



Universitetet  
i Stavanger

**DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET**

## **MASTEROPPGAVE**

|  |  |
|--|--|
| Studieprogram/spesialisering:<br>Konstruksjoner og materialer -<br>Maskinkonstruksjon  | Vårsemesteret, 2019<br><br>Åpen                              |
| Forfatter:<br>Håkon Neeraas  | .....<br>(signatur forfatter)                                |
| Fagansvarlig:<br>Gerhard Ersdal  |  |
| Veileder(e):<br>Gerhard Ersdal   |  |
| Tittel på masteroppgaven:<br>Sprekkvekst og<br>inspeksjonsplanlegging<br><br>Engelsk tittel: Crack growth<br>and inspection planning |  |
| Studiepoeng: 30  |  |
| Emneord:<br>Sprekkvekst<br>Inspeksjonsplanlegging<br>Utmatting<br>Monte Carlo Simulering   | Sidetall: 77<br><br>Vedlegg: 40<br><br>Stavanger, 15.06/2019 |

Forside for masteroppgave  
Det teknisk-naturvitenskapelige  
fakultet

UNIVERSITET I STAVANGER

MASTEROPPGAVE

**Sprekkvekst og  
inspeksjonsplanlegging**

Skrevet av:

Håkon Neeraas

# SAMMENDRAG

---

Hensikten med denne oppgaven er å undersøke behovet for inspeksjoner for å oppdage sprekkvekst i et kritisk knutepunkt på en offshore jacket underlagt syklisk bølgebelastning. Det er studert hvor ofte det er nødvendig med inspeksjoner og hvordan inspeksjonsintervallene endrer seg med tiden. I tillegg er det undersøkt sannsynligheten for funn av sprekker, og hvor ofte det er et behov for reparasjon med tiden. Effekten av usikkerheter er også tatt med i beregningene.

Simuleringer er foretatt i MATLAB, ved bruk av Monte Carlo simuleringer. Bruddmekanisk modell er kalibrert opp mot SN- kurve for tre forskjellige utmattingslevetider: 22, 39 og 60 år.

Simuleringene er foretatt i 3 Studier.

Studie 1 simuleres med sannsynlighet for akseptabel bruddfeil lik 0.01 for beregnede utmattingslevetider, og varierende årlig, globale og initiale sprekkvekst usikkerheter. Resultatene som kommer ut fra simuleringen viser her første inspeksjon og gjennomsnittlig inspeksjon for CVI og MPI som inspeksjonsmetode. I Studie 2 endres sannsynligheten for akseptabel bruddfeil til 0.001. Her sammenlignes bestemte utmattingslevetider som følge av reparasjonsbehovet, samt tilhørende inspeksjonsintervaller for CVI og MPI. I Studie 3 sammenlignes resultater for bestemte utmattingslevetider med sannsynlighet for akseptabel bruddfeil lik 0.001 og 0.01, som følge av reparasjonsbehovet og inspeksjonsintervaller.

Det går frem av resultatene for Studie 1 at første inspeksjon og gjennomsnittlig inspeksjon synker med økende usikkerhet for alle utmattingslevetider. Reparasjonsbehovet blir større når sannsynligheten for bruddfeil endres til 0.001. Studie 3 viser en lavere sannsynlighet for reparasjon ved god simuleringskvalitet. Inspeksjonsintervallet synker når sannsynligheten for akseptabel bruddfeil endres fra 0.01 til 0.001.

# FORORD

---

Denne masteroppgaven er gjennomført som en avsluttende del av studiet for å tilfredsstille krav til mastergrad i konstruksjoner og materialer ved Universitet i Stavanger, fakultet for vitenskap og teknologi. Masteroppgaven er gjennomført fra januar til juni 2019.

Som en del av denne masteroppgaven har en MATLAB- fil blitt brukt i simuleringer. Denne MATLAB- filen er utarbeidet av Magnus G. Ersdal og Gerhard Ersdal. Dette er deres verk, hvor undertegnende har gjort minimale endringer for å tilpasse oppgaven.

Jeg vil takke min veileder professor Gerhard Ersdal, ved Universitet i Stavanger og Petroleumstilsynet, for hjelp og gode råd under hele dette arbeidet. I tillegg vil jeg takke Narve Oma, ved Petroleumstilsynet, for gode innspill under veiledende møter underveis i arbeidet.

# INNHold

---

|  |     |
|--|-----|
| Sammendrag .....   | iii |
| Forord .....   | iv  |
| Figurliste .....   | vii |
| Tabelliste .....   | ix  |
| sybolliste .....   | x   |
| Forkortelser .....   | xi  |
| 1 Introduksjon.....  | 1   |
| 1.1 Bakgrunn .....   | 1   |
| 1.2 Problembeskrivelse .....   | 2   |
| 1.3 Rapportens oppbygning.....   | 2   |
| 2 Utmattingsteori .....  | 3   |
| 2.1 Utmatting og sprekkvekst.....  | 4   |
| 2.2 Bruddmekanisk sprekkvekst.....   | 4   |
| 2.3 SN utmatting.....  | 6   |
| 2.3.1 Den nominelle spenningsmetoden.....  | 7   |
| 2.3.2 Hot- Spot Stress Method .....  | 8   |
| 3 Simuleringsprosessen .....   | 9   |
| 4 Teoretisk fremstilling av simuleringen.....  | 12  |
| 4.1 Probabilistisk modell .....  | 12  |
| 4.1.1 Langtidsbestemmelse av sjøtilstand .....                                       | 12  |
| 4.1.2 Syklisk utmattings spenning (ekvivalent syklisk spenning for sjøtilstand)..... | 13  |
| 4.1.3 Bruddmekanisk sprekkvekst.....   | 13  |
| 4.1.4 Initial sprekkdybde .....  | 14  |
| 4.1.5 Inspeksjoner.....  | 14  |
| 4.2 Monte Carlo simulering.....  | 16  |
| 4.2.1 Nødvendig antall simuleringer .....  | 17  |
| 4.2.2 Modellusikkerhet.....  | 18  |
| 4.3 Kalibrering av bruddmekanisk modell .....  | 19  |
| 5 Resultater.....  | 20  |
| 5.1 Resultater fra simuleringene.....  | 22  |
| 5.1.1 Kalibrering av utmattingslevetid .....   | 26  |
| 5.2 Studie 1:.....   | 28  |
| 5.2.1 Resultater for 22 års utmattingslevetid.....                                   | 28  |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.2.2 | Resultater for 39 års utmattingslevetid.....  | 31 |
| 5.2.3 | Resultater for 60 års utmattingslevetid.....  | 35 |
| 5.2.4 | Samlet sammenligning av første inspeksjon for CVI og MPI.....   | 39 |
| 5.3   | Sammenligning av a0CoV lik 0, 0.1 og 0.2 .....  | 42 |
| 5.4   | Studie 2:.....  | 45 |
| 5.4.1 | Sammenligning av forskjellige utmattingslevetider for CVI og MPI med $P_{\text{fac}}$ lik 0.001<br>45 |    |
| 5.5   | Studie 3.....   | 54 |
| 5.5.1 | Sammenligning av $P_{\text{fac}}$ lik 0.001 og 0.01 for CVI med usikkerhet.....                       | 54 |
| 5.5.2 | Sammenligning av $P_{\text{fac}}$ lik 0.001 og 0.01 for CVI uten usikkerhet .....                     | 58 |
| 5.5.3 | Sammenligning av $P_{\text{fac}}$ lik 0.001 og 0.01 for MPI med usikkerhet.....                       | 61 |
| 5.5.4 | Sammenligning av $P_{\text{fac}}$ lik 0.001 og 0.01 for MPI uten usikkerhet.....                      | 65 |
| 6     | Diskusjon.....  | 68 |
| 6.1   | Studie 1.....   | 68 |
| 6.2   | Studie 2.....   | 71 |
| 6.3   | Studie 3.....   | 72 |
| 7     | Konklusjon .....  | 74 |
|       | Referanser.....   | 76 |
|       | Vedlegg 1: Matlab-fil .....   | 78 |
|       | Vedlegg 2: Matlab-fil (SN_FM_kalibrering) .....   | 83 |
|       | Vedlegg 3: Produserte simuleringsfigurer.....   | 87 |

# FIGURLISTE

|   |    |
|---|----|
| Figur 2.1: Sprekkvekstkurve fremstilt i et logaritmisk diagram .....  | 5  |
| Figur 3.1: Deler av simuleringsprosessen .....  | 10 |
| Figur 3.2: Simuleringsprosessen .....   | 11 |
| Figur 5.1: Weibullfordeling av langtidsbestemmelse av sjøtilstander.....  | 22 |
| Figur 5.2: Weibullfordeling av ekvivalent syklisk spenning .....  | 22 |
| Figur 5.3: Fordelingen av initial sprekkstørrelse, $\alpha_0$ .....   | 23 |
| Figur 5.4: Fordelingen av bruddmekaniske data .....   | 23 |
| Figur 5.5: Sprekkvekst gjennom levetiden.....   | 24 |
| Figur 5.6: Sannsynlighet for bruddfeil.....   | 24 |
| Figur 5.7: År for når bruddfeil i hvert knutepunkt oppstår .....  | 25 |
| Figur 5.8: Sannsynlighet for reparasjon .....   | 25 |
| Figur 5.9: Fordelingen av sprekker før og etter oppdatering 1 .....   | 25 |
| Figur 5.10: Fordelingen av sprekker før og etter oppdatering 2 .....  | 25 |
| Figur 5.11: Kalibrering av 22 års utmattingslevetid.....  | 27 |
| Figur 5.12: Kalibrering av 39 års utmattingslevetid.....  | 27 |
| Figur 5.13: Kalibrering av 60 års utmattingslevetid.....  | 27 |
| Figur 5.14: Første inspeksjon for utmattingslevetid på 22 år .....  | 30 |
| Figur 5.15: Gjennomsnittlig inspeksjon for utmattingslevetid på 22 år .....   | 31 |
| Figur 5.16: Første inspeksjon for utmattingslevetid på 39 år .....  | 33 |
| Figur 5.17: Gjennomsnittlig inspeksjon for 39 års utmattingslevetid.....  | 34 |
| Figur 5.18: Første inspeksjon for 60 års utmattingslevetid.....   | 36 |
| Figur 5.19: Gjennomsnittlig inspeksjon for 60 års utmattingslevetid.....  | 38 |
| Figur 5.20: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 22 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV.                                    | 39 |
| Figur 5.21: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 22 års utmattingslevetid, GCoV vs. YCoV.                                    | 39 |
| Figur 5.22: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 39 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV.                                    | 40 |
| Figur 5.23: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 39 års utmattingslevetid, GCoV vs. YCoV.                                    | 40 |
| Figur 5.24: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 60 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV.                                    | 40 |
| Figur 5.25: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 60 års utmattingslevetid, GCoV vs. YCoV.                                    | 40 |
| Figur 5.26 Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 22 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV.                                     | 41 |
| Figur 5.27: Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 22 års utmattingslevetid, GCoV vs. YCoV                                     | 41 |
| Figur 5.28: Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 39 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV                                     | 41 |
| Figur 5.29: Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 39 års utmattingslevetid, GCoV vs. YCoV                                     | 41 |
| Figur 5.30: Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 60 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV                                     | 42 |
| Figur 5.31: Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 60 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV                                     | 42 |
| Figur 5.32: Sammenligning av forskjellige initial sprekkvekstusikkerheter .....   | 43 |
| Figur 5.33: Inspeksjonsintervaller for forskjellig initial sprekkvekstusikkerhet.....   | 44 |
| Figur 5.34: Sammenligning av forskjellige utmattingslevetider for CVI og $P_{\text{facc}}$ lik 0.001 .....                          | 47 |
| Figur 5.35: Skalering av utmattingslevetid for CVI .....  | 49 |
| Figur 5.36: Sammenligning av forskjellige utmattingslevetider for MPI og $P_{\text{facc}}$ lik 0.001 .....                          | 51 |
| Figur 5.37: Skalering av utmattingslevetid for MPI.....   | 53 |
| Figur 5.38: Sammenligning av forskjellig utmattingslevetider for CVI og $P_{\text{facc}}$ lik 0.001 vs. 0.01, med usikkerhet .....  | 56 |
| Figur 5.39: Sammenligning av inspeksjonsintervaller for CVI og $P_{\text{facc}}$ lik 0.001 vs. 0.01, med usikkerhet .....           | 57 |
| Figur 5.40: Sammenligning av forskjellig utmattingslevetider for CVI og $P_{\text{facc}}$ lik 0.001 vs. 0.01, uten usikkerhet ..... | 59 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figur 5.41: Sammenligning av inspeksjonsintervaller for CVI og <math>P_{\text{facc}}</math> lik 0.001 vs. 0.01, uten usikkerhet</b> .....          | 61 |
| <b>Figur 5.42: Sammenligning av forskjellig utmattingslevetider for MPI og <math>P_{\text{facc}}</math> lik 0.001 vs. 0.01, med usikkerhet</b> .....  | 63 |
| <b>Figur 5.43: Sammenligning av inspeksjonsintervaller for MPI og <math>P_{\text{facc}}</math> lik 0.001 vs. 0.01, med usikkerhet</b> .....           | 64 |
| <b>Figur 5.44: Sammenligning av forskjellig utmattingslevetider for MPI og <math>P_{\text{facc}}</math> lik 0.001 vs. 0.01, uten usikkerhet</b> ..... | 66 |
| <b>Figur 5.45: Sammenligning av inspeksjonsintervaller for CVI og <math>P_{\text{facc}}</math> lik 0.001 vs. 0.01, uten usikkerhet</b> .....          | 67 |



# TABELLISTE

|   |    |
|---|----|
| Tabell 4-1: PoD- kurver for MPI.....                              | 15 |
| Tabell 4-2: PoD- kurver for CVI.....                              | 16 |
| Tabell 4-3: Antall simuleringer med forskjellig nøyaktighet ..... | 18 |
| Tabell 5-1: Stokastiske variabler som inngår i modellen.....      | 21 |
| Tabell 5-2: Kalibrering av utmattingslevetid .....                | 26 |

# SYMBOLLISTE

| Variabel            | Forklaring                                 |
|---------------------|--|
| $da/dN$             | Sprekkvekst                                |
| $\Delta K$          | Spenningsintensitetsvidden                 |
| $\Delta K_{th}$     | Nedre grense for<br>$\Delta K$ , terskelen |
| $A$                 | Materialkonstant i Paris ligning           |
| $m$                 | Stigningen til sprekkveksten               |
| $K_{maks}$          | Maksimum spenningsintensitetsvidde         |
| $K_{min}$           | Minimum spenningsintensitetsvidde          |
| $K_c$               | Kritisk spenningsintensitetsvidde          |
| $R$                 | Spenningsforhold                           |
| $N$                 | Antall sykler                              |
| $a (2\cdot c)$      | Sprekk lengde (Sprekkdypde)                |
| $D$                 | Total delskade                             |
| $n$                 | Anslått antall sykler for spenningsvidde   |
| $\sigma_{nom}$      | Nominell spenning                          |
| $F$                 | Aksialkraft (kraften i lengderetningen)    |
| $A_t$               | Tverrsnittsarealet                         |
| $H_s$               | Signifikant bølgehøyde                     |
| $T_Z$               | Nulloppekryssingsperiode                   |
| $C_1$               | Bølgebelastningskoeffisient                |
| $C_2$               | Bølgebelastningskoeffisient \              |
| $\Delta\sigma_{eq}$ | Ekvivalent spenning                        |
| $F(a, t)$           | Geometrisk funksjon                        |
| $\mu_{a0}$          | Gjennomsnittlig initial sprekkdybde        |
| $X_0$               | Fordelingsparameter                        |
| $b$                 | Fordelingsparameter                        |
| $P_f$               | Sannsynlighet for avgrenset tilstandssvikt |
| $P_{facc}$          | Sannsynlighet for akseptabel bruddfeil     |

# FORKORTELSER

---

|        |                                    |
|--------|------------------------------------|
| COV    | Coefficient of variation           |
| DNV    | Det Norske Veritas                 |
| SD     | Standardavvik                      |
| NORSOK | Norsk Sokkels Konkurransesposisjon |
| CVI    | Close Visual Inspection            |
| MPI    | Magnetic Particle Inspection       |
| PoF    | Sannsynlighet for bruddfeil        |
| PoD    | Sannsynlighet for deteksjon        |

# 1 INTRODUKSJON

---

Denne masteroppgaven har sitt opphav fra faget OFF620 «Levetidsforlengelse av konstruksjoner» som ble gjennomført ved Universitet i Stavanger høsten 2018. Som en del av dette faget ble det gjennomført et prosjekt hvor det ble sett på levetidsforlengelse av et kritisk knutepunkt på en offshore jacket utsatt for syklisk bølgebelastning. Det ble spesielt sett på sprekkvekst og inspeksjonsrutiner og hvordan dette utvikler seg når tiden går.

Masteroppgaven er en videreføring av dette prosjektet.

## 1.1 BAKGRUNN

Probabilistiske metoder og konstruksjonspålitelighetsanalyser brukes ofte i inspeksjonsplanlegging for å avdekke sprekkvekst. Der er gode erfaringer med å bruke dette som grunnlag for en risikobasert inspeksjonsplanlegging. Det er imidlertid diskutert om disse er akseptable for eldre konstruksjoner, da disse ofte gir lengre og lengre inspeksjonsintervaller med økende alder. Disse økende inspeksjonsintervallene er i strid med den intuitive tanken om behovet for kortere intervaller med økende alder.

Det teoretiske grunnlaget for probabilistisk inspeksjonsplanlegging basert på konstruksjonspålitelighetsanalyser har eksistert i mange år, og ble blant annet beskrevet av H. O. Madsen et al (1987). Denne metoden ble utviklet for å kunne gjennomføres med såkalt First Order Reliability Method (FORM) og benytter en generell oppdatering når informasjon som for eksempel at ingen funn er identifisert ved inspeksjon. En alternativ metode for å oppdatere påliteligheten av en konstruksjon og dermed bestemme inspeksjonsbehovet er beskrevet av (Ersdal og Oma, 2019). I denne alternative metoden benyttes Monte Carlo simulering av et knutepunkt gjennom livsløpet, og hvor oppdatering knyttes bare til sprekkstørrelsen. Denne metoden dannet grunnlaget for denne masteroppgaven.

## **1.2 PROBLEMBESKRIVELSE**

Hensikten med denne masteroppgaven er å undersøke behovet for inspeksjoner for å oppdage sprekkvekst i et kritisk knutepunkt på en offshore jacket underlagt syklisk bølgebelastning.

Følgende punkter er studert:

- Hvor ofte er det nødvendig med inspeksjon for å holde konstruksjonen på en konstant minimal sikkerhet?
- Hvordan endres inspeksjonsintervallene med tiden?
- Hva er sannsynligheten for funn og dermed hvor ofte er det behov for reparasjon og hvordan endres dette med tiden?
- Effekten av forskjellige modellusikkerheter på de resulterende inspeksjonsintervaller

## **1.3 RAPPORTENS OPPBYGNING**

Kapittel 1 består av en introduksjon og bakgrunnsinformasjon, samt avgrensninger i oppgaven

Kapittel 2 tar for seg utmattingsteori

Kapittel 3 inneholder simuleringsprosessen

Kapittel 4 består av en teoretisk fremstilling av simuleringen

I kapittel 5 presenteres resultatene i form av figurer og tekst

I kapittel 6 og 7 diskuteres og konkluderes resultatene

Rapporten avsluttes med forslag til videre arbeid, referanser og vedlegg

## 2 UTMATTINGSTEORI

---

Utmatting rammer de fleste konstruksjonsmaterialer utsatt for sykliske laster. Når et materiale blir utsatt for vekslende spenning av en viss størrelse, over en viss tid, kan det oppstå sprekkdannelser og dette kalles utmatting. Under den industrielle revolusjonen fikk ingeniørene for alvor føle på dette problemet. Fra omkring 1830 finnes det beskrivelser av uventede brudd i maskindeler, og karakteristiske kjennetegn var lav, syklisk spenning og sprø bruddflate. Et eksempel på dette var brudd i jernbaneaksler. Jernbaneingeniøren A. Z. Wöhler utviklet i 1858 en fremgangsmåte, slik at materialets motstand skulle bli bedre rustet mot utmatting. Han utviklet Wöhler- kurver, senere også kjent som SN- kurver, for å bestemme utmattingsstryken til jernbaneakslinger basert på utmattingstester. Resultatene som Wöhler fikk ble seinere brukt av hans etterfølger, Spangenberg, og han plottet disse dataene i kurver med lineær absisse- og ordinatform<sup>1</sup>. I 1910 brukte en amerikaner ved navn Basquin de samme dataene som Wöhler fikk fra sine utmattingstester til å lage plot i log-log-form, på samme måte som SN- kurver presenteres i utmattingsstandarder i dag.

---

<sup>1</sup> Abscisse er x-koordinaten og ordinat er y-koordinaten i et rettvinklet koordinatsystem.

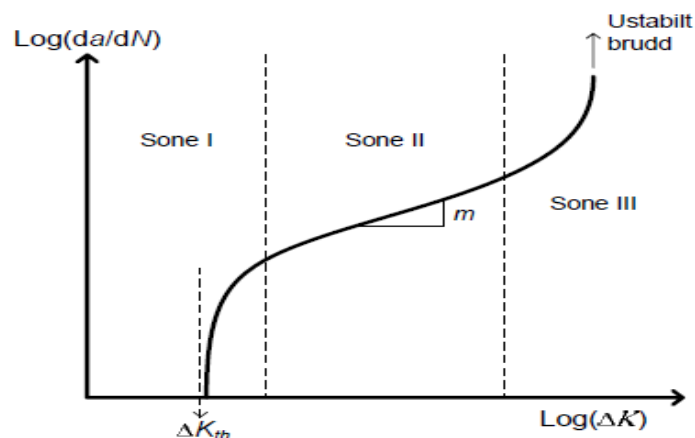
## 2.1 UTMATTING OG SPREKKVEKST

Det er to hovedmetoder for å bestemme levetiden til en konstruksjon utsatt for syklisk belastning før brudd oppstår som følge av sprekkvekst, bruddmekanisk sprekkvekstanalyse og SN- utmatting. Begge er relevante for utforming, drift og forlengelse av levetiden til en konstruksjon og begge metodene er empiriske basert på eksperimentelle data. En SN-beregning av levetiden for en konstruksjonsdel utsatt for sykliske laster gir kun antallet sykler som en kan forvente at konstruksjonsdelen kan tåle før den svikter, mens bruddmekanisk beregning kan brukes til å beregne sprekkvekst fra en definert startsprekk (defekt) eller en sprekk som er funnet under inspeksjon av en konstruksjon. Bruddmekanisk sprekkvekstanalyse er dermed velegnet til bruk i å bestemme behov for inspeksjoner.

Utviklingen av en utmattingsprekk består i hovedsak av tre stadier; sprekk initiering, sprekkvekst og ustabil brudd.

## 2.2 BRUDDMEKANISK SPREKKVEKST

Ifølge tradisjonell bruddmekanikk kan dette illustreres som vist i Figur 2.1. Figuren viser et sprekkvekstdiagram med log-log plot av  $\frac{da}{dN}$  og  $\Delta K$ , hvor  $\frac{da}{dN}$  kan beskrives som sprekkvekst per lastsyklus og  $\Delta K$  karakteriserer variasjon i spenningsintensitetsfaktoren (vidden). Figur 2.1 illustrerer en typisk sprekkvekst som følge av utmatting i et metall ved henholdsvis sone I, II og III.



**Figur 2.1: Sprekkvekstkurve fremstilt i et logaritmisk diagram**

Første stadium i utmattingsprosessen er initiering, omtalt som Sone I. I denne sonen bøyer kurven av og går mot en nedre grense for  $\Delta K$  lik terskelverdien  $\Delta K_{th}$ . Hvis  $\Delta K$  får en verdi under  $\Delta K_{th}$ , er det ingen sprekkvekst. Initieringsperioden kan være forskjellige i forhold til hvor sprekken oppstår. Hvis initieringen starter på en plan overflate, kan det ta lang tid før neste sone blir en realitet, og noe som kan utgjør det meste av komponentens levetid. Foregår initieringen ved en skarp defekt, kan den lokale spenningsvidden bli stor, noe som fører til at initieringsperioden kan gå mye raskere, og føre til at sone II utgjør den vesentligste delen av levetiden.

Neste stadium, omtalt Sone II, har en lineær form og blir formulert av Paris ligning som følger:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (2.1)$$

hvor  $A$  og  $m$  er materialkonstanter som bestemmes eksperimentelt, og  $\Delta K$  er spenningsintensitetsvidden lik  $K_{max} - K_{min}$ .

Formuleringen av Paris ligning gjelder kun for sone II, men denne ligningen har blitt modifisert av andre vitenskapsmenn til å gjelde for både sone I og III.



Foreman modifiserte Paris sin ligning til å gjelde for sone III slik:

$$\frac{da}{dN} = \frac{A\Delta K^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (2.2)$$

hvor  $K_c$  er kritisk spenningsintensitetsfaktoren og  $R$  er spenningsforholdet  $K_{min}/K_{maks}$ .

Klesnil og Lukas modifiserte Paris sin ligning for sone I slik:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (2.3)$$

Siste stadium er brudd, og dette skjer når sprekken har nådd en kritisk størrelse. Selve forløpet til bruddet kan skje svært hurtig og dermed være ustabil. Figur 2.1 viser at kurven for sone III bøyer av oppover, og dette kan resultere i at tilstanden  $K_{maks}$  ligger nærme den kritiske verdien for ustabil brudd.

## 2.3 SN UTMATTING

Den mest vanlige metoden for evaluering av utmattingslevetid er SN-metoden basert på bruk av SN-kurver som gir maksimalt antall spenningssyklus (N) for en detalj for forskjellige verdier av spenningsvidder (S). Kurvene baserer seg som tidligere nevnt på resultater oppnådd ved tester i laboratorier. SN- kurvene er sortert etter flere klasser avhengig av geometri og retning av spenningen i den sveisede forbindelsen. Hver klasse har en designet SN- kurve. Utmattingssprekker kan utvikle seg flere steder, som i endesveiståen, i sveiseroten og i sveisen selv. Hvert sted må bli klassifisert separat i samsvar med regelverk, standarder og veiledninger.

SN-kurver til bruk i design er basert på karakteristiske verdier, noe som vil si gjennomsnitt-minus-to-standardavvik kurver, for relevante eksperimentelle data. Dette er analogt med tilnærmingen brukt for den karakteristiske styrken til materialet. SN- kurvene er dermed forbundet med en 97.7% sannsynlig for overlevelse eller motsatt, at når beregnet levetid er nådd er det 2.3% sannsynlighet for å finne en sprekk der.

Den grunnleggende design SN- kurven er gitt ved:

$$\log(N) = \log(A) - m \cdot \log(S) \quad (2.4)$$

hvor  $S$  er spenningsvidden,  $N$  er anslått antall sykler til brudd for spenningsvidde  $S$ ,  $m$  er SN-kurvens negative omvendte helning (typisk satt lik 3), og  $\log(A)$  er avskjæring av  $\log(N)$  i SN- kurven.

I praksis vil ikke en konstruksjonsdetalj bli utsatt for spenningssykler med kun en spenningsvidde. For å kunne summere delskade fra forskjellige spenningsvidder ( $S$ ) foreslo A. G. Palmgren en formel for lineær summering av delskaden fra hver spenningsvidde  $S$ . Denne metoden ble mer kjent når den senere ble publisert av A. M. Miner, og kalles ofte Palmgren-Miner summasjon:

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (2.5)$$

hvor  $D$  er total delskade,  $n_i$  er anslått antall sykler for spenningsvidde  $S$  og  $N_i$  er anslått antall sykler til brudd for spenningsvidde  $S$ .

Det er tre grunnleggende metoder for evaluering av utmattingsspenninger med bestemte SN-kurver for hver metode:

- Den nominelle spenningsmetoden
- The Structural-Hot-Spot Stress (SHSS) Method
- The notch stress method

De to første metodene er mest vanlige, og vil dermed bli beskrevet nærmere i fortsettelsen.

### 2.3.1 Den nominelle spenningsmetoden

Den nominelle spenningen kan forklares som spenningen i konstruksjonen uten påvirkning fra geometrien til den sveisede forbindelsen, og kan bestemmes langt fra sveisen sprekken antas å ha oppstått. Den spesifikke spenningen i sveisen er da inkludert i SN- kurven for detaljen.

Nominell spenning følger klassisk lineærelastisk fasthetslære, og kan forklares som aksialkraft per tverrsnittsareal:

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

hvor  $\sigma_{nom}$  er nominell spenning,  $F$  er aksialkraft (kraften i lengderetningen) og  $A$  er tverrsnittsarealet.

Den nominelle spenningsmetoden er basert på omfattende tester for standardiserte sveisede knutepunkter og forbindelser. Knutepunktene er klassifisert etter type, belastning og form. Det antas og bekreftes av eksperimenter at sveiser med samme form har samme generelle utmattingsatferd, slik at en enkel SN- kurve kan benytte enhver forbindelse i denne sveiseklassen.

Den nominelle spenningsmetoden innebærer følge trinn:

1. Valg av sveiseklasse med tilhørende SN- kurver, definert av standarder
2. Identifisering av miljø (luft, sjøvann med katodisk beskyttelse, sjøvann uten korrosjon) for valg av SN- kurve
3. Beregning av nominelle spenningsområder
4. Korrigering av spenningsområdet for tykkelseeffekten og feiljustering
5. Bestemmelse av antall sykluser til utmattingsbrudd fra SN- kurver
6. Skadeberegninger og sikkerhetsvurderinger

### 2.3.2 Hot- Spot Stress Method

I motsetningen til den nominelle spenningsmetoden, som bestemmer spenningen lagt fra selve sveisen, opptrer Hot-Spot- spenningen lokalt. Det vil med andre ord si at den geometriske spenningen oppstår helt frem til sveisen, gjerne ved sveisetåen. Spenningene som oppstår på grunn av sveisegeometrien er ikke en del av Hot-Spot- metoden. For å beregne Hot-Spot- spenning brukt i SN, er normalt nominal spenning multiplisert med en spenningskonsentrasjonsfaktor, SCF:

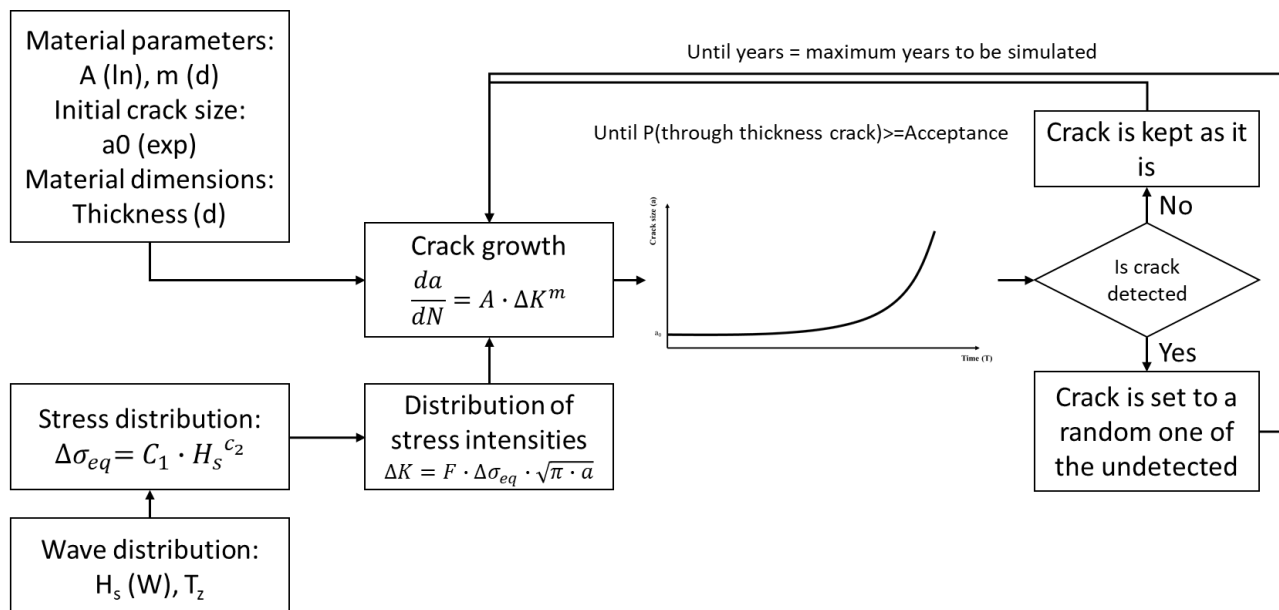
$$\Delta\sigma_{HotSpot} = SFC \cdot \Delta\sigma_{nom} \quad (2.7)$$

### 3 SIMULERINGSPROSESSEN

---

Simuleringer som er brukt i denne oppgaven studerer sprekkvekst og inspeksjonsbehovet til en offshore jacket, hvor det blir sett på et kritiske punkt i konstruksjonen som simuleres med forskjellige levetider og usikkerheter innebygd. Dette gjøres ved å bruke Monte Carlo simuleringer av et knutepunkt gjennom livsløpet på 100 år, hvor oppdateringer knyttes bare til sprekkstørrelsen. Simuleringene blir kjørt med både 50 000 og 400 000 simulerte knutepunkt, med tilhørende sannsynlighet for akseptabel bruddfeil tilsvarende henholdsvis 0.01 og 0.001.

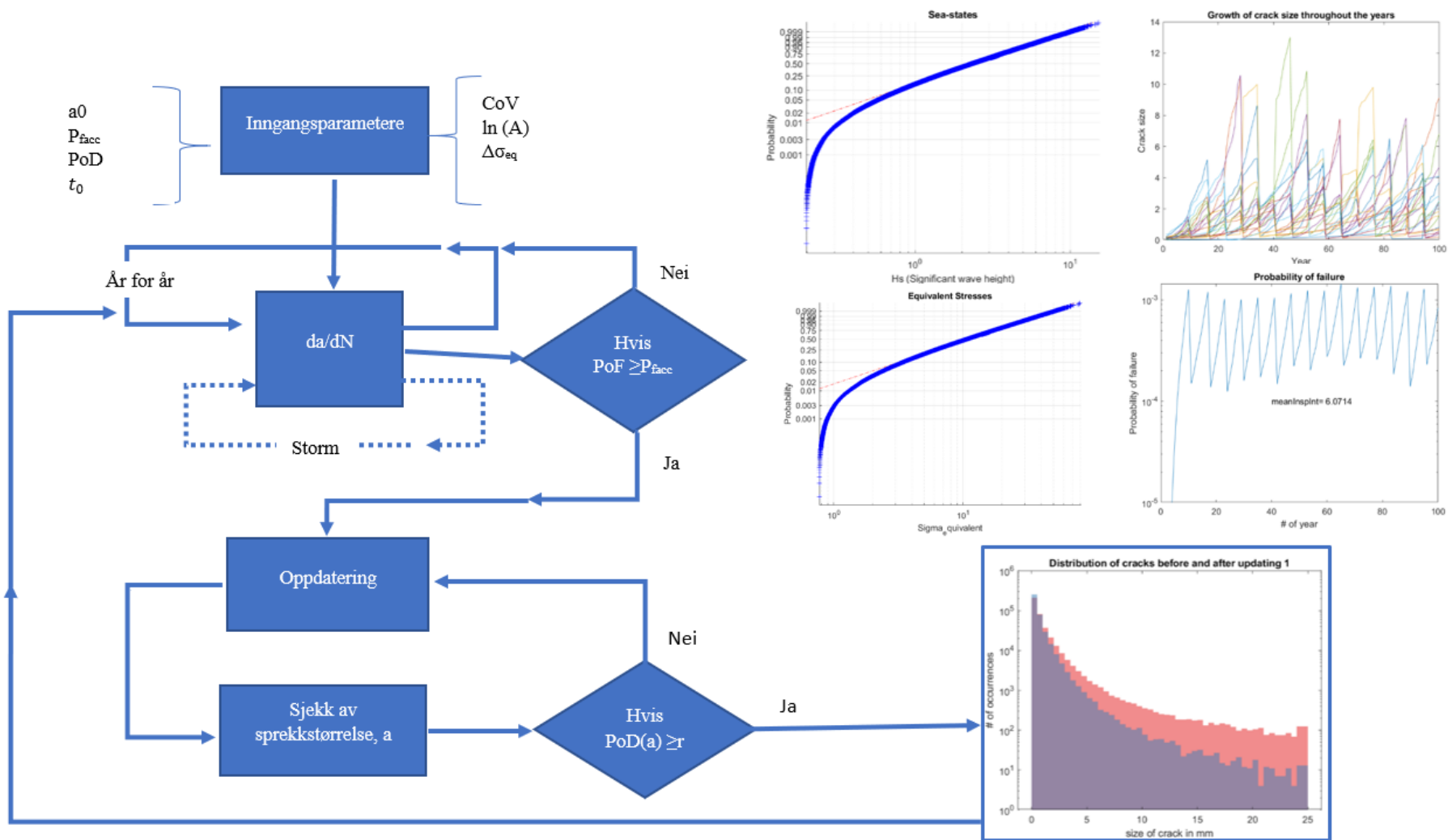
Deler av simuleringsprosessen er vist som i Figur 3.1 (Ersdal og Oma 2019). Første skritt i denne prosessen er å definere inngangsparametere. Det vil si materialparametere og initial sprekkstørrelse. Deretter defineres spenningsintensitetsvidden,  $\Delta K$ , med spenningsfordeling  $\Delta\sigma_{eq}$  gitt av bølgefordinen, og den geometriske funksjonen for en tubulær jacket forbindelse. Dette blir så satt inn i formelen for bruddmekanisk sprekkvekst. Kurven som vises på Figur 3.1 illustrerer sprekkveksten som funksjon av tiden, inntil sannsynligheten for akseptabel sprekkstørrelse er tilfredsstillt. Initial sprekkvekst er representert ved  $a_0$ , og inntreer i starten av levetiden. Etter som tiden går, med syklisk belastning, øker sprekkvekstkurven. Hvis en sprekk er oppdaget, blir den satt til en tilfeldig en av de uoppdagede. De uoppdagede sprekke blir beholdt som de er. Både oppdagede og uoppdagede sprekker blir så simulert på nytt, år for år, helt til maksimalt livsløp er oppnådd.



**Figur 3.1: Deler av simuleringsprosessen**

Det som derimot skjer når en oppdaget sprekk har sannsynligheten for bruddfeil større eller lik sannsynligheten for akseptabel bruddfeil, er at en inspeksjon blir foretatt med oppdatering av sprekken, noe som er illustrert i Figur 3.2. Den oppdaterte sprekken blir så simulert på nytt sammen med alle andre sprekker, før en ny oppdatering skjer når en sprekk havner utenfor tilfredsstillende sannsynligheten for akseptabel bruddfeil.

På høyre siden av Figur 3.2 er det illustrert fem forskjellige figurer tilhørende simuleringen. To av disse illustreringene viser både langtidsbestemmelse av sjøtilstander og ekvivalente spenninger i et Weibullfordelings-plot. Det er en illustrasjon av sprekkveksten gjennom livsløpet, mens de to siste illustreringene tar for seg sannsynligheten for bruddfeil, samt fordelingen av sprekker før og etter oppdatering.



Figur 3.2: Simuleringsprosessen

## 4 TEORETISK FREMSTILLING AV SIMULERINGEN

---

For å kunne studere sprekkvekst og dermed behovet for inspeksjoner, er det brukt Monte Carlo simuleringer. Simuleringene består av flere teoretiske ligninger som nå vil bli ramset opp og forklart som en del av den probabilistiske modellen. Videre blir Monte Carlo simulering forklart nærmere, samt tilhørende modellusikkerhet og nødvendig antall simuleringer for å tilfredsstille nøyaktigheten som kreves. Det avsluttes med å se på kalibrering av bruddmekanisk modell.

### 4.1 PROBABILISTISK MODELL

#### 4.1.1 Langtidsbestemmelse av sjøtilstand

Langtidsbestemmelse av sjøtilstanden, beskrevet av signifikant bølgehøyde,  $H_s$ , er antatt å følge en 3- parameter Weibullfordeling med fordelingsfunksjon lik:

$$F_{H_s}(h) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{h - H_0}{H_C - H_0} \right)^\gamma \right] \quad (4.1)$$

hvor  $H_0$ ,  $H_C$  og  $\gamma$  er parametere av fordelingen.

I simuleringene i denne oppgaven er en Weibullfordeling med data fra «the Kvitbjørn field in Northern Sea (Statoil 2000)» benyttet:  $H_C = 2.895m$ ,  $H_0 = 0.198m$  and  $\gamma = 1.499$ .

Midlere nulloppkrysningsperiode for en gitt sjøtilstand er, ifølge Krogstad (2004), satt til:

$$T_Z = 3.3 \cdot \sqrt{H_s} \quad (4.2)$$

med en minimums verdi på  $T_Z = 5.72$  s.

## 4.1.2 Syklisk utmattings spenning (ekvivalent syklisk spenning for sjøtilstand)

De sykliske spenningene kan bli simulert direkte fra de enkelte bølgene. Dette ville medført at hver sjøtilstand beskrevet av en  $H_s$  og en  $T_z$  må simuleres til en tidshistorie og en syklustelling (f. eks. Rainflow Counting Method) måtte vært brukt for å få en korrekt telling av alle spenningssykluser. I dette studiet skal konstruksjonsdelen vurderes for lange levetider (typisk opp til 100 år) og dermed vil en slik metode for beregning av syklisk utmattingspenning og sprekkvekst gå svært sakte. For å fremskynde simuleringen kan ekvivalent spenning i hver sjøtilstand brukes. I denne studien, foreslått av Ersdal G. (2005), er dette brukt:

$$\Delta\sigma_{eq} = \frac{C_1}{1.702 - 0.138 \cdot m_a} \cdot (H_s)^{C_2 - 0.03} \quad (4.3)$$

hvor  $C_1$  og  $C_2$  er bølgebelastningskoeffisienter,  $H_s$  er signifikant bølgehøyde og  $m_a$  er stigningen til sprekkveksten.

## 4.1.3 Bruddmekanisk sprekkvekst

Sprekkvekst er ved bruddmekanikk gitt ved Paris ligning:

$$\frac{da}{dN} = A \cdot \Delta K^m \quad (4.4)$$

hvor  $A$  og  $m$  er parametere for sprekkvekstkurven og

$$\Delta K = \Delta\sigma \cdot F(a, t) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.5)$$

Her er  $\Delta K$  er spenningsintensitetsvidden,  $\Delta\sigma$  er sykliske spenning,  $F(a, t)$  er geometrisk funksjon og  $a$  den øyeblikkelige sprekkdybden. For en tubulær jacket forbindelse, er den geometriske funksjonen gitt ved (Dalane, 1993):

$$F(a, t) = \left(1.08 - 0.7 \cdot \frac{a}{t}\right) \cdot \left(1.0 + 1.24 \cdot e^{-22.1 \frac{a}{t}} + 3.17 \cdot e^{-357 \frac{a}{t}}\right) \quad (4.6)$$



hvor  $a$  er øyeblikkelig sprekkdybde og  $t$  er tykkelsen av materialet. For hver sjøtilstand, er sprekkvekst beregnet etter (Dalane, 1993):

$$da_i = A \cdot [\Delta\sigma_{eq} \cdot F(a_{i-1}, t) \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{i-1}}]^m \cdot N_w \quad (4.7)$$

Her er  $N_w$  antall sykler i en sjøtilstand.

#### 4.1.4 Initial sprekkdybde

Den initiale sprekkdybden til sveisen i knutepunktet er antatt å være eksponentialfordelt med gjennomsnittlig initial sprekkdybde verdi  $\mu_{a0} = 0.11m$ , forslått av DNV (1996) med tetthets- og fordelingsfunksjon:

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} \quad (4.8)$$

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda \cdot x} \quad (4.9)$$

hvor  $\lambda = \frac{1}{\mu_{a0}}$ .

#### 4.1.5 Inspeksjoner

Metoden Ikke-destruktiv testing (NDT) brukes ofte til å lokalisere og måle defekter i konstruksjoner. Denne metoden benytter en definert funksjon som følge av oppstått sprekkstørrelse, gjennom sannsynlighet for deteksjon (PoD)- kurver. Det finnes PoD- kurver for flere forskjellige inspeksjonsmetoder, og i forskjellig grad av for eksempel tilgjengelighet: lett, moderat og vanskelig tilgang. Det er i tillegg forskjellige PoD- kurver for forhold over og under vann som kan ha mye å si for tilgjengelighet og utførelse av arbeid.

Det er valgt å se nærmere på to forskjellige inspeksjonsmetoder: Close Visual Inspection (CVI) og Eddy Current (EC), Magnetic Particle Inspection (MPI) og Alternatig Current Field Measurement (ACFM). De tre siste inspeksjonsmetodene som nettopp er nevnt opererer med samme fordelingsparametere, og blir dermed valgt som én inspeksjonsmetode. Av den grunn omtales inspeksjonsmetodene CVI og MPI videre i denne rapporten.

CVI regnes som effektiv for en generell vurdering, men har sine begrensninger. Små utmattingsprekker kan være vanskelige å kartlegge, noe som medfører at utmattingsprekken først kan finnes når den har vokst seg stor nok. Grundig rengjøring kan være avgjørende for om en utmattingsprekk blir funnet eller ikke, da gjerne ved bruk av nærbildeteknologi på utsatte steder i konstruksjonen.

MPI innebærer bruk av induisert magnetisk felt i en stålkomponent, hvor et magnetisk pulver brukes til å identifisere overflatesprekker. MPI krever en meget forsiktig overflatebehandling, noe som gjør at ganske små sprekker kan bli oppdaget. MPI krever i tillegg at maling fjernes, noe som kan skape utfordringer da dette beskyttelseslaget kan frembringe fremtidig korrosjonsangrep, gjerne på båtskrog. Denne metoden er også egnet for arbeid under vann på vanskelige områder, utført av dykkere. MPI er betydelig mer tidkrevende og effekt sett i forhold til CVI.

Ifølge DNVGL-RP-C210 er fordelingsfunksjonen for PoD- kurver for CVI og MPI gitt ved:

$$PoD(2 \cdot c) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot c}{x_0}\right)^b} \quad (4.10)$$

hvor  $2 \cdot c$  er lengden av sprekken,  $X_0$  og  $b$  er fordelingsparametere

Utmattingsprekk forholdet  $\frac{a}{c}$  antas å være 0.15 (Dalane, 1993). I simuleringen er sprekkybden modellert, og oppdaget sprekkybde er satt til  $a = \frac{1}{2} \cdot 0.15 \cdot (2 \cdot c)$ .

PoD- kurver er avhengig av kvalifikasjon og utførelse av arbeid. Tabell 4-1 og 4-2 viser verdier for  $X_0$  og  $b$  for henholdsvis MPI og CVI med tilhørende forklaring av tilgjengelighet. For MPI er verdier for inspeksjon under vann og mindre gode arbeidsforhold over vann valgt. Dette tilsvarer  $X_0 = 1.16$  og  $b = 0.90$ . For CVI er det valgt krevende tilgang tilsvarende  $X_0 = 83.03$  og  $b = 1.079$ .

**Tabell 4-1: PoD- kurver for MPI**

| Beskrivelse  | $X_0$ | $b$  |
|--|-------|------|
| Ved bakkesveis eller lignende gode forhold over vann | 0.40  | 1.43 |
| Normale arbeidsforhold over vann                     | 0.45  | 0.90 |
| Under vann og mindre gode arbeidsforhold over vann   | 1.16  | 0.90 |

**Tabell 4-2: PoD- kurver for CVI**

| Beskrivelse      | $X_0$ | $b$   |
|------------------|-------|-------|
| Lett tilgang     | 15.78 | 1.079 |
| Moderat tilgang  | 37.15 | 0.954 |
| Krevende tilgang | 83.03 | 1.079 |

## 4.2 MONTE CARLO SIMULERING

For å kunne studere sprekkvekst og dermed behovet for inspeksjoner benyttes i denne oppgaven metoden Monte Carlo simuleringer. Den grunnleggende ideen i en Monte Carlo simulering er at et stort antall samtidige realisasjoner av alle grunnleggende variabler ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  ...), generert fra deres sannsynlighetsfordeling. For hvert sett av simulerte variabler er en tilstandsfunksjon beregnet. Antallet av prøver der tilstandsfunksjonen faller inn under feildomenet,  $N_f$ , er identifisert. Sannsynligheten for bruddfeil estimeres deretter basert på totalt antall realisasjoner og antall prøver som faller i feildomenet.

En nødvendig simuleringsteknikk for å estimere sannsynligheten for bruddfeil er å simulere utfallet av stokastiske variabler med en vilkårlig fordeling. Tallet generert av algoritmer implementert på datamaskinen er vanligvis ikke helt tilfeldig, men et pseudo- tilfeldig tall. Årsaken er at de genereres ved en ligning slik at en sekvens av tall gjentas etter en rekke utfall. Videre blir det samme sekvens av tall hvis generatoren starter med samme startforhold.

