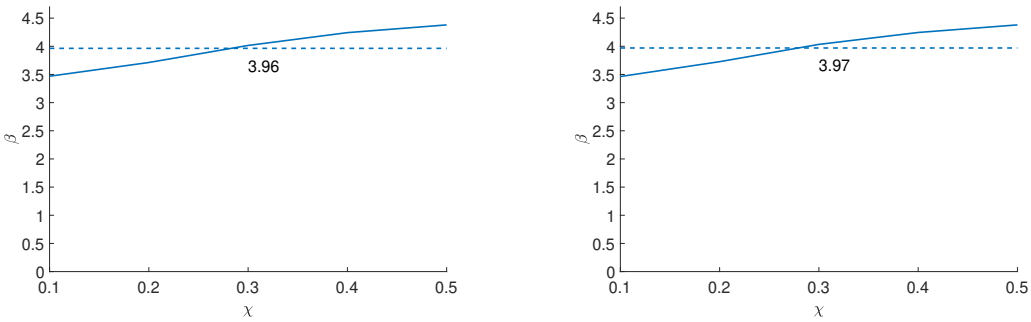
Figur 3.19: α værdier for de stokastiske variable for hver brudmåde for nye konstruktioner. Den stiplede linje repræsenterer den standardiserede værdi brugt ved designværdimetoden.

3.5.5 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra DK NA

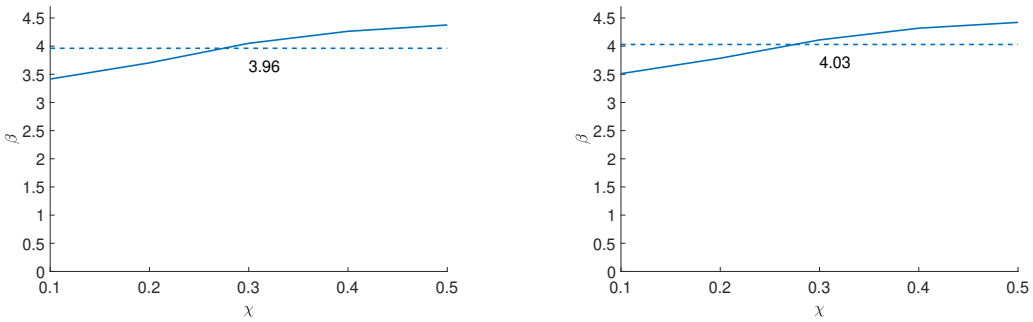
Kalibreringen af Sikkerhedsindekser gøres ved structural reliability methods. Fremgangsmåden for denne metode kan ses i afsnit 2.1. Simuleringer blive opdelt for forskellige lastforhold mellem 0,1 og 0,9, hvor intervallet 0,1-0,5 vil repræsentere lastforhold for eksisterende konstruktioner og intervallet 0,5-0,9 vil repræsentere nye.

Sikkerhedsindeks for Eksisterende Konstruktioner

Sikkerhedsindekser med χ værdier mellem 0,1 og 0,5 er vist på Figur 3.20. Da sikkerhedsindekset varierer med lastforholdet, bestemmes det overordnede sikkerhedsindeks som middelværdien af sikkerhedsindekserne for lastforhold mellem 0,1 og 0,5. Den stiplede linje illustrerer på Figur 3.20 denne middelværdi, hvis værdi også er vist på figuren.



(a) Net-tension. **(b)** Pin-bearing.



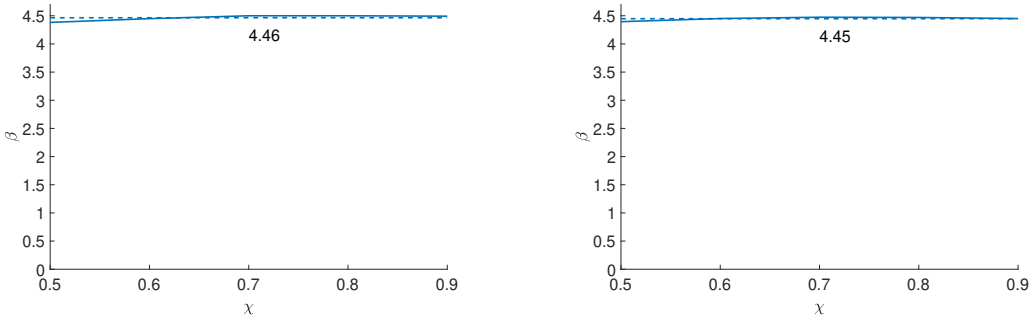
(c) Shear-out. **(d)** Block-shear.

Figur 3.20: Sikkerhedsindeks for eksisterende konstruktioner ved partialkoefficienter bestemt via [DS/INF 172, 2009].

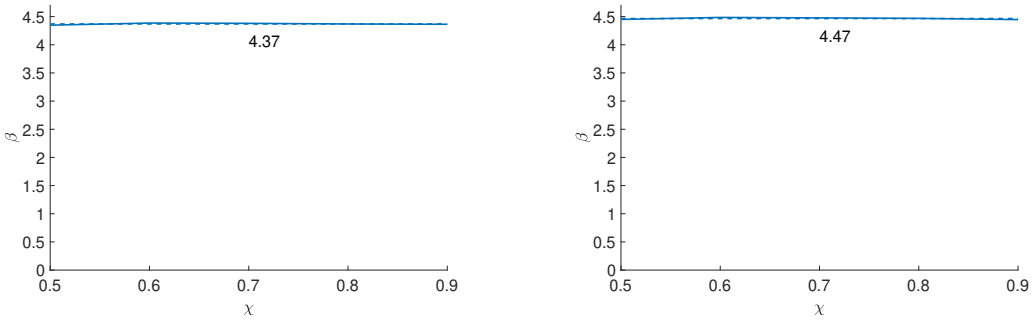
På Figur 3.20 kan det ses, at partialkoefficienter bestemt via DK NA EN1990 resulterer i et højere tilsigtet for eksisterende konstruktioner.

Sikkerhedsindeks for Nye Konstruktioner

Samme fremgangsmåde gøres tilsvarende for χ i intervallet 0,5-0,9, hvilket kan svare til nye konstruktioner, hvor der er anvendt FRP, hvilket vil resulterer i lavere egenvægt.



(a) Net-tension. **(b)** Pin-bearing.



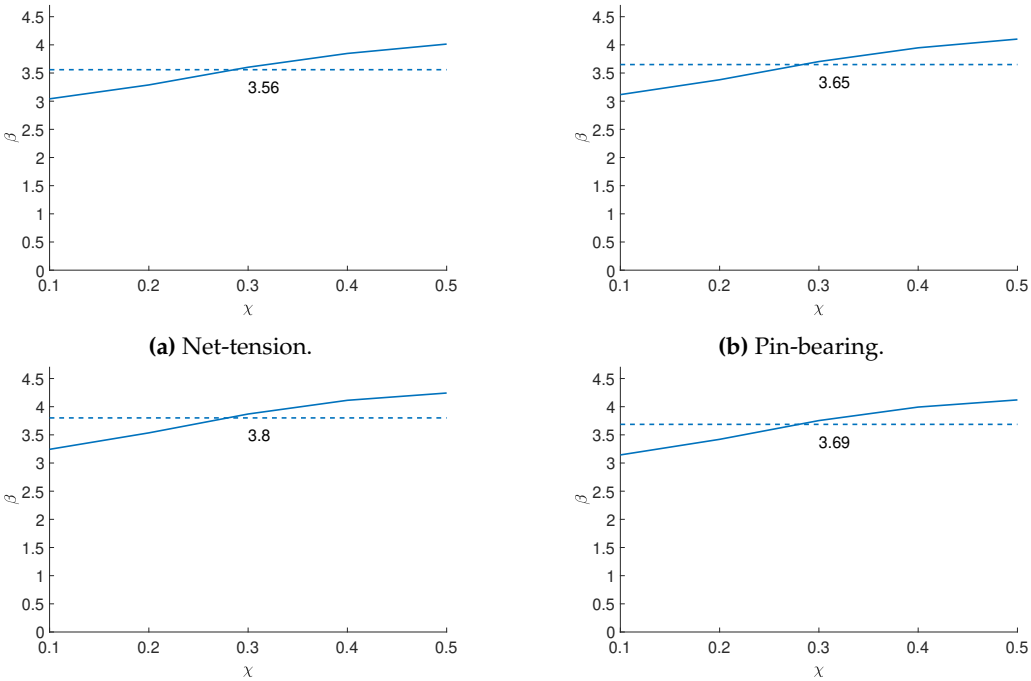
(c) Shear-out. **(d)** Block-shear.

Figur 3.21: Sikkerhedsindeks for nye konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, ved partialkoefficienter bestemt via [DS/INF 172, 2009].

Ligesom for eksisternede konstruktioner kan det ses på Figur 3.21, at partialkoefficienter bestemt via [DS/INF 172, 2009] resulterer i et højere tilsigtet for eksisterende konstruktioner.

3.5.6 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra Designværdimetoden

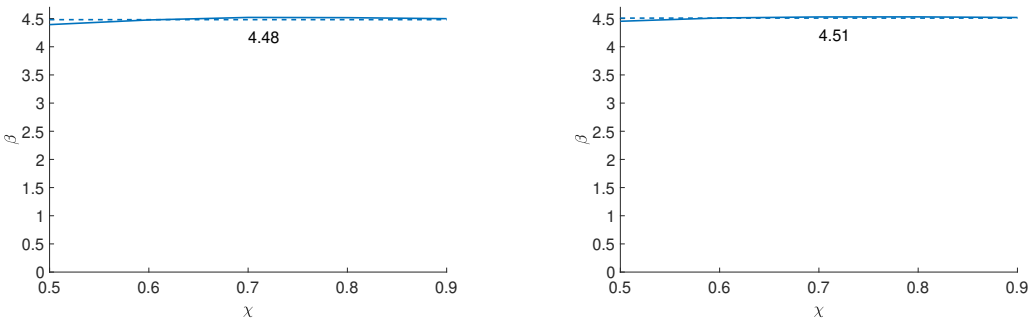
På Figur 3.22 og Figur 3.23 kan sikkerhedsindekset som funktion af lastforholdet, med partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden ses. Disse er som tidligere opdelt for eksisterende og nye konstruktioner med hver sine lastholdsintervaller.