For å simulere stokastiske variabler i forhold til en gitt sannsynlighetsfunksjon, er det ofte nyttig å basere dette på genererte og uniforme fordelte tall. En stokastisk variabel  $V$  som er uniformt fordelt mellom 0 og 1 vil ha denne fordelingsfunksjonen:

$$F_V(v) = \begin{cases} v & \text{hvis } 0 \leq v \leq 1 \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (4.11)$$

For å genere en stokastiske variabel  $X$ , med fordelingsfunksjonen  $F_x(X)$ , benyttes invers metode i to nødvendige steg for å generere ut  $\hat{x}$  av  $X$ :

1. genererer ut  $\hat{v}$  av  $V$  (for eksempel ved bruk av sammenfallende multiplikasjonsgenerator)

2. Bestem utfallet av  $\hat{x}$  ved:

$$\hat{x} = F_X^{-1}(F_V(v)) = F_X^{-1}(\hat{v}) \quad (4.12)$$

## 4.2.1 Nødvendig antall simuleringer

En avgrenset tilstandsfunksjon  $g(x)$  kan forklares med at  $x$  vektoren til alle relevante grunnvariabler, mens  $g()$  er funksjonsuttrykket forholdet mellom grenseverdi og grunnvariabelen. Hvis alle variabler i en avgrenset tilstandsfunksjon  $g(x)$  er simulert i samsvar med nødvendig sannsynlighetsfordelingsfunksjon, kan sannsynligheten for avgrenset tilstandssvikt (tilstandsfeil) beregnes. I grov Monte Carlo simulering er  $P_f$  estimert av:

$$\hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(\hat{x}_j)] \quad (4.13)$$

hvor  $N$  er antall simuleringer og  $\hat{x}_j$  er «prøve» nr.  $j$  av en standard normalfordelt stokastisk vektor  $\bar{X}$ . Indikatorfunksjonen  $I[g(\hat{x}_j)]$  er definert av:

$$I[g(\hat{x}_j)] = \begin{cases} 0 & \text{hvis } g(x) > 0 \text{ (sikker)} \\ 1 & \text{hvis } g(x) \leq \frac{\text{feil}}{\text{svikt}} \end{cases} \quad (4.14)$$

Ved å ta utgangspunkt i binominal fordeling (Bury 1975), kan man estimere standardavviket av  $\hat{P}_f$  slik:

$$s = \sqrt{\frac{\hat{P}_f(1 - \hat{P}_f)}{N}} \quad (4.15)$$

Konfidensintervaller for estimatet av sannsynligheten for feil kan bestemmes ved å bruke  $\hat{P}_f$  som normalfordeling for  $N \rightarrow \infty$ .

La oss si at vi vil beregne sannsynligheten for avgrenset tilstandsfeil på  $10^{-4}$ , og vil av den grunn finne antall simuleringer som trengs for å oppnå maksimum 5% nøyaktighet (s skal være mindre enn 5% av  $P_f$ ). Ligning for s, ligning (4.15), kan bli endret slik at:

$$N = \frac{P_f(1 - P_f)}{s^2} = \frac{P_f(1 - P_f)}{(0,05 \cdot P_f)^2} = \frac{(1 - P_f)}{P_f \cdot (0,05)^2} \approx 4\,000\,000$$

Dette viser at om en vil ha en maksimal nøyaktighet på 5%, trenger man 4 000 000 simuleringer.

Tabell 4-3 viser to forskjellige nøyaktigheter på henholdsvis 5 og 10% med oppgitte  $P_{facc}$  verdier. Beregning av  $N$  er utført på samme måte som eksempelet ovenfor.

**Tabell 4-3: Antall simuleringer med forskjellig nøyaktighet**

| Nøyaktighet, 5% |           | Nøyaktighet, 10% |           |
|-----------------|-----------|------------------|-----------|
| $P_f$           | N         | $P_f$            | N         |
| 0,01            | 40 000    | 0,01             | 10 000    |
| 0,001           | 400 000   | 0,001            | 100 000   |
| 0,0001          | 4 000 000 | 0,0001           | 1 000 000 |

## 4.2.2 Modellusikkerhet

I denne oppgaven er det brukt tre forskjellige usikkerheter. Usikkerhet som følge av bølgebelastninger på konstruksjonen. Denne endres årlig, og omtales YCoV. Usikkerhet som følge av bølgebelastninger på konstruksjonen, og holdes konstant gjennom konstruksjonens levetid. I tillegg er usikkerhet i initial sprekkstørrelse brukt, den omtales  $a_0$ CoV.

### 4.3 KALIBRERING AV BRUDDMEKANISK MODELL

Beregnet utmatting basert på SN- data anses å være mer pålitelig sett i forhold til bruddmekanisk data. SN- data er nemlig avledet direkte fra utmattingstester, mens bruddmekanikken er basert på beregninger hvor ytterligere parametere må tilføyes. På bakgrunn av det er det derfor nyttig å kalibrere slik at bruddmekanikken følger SN -data (test data) frem til første inspeksjon. Etter første inspeksjon følges bruddmekanisk modell, hvor pålitelig inspeksjonsmetoden er og hvorvidt sprekker er funnet eller ikke.

Utmatting for SN- data er basert på parametere fra NORSOK N-004 (NORSOK 1999).

Grensetilstandsfunksjonen for SN utmatting defineres som:

$$g = 1 - d_{Tot} = 1 - \sum_i \frac{N_i}{N_{SN}(\Delta\sigma_{eq_i})} \quad (4.16)$$

I følge NORSOK N-004 (NORSOK 1999) er en-helning SN- kurve for tubulær forbindelse beskrevet ved  $\ln(a) = 11.764$  og helning av SN- kurve beskrevet ved  $m = 3$ . Gjennomsnittlig verdi for  $\ln(a)$  er antatt å være 2 standardavvik større. Standardavviket til SN- kurven er antatt å være 0.25, noe som resulterer i en gjennomsnittlig  $\ln(a) = 12.264$ .

For at bruddmekanisk kurve skal gå gått med SN- kurve er disse verdiene benyttet:

Gjennomsnittlig  $\ln(A) = 29.1$  og standardavvik for  $\ln(A) = 0.64$ .

Grensetilstandsfunksjonen for bruddmekanisk sprekkevekst er definert som:

$$g = a_c - \sum_i da_i = a_c - \sum_i A \cdot [\Delta\sigma_{eq} \cdot F(a_{i-1}, t) \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{i-1}}]^m \cdot N_w \quad (4.17)$$

hvor  $a_c$  er kritisk sprekkestørrelse lik 25 mm og  $N_w$  er antall sykler i en sjøtilstand. Både helningen for bruddmekanisk kurve og SN- kurve er satt til 3.

## 5 RESULTATER

---

Hovedresultatene i denne studien tar for seg effekten av beregnede utmattingslevetider, med tilhørende usikkerhetsparametere og sannsynlighet for akseptabel bruddfeil lik 0.01.

Sannsynligheten for akseptabel bruddfeil økes så til 0.001, for ett sett av usikkerhetsparametere og samme beregnede utmattingslevetider. Resultater for akseptabel bruddfeil lik 0.001 og 0.01 blir så sammenlignet.

Første del av resultatene gir en forklarende fremstilling av produserte figurer for hver simulering, før resultater fra kalibrering av bruddmekanisk modell og konstruksjonens utmattingslevetider blir bestemt. Det sentrale her er å se på effekten av beregnede utmattingslevetider, noe som er presentert i tre forskjellige studier: Studie 1, 2 og 3.

Neste del bygger videre på konstruksjonens bestemte utmattingslevetider, med sannsynlighet for akseptabel bruddfeil lik 0.01. Dette blir kalt Studie 1. Her fremstilles hver utmattingslevetid med to forskjellige inspeksjonsmetoder, hvor det blir presentert resultater for første inspeksjon og gjennomsnittlig inspeksjon. Deretter følger en samlet sammenligning av årlige og globale usikkerheter som følge av bølgebelastninger på konstruksjonen for hver utmattingslevetid. Det er i tillegg foretatt en sammenligning av forskjellige verdier av initial sprekkvekstusikkerhet, med tilhørende inspeksjonsintervaller, for en utvalgt utmattingslevetid.

Resultater for sannsynlighet for akseptabel bruddfeil lik 0.001 blir så presentert. Dette blir kalt Studie 2. Her sammenlignes bestemte utmattingslevetider for konstruksjonen for hver inspeksjonsmetode som følge av reparasjonsbehovet, samt tilhørende inspeksjonsintervaller. Deretter sammenlignes resultater for bestemte utmattingslevetider med sannsynlighet for akseptabel bruddfeil lik 0.001 og 0.01, som følge av reparasjonsbehovet med tilhørende sammenligning av inspeksjonsintervaller. Dette presenteres ved bruk av begge inspeksjonsmetoder, og blir kalt Studie 3.

Resultatene i denne oppgaven blir presentert i en rekke figurer, og her er kurver for CVI som inspeksjonsmetode benyttet heltrukken linje, mens for inspeksjonsmetode MPI benyttes stiplet linje. Denne måten å skille kurvene på er gjennomgående brukt i fremstillingen av alle resultater.

## Oppsummering av stokastiske variabler:

Tabell 5-1 viser oppsummering av alle stokastiske variabler brukt i alle simuleringer i denne oppgaven.

**Tabell 5-1: Stokastiske variabler som inngår i modellen**

| Parameter  | Fordelingstype                                     | Parameter 1  | Parameter 2                           |
|--|--|--|---------------------------------------|
| $H_s$  | Weibull  |  |                                       |
| $T_Z$  | Rettet som en funksjon av $H_s$ . Se ligning (4.2) |  |                                       |
| Ekvivalent spenning:<br>$\Delta\sigma_{eq}$  | Funksjon basert på $H_s$ . Se ligning (4.3)        |  |                                       |
| $C_1$  | Bestemt  | X for 22 års levetid<br>Y for 39 års levetid<br>Z for 60 års levetid |                                       |
| $C_2$  | Bestemt  |  |                                       |
| Usikkerhet i bølgebelastningen på konstruksjonen, endres årlig.<br>$\alpha_{YCOV}$                             | Normal   | $\mu = 1.0$  | SD = 0.0, 0.1, 0.15 <sup>2</sup>      |
| Usikkerhet i bølgebelastningen på konstruksjonen, konstant gjennom konstruksjonens levetid.<br>$\alpha_{GCOV}$ | Normal   | $\mu = 1.0$  | SD = 0.0, 0.15, 0.3                   |
| Usikkerhet i initial sprekkstørrelse   | Normal   | $\mu = 1.0$  | SD = 0.0, 0.1, 0.2                    |
| FM material parameter $\ln(A)$   | Normal   | $\mu = 29.1$   | SD = 0.64                             |
| FM material parameter m  | Bestemt  | 3  |                                       |
| Initial sprekkstørrelse  | Ekspontensial                                      | $\mu = 0.11$ mm  |                                       |
| SN material parameter $\log(a)$  | Normal   | $\mu = 12.264$   | SD = 0.25                             |
| SN material parameter m  | Bestemt  | 3  |                                       |
| Tykkelse   | Bestemt  | 25 mm  |                                       |
| Sannsynlighet for deteksjon  | -  | $x_0 = 83.03$ (CVI)<br>$x_0 = 1.16$ (MPI)                            | $b = 1.079$ (CVI)<br>$b = 0.90$ (MPI) |

<sup>2</sup> I sammenligningen av  $a_0$  lik 0.0, 0.1 og 0.2 er det brukt YCoV lik 0.0, 0.15 og 0.3.



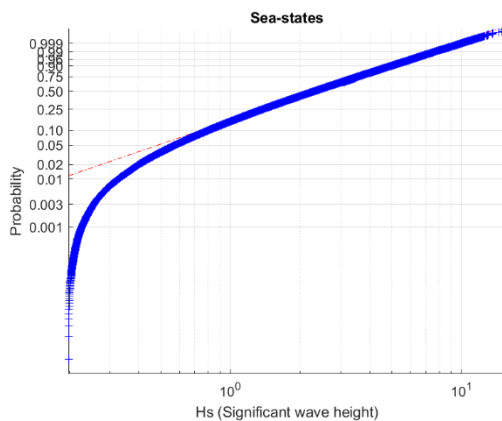
## 5.1 RESULTATER FRA SIMULERINGENE

Dette delkapittelet inneholder en forklaring av figurer som produseres for hver simulering. I tillegg presenteres resultater fra kalibreringen av bruddmekanisk modell opp mot SN- kurve, hvor konstruksjonens utmattingslevetid blir bestemt.

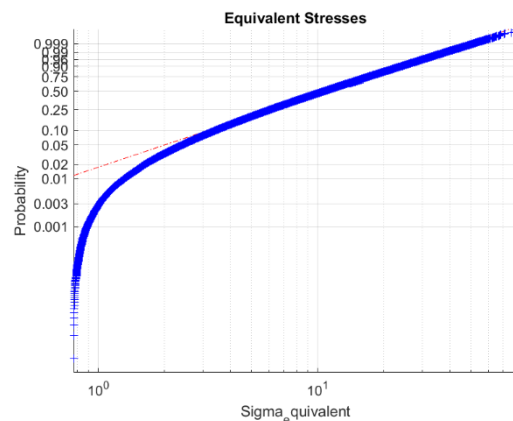
Hver simulering som er gjort i denne oppgaven produserer mange figurer. Disse figurene kan deles opp i to deler, hvor de første figurene kalles inngangsparametere. Den andre delen inneholder selve resultatfigurene, og det er disse som hovedsakelig er lagt til grunn for videre presentasjon av resultater.

### Del 1: inngangsparametere

Et Weibullplot over langtidsbestemmelse av sjøtilstander er vist i Figur 5.1, hvor signifikant bølgehøyde er representert på x-aksen og sannsynligheten er representert på y-aksen. De beregnede dataene ligger fint over den røde linjen innfelt i plottet, noe som indikerer at langtidsbestemmelse av sjøtilstander følger en Weibullfordeling. Dette gjelder også for den ekvivalente sykliske spenningen for langtidsbestemmelse av sjøtilstander, vist i Figur 5.2, som også følger en Weibullfordeling.



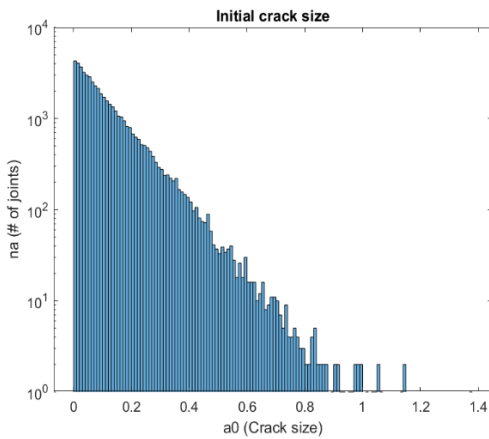
**Figur 5.1: Weibullfordeling av langtidsbestemmelse av sjøtilstander**



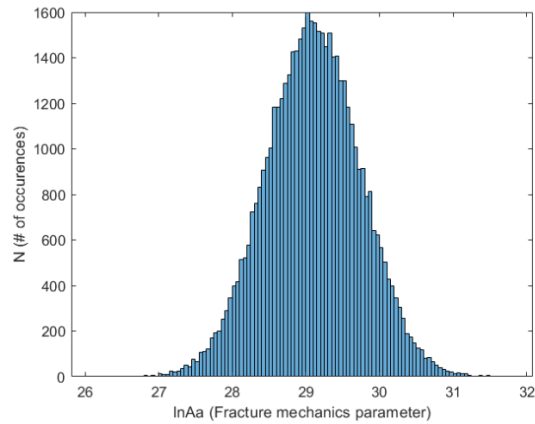
**Figur 5.2: Weibullfordeling av ekvivalent syklisk spenning**

Fordelingen av initial sprekkstørrelse (dybden),  $a_0$ , er vist i Figur 5.3 som en eksponentialfordeling. Her er sprekkstørrelsen lang x-aksen og antall knutepunkt på y-aksen. Figur 5.4 viser normalfordelingen av bruddmekaniske data for  $\ln(A)$ , og har den velkjente

klokkeformen med forventning 29.1 på x-aksen og standardavvik 0.64. Antall sykler,  $N$ , opptrer på y-aksen.



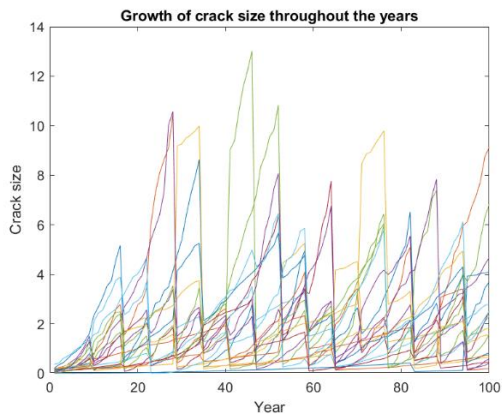
**Figur 5.3: Fordelingen av initial sprekkstørrelse,  $\alpha_0$**



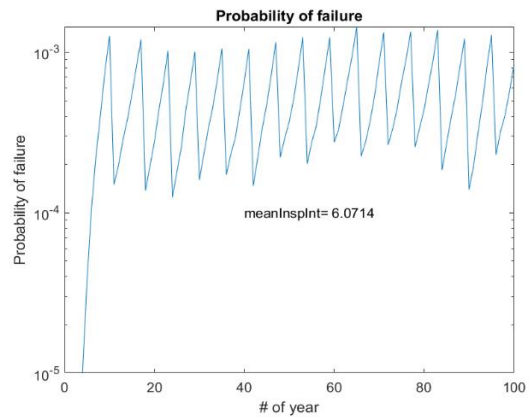
**Figur 5.4: Fordelingen av bruddmekaniske data**

## Del 2: Resultatfigurer

Figur 5.5 viser sprekkveksten i et knutepunkt gjennom levetiden på 100 år, hvor sprekkstørrelse og levetid er representert på henholdsvis x- og y-aksen. Det går her frem at når en kurve har fått en topp, blir den etterfulgt av en vertikal strek nedover fra nettopp denne toppen. Dette forklares med at en inspeksjon er blitt utført og sprekken har blitt oppdatert. Sannsynligheten for bruddfeil (PoF) er vist i Figur 5.6 gjennom livsløpet på 100 år. Hver kurvetopp indikerer her at PoF er lik eller større enn sannsynlighet for akseptabel bruddfeil ( $P_{\text{facc}}$ ), noe som fører til oppdatering av sprekkstørrelsen.



**Figur 5.5: Sprekkvekst gjennom levetiden**

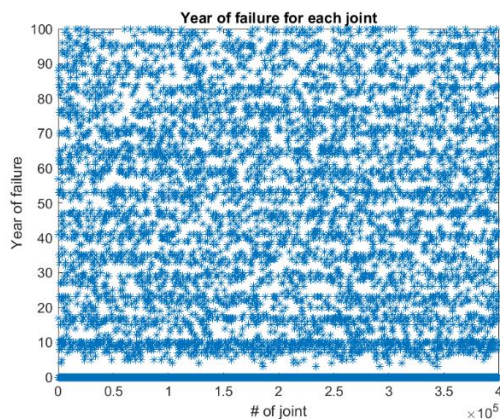


**Figur 5.6: Sannsynlighet for bruddfeil**

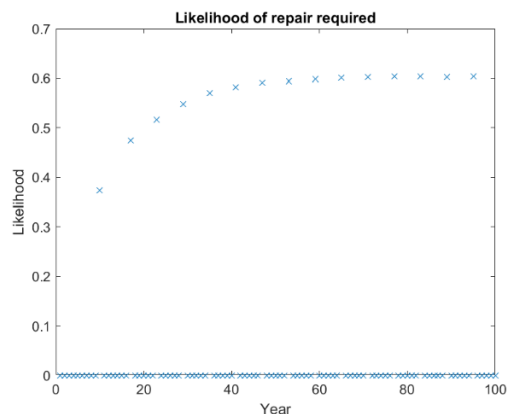
I Figur 5.7 vises et plot over hvilket år det simulerte knutepunktet har bruddfeil i løpet av livsløpet. Hvert blått kryss (\*) representerer et simulert knutepunkt som følge av hvilket år bruddfeilen har oppstått (y-akse), samt hvilket knutepunkt det er snakk (x-akse).

Knutepunktene som gikk gjennom livsløpet uten bruddfeil befinner seg helt nederst i figuren, og danner en horisontal strek langs x-aksen.

Reparasjonsbehovet er fremstilt i Figur 5.8 med livsløpet langt x-aksen og sannsynligheten for reparasjon på y-aksen. Sannsynligheten for reparasjon viser også her blåfargede kryss (\*). Her er hvert blått kryss oppstått som følge av at PoF er større eller lik  $P_{\text{fac}}$ . Dette gjelder ikke for blåfargede kryss langs x-aksen, da disse har sannsynlighet for reparasjon tilnærmet lik 0. Kurven som de blåfargede kryssene til sammen lager begynner på drøyt 0.35 i sannsynlighet for reparasjon etter 15 år. Deretter stiger kurven av punkter jevnt, før den flater ut ved sannsynlighet for reparasjon på 0.6.

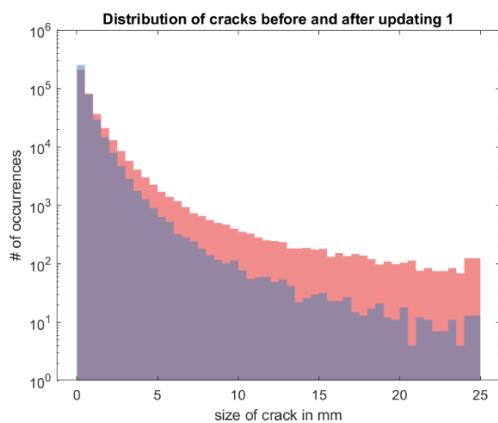


**Figur 5.7: År for når bruddfeil i hvert knutepunkt oppstår**

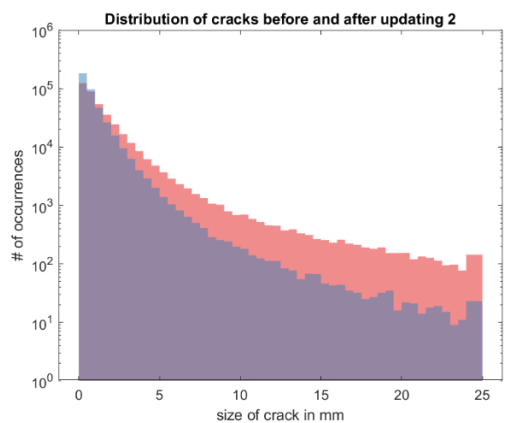


**Figur 5.8: Sannsynlighet for reparasjon**

For å kartlegge sprekkenes oppdateringer, er det opprettet en oversikt over dette vist i Figur 5.9 og 5.10, hvor sprekkstørrelse og antall forekomster representerer henholdsvis x- og y-aksen. Disse figurene viser fordelingen av sprekker før og etter oppdatering 1 og 2 i løpet av livsløpet, men antall oppdateringer kan variere i forhold til reparasjonsbehovet og ha langt flere oppdateringer enn det som er vist her. For å skille sprekkstørrelsen før og etter oppdatering er det brukt fargekoder: rød farge representerer de oppdagende, mens blå farge representerer de nykommene. Lilla farge representerer en blanding av oppdagende og nykommene.



**Figur 5.9: Fordelingen av sprekker før og etter oppdatering 1**



**Figur 5.10: Fordelingen av sprekker før og etter oppdatering 2**

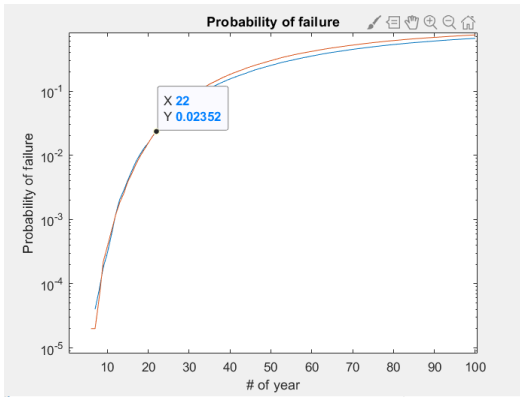
### 5.1.1 Kalibrering av utmattingslevetid

For å kalibrere FM- kurve opp mot SN- kurve, er det foretatt syv simuleringer med 50 000 simulerte knutepunkt hver og usikkerheten, CoV, lik 0. Tabell 5-2 viser dette med forskjellige valg av  $C_1$  fra 4 til 6.

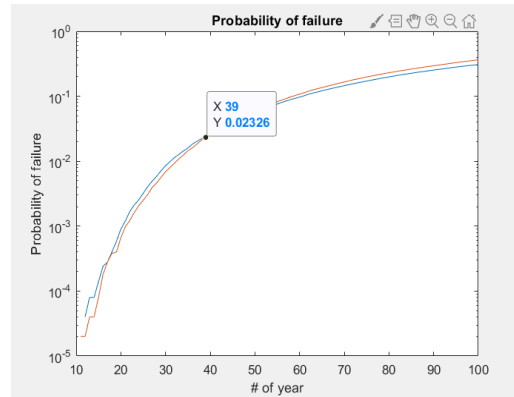
**Tabell 5-2: Kalibrering av utmattingslevetid**

| SN_FM_Calibration_1_Slope_SN_1_Slope_FM_CoV=0: |       |                                |
|--|-------|--------------------------------|
| Antall simulerte knutepunkt                    | $C_1$ | Utmattingslevetid ved 2.3% PoF |
| 50 000   | 4     | 60 år                          |
| 50 000   | 4.5   | 42 år                          |
| 50 000   | 4.6   | 39 år                          |
| 50 000   | 5     | 30 år                          |
| 50 000   | 5.5   | 23 år                          |
| 50 000   | 5.6   | 22 år                          |
| 50 000   | 6     | 19 år                          |

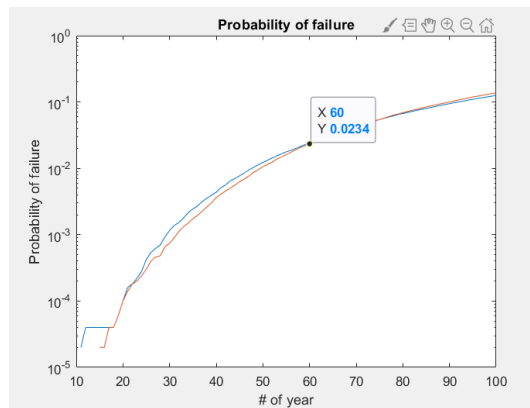
Hensikten med dette er å bestemme tre forskjellige levetider, valgt utover i livsløpet på 100 år, med tilhørende  $C_1$  verdi. Figur 5.11, 5.12 og 5.13 viser fremgangsmåten for hvordan dette er gjort for 22, 39 og 60 års utmattingslevetid. Kort fortalt settes en  $C_1$  verdi inn i programmeringen, deretter kjøres programmet, og får ut en figur med sannsynlighet for bruddfeil. Videre måles det opp, og der hvor kurven er 2.3% sannsynlighet for bruddfeil (Y-akse) er utmattingslevetiden representert ved X- verdi. Når  $C_1$  velges til 5.6, 4.6 og 4 blir utmattingslevetiden henholdsvis 22, 39 og 60 år. Det er disse verdiene som er brukt i simuleringene.



**Figur 5.11: Kalibrering av 22 års utmattingslevetid**



**Figur 5.12: Kalibrering av 39 års utmattingslevetid**



**Figur 5.13: Kalibrering av 60 års utmattingslevetid**

## 5.2 STUDIE 1:

Resultatene som nå vil bli presentert er delt opp etter beregnet utmattingslevetid på 22, 39 og 60 år for inspeksjonsmetode CVI og MPI. Simuleringene er i hovedsak kjørt med 50 000 simulerte knutepunkt, og  $P_{\text{facc}}$  lik  $0.01^3$ . Resultater fra hver utmattingslevetid viser figurer for første inspeksjon og gjennomsnittlig inspeksjon. Årlig usikkerhet varierer med 0.0, 0.1 og 0.15, mens global usikkerhet varierer med 0.0, 0.15 og 0.3. I tillegg varierer initial sprekkvekst usikkerhet med 0 og 0.1. Alle resultatfigurer har varierende årlig og global usikkerhet langs x-aksen, mens y-aksen representerer inspeksjonsåret.

På slutten av Studie 1 er det trukket ut en samlet sammenligning av første inspeksjon for hver utmattingslevetid, og for hver inspeksjonsmetode. Her varierer både årlig og global usikkerhet med 0.0, 0.15 og 0.3. Hver utmattingslevetid er representert med to figurer, og benytter samme simuleringensdata, men er fremstilt på forskjellig måte etter årlig og global usikkerhet. Sammenligningen her ser på kurver som funksjon av årlig usikkerhet i det ene figuren og som funksjon av global usikkerhet i den andre. På den måten vil kurvene i hver figur bedømme hvilken usikkerhet som har mest å si.

### 5.2.1 Resultater for 22 års utmattingslevetid

#### 5.2.1.1 Første inspeksjonsår med utmattingslevetid på 22 år

Det går frem av Figur 5.14 at kurvene for inspeksjonsmetode CVI, med og uten usikkerheter i initialsprekkveksten, har samme år for første inspeksjon frem til den globale usikkerheten økes til 0.3. Da skiller det ett år, og noe som også vedvarer når den årlige usikkerheten økes fra 0 til 0.15. Det skjer riktignok en svingning mellom disse kurvene når årlig usikkerhet økes fra 0.1 til 0.15, men skillet er fremdeles på ett år. Videre er det en betydelig nedgang i første år for inspeksjon når global usikkerhet økes til 0.15, og denne er på fem år, noe som også gjelder når global usikkerhet økes videre til 0.3. Her går kurvene ned fra 16 år til henholdsvis 11 og 12 år for CVI med og uten usikkerhet i initial sprekkvekst.

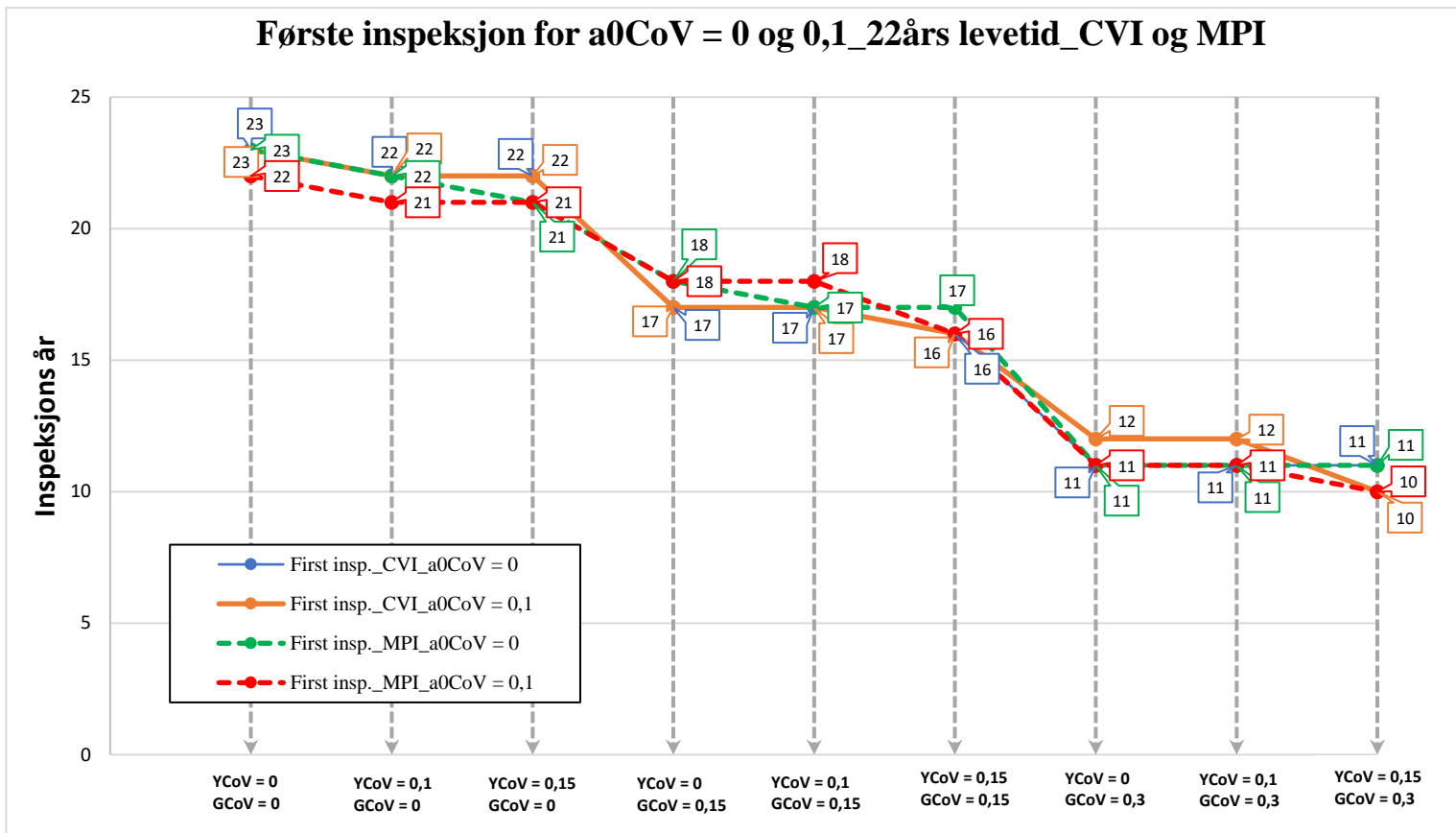
---

<sup>3</sup> Noen simuleringer ble riktignok kjørt på nytt, som en kontrollsjekk, med 70 000 simulerte knutepunkt.

Kurvene for inspeksjonsmetode MPI, med og uten usikkerhet i initial sprekkvekst, skiller ett år for global usikkerhet på 0 og årlig usikkerhet på 0 og 0.1. Deretter har kurvene samme år for første inspeksjon med årlig usikkerhet på 0.15 og global usikkerhet på 0, samt årlig usikkerhet på 0 og global usikkerhet på 0.15. Videre går det frem at når årlig usikkerhet økes fra 0 til 0.15, med konstant global usikkerhet på 0.15, skiller det igjen ett år. Når global usikkerhet økes til 0.3, med årlig usikkerhet på 0 og 0.1, kommer første inspeksjon på samme år. Ved årlig og global usikkerhet henholdsvis på 0.15 og 0.3, har kurvene nok en gang samme år for første inspeksjon. Det skjer i likhet med kurver omtalt for CVI, en betydelig nedgang i første inspeksjonsår når global usikkerhet økes fra 0 til 0.15. Nedgangen her er på 3 år, mens ytterlige nedgang ved økning av global usikkerhet til 0.3 skjer på 6 og 5 år for henholdsvis MPI med og uten usikkerhet i initial sprekkvekst.

Kurvene for inspeksjonsmetodene CVI og MPI følger hverandre, og ingen av kurvene overstiger mer enn ett år i avvik fra hverandre når årlig og global usikkerhet økes.





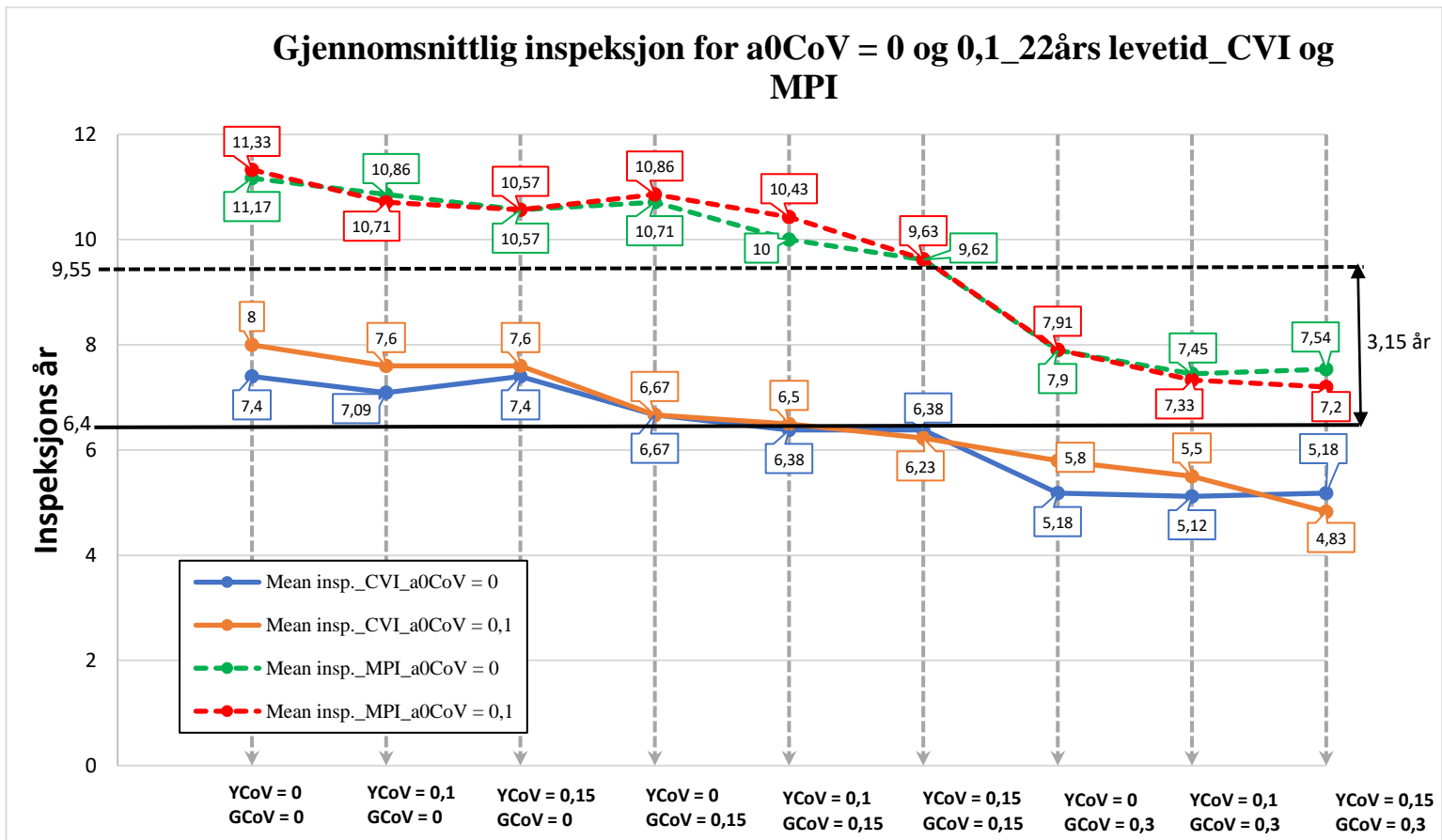
Figur 5.14: Første inspeksjon for utmattingslevetid på 22 år

### 5.2.1.2 Gjennomsnittlig inspeksjon med utmattingslevetid på 22 år

Det går frem av Figur 5.15 at kurvene for inspeksjonsmetode CVI, med og uten initial sprekkvekst usikkerhet har en noenlunde lik form, med noen avvik når global usikkerhet er konstant lik 0 og årlig usikkerhet varierer fra 0 til 0.15. Det vises også noe avvik mellom kurvene når den globale usikkerheten er 0.15 og årlig usikkerhet varierer fra 0 til 0.15.

Kurvene for inspeksjonsmetode MPI, med og uten initial sprekkvekst usikkerhet har en relativt lik form, noe større differanse når årlig usikkerhet økes fra 0 til 0.1 for global usikkerhet lik 0.15. I tillegg er det en forskjell ved årlig usikkerhet på 0.15 og global usikkerhet på 0.3.

Det er markert inn to horisontale linjer i Figur 5.15 som representerer gjennomsnittet av gjennomsnittlig inspeksjon for både CVI og MPI. CVI benytter en heltrukken svart strek, mens MPI benytter en stiplet svart strek. Kurvene for gjennomsnittet av gjennomsnittlig inspeksjon for CVI er på 6.4 år, mens gjennomsnittet av gjennomsnittlig inspeksjon for MPI er på 9.55 år, og har en differanse seg imellom på 3.15 år.



Figur 5.15: Gjennomsnittlig inspeksjon for utmattingslevetid på 22 år

## 5.2.2 Resultater for 39 års utmattingslevetid

### 5.2.2.1 Første inspeksjonsår med utmattingslevetid på 39 år

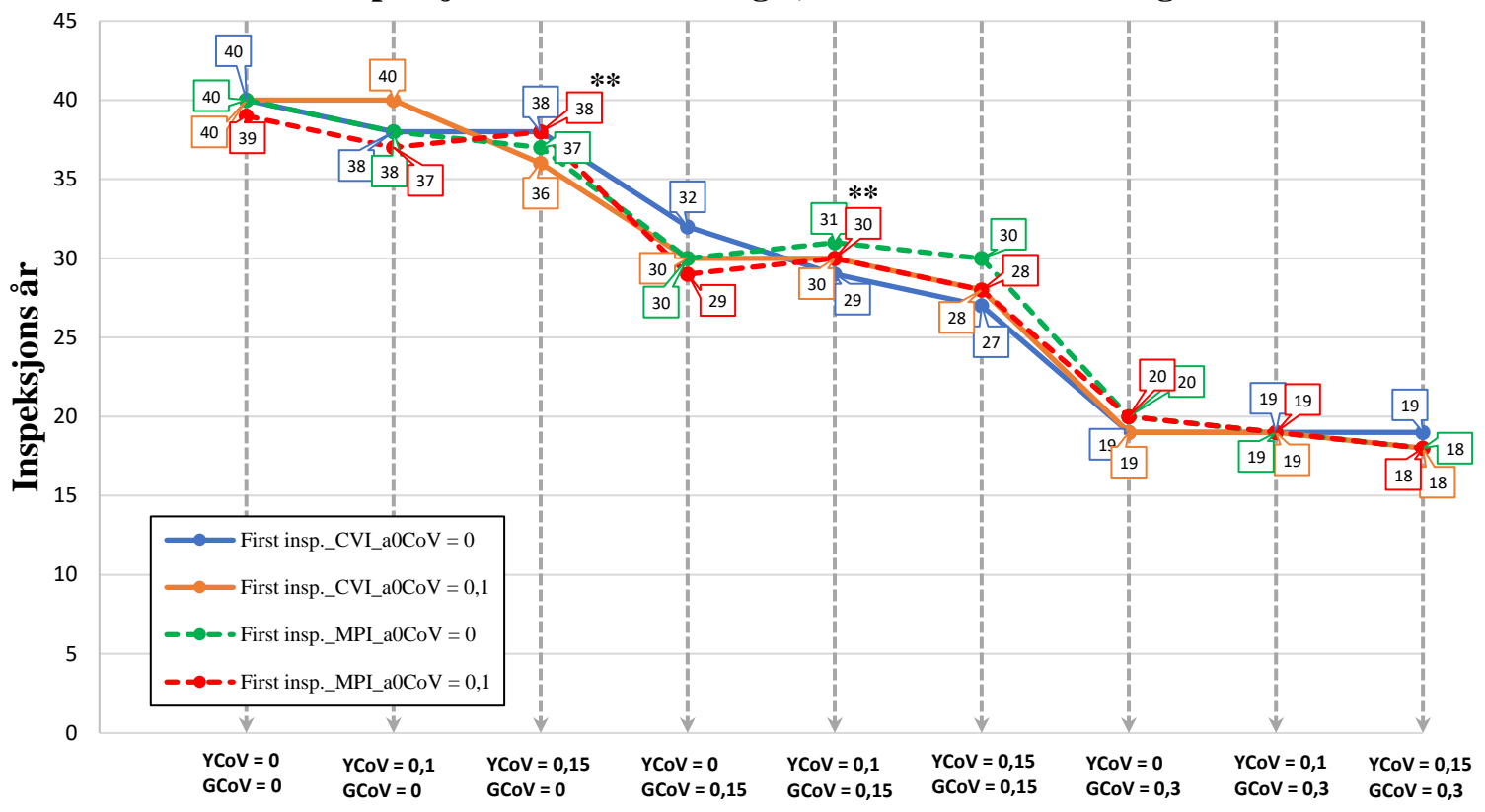
Første inspeksjonsår med utmattingslevetid på 39 år er vist i Figur 5.16. Kurvene for CVI får samme inspeksjonsår når årlig og global usikkerhet er lik 0. Deretter går det frem at når den årlige usikkerheten øker til 0.1 synker kurven med initial sprekkvekst usikkerhet lik 0 til 38

år, mens kurven med initial sprekkvekst usikkerhets holder seg stabilt på 40 år. Ved årlig og global usikkerhet lik 0.15 og 0, er det en differanse på to år. Denne differansen opprettholdes ved årlig usikkerhet på 0 og global usikkerhet lik 0.15. Når global usikkerhet holdes konstant lik 0.15, og årlig usikkerhet varierer fra 0.1 til 0.15 skiller det to år på hver av disse simuleringene. Ved global usikkerhet lik 0.3 holdes både kurven for initial sprekkvekst usikkerhet lik 0 og 0.1 seg lik for årlig usikkerhet på 0 og 0.1. Når årlig usikkerhet er lik 0.15 og global usikkerhet er lik 0.3 blir differansen ett år.

Kurvene for MPI viser ett års forskjell når global usikkerhet er konstant lik 0 og årlig usikkerhet varierer fra 0 til 0.15. Videre går det frem at når global usikkerhet økes til 0.15 skjer det en økning i første inspeksjon fra henholdsvis 30 og 29 år til 31 og 30 år for kurvene med årlig usikkerhet lik 0 og 0.1. Ved årlig usikkerhet på 0.15, og samme globale usikkerhet, går det frem at differansen blir to år. Deretter økes global usikkerhet til 0.3, og begge kurvene får første inspeksjon på samme år for årlig usikkerhet lik 0, 0.1 og 0.15.

Kurvene for CVI og MPI følger hverandre, riktignok ikke like tett som for en utmattingslevetid på 22 år vist i Figur 5.14. Figur 5.16 viser at kurvene for CVI og MPI har størst avvik fra hverandre tilsvarende tre år når årlig og global usikkerhet er på henholdsvis 0.1 og 0, 0 og 0.15 og 0.15 og 0.15.

### Første inspeksjon for a0CoV = 0 og 0,1\_39års levetid\_CVI og MPI



Figur 5.16: Første inspeksjon for utmattingslevetid på 39 år

#### 5.2.2.2 Gjennomsnittlig inspeksjon med utmattingslevetid på 39 år

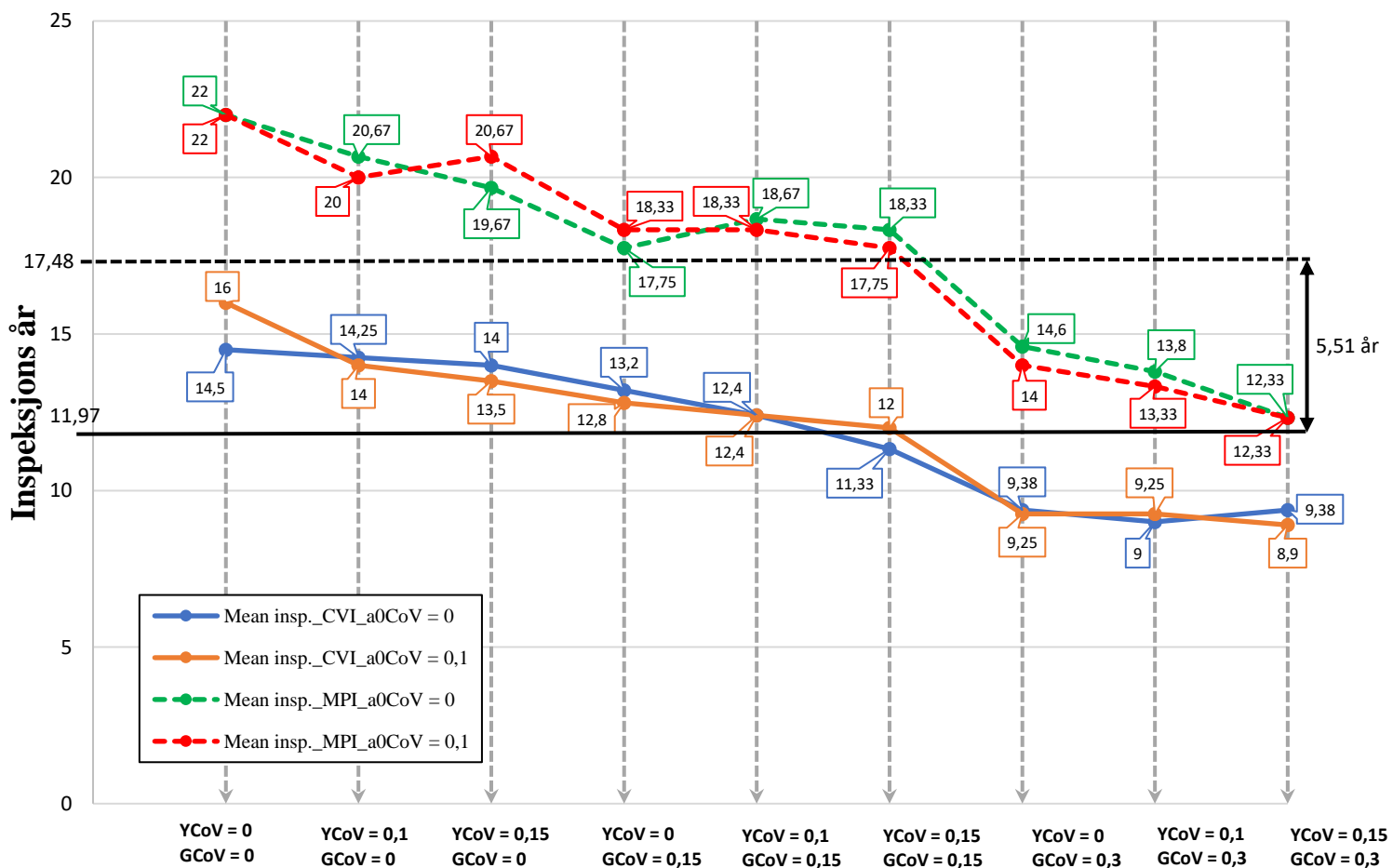
Figur 5.17 viser at kurvene for CVI har den største differansen når usikkerheten er satt til 0 for både årlig og global. Videre går det frem at differansen i disse kurvene holder seg godt under ett år for alle andre simuleringer. Den nest største differansen får man når både årlig og global usikkerhet er lik 0.15, og denne viser 0.66 år.

Kurvene for MPI har samme gjennomsnittlig inspeksjon ved både årlig og global usikkerhet lik 0. Deretter økes differansen til 0.67 år ved økning av årlig usikkerhet til 0.1, for så å øke til ett års differanse ved årlig usikkerhet på 0.15 og samme globale usikkerhet. Når den globale usikkerheten økes fra 0 til 0.15 og årlig usikkerhet er lik 0 viser differansen 0.58 år. Videre

viser kurvene en noe lik form, med differanse på rundt 0.6 år, før kurvene samles og har samme gjennomsnittlig inspeksjon når årlig usikkerhet er 0.15 og global usikkerhet er 0.3.

Det er markert inn to horisontale linjer i Figur 5.17 som representerer gjennomsnittet av gjennomsnittlig inspeksjon for både CVI og MPI. CVI benytter en heltrukken svart strek, mens MPI benytter en stiplet svart strek. Gjennomsnittet av gjennomsnittlig inspeksjon for CVI er på 11.97 år, mens gjennomsnittet av gjennomsnittlig inspeksjon for MPI er på 17.48 år, og har en differanse seg imellom på 5.51 år.