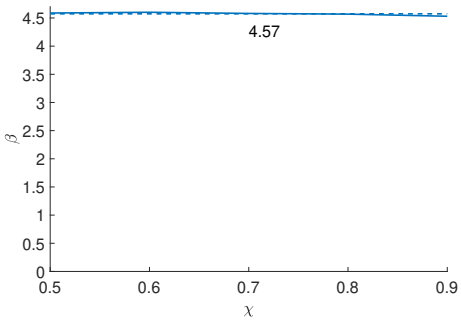
(a) Net-tension. **(b)** Pin-bearing. **(c)** Shear-out. **(d)** Block-shear.

Figur 3.22: Sikkerhedsindeks for eksisterende konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, med partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden.

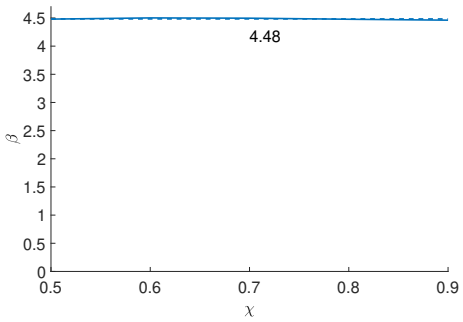
For eksisterende konstruktioner resulterer partialkoefficienter fra designværdimetoden i sikkerhedsindekser på under det tilsigtet på 3,8. Dette kan skyldes at de bestemte α værdier på Figur 3.18 for de stokastiske variabler er tætte på de standardisere værdier anvendt i designværdimetoden, og da der ikke er taget højde for lasternes stokastiske variabler og der blot er anvendt partialkoefficienter angivet i Eurocode.



(a) Net-tension. **(b)** Pin-bearing.



(c) Shear-out.



(d) Block-shear.

Figur 3.23: Sikkerhedsindeks for nye konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, med partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden.

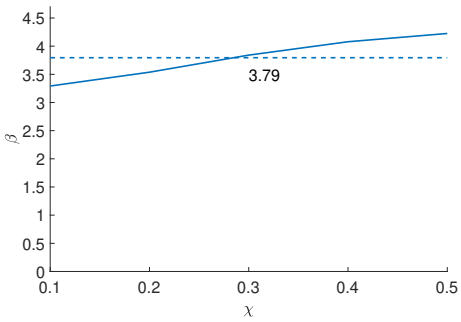
For nye konstruktioner resulterer designværdimetoden i sikkerhedsindekser over det tilsigtet. Forskellen fra resultaterne for eksisterende konstruktioner i Figur 3.22 kan skyldes de lavere α værdier i Figur 3.19 i forhold til α værdier i Figur 3.18.

3.5.7 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Direkte Anvendelse af Sikkerhedsindeksmetoden

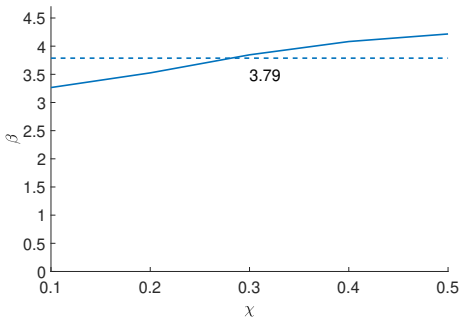
Ved denne metode kalibreres partialkoefficienterne direkte ved anvendelse af sikkerhedsindeksmetoden. Der tages udgangspunkt i partialkoefficienter bestemt via DK NA EN1990, hvor partialkoefficienten γ_R fra DK NA EN1990 anvendes, mens partialkoefficienten γ_m øges/sænkes indtil det tilsigtet sikkerhedsindeks er opnået. Ved sænkning af γ_m til værdier givet i Tabel 3.21 og anvendelse af γ_R værdier givet i Tabel 3.18 opnås sikkerhedsindekser i Figur 3.24

$f_{t,0°}$	$f_{t,90°}$	$f_{\tau,0°}$
1,15	1.12	1.09

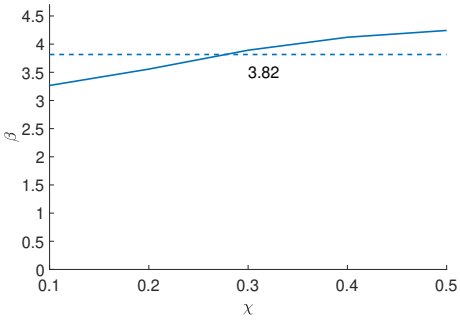
Tabel 3.21: Partialkoefficienter, γ_m, for eksisterende konstruktioner ved styrker anvendt i bæreevnemodel i Eurocode bestemt ved direkte kalibrering.



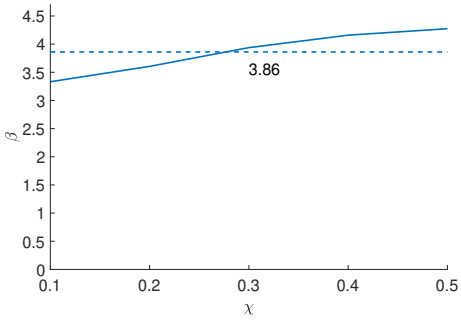
(a) Net-tension.



(b) Pin-bearing.



(c) Shear-out.



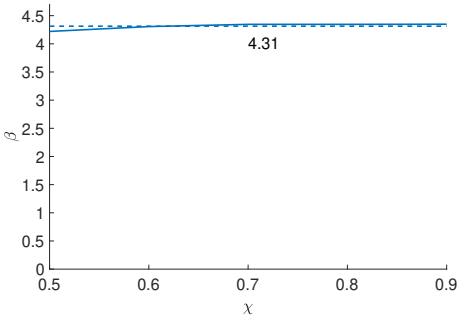
(d) Block-shear.

Figur 3.24: Sikkerhedsindeks for eksisterende konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, ved partialkoefficienter bestemt ved direkte kalibrering.

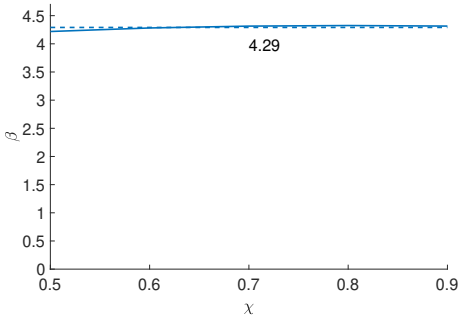
Samme fremgangsmåde gøres for nye konstruktioner, hvor γ_m sænkes til værdier givet i Tabel 3.22, hvilket resulterer i sikkerhedindekser givet i Figur 3.25.

$f_{t,0°}$	$f_{t,90°}$	$f_{\tau,0°}$
1,15	1.12	1.09

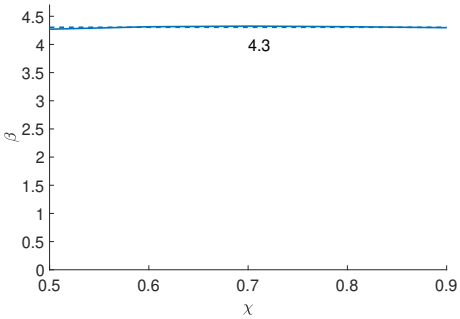
Tabel 3.22: Partialkoefficienter, γ_m, for nye konstruktioner ved styrker anvendt i bæreevnemodel i Eurocode bestemt ved direkte kalibrering.



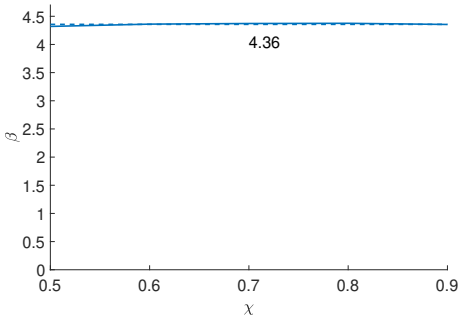
(a) Net-tension.



(b) Pin-bearing.



(c) Shear-out.



(d) Block-shear.

Figur 3.25: Sikkerhedsindeks for nye konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, ved partialkoefficienter bestemt ved direkte kalibrering.

4. Stabilitetsbrud

I dette afsnit undersøges bæreevnemodeller for stabilitetsbrud af FRP profiler. Brudscenariet består af forskellige søjleprofiler, der påvirkes af tryk normal på profilets tværsnit. Profilerne består af firkant-, I- og U-profiler og testes både for stabilitetsbrud om den stærke og svage akse, og ved forskellige søjlelængder.

4.1 Bæreevnemodel

For dette brudscenarie benyttes en bæreevnemodel af Trumpf [2006]. Bæreevnen for denne model bestemmes ved:

$$N_{ck} = \chi \cdot A_{eff} \cdot f_{ux2} \tag{4.1.1}$$

χ	Søjlereduktionsfaktor
A_{eff}	Effektive areal
f_{ux2}	Brudspænding for stærkeste enkelt felt

$$\chi = \begin{cases} \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} & \text{for } \bar{\lambda} > 0.5 \\ 1 & \text{for } \bar{\lambda} \leq 0.5 \end{cases} \tag{4.1.2}$$

χ	Søjlereduktionsfaktor
Φ	Faktor
$\bar{\lambda}$	Relative slankhedsforhold

$$\Phi = \frac{1}{2}\left(1 + \alpha_f(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2\right) \tag{4.1.3}$$

α	Imperfektionsfaktor
$\bar{\lambda}_0$	0,5

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{fux2}}{N_{cr}}} \tag{4.1.4}$$

N_{fux2}	Brudkraft for stærkeste enkelt felt
N_{cr}	Kritiske søjlekraft

Den kritiske søjlekraft kan bestemmes ud fra Eulers formel:

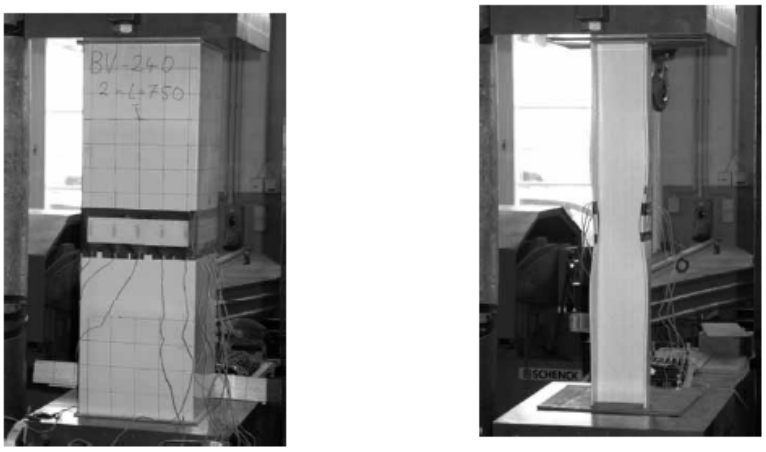
$$N_{cr} = \frac{E_{cx} \cdot I \cdot \pi^2}{{l_{cr}}^2} \tag{4.1.5}$$

E_{cx}	Elasticitetsmodul i x-retning
I	Inertimoment om undersøgte akse
l_{cr}	Kritiske søjlelængde

$$N_{fux2} = f_{ux2} \cdot A_{eff} \tag{4.1.6}$$

4.2 Forsøgsopstilling

Forsøget, der er udført af Trumpf, klargøres ved at et FRP profil placeres og fastgøres i en trykstyrketester. Fastgørelsen bliver udført på en sådan måde at rotation i profilets ender er muligt. Trykstyrketesteren trykker i hver ende af profilet indtil brud. For at kunne teste profilerne både om den stærke og svage akse for U- og I-profilerne, fastholdes den svage akse i nogle forsøg, så udbøjning kun kan opstå om den stærke. Foto taget af forsøgsopstilling er vist på Figur 4.1



Figur 4.1: Forsøgsopstilling for stabilitetsforsøg. [Trumpf, 2006]

Tværsnitsdata for profilerne er præsenteret i tabel 4.1.

Profil	A [mm^2]	I_y [mm^4]	I_z [mm^4]	A_{eff} [mm^2]	I_{yeff} [mm^4]	I_{zeff} [mm^4]
V50	915,14	313160,4	314685,7	915,14	313160,37	314685,7
V60	1111,61	566450	565760,1	1111,61	566449,99	565760,1
V100	3083,21	4371086	4364552	3083,21	4371086,19	4364552
V120	3641,24	7651574	7682826	3641,24	7651573,9	7682826
V132	4829,01	12183635	12104154	4829,01	12183635	12104154
V240	11125,67	96825429	97281633	11125,67	96825428,55	97281633
I120	1452,15	3224146	233569,4	1217,79	3194743,92	232856,9
I160	2473,35	9681074	691495,5	2110,46	9617664,83	689596,2
I200	3892,08	23770023	1710973	3347,61	23634325,65	1706476
I240	5640,09	49626959	3580391	4894,45	49387946,37	3571410
I300	8776,74	1,21E+08	8714448	7482,05	119708068,7	8690340
U120	1275,18	2659277	279952,6	1204,23	2428665,2	195431
U140	1043,56	2750988	130399,2	812,18	2707820,37	116479,9
U200	3007,47	15889525	823347,7	2742,65	15873562,53	791929,4
U240	2986,94	23393661	1228053	2513,26	23254580,87	1138645
U300	6998,79	82699829	4254494	6535,8	82664962,33	4136775
U360	9881,33	1,69E+08	8727776	8324,96	167896388,3	8091559

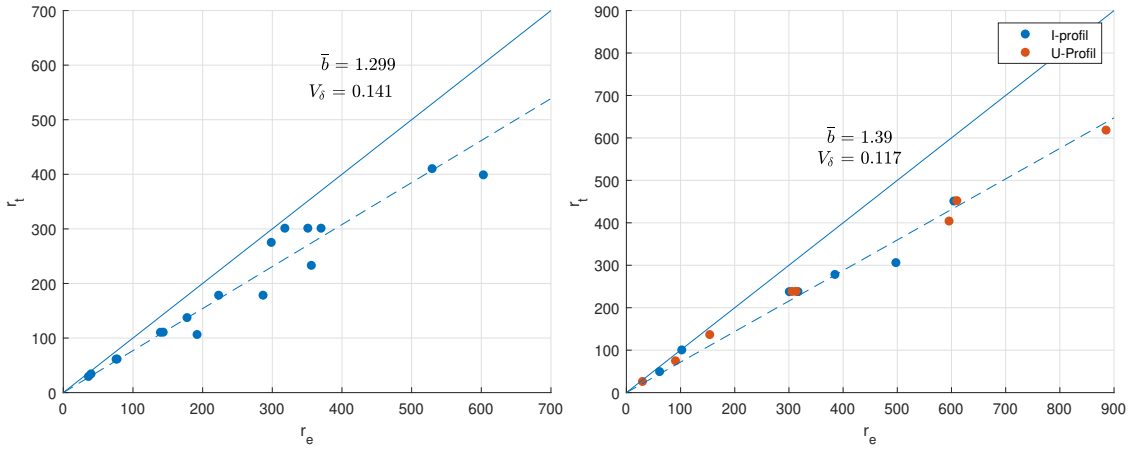
Tabel 4.1: Profilspecifikationer. [Trumpf, 2006]

4.3 Statistisk Vurdering af Bæreevnemodel

Der udføres en statistisk vurdering af bæreevnemodellen, for at bestemme usikkerheden af modellen. Dette gøres ved at sammenligne beregnede og eksperimentelt målte bæreevner for de forsøgsemner, der er beskrevet i appendiks i Tabel C.1. Ved at benytte profilspecifikationer fra Tabel 4.1 og forsøgsdata fra Tabel C.1 kan den teoretiske bæreevne for hvert udført forsøg bestemmes. Da ikke alle forsøg er brugbare, er nogle forsøgsresultater ikke brugt til den statistiske analyse.

4.3.1 Bestemmelse af Bias og Variationskoefficient

Den eksperimentelle bæreevne og den teoretiske bæreevne for stabilitetsbrud opdeles i 3 populationer, henholdsvis firkantprofiler, I- og U-profiler om den svage akse, og I- og U-profiler om den stærke akse, der hver især antages statistisk homogene. Dette gøres for at reducere spredningen af de individuelle profiler [Eurocode 0, 2007, D.8.2.2.5]. Da kun 3 forsøg ved undersøgelse af I- og U-profiler om den stærke akse var brugbare, undlades disse fra den statistiske vurdering. På Figur 4.2 er r_e-r_t-diagrammer for de 2 resterende dele præsenteret. Beskrivelse af bestemmelse af bias og variationskoefficient er beskrevet i afsnit 3.4.

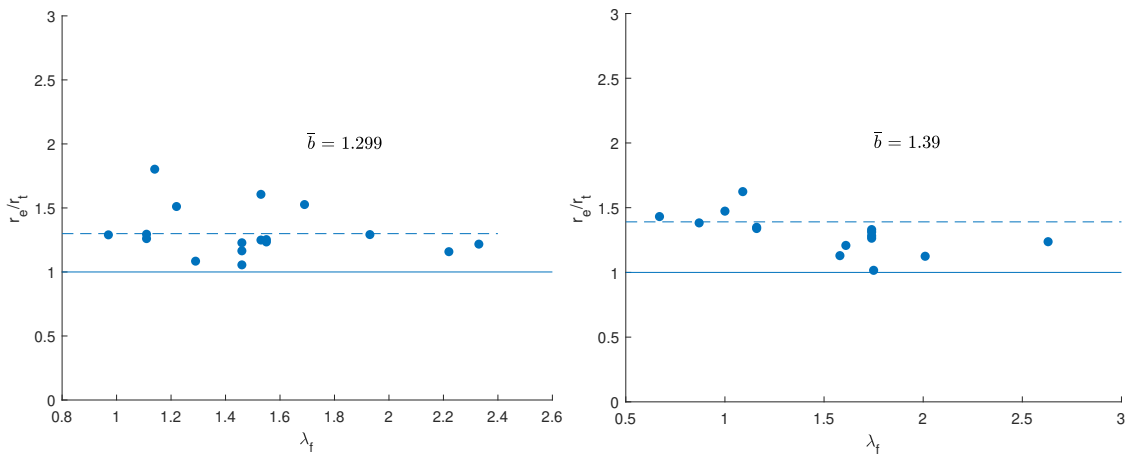


(a) Firkantprofiler. **(b)** I- og U-profiler - Svage akse.

Figur 4.2: r_e-r_t-diagrammer - Trumpf's model.

På Figur 4.2 kan det ses at bæreevnemodellen af Trumpf resulterer i et bias på hhv. 30 og 39% i forhold til den eksperimentelle bæreevne, r_e, der er bestemt ved forsøg og en variationskoefficient for modelusikkerheden på hhv. 0,141 og 0,117. Dette indikerer, at bæreevnemodellen er konservativ til at estimere søjlens reelle bæreevne med lav variation.

Bias bestemt for hvert forsøg kan plottes med forsøgssøjlens tilhørende slankhedsforhold, λ, for at se betydningen af søjlens slankhedsforhold for bæreevnemodellens nøjagtighed er illustreret på Figur 4.3. Figurerne kunne indikere at bæreevnemodellens nøjagtighed stiger ved forøgelse af søjlens slankhedsforhold.



(a) Firkantprofiler. **(b)** I- og U-profiler - Svage akse.

Figur 4.3: Indflydelse af søjlens slankhedsforhold på bæreevnemodels nøjagtighed - Trumpf's model. Den stiplede linje indikerer middelværdien, $\bar{b}$.

Variationskoefficienten af bæreevnen, relateret til usikkerheder i de fysiske materialeparametre modelleret i X bestemmes til 0,08 ud fra (A.1.8), hvorved den totale variation, V_r, kan bestemmes ud fra (A.1.10) til værdier i Tabel 4.2

	Firkantprofil	U- og I-profil - svage akse
V_δ	0,14	0,12
V_{rt}	0,08	0,08
V_r	0,16	0,14
$\bar{b}$	1,30	1,39

Tabel 4.2: Bias og den totale variation af bæreevnemodellen.

4.3.2 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af DK NA EN1990

I dette afsnit bestemmes partialkoefficienter for styrkeparametre, der sikrer en tilstrækkelig sikkerhed. Sikkerheden er repræsenteret ved sikkerhedsindekset, der ved denne brudform tilsigtes 4,3. Den nærmere beskrivelse af fremgangsmåden for de anvendte metoder er beskrevet i afsnit 3.4.2.

Den regningsmæssig bæreevne opstilles som en funktion af én stokastisk variable, profilernes trykstyrke. Brudspændingen for stærkeste enkelt felt, f_{ux2}, antages at være en funktion af trykstyrken og en konstant. I Tabel C.1 er data for f_{ux2}, hvorved konstanten for den undersøgte konstruktionsdel kan bestemmes. Dette gør at bæreevne nu er en funktion af profilernes trykstyrke. Partialkoefficienten for styrken, γ_m, bestemmes ud fra Tabel 3.6 til værdier givet i Tabel 4.3, ud fra at variationskoefficienten for profilernes trykstyrke er 0,0843 [Trumpf, 2006].

f_{ux2}
1,18

Tabel 4.3: Partialkoefficienten, γ_m, for styrke anvendt i bæreevnemodel af Trumpf. [Trumpf, 2006]

Ud fra den totale variationskoefficient V_r fra Tabel 4.2 kan delpartialkoefficienterne γ_1, γ_2 og γ_3 bestemmes ud fra Tabel 2.4-2.6 til værdier i Tabel 4.4. Ud fra (2.2.1) kan γ_R for firkant-, U- og I-profiler bestemmes.

Profil	γ_1	γ_2	γ_3	γ_R
Firkant	1,00	1,16	1,00	1,16
U- og I	1,00	1,14	1,00	1,14

Tabel 4.4: Delpartialkoefficienterne, γ_1-γ_3, og partialkoefficienten for bæreevnemodellens modelusikkerhed, γ_R.

4.3.3 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Anvendelse af designværdimetoden

Alternativt kan partialkoefficienterne bestemmes ved designværdimetoden, der er beskrevet i afsnit 2.3. Ud fra denne metode bestemmes værdier vist i Tabel 4.5 og Tabel 4.6.

	Firkantprofil	U- og I-profil
γ_R	1,25	1,21
γ_m	0,96	0,96

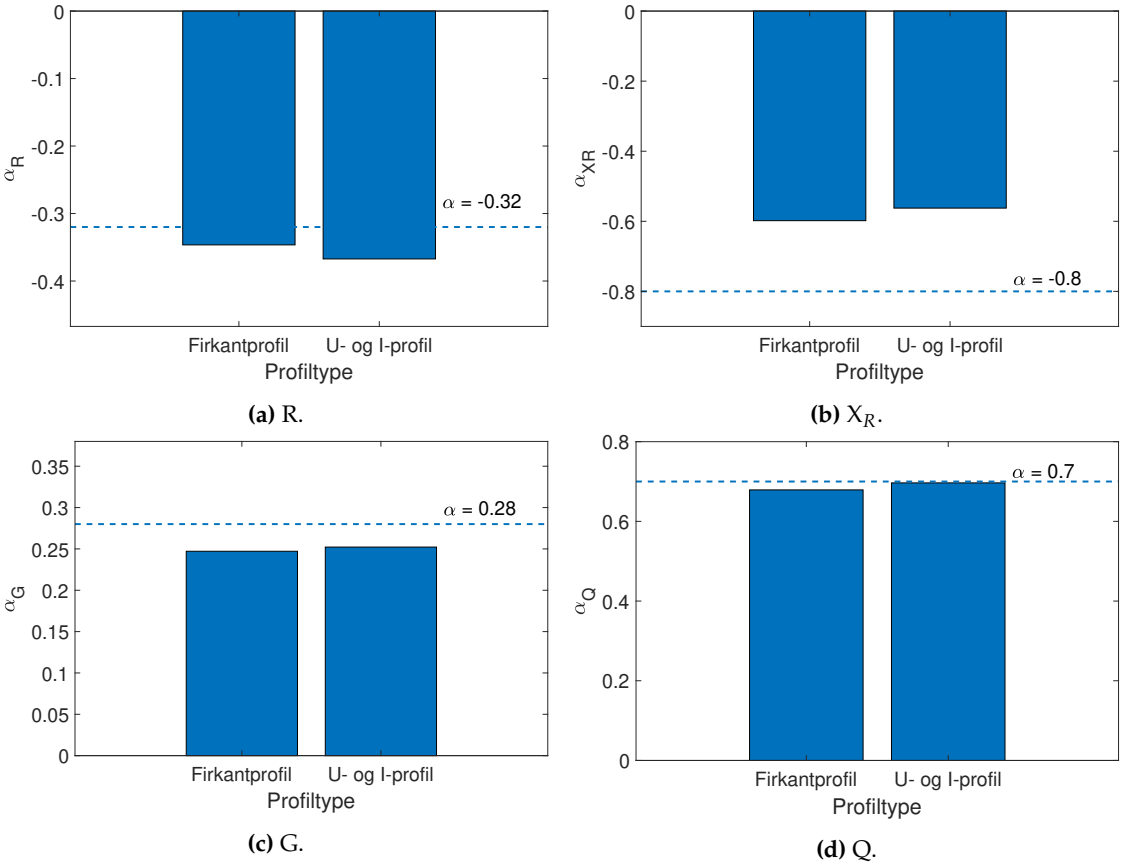
Tabel 4.5: Partialkoefficienter, γ_R og γ_m, for eksisterende konstruktioner bestemt ved designværdimetoden.

	Firkantprofil	U- og I-profil
γ_R	1,33	1,28
γ_m	0,98	0,98

Tabel 4.6: Partialkoefficienter, γ_R og γ_m, for nye konstruktioner bestemt ved designværdimetoden.

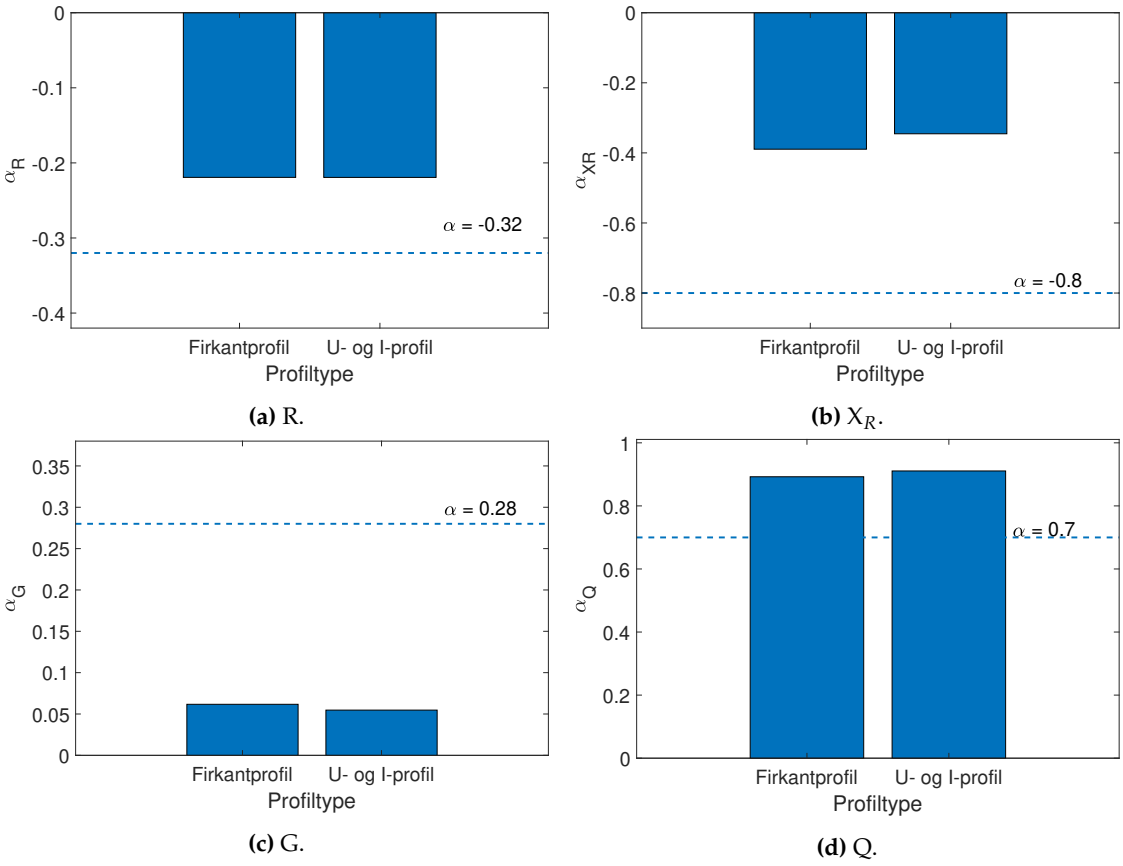
4.3.4 Bestemmelse af α-vektor

De tilhørende α værdier med lastforhold 0,3 og 0,7 for hhv. en eksisterende og en ny konstruktion er vist i Tabel 4.4 og 4.5. Nærmere beskrivelse af bestemmelse af α værdier kan ses i afsnit 2.4.



(a) R. **(b)** X_R. **(c)** G. **(d)** Q.

Figur 4.4: α værdier for de stokastiske variable for hver brudmåde for eksisterende konstruktioner. Den stiplede linje repræsenterer den standardiserede værdi brugt ved designværdimetoden.



(a) R. **(b)** X_R. **(c)** G. **(d)** Q.

Figur 4.5: α værdier for de stokastiske variable for hver brudmåde for nye konstruktioner. Den stiplede linje repræsenterer den standardiserede værdi brugt ved designværdimetoden.

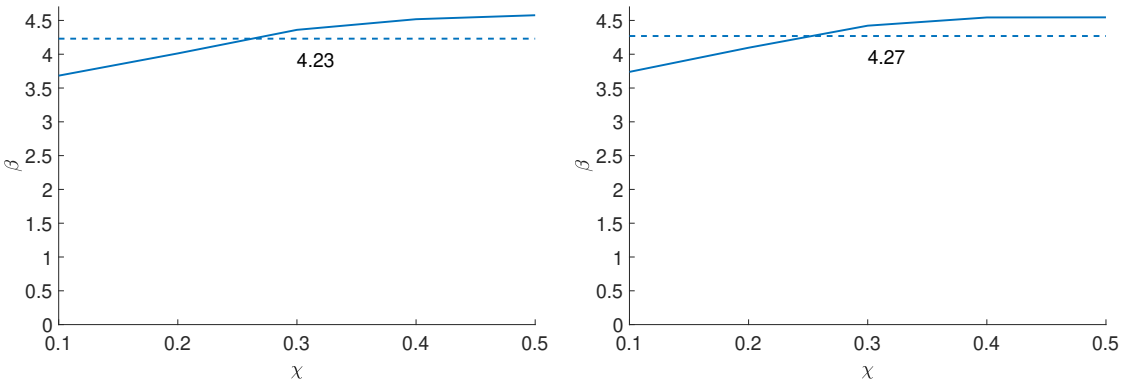
4.3.5 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra DK NA

Fremgangsmåden for kalibrering ved structural reliability methods kan ses i afsnit 2.1.

Ligesom tidligere vil simuleringer blive opdelt for forskellige lastforhold mellem 0,1 og 0,9, hvor intervallet 0,1-0,5 vil repræsentere lastforhold for eksisterende konstruktioner og intervallet 0,5-0,9 vil repræsentere nye.

Eksisterende Konstruktioner

Sikkerhedsindekser med χ værdier mellem 0,1 og 0,5 er vist på Figur 4.6. Da sikkerhedsindekset varierer med lastforholdet, bestemmes det overordnede sikkerhedsindeks som middelværdien af sikkerhedsindekserne for lastforhold mellem 0,1 og 0,5. Den stiplede linje illustrerer på Figur 4.6 denne middelværdi, hvis værdi også er vist på figuren.



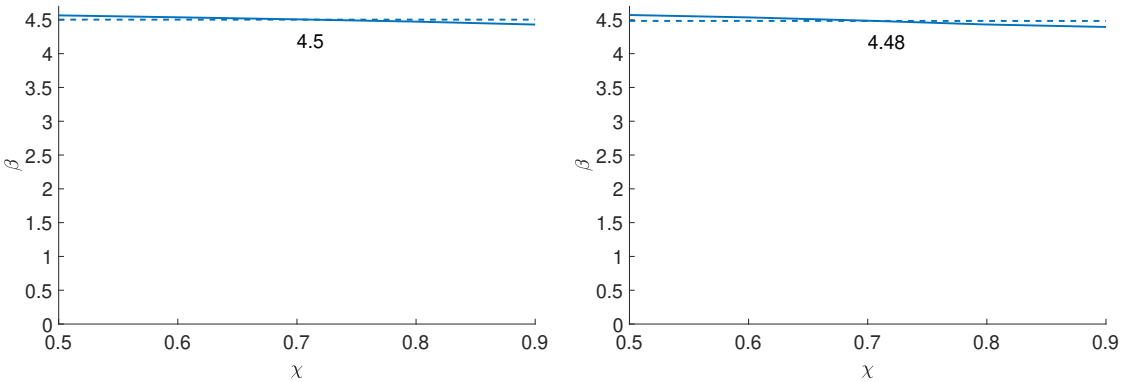
(a) Firkantprofiler. **(b)** I- og U-profiler - Svage akse.

Figur 4.6: Sikkerhedsindeks for eksisterende konstruktioner ved partialkoefficienter bestemt via [DS/INF 172, 2009].

Det kan ses på Figur 4.6 at partialkoefficienter bestemt via DK NA EN1990 resulterer for høje sikkerhedindekser i forhold til det tilsigtet sikkerhedsindeks på 3,8.

Nye Konstruktioner

Samme fremgangsmåde gøres tilsvarende for χ i intervallet 0,5-0,9.



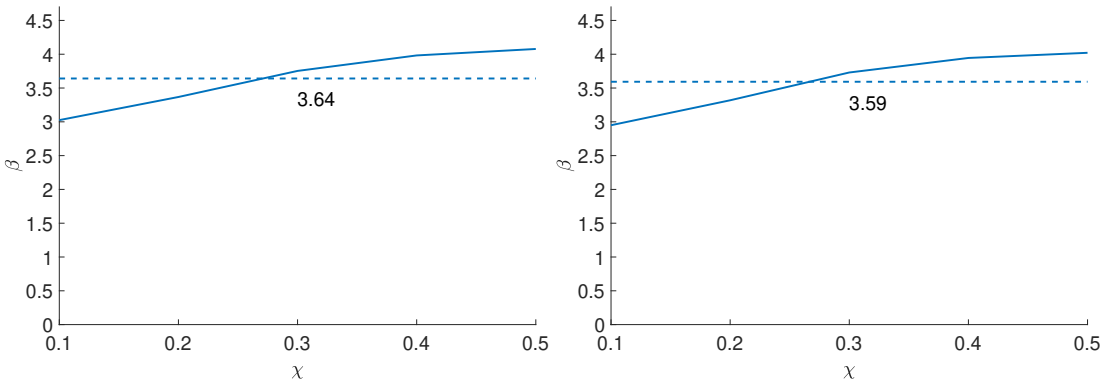
(a) Firkantprofiler. **(b)** I- og U-profiler - Svage akse.

Figur 4.7: Sikkerhedsindeks for nye konstruktioner ved partialkoefficienter bestemt via [DS/INF 172, 2009].

For nye konstruktioner kan det ses på Figur 4.7 at partialkoefficienter bestemt via DK NA EN1990 giver resulterer i tilsvarende for høje sikkerhedindekser i forhold til det tilsigtet sikkerhedsindeks på 4,3.

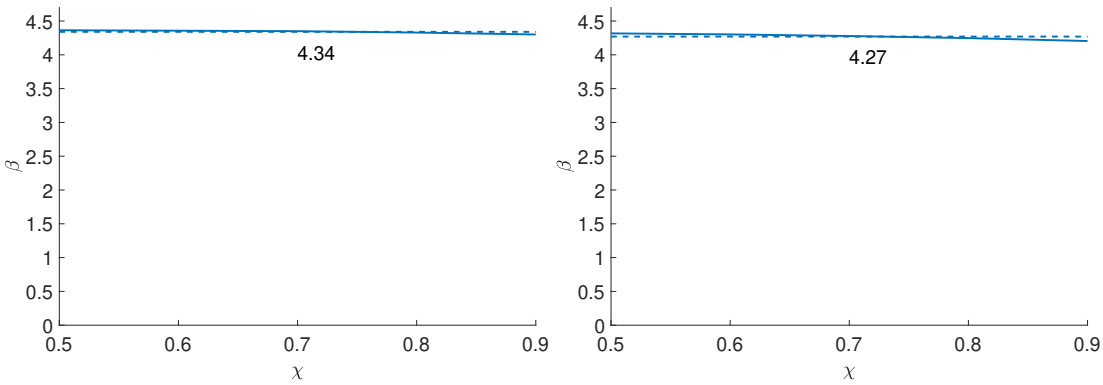
4.3.6 Sikkerhedsindekser ved Anvendelse af Partialkoefficienter fra Designværdimetoden

På Figur 4.8 og Figur 4.9 kan sikkerhedsindekset som funktion af lastforholdet, med partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden ses. Disse er som tidligere opdelt for eksisterende og nye konstruktioner med hver sine lastholdsintervaller.



(a) Firkantprofiler. **(b)** I- og U-profiler - Svage akse.

Figur 4.8: Sikkerhedsindeks for eksisterende konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, med partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden.



(a) Firkantprofiler. **(b)** I- og U-profiler - Svage akse.

Figur 4.9: Sikkerhedsindeks for nye konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, med partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden.

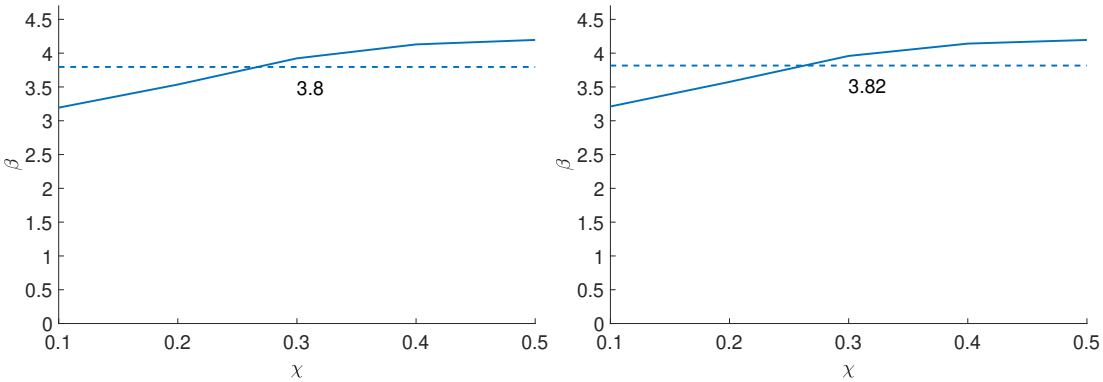
Designværdimetoden resulterer i disse tilfælde overordnet under det tilsigt sikkerhedsindeks, hvilket kan skyldes at der kun er bestemt partialkoefficienter for designligningens styrkeparametre, og ikke for designligningens laster.

4.3.7 Bestemmelse af Partialkoefficienter ved Direkte Anvendelse af Sikkerhedsindeksmetoden

Ved denne metode kalibreres partialkoefficienterne direkte ved anvendelse af Sikkerhedsindeksmetoden. Der tages udgangspunkt i partialkoefficienter bestemt via DK NA EN1990, hvor partialkoefficienten γ_R fra DK NA EN1990 anvendes, mens partialkoefficienten γ_m øges/sænkes indtil det tilsigtet sikkerhedsindeks er opnået. Dette er begrundet ved at α værdien for modelusikkerheden tidligere i Figur 4.4 og 4.5 blev bestemt til at være højere end α værdien for styrkeparameteren for både eksisterende og nye konstruktioner. Der kalibreres partialkoefficienter for både eksisterende og nye konstruktioner.

Eksisterende Konstruktioner

Ved sænkning af γ_m til 1,07 og anvendelse af γ_R værdier givet i Tabel 4.4 opnås sikkerhedsindekser i Figur 4.10

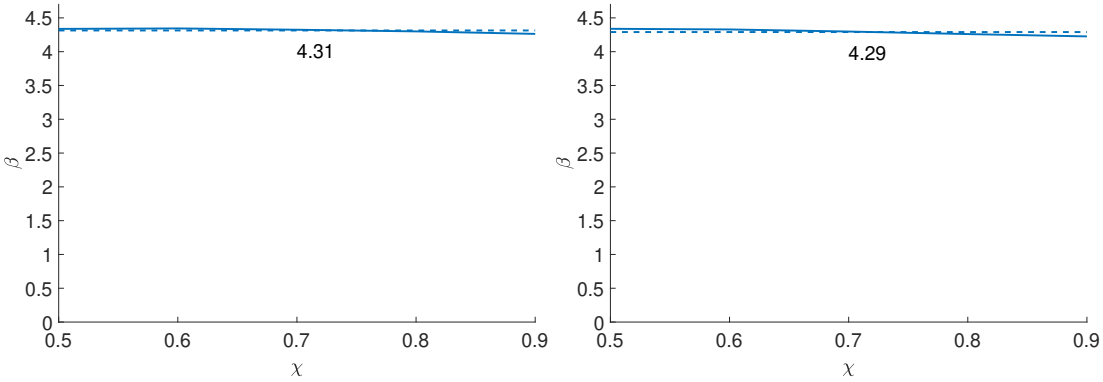


(a) Firkantprofiler. **(b)** I- og U-profiler - Svage akse.

Figur 4.10: Sikkerhedsindeks for nye konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, med partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden.

Nye Konstruktioner

Ved sænkning af γ_m til 1,11 og anvendelse af γ_R værdier givet i Tabel 4.4 opnås sikkerhedsindekser i Figur 4.11



(a) Firkantprofiler. **(b)** I- og U-profiler - Svage akse.

Figur 4.11: Sikkerhedsindeks for nye konstruktioner afhængig af lastforhold, χ, med partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden.

Konklusion

5 Konklusion 65

Litteraturliste 66

5. Konklusion

Flere metoder er blevet anvendt til bestemmelse af pålideligheden af FRP konstruktioner. Brudgrænsetilstanden, ULS, for boltsamlinger og stabiltetsbrud for en søjle er blevet anvendt som eksempel for pålidelighedsundersøgelsen, hvor forskellige bæreevnemodeller for disse brudscenarier blev statistisk vurderet. Den statistiske vurdering viste at modelusikkerhederne for de undersøgte bæreevnemodeller var mellem 0,13 og 0,25 med bias mellem 1,01 og 1,39. Til at vurdere pålideligheden er sikkerhedsindekset blevet anvendt som pålidelighedsstørrelse, mens en metode fra DK NA EN1990 og designværdimetoden blev anvendt til bestemmelse af partialkoefficienter. Da designlasten er afhængig af forholdet mellem permanent og variabel last, blev der bestemt partialkoefficienter og sikkerhedsindekser for både eksisterende og nye konstruktioner. Dette var begrundet ved, at FRP's egenvægt generelt er lavere end tidligere traditionelt anvendte materialer, såsom stål og beton, hvilket betyder at eksisterende konstruktioners permanente last er højere end nye konstruktioner, hvor FRP er anvendt i større grad. Sikkerhedsindekset blev bestemt ud fra *structural reliability methods* ved brug af Crude Monte Carlo simulering, hvor 50.000.000 realiseringer af de stokastiske variable blev simuleret, hvorved sandsynligheden for brud og sikkerhedindekset kunne bestemmes. Ydermere blev partialkoefficienterne kalibreret direkte ved anvendelse af sikkerhedsindeksmetoden.

Den statistiske vurdering viste at partialkoefficienter bestemt via DK NA EN1990 generelt resulterer i for høj sikkerhed, mens partialkoefficienter bestemt ved designværdimetoden generelt resulterede i sikkerhed omkring det tilsigtet, dog med enkelte for lave værdier. Dette kan skyldes at der ved designværdimetoden kun blev undersøgt partialkoefficienter for designligningens styrkeparametre, mens partialkoefficienter for designligningens laster blev bestemt via værdier angivet i Eurocode. Bestemmelse af α værdier viste desuden at for nogle bæreevnemodeller var nogle α værdier tætte på de standardisere værdier anvendt i designværdimetoden, hvilket reducerer forsigtigheden af metoden.

Det vurderes ud fra resultaterne at den mest præcise metode til bestemmelse af partialkoefficienter er ved anvendelse af sikkerhedsindeksmetoden, hvor partialkoefficienterne bliver kalibreret direkte. Dette er dog også den mest tilkrævende metode, hvilket øger interessen for at alternative metoder. Den mest konservative metode var ved kalibrering af partialkoefficienter ved anvendelse af DK NA EN1990.

Litteratur

DK NA EN1990, 2013. DK NA EN1990. *Nationalt anneks til Eurocode 0: Projekteringsgrundlag for bærende konstruktioner*, 2013.

DS/INF 172, 2009. DS/INF 172. *Baggrundsundersøgelser i forbindelse med udarbejdelse af Nationale Annekser til EN 1990 og EN 1991 – Sikkerhedsformat, lastkombinationer, partialkoefficienter, udmattelse, snelast, vindlast, mm.*, 2009.

Eurocode, 2020. Eurocode. *DRAFT - Design of fibre reinforced polymer structures*, 2020.

Eurocode 0, 2007. Eurocode 0. *DS/EN 1990:2007*, Dansk Standard, 2007.

Fiberline Composites A/S, 2003. Fiberline Composites A/S. *Fiberline Konstruktionshåndbog*, 2003.

ISO 2394, 2015. ISO 2394. *Generelle principper for konstruktioners pålidelighed*, 2015.

Luigi Ascione, 2016. Patrice Godonou Kees van IJselmuijden Jan Knippers Toby Mottram Matthias Oppe Morten Gantriis Sorensen Jon Taby Liesbeth Tromp Luigi Ascione, Jean-François Caron. *Prospect for new guidance in the design of FRP*, 2016.

Oppe, 2008. Matthias Oppe. *Zur Bemessung geschraubter Verbindungen von pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen*, 2008.

Pedersen, 2015. Erik Steen Pedersen. *Vurdering af eksisterende konstruktioners bæreevne*, 2015.

Sørensen, 2011. John Dalsgaard Sørensen. *Notes in Structural Reliability Theory And Risk Analysis*, 2011.

Trumpf, 2006. Heiko Trumpf. *Stabilitätsverhalten ebener Tragwerke aus pultrudierten faserverstärkten Polymerprofilen*, 2006.

IV Appendiks

A Statistisk vurdering af bæreevnemodeller 71
A.1 Bestemmelse af Bias og Variationskoefficient for Modelusikkerhed

B Data for boltsamlingsforsøg 75

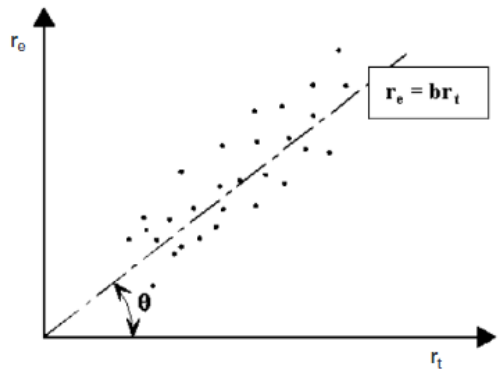
C Data for stabilitetsbrudsforsøg 79

A. Statistisk vurdering af bæreevnemodeller

I dette afsnit beskrives generelt hvordan pålidelighed bestemmes med udgangspunkt i en svigtfunktion, hvordan modelusikkerhed estimeres, hvordan karakteristiske værdier bestemmes og hvordan partialkoefficienter kan bestemmes ved flere metoder. Der tages udgangspunkt i proceduren i DS/EN 1990 D.8.

Der udarbejdes en beregningsmodel for en konstruktion eller konstruktionsdel teoretiske bæreevne, r_t. Denne bæreevne bør dække alle relevante grundlæggende variable, der påvirker bæreevnen ved den relevante grænsetilstand.

Faktiske målte egenskaber indsættes i bæreevnefunktionen, således at der opnås teoretiske værdier, der kan sammenlignes med værdier opnået ved forsøg. For hvert forsøg udregnes en tilsvarende teoretisk værdi der plottes i par i et koordinatsystem, hvorved der opnås et re-rt-diagram som vist på Figur A.1.



Figur A.1: re-rt-diagram, hvor r_e = Eksperimentielle bæreevne, r_t = teoretiske bæreevne, b = bias.[Eurocode 0, 2007, Figur D.1]

Hvis bæreevnemodellen er perfekt vil alle re-rt par være lig med hinanden, og alle punkterne vil ligge på linjen $\theta = 45°$. Til at vurdere bæreevnemodellens præcision anvendes bias, b og modellens variationskoefficient for modelusikkerheden. Ved b=1 estimerer bæreevnemodellen værdier omkring den reelle bæreevne, ved b>1 estimerer bæreevnemodellen værdier lavere den reelle bæreevne og er derved konservativ, mens ved b<1 estimerer bæreevnemodellen værdier højere den reelle bæreevne. Modellens variationskoefficient for modelusikkerheden indikerer, hvor spredte punkterne er. Ved højere variationskoefficient er punkterne mere spredte.

A.1 Bestemmelse af Bias og Variationskoefficient for Modelusikkerhed

Bias, b, bestemmes for at kunne bedømme hvordan bæreevnemodellen estimerer bæreevnen:

$$b_i = \frac{r_{e,i}}{r_{t,i}} \tag{A.1.1}$$

Middelværdien af, b, bestemmes ved *mindste kvadraters metode*:

$$\bar{b} = \frac{\sum r_e r_t}{\sum r_t^2} \tag{A.1.2}$$

Variationskoefficienten for modelusikkerheden, V_δ, bestemmes ved følgende fremgangsmåde. Denne fremgangsmåde antager at den grundlæggende usikkerhed er lognormalfordelt.

$$\delta_i = \frac{r_{ei}}{b r_{ti}} \tag{A.1.3}$$

$$\Delta_i = \ln \delta_i \tag{A.1.4}$$

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \Delta_i \tag{A.1.5}$$

$$s_\Delta^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 \tag{A.1.6}$$

$$V_\delta = \sqrt{\exp\left(s_\Delta^2\right) - 1} \tag{A.1.7}$$

Variationskoefficienten, der er relateret til modellens fysiske usikkerheder **X** bestemmes ved (A.1.8), som lineariserer bæreevnemodellen ved punktet $f_t(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, ..., \mu_{X_n})$.

$$V_{rt}^2 = \frac{1}{f_t(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, ..., \mu_{X_n})^2} \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{\partial f_t}{\partial x_j} \sigma_{X_j} \right)^2 \tag{A.1.8}$$

Hvis modellen kan skrives som et produkt af de fysiske usikkerheder kan formuleringen simplificeres til:

$$V_{rt}^2 = V_{X_1}^2 + V_{X_2}^2 + ... + V_{X_n}^2 \tag{A.1.9}$$

For små værdier af V_δ^2 og V_{rt}^2 kan den totale variationskoeffcient, V_r, tilnærmes ved:

$$V_r^2 = V_\delta^2 + V_{rt}^2 \tag{A.1.10}$$

B. Data for boltsamlingsforsøg

e [mm]	p1 [mm]	c [mm]	p2 [mm]	w [mm]	t [mm]	d0 [mm]	d [mm]	m [-]	n [-]	m×n [-]	Re kN
45.4	-	26	-	52	8.01	13.18	12	1	1	1	33.65
45.3	-	26	-	52	8.04	13.01	12	1	1	1	36.48
45.7	-	26	52	104	7.94	13.04	12	2	1	2	64.82
45.7	-	26	52	104	8	13	12	2	1	2	69.79
44.9	52	26	-	52	8	12.9	12	1	2	2	60.12
45.6	52	26	-	52	7.99	13.15	12	1	2	2	59.99
45.8	-	26	52	156	8.02	12.92	12	3	1	3	86.66
46.2	-	26	52	156	8	12.73	12	3	1	3	89.26
45.2	52	26	-	52	8	13.11	12	1	3	3	86.11
45.5	52	26	-	52	8.04	13	12	1	3	3	77.54
45.4	52	26	52	104	8.01	12.9	12	2	2	4	130.78
44.7	52	26	52	104	7.99	12.88	12	2	2	4	113.33
35	-	20	-	40	6	10	10	1	1	1	17.6
35	-	20	-	40	6	10	10	1	1	1	16.4
35	-	20	-	40	6	10	10	1	1	1	18.3
35	-	20	-	40	6	10	10	1	1	1	18.1
35	-	20	-	40	6	10	10	1	1	1	15.4
35	-	20	-	40	6	11	10	1	1	1	16.6
35	-	20	-	40	6	11	10	1	1	1	17.5
35	-	20	-	40	6	11	10	1	1	1	17.1
35	-	20	-	40	6	11	10	1	1	1	17
35	-	20	-	40	6	11	10	1	1	1	16.4
35	40	20	-	40	6	10	10	1	2	2	33.5
35	40	20	-	40	6	10	10	1	2	2	32.7
35	40	20	-	40	6	10	10	1	2	2	30.5
35	40	20	-	40	6	10	10	1	2	2	33.3
35	40	20	-	40	6	11	10	1	2	2	33.5
35	40	20	-	40	6	11	10	1	2	2	34
35	40	20	-	40	6	11	10	1	2	2	31.9
35	40	20	-	40	6	11	10	1	2	2	34.1
35	40	20	-	40	6	11	10	1	2	2	30.9
35	40	20	-	40	6	11	10	1	3	3	40.8
35	40	20	-	40	6	11	10	1	3	3	44.9
35	40	20	-	40	6	11	10	1	3	3	45.7
35	40	20	-	40	6	11	10	1	3	3	43.6
35	40	20	-	40	6	11	10	1	3	3	42.8
35	-	20	40	80	6	10	10	2	1	2	39.8
35	-	20	40	80	6	10	10	2	1	2	38.5
35	-	20	40	80	6	10	10	2	1	2	39.6
35	-	20	40	80	6	10	10	2	1	2	35.1
35	-	20	40	80	6	11	10	2	1	2	34.5

e [mm]	p1 [mm]	c [mm]	p2 [mm]	w [mm]	t [mm]	d0 [mm]	d [mm]	m [-]	n [-]	m×n [-]	Re kN
35	-	20	40	80	6	11	10	2	1	2	37.7
35	-	20	40	80	6	11	10	2	1	2	35
35	-	20	40	80	6	11	10	2	1	2	34.9
35	-	20	40	80	6	11	10	2	1	2	36.7
35	40	20	40	80	6	10	10	2	2	4	80.2
35	40	20	40	80	6	10	10	2	2	4	71.9
35	40	20	40	80	6	10	10	2	2	4	76.7
35	40	20	40	80	6	10	10	2	2	4	70
35	40	20	40	80	6	10	10	2	2	4	72.2
35	40	20	40	80	6	11	10	2	2	4	67.9
35	40	20	40	80	6	11	10	2	2	4	74.1
35	40	20	40	80	6	11	10	2	2	4	67.7
35	40	20	40	80	6	11	10	2	2	4	69.9
35	40	20	40	80	6	11	10	2	2	4	64.6
21	-	12	-	24	8	8	6	1	1	1	16.02
21	-	12	-	24	8	8	6	1	1	1	16.44
21	-	12	-	24	6	6.5	6	1	1	1	8.63
21	-	12	-	24	6	6.5	6	1	1	1	8.15
21	-	12	-	24	6	6.5	6	1	1	1	8.44
21	-	12	-	24	6	6.5	6	1	1	1	8.37
21	-	12	-	24	6	6.5	6	1	1	1	8.09
21	-	12	-	24	6	6.5	6	1	1	1	8.14
21	-	12	-	24	8	6.5	6	1	1	1	11.39
21	-	12	-	24	8	6.5	6	1	1	1	12.86
21	-	12	-	24	8	6.5	6	1	1	1	12.42
21	-	12	-	24	8	6.5	6	1	1	1	13.82
21	-	12	-	24	8	6.5	6	1	1	1	12.23
21	-	12	-	24	8	6.5	6	1	1	1	12.73
42	-	24	-	48	8	12	12	1	1	1	27.32
42	-	24	-	48	8	12	12	1	1	1	25.32
42	-	24	-	48	8	12	12	1	1	1	25.67
42	-	24	-	48	8	12	12	1	1	1	27.06
42	-	24	-	48	8	12	12	1	1	1	26.81
42	-	24	-	48	8	12	12	1	1	1	27.13
35	-	20	-	40	10	10	10	1	1	1	26.96
35	-	20	-	40	10	10	10	1	1	1	28.52
35	-	20	-	40	10	10	10	1	1	1	26.46
35	-	20	-	40	10	10	10	1	1	1	28.23
35	-	20	-	40	10	10	10	1	1	1	28.5
35	-	20	-	40	10	10	10	1	1	1	27.39
56	-	32	-	64	10	16	16	1	1	1	44.6
56	-	32	-	64	10	16	16	1	1	1	45.64
56	-	32	-	64	10	16	16	1	1	1	44.52
56	-	32	-	64	10	16	16	1	1	1	44.5
56	-	32	-	64	10	16	16	1	1	1	45.89
56	-	32	-	64	10	16	16	1	1	1	45.31
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	34.56
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	34.66
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	34.17
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	34.08

e [mm]	p1 [mm]	c [mm]	p2 [mm]	w [mm]	t [mm]	d0 [mm]	d [mm]	m [-]	n [-]	m×n [-]	Re kN
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	34.51
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	33.59
35	-	20	-	40	15	10	10	1	1	1	41.97
35	-	20	-	40	15	10	10	1	1	1	47.33
35	-	20	-	40	15	10	10	1	1	1	44.29
35	-	20	-	40	15	10	10	1	1	1	46.93
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	33.2
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	30.5
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	31.47
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	31.4
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	32.18
35	-	20	-	40	12	10	10	1	1	1	33.66
21	24	12	-	24	8	8	6	1	2	2	31.97
21	24	12	-	24	8	8	6	1	2	2	30.38
21	24	12	-	24	8	8	6	1	2	2	47.04
21	24	12	-	24	8	8	6	1	2	2	45.7

Tabel B.1: Konfigurationer og resultater for boltsamlingsforsøg. [Oppe, 2008]

C. Data for stabilitetsbrudsforsøg

Profil [-]	l_{cr} [mm]	f_{ux2} [N/mm^2]	E_{Gesamt} [N/mm^2]	N_{ux2} [kN]	N_{cr} [kN]	λ_f [-]	N_e [kN]
V100	1000	199,11	34351	613,9	1479,72	0,64	993,7
V60	1001	177,71	28739	197,55	160,35	1,11	139,4
V60	1000	177,71	28739	197,55	160,67	1,11	143,4
V100	1501	199,11	34351	613,9	656,78	0,97	529,4
V50	1001	204,73	25075	187,36	77,72	1,55	75,8
V50	999	204,73	25075	187,36	78,03	1,55	77,2
V100	2001	199,11	34351	613,9	369,56	1,29	298,5
V50	1501	204,73	25075	187,36	34,57	2,33	36,1
V60	2000	177,71	28739	197,55	40,17	2,22	39,8
V100	3000	199,11	34351	613,9	164,41	1,93	177,6
V60	1028	177,71	28739	197,55	152,04	1,14	192
V60	1028	177,71	28739	197,55	152,04	1,14	299
V60	1028	177,71	28739	197,55	152,04	1,14	270
V60	1028	177,71	28739	197,55	152,04	1,14	298
V240	1059	93,74	29984,5	1042,91	25550,19	0,2	1166
V240	2059	93,74	29984,5	1042,91	6758,86	0,39	864
V240	3079	93,74	29984,5	1042,91	3022,5	0,59	985
V240	1000	93,74	29984,5	1042,91	28654,05	0,19	1263,84
V240	680	93,74	29984,5	1042,91	61968,1	0,13	1399,8
V120	3100	145,89	28727	531,22	225,74	1,53	286,7
V120	3100	145,89	28727	531,22	225,74	1,53	223
V132	3113	169,14	31232	816,78	385,01	1,46	370
V132	3113	169,14	31232	816,78	385,01	1,46	318
V132	3113	169,14	31232	816,78	385,01	1,46	351
V132	3613	169,14	31232	816,78	285,82	1,69	356
V132	2613	169,14	31232	816,78	546,46	1,22	603
I200w	994	128,76	33170,53	431,04	566,92	0,87	384,9
I240w	995	128,94	33424,79	631,11	1193,03	0,73	942,8
I300w	994	135,55	34722,37	1014,17	3022,57	0,58	1646
I240w	1496	128,94	33424,79	631,11	527,76	1,09	497,4
I300w	1995	135,55	34722,37	1014,17	750,35	1,16	604,4
I120w	994	139,57	30949,21	169,96	72,21	1,53	163,3
I200w	1995	128,76	33170,53	431,04	140,74	1,75	102,2
I300w	2994	135,55	34722,37	1014,17	333,15	1,74	300,7
I200w	2994	128,76	33170,53	431,04	62,49	2,63	61,3
I300w	2993	135,55	34722,37	1014,17	333,38	1,74	316,7
I120w	2831	139,57	30949,21	169,96	8,9	4,37	166
I200w	100	128,76	33170,53	431,04	56013,84	0,09	1525,45
I300w	574	135,55	34722,37	1014,17	9064,11	0,33	1611,11
I240w	100	128,94	33424,79	631,11	118113,3	0,07	1757,37
I200w	500	128,76	33170,53	431,04	2240,55	0,44	759,39

Profil [-]	l_{cr} [mm]	f_{ux2} [N/mm^2]	E_{Gesamt} [N/mm^2]	N_{ux2} [kN]	N_{cr} [kN]	λ_f [-]	N_e [kN]
I300w	500	135,55	34722,37	1014,17	11945,63	0,29	1740,4
I160w	200	129,62	34351	273,55	5860,96	0,22	449,09
U300w	995	113,62	39220	742,59	1663,45	0,67	885,2
U360w	994	121,31	34788,6	1009,94	3032,97	0,58	1681,7
U200w	994	102,3	29607,6	280,59	243,51	1,07	313,7
U300w	1495	113,62	39220	742,59	736,84	1	595,5
U360w	1994	121,31	34788,6	1009,94	753,69	1,16	609,9
U120w	1495	79,17	30789,48	95,34	38,06	1,58	29,7
U200w	1494	102,3	29607,6	280,59	107,79	1,61	90,6
U360w	2993	121,31	34788,6	1009,94	334,52	1,74	313
U300w	2994	113,62	39220	742,59	183,72	2,01	153,8
U360w	2994	121,31	34788,6	1009,94	334,3	1,74	305,8
U200w	2831	102,3	29607,6	280,59	30,02	3,06	385
U140w	1000	73,01	29148,38	59,3	37,51	1,26	115,56
U140w	500	73,01	29148,38	59,3	150,05	0,63	113,94
U300w	680	113,62	39220	742,59	3561,54	0,46	1382,63
I240s	1495	128,94	33424,79	631,11	7324,93	0,29	1073,1
I300s	1997	135,55	34722,37	1014,17	10356,26	0,31	1708,6
I120s	994	139,57	30949,21	169,96	996,76	0,41	273,9
I200s	1995	128,76	33170,53	431,04	1955,22	0,47	509,8
I120s	1494	139,57	30949,21	169,96	441,23	0,62	232,8
I240s	2994	128,94	33424,79	631,11	1826,34	0,59	576,3
I120s	2994	139,57	30949,21	169,96	109,87	1,24	94,5
I300s	3059	135,55	34722,37	1014,17	4413,67	0,48	1434,64
I160s	1831	129,62	34351	273,55	979,01	0,53	462
I160s	2831	129,62	34351	273,55	409,53	0,82	443
I200s	831	128,76	33170,53	431,04	11268,85	0,2	698
I200s	2831	128,76	33170,53	431,04	970,96	0,67	681
I240s	1831	128,94	33424,79	631,11	4883,25	0,36	986
I240s	2831	128,94	33424,79	631,11	2042,71	0,56	1008
I300s	831	135,55	34722,37	1014,17	59807,66	0,13	1483
I300s	2831	135,55	34722,37	1014,17	5153,23	0,44	1435
I200s	100	128,76	33170,53	431,04	778183	0,02	1525,45
I300s	574	135,55	34722,37	1014,17	125353,1	0,09	1611,11
I240s	100	128,94	33424,79	631,11	1637141	0,02	1757,37
I200s	500	128,76	33170,53	431,04	31127,32	0,12	759,39
I300s	500	135,55	34722,37	1014,17	165203,4	0,08	1740,4
I160s	200	129,62	34351	273,55	82054,55	0,06	449,09
U300s	995	113,62	39220	742,59	32334,47	0,15	1139,4
U360s	994	121,31	34788,6	1009,94	58680,75	0,13	1569,5
U200s	994	102,3	29607,6	280,59	4699,39	0,24	457,2
U360s	1994	121,31	34788,6	1009,94	14582,03	0,26	1481,1
U120s	994	79,17	30789,48	95,34	817,89	0,34	199,8
U200s	1494	102,3	29607,6	280,59	2080,24	0,37	421,4
U120s	1494	79,17	30789,48	95,34	362,05	0,51	189
U120s	2994	79,17	30789,48	95,34	90,15	1,03	116,7
U120s	2831	79,17	30789,48	95,34	100,83	0,97	125
U140s	1831	73,01	29148,38	59,3	236,06	0,5	95
U200s	1831	102,3	29607,6	280,59	1384,96	0,45	407
U240s	1831	82,98	25318,26	208,55	1743,63	0,35	291

Profil [-]	l_{cr} [mm]	f_{ux2} [N/mm^2]	E_{Gesamt} [N/mm^2]	N_{ux2} [kN]	N_{cr} [kN]	λ_f [-]	N_e [kN]
U300s	2831	113,62	39220	742,59	3994,22	0,43	1033
U140s	1000	73,01	29148,38	59,3	791,41	0,27	115,56
U140s	500	73,01	29148,38	59,3	3165,65	0,14	113,94
U300s	680	113,62	39220	742,59	69229,97	0,1	1382,63

Tabel C.1: Data for stabilitetsbrudsforsøg. [Trumpf, 2006]