**Gjennomsnittlig inspeksjon for a0CoV = 0 og 0,1\_39 års levetid\_CVI og MPI**



**Figur 5.17: Gjennomsnittlig inspeksjon for 39 års utmattingslevetid**

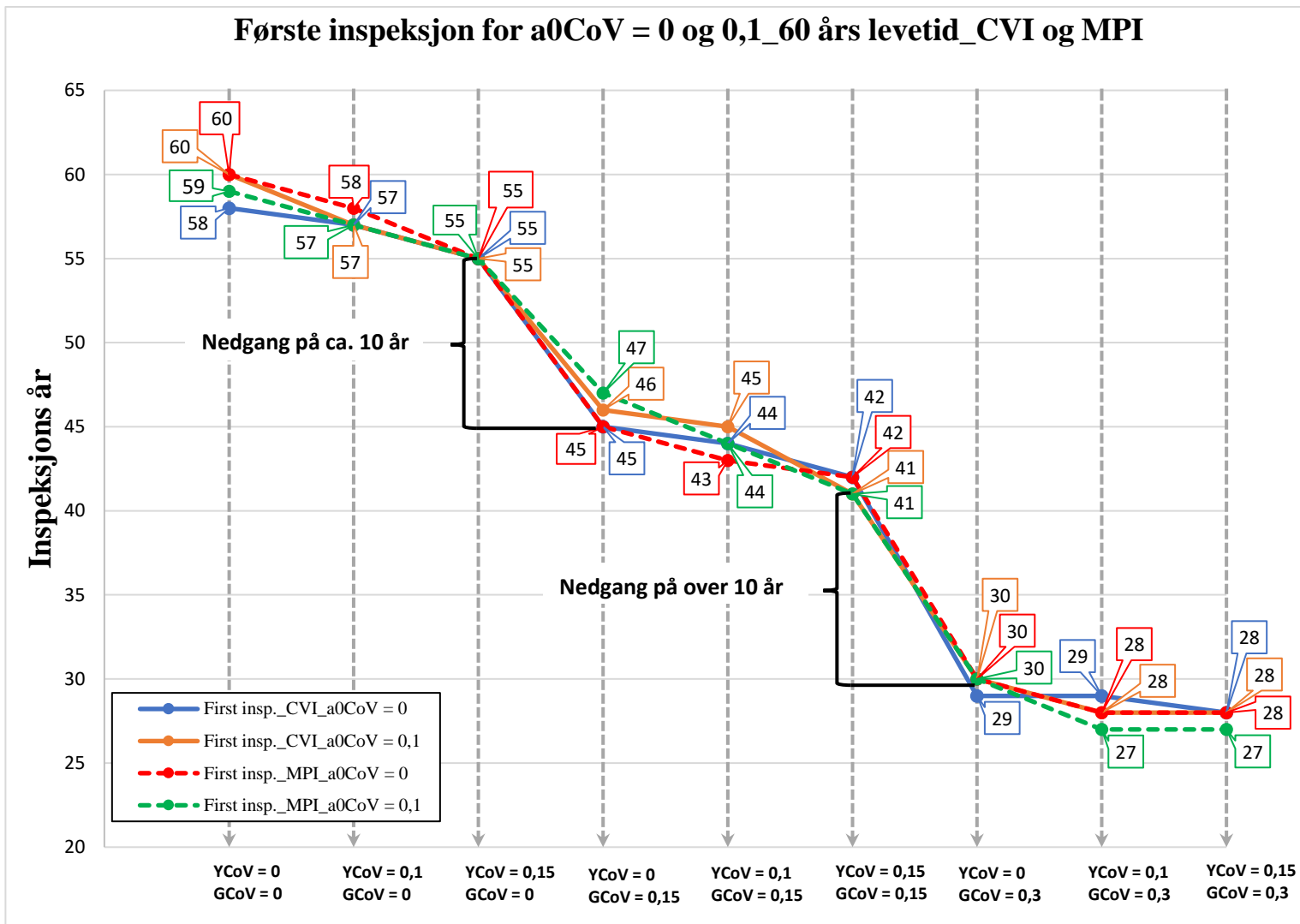
## 5.2.3 Resultater for 60 års utmattingslevetid

### 5.2.3.1 Første inspeksjons år med utmattingslevetid på 60 år

Resultatene fra en utmattingslevetid på 60 år er presentert i Figur 5.18. Kurvene for CVI viser at det er to års differanse uten årlig og global usikkerhet. Når den årlige usikkerheten øker til 0.1 og videre til 0.15, får kurvene samme år for første inspeksjon. Deretter økes den globale usikkerheten til 0.15, noe som medfører en nedgang i første inspeksjon på 9 og 10 år for henholdsvis kurver med og uten initial sprekkvekst usikkerhet, og årlig usikkerhet på 0. Differansen mellom disse kurvene viser her ett år. Ved å øke den årlige usikkerheten til 0.1 og 0.15, samt holder global usikkerhet konstant lik 0.15, blir differansen mellom kurvene fortsatt ett år. Videre ser man nok en stor nedgang for første års inspeksjon når den globale usikkerheten økes til 0.3, og er på over 10 år. Differansen mellom kurvene er på ett år med årlig usikkerhet på 0 og 0.1, før kurvene samles til en felles første inspeksjon med henholdsvis årlig og global usikkerhet på 0.15 og 0.3.

Kurvene for MPI har ett års differansen uten årlig og global usikkerhet. Når den årlige usikkerheten økes til 0.1 er det fortsatt ett års differanse mellom kurvene, før de får samme år for første inspeksjon ved årlig usikkerhet lik 0.15 uten global usikkerhet. Deretter økes den globale usikkerheten til 0.15, og her synker begge kurvene fra 55 år og ned til 47 år og 45 år for første inspeksjon for henholdsvis kurver med og uten initial sprekkvekst usikkerhet. Denne nedgangen vises også i Figur 5.18 med en innfelt tekst. Videre ser man at differansen mellom kurvene synker til ett år med global usikkerhet lik 0.15 og årlig usikkerhet lik 0.1 og 0.15. Nok en gang skjer det en felles stor nedgang når global usikkerhet økes til 0.3, og denne nedgangen går fra 42 og 41 år til 30 år for første inspeksjon. Nedgangen er også vist i figuren med en innfelt tekst. Når årlig usikkerhet økes fra 0 til 0.1 har differansen blitt to år før de igjen går ned til ett år, med samme globale usikkerhet lik 0.3.

Kurvene for CVI og MPI følger hverandre tett med noen avvik. Når årlig og global usikkerhet er satt til 0, har kurver for CVI og MPI, uten initial sprekkvekstusikkerhet, to års avvik. Videre er det to års avvik for CVI uten initial sprekkvekst usikkerhet og MPI med initial sprekkvekst usikkerhet når årlig og global usikkerhet er satt til henholdsvis 0 og 0.15. I tillegg er det to års avvik mellom kurvene for CVI og MPI henholdsvis uten og med initial sprekkvekstusikkerhet.



Figur 5.18: Første inspeksjon for 60 års utmattingslevetid

### 5.2.3.2 Gjennomsnittlig inspeksjon med utmattingslevetid på 60 år

Resultater for gjennomsnittlig inspeksjon er vist i Figur 5.19 med utmattingslevetid på 60 år. Hver inspeksjonsmetode skiller seg ut ved at initial sprekkvekst usikkerheten er satt til 0 og 0.1. Kurvene for CVI har en differanse på to år uten årlig og global usikkerhet, og dette er den største differansen som vises i disse kurvene. Når den årlige usikkerheten økes, og global usikkerhet holdes lik 0, er differansen lik ett år ved 0.1 og 0.5 år ved 0.15 i årlig usikkerhet. Deretter økes global usikkerhet til 0.15, og her går det frem at differansen mellom kurvene er på 0.5, 1 og 0.67 år for henholdsvis 0, 0.1 og 0.15 i årlig usikkerhet. Videre økes den globale usikkerheten til 0.3, og da synker begge kurvene fra 18.67 og 18 år til 14 og 16 år for første

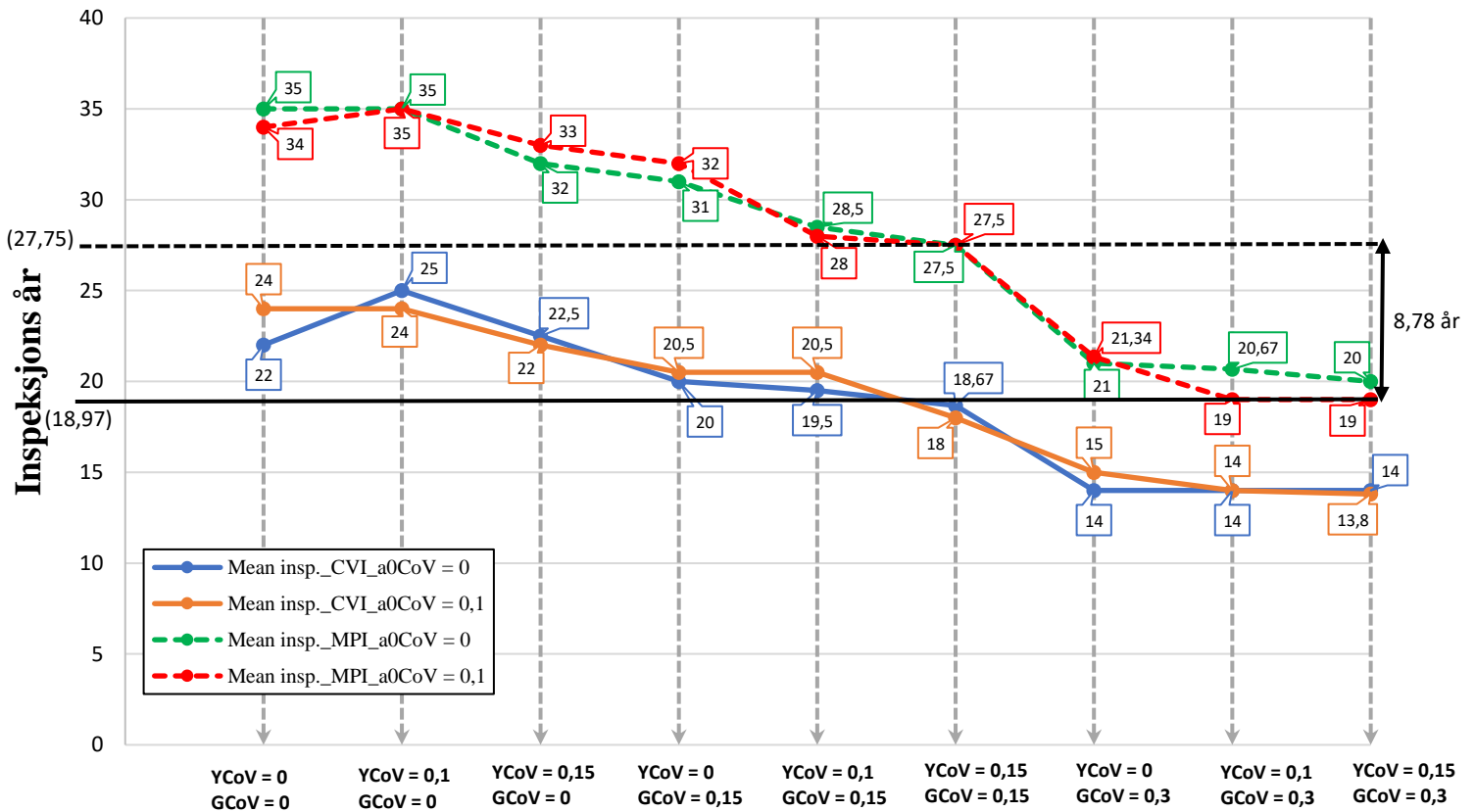
inspeksjon, ved årlig usikkerhet lik 0. Med økning i årlig usikkerhet til 0.1, har kurvene samme år for gjennomsnittlig inspeksjon på 14 år, før de ender opp med en differanse på 0.2 år når årlig og global usikkerhet er henholdsvis på 0.15 og 0.3.

For MPI som inspeksjonsmetode viser Figur 5.19 at kurvene har ett års differanse uten årlig og global usikkerhet. Ved å holde global usikkerhet lik 0, for så å øke årlig usikkerhet til 0.1, får kurvene samme gjennomsnittlig inspeksjon. Økes årlig usikkerhet til 0.15, blir differansen ett år. Denne differansen opprettholdes når global usikkerhet økes til 0.15 med 0 som årlig usikkerhet. Ved å holde global usikkerhet lik 0.15, synker differansen til 0.5 år for årlig usikkerhet lik 0.1, før den igjen får samme gjennomsnittlig inspeksjon ved 0.15 i årlig usikkerhet. Deretter økes global usikkerhet til 0.3, noe som gjør at kurvene synker fra 27.5 år til 21 år uten initial sprekkvekst usikkerhet og til 21.34 år med initial sprekkvekst usikkerhet for årlig usikkerhet lik 0. Videre holdes global usikkerhet lik 0.3, mens årlig usikkerhet økes til 0.1 og 0.15. Ved 0.1 i årlig usikkerhet viser figuren en differanse på 1,67 år, og er det største avviket i disse kurvene, før kurvene ender opp med årlig usikkerhet lik 0.15 og får en differanse på ett år.

Kurvene for CVI har et gjennomsnitt på 18.97 representert med en svart heltrukken linje innfelt. Svart stiplet linje representerer et gjennomsnitt på 27.75 for MPI. Differansen mellom gjennomsnittlig linje for CVI og MPI er på 8.78 år.



### Gjennomsnittlig inspeksjon for a0CoV = 0 og 0,1\_60 års levetid\_CVI and MPI

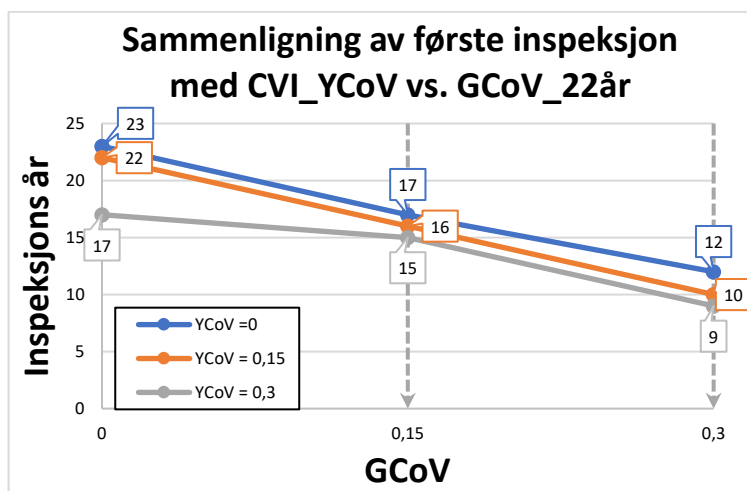


Figur 5.19: Gjennomsnittlig inspeksjon for 60 års utmattingslevetid

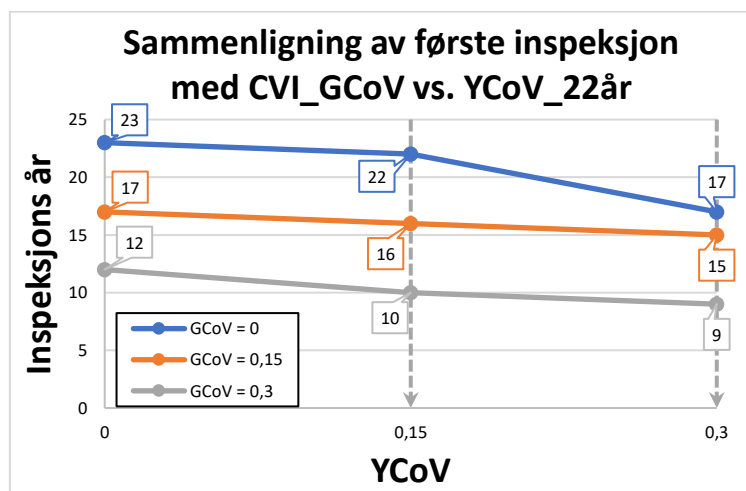
## 5.2.4 Samlet sammenligning av første inspeksjon for CVI og MPI

Figur 5.20 til Figur 5.25 viser en samlet sammenligning av første inspeksjon for CVI, med utmattingslevetid på 22, 39 og 60 år. Figur 5.20 og 5.21 har utmattingslevetid på 22 år, mens Figur 5.22 og 5.23 tar for seg en utmattingslevetid på 39 år. En utmattingslevetid på 60 år er vist i Figur 5.24 og 5.25. Det går tydelig frem at årlig usikkerhet har mer å si for simuleringene som er foretatt enn global usikkerhet. Dette vises i hvert figursett, hvor kurver for YCoV lik 0, 0.15 og 0.3 holder seg mye tettere enn kurver for GCoV lik 0, 0.15 og 0.3.

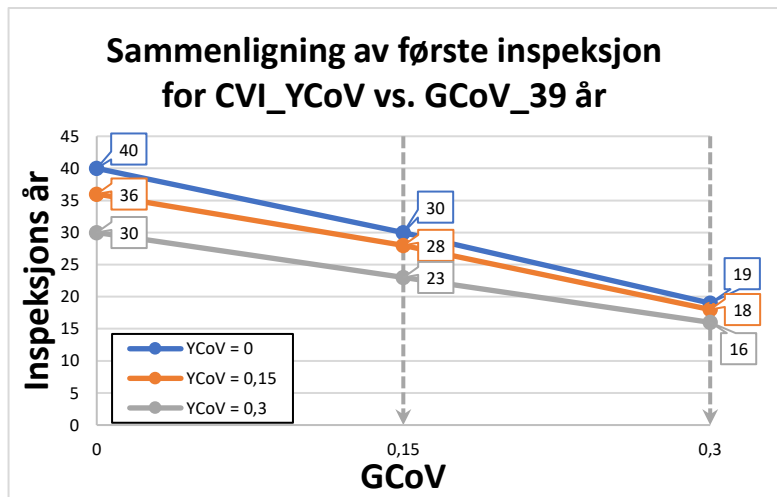
Samlet sammenligning av første inspeksjon for MPI, med utmattingslevetid på 22, 39 og 60 år, følger samme mønster som for CVI. Det går også her tydelig frem at kurver med årlig usikkerhet lik 0, 0.15 og 0.3 er vesentlig tettere enn kurver for global usikkerhet med samme verdier. Dette vises i Figur 5.26 og 5.27 for en utmattingslevetid på 22 år. Figur 5.28 og 5.29 viser en utmattingslevetid på 39 år, før Figur 5.30 og 5.31 viser en utmattingslevetid på 60 år.



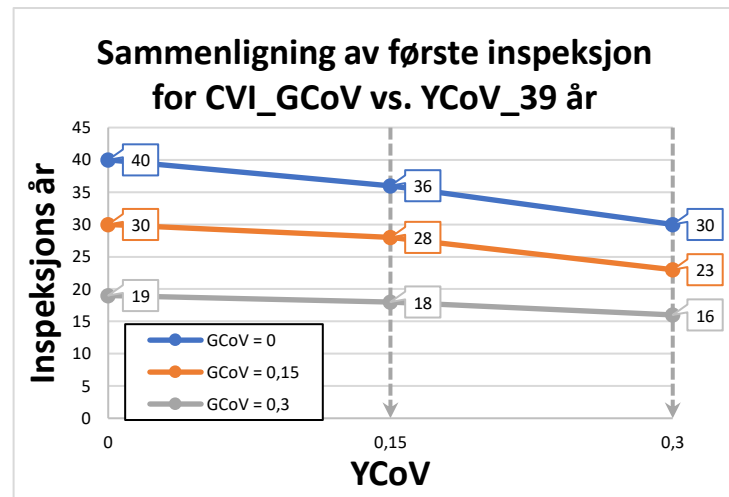
Figur 5.20: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 22 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV



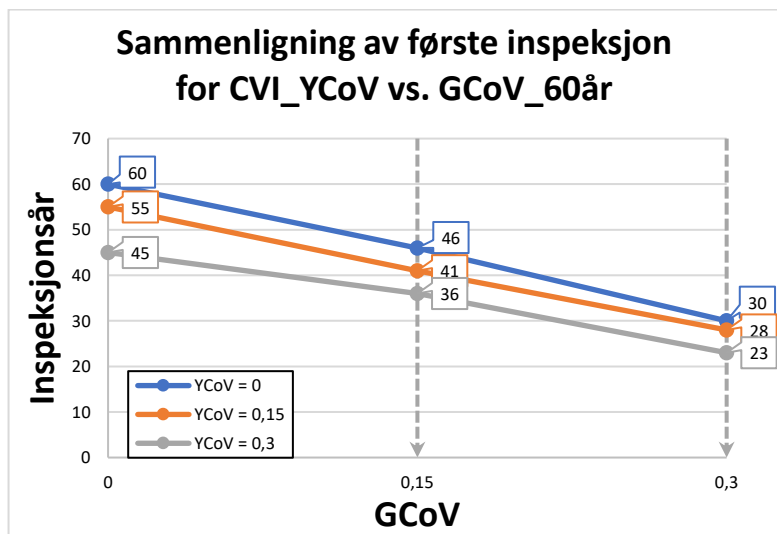
Figur 5.21: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 22 års utmattingslevetid, GCoV vs. YCoV



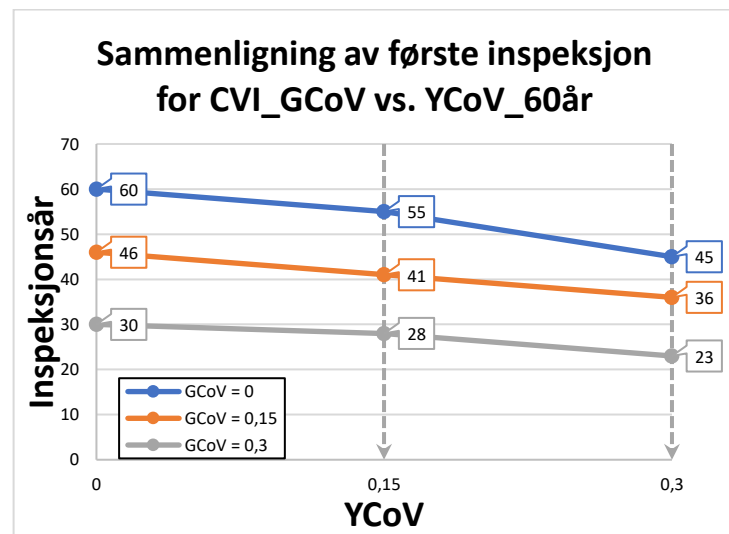
Figur 5.22: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 39 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV



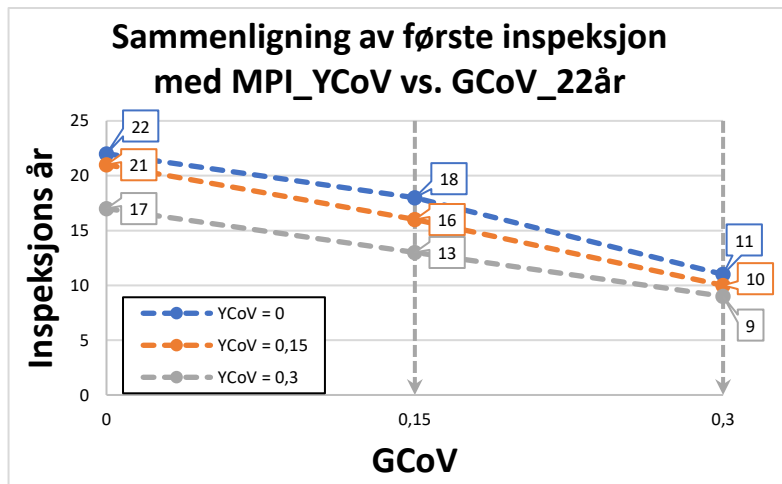
Figur 5.23: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 39 års utmattingslevetid, GCoV vs. YCoV



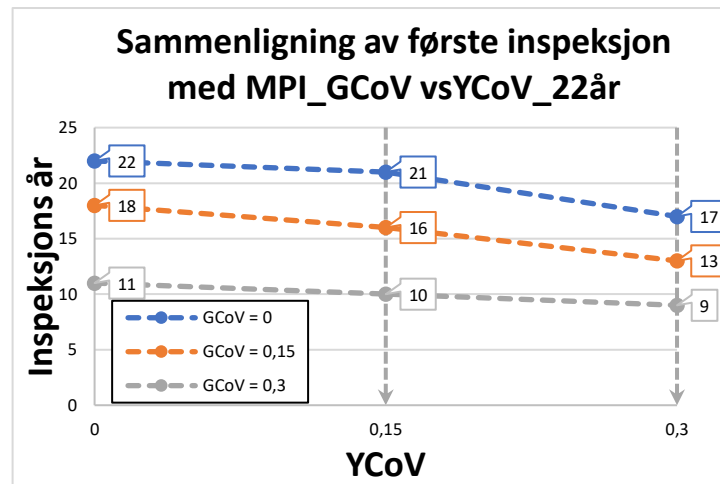
Figur 5.24: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 60 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV



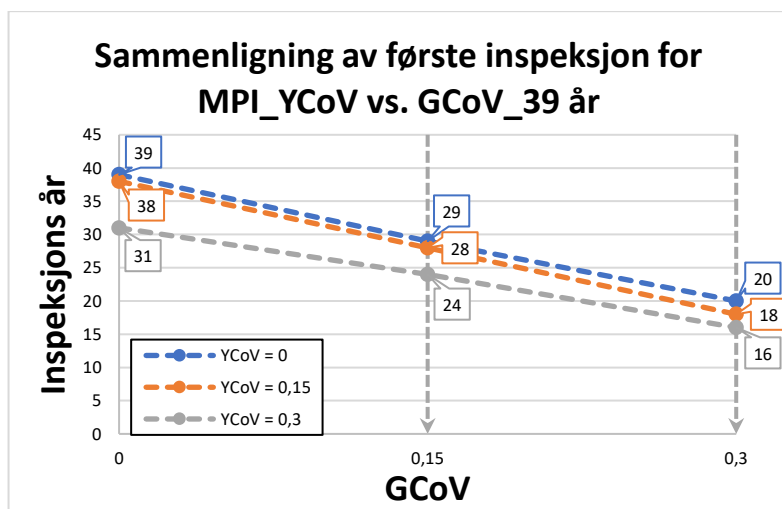
Figur 5.25: Sammenligning av første inspeksjon for CVI, 60 års utmattingslevetid, GCoV vs. YCoV



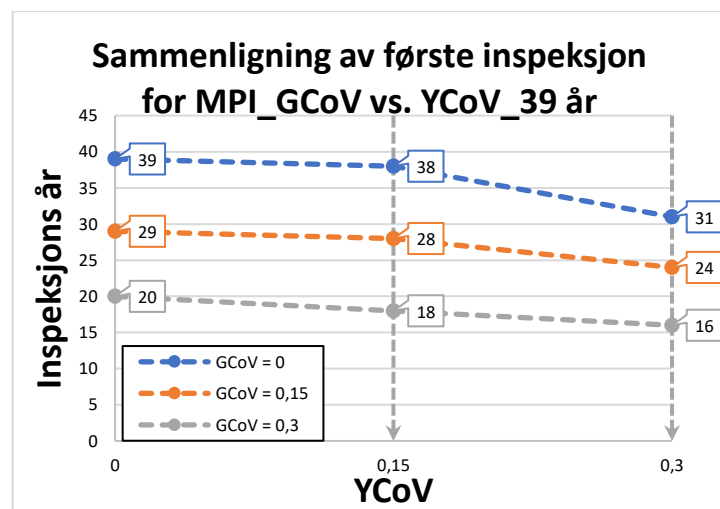
Figur 5.26 Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 22 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV



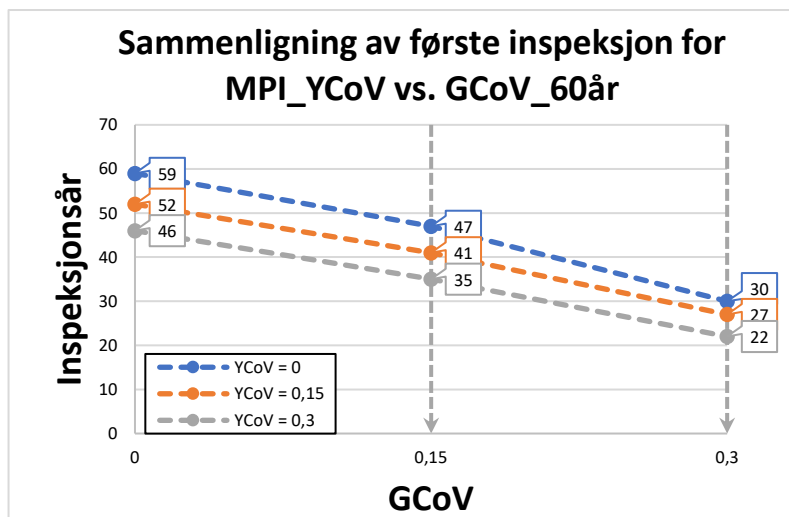
Figur 5.27: Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 22 års utmattingslevetid, GCoV vs. YCoV



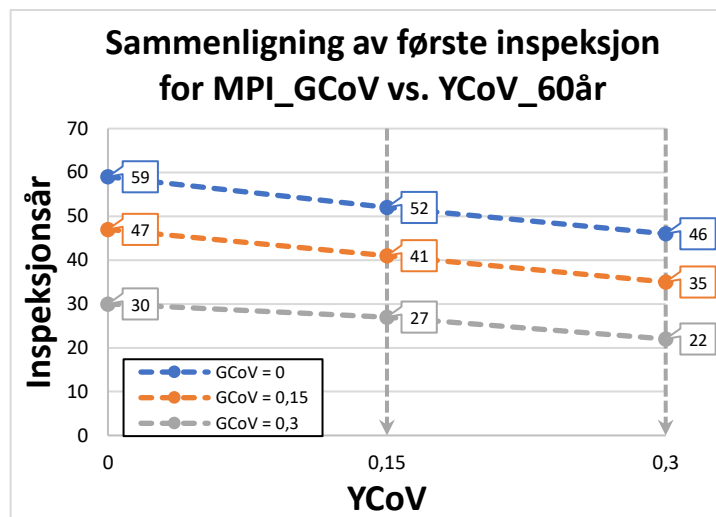
Figur 5.28: Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 39 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV



Figur 5.29: Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 39 års utmattingslevetid, GCoV vs. YCoV



Figur 5.30: Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 60 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV



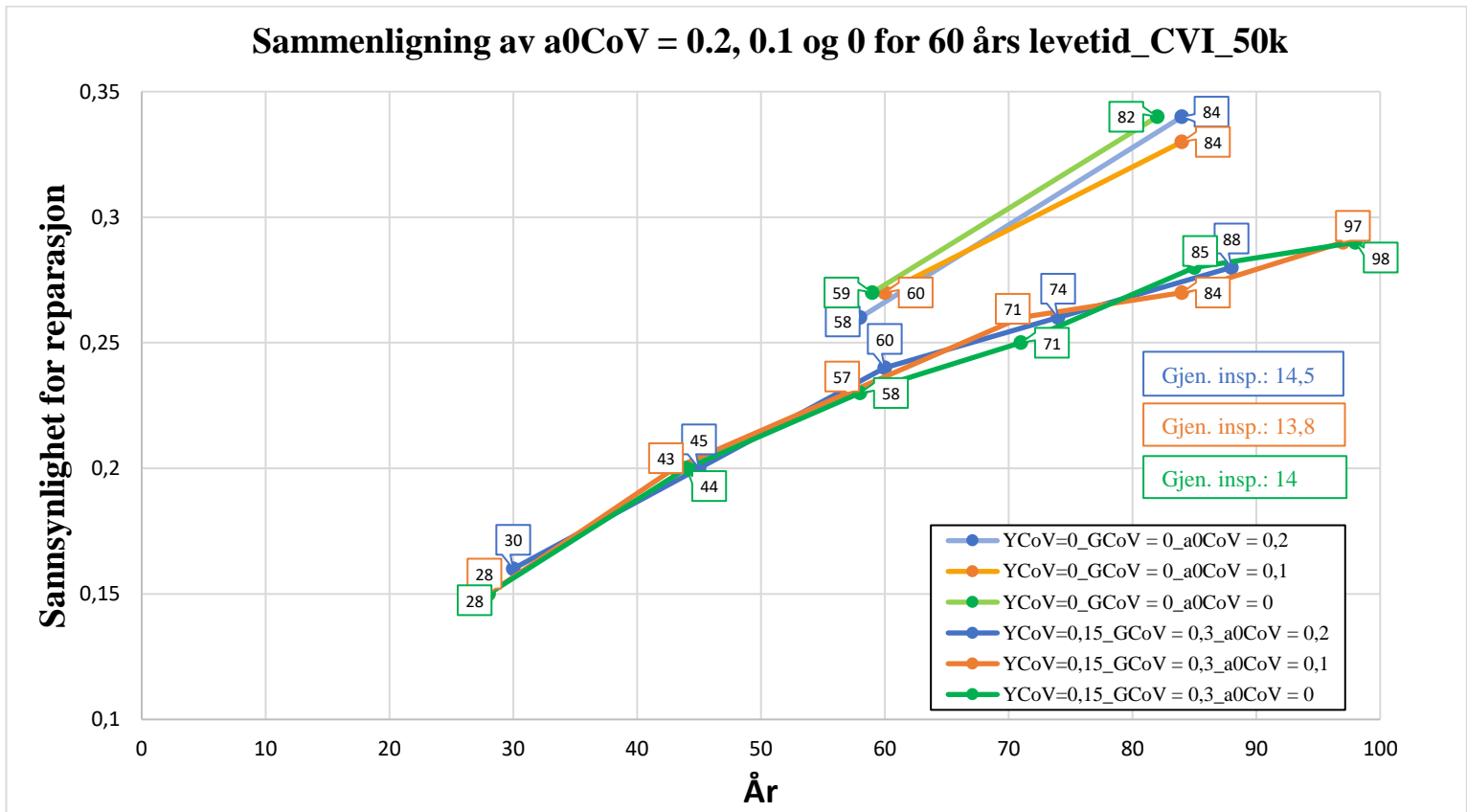
Figur 5.31: Sammenligning av første inspeksjon for MPI, 60 års utmattingslevetid, YCoV vs. GCoV

### 5.3 SAMMENLIGNING AV A0CoV LIK 0, 0.1 OG 0.2

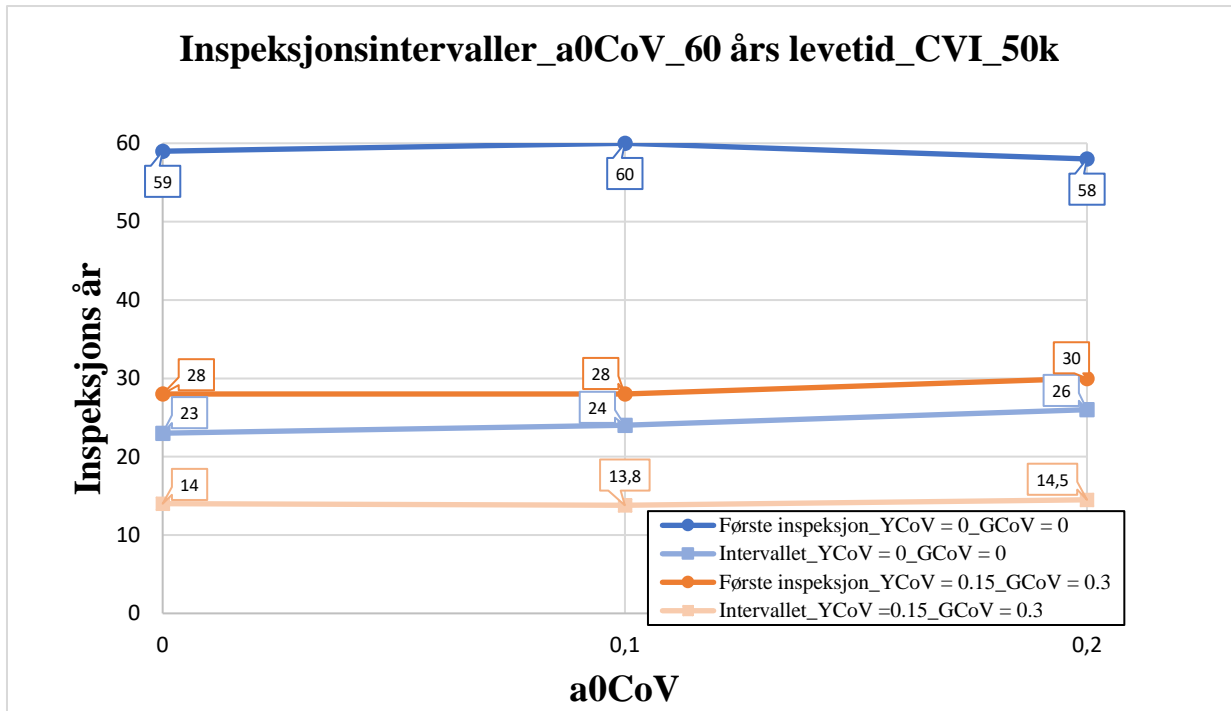
Denne sammenligningen er utført for to forskjellige årlige og globale usikkerheter, med initial sprekkvekst usikkerhet varierende på 0, 0.1 og 0.2. Utmattingslevetiden er her 60 år, med CVI som inspeksjonsmetode. Figur 5.32 viser hvordan sannsynlighet for reparasjon øker i forhold til hvilket år det blir utført en inspeksjon. Kurvene uten årlig og global usikkerhet, med varierende initial sprekkvekst usikkerhet, får to inspeksjoner i løpet av livsløpet. Første inspeksjon for a0CoV lik 0 kommer etter 59 år, før den stiger til 60 år med a0CoV lik 0.1. Når a0CoV er satt lik 0.2, kommer første inspeksjon etter 59 år. Den andre og siste inspeksjonen for disse kurvene kommer etter 82 år for a0CoV lik 0, før den stiger til 84 år for a0CoV lik 0.1 og 0.2.

Den årlig og globale usikkerheten økes så til henholdsvis 0.15 og 0.3, hvor initial sprekkvekst usikkerhet varierer som før. Første inspeksjon kommer etter 28 år for a0CoV lik 0 og 0.1, før den stiger til 30 år for a0CoV lik 0.2. Kurvene følger så hverandre tett ved andre inspeksjon, før det blir noe avvik i tredje, fjerde og femte inspeksjon. Avviket varierer fra 3 til 4 år i disse inspeksjonene. A0CoV lik 0.2 har sin siste og femte inspeksjon etter 88 år. Ved sjette og siste inspeksjon er kurvene for a0CoV lik 0 og 0.1 igjen samlet med ett års avvik. Simulering med a0CoV lik 0 får en gjennomsnittlig inspeksjon på 14 år, mens gjennomsnittlig inspeksjon for a0CoV lik 0.1 synker til 13.8 år, før den stiger til 14.5 med a0CoV lik 0.2.

Inspeksjonsintervallene til denne sammenligningen er vist i Figur 5.33. Her er kurvene delt opp med og uten usikkerhet, hvor  $a_0CoV$  varierer med 0, 0.1 og 0.2. Kurvene for første inspeksjon og intervall får nokså rette linjer med økende  $a_0CoV$ .



Figur 5.32: Sammenligning av forskjellige initial sprekkvekstusikkerheter



Figur 5.33: Inspeksjonsintervaller for forskjellig initial sprekvekstusikkerhet

## 5.4 STUDIE 2:

Studie 2 skiller seg ut ved at sannsynligheten for akseptabel bruddfeil er økt fra 0.01 til 0.001. For å tilfredsstille kravet for antall simulerte knutepunkt, også omtalt under kapittel 4.2.1: Nødvendig antall simulering, er disse simuleringene kjørt med 400 000 simulerte knutepunkt. Hver utmattingslevetid har to forskjellige simuleringer, hvor usikkerheten varierer. Den ene simuleringen har årlig, global og initial sprekkvekst usikkerhet på henholdsvis 0.15, 0.15 og 0.1, mens den andre simuleringen er uten årlig, global og initial sprekkvekst usikkerhet. Det er presentert ett diagram for hver inspeksjonsmetode. I tillegg er det opprettet et skaleringsplot av kurver for 39 og 60 års utmattingslevetid for hver inspeksjonsmetode.

### 5.4.1 Sammenligning av forskjellige utmattingslevetider for CVI og MPI med $P_{\text{facc}}$ lik 0.001

#### 5.4.1.1 Sammenligning av forskjellige levetider for CVI

Sammenligning av forskjellige levetider for CVI er vist i figur 5.34, med livsløpet langs x-aksen og sannsynlighet for reparasjon på y-aksen. Her går det frem at ved 22 års levetid følger kurvene med og uten usikkerhet hverandre fra 14 og opp til ca. 22 år, selv med et lite avvik. Kurven med innebygd usikkerhet får riktignok første inspeksjon etter 10 år, og når denne kurven har sin andre inspeksjon får kurven uten usikkerhet sin første inspeksjon. Dette skjer etter 14 år. Etter ca. 22 år har kurven uten usikkerhet en høyere stigning enn kurven med usikkerhet, noe som vedvarer ut livsløpet på 100 år. Kurven med usikkerhet starter en «berg og dalbane»-form, altså svingning opp og ned, etter 41 år, og dette fortsetter ut livsløpet. Det samme skjer for kurven uten usikkerhet, og starter med dette etter 67 år. Både kurver med og uten usikkerhet har en periode i forkant av svingningen som viser konstant sannsynlighet for reparasjon fra inspeksjon til inspeksjon, særlig for kurven uten usikkerhet, før sannsynligheten for reparasjon økes og igjen blir konstant. Og slik fortsetter det ut livsløpet. Gjennomsnittlig inspeksjon for en utmattingslevetid på 22 år er 3.6 og 4.67 år for henholdsvis med og uten usikkerhet.

Ved å se på kurver for 39 års levetid i samme figur, har kurven med usikkerhet første inspeksjon etter 17 år, og øker deretter til 24 år for neste inspeksjon. Første inspeksjon for



kurven uten usikkerhet kommet etter 26 år, og da ligger kurvene med og uten usikkerhet godt samlet opp mot ca. 35 år. Deretter har kurven uten usikkerhet en høyere stigning enn kurven med usikkerhet, og dette vedvarer, i likhet med 22 års levetid, ut livsløpet. Kurven uten usikkerhet stiger jevnt og trutt opp mot 96 år, og har sin siste inspeksjon dette året. Kurven med usikkerhet har også en jevn stigning, men flater noe ut mot slutten og har to perioder etter 79 til 85 år og 92 til 98 år på 0.3 og 0.31 i sannsynlighet for reparasjon hvor nettopp denne sannsynligheten holder seg konstant. Kurven med usikkerhet har sin siste inspeksjon etter 98 år. Gjennomsnittlig inspeksjon er på 6.75 med usikkerhet og 8.75 uten usikkerhet.

De siste kurvene i figur 5.34 ser på 60 års utmattingslevetid. Her går det frem at kurven med usikkerhet får sin første inspeksjon etter 25 år, før den øker til 36 år for neste inspeksjon. Kurven uten usikkerhet får sin første inspeksjon etter 37 år, og her ser man at kurvene med og uten usikkerhet følger hverandre, ikke like godt som for levetid på 22 og 39 år, men det er en viss likhet i form og stigning. Disse kurvene følger hverandre opp til drøyt 50 år av livsløpet. Deretter ser man at kurven uten usikkerhet har en høyere stigning, også dette i likhet med hva som skjedde med 22 og 39 års levetid, men her stabiliserer stigningen seg i større grad opp til inspeksjon på 76 år. Videre er stigningen noe større for kurven uten usikkerhet, før den når sin siste inspeksjon etter 90 år. På generelt grunnlag har kurven med usikkerhet en jevn stigning fra inspeksjon på 47 år og opp til sin siste inspeksjon ved 96 år, med unntak av en minimal stigningsendring ved inspeksjon på 86 år. Kurvene med og uten usikkerhet har henholdsvis 10.14 og 13.25 år for gjennomsnittlig inspeksjon.

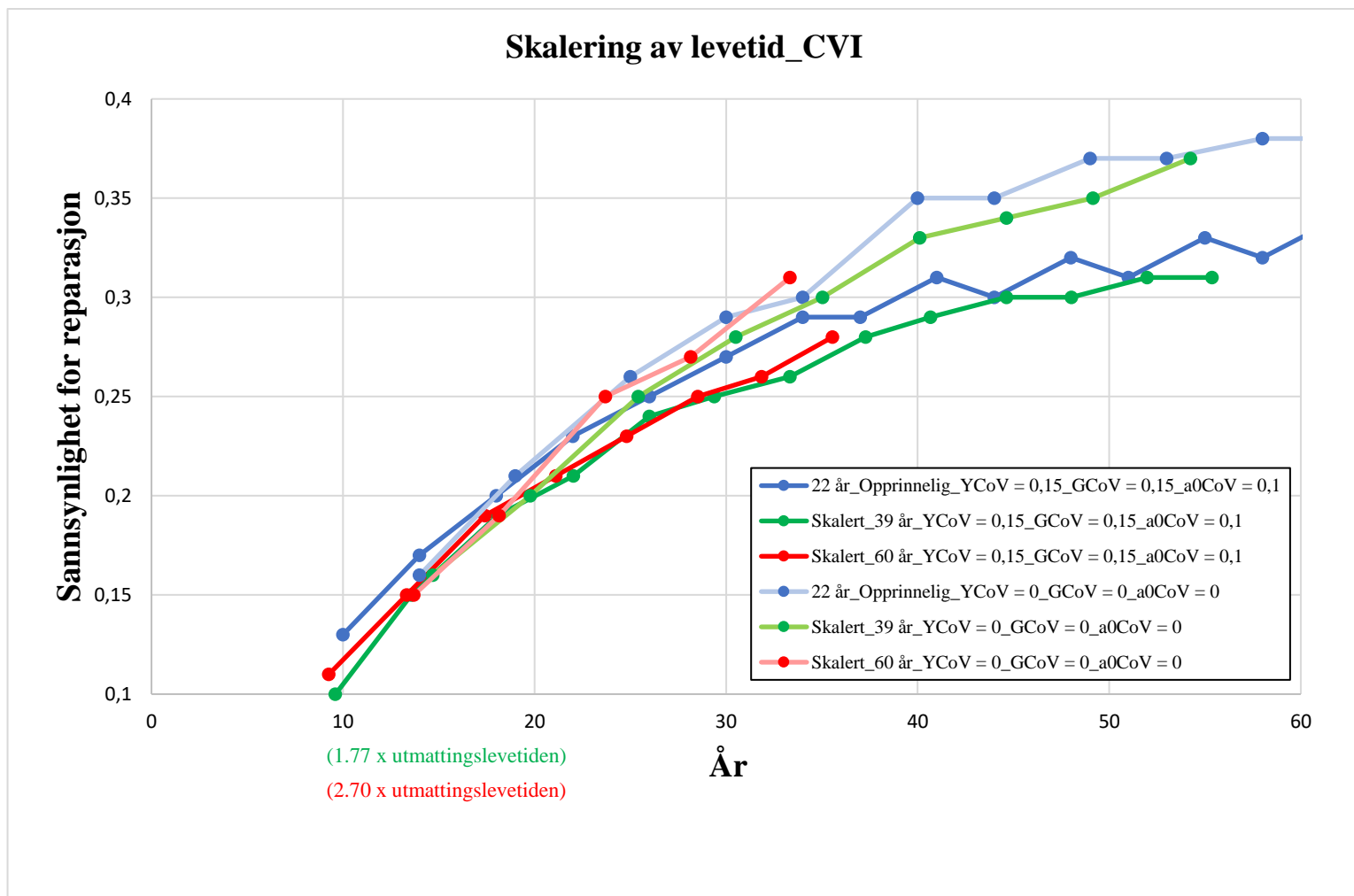


## Skalering av forskjellige levetider for CVI

Det er foretatt en skalering av kurver for levetid på 39 og 60 år, mens kurver for levetid på 22 år fremstår slik de opptrer i Figur 5.34. Figur 5.35 viser denne skaleringen, og her går livsløpet fra 0 til 60 år. I tillegg begynner andre aksene på 0.1 sannsynlighet for reparasjon. Dette er gjort for å sette søkelys på nettopp skaleringen. Skaleringen skjer ved at kurvene for henholdsvis 39 og 60 års levetid er dividert på 1.77 og 2.70, slik at disse kurvene kan gå gått sammen med kurvene for levetid på 22 år. Sannsynlighet for reparasjon er ikke skalert ned, og benytter opprinnelige verdier.

Det går frem av figuren at opprinnelig verdi for 22 års levetid, med usikkerhet, har en noe høyere sannsynlighet for reparasjon fra første inspeksjon og ut livsløpet, sett i forhold til skaleringskurver for 39 og 60 års levetid. Kurven for skalering av 39 års levetid kommer riktignok nærmere når opprinnelig 22 års levetid begynner med den omtalte «berg og dalbane»- formen. Forholdet mellom skalerte kurver for 39 og 60 års utmattingslevetid viser en nokså lik fremgang i livsløpet, med en liten forskjell i første inspeksjon og når kurven til 60 års utmattingslevetid har sin siste inspeksjon fremstilt.

Kurvene for opprinnelig 22 års levetid, samt skalerte kurver for 39 og 60 års levetid, uten usikkerhet, har nokså like verdier i starten av livsløpet. Endringen blir deretter mer synlig fra ca. 20 år. Her vises det at skalert kurve for 39 års utmattingslevetid ligger lavere enn både opprinnelig 22 år og skalert 60 års kurver, med en liten oppgang ved siste fremviste inspeksjon. Kurven for skalert 60 års utmattingslevetid svinger opp på kurven for opprinnelig 22 års levetid ved ca. 24 år av livsløpet, men går så ned under, før den igjen beveger seg opp på og til og med over ved sin siste fremviste inspeksjon.



Figur 5.35: Skalering av utmattingslevetid for CVI

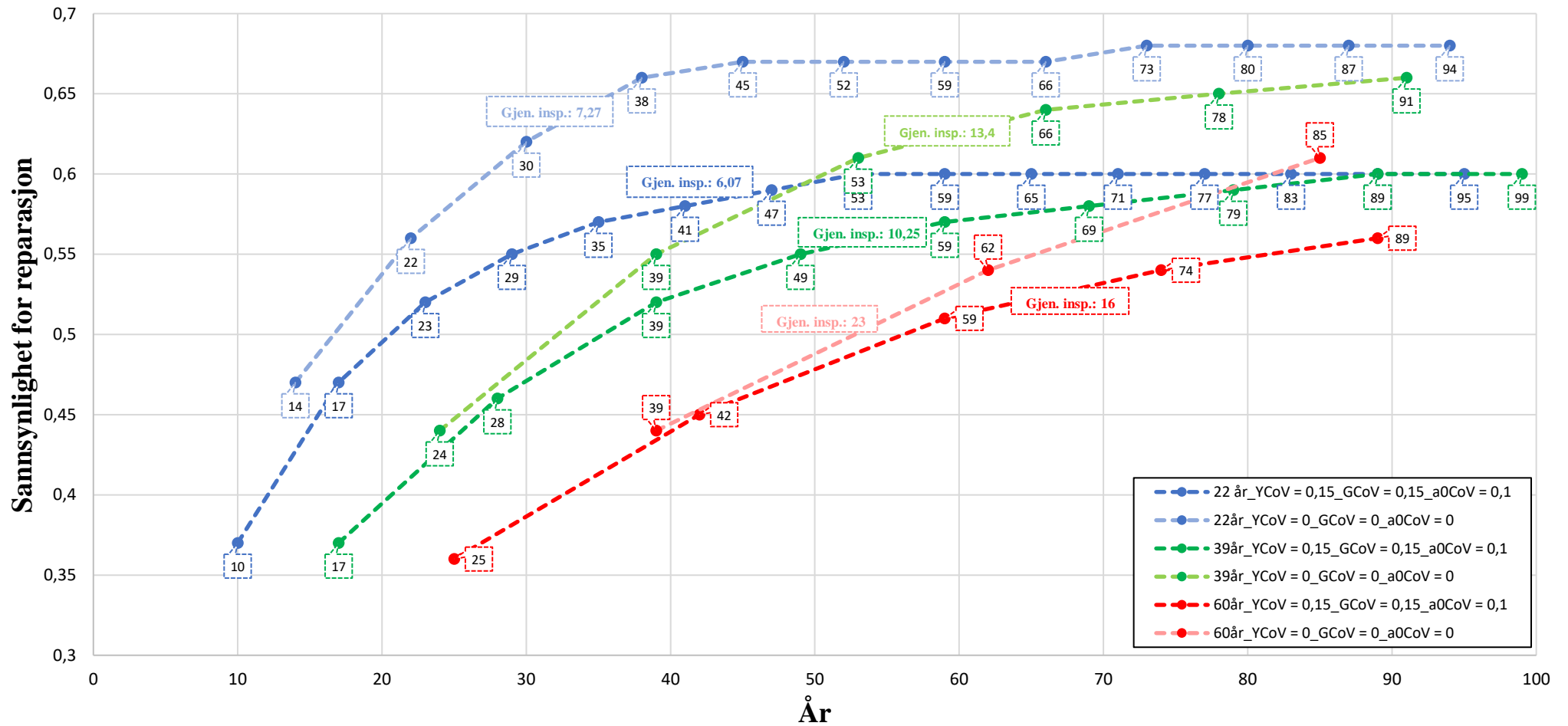
#### 5.4.1.2 Sammenligning av forskjellige levetider for MPI

Sammenligningen av forskjellige levetider for MPI er vist i Figur 5.36. Kurven for 22 års utmattingslevetid med usikkerhet har sin første inspeksjon etter 10 år, og har en jevn kurve opp mot inspeksjon nummer 8 etter 53 år. Videre herfra flater kurven helt ut for alle resterende inspeksjoner med sannsynlighet for reparasjon lik 0,6. Gjennomsnittlig inspeksjon for denne kurven er på 6.07 år. Ved å sette årlig, global og initial sprekkevækst usikkerhet lik 0 for samme levetid, økes første inspeksjon til 14 år, deretter stiger kurven i lignende tempo sammenlignet med kurve med usikkerhet, nos som vises i lyseblå kurve. Denne kurven flater ut ved femte inspeksjon på 45 år, med et lite hopp i sannsynlighet for reparasjon etter 73 år, før den fortsetter med å flate ut.

Kurve for 39 år utmattingslevetid, med usikkerhet innebygd, og har sin første inspeksjon etter 17 år. I likhet med kurver for levetid på 22 år, med og uten usikkerheter, stiger denne kurven også jevnt oppover før den flater ut ved inspeksjon nummer 8 etter 89 år. Siste inspeksjon kommer på slutten av livsløpet og vises etter 99 år. Denne kurven har en gjennomsnittlig inspeksjon på 10.25 år. Når usikkerheten blir satt ned til 0 for samme levetid, økes første inspeksjons år til 24 år. Etter dette stiger kurven i noe større tempo enn kurven med usikkerhet, men også her skjer det en utflating. Riktignok ikke helt flat, men har noe stigning. Siste inspeksjon for denne kurven kommer etter 91 år, med en gjennomsnittlig inspeksjon på 13.4 år.

Den siste utmattingslevetiden på 60 år viser kurver med og uten usikkerhet på henholdsvis 25 og 39 år for første inspeksjon. Disse kurvene har en relativt lik stigning ved å se på første og andre inspeksjon for kurve med usikkerhet og første inspeksjon uten usikkerhet. Denne stigning vedvarer for kurve uten usikkerhet, men synker for kurve med usikkerhet.

Sammenligning av forskjellige levetider\_MPI\_Pfacc\_0.001\_400k



Figur 5.36: Sammenligning av forskjellige utmattingslevetider for MPI og P<sub>fac</sub> lik 0.001

## Skalering av forskjellige levetider for MPI

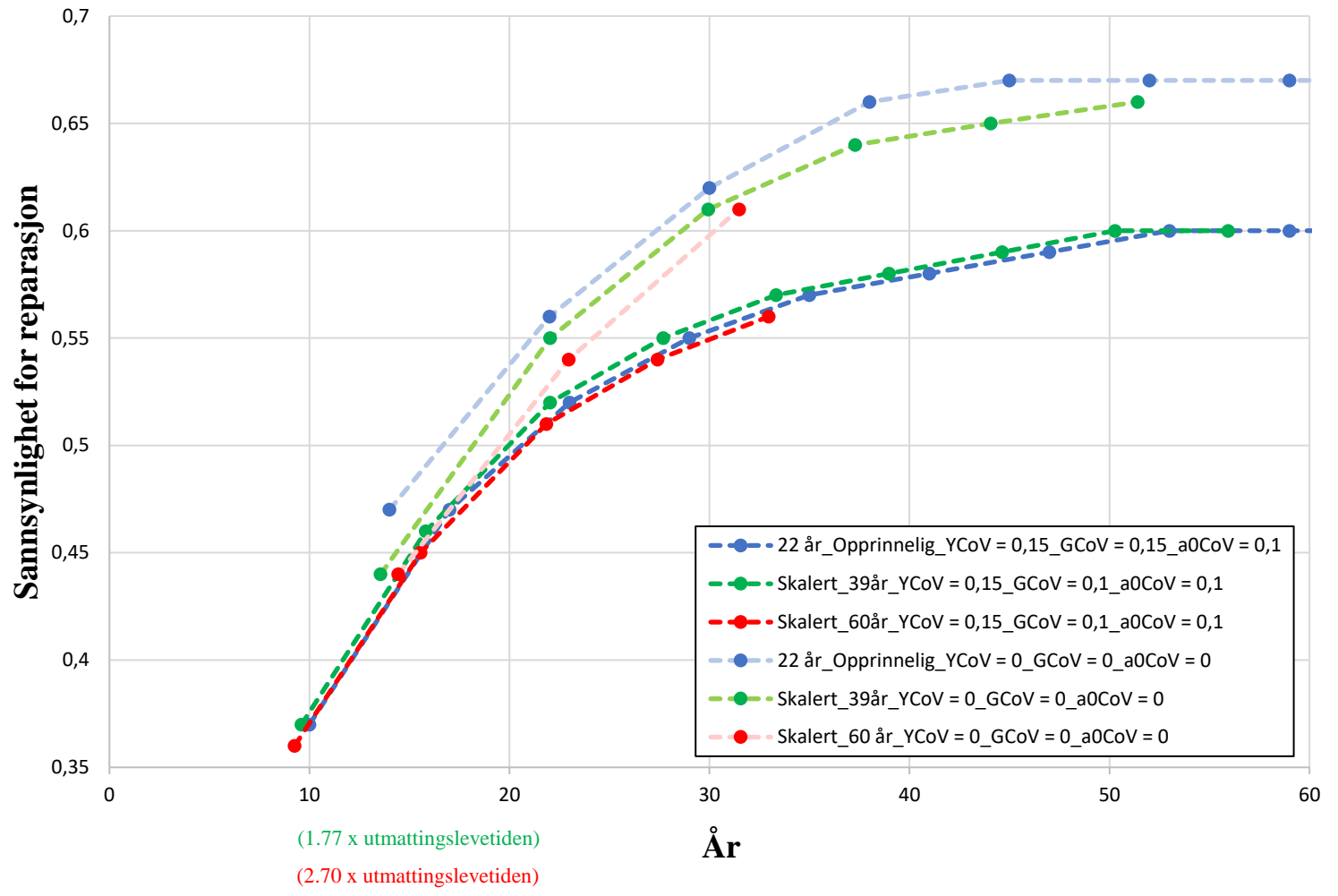
I likhet med skalering av forskjellige utmattingslevetider for CVI, er det gjort det samme for MPI vist i Figur 5.37. Samme skalering er foretatt med kurver for levetid på 39 og 60 år, mens kurver for levetid på 22 år opptrer på samme måte som Figur 5.36 viser. Også her går livsløpet fra 0 til 60 år for å sette søkelys på skaleringen. Andre akse begynner her på 0.35 sannsynlighet for reparasjon. Kurver for 39 og 60 års utmattingslevetid er henholdsvis dividert på 1.77 og 2.70, for å gå gått med kurver for 22 års utmattingslevetid.

Sannsynligheten for reparasjon følger samme verdi, og er dermed ikke skalert ned.

Det går frem av Figur 5.37 at kurvene med usikkerhet får en tilnærmet lik form etter skalering. Skalert 39 års utmattingskurve legger seg oppe på opprinnelig 22 års utmattingslevetid før siste inspeksjon, med sannsynlighet for reparasjon lik 0.6.

Skalerte kurver uten usikkerhet har også en lik form, særlig frem til 30 år av livsløpet.

### Skalering av utmattingslevetid\_MPI



Figur 5.37: Skalering av utmattingslevetid for MPI



## 5.5 STUDIE 3

I studie 3 blir sannsynlighet for akseptabel bruddfeil lik 0.001 og 0.01 sammenlignet med forskjellig utmattingslevetid. Hver utmattingslevetid har to forskjellige simuleringer, hvor usikkerheten varierer. Den ene simuleringen har årlig, global og initial sprekkvekst usikkerhet på henholdsvis 0.15, 0.15 og 0.1, mens den andre simuleringen er uten årlig, global og initial sprekkvekst usikkerhet. I tillegg er det en tilhørende sammenligning av inspeksjonsintervaller. Dette er gjort for inspeksjonsmetodene CVI og MPI.

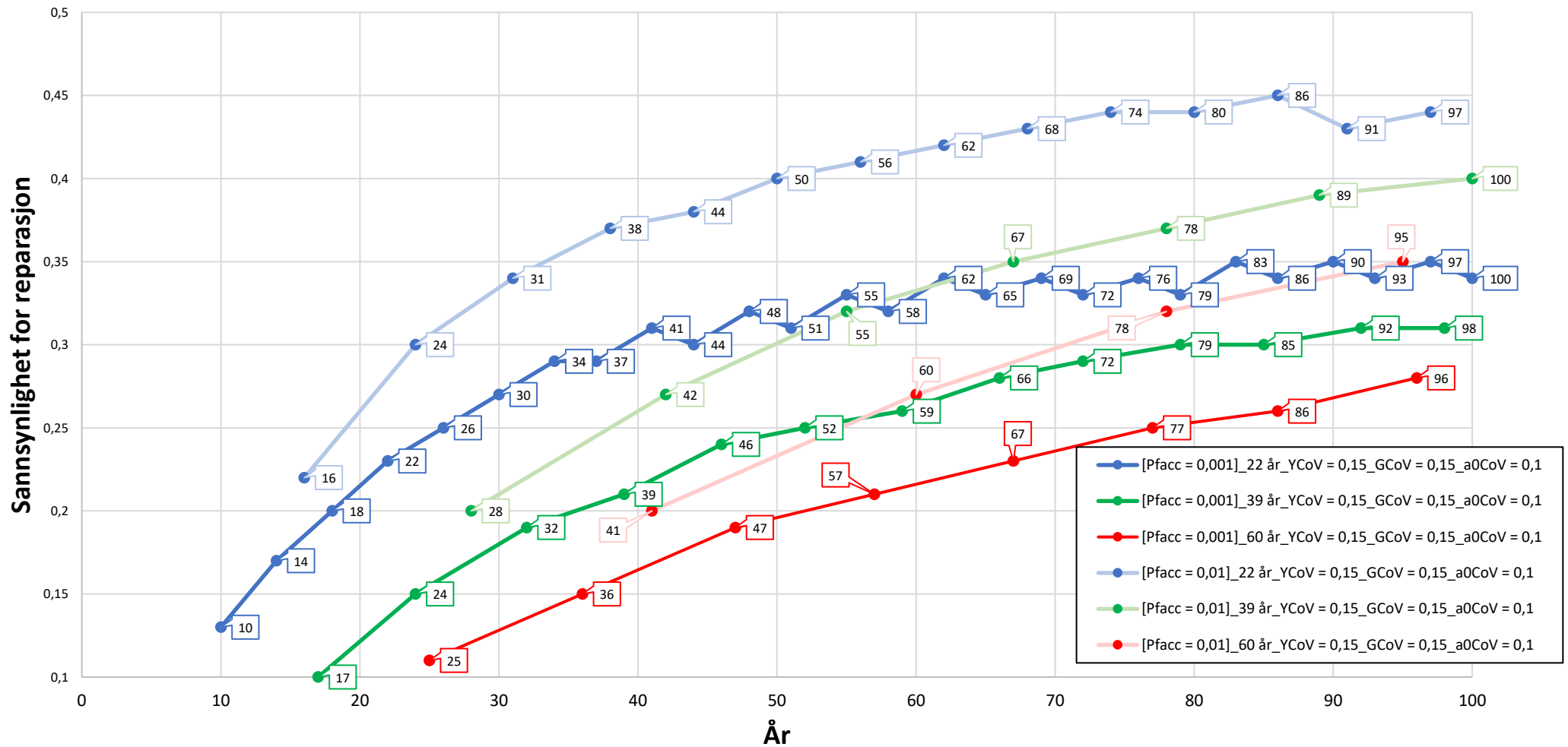
### 5.5.1 Sammenligning av $P_{\text{facc}}$ lik 0.001 og 0.01 for CVI med usikkerhet

Sammenligningen av  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 og 0.01 for forskjellige utmattingslevetider for CVI er vist i Figur 5.38. Her går det frem at kurve med  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 og 22 års utmattingslevetid får sine to første inspeksjoner etter 10 og 14 år, før kurve med  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og samme utmattingslevetid får sin første inspeksjon. Dette skjer etter 16 år. Kurve med  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 har ikke like mange inspeksjoner som kurve med  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001, men sannsynligheten for reparasjon har en høyere verdi. Stigningen på disse kurvene er noe forskjellig da kurve med  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 har en noe brattere stigning i starten, før den flater mer ut mot slutten. Denne kurven stiger helt til nest siste inspeksjon etter 91 år, for da synker sannsynligheten for reparasjon, før den går opp igjen ved siste inspeksjon. Kurven til  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 stiger de første sju inspeksjonene, før sannsynligheten for reparasjon er konstant til neste inspeksjon. Derfra og ut livsløpet begynner kurven, som forklart under kapittel 5.4.1, den såkalte «berg-og-dalbane»-formen, hvor kurven går opp og ned i sannsynlighet for reparasjon.

Når utmattingslevetiden er 39 år og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 kommer første og andre inspeksjon etter henholdsvis 17 og 24 år. Først etter 28 år kommer første inspeksjon for kurve med utmattingslevetid på 39 år og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01, og ligger over kurve med  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 gjennom hele livsløpet. Denne kurven har sin siste inspeksjon etter 100 år ved 0.4 i sannsynlighet for reparasjon. Kurven med utmattingslevetid på 39 år og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 stiger ikke like raskt som for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01, og flater noe mer ut mot slutten av livsløpet. Denne kurven har to opphold mellom inspeksjon nummer 10 og 11, samt 12 og 13, hvor sannsynlighet for reparasjon er konstant.

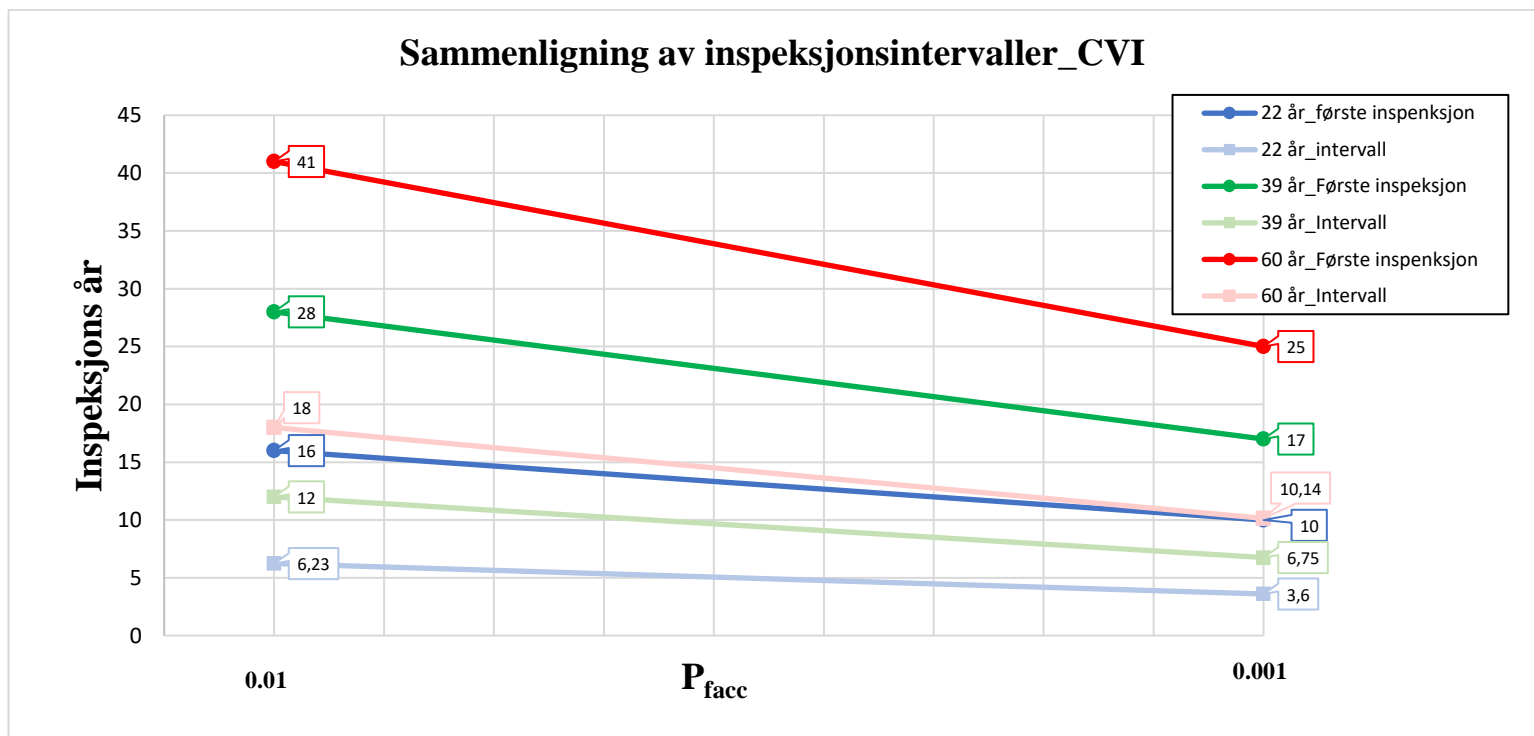
Kurve for utmattingslevetid på 60 år og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 får sine to første inspeksjoner etter 25 og 36 år. Ved 41 år har kurve for utmattingslevetid på 60 år og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 sin første inspeksjon, deretter stiger kurven videre opp til andre inspeksjon ved 60 år, før de to siste inspeksjonene skjer etter 78 og 95 år. Kurven for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 ligger godt over kurve for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001, men er noe nærmere de første inspeksjonene.

Sammenligning av forskjellige utmattingslevetider\_CVI\_Pfacc\_0.001 vs. 0.01



Figur 5.38: Sammenligning av forskjellige utmattingslevetider for CVI og  $P_{facc}$  lik 0.001 vs. 0.01, med usikkerhet

Figur 5.39 viser sammenligningen av inspeksjonsintervaller for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001 med forskjellig utmattingslevetider. Denne figuren tar for seg første inspeksjon og intervallet som oppstår for  $P_{\text{facc}}$  er 0.01 og 0.001. Når utmattingslevetiden er 22 år kommer første inspeksjon etter 16 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01, og etter 10 år når  $P_{\text{facc}}$  er lik 0.001. Tilhørende intervall er på 6.23 og 3.6 for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001. For utmattingslevetid på 39 år kommer første inspeksjon etter 28 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og etter 17 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Det tilhørende intervallet er på 12 og 6.75 år for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001. Når utmattingslevetiden økes til 60 år kommer første inspeksjon etter 41 og 25 år for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001. Intervallet er på 18 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 10.14 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001.



Figur 5.39: Sammenligning av inspeksjonsintervaller for CVI og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 vs. 0.01, med usikkerhet

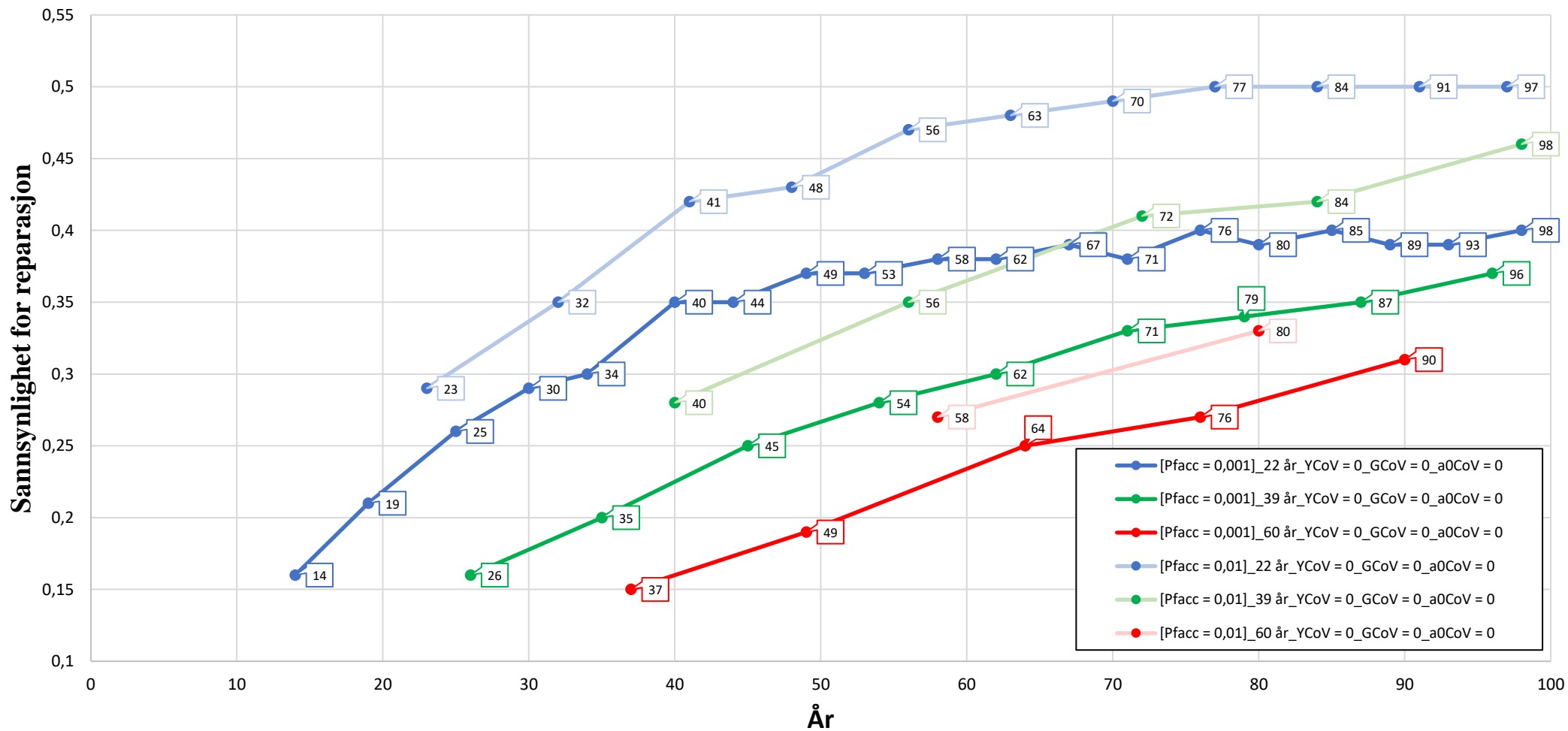
## 5.5.2 Sammenligning av $P_{\text{facc}}$ lik 0.001 og 0.01 for CVI uten usikkerhet

Sammenligning av  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 og 0.01 for forskjellige utmattingslevetider uten usikkerhet er vist i Figur 5.40. Her går det frem at når utmattingslevetiden er 22 år og  $P_{\text{facc}}$  er lik 0.01, kommer første inspeksjon etter 23 år. Videre stiger kurven opp mot 0.5 i sannsynlighet for reparasjon, og flater ut ved denne verdien de siste fire inspeksjonene. For  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 og samme utmattingslevetid kommer første inspeksjon etter 14 år. Denne kurven stiger som følge av økning i sannsynlighet for reparasjon, men begynner å flate ut etter rundt 40 år. Inspeksjon nummer 6 og 7 har konstant sannsynlighet for reparasjon tilsvarende 0.35. Deretter stiger kurven noe før den igjen får konstant sannsynlighet for reparasjon. Også her starter kurven med «berg-og-dalbane»-form ved at sannsynligheten for reparasjon går opp og ned for hver inspeksjon. Siste inspeksjon kommer etter 98 år med en sannsynlighet for reparasjon på 0.4.

Når utmattingslevetiden er 39 år og  $P_{\text{facc}}$  er 0.001 kommer første inspeksjon etter 26 år. Første inspeksjon for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 kommer noe seinere og har sin første inspeksjon etter 40 år. Da har kurven for  $P_{\text{facc}}$  allerede hatt to inspeksjoner. Kurver for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 og 0.01 har en noenlunde lik form, men  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 har en høyere verdi av sannsynlighet for reparasjon gjennom hele livsløpet.

Kurven for utmattingslevetid på 60 år og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 får sine to første inspeksjoner etter 37 og 49 år, og etter 58 år får  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 sin første inspeksjon. Kurven for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 får bare to inspeksjoner i løpet av livsløpet, og har sin andre og siste inspeksjon etter 80 år. Begge disse to inspeksjonene har en høyere sannsynlighet for reparasjon enn  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001, noe figuren viser.

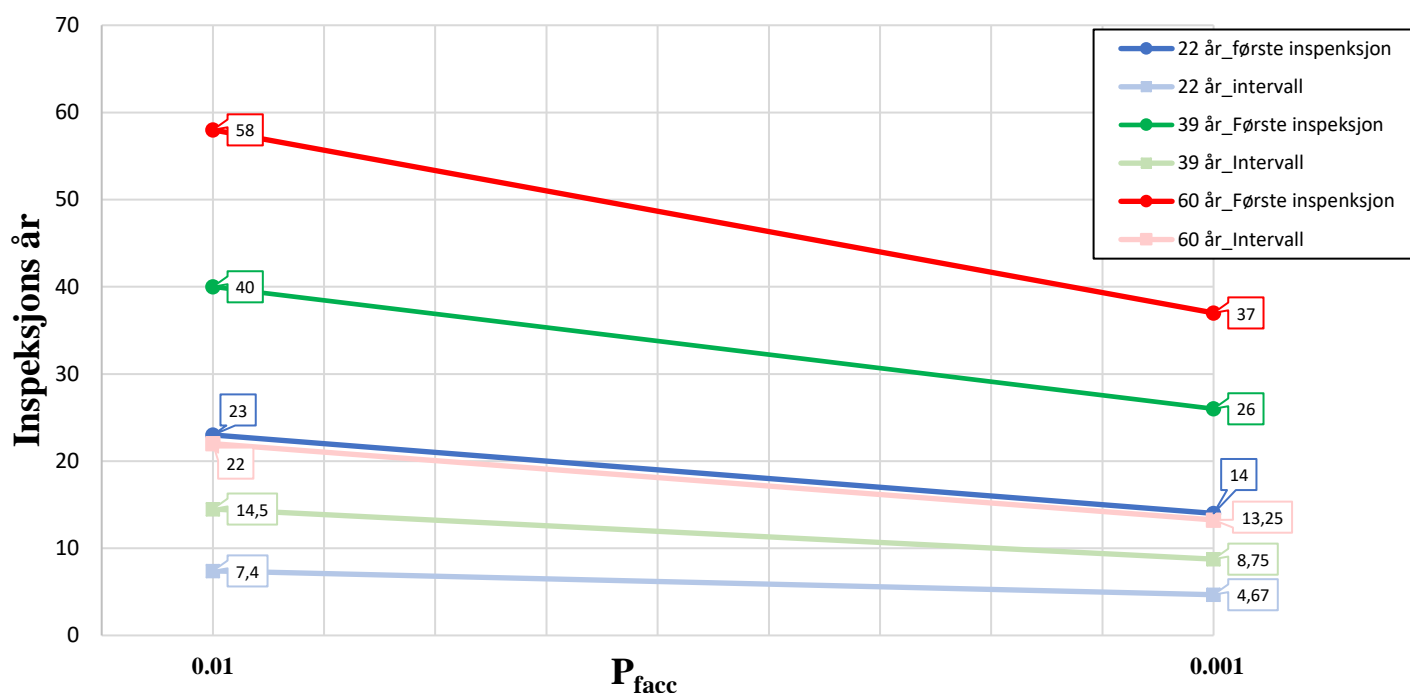
### Sammenligning av forskjellige levetider\_CVI\_Pfacc\_0.001 vs. 0.01



Figur 5.40: Sammenligning av forskjellig utmattingslevetider for CVI og  $P_{facc}$  lik 0.001 vs. 0.01, uten usikkerhet

Figur 5.41 viser sammenligning av inspeksjonsintervaller for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001 med forskjellig utmattingslevetider. Det er ingen årlig, global og initial sprekkvekst usikkerhet, og er dermed satt til 0. Inspeksjonsmetoden er CVI. Figuren viser kurver for første inspeksjon og kurver for intervallet, med forskjellig utmattingslevetider. Når utmattingslevetiden er 22 år kommer første inspeksjon etter 23 og 14 år for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001. Det tilhørende intervallet er på 7.4 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01, og synker til 4.67 for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Med en utmattingslevetid på 39 år kommer første inspeksjon etter 40 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01, og synker til 26 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01. Intervallet for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 er på 14.5, og synker til 8.75 når  $P_{\text{facc}}$  er 0.001. Ved en utmattingslevetid på 60 år kommer første inspeksjon etter 58 og 37 år for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001. Det tilhørende intervallet er på 22 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 13.25 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001.

### Sammenligning av inspeksjonsintervaller\_CVI



Figur 5.41: Sammenligning av inspeksjonsintervaller for CVI og P<sub>faccc</sub> lik 0.001 vs. 0.01, uten usikkerhet

### 5.5.3 Sammenligning av P<sub>faccc</sub> lik 0.001 og 0.01 for MPI med usikkerhet

Sammenligningen av P<sub>faccc</sub> lik 0.001 og 0.01 for forskjellige utmattingslevetider med usikkerhet er vist i Figur 5.42. Her går det frem at når utmattingslevetiden er 22 år og P<sub>faccc</sub> er lik 0.001 får kurven en fin stignings bue opp mot inspeksjon nummer 8 etter 53 år, og herfra er sannsynligheten for reparasjon konstant lik 0.6 for alle resterende inspeksjoner. Når P<sub>faccc</sub> er lik 0.01 for samme utmattingslevetid, ligger kurven godt over kurven for P<sub>faccc</sub> lik 0.001.

Denne kurven flater også ut, noe man ser tendenser til allerede etter inspeksjon nummer 3 ved 38 år. Her er sannsynligheten for reparasjon konstant til neste inspeksjon, før kurven stiger og flater helt ut og gir konstant sannsynlighet de to siste inspeksjonene ved 84 og 93 år.

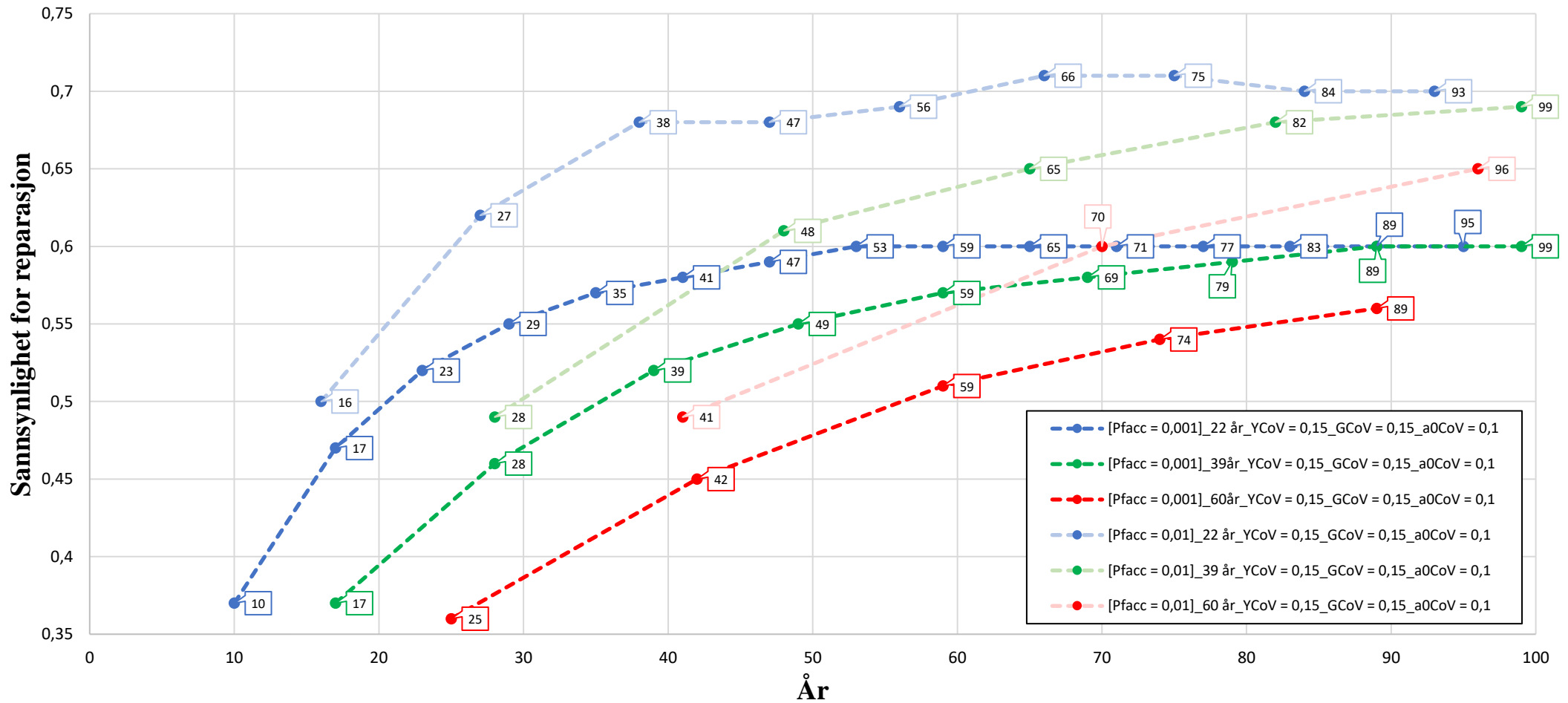
Når utmattingslevetiden er 39 år og P<sub>faccc</sub> er lik 0.001, får også denne kurven en fin buet form opp mot sin nest siste inspeksjon ved 89 år. Kurven har videre en konstant sannsynlighet for



reparasjon på 0.6 de to siste inspeksjonene ved 89 og 99 år, og legger seg oppe på kurven for utmattingslevetid på 22 år og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Når  $P_{\text{facc}}$  økes til 0.01 for utmattingslevetid på 39 år går det frem at kurven har en høyere sannsynlighet for reparasjon enn for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001, og ligger dermed over denne kurven. Denne kurven stiger med godt over 0.1 i sannsynlighet for reparasjon når første inspeksjon kommer etter 28 år og opp til andre inspeksjon som kommer etter 48 år. Deretter slakker stigningen noe av og begynner å flate ut ved nest siste inspeksjon etter 82 år.

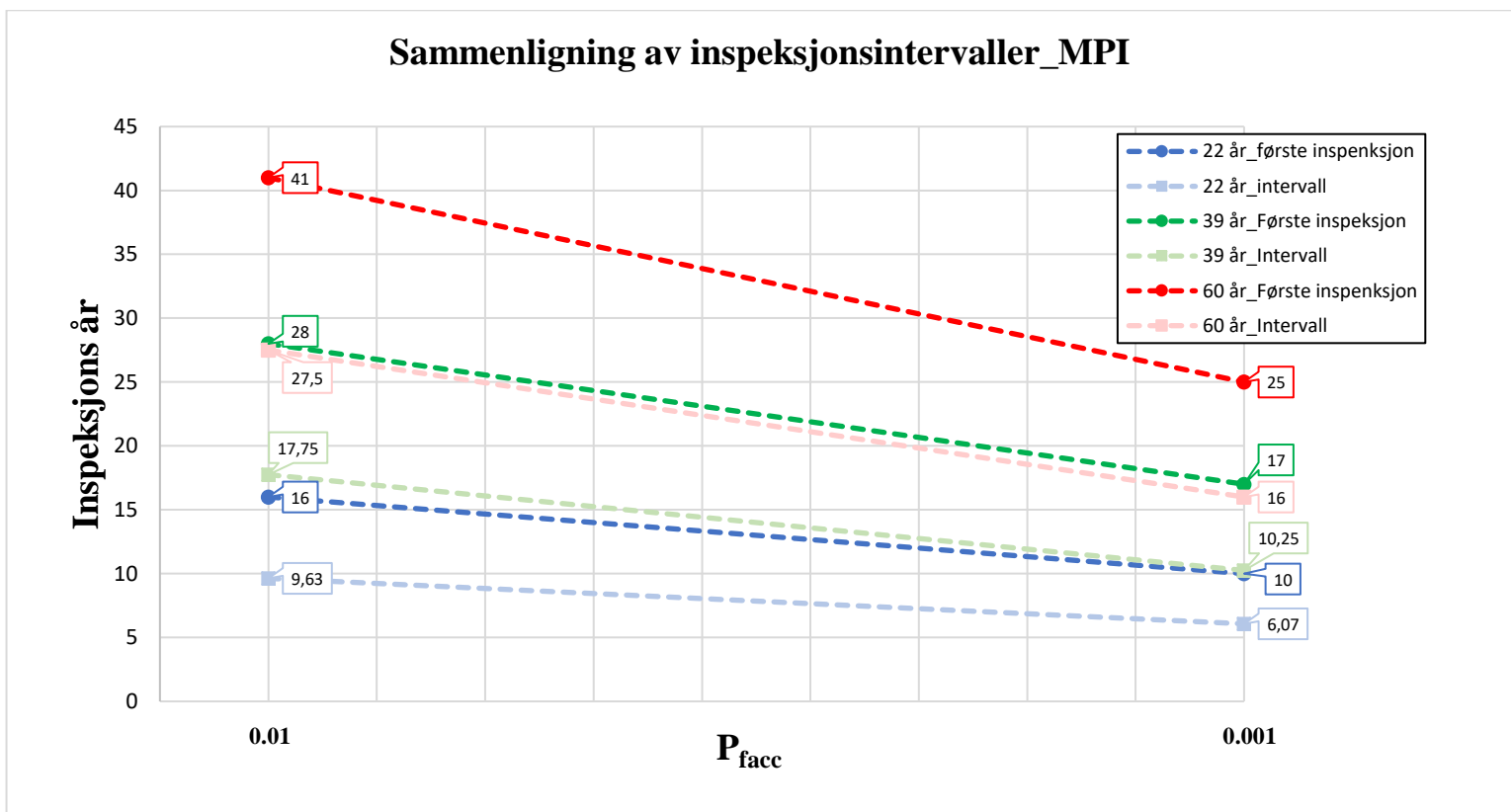
Ved en utmattingslevetid på 60 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 får også denne kurven en god stigning opp mot siste inspeksjon etter 89 år, og en kan se tendenser i stigningen til kurven at den vil flate ut mot slutten av livsløpet. Kurven til  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 har en høyere sannsynlighet for reparasjon enn for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001, og har sin første inspeksjon etter 41 år. Deretter stiger kurven opp til andre inspeksjon ved 70 år og sannsynlighet for reparasjon på 0.6. Kurven fortsetter så videre med en noe lavere stigning og har sin siste inspeksjon etter 96 år.

Sammenligning av forskjellige levetider\_MPI\_Pfacc = 0.001 vs. 0.01



Figur 5.42: Sammenligning av forskjellig utmattingslevetider for MPI og  $P_{facc}$  lik 0.001 vs. 0.01, med usikkerhet

Figur 5.43 viser sammenligningen av inspeksjonsintervaller for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001 med forskjellig utmattingslevetider og inspeksjonsmetode MPI. Første inspeksjon og tilhørende intervall er vist i denne figuren. Når utmattingslevetiden er 22 år kommer første inspeksjon etter 16 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01, for så å synke til 10 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Det tilhørende intervallet er på 9.63 og 6.07 år for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001. For utmattingslevetid på 39 år blir første inspeksjon etter 28 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 17 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Intervallet er på 17.75 og 10.25 år for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001. Ved å øke utmattingslevetiden til 60 år kommer første inspeksjon etter 41 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og etter 25 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Det tilhørende intervallet er på 27.5 og 16 år for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001.



Figur 5.43: Sammenligning av inspeksjonsintervaller for MPI og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 vs. 0.01, med usikkerhet

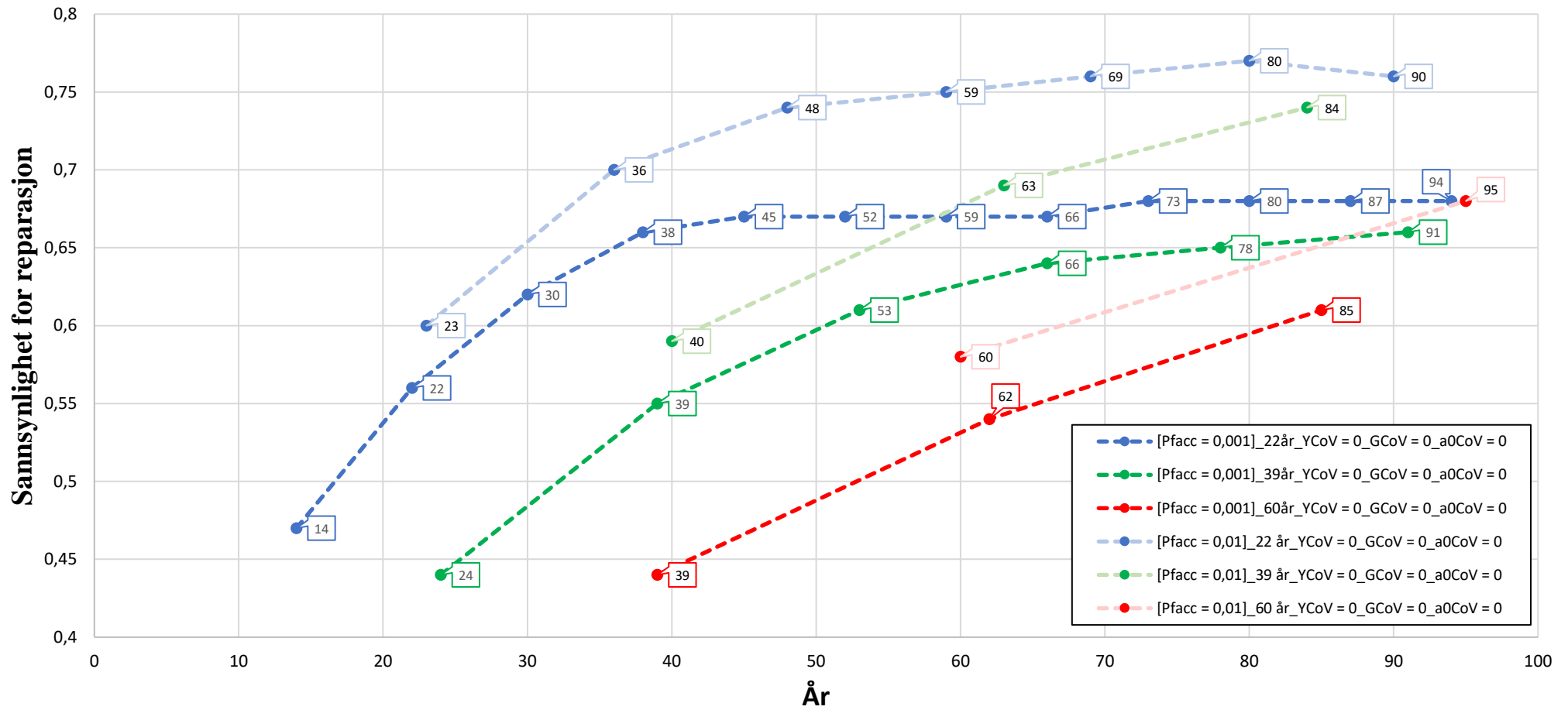
### 5.5.4 Sammenligning av $P_{\text{facc}}$ lik 0.001 og 0.01 for MPI uten usikkerhet

Sammenligningen av  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 og 0.01 med forskjellige utmattingslevetider for MPI er vist i Figur 5.44. Det er ingen årlig, global og initial sprekkvekst usikkerhet i disse simuleringene. Her viser kurve for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 og 22 års utmattingslevetid en buet stigning opp mot inspeksjon nummer 5. Derifra går det frem at sannsynligheten er konstant for de neste tre inspeksjonene, før kurven får et lite hopp i sannsynlighet for reparasjon og holder seg konstant de fire siste inspeksjonene av livsløpet. For  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01, og samme utmattingslevetid, kommer første inspeksjon noe seinere enn for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Her kommer første inspeksjon etter 23 år, og stiger videre opp til neste inspeksjon som er etter 36 år. Deretter begynner kurven å flate ut, med en lav økning i sannsynlighet for reparasjon fra inspeksjon til inspeksjon. Den siste inspeksjonen kommer etter 90 år med sannsynlighet for reparasjon lik 0.76, og denne har en lavere sannsynlighet for reparasjon enn den forrige som er på 0.77.

Kurve for utmattingslevetid på 39 år og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 får også en buet stigning, men noe mer kantete enn for utmattingslevetid på 22 år og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Stigningen avtar etter hvert mot siste inspeksjon, som er etter 84 år. For  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 stiger kurven fra sin første inspeksjon etter 40 år opp til neste inspeksjon etter 63 år, før den siste inspeksjonen som kommer etter 84 år. Stigningen avtar noe fra 63 til 84 år.

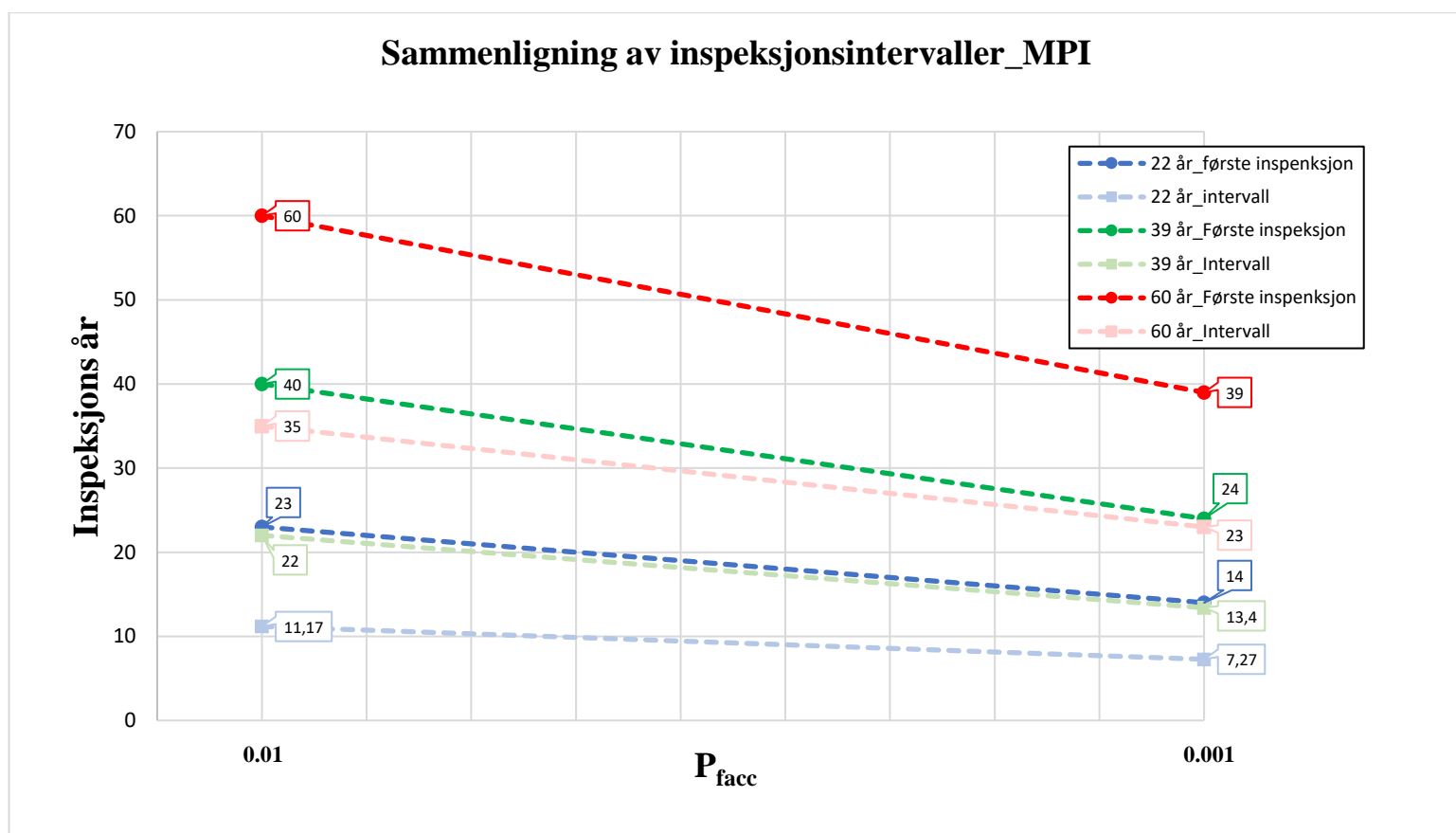
For en utmattingslevetid på 60 år viser kurven for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 første inspeksjon etter 39 år. Deretter stiger kurven opp til neste inspeksjon som etter 62 år, før siste inspeksjon kommer etter 85 år. For  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01, og samme utmattingslevetid, har kurven bare to inspeksjoner, og disse kommer etter 60 og 95 år.

Sammenligning av forskjellige levetider\_MPI\_Pfacc\_0.001 vs. 0.01



Figur 5.44: Sammenligning av forskjellig utmattingslevetider for MPI og  $P_{facc}$  lik 0.001 vs. 0.01, uten usikkerhet

Figur 5.45 viser sammenligningen av inspeksjonsintervaller for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001 med forskjellige kurver for utmattingslevetider. Denne figuren ser på første inspeksjon, samt intervallet som oppstår med  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001. MPI er brukt som inspeksjonsmetode, med ingen årlig, global og initial sprekkvekst usikkerhet. Når utmattingslevetiden er 22 år kommer første inspeksjon etter 23 og 14 år for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001. Tilhørende intervall er på 11.17 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 7.27 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Når utmattingslevetiden økes til 39 år kommer første inspeksjon etter 40 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 24 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Intervallet blir på 22 og 13.4 år for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001. Kurver for 60 års utmattingslevetid gir første inspeksjon etter 60 år for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og etter 39 for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001. Kurver for intervallet viser 35 og 23 år for henholdsvis  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 0.001.



Figur 5.45: Sammenligning av inspeksjonsintervaller for CVI og  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 vs. 0.01, uten usikkerhet

## 6 DISKUSJON

---

Denne diskusjonen bygger videre på resultater fremstilt som Studie 1, 2 og 3. Studie 1 diskuterer resultater for første inspeksjon og gjennomsnittlig inspeksjon for beregnede utmattingslevetider. Sannsynlighet for akseptabel bruddfeil er her 0.01. Deretter diskuteres Studie 2, med resultater for  $P_{\text{facc}}$  er lik 0.001, før Studie 3 diskuterer resultater for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 og 0.01.

### 6.1 STUDIE 1

Det er et tydelig mønster i resultatene for første års inspeksjon, gjennomgående for de forskjellige utmattingslevetidene. Kurvene får en nedgang i første inspeksjons år jo høyere usikkerheten blir, noe som ikke er overraskende. Det er heller en bekreftelse på at det som er gjort følger logisk tankegang. Det er riktignok tre unntak ved 39 års utmattingslevetid, og dette vises i Figur 5.16 med symbolet \*\*. Her er det altså tre avvik som går på økning av årlig usikkerhet fra 0.1 til 0.15 i det ene tilfellet, og fra 0 til 0.1 i de to andre. I disse tre tilfellene går første inspeksjons år opp ett år, noe som ikke er mye, men nok til få oppmerksomhet. Disse simuleringene er kjørt med 50 000 simulerte knutepunkt, og en nøyaktighet på 10%. Det er grunn til å tro at nettopp disse tre avvikene skyldes programmert verdi som befinner seg på øvre del av nøyaktighetsintervallet.

Det går frem av resultatene for første inspeksjon uten innebygd usikkert, uavhengig av utmattingslevetid, at første inspeksjon kommer enten akkurat på, litt før eller litt etter bestemt utmattingslevetid. Dette virker ikke realistisk, da denne første inspeksjonen burde kommet på et tidligere tidspunkt i forhold til hva bestemt utmattingslevetid skulle tilsi. Det er naturlig å tro at nøyaktigheten kan være en årsak til dette, men når alle resultater sier noe annet faller på en måte denne forklaringen bort.

En annen interessant observasjon i resultatene for første års inspeksjoner er forholdet mellom økning i årlig usikkerhet sammenlignet med økning i global usikkerhet. Det skjer en nedgang i første inspeksjons år når begge disse to usikkerhetene økes, men global usikkerhet har en større betydning enn årlig usikkerhet. Dette kommer tydelig frem ved å se på fremstilling av første inspeksjon år for hver utmattingslevetid, spesielt ved en utmattingslevetid på 60 år.

Figur 5.18 viser dette, og her er det markert to betydelige nedganger når global usikkerhet økes fra 0 til 0.15 og fra 0.15 til 0.3 på henholdsvis ca. 10 års nedgang og over 10 års nedgang. Det går også tydelig frem under kapittel 5.2.4 – Samlet sammenligning av første inspeksjon for CVI og MPI. Her vises det at kurvene for GCoV lik 0, 0.15 og 0.3 får et klart større skille mellom seg enn det kurvene til YCoV får med samme verdier. Dette gjelder for både CVI og MPI.

Ved å se på forholdet mellom første år for inspeksjon uten usikkerhet, og med årlig og global usikkerhet på henholdsvis 0.15 og 0.3, blir første året for inspeksjon redusert med under en halvpart. Dette er noe som går igjen i alle resultater av første år for inspeksjon ved ulike utmattingslevetider. I likhet med hva som ble skrevet om normalfordeling og bruk av YCoV og GCoV ovenfor, vil det her også komme inn på dette området. Når standardavviket er satt lik GCoV, får normalfordelingskurven en bredere form ved usikkerhet på 0.3, og dermed et større spekter å velge i. Dette kan forklares som en årsak til hvorfor første år for inspeksjon blir redusert med en halvpart.

Resultatene for første inspeksjon viser ikke noe tydelig mønster, eller klart skille mellom inspeksjonsmetodene CVI og MPI. Kurvene med heltrukken linje svinger frem og tilbake over kurver med stiplet linje, og dette fremstår gjennomgående for alle utmattingslevetider. Det går likevel frem av Figur 5.14 og 5.18 for henholdsvis 22 og 60 års utmattingslevetid har et skille på høyest ett år mellom kurvene for CVI og MPI. For en utmattingslevetid på 39 år, vist i Figur 5.16, er kurvene noe mer spredt, og har sitt største skille på tre år. Her er global usikkerhet lik 0 og 0.15 med varierende årlig usikkerhet fra 0 til 0.15. Når global usikkerhet økes til 0.3, stabiliserer kurvene seg i større grad, og skillet mellom kurvene overstiger ikke ett år. Programmet «vet ikke» hvilken inspeksjonsmetode som er benyttet når første inspeksjon inntreffer, og dermed skal første inspeksjons år komme på samme år, teoretisk sett. Når dette ikke er tilfellet, er det naturlig å tenke på at disse resultatene er kjørt med 50 000 simulerte knutepunkt og 10% nøyaktighet, noe som kan påvirke resultatene etter hvor i nøyaktighetsintervallet verdien har blitt valgt. En annen faktor som også kan spille inn er «programmeringsstøy», som kan endre resultatene noe.

I motsetning til kurvene for første inspeksjon, viser gjennomsnittlige inspeksjon et avskilt mønster for inspeksjonsmetodene CVI og MPI. På bakgrunn av hvor effektive de forskjellige inspeksjonene er, gjenspeiles dette i disse resultatene, noe som nærmere ble forklart under kapittel 4.1.5: inspeksjoner. Her går det frem at MPI er betydelig mer tidkrevende og effektiv sett i forhold til CVI, og dette vises altså i denne sammenhengen. Hver fremstilling av



gjennomsnittlige inspeksjon viser at kurver for MPI befinner seg et godt stykke over kurver for CVI uavhengig av utmattingslevetid. Kurvene for MPI får med andre ord et høyere år for gjennomsnittlige inspeksjon enn CVI. Gjennomsnittlig inspeksjon med en utmattingslevetid på 22 år får et gjennomsnittlige avvik på 3,15 år mellom kurvene for MPI og CVI. Ved å øke utmattingslevetiden til 39 år øker avviket til 5,51 år, før den igjen stiger til et avvik på 8,78 år for 60 års levetid. Det går dermed frem at gjennomsnittlig avvik stiger mest når utmattingslevetiden økes fra 39 til 60 år, og har en økning på 3,27 år. Økningen fra 22 til 39 års utmattingslevetid kommer på 2,36 år. Dette vil altså si at overgangen fra 39 til 60 års utmattingslevetid øker med snaut ett år (0,91 år) mer enn overgang fra 22 til 39 års utmattingslevetid. Dette kan forklares med at overgangen fra 22 til 39 års utmattingslevetid er på 17 år, mens fra 39 til 60 års utmattingslevetid er overgangen på 21 år.

Det er videre sett på hva som skjer når initial sprekkvekst usikkerhet er 0, 0.1 og 0.2 for en utvalgte simuleringer med to forskjellige årlig og globale usikkerheter. Interessen bak denne undersøkelsen er å se om initial sprekkvekst usikkerhet «slår inn», altså får en overraskende endring som gir utslag i resultatene. Dette er vist i Figur 5.32. Kurvene for årlig og global usikkerhet lik henholdsvis 0.15 og 0.3 med varierende initial sprekkvekst usikkerhet ligger nokså tett. Det er med andre ord ingen ting som tyder på at varierende initial sprekkvekst usikkerhet har noe å si i disse simuleringene, hverken med og uten årlig og global usikkerhet, noe som også kommer klart frem i Figur 5.33 med inspeksjonsintervaller og relativt rette linjer. Det underbygges også ved at kurvene for årlig og global usikkerhet svinger frem og tilbake med varierende initial sprekkvekst usikkerhet vist i Figur 5.32. Det som er logisk å tenke seg er at kurven med høyeste usikkerhet får lavest gjennomsnittlige inspeksjonsverdi, men dette er ikke tilfellet i denne undersøkelsen. Det er heller motsatt. Kurven med årlig og global usikkerhet henholdsvis lik 0.15 og 0.3 med initial sprekkvekst usikkerhet på 0.2 har den høyeste gjennomsnittlige inspeksjonsverdien på 14,5 år. Ved å gå ned på initial sprekkvekst usikkerhet blir gjennomsnittlig inspeksjon 13,8 år, før den går opp til 14 år uten initial sprekkvekst usikkerhet. Kurven med årlig, global og initial sprekkvekst usikkerhet på henholdsvis 0.15, 0.3 og 0.2 har riktignok siste inspeksjon etter 88 år, og får sin neste inspeksjon rett over livsløpet på 100 år, i hvert fall når en ser på gjennomsnittlige inspeksjon. Av den grunn sier ikke dette gjennomsnitte helt den rette sannheten, men når livsløpet i denne oppgaven går fra 0 til 100 år blir altså resultatet seende slik ut. Det som derimot er realistisk er at kurvene får en høyere verdi av sannsynlighet for reparasjon jo lengre ut i livsløpet en kommer.

## 6.2 STUDIE 2

Det er nå sammenligningen av forskjellig utmattingslevetid med høyere antall simulerte knutepunkt vil bli diskutert. Her er sannsynligheten for akseptabel bruddfeil økt fra 0.01 til 0.001. Kurvene for CVI som inspeksjonsmetode er vist i Figur 5.34, og det er denne som først vil bli sett på. Ved å se på hvordan kurvene for hver utmattingslevetid begynner sin reise inn i livsløpet på 100 år, går det frem at kurvene med og uten usikkerhet har en nokså lik start. Kurvene følger hverandre godt. Etter hvert skjer det derimot en endring. For 22 års levetid skjer denne endringen etter ca. 22 år, derfra stiger kurven uten usikkerhet i større tempo enn kurven med usikkerhet. Det samme skjer når levetiden er 39 år, men her skjer endringen etter ca. 35 år. Den siste levetiden har også en slik endring, selv om kurvene har et noe større sprik i forkant, men endringen kommer for alvor etter drøyt 50 år. Det som derimot skiller kurvene for levetid på 22 år fra kurvene for levetid på 39 og 60 år, er «berg og dalbane»- formen som også tidligere er omtalt. Kurvene for levetid på 22 år begynner med dette etter drøyt 40 år med usikkerhet innebygd, mens kurven uten usikkerhet har sin start med dette etter ca. 65 år. Begge disse kurvene har en periode i forkant hvor sannsynligheten for reparasjon får en konstant verdi fra inspeksjon til inspeksjon, for deretter å stige videre med økende sannsynlighet for reparasjon. For kurven uten usikkerhet skjer dette flere ganger opp mot ca. 65 år, og her begynner altså «berg og dalbane»- formen. Dette med konstant sannsynlighet skjer også med en levetid på 39 år, med usikkerhet. Her kommer dette til syne når kurven passerer 80 års livsløp, noe som kan tyde på en kommende utflating av kurven, og dette underbygges også ved å se på tilhørende skaleringsplot.

I forhold til kurvene som oppstår for inspeksjonsmetode CVI, har kurvene for inspeksjonsmetode MPI en tydeligere utflating. Dette vises spesielt godt for kurver med en levetid på 22 år, og gjelder først og fremst for kurve med usikker, som flater helt ut fra 53 år av livsløpet. Utflatingen av kurve med samme levetid, uten usikkerhet, skjer ved 45 år og varer til 66 år. Men om en ser på neste inspeksjon, som kommer etter 73 år, så har denne en økt sannsynlighet for reparasjon, før kurven igjen flater ut de resterende inspeksjonene. Skaleringen av forskjellige levetider for MPI, har en veldig lik form, og ligger tett inntil opprinnelig verdi for 22 års levetid. Dette er først og fremst tilfellet for kurver med usikkerhet, men kurver uten usikkerhet har også en slik form, med noe større avvik til opprinnelig kurve.

## 6.3 STUDIE 3

Det er nå sannsynlighet for akseptabel bruddfeil lik 0.001 og 0.01 sammenlignes og diskuteres, med forskjellig utmattingslevetider og tilhørende usikkerheter for CVI og MPI.

På generelt grunnlag har kurver med  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 en lavere sannsynlighet for reparasjon enn kurver med  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01. Dette skyldes i hovedsak kvaliteten på simuleringen i form av lav  $P_{\text{facc}}$  og høyt antall simulerte knutepunkt. Og da menes det høyt i forhold til antall simulerte knutepunkt for  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01. Kvaliteten i simuleringen, som nettopp ble nevnt, skal ikke slippes riktig enda, for den kan forklares med et bremsesystem i en bil. Normalt sett kan en bil bremse på to forskjellige måter, enten ved å benytte et komplisert bremsesystem eller ved bruk av håndbrekk. I denne sammenhengen er kvaliteten på bremsesystemet i bilen betydelig bedre enn håndbrekket. Det er med andre ord stor forskjell i kvalitet. Denne forskjellen i kvalitet kan overføres til  $P_{\text{facc}}$  og antall simulerte knutepunkt, hvor god kvalitet har  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 og 400 000 simulerte knutepunkt, mens den mindre gode kvaliteten kan ha  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 og 50 000 simulerte knutepunkt. Alle utmattingslevetider med god kvalitet, altså  $P_{\text{facc}}$  lik 0.001 får et tidligere inspeksjonsbehov enn med mindre god kvalitet, derav  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01. En kan dermed slå fast at en komplisert og god simuleringskvalitet trenger oftere vedlikehold enn en mindre komplisert og mindre god simuleringskvalitet.

Både CVI og MPI synker i inspeksjonsintervall med økende kvalitet, men også økende utmattingslevetid. Bruk av CVI med utmattingslevetid på 22, 39 og 60 år synker med henholdsvis 2.63, 5.25 og 7.86 år. Dette gjelder for simulering med usikkerhet innebygd. Ser man på den samme simuleringen for MPI synker denne med 3.56, 7.5 og 11.5 år. Simuleringer med CVI og MPI uten innebygd usikkerhet får noenlunde samme nedgang. På bakgrunn av det kan en slå fast at MPI synker mer enn CVI når kvaliteten økes fra  $P_{\text{facc}}$  lik 0.01 til 0.001.

For de aller fleste utmattingslevetider av god kvalitet gjennomføres to inspeksjoner før utmattingslevetider med mindre god kvalitet får sin først. Det er riktignok to avvik for 22 og 60 års utmattingslevetid for MPI med usikkerhet og ett avvik for 60 års utmattingslevetid for MPI uten usikkerhet. En annen konsekvens av god simuleringskvalitet er at inspeksjonsintervallet synker.

Simuleringer med og uten usikkerhet følger logisk tankegang. Det vil altså si at simuleringer som ikke har innebygd usikkerhet får et seinere inspeksjonsbehov enn simuleringer med

usikkerhet innebygd, noe som gjelder for både CVI og MPI, og er vist i sammenligning av inspeksjonsintervaller for hver inspeksjonsmetode med og uten usikkerhet.

## 7 KONKLUSJON

---

Denne konklusjonen baserer seg på Studie 1, 2 og 3

I Studie 1 kan det konkluderes med at første inspeksjons år og gjennomsnittlig inspeksjon synker med økende usikkerhet for alle bestemte utmattingslevetider. Av brukte usikkerheter er det global usikkerhet som har mest å si for simuleringsresultatene.

Studie 2 kan konkludere med en økende sannsynlighet for funn etter hvert som tiden går, og dermed et større reparasjonsbehov.

Studie 3 kan konkludere med lavere sannsynlighet for reparasjon ved god simuleringskvalitet, og et større reparasjonsbehov. I tillegg synker inspeksjonsintervallet når  $P_{\text{facc}}$  endres fra 0.01 til 0.001.

## 8 FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

---

Forslag til videre arbeid er som følger:

- Innføre to-helning for SN- kurve, for så å studere forskjeller og likheter
- Inkludere flere usikkerheter, og studere effekten av disse

## REFERANSER

---

- Almar-Næss, Almar. (2019, 21. mars). utmatting - teknikk. I Store norske leksikon. Hentet 10. juni 2019 fra [https://snl.no/utmatting\\_-\\_teknikk](https://snl.no/utmatting_-_teknikk)
- Anderson, T. L. (2005). *Fracture mechanics : fundamentals and applications* (3. utg.). Boca Raton FL: Taylor & Francis.
- British Standards Institution. (2015). *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures* (3. utg.). London: BSI.
- Bury, K.V. (1975). *Statistical models in applied Science*. John Wiley & Sons.
- Dalane, J.I. (1993). *System reliability in design and maintenance of fixed offshore structures. Doktoravhandling*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Norge.
- DNV, DNVGL-RP-C210. (2015). *Probabilistic methods for planning of inspection for fatigue cracks in offshore*. Hentet fra: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RP/2015-11/DNVGL-RP-C210.pdf>
- DNV (1996). *Guideline for Offshore Structural Reliability Analysis. General part and Applications to Jackets*. Det Norske Veritas, Høvik, Norge
- Ersdal, G. (2017). *A preliminary version of a compendium on: Safety of structures*. Universitet i Stavanger.
- Ersdal, G., Sharp, J. V. & Stacey, A. (2019). *Ageing and life extension of offshore structures : the challenge of managing structural integrity*. Chichester: Wiley.
- Hans A. Bratfos, Universitet i Oslo, MEK4520. (2006). *Forelesningsnotater, Kapittel 10, Utmattings-sprekkvekst*. Hentet fra: <https://www.uio.no/studier/emner/matnat/math/nedlagte-emner/MEK4520/h06/undervisningsmateriale/kapittel%2010%20-%20utmattings-sprekkvekst.pdf>
- Krogstad, H.E. (2004). *Analysis of wave data from Valhall – Comparison of methods*. Sintef IKT, Trondheim, Norge.
- Lassen, T. & Recho, N. (2006). *Fatigue life analyses of welded structures*. London ;,Newport Beach, CA: ISTE.
- Lotsberg, I. (2016). *Fatigue design of marine structures*. New York NY: Cambridge University Press.
- Madsen, H.O. et al. (1987). *Probabilistic fatigue crack growth analysis of offshore structures, with reliability updating through inspection*. Paper presented at Marine Structure Reliability Symposium, Virginia.
- NORSOK (1998). *NORSOK N-004 Design of steel structures, Rev 1*, Norske Standard, Lysaker, Norge. ([www.standard.no/petroleum](http://www.standard.no/petroleum)).

Ordinat. (2018, 26. september). I Store norske leksikon. Hentet 14. juni 2019  
fra: <https://snl.no/ordinat>

Statoil (2000). “*Metoccean Design Criteria for Kvitebjørn*”, Statoil Report No C193.  
KVB-NFD-0001, Rev Date 2000-12-14, Statoil, Stavanger, Norge.



# VEDLEGG 1: MATLAB-FIL

---

```
<<
close all;
clear

tic
%% The major input settings
Na=50000; %Number of joints simulated
InspectionMethod=1; %0=CVI, 1=EC, MPI and ACFM ...
PfailAcc=0.01; %Acceptance criteria before inspection is required
CoV=0.15; %Coefficient of variation for the load uncertainty, changed
yearly
GCoV=0.3; %General coefficient of variation that are kept for the full
simulation
a0CoV=0.1; %CoV on the initial crack size
Ny=100; %Number of years simulated

Nhps=3; %Number of hours per sea-state
NS=round(365*24/Nhps)*Ny; %Number of sea-states in simulated periods
Nspy=round(365*24/Nhps); %Number of sea-states per year

%% Text for saving figures
Ftxt1 = ['PoF' num2str(PfailAcc)];
Ftxt2 = ['CoV' num2str(CoV)];
Ftxt3 = ['GCoV' num2str(GCoV)];
Ftxt4 = ['a0CoV' num2str(a0CoV)];
if InspectionMethod==0
    Ftxt5 = ['CVI'];
else
    Ftxt5 = ['MPI'];
end
Ftxt7 = ['.tif'];

%% Joints and initial crack size
t0=25; % Thickness of steel in joints
mean_a0=0.11; %Mean initial crack size
lamda=1/mean_a0; %Exponential function factor

%% Fracture mechanics data
ma=3; %Slope of crack growth
meanln_Aa=29.1; % Calibrated to SN D-curve
sdln_Aa=0.64; % Calibrated to SN D-curve
Aa=zeros(1,Na);
for i=1:Na
    lnAa=normrnd(meanln_Aa,sdln_Aa);
    Aa(i)=exp(-lnAa);
end

%% Inspection data
if InspectionMethod==0
    %PoD curves for CVI DNVGL-RP-C210, table 11-2
    x0=83.03*1/2*0.15;
    b=1.079;
end

if InspectionMethod==1
    %PoD curves for EC, MPI and ACFM below water table 11-1 DNVGL-RP-C210
    x0=1.16;
    b=0.90;
```

```

end

%% Wave environment data and wave load data
Hc=2.895; %Weibull parameters for long term sea-state distribution
gamma=1.499;
H0=0.198;
Hs=zeros(1,NS);
Tz=zeros(1,NS);
for j=1:NS
    uniHs=rand(1);
    Hs(j)=(-log(1-uniHs))^(1/gamma)*(Hc-H0)+H0;
    if Hs(j)>=3
        Tz(j)=3.3*(Hs(j))^0.5;
    else
        Tz(j)=5.72;
    end
end

figure;
wblplot(Hs);
title('Sea-states');
xlabel('Hs (Significant wave height)');

Ftxt6 = ['Fig1'];
str = [Ftxt1,Ftxt2,Ftxt3,Ftxt4,Ftxt5,Ftxt6,Ftxt7];
saveas(gcf,str,'tiffn')

%% Equivalent stress range
C2=1.1;
C1=4.6;
dSigma_eq=C1/(1.702-0.138*ma)*(Hs).^ (C2-0.03);

figure
wblplot(dSigma_eq);
title('Equivalent Stresses');
xlabel('Sigma_equivalent');

Ftxt6 = ['Fig2'];
str = [Ftxt1,Ftxt2,Ftxt3,Ftxt4,Ftxt5,Ftxt6,Ftxt7];
saveas(gcf,str,'tiffn')

%% Initial crack size
for na = 1:Na
    unia0=rand;
    a0_alpha(na) = normrnd(1,a0CoV);
    a0(na)=1/lamda*(-log(1-unia0))*a0_alpha(na);
end

na=[1:1:Na];
figure;
histogram(a0);
set(gca, 'YScale', 'log');
title('Initial crack size')
ylabel('na (# of joints)');
xlabel('a0 (Crack size)');

Ftxt6 = ['Fig3'];
str = [Ftxt1,Ftxt2,Ftxt3,Ftxt4,Ftxt5,Ftxt6,Ftxt7];
saveas(gcf,str,'tiffn')

```

```

%% Fracture mechanics calculation
t=t0; %Thickness of steel joint
Nfail=zeros(1,Na); %Array of zeroes for later to store into
TimeStep=NS/Ny; %Number of sea-states per simulations/number of simulations
aa=zeros(Na,TimeStep+1); % Creates the right size of the matrix for the
crack size
aa(:,1)=a0; % Initial crack size

insp_2=0;
alpha=zeros(1,Na); %Preallocating matrices to slightly speed up computation
da=zeros(1,Na);
aaa=zeros(Na,Ny);
Pfail=zeros(1,Ny);
POD=zeros(1,Na);
oppdaget=zeros(Na,Ny);

for na = 1:Na
    G_alpha(na) = normrnd(1,GCoV);
end

for ny=1:Ny
    for na = 1:Na
        alpha(na) = normrnd(1,CoV)*G_alpha(na);
    end
    for ns=1:Nspy
        dSigma_eqn=dSigma_eq(ns+(ny-1)*Nspy);
        Tzn=Tz(ns+(ny-1)*Nspy);
        Nw=round(Nhps*60*60/Tz(ns));
        for na=1:Na % For each simulated crack
            if aa(na,ns)<=t && aa(na,ns)>0 % If Crack size is less than
thickness
da(na)=Aa(na)*(alpha(na)*dSigma_eq(ns)*SI(aa(na,ns),t)*sqrt(pi*aa(na,ns)))^
ma;
                else
                    da(na)=0;
                end
                aa(na,ns+1)=aa(na,ns)+Nw*da(na); %aa(Joints,TimeStep)
            end
        end
        for na=1:Na
            aaa(na,ny)=aa(na,Nspy+1); %Yearly crack size per joint
            aa(na,1)=aaa(na,ny); %Resetting start crack for next year
(Overwriting new a0)
            if aa(na,ns) >=t && Nfail(na)==0
                Nfail(na)=ny;
            end
        end
        Fail=0;
        for nna=1:Na
            if aa(nna,ny)>=t
                Fail=Fail+1;
            end
        end
        Pfail(ny)=(Fail/Na); %Before with %:(Pfail(ny)=(Fail/Na)*100;)

        if Pfail(1,ny)>=PfailAcc %ny==60 || ny==80 %Inspection at 60 and 80
years
            insp_2=insp_2+1;
            InspectionYear(1,insp_2)=ny;
            ii=0;

```

```

for na=1:Na
    POD(na)=1-1/(1+(aaa(na,ny)/x0)^b); % Probability of detection
    unipod=rand();

    if POD(na)<unipod
        ii = ii+1;
        anoid(ii)=aa(na,ny);
    else
        oppdaget(na,ny)=1;
        aaa(na,ny)=0; % Zero the crack size for identified cracks
    end

end

Nanoid=length(anoid);

for na=1:Na
    if aaa(na,ny) == 0
        jj=randi([1 Nanoid]);
        if anoid(jj)>=0.11
            aaa(na,ny)=anoid(jj);
        else
            unia0=rand;
            aaa(na,ny)=1/lamda*(-log(1-unia0));
        end
    end
    aa(na,1)=aaa(na,ny); %Resetting start crack for next year
(Overwriting new a0)
end
end

%-----INSPECTION END-----
end

mean_diff_IY=mean(diff(InspectionYear)); % Mean number of years between
inspections

Opd=sum(oppdaget)/Na;
figure;
% histogram(Opd)
plot(Opd,'x');
title('Likelihood of repair required');
ylabel('Likelihood');
xlabel('Year');

Ftxt6 = ['Fig4'];
str = [Ftxt1,Ftxt2,Ftxt3,Ftxt4,Ftxt5,Ftxt6,Ftxt7];
saveas(gcf,str,'tiffn')

nsn=[1:1:Ny];
nan=[1:1:Na];

figure;
plot(nsn,aaa(1:20,nsn));%[1:min(10,Na)]
xlim([0,Ny]);
title('Growth of crack size throughout the years');
ylabel('Crack size');
xlabel('Year');

Ftxt6 = ['Fig5'];
str = [Ftxt1,Ftxt2,Ftxt3,Ftxt4,Ftxt5,Ftxt6,Ftxt7];
saveas(gcf,str,'tiffn')

```

```

figure;
plot(nan,Nfail, '*');
title('Year of failure for each joint');
ylabel('Year of failure');
xlabel('# of joint');

Ftxt6 = ['Fig6'];
str = [Ftxt1,Ftxt2,Ftxt3,Ftxt4,Ftxt5,Ftxt6,Ftxt7];
saveas(gcf,str,'tiffn')

figure;
plot(nsn,Pfail);
title('Probability of failure');
% txt1 = ['meanln(A)= ' num2str(meanln_Aa)];
% text(40,3*10^-4,txt1)
% txt2 = ['sdln(A)= ' num2str(sdln_Aa)];
% text(40,2*10^-4,txt2)
% txt3 = ['max NYinit= ' num2str(maxNYinit)];
% text(40,1.4*10^-4,txt3)
% txt4 = ['deltaK0= ' num2str(K0)];
% text(40,9*10^-5,txt4)
% txt5 = ['C1= ' num2str(C1)];
% text(40,6*10^-5,txt5)
txtOpd = ['meanInspInt= ' num2str(mean_diff_IY)];
txtplace=PfailAcc*0.1;
text(40,txtplace,txtOpd)
ylabel('Probability of failure');
set(gca, 'YScale', 'log');
xlabel('# of year');

Ftxt6 = ['Fig7'];
str = [Ftxt1,Ftxt2,Ftxt3,Ftxt4,Ftxt5,Ftxt6,Ftxt7];
saveas(gcf,str,'tiffn')

figure;
edges = [1 2:1:99 100];
h = histogram(Nfail,edges);
title('Year of failure');
ylabel('# of failures');
xlabel('# of year');
xlim([0 100]);

Ftxt6 = ['Fig8'];
str = [Ftxt1,Ftxt2,Ftxt3,Ftxt4,Ftxt5,Ftxt6,Ftxt7];
saveas(gcf,str,'tiffn')

map = brewermap(3,'Set1');
for upi=1:length(InspectionYear)
    chk1=InspectionYear(1,upi)-1;
    chk2=InspectionYear(1,upi);
    for na=1:Na
        aaa1(na)=aaa(na,chk1);
        aaa2(na)=aaa(na,chk2);
    end
    figure
    edges = [0 0.5:0.5:24 25];

    histogram(aaa1,edges,'facecolor',map(1,:), 'facealpha',.5, 'edgecolor','none'
);
    hold on

```

```

histogram(aaa2,edges,'facecolor',map(2,:), 'facealpha',.5,'edgecolor','none'
);
    set(gca, 'YScale', 'log');
    txtins = ['Distribution of cracks before and after updating '
num2str(upi)];
    title(txtins);
    ylabel('# of occurrences');
    xlabel('size of crack in mm');
    Ftxt6 = ['Fig' num2str(upi+10)];
    str = [Ftxt1,Ftxt2,Ftxt3,Ftxt4,Ftxt5,Ftxt6,Ftxt7];
    saveas(gcf,str,'tiffn')
end

toc
«

```

## VEDLEGG 2: MATLAB-FIL (SN\_FM\_KALIBRERING)

---

```

«

close all;
clear

tic
%%
CoV=0.0; %Coefficient of variation for the load uncertainty
Ny=100; %Number of years simulated
Nhps=3; %Number of hours per sea-state (Should be set to 3, not 6 as it was
before)
NS=round(365*24/Nhps)*Ny; %Number of sea-states in simulated periods
Nspy=round(365*24/Nhps); %Number of sea-states per year

%% Joints and initial crack size
Na=50000; %Number of joints simulated
t0=25; % Thickness of steel in joints
mean_a0=0.11; %Mean initial crack size
lamda=1/mean_a0; %Exponential function factor

%% SN data probabilistic
meanSNloga1=12.264; %Scale parameter SN parameter 1st slope
sdSNloga1=0.25;
meanSNa1=10^meanSNloga1;
SNm1=3; %Shape parameter SN parameter 2nd slope
SNloga1=zeros(1,Na);
SNa1=zeros(1,Na);
for i=1:Na
    SNloga1(i)=normrnd(meanSNloga1,sdSNloga1);
    SNa1(i)=10^SNloga1(i);
end
figure
histogram(SNloga1);
xlabel('logA1 (SN parameter slope 1)');
ylabel('N (# of occurences)');

%% Fracture mechanics data
ma=3; %Slope of crack growth
meanln_Aa=29.1; % BS7910:2013 8.2.3.5 Simplified fatigue crack growth in
marine environments

```

```

sdln_Aa=0.64;
lnAa=zeros(1,Na);
Aa=zeros(1,Na);
for i=1:Na
    lnAa(i)=normrnd(meanln_Aa,sdln_Aa);
    Aa(i)=exp(-lnAa(i));
end

figure
histogram(lnAa);
xlabel('lnAa (Fracture mechanics parameter)');
ylabel('N (# of occurrences)');

% Initiation period
meanNYinit=0;
sdNYinit=0.001;
for i=1:Na
    NYinit(i)=normrnd(meanNYinit,sdNYinit);
end

figure
histogram(NYinit)
xlabel('initiation period')
ylabel('N (# of occurrences)');

%% Inspection data
x0=83.03*1/2*0.15; %POD values (DNVGL-RP-C210, table 11-2)
b=1.079;          %POD values (DNVGL-RP-C210, table 11-2)

%% Wave environment data and wave load data
Hc=2.895; %Weibull parameters for long term sea-state distribution
gamma=1.499;
H0=0.198;
Hs=zeros(1,NS);
Tz=zeros(1,NS);
for j=1:NS
    uniHs=rand(1);
    Hs(j)=(-log(1-uniHs))^(1/gamma)*(Hc-H0)+H0;
    if Hs(j)>=3
        Tz(j)=3.3*(Hs(j))^0.5;
    else
        Tz(j)=5.72;
    end
end
end
figure;
wblplot(Hs);
%j=[1:NS];
%plot(j,Hs);
%xlim(size(Hs));
title('Sea-states');
xlabel('Hs (Significant wave height)');

%% Equivalent stress range
C2=1.1;
C1=5.6; %nthroot(0.42,3)*250/28^C2;
dSigma_eq=C1/(1.702-0.138*ma)*(Hs).^ (C2-0.03);

figure
wblplot(dSigma_eq);
title('Equivalent Stresses');
xlabel('Sigma_equivalent');

```

```

%% Initial crack size
unia0=rand(1,Na);
a0=1/lamda*(-log(1-unia0));

na=[1:1:Na];
figure;
histogram(a0);
title('Initial crack size')
xlabel('a0 (Crack size)');
ylabel('n (# of occurences)');

%% Fracture mechanics calculation
t=t0; %Thickness of steel joint
Nfail=zeros(1,Na); %Array of zeroes for later to store into
NSNfail=zeros(1,Na);
TimeStep=NS/Ny; %Number of sea-states per simulations/number of simulations
aa=zeros(Na,TimeStep+1); % Creates the right size of the matrix for the
crack size
aa(:,1)=a0; % Initial crack size

alpha=zeros(1,Na); %Preallocating matrices to slightly speed up computation
da=zeros(1,Na);
aaa=zeros(Na,Ny);
Pfail=zeros(1,Ny);
POD=zeros(1,Na);
oppdaget=zeros(Na,Ny);
SNdamage=zeros(Na,Nspy);
SNDam=zeros(Na,Ny);
for ny=1:Ny
    for na = 1:Na
        alpha(na) = normrnd(1,Cov);
    end
    for ns=1:Nspy
        dSigma_eqn=dSigma_eq(ns+(ny-1)*Nspy);
        Tzn=Tz(ns+(ny-1)*Nspy);
        Nw=round(Nhps*60*60/Tz(ns));
        NdSigma_eqn(ns+(ny-1)*Nspy)=Nw;
        for na=1:Na % For each simulated crack
            if aa(na,ns)<=t && ny>=NYinit(na)% If Crack size is less than
thickness
da(na)=Aa(na)*(alpha(na)*dSigma_eqn*SI(aa(na,ns),t)*sqrt(pi*aa(na,ns)))^ma;
                else
                    da(na)=0;
                end
                aa(na,ns+1)=aa(na,ns)+Nw*da(na); %aa(Joints,TimeStep)
                logNdSigma=SNloga1(na)-SNm1*log10(alpha(na)*dSigma_eqn);
                NdSigma=10^logNdSigma;
                SNDamage(na,ns)=Nw/NdSigma;
            end
        end
    end

    for na=1:Na
        aaa(na,ny)=aa(na,Nspy+1); %Yearly crack size per joint
        aa(na,1)=aaa(na,ny); %Resetting start crack for next year
(Overwriting new a0)
        if aa(na,ns) >=t && Nfail(na)==0
            Nfail(na)=ny;
        end
    end
end
for nspy=1:Nspy

```



```

        SNdam(na,ny)=SNdam(na,ny)+SNdamage(na,nspy);
    end
    if SNdam(na,ny)>=1.0 && NSNfail(na)==0
        NSNfail(na)=ny;
    end
end

Fail=0;
SNFail=0;
for nna=1:Na
    if aa(nna,ny)>=t
        Fail=Fail+1;
    end
    if SNdam(nna,ny)>=1.0
        SNFail=SNFail+1;
    end
end

Pfail(ny)=Fail/Na;           %Before with %:(Pfail(ny)=(Fail/Na)*100;)
PSNfail(ny)=SNFail/Na;

%     SNdamage=zeros(Na,Nspy);
for na=1:Na
    SNdam(na,ny+1)=SNdam(na,ny);
end
end
%% Figures

nsn=[1:1:Ny];
nan=[1:1:Na];

figure;
plot(nsn,aaa(1:20,nsn));%[1:min(10,Na)]
xlim([0,Ny]);
title('Growth of crack size throughout the years');
ylabel('Crack size');
xlabel('Year');

figure;
plot(nan,Nfail,'*');
title('Year of failure for each joint');
ylabel('Year of failure');
xlabel('# of joint');

figure;
plot(nsn,Pfail,nsn,PSNfail);
title('Probability of failure');
ylabel('Probability of failure');
set(gca, 'YScale', 'log');
xlabel('# of year');

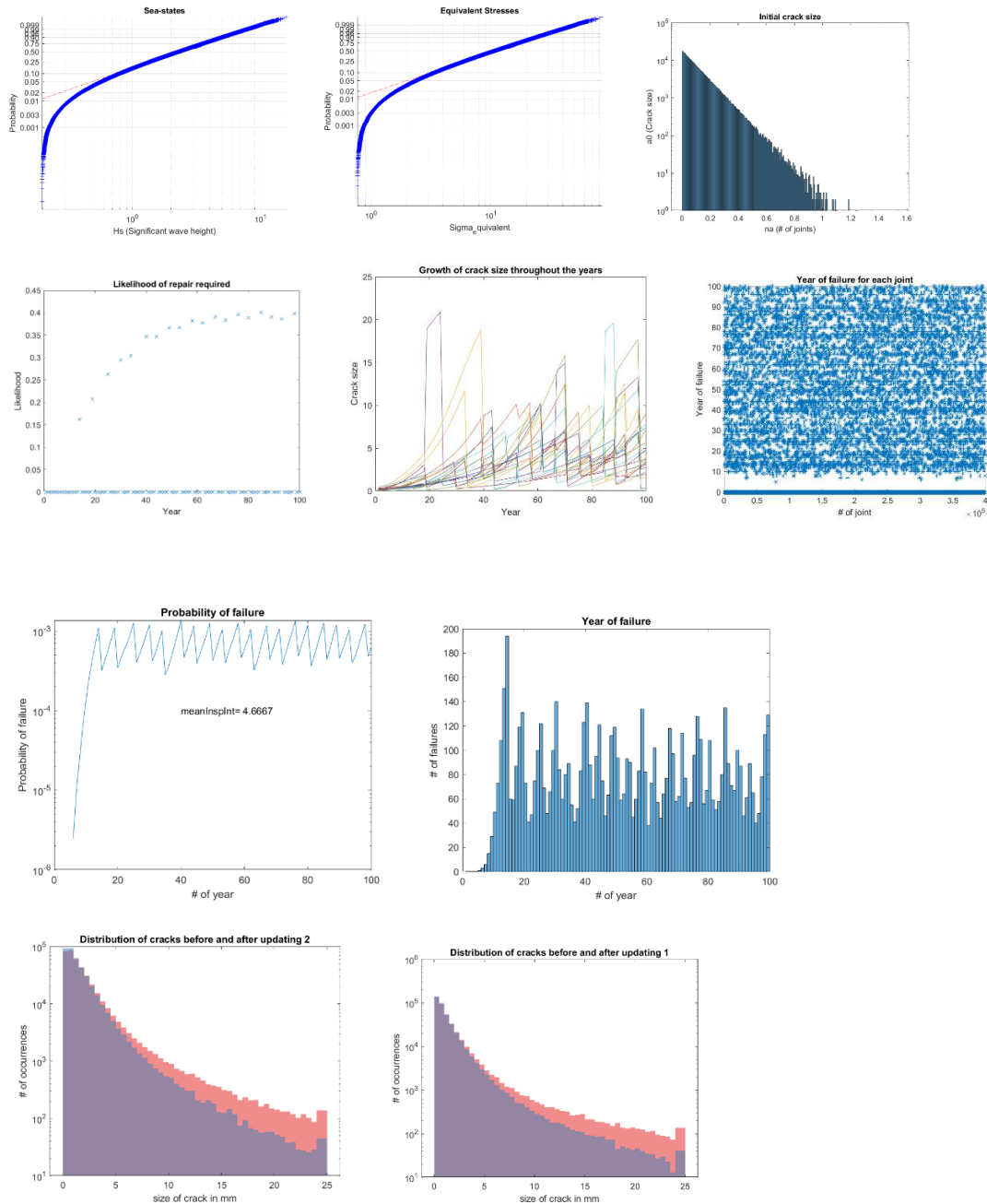
figure;
edges = [1 2:1:99 100];
h = histogram(Nfail,edges);
title('Year of failure');
ylabel('# of failures');
xlabel('# of year');
xlim([0 100]);

toc
«

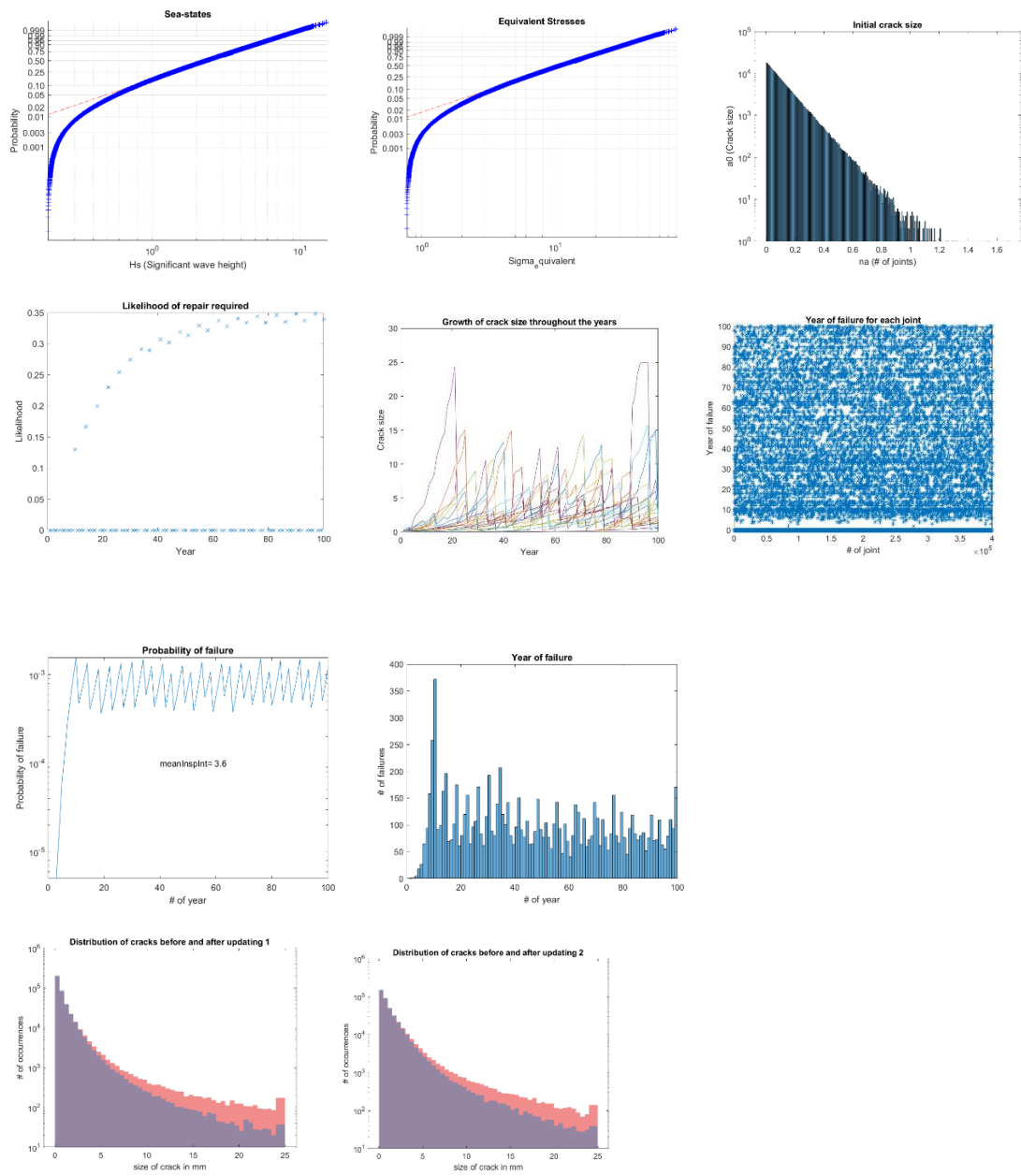
```

# VEDLEGG 3: PRODUSERTE SIMULERINGSFIGURER

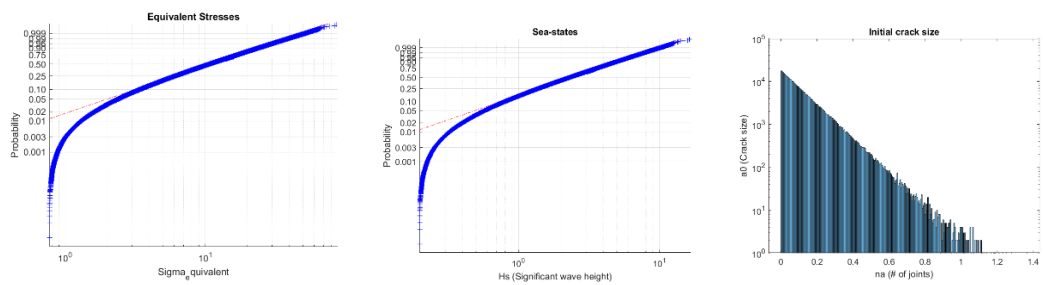
400k\_CVI\_22 år\_0.001: YCoV = 0, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

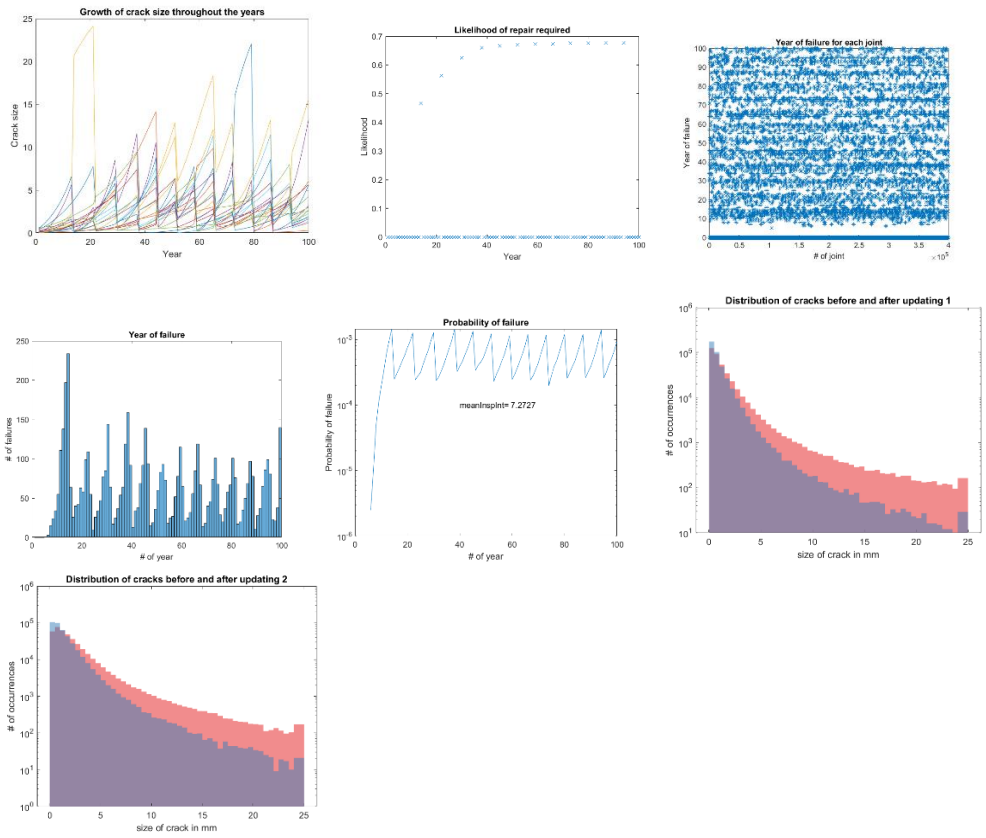


400k\_CVI\_22år\_0.001\_YCoV = 0.15, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0.1:

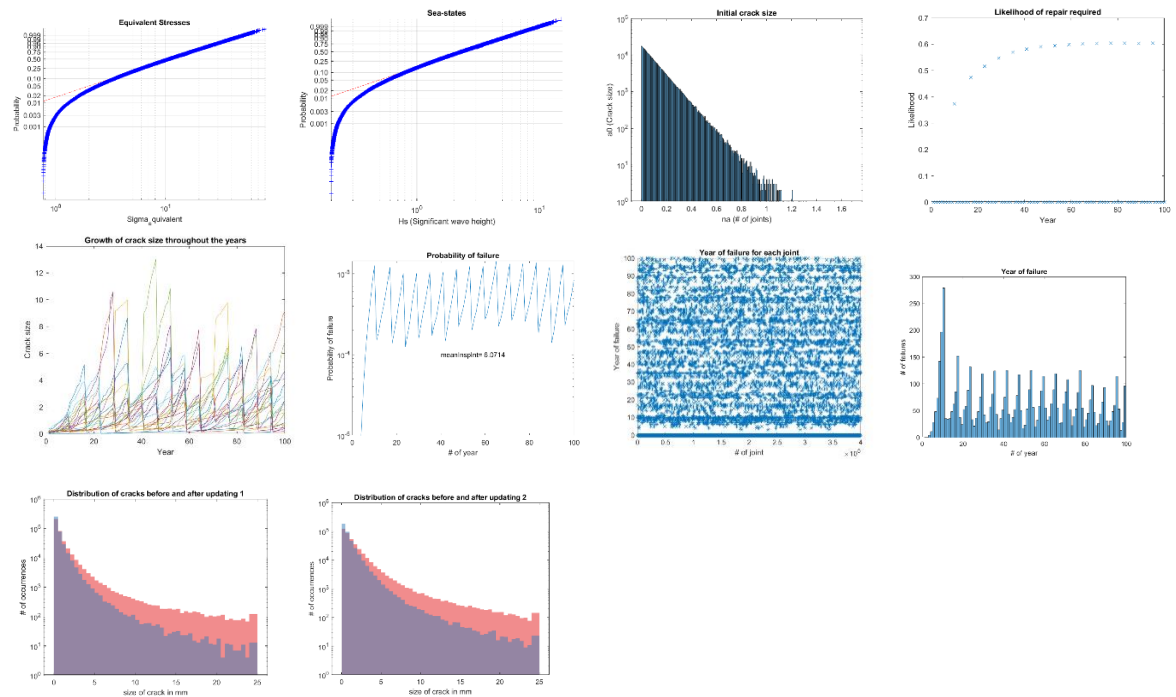


400k\_MPI\_22år\_0.001\_YCoV = 0, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

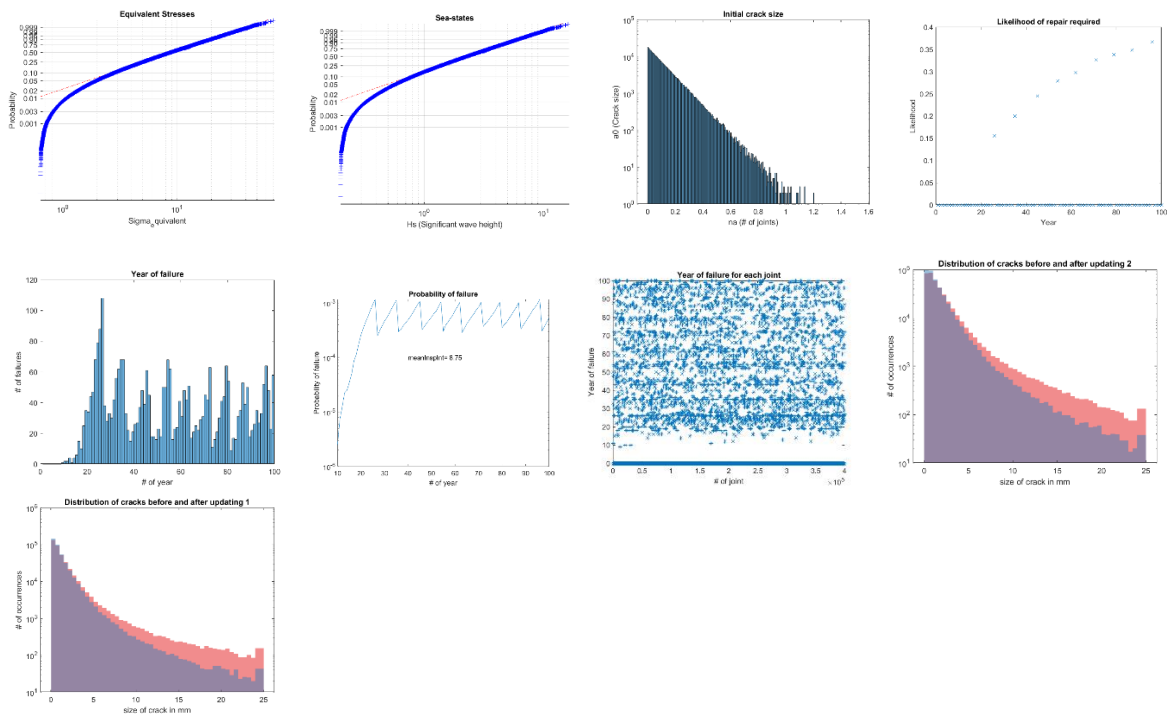




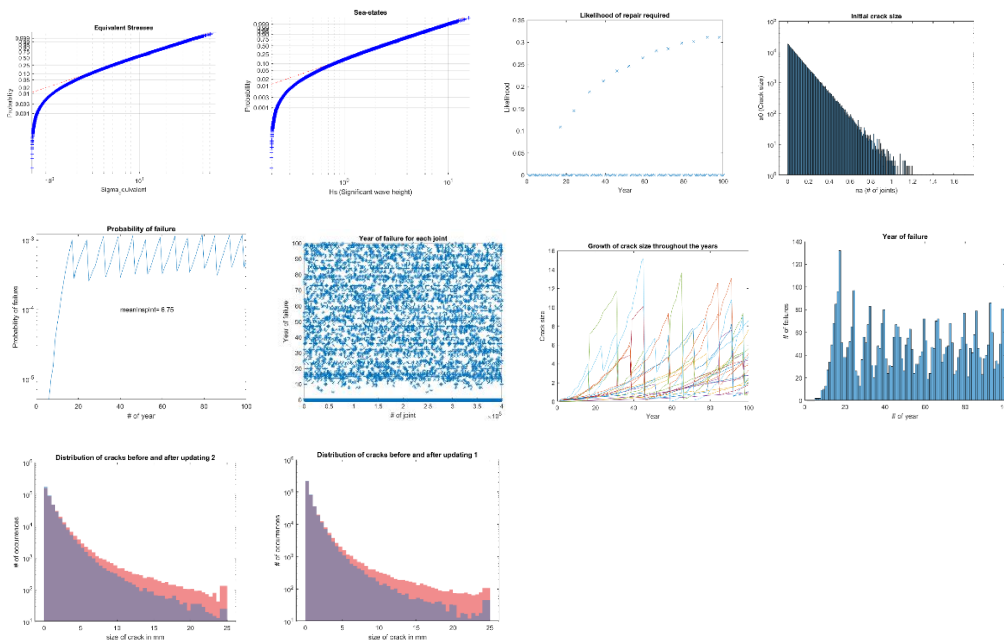
400k\_MPI\_22år\_0.001\_ YCoV = 0.15, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0.1:



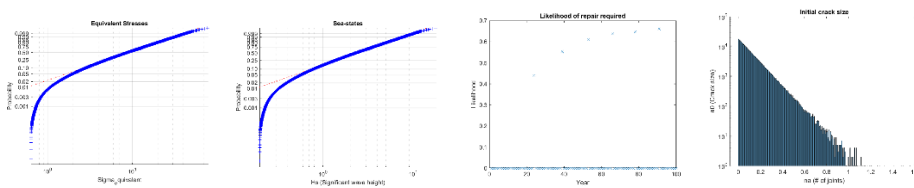
400k\_CVI\_39år\_0.001\_YCoV = 0, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

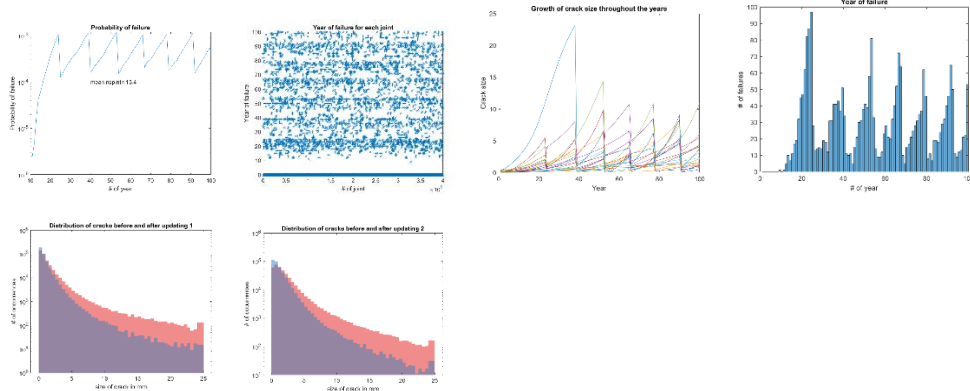


400k\_CVI\_39år\_0.001\_YCoV = 0.15, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0.1:

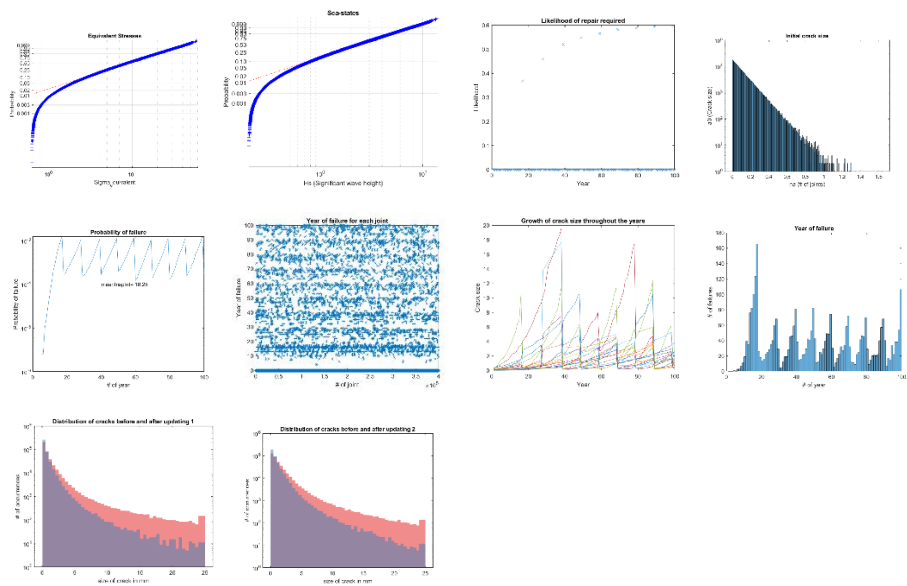


400k\_MPI\_39år\_0.001\_YCoV = 0, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

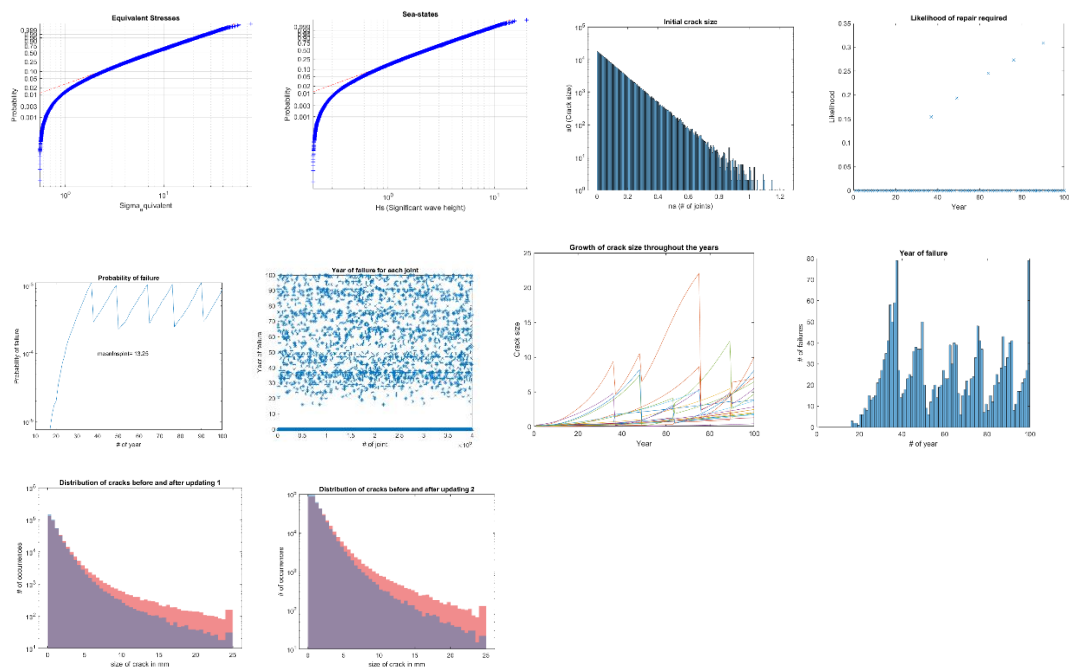




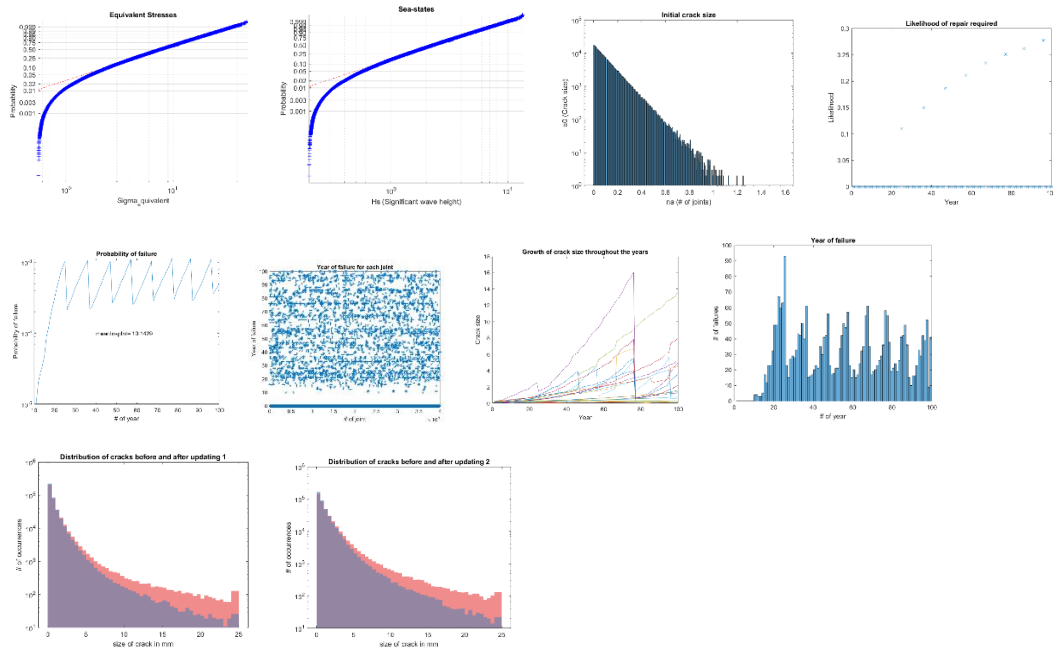
400k\_MPI\_39r\_0.001\_YCoV = 0.15, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0.1:



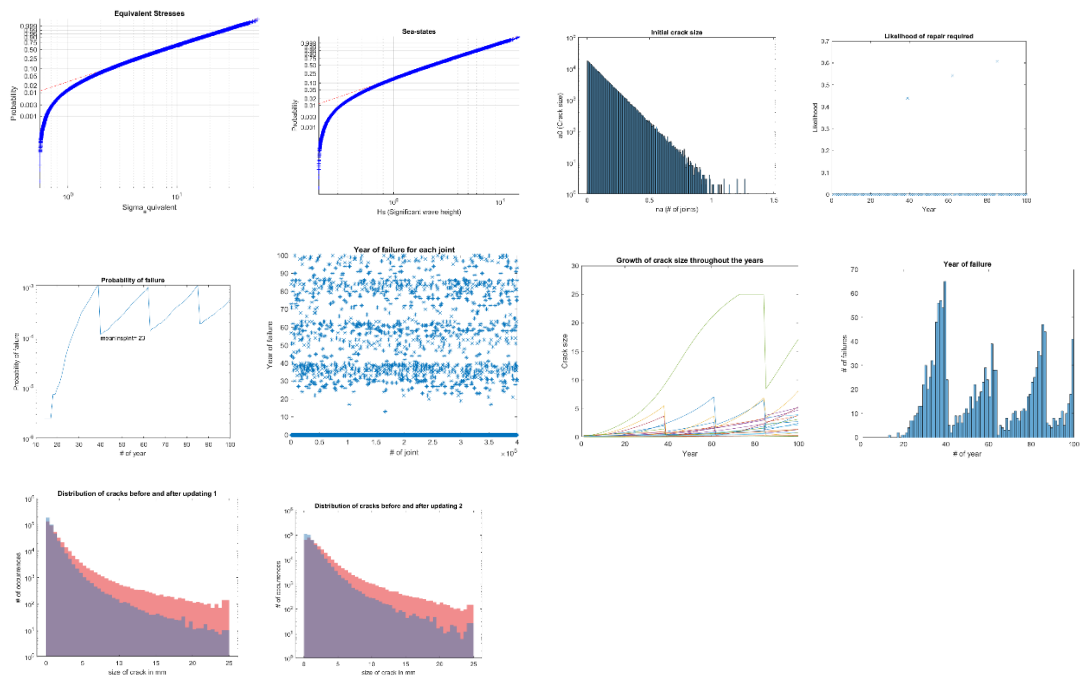
400k\_CVI\_60r\_0.001\_YCoV = 0, GCoV = 0 og a0CoV = 0:



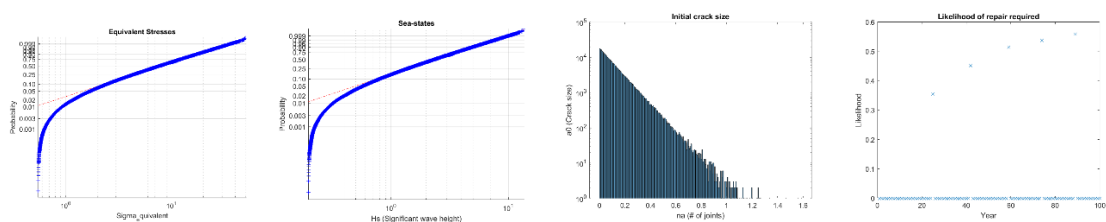
400k\_CVI\_60år\_0.001\_ YCoV = 0.15, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0.1:

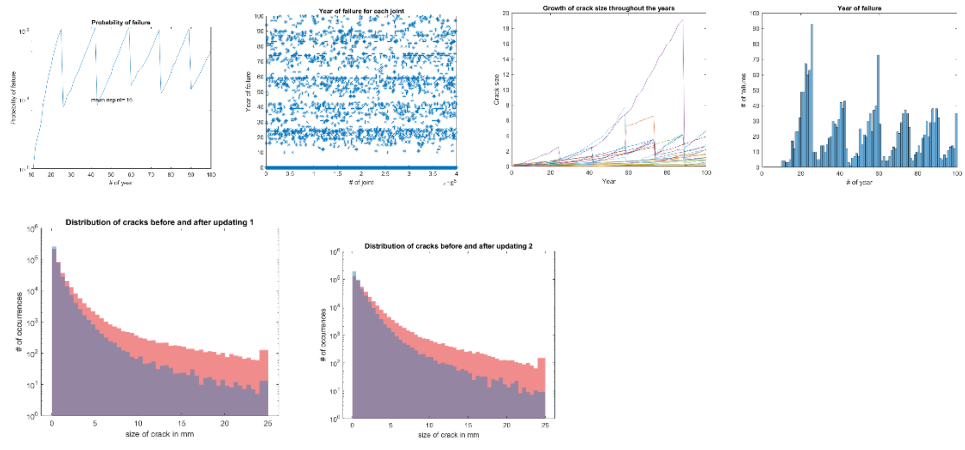


400k\_MPI\_60år\_0.001\_ YCoV = 0, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

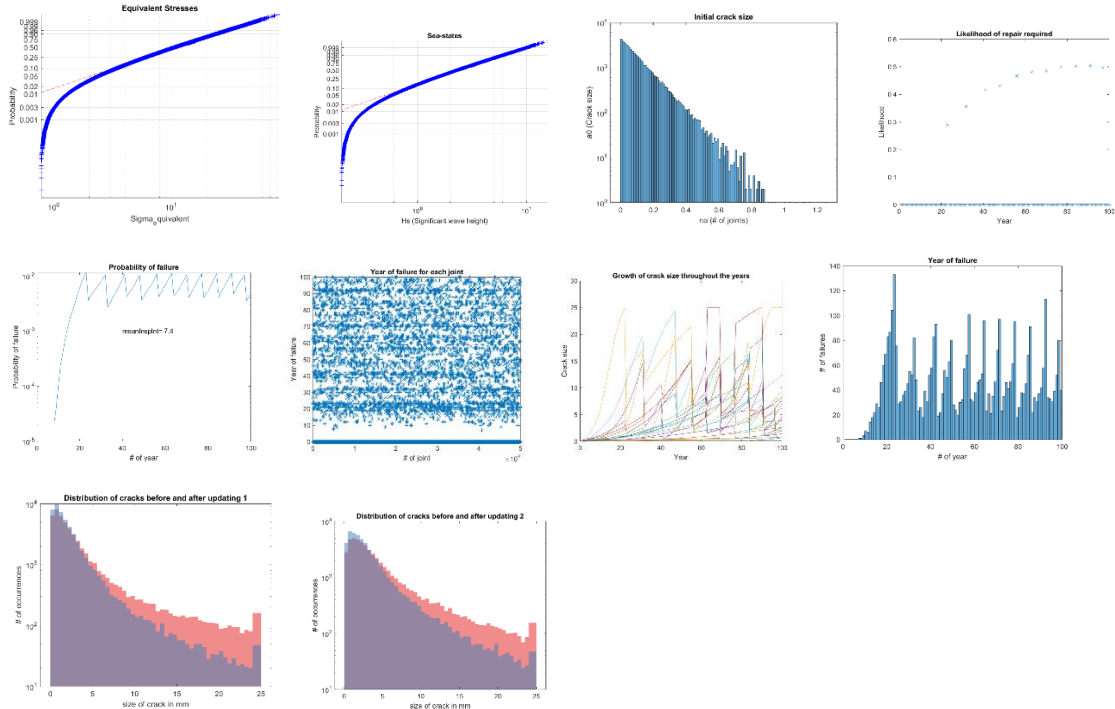


400k\_MPI\_60år\_0.001\_ YCoV = 0.15, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0.1:

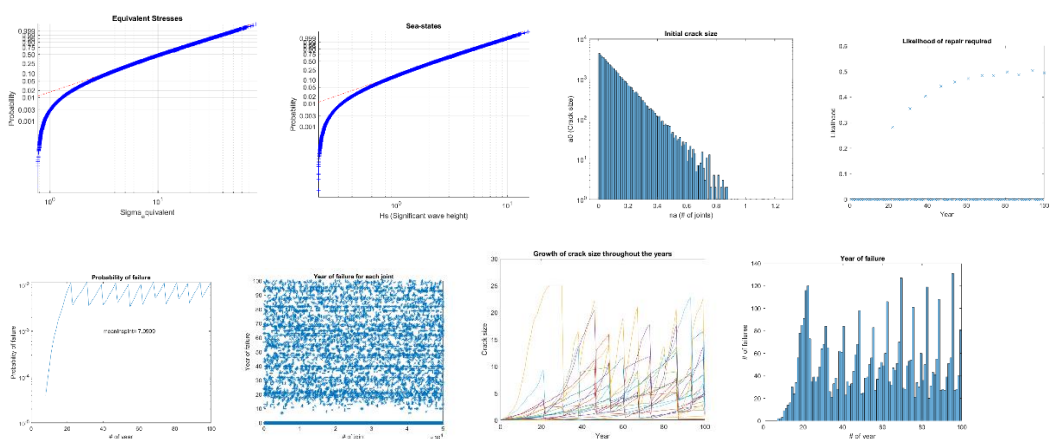




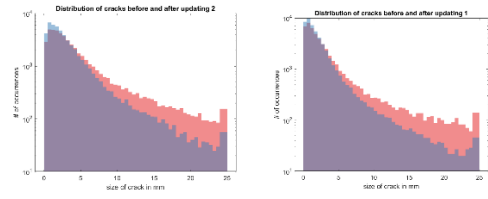
50k\_CVI\_22r\_0.01\_YCoV = 0, GCoV =0 og a0CoV =0:



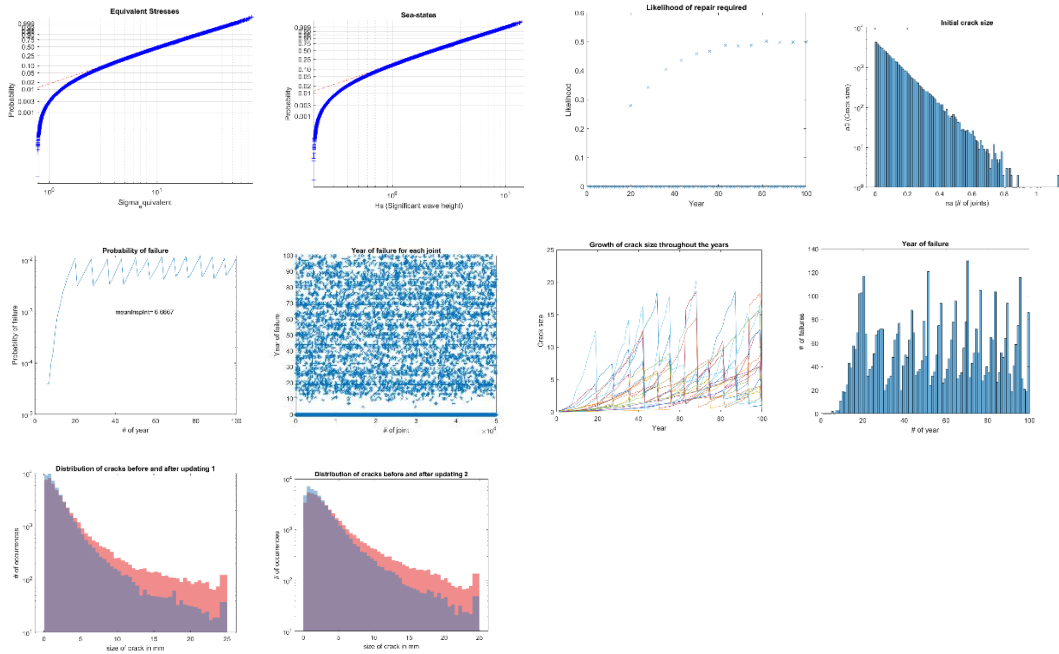
50k\_CVI\_22r\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV =0 og a0CoV =0:



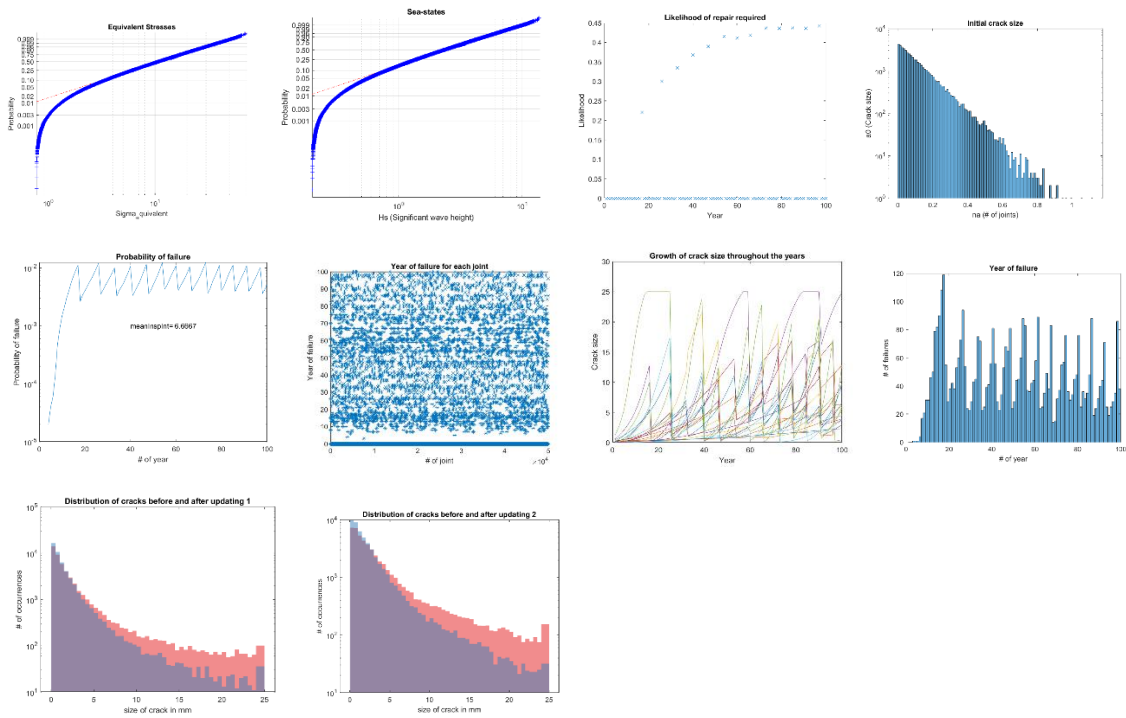




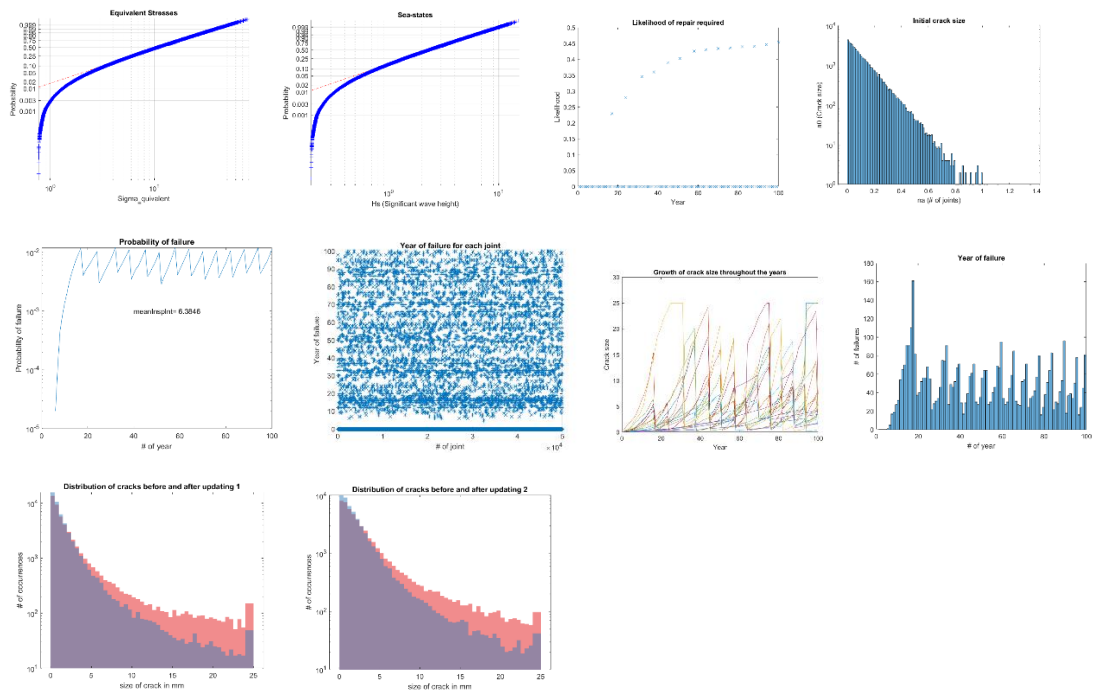
50k\_CVI\_22år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV=0 og a0CoV=0:



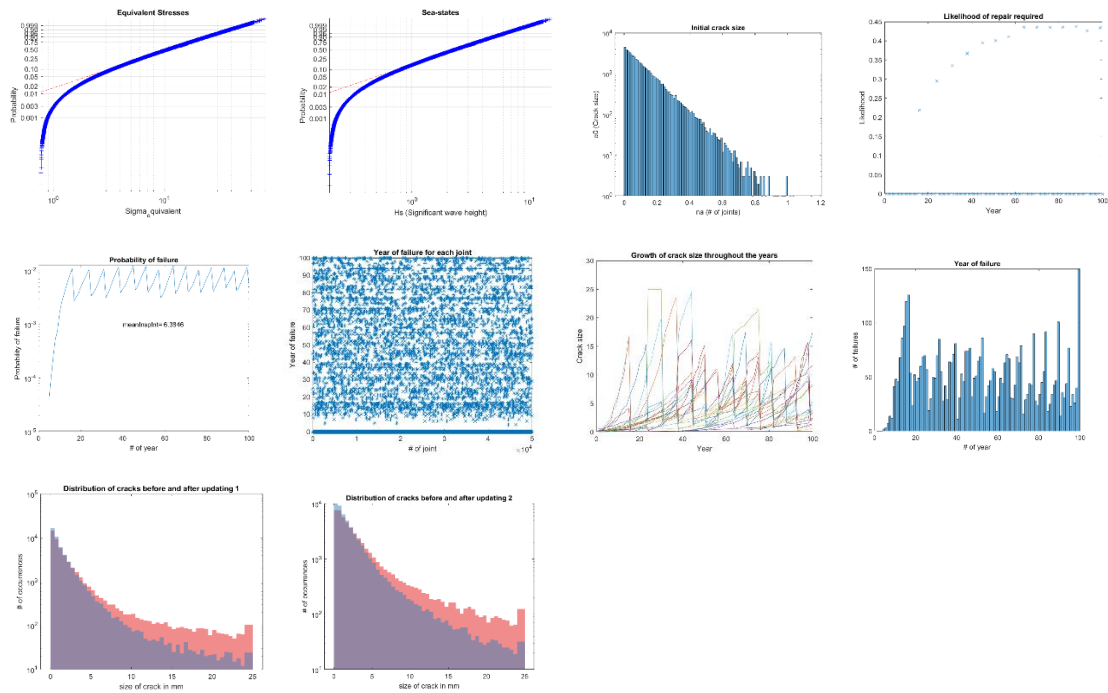
50k\_CVI\_22år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:



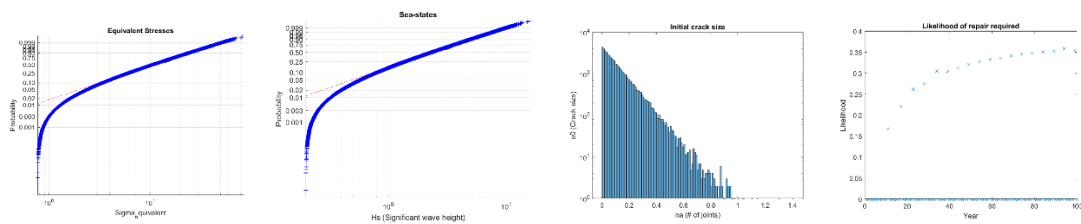
50k\_CVI\_22år\_0.01\_ YCoV = 0.1, GCoV=0.15 og a0CoV =0:

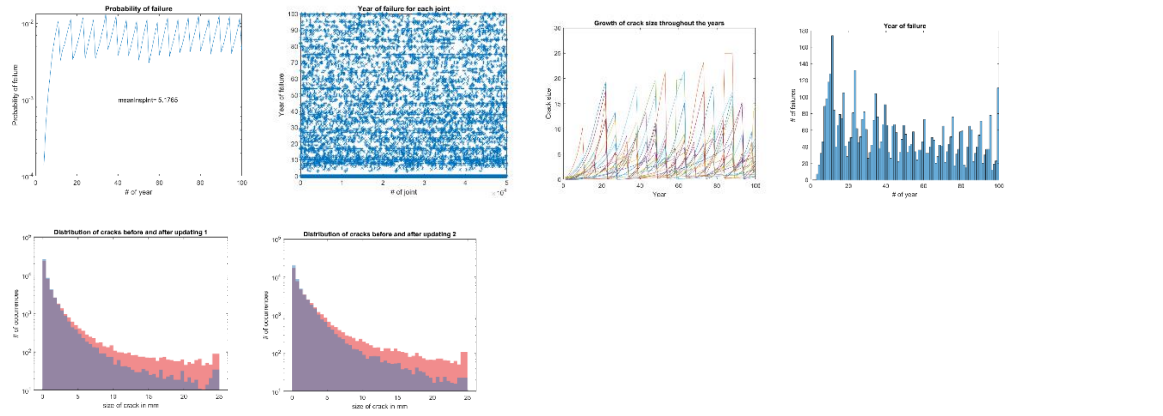


50k\_CVI\_22år\_0.01\_ YCoV = 0.15, GCoV =0.15 og a0CoV =0:

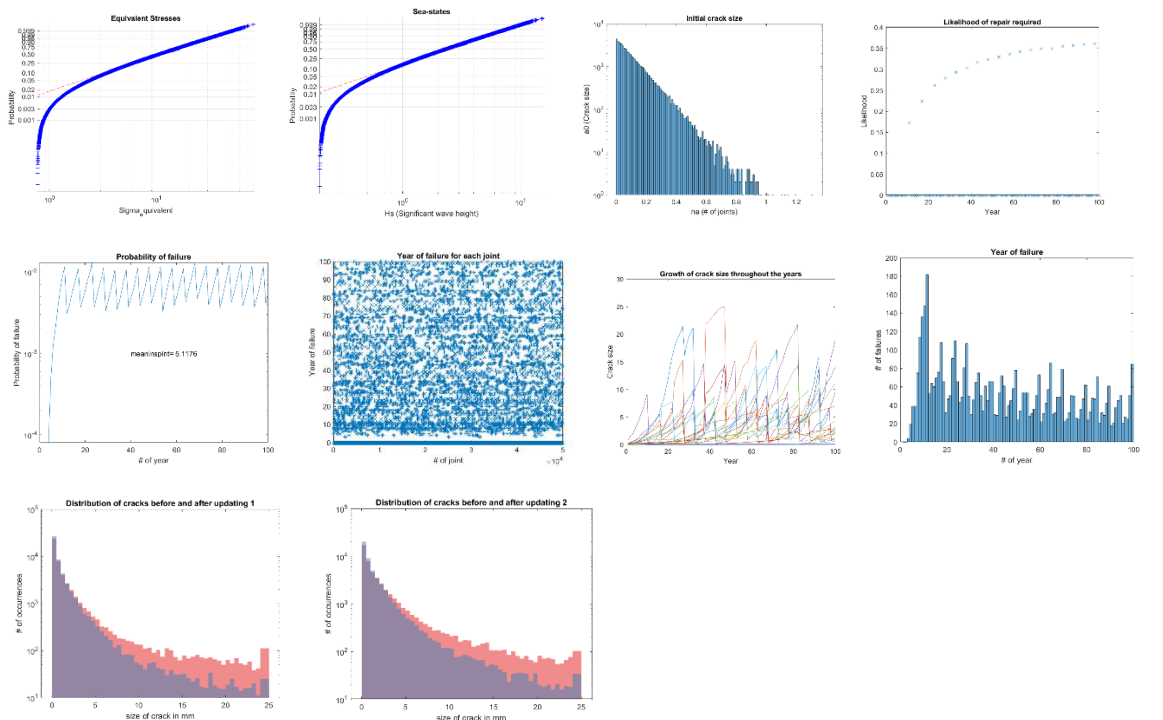


50k\_CVI\_22år\_0.01\_ YCoV = 0, GCoV =0.3 og a0CoV =0:

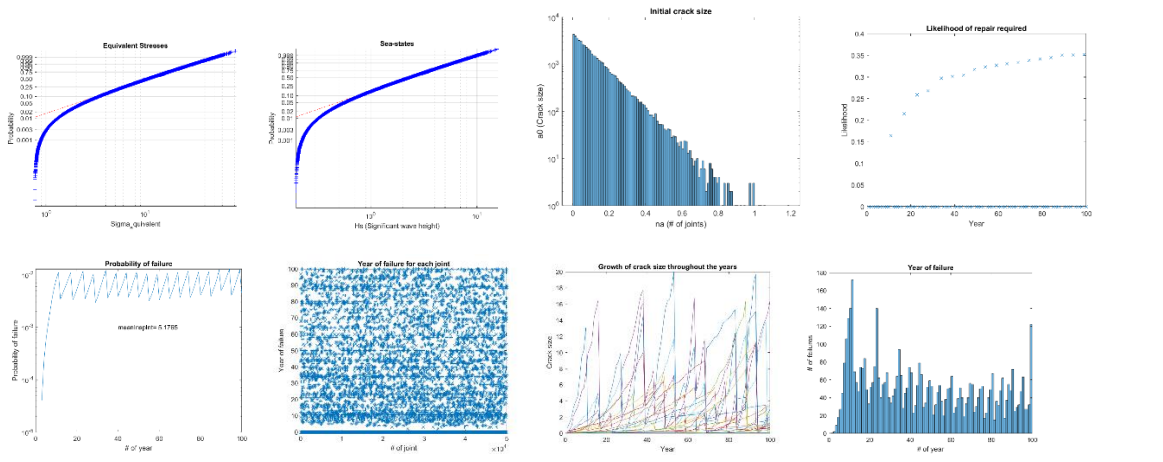


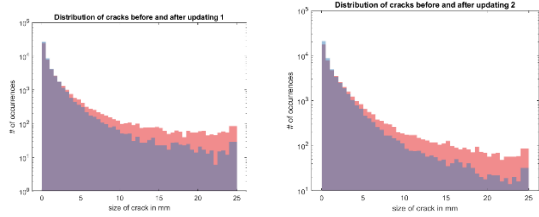


50k\_CVI\_22år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:

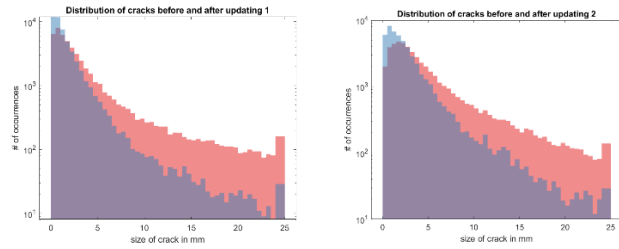
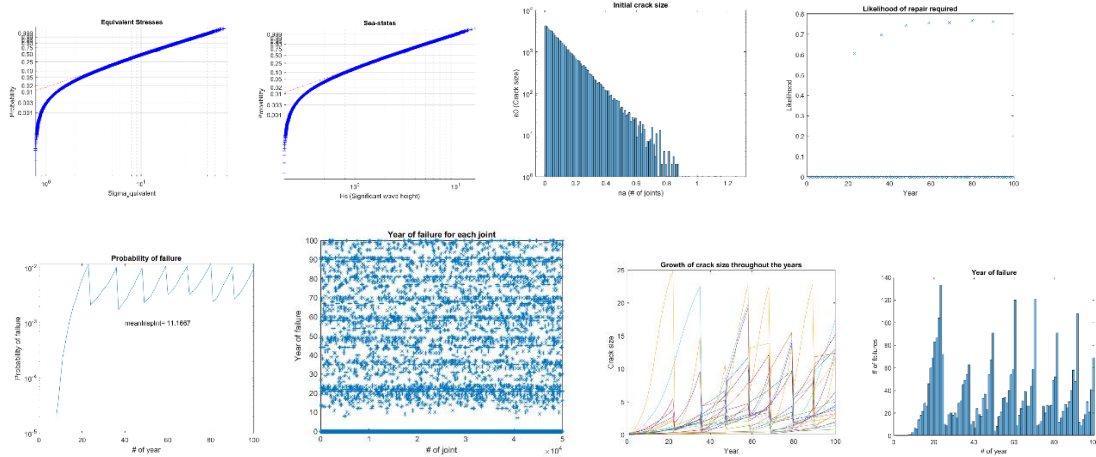


50k\_CVI\_22år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:

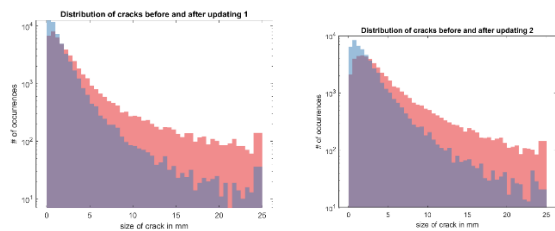
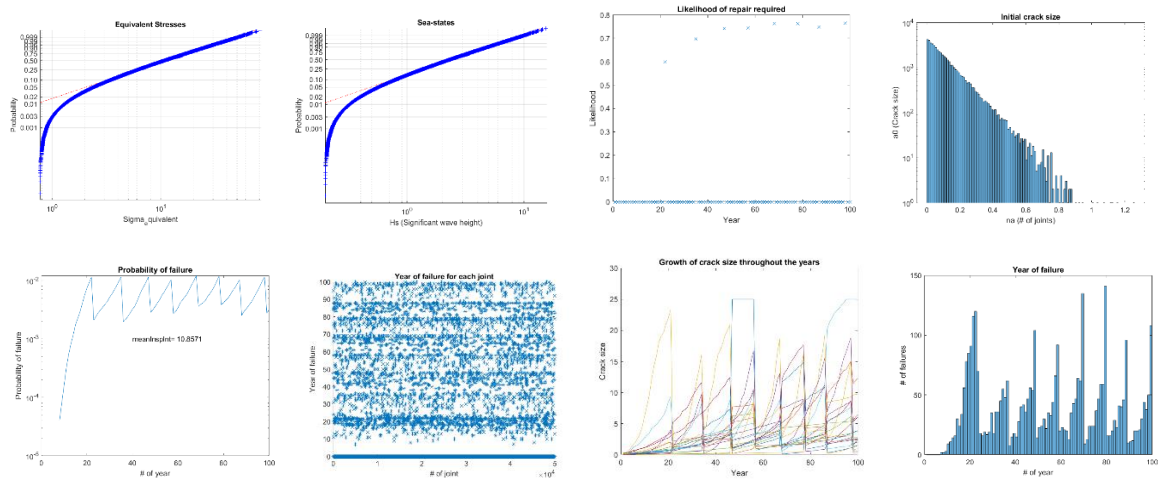




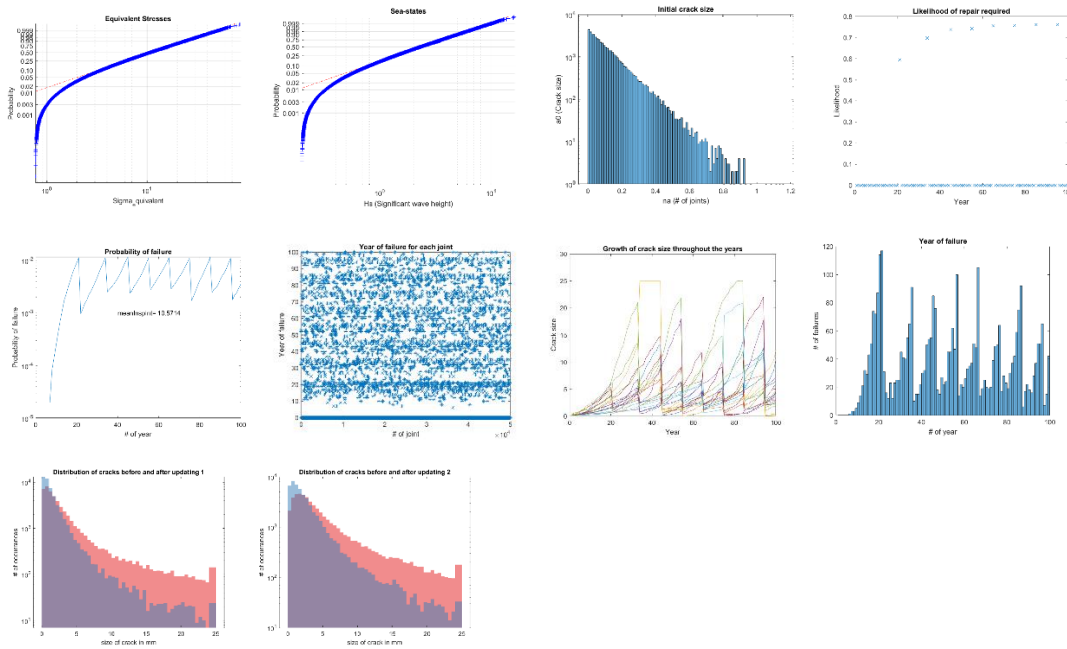
50k\_MPI\_22år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0 og a0CoV = 0:



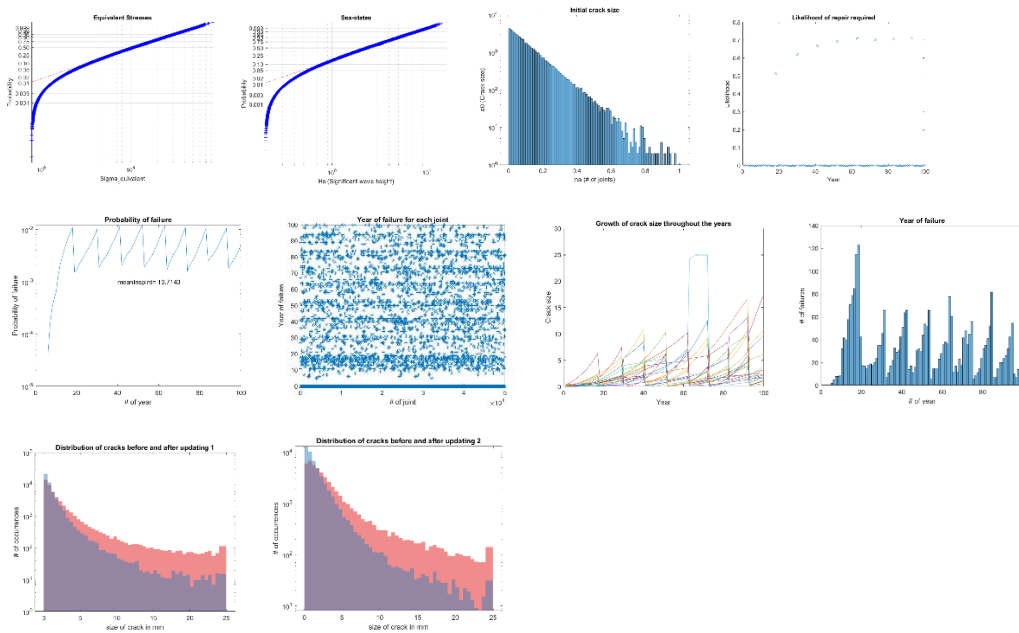
50k\_MPI\_22år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0 og a0CoV = 0:



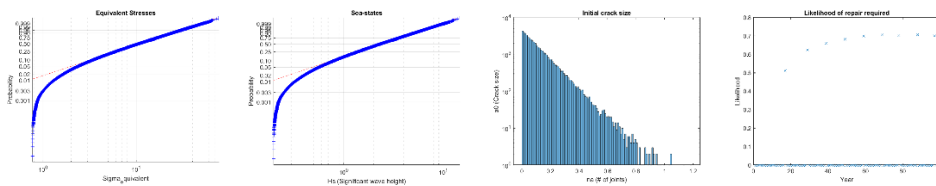
50k\_MPI\_22år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

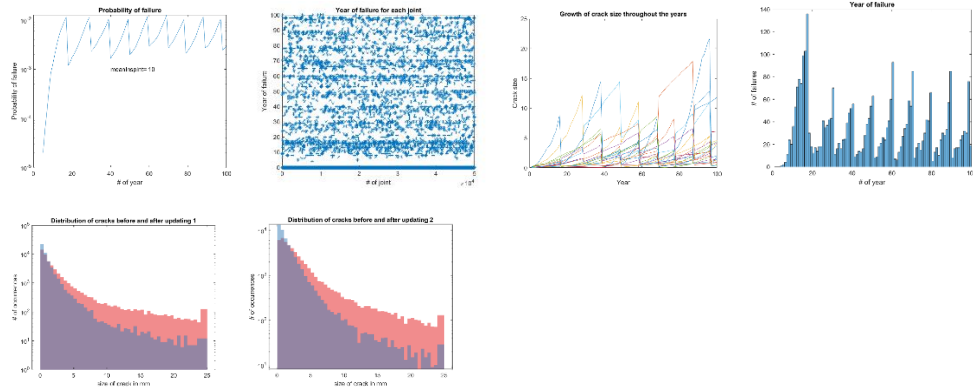


50k\_MPI\_22år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:

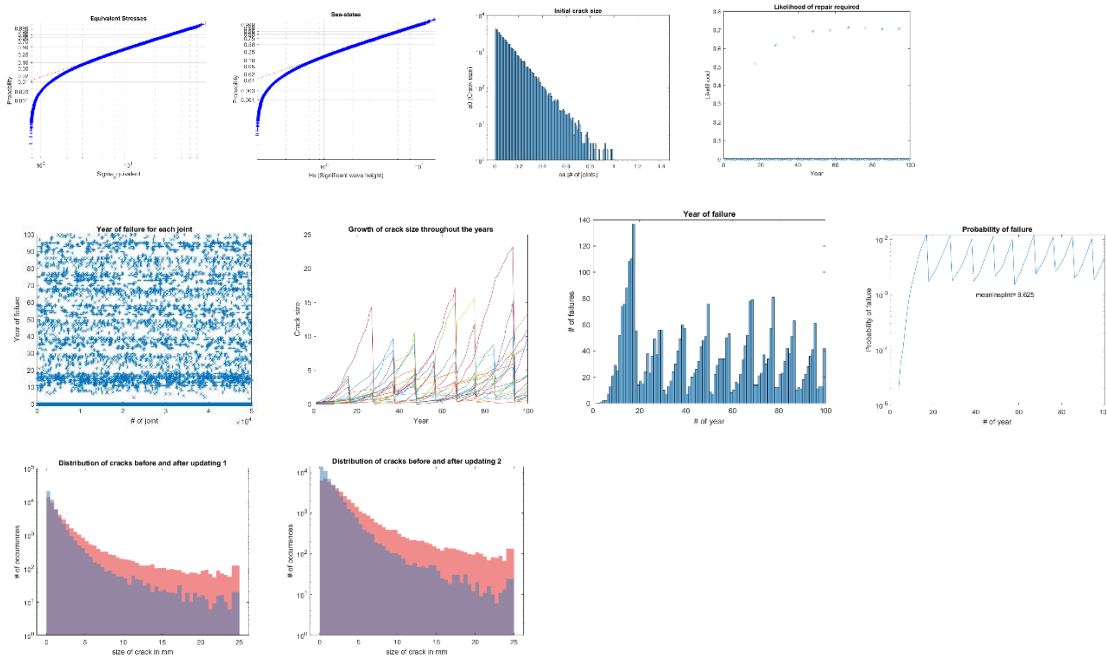


50k\_MPI\_22år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:

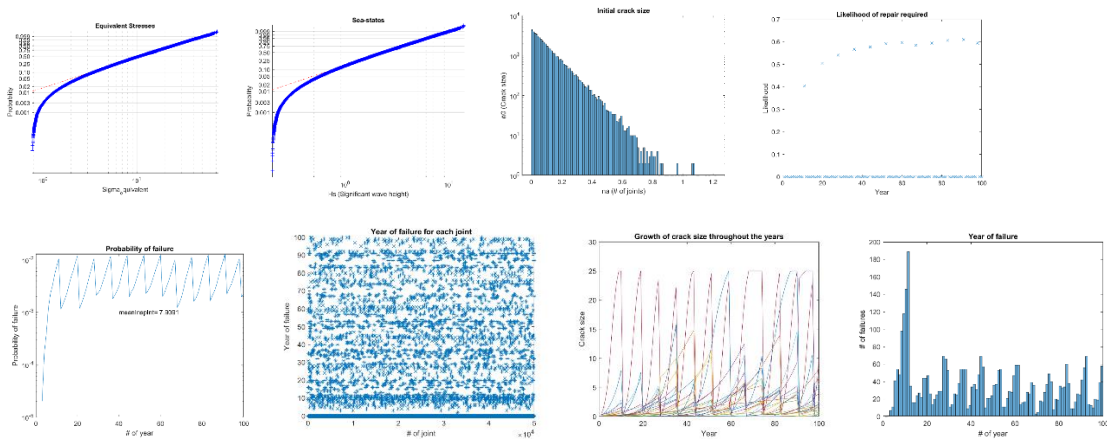


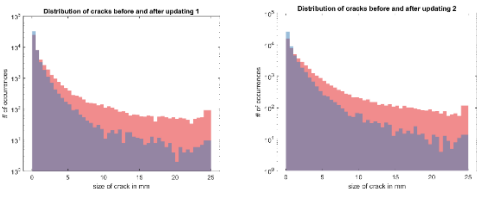


50k\_MPI\_22r\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:

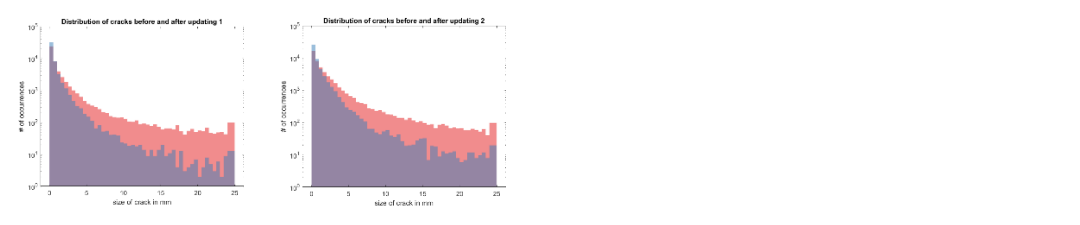
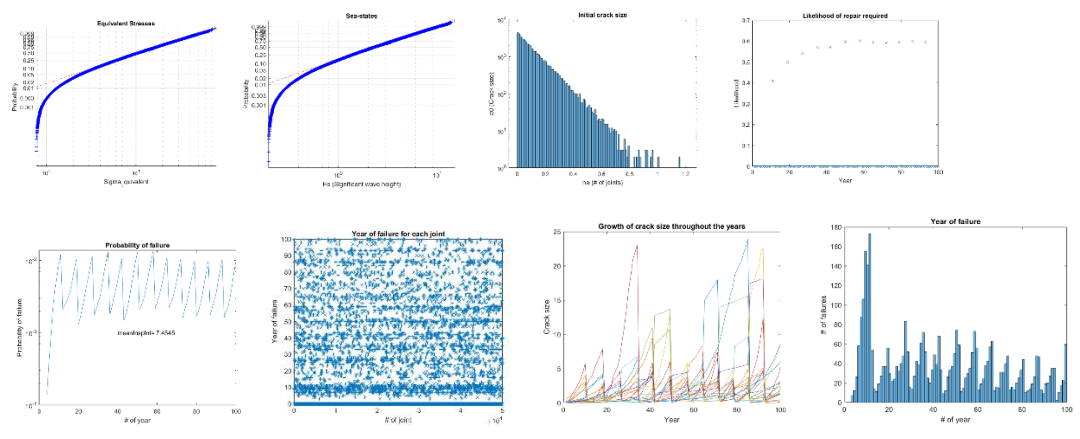


50k\_MPI\_22r\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:

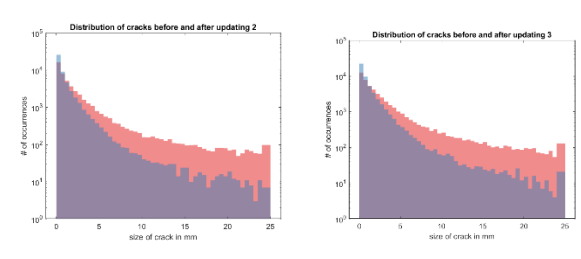
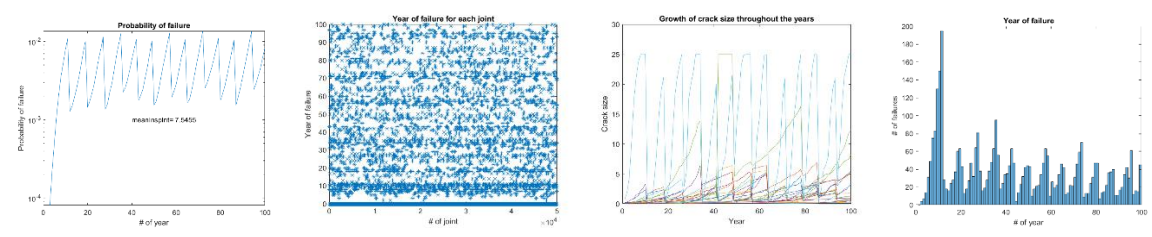
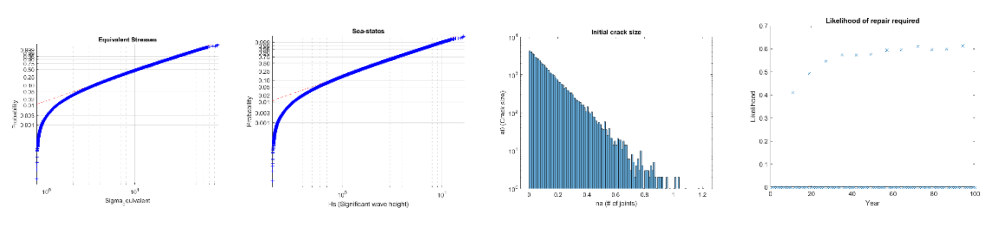




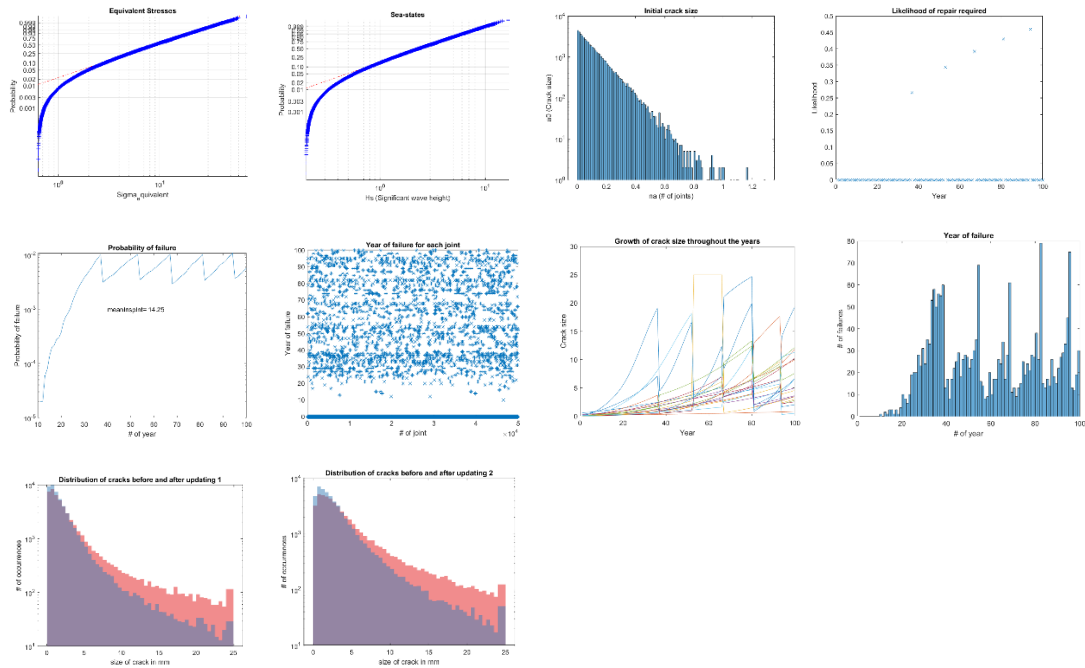
50k\_MPI\_22år\_0.01\_ YCoV = 0.1, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:



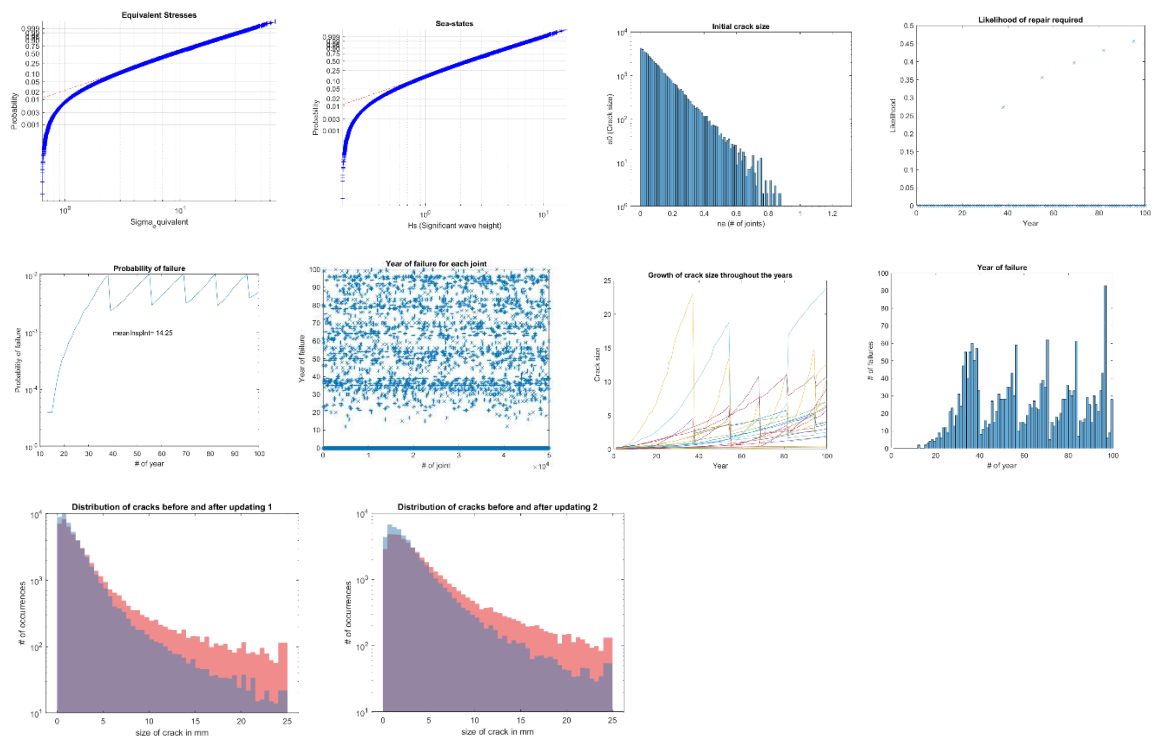
50k\_MPI\_22år\_0.01\_ YCoV = 0.15, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:



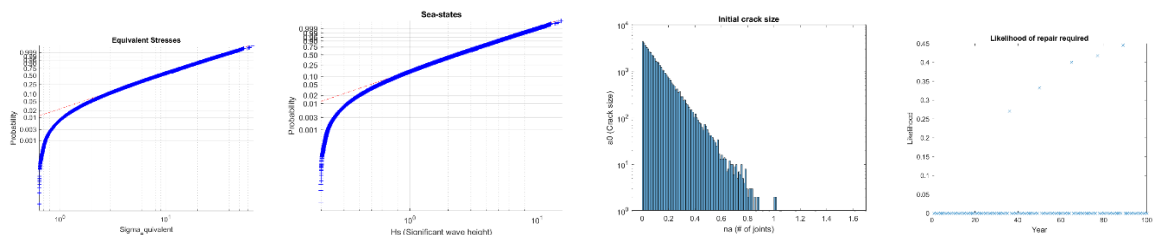
50k\_CVI\_39år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0 og a0CoV = 0:



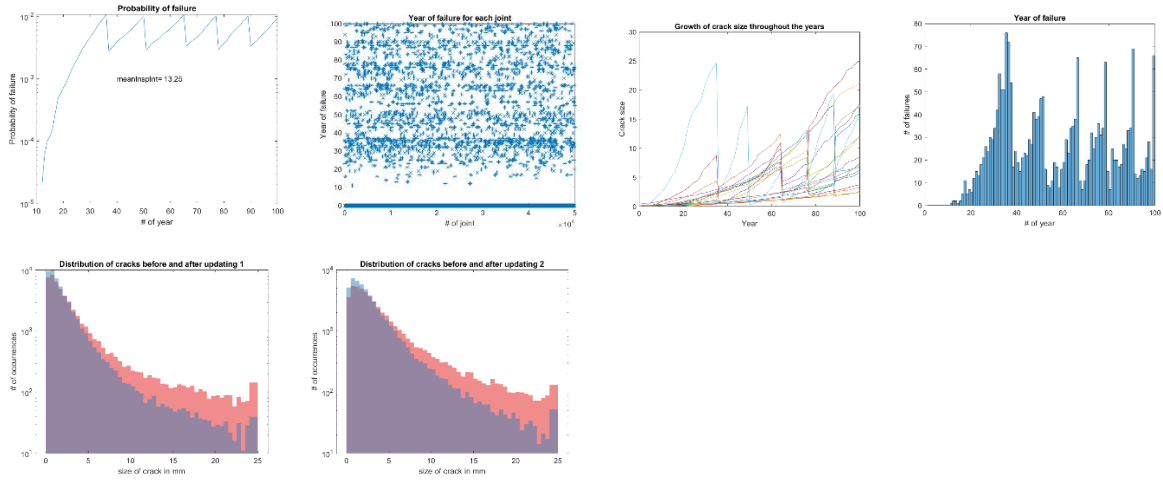
50k\_CVI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0 og a0CoV = 0:



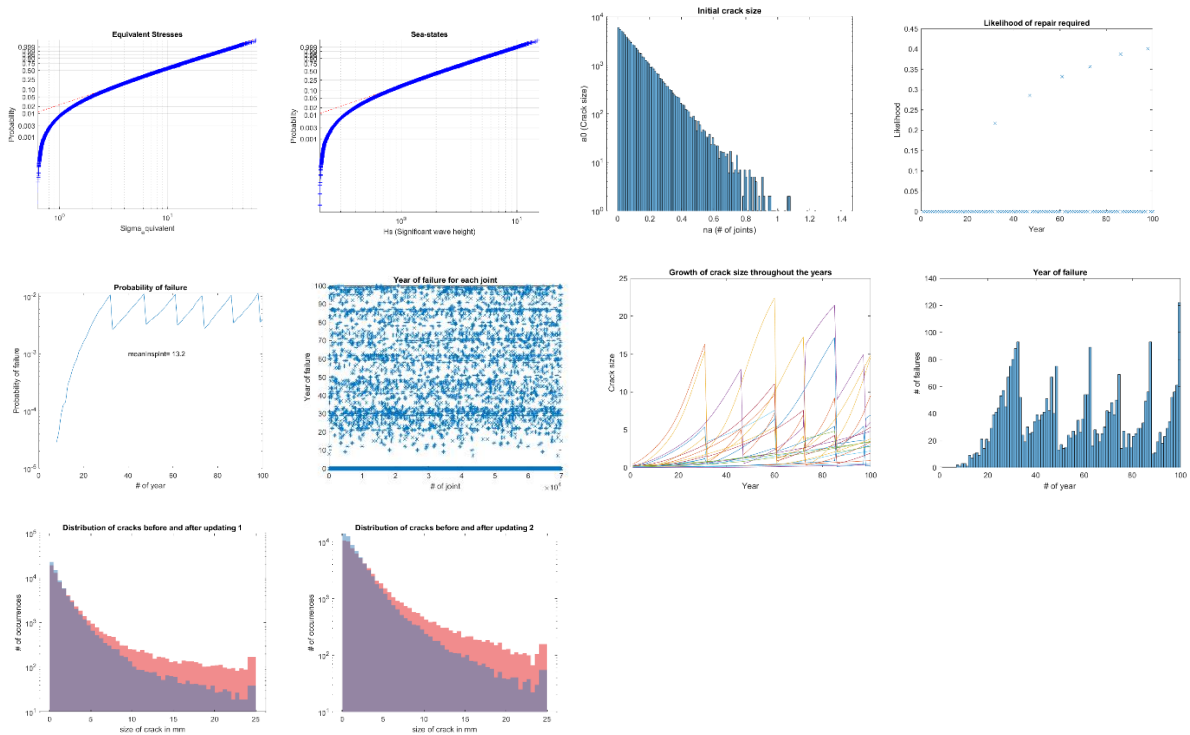
50k\_CVI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0 og a0CoV = 0:



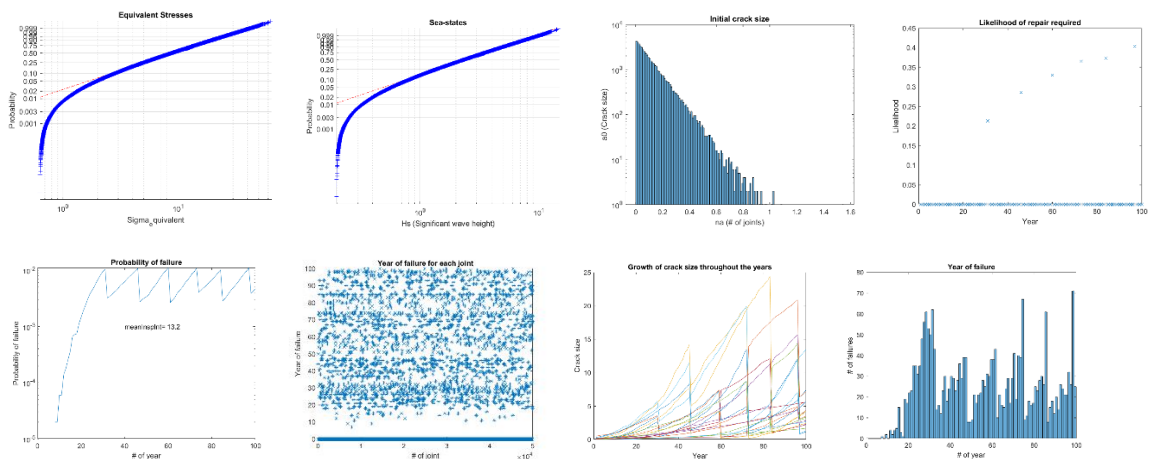


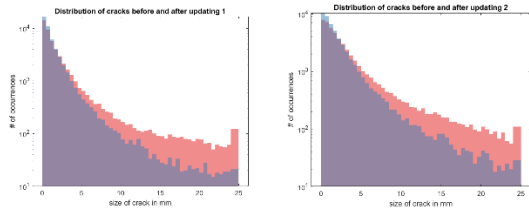


50k\_CVI\_39r\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:

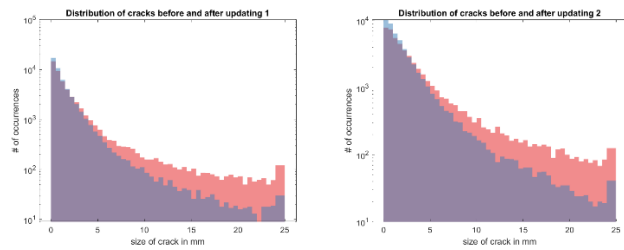
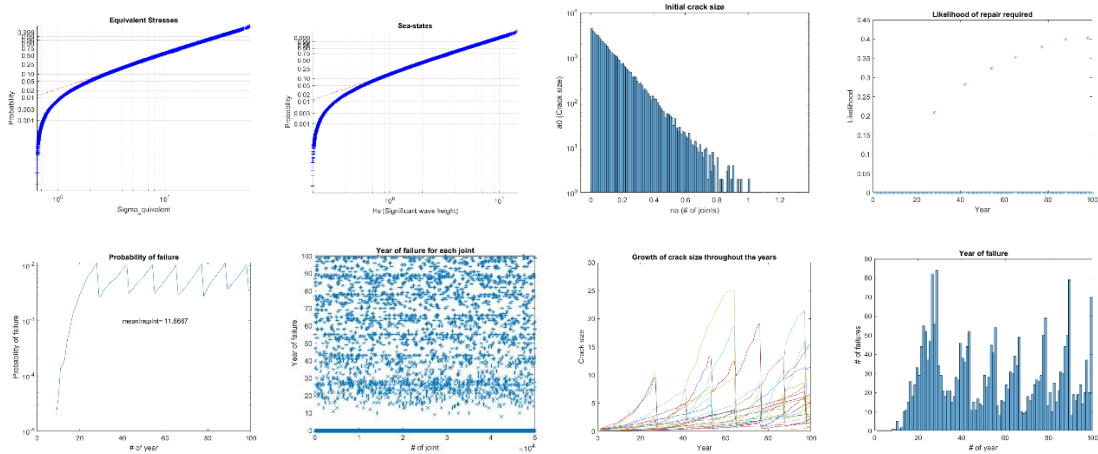


50k\_CVI\_39r\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:

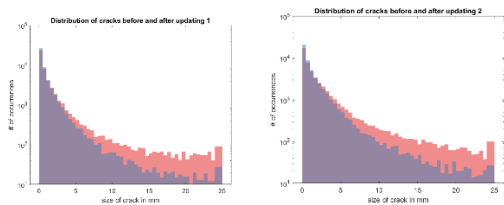
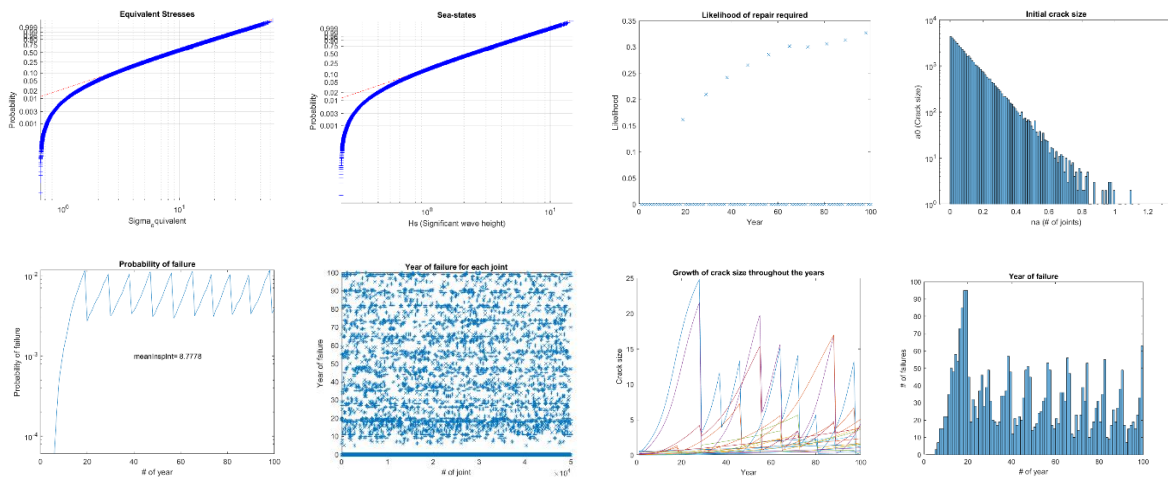




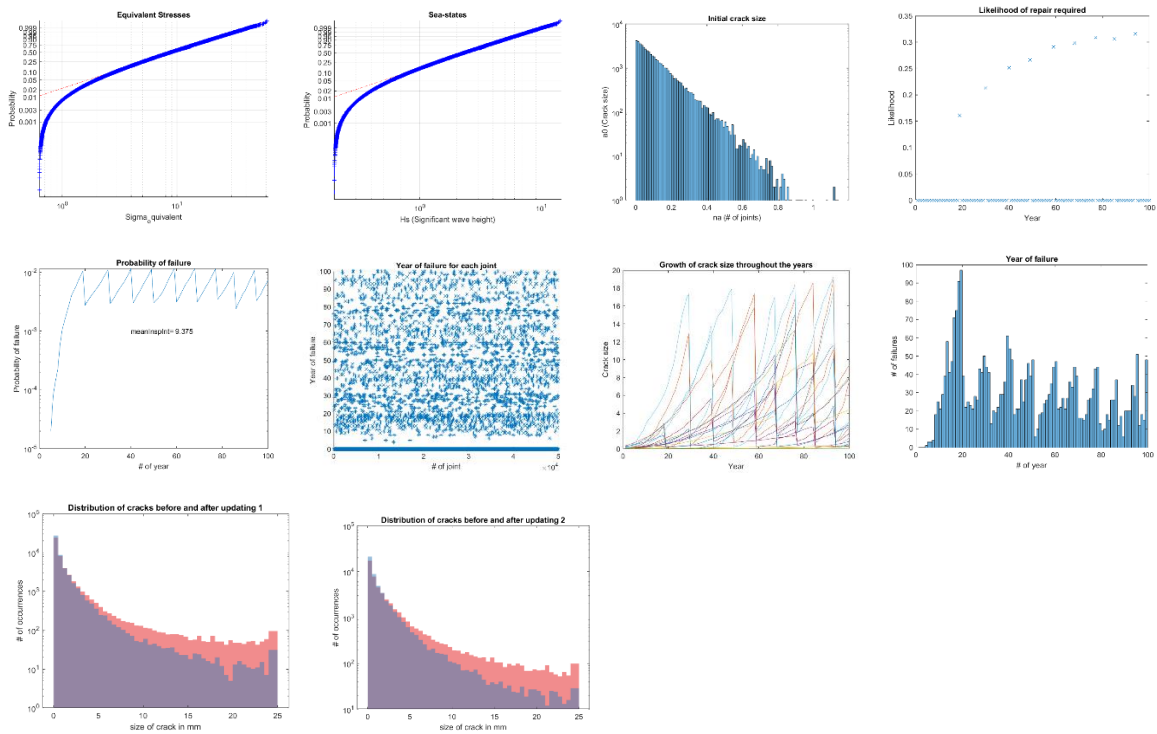
50k\_CVI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:



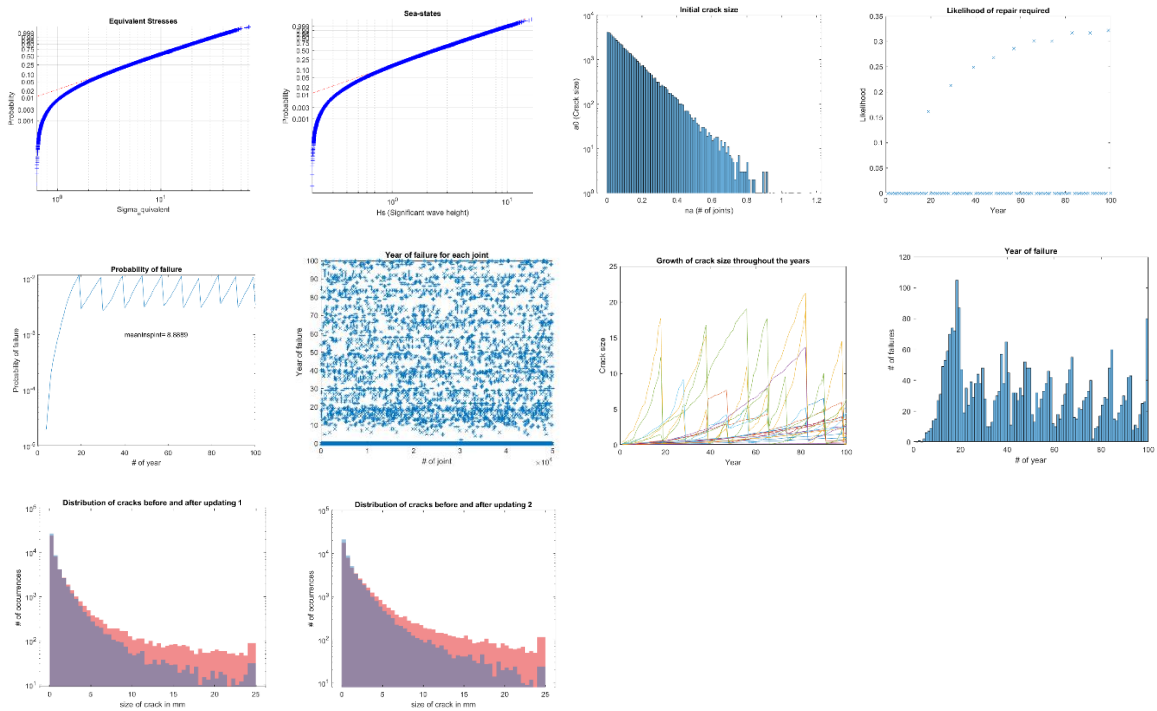
50k\_CVI\_39år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:



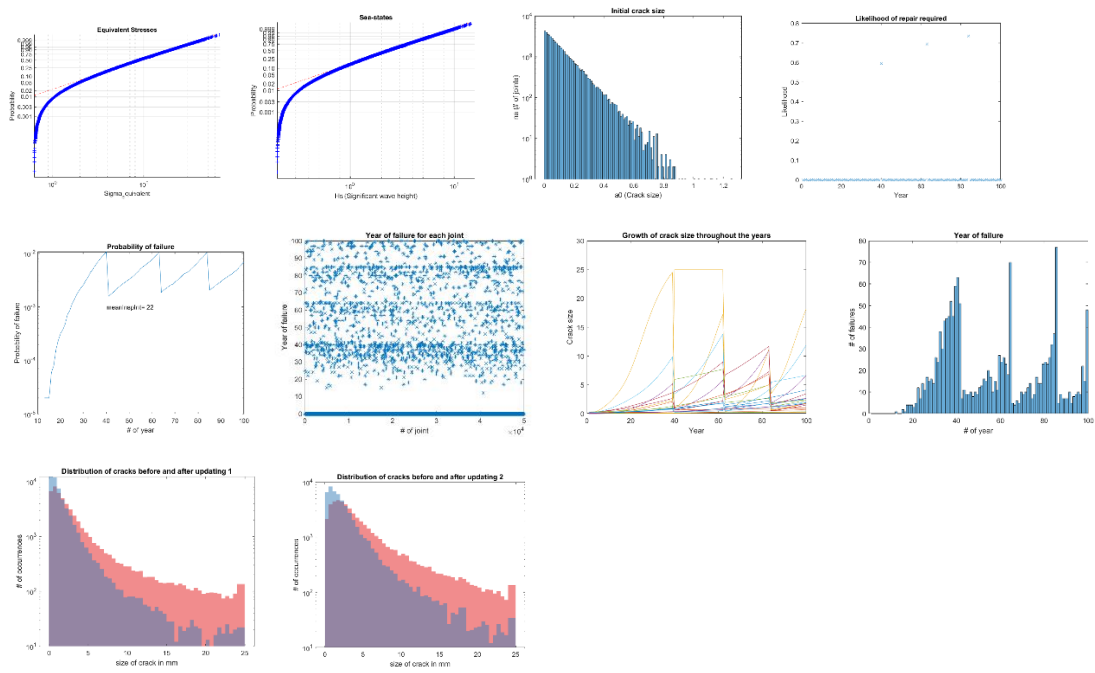
50k\_CVI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:



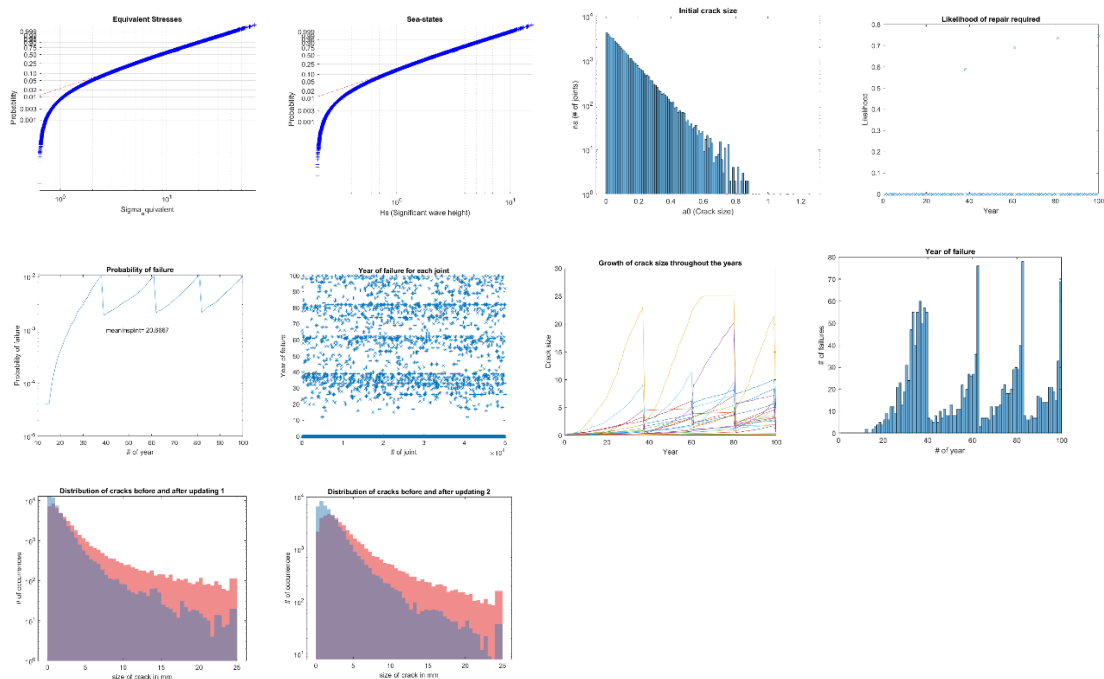
50k\_CVI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:



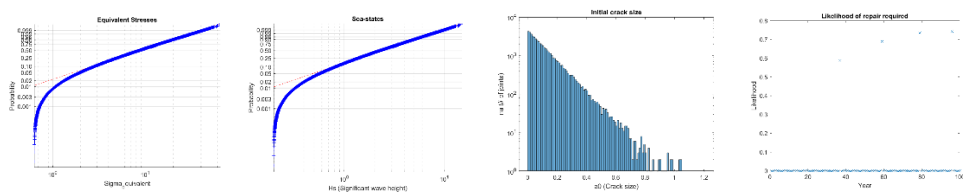
50k\_MPI\_39år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

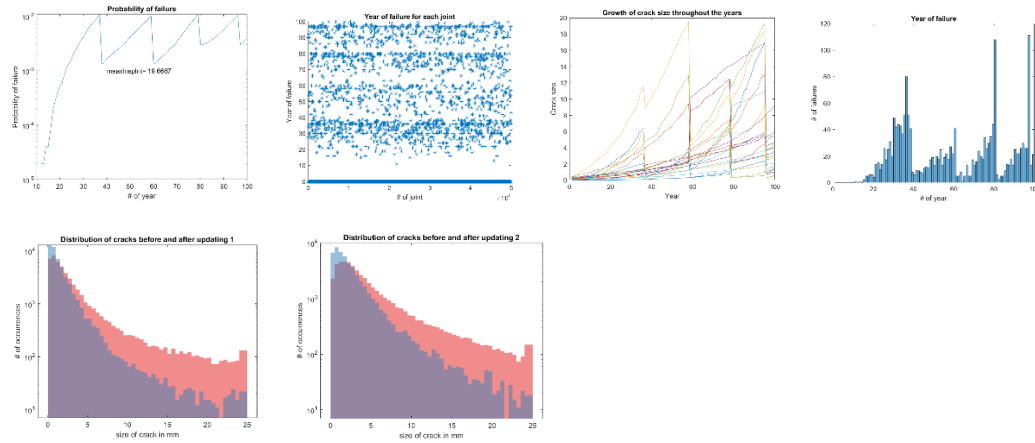


50k\_MPI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

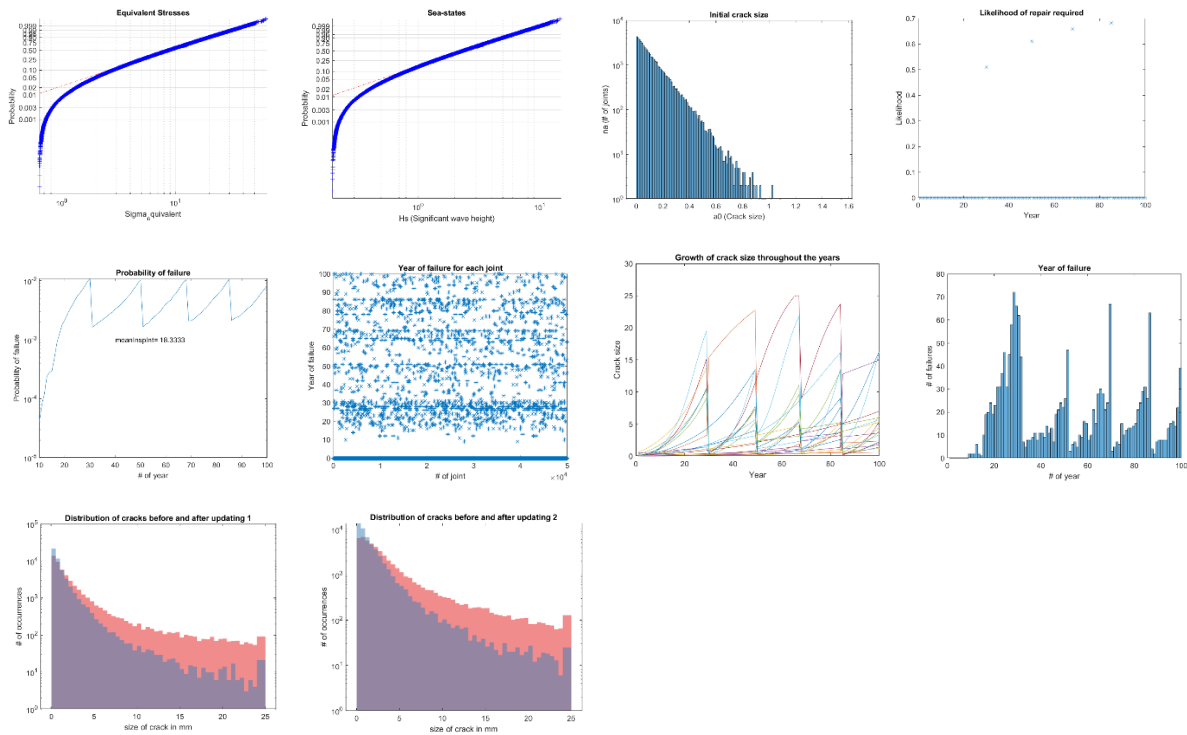


50k\_MPI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

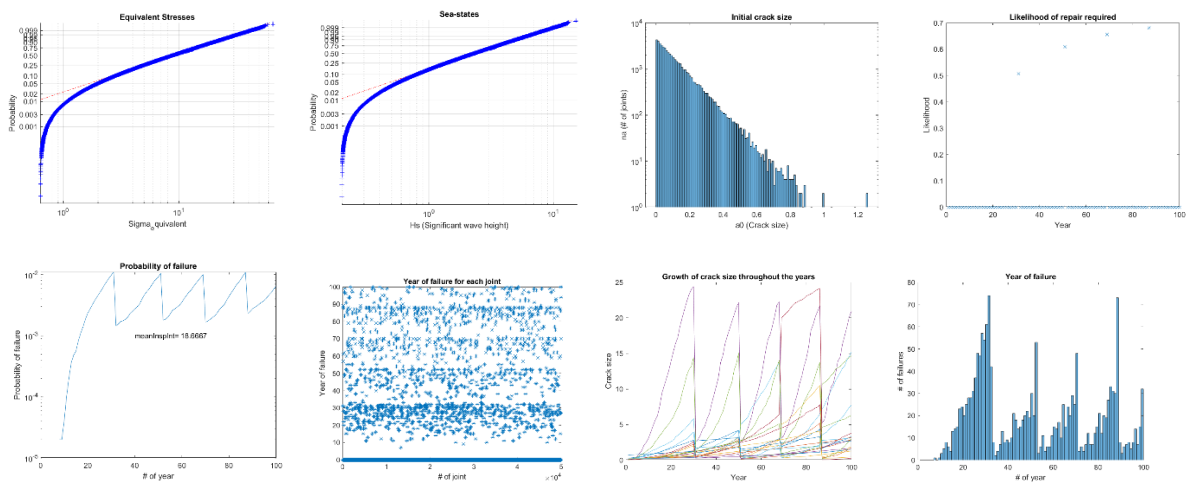


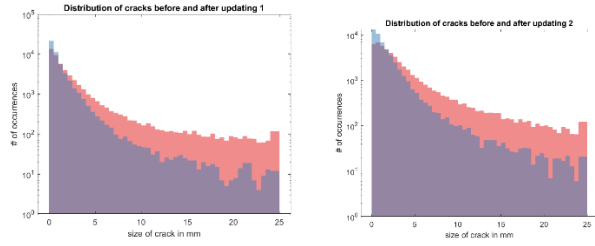


50k\_MPI\_39år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:

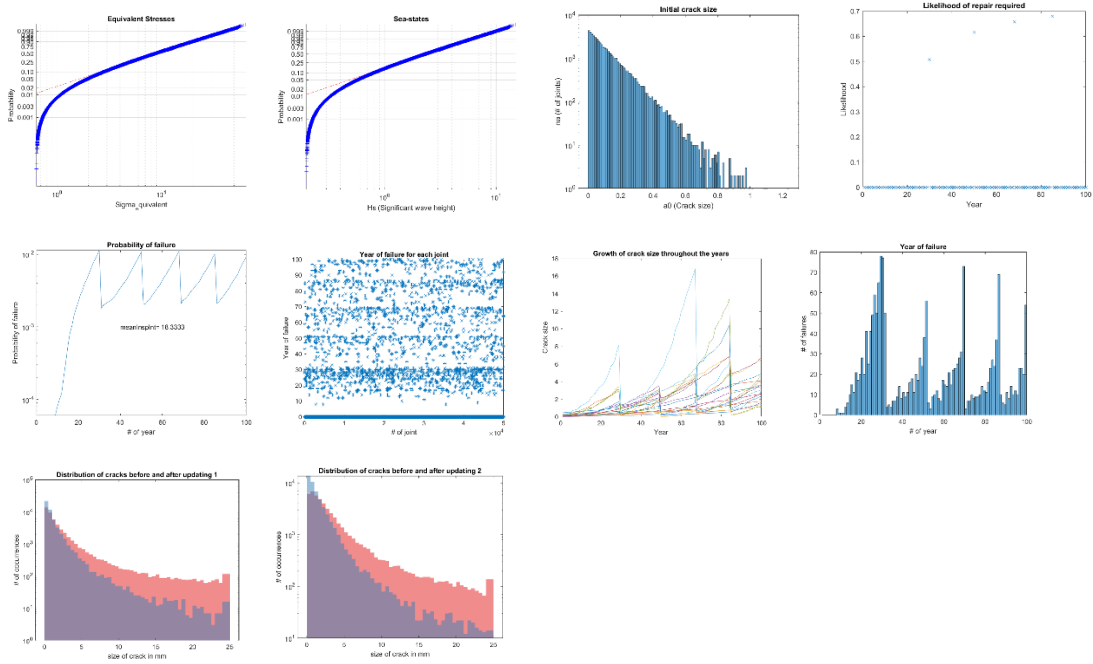


50k\_MPI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:

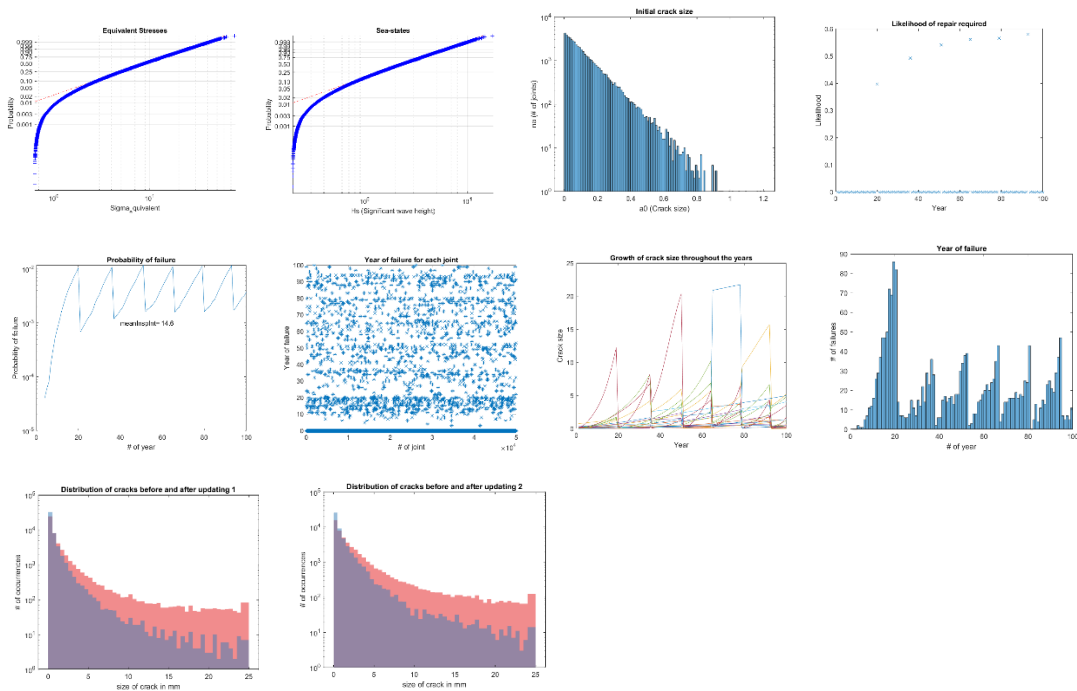




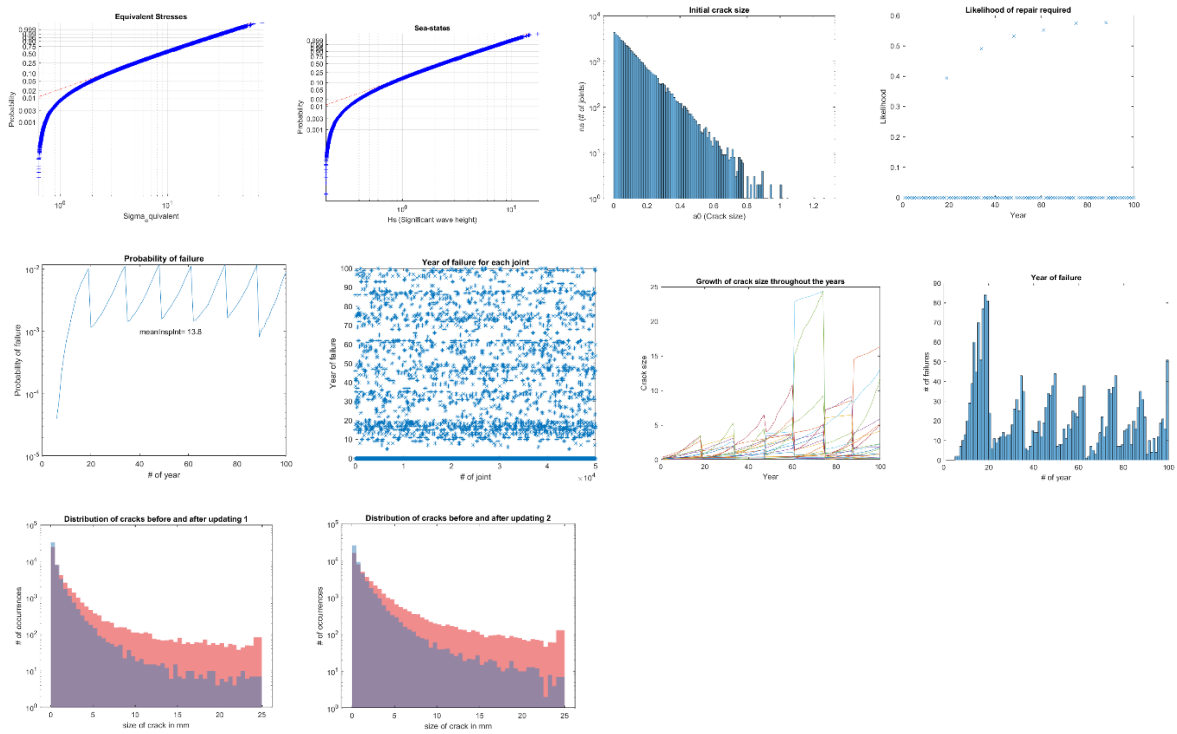
50k\_MPI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:



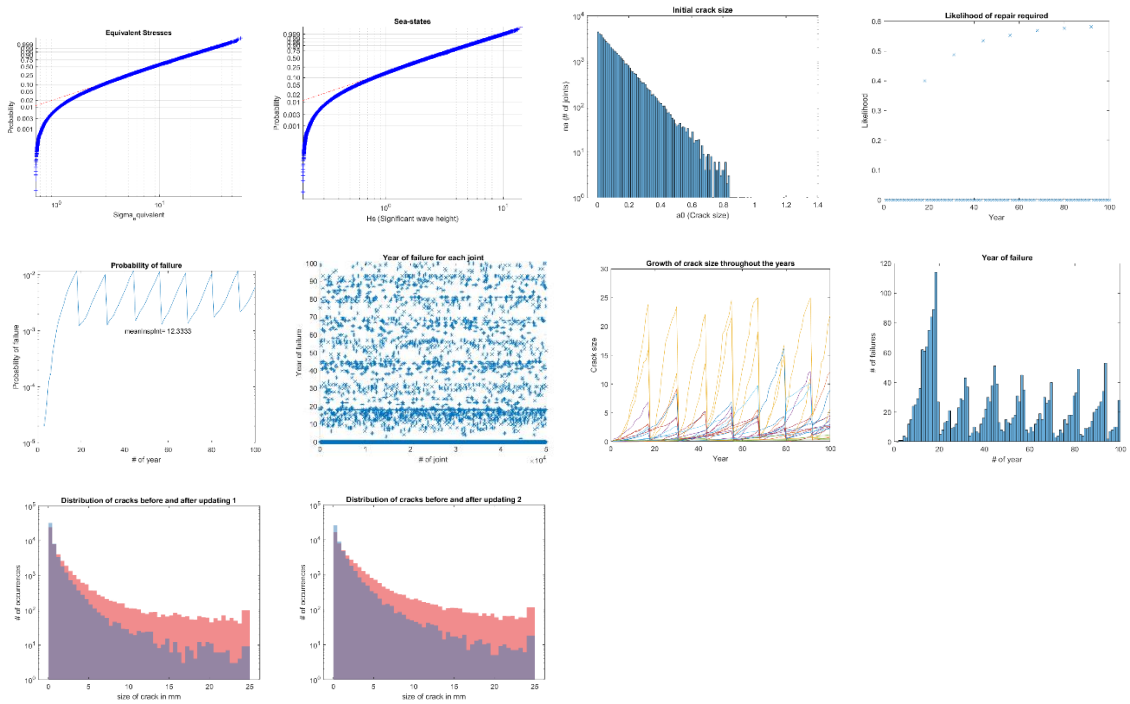
50k\_MPI\_39år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:



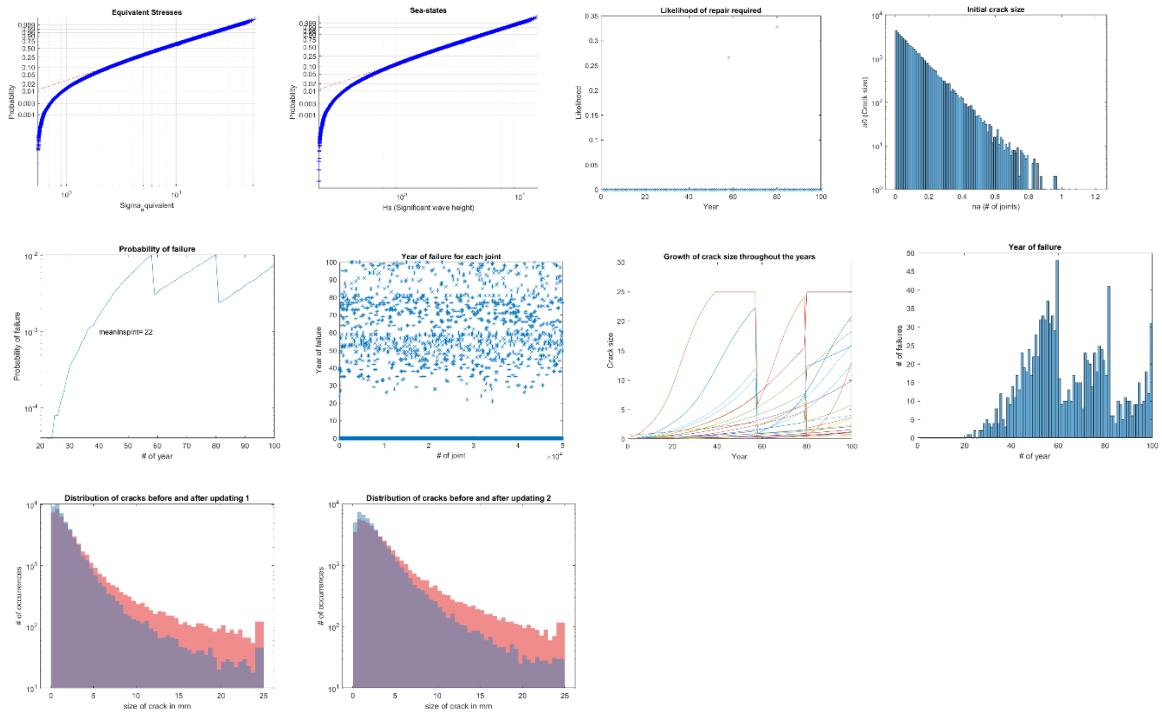
50k\_MPI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:



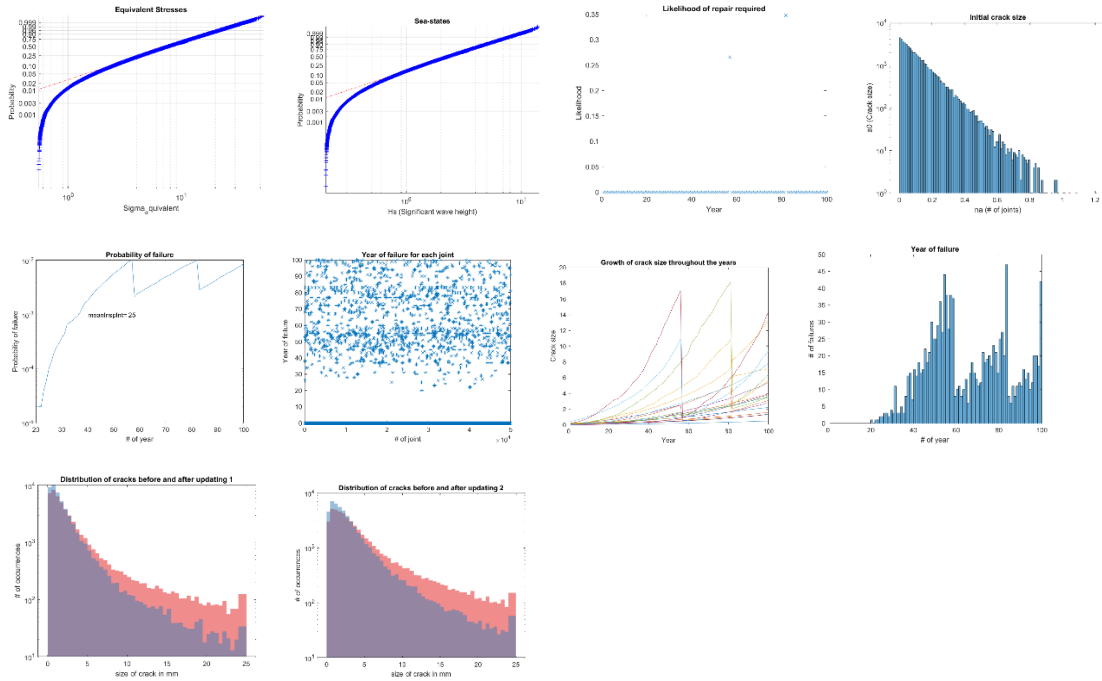
50k\_MPI\_39år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:



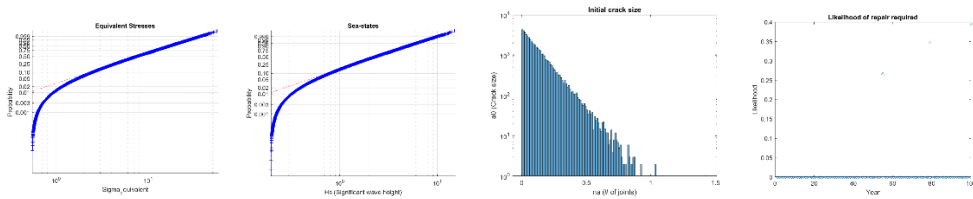
50k\_CVI\_60år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0 og a0CoV = 0:



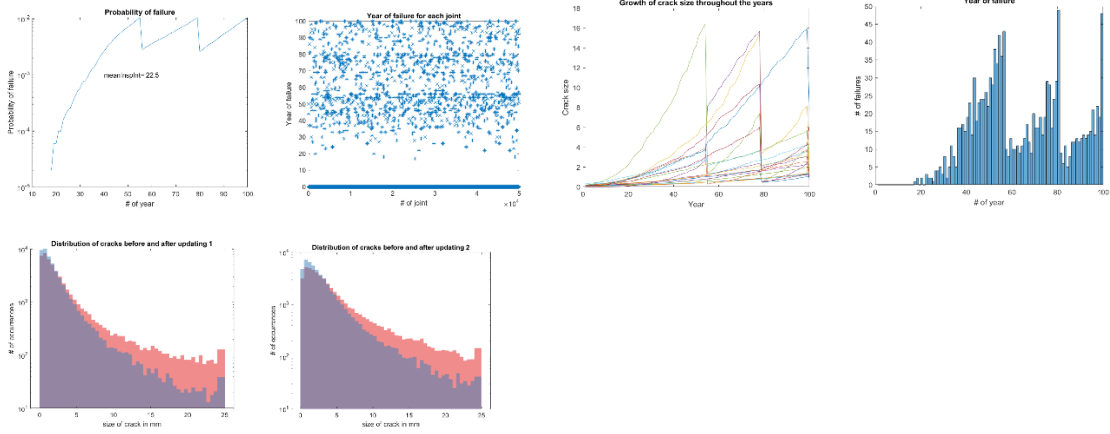
50k\_CVI\_60år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0 og a0CoV = 0:



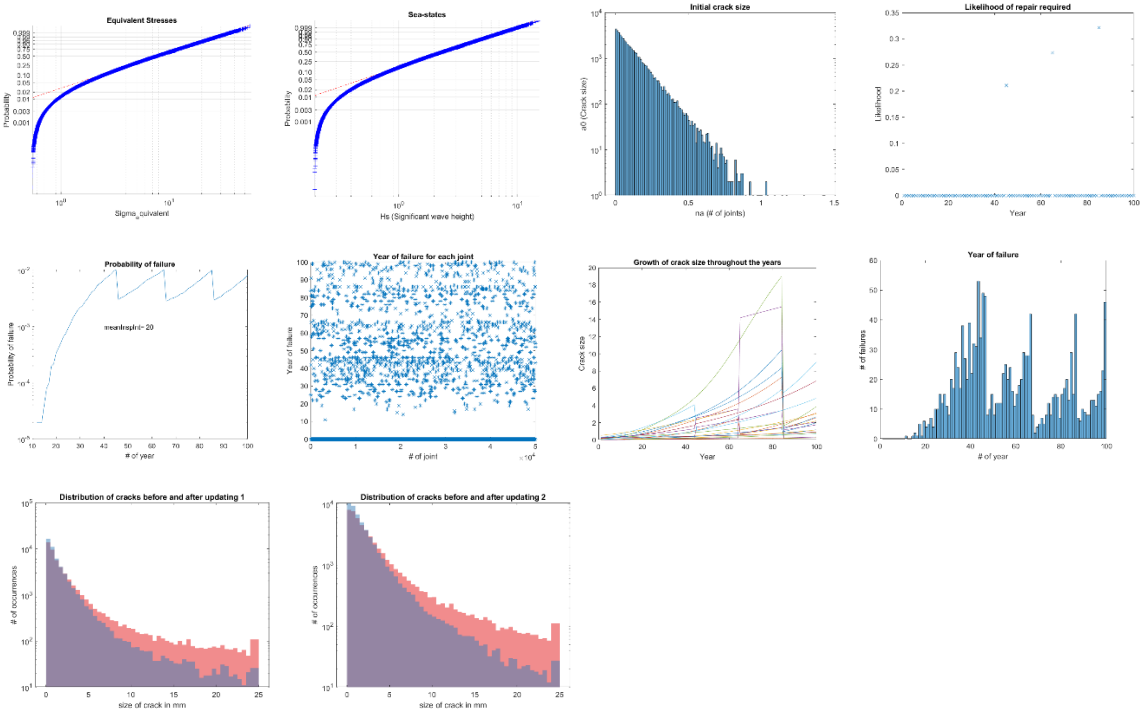
50k\_CVI\_60år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0 og a0CoV = 0:



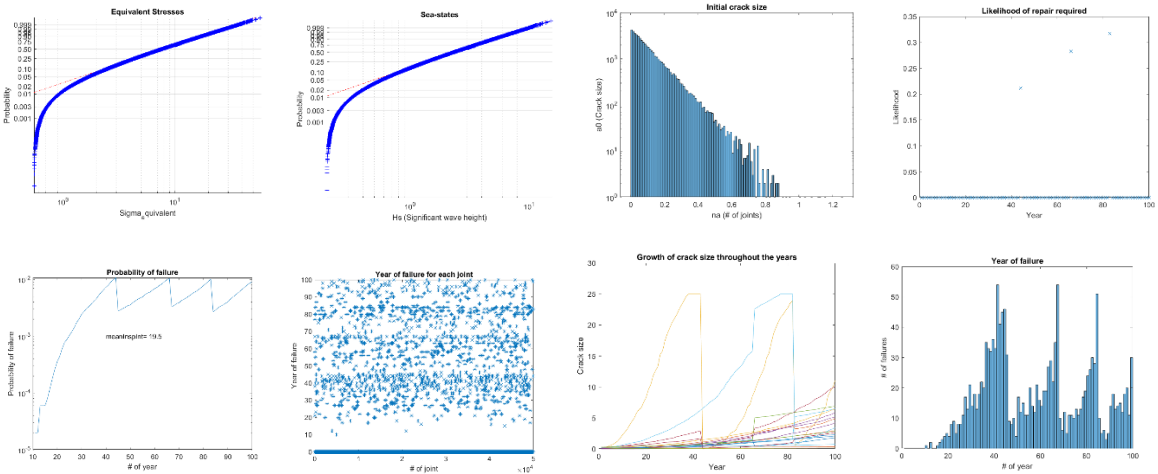


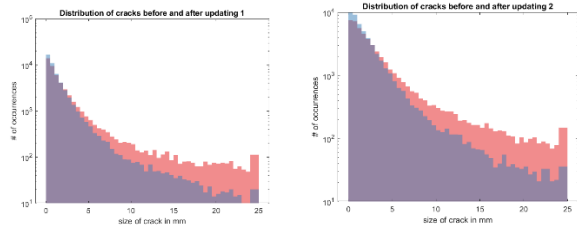


50k\_CVI\_60år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:

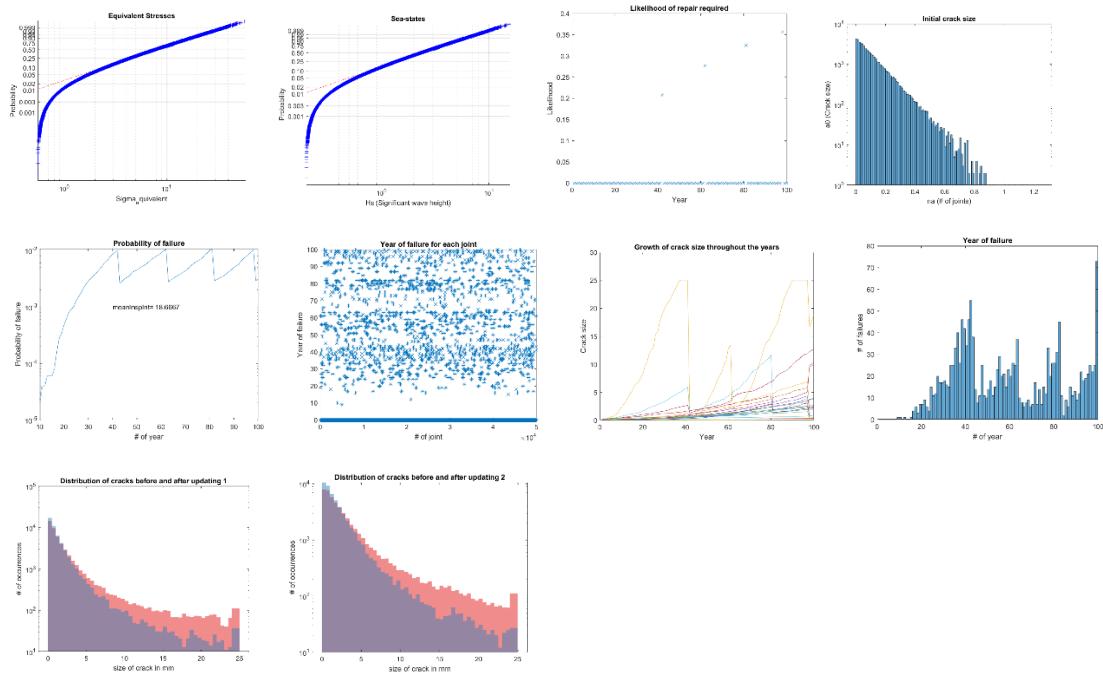


50k\_CVI\_60år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:

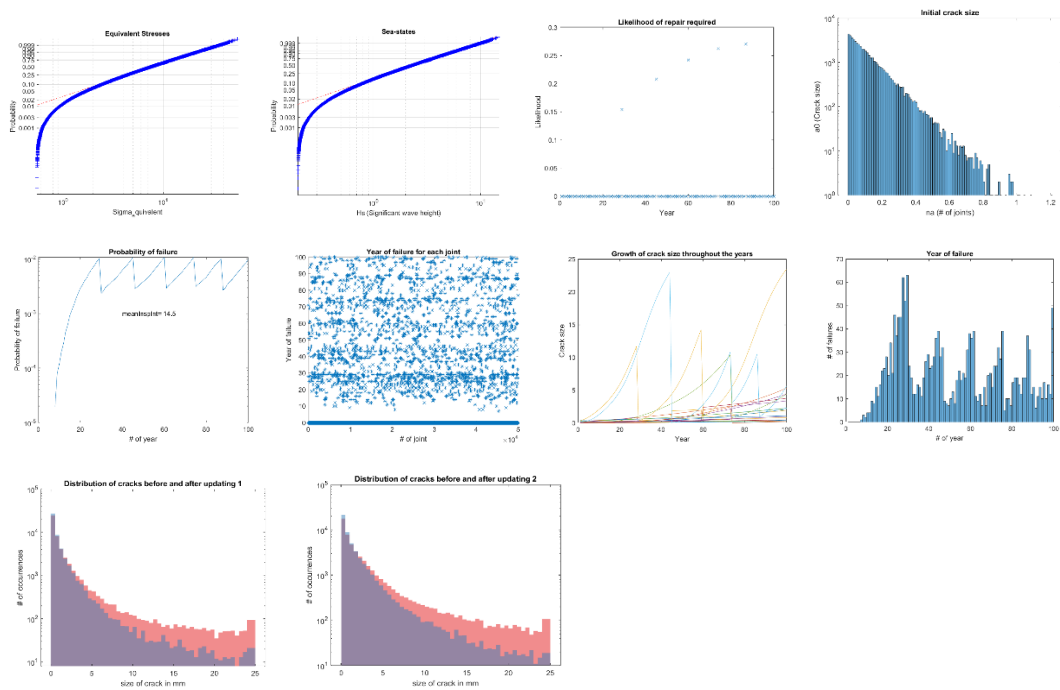




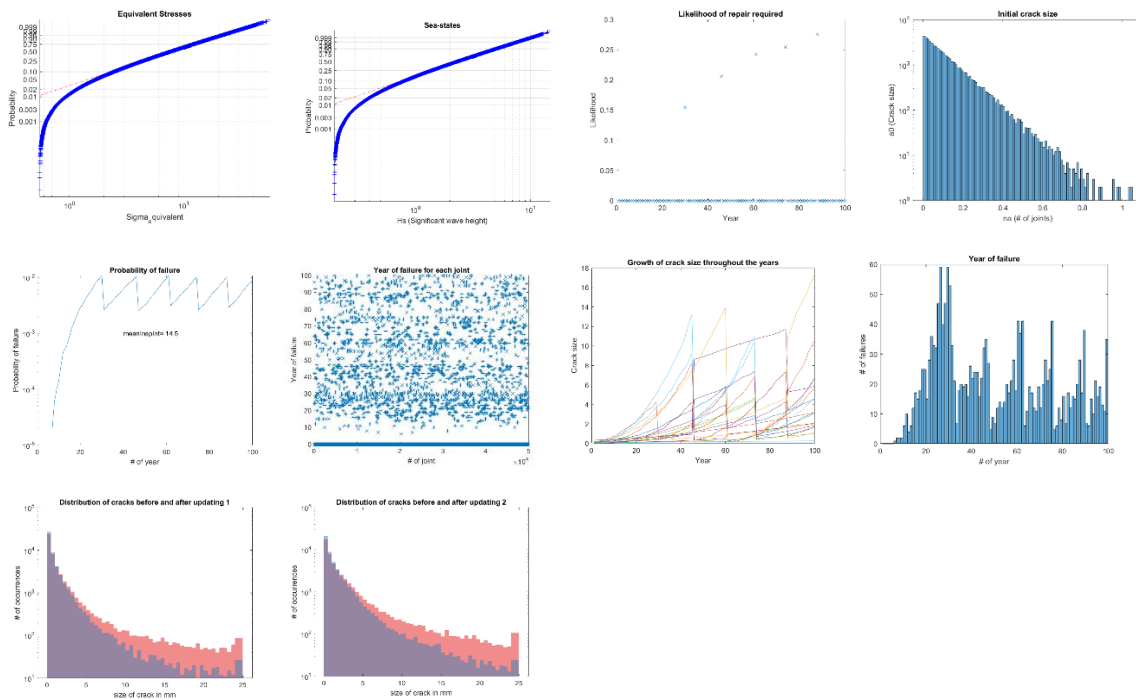
50k\_CVI\_60år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:



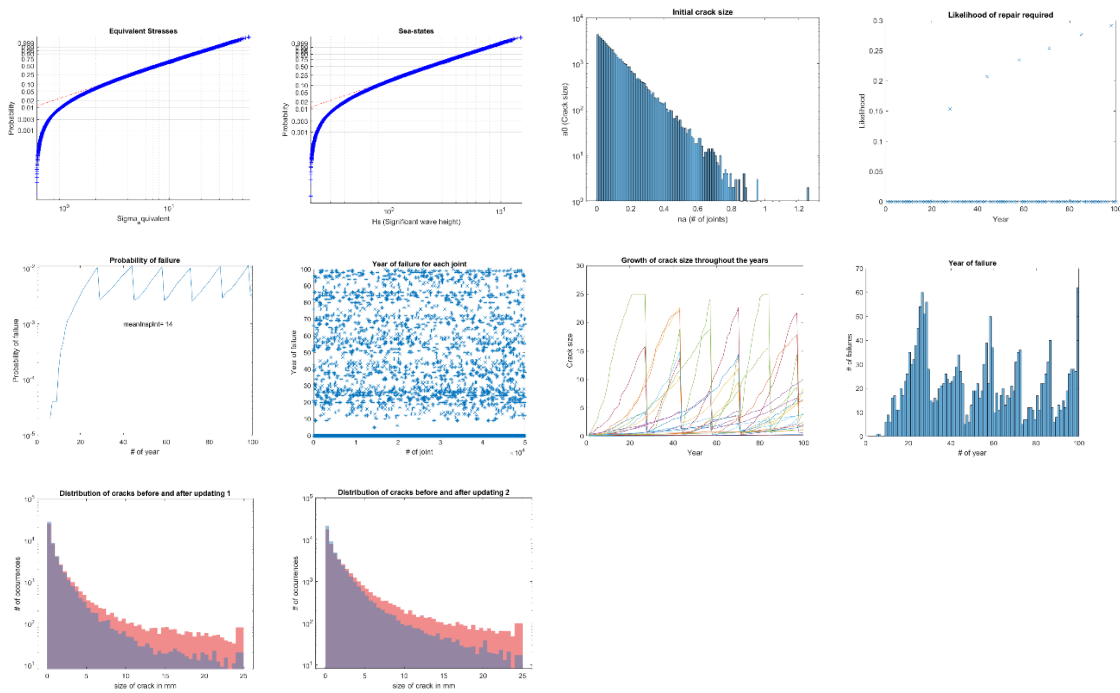
50k\_CVI\_60år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:



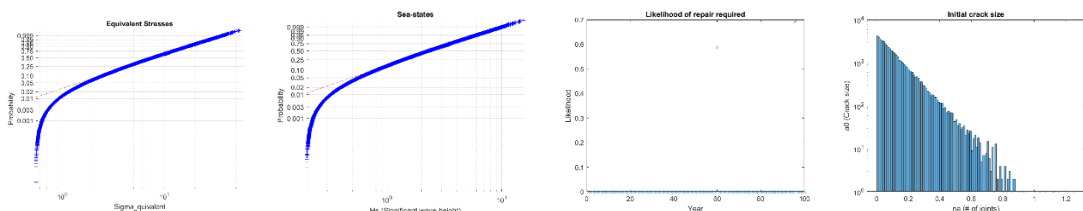
50k\_CVI\_60år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV=0.3 og a0CoV =0:

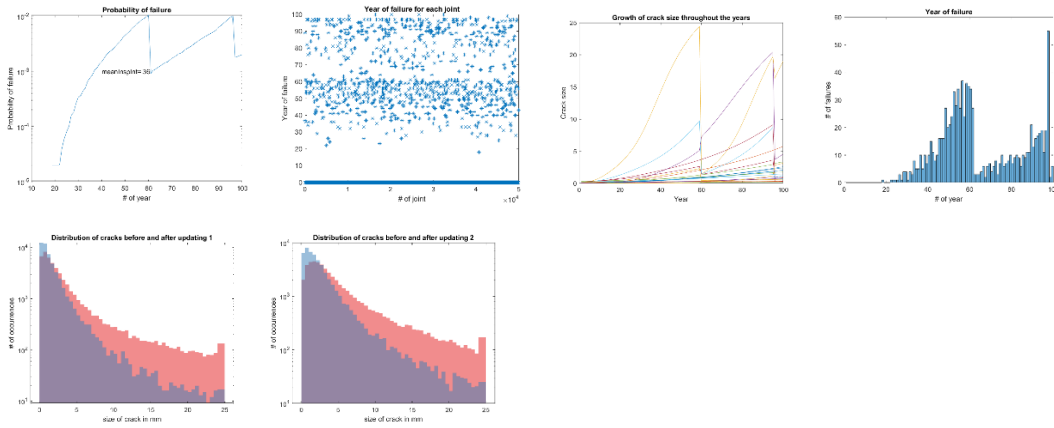


50k\_CVI\_60år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV=0.3 og a0CoV =0:

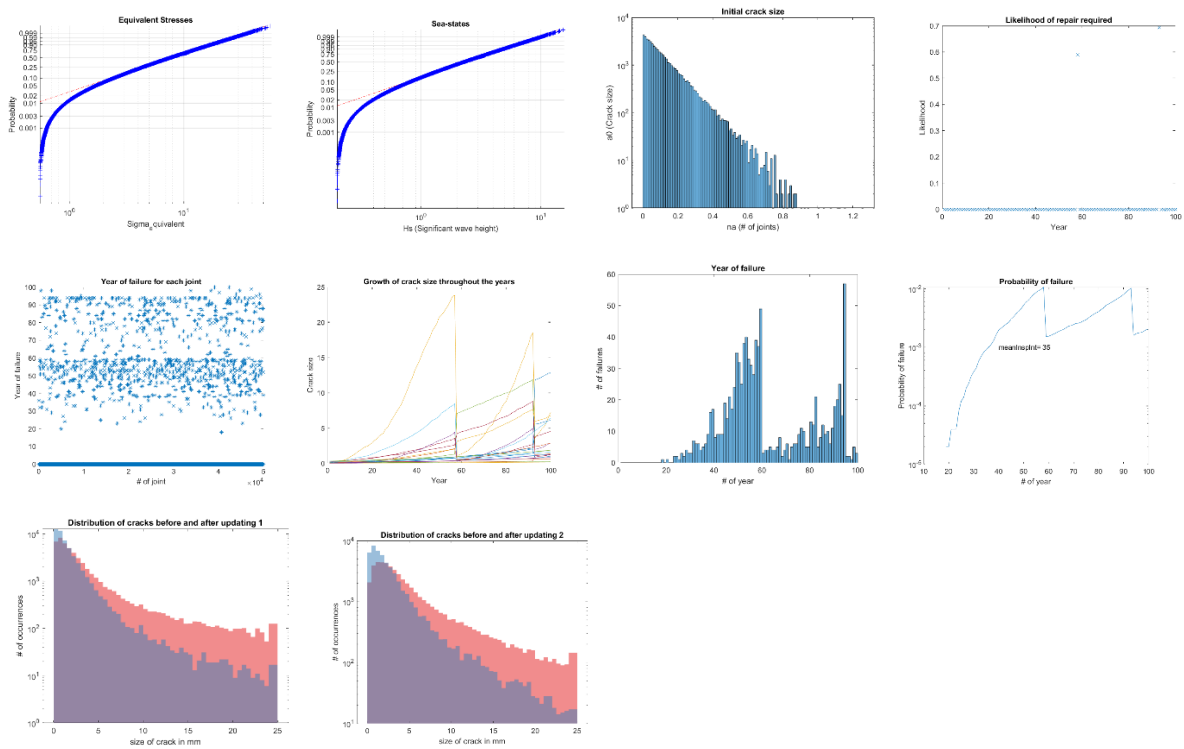


50k\_MPI\_60år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV =0 og a0CoV =0:

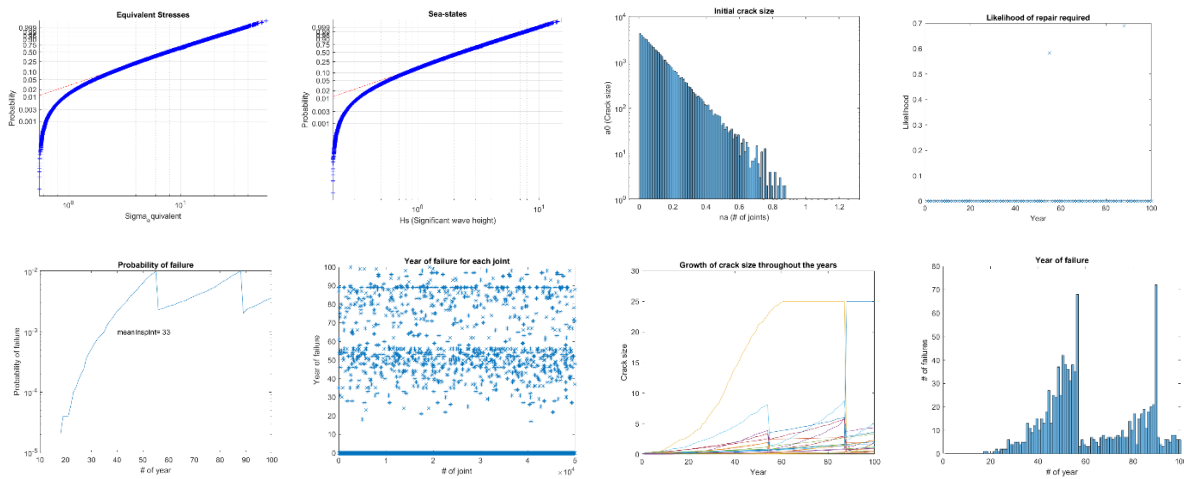


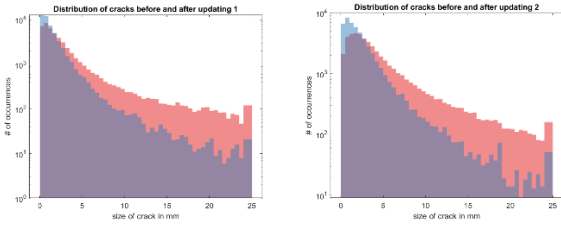


50k\_MPI\_60r\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

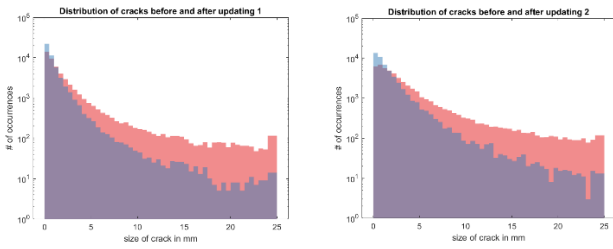
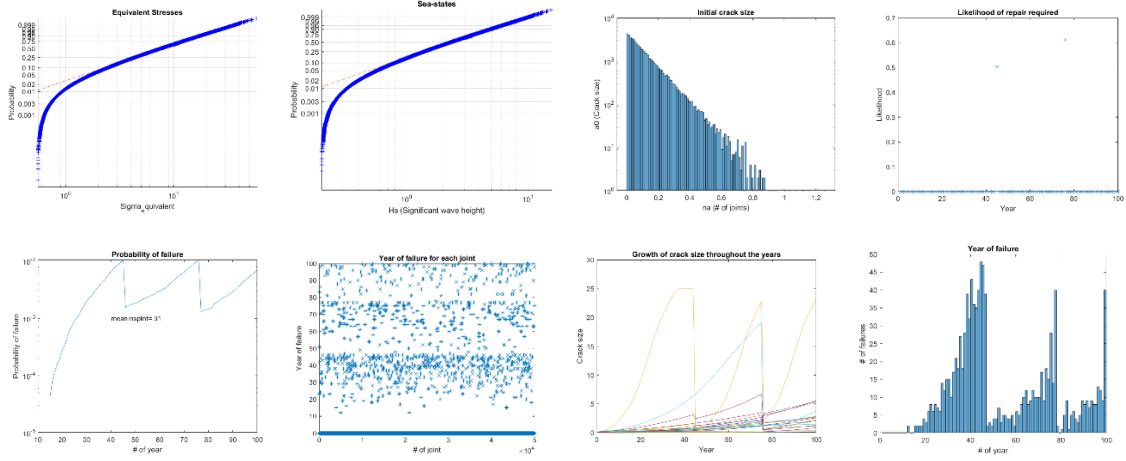


50k\_MPI\_60r\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV = 0 og a0CoV = 0:

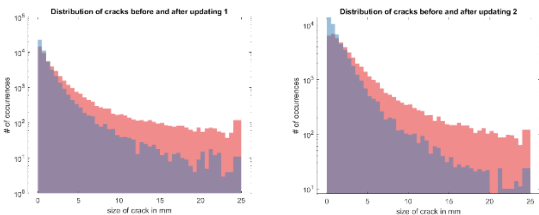
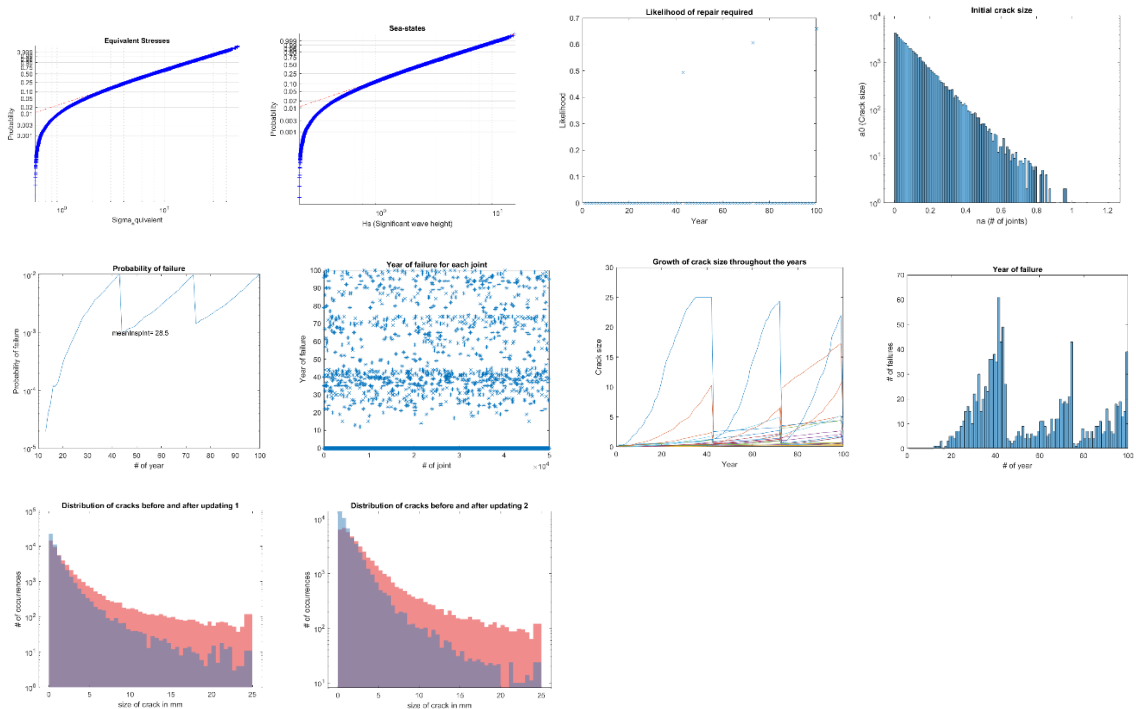




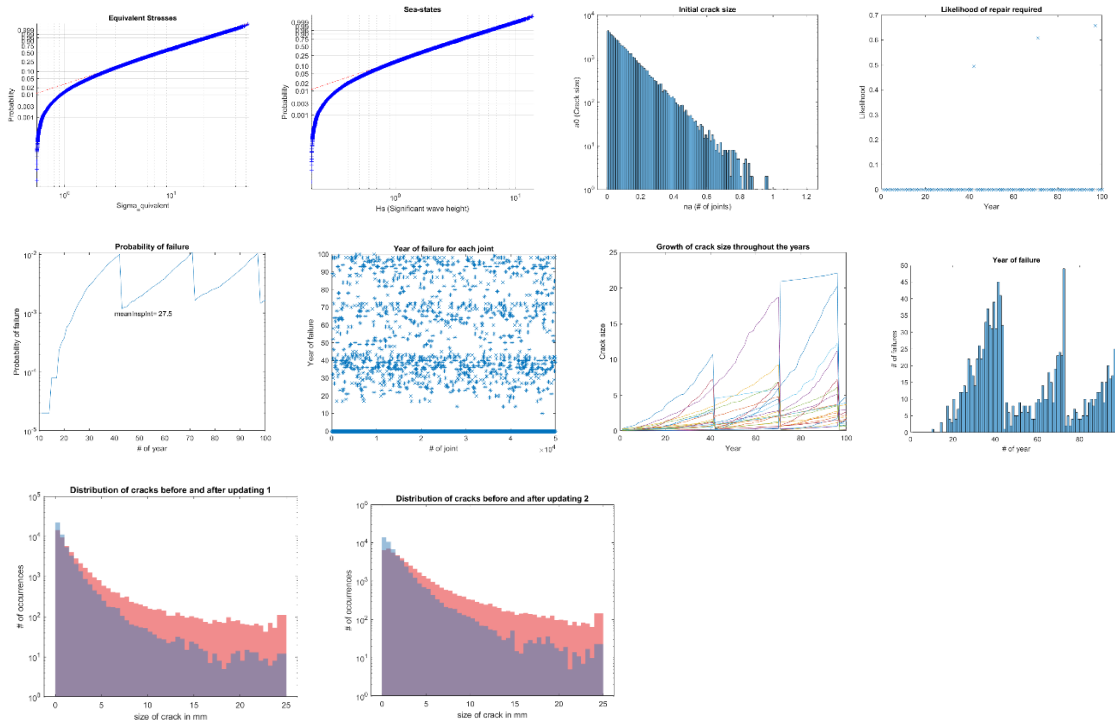
50k\_MPI\_60år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:



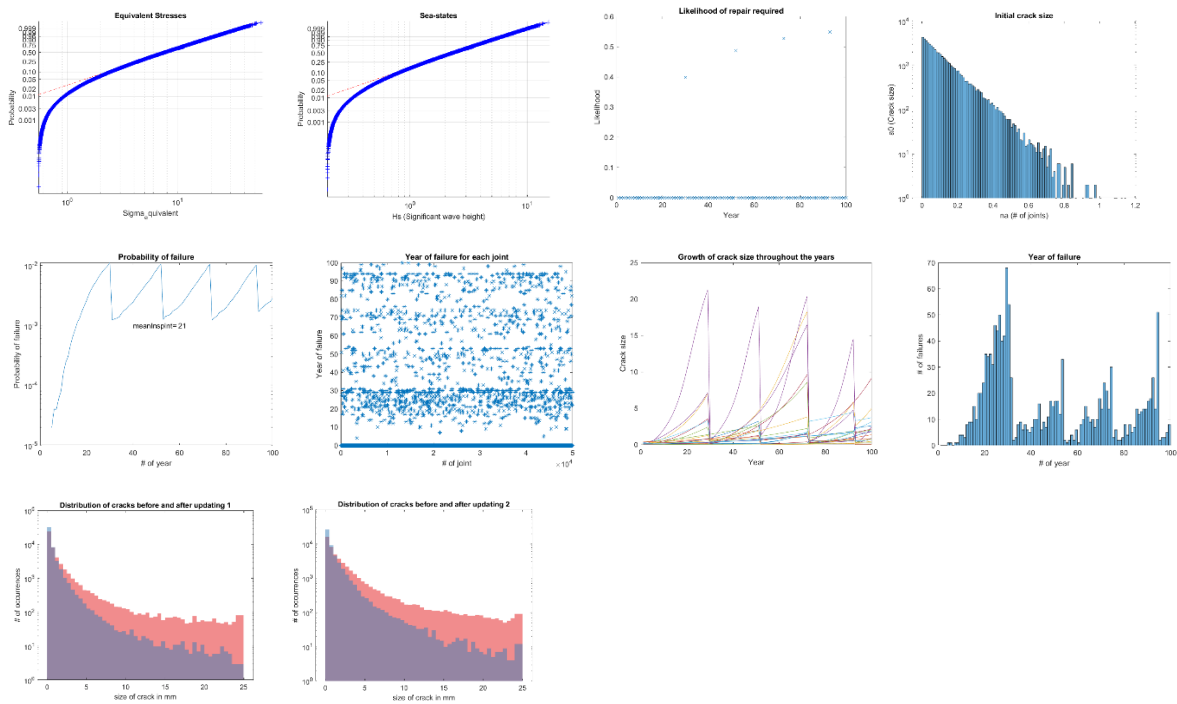
50k\_MPI\_60år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV = 0.15 og a0CoV = 0:



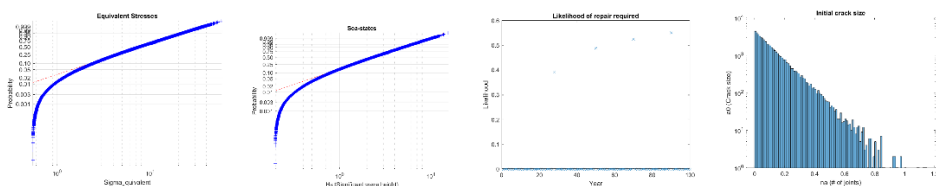
50k\_MPI\_60år\_0.01\_YCoV = 0.15, GCoV =0.15 og a0CoV =0:

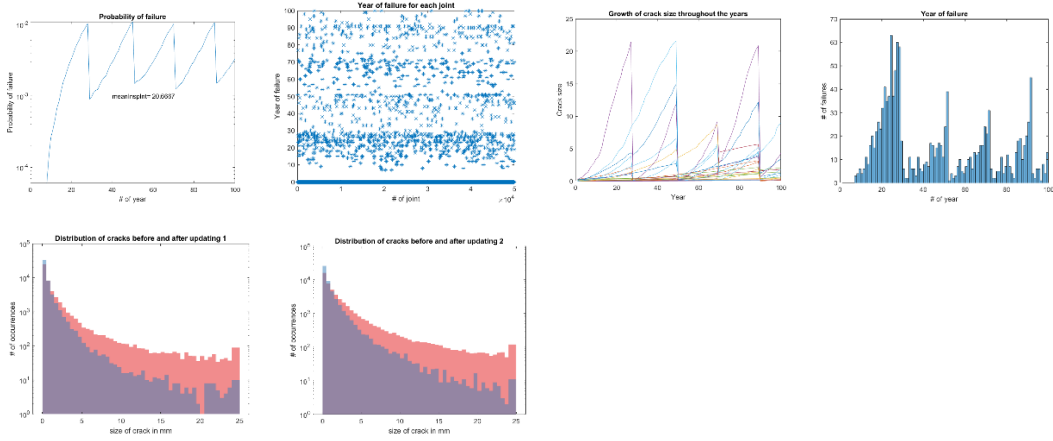


50k\_MPI\_60år\_0.01\_YCoV = 0, GCoV =0.3 og a0CoV =0:



50k\_MPI\_60år\_0.01\_YCoV = 0.1, GCoV =0.3 og a0CoV =0:





50k\_MPI\_60år\_0.01\_ YCoV = 0.15, GCoV = 0.3 og a0CoV = 0:

