Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Masteroppgave 2021 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Utmatting i strømkabel til flytende vindturbin

Johannes Skibeli Herrem
Maskin, prosess- og produktutvikling

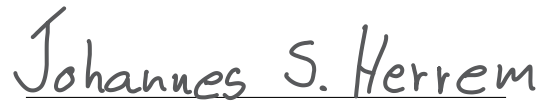
Forord

Denne masteroppgaven er skrevet av en masterstudent ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet på linjen, maskin, prosess- og produktutvikling. Oppgaven er skrevet med hjelp fra hovedveileder, professor Tor Anders Nygård fra IFE/NMBU og sekundærveileder, Marit Kvittem i SINTEF Ocean, som jeg ønsker å rette en stor takk til.

Å skrive denne masteroppgaven har vært både spennende, utfordrene og interessant. Det har gitt meg muligheten til å fordype meg i et tema som jeg selv synes er viktig.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

30. mai 2021



Johannes Skibeli Herrem

Sammendrag

Offshore vindkraft har hatt en enorm vekst de siste 20 årene, men flytende vindturbiner er fortsatt i en tidlig fase. Per 2017 var det kun tre operative vindturbiner på flytende plattform, men som i all hovedsak er brukt til testing og forskning. Fra de flytende vindturbinene henger det en strømkabel som blir utsatt for kontinuerlig dynamiske påkjenninger fra omgivelsene.

I denne masteroppgaven blir ekstremlaster og utmatting for den dynamiske strømkabelen beregnet i detalj. Hovedfokuset er å undersøke utmattingsutviklingen i armeringslaget langs strømkabelen ved å se på damage equivalent load (DEL) forholdene mellom definerte elementer i kabelen. Undersøkelsene er rettet mot den øvre og bøyde seksjonen av strømkabelen.

For å danne et grunnlag til konfigurasjon, geometri og materialegenskaper, blir utgangspunktet hentet fra en masteroppgave skrevet av Karoline Bakken (Bakken, 2019). Det blir benyttet en lazy wave konfigurasjon med oppskalerte lengder. Strømkabelen blir simulert i 21 forskjellige sjøtilstander med det aero-hydro-servo-elastic programmet 3DFloat, hengende fra den semi-submersible plattformen, Windmoor 12 MW, som er plassert ved 150 meters havdyp. Plattformbevegelsene kommer fra en medmasterstudents simulering, der forankringslinene til samme plattform med identiske sjøtilstander undersøkes.

I simuleringen er kabelkonfigurasjonen delt i elementer, der element 74, 72, 70 og 68 er valgt å fokusere på for den øvre seksjonen av strømkabelen. I bøyd seksjon er element 35, 36, 37 og 38 valgt for undersøkelsen. Spenningene i kabelen beregnes i 8 punkter i tverrsnittet, som det videre blir gjort utmattingsberegninger på. Delskadene på kabelen blir regnet om til spenningsvidder som påfører den samme skaden med 10^7 sykluser (DEL).

Resultatene viser at element 74 får de største påkjenningene med en Damage equivalent load på 77 kPa og en gradvis nedgang i spennvidden i underliggende elementer. For bøyd seksjon ligger spennvidden på bare 1/5 av de øvre elementene.

Nøkkelord – Flytende vindturbin, Dynamisk strømkabel, 3DFloat, Damage equivalent load (DEL), Utmatting

Innhold

1 Innledning **1**
1.1 Litteraturgjennomgang . . . 2
1.2 Teoretisk grunnlag . . . 4
1.2.1 Miljøforhold og miljøbelastning . . . 4
1.2.2 Statisk og dynamisk strømkabel for flytende vindturbiner . . . 7
1.2.3 Plattform til vindturbin . . . 10
1.2.4 Utmatting . . . 13
1.2.5 Rainflow Counting . . . 17
1.2.6 Miner-Palmgren . . . 17
1.2.7 Damage equivalent load (DEL) . . . 19
1.3 Beskrivelse av masteroppgaven . . . 19
1.3.1 Problemstilling . . . 20

2 Metode **21**
2.1 Utgangspunkt for strømkabelen . . . 21
2.2 Scenario for simulering av strømkabel . . . 22
2.2.1 Sjøtilstander . . . 23
2.2.2 Havstrømmer . . . 24
2.2.3 Bølger . . . 27
2.3 Beskrivelse av WINDMOOR 12 MW . . . 27
2.4 3DFloat . . . 30
2.5 Inngangsparameter for simuleringen . . . 30
2.6 Utmatting . . . 32
2.6.1 Spenninger i tverrsnitt . . . 32
2.6.2 Delskade, levetid og DEL . . . 34

3 Simuleringer og analyser **36**
3.1 Strømkabel i likevekts-tilstand . . . 36
3.2 Sensitivitetsanalyse . . . 37
3.3 Resultater fra simulering . . . 43

4 Utmattingsresultater **46**

5 Diskusjon **53**
5.1 Strømkabelens geometri og materialegenskaper . . . 53
5.2 Tvungen bevegelse og miljøforhold . . . 54
5.3 Utmatting og spenninger i strømkabel . . . 55
5.4 Videre arbeid . . . 56

6 Konklusjon **57**

Referanser **58**

Appendiks **60**

A Krefter og momenter i simuleringene **60**

A.1 Flere plott fra endelig simulering 60
A.2 Simuleringer med bølger som ikke ble brukt 102

B Spenninger i utvalgte elementer 111
B.1 Maksimal spenninger i 8 punkter i tverrsnittet for element 74 og 37 153
B.2 Maks gjennomsnittsspenninger og maks spennvidder i tverrsnittet på strømkabel i de forskjellige sjøtilstandene 160

C Platformbevegelser 175

D Komplette tabeller for havstrømmer 178

E Python koder for utmatting og spenninger i 8 punkter av tverrsnittet 181

Figurliste

1.1 Viser kumulativ og årlig offshore vindkraft installert, oppgitt i effekt (WindEurope, 2021). . . . 1
1.2 Viser marked for flytende vindturbiner per 2017 (Gao et al., 2018). . . . 2
1.3 Illustrerer en oppbygningen av en tre-kjerne kabel (Bolotinha, 2021). . . . 8
1.4 Illustrerer en trefase undervannskabel med dobbel armering (Worzyk, 2009, s.35) . . . 10
1.5 Viser noen vanlige strukturer for offshore vindturbin-plattformer (Bailey et al., 2014). . . . 11
1.6 Illustrerer bevegelsene til en flytende vindturbin med tilhørende begreper (DNV, 2018). . . . 13
1.7 Viser variasjonen i spenninger over tid. (a) viser en sinusoidal spenningskurve og (b) en kurve med tilfeldige spenninger (Callister og Rethwisch, 2014, s.305). . . . 14
1.8 Illustrerer en tid-spenningskurve med tilhørende definisjoner (Terjesen, 2020). 14
1.9 Viser et eksempel på en S-N kurve (Callister og Rethwisch, 2014, s.307) . . 15
1.10 Viser en sammenligning mellom de empiriske sammenhengene mellom utmattingsgrense og middelspenning (a - Söderberg, b - Goodman, c - Gerber, d - Morrow). . . . 17
1.11 Viser et tid-spenning plott som er snudd 90°. . . . 18
1.12 Viser tøyning-spenning plott . . . 18
2.1 viser en skjematisk tegning av scenariet som simuleres, der retninger for vind, bølger og havstrømmer er inkludert. . . . 23
2.2 Viser flyteren WINDMOOR 12 MW (Silva de Souza et al., 2021). . . . 28
2.3 Viser globalt og lokalt koordinatsystem for WINDMOOR 12 MW (Silva de Souza et al., 2021). . . . 29
2.4 Illustrerer de 8 spenningspunktene i tversnittet på elementet. . . . 33
3.1 Viser spenninger langs strømkabel når strømkabel ligger i likevekts-tilstand. 36
3.2 Viser moment og aksiale krefter langs kabelen ved likevekts-tilstand. . . . 37
3.3 Viser aksiale krefter i sjøtilstand 21 som er målt i monitor 74 i de forskjellige tilfellene. . . . 38
3.4 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21 med bølger og strøm, som er målt fra monitor i element 37 . . . 38
3.5 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21 uten bølger og strøm, som er målt fra monitor i element 37 . . . 39
3.6 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21 uten bølger med strøm, som er målt fra monitor i element 37 . . . 39
3.7 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21 med bølger uten strøm, som er målt fra monitor i element 37 . . . 40
3.8 Viser aksiale krefter i sjøtilstand 19 som er målt i monitor 74 i de forskjellige tilfellene. . . . 41
3.9 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19 med bølger og strøm, som er målt fra monitor i element 37 . . . 41
3.10 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19 uten bølger og strøm, som er målt fra monitor i element 37 . . . 42

3.11 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19 uten bølger med strøm, som er målt fra monitor i element 37 42
3.12 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19 med bølger uten strøm, som er målt fra monitor i element 37 43
5.1 Viser de underlige spenninger som oppstod i sjøtilstand 15 med gammel skjærmodul. 54
A.1 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 1. 60
A.2 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 1, som er målt fra monitor i element 35. . 61
A.3 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 1, som er målt fra monitor i element 36. . 61
A.4 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 1, som er målt fra monitor i element 37. . 61
A.5 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 1, som er målt fra monitor i element 38. . 62
A.6 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 2. 62
A.7 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 2, som er målt fra monitor i element 35. . 63
A.8 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 2, som er målt fra monitor i element 36. . 63
A.9 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 2, som er målt fra monitor i element 37. . 63
A.10 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 2, som er målt fra monitor i element 38. . 64
A.11 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 3. 64
A.12 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 3, som er målt fra monitor i element 35. . 65
A.13 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 3, som er målt fra monitor i element 36. . 65
A.14 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 3, som er målt fra monitor i element 37. . 65
A.15 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 3, som er målt fra monitor i element 38. . 66
A.16 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 4. 66
A.17 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 4, som er målt fra monitor i element 35. . 67
A.18 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 4, som er målt fra monitor i element 36. . 67
A.19 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 4, som er målt fra monitor i element 37. . 67
A.20 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 4, som er målt fra monitor i element 38. . 68
A.21 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 5. 68
A.22 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 5, som er målt fra monitor i element 35. . 69
A.23 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 5, som er målt fra monitor i element 36. . 69
A.24 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 5, som er målt fra monitor i element 37. . 69
A.25 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 5, som er målt fra monitor i element 38. . 70
A.26 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 6. 70
A.27 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 6, som er målt fra monitor i element 35. . 71
A.28 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 6, som er målt fra monitor i element 36. . 71
A.29 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 6, som er målt fra monitor i element 37. . 71
A.30 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 6, som er målt fra monitor i element 38. . 72
A.31 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 7. 72
A.32 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 7, som er målt fra monitor i element 35. . 73
A.33 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 7, som er målt fra monitor i element 36. . 73
A.34 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 7, som er målt fra monitor i element 37. . 73
A.35 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 7, som er målt fra monitor i element 38. . 74
A.36 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 8. 74
A.37 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 8, som er målt fra monitor i element 35. . 75
A.38 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 8, som er målt fra monitor i element 36. . 75
A.39 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 8, som er målt fra monitor i element 37. . 75
A.40 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 8, som er målt fra monitor i element 38. . 76
A.41 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 9. 76

A.42 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 9, som er målt fra monitor i element 35. . 77
A.43 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 9, som er målt fra monitor i element 36. . 77
A.44 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 9, som er målt fra monitor i element 37. . 77
A.45 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 9, som er målt fra monitor i element 38. . 78
A.46 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 10. 78
A.47 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 10, som er målt fra monitor i element 35. 79
A.48 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 10, som er målt fra monitor i element 36. 79
A.49 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 10, som er målt fra monitor i element 37. 79
A.50 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 10, som er målt fra monitor i element 38. 80
A.51 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 11. 80
A.52 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 11, som er målt fra monitor i element 35. 81
A.53 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 11, som er målt fra monitor i element 36. 81
A.54 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 11, som er målt fra monitor i element 37. 81
A.55 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 11, som er målt fra monitor i element 38. 82
A.56 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 12. 82
A.57 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 35. 83
A.58 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 36. 83
A.59 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 2, som er målt fra monitor i element 37. . 83
A.60 Viser bøyemomenter som er målt fra monitor i element 38. 84
A.61 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 13. 84
A.62 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 13, som er målt fra monitor i element 35. 85
A.63 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 13, som er målt fra monitor i element 36. 85
A.64 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 13, som er målt fra monitor i element 37. 85
A.65 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 13, som er målt fra monitor i element 38. 86
A.66 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 14. 86
A.67 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 14, som er målt fra monitor i element 35. 87
A.68 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 14, som er målt fra monitor i element 36. 87
A.69 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 14, som er målt fra monitor i element 37. 87
A.70 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 14, som er målt fra monitor i element 38. 88
A.71 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 15. 88
A.72 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 15, som er målt fra monitor i element 35. 89
A.73 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 15, som er målt fra monitor i element 36. 89
A.74 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 1, som er målt fra monitor i element 37. . 89
A.75 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 15, som er målt fra monitor i element 38. 90
A.76 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 16. 90
A.77 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 16, som er målt fra monitor i element 35. 91
A.78 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 16, som er målt fra monitor i element 36. 91
A.79 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 16, som er målt fra monitor i element 37. 91
A.80 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 16, som er målt fra monitor i element 38. 92
A.81 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 17. 92
A.82 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 35. 93
A.83 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 36. 93
A.84 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 37. 93
A.85 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 38. 94
A.86 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 18. 94
A.87 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 35. 95
A.88 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 36. 95

A.89 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 37. 95
A.90 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 38. 96
A.91 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 19. 96
A.92 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 35. 97
A.93 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 36. 97
A.94 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 37. 97
A.95 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 38. 98
A.96 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 20. 98
A.97 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 20, som er målt fra monitor i element 35. 99
A.98 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 20, som er målt fra monitor i element 36. 99
A.99 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 20, som er målt fra monitor i element 37. 99
A.100 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 20, som er målt fra monitor i element 38. 100
A.101 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 21. 100
A.102 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21, som er målt fra monitor i element 35. 101
A.103 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21, som er målt fra monitor i element 36. 101
A.104 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21, som er målt fra monitor i element 37. 101
A.105 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21, som er målt fra monitor i element 38. 102
A.106 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 12. 102
A.107 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 35. 103
A.108 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 36. 103
A.109 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 37. 103
A.110 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 38. 104
A.111 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 17. 104
A.112 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 35. 105
A.113 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 36. 105
A.114 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 37. 105
A.115 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 38. 106
A.116 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 18. 106
A.117 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 35. 107
A.118 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 36. 107
A.119 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 37. 107
A.120 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 38. 108
A.121 Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 19. 108
A.122 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 35. 109
A.123 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 36. 109
A.124 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 37. 109
A.125 Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 38. 110
B.1 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 1. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 111
B.2 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 1. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 112
B.3 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 2. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 113
B.4 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 2. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 114
B.5 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 3. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 115

B.6 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 3. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 116
B.7 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 4. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 117
B.8 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 4. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 118
B.9 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 5. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 119
B.10 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 5. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 120
B.11 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 6. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 121
B.12 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 6. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 122
B.13 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 7. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 123
B.14 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 7. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 124
B.15 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 8. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 125
B.16 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 8. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 126
B.17 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 9. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 127
B.18 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 9. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 128
B.19 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 10. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 129
B.20 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 10. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 130
B.21 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 11. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 131
B.22 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 11. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 132
B.23 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 12. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 133
B.24 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 12. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 134
B.25 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 13. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 135
B.26 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 13. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 136
B.27 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 14. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 137
B.28 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 14. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 138

B.29 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 15. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 139
B.30 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 15. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 140
B.31 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 16. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 141
B.32 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 16. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 142
B.33 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 17. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 143
B.34 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 17. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 144
B.35 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 18. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 145
B.36 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 18. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 146
B.37 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 19. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 147
B.38 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 19. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 148
B.39 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 20. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 149
B.40 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 20. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 150
B.41 Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 21. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 151
B.42 Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 21. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet. 152
C.1 Viser plott for 22 sjøtilstander i X, Y, Z. 175
C.2 Viser plott for 22 sjøtilstander i X, Y, Z. 176
C.3 Viser plott for sjøtilstander i X, Y, Z. 177
D.1 Skjermbilde av Excel ark for beregning av havstrømmer ved overflaten. . . 178
D.2 Skjermbilde av Excel ark for strømningsprofil av havstrømmer ved 4, 8 og 10 m/s. 179
D.3 Skjermbilde av Excel ark for strømningsprofil av havstrømmer ved 14, 17 og 23,5 m/s. 180
D.4 Skjermbilde av Excel ark for strømningsprofil av havstrømmer ved 38, og 44,5 m/s. 181

Tabelliste

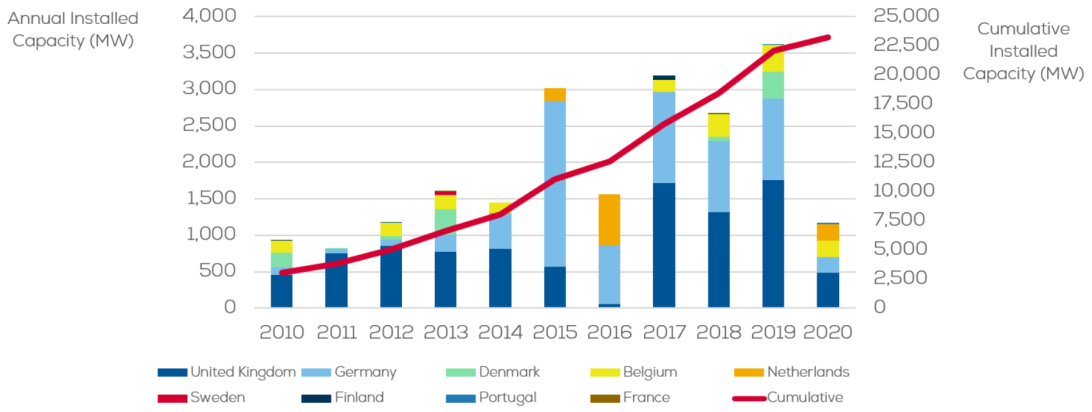
1.1 Viser egenskaper til en strømkabel ved noen armeringskonsepter (Worzyk, 2009). 9
2.1 Viser målene som benyttes i konfigurasjonen til Bakken. 21
2.2 Viser oppskalerte mål fra Bakken's konfigurasjon. 22
2.3 Viser mekaniske egenskaper til strømkabel. 22
2.4 Dimensjoner i kabeltverrsnitt 22
2.5 Viser sjøtilstandene som simuleres. 24
2.6 Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $4m/s$ 25
2.7 Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $8m/s$ 25
2.8 Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $10,6m/s$ 25
2.9 Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $14m/s$ 26
2.10 Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $17m/s$ 26
2.11 Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $23,5m/s$ 26
2.12 Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $38m/s$ 26
2.13 Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $44,5m/s$ 27
2.14 Inngangsparameter for bølger i 3DFloat. 27
2.15 Viser plattformdimensjoner til vindturbinen (Silva de Souza et al., 2021) . 29
3.1 Viser maksimal spenningsvidde og maksimal gjennomsnittsspenning i de forskjellige sjøtilstandene for element 74. 44
3.2 Viser maksimal spenningsvidde og maksimal gjennomsnittsspenning i de forskjellige sjøtilstandene for element 37. 44
4.1 Viser resultater for skaden for hver sjøtilstand i element 74-68, samt total skade og DEL for alle sjøtilstander. D - Skade [skade/3599,45s]. 46
4.2 Viser prosentvis bidrag til totalskade i element 74, 72, 70 og 68 når sannsynlighet for inntreffelse av sjøtilstandene er inkludert. 47
4.3 Viser prosentvis bidrag til totalskade i element 74, 72, 70 og 68 når sjøtilstandene vektes likt 48
4.4 Viser resultater for skaden for hver sjøtilstand i element 38-35, samt total skade og DEL for alle sjøtilstander. D - Skade [skade/3599,45s]. 49
4.5 Viser prosentvis bidrag til totalskade i element 35, 36, 37 og 38 når sannsynlighet for inntreffelse av sjøtilstandene er inkludert. 50
4.6 Viser prosentvis bidrag til totalskade i element 35, 36, 37 og 38 når sjøtilstandene vektes likt. 51
4.7 Viser forholde til DEL mellom element 74 og elementene nedover strømkabelen. 52
B.1 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 1. 153
B.2 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 2. 153
B.3 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 3. 153
B.4 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 4. 154
B.5 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 5. 154

B.6 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 6. 154
B.7 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 7. 155
B.8 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 8. 155
B.9 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 9. 155
B.10 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 10. 156
B.11 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 11. 156
B.12 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 12. 156
B.13 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 13. 157
B.14 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 14. 157
B.15 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 15. 157
B.16 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 16. 158
B.17 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 17. 158
B.18 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 18. 158
B.19 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 19. 159
B.20 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 20. 159
B.21 Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 21. 159

1 Innledning

Et av FNs bærekraftmål er å stoppe klimaendringene. For å få til dette må vi begrense den globale gjennomsnittstemperaturen til 1,5 °C (FN-sambandet, 2021). Dette tvinger frem forskning på bedre fornybare energiløsninger, slik som offshore vindkraft.

Offshore vindkraft har hatt en enorm vekst de siste 20 årene. I 2019 ble det installert 3,6 GW ekstra kapasitet, som satte ny rekord i Europa, illustrert i figur 1.1 (WindEurope, 2021).



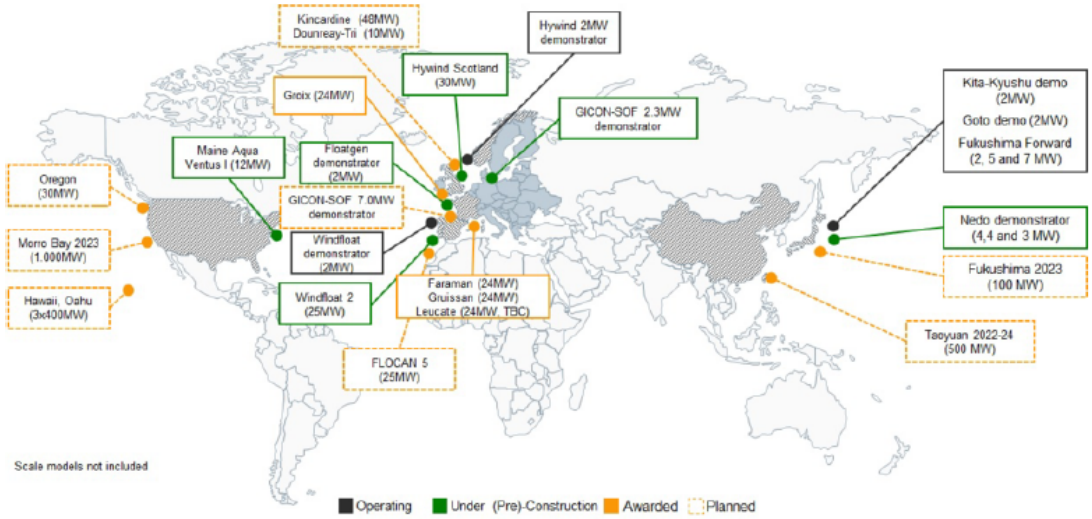
Figur 1.1: Viser kumulativ og årlig offshore vindkraft installert, oppgitt i effekt (WindEurope, 2021).

Europeiske land har planlagt å sammen levere 111 GW av offshore vindkraft innen 2030, men dette krever store investeringer i det elektriske kraftnettverket, offshore, samt forsterke eksisterende kraftnett på land (WindEurope, 2021).

Den største andelen av offshore vindturbiner er fastmontert på havbunden. 80% av all offshore vindresurser er lokalisert der havdypet er på 60 meter eller mer, hvor de tradisjonelle fastmonterte vindturbinene ikke lengre er økonomisk attraktive (WindEurope, 2017). Dette gjør at interessen for flytende vindturbiner er svært høy.

Flytende vindturbiner er fortsatt i en tidlig fase. I 2017 var det kun tre operative flytende vindturbiner, vist i figur 1.2. Dette er single demoturbiner som hovedsakelig er brukt for testing og forskning. Per dags dato er det kun HYWIND Scotland som er en operativ flytende vindpark, men det er flere igangsatte og planlagte prosjekter.

I olje og gass sektoren er det mye forskning rundt levetiden og fleksibiliteten til den såkalte



Figur 1.2: Viser marked for flytende vindturbiner per 2017 (Gao et al., 2018).

navlestrengen (umbilicals), men det er vesentlig mindre forskning på strømkabelen for de flytende vindturbinene. Kabelen blir kontinuerlig utsatt for dynamiske påkjenninger, som nettopp denne masteroppgaven har lagt fokus på.

1.1 Litteraturgjennomgang

Litteratursøk er gjort i forbindelse med studien. I masteroppgaven til (Bakken, 2019) blir det beskrevet at strømkabelen er et svært viktig element i utviklingen av flytende vindturbiner. Kabelen er eksponert for hydrodynamiske laster og tvangsbevegelser fra den flytende vindturbinen, som fører til utmatting og begrenser kabelens levetid. Masteroppgaven har tatt utgangspunkt i flyteren OO-Star fra prosjektet Life50+, som er designet av Dr. Techn. Olav Olsen. Den globale modelleringen var gjennomført i SIMA RIFLEX bestående av hele den dynamiske strømkabelen med 3 elektriske ledere på 95 mm^2. Armeringen i kabelen bestod av 63 stålfiber i det innerste laget og 71 i det ytterste, med en leggevinkel på 20°. Den globale modellen var delt inn i 3 deler med 2 forskjellige tverrsnitt, der del 1 var den nederste delen koblet til havbunnen, del 2 var oppdriftsdel og del 3 var delen som ble festet til havoverflaten. Hovedfokuset med den globale analysen var å undersøke kontaktmekanismene i tverrsnittet av kabelen, fremfor en full utmattingsanalyse for hele strømkabelen. Analysen ble gjennomført ved å eksponere modellen for 160 sjøtilstander med én times simulering. Vinkelen mellom flyteren og kabelen, samt spenningen i det øvre elementet ble omgjort til tidsserier og talt ved bruk av Rainflow tellealgoritme. Syklusene

ble omorganisert til 15 lasttilfeller med dynamisk vinkel og tilhørende spenning. Dette ble videre brukt i en lokal modell av strømkabelen. Den lokale modellen ble analysert ved hjelp av et dataprogram, utviklet av professor Svein Sævik, kalt Bflex. Modellen inkluderte kun den øverste delen av strømkabelen, samt en bøyeavstiver, for å lette overgangen mellom flyteren og den dynamiske kabelen. Det ble antatt at den øverste delen av kabelen ville oppleve de største mekaniske påkjenningene og ble derfor valgt i beregninger for levetid. Noen av funnene som ble gjort var at problemene vil oppstå i det innerste laget og at levetiden på kobberlederne er styrt av lokal friksjon i tversnittet. Levetiden for denne spesifikke kabelen ble beregnet til 267 år, med en sikkerhetsfaktor på 10.

(Bakken, 2019) fant også ut at levetiden på kabelen er svært sensitiv med valg av SN-kurve. Det ble regnet ut to levetider med SN-kurve fra en artikkel skrevet av (Karlsen, 2010), der der levetiden ble redusert med en faktor på 100.

I artikkel (Karlsen, 2010) ble det studert hvilke parametere som er kritiske i utmattingsberegninger på en dynamisk strømkabel. Karlsen beskriver at det har blitt gjort forsøk på utmattingstester med aksial belastning, som har basert seg på Gerber eller Goodman transformasjon, men dette har ikke vært suksessfullt. Grunnet stress konsentrasjon i "trellis"kontaktpunkter er "fretting"vurdert til å være en dominerende egenskap i utmattingsberegninger. Friksjonskrefter øker med leggevinkel, aksiallast og friksjonskoeffisient. Friksjonskreftene oppleves ikke bare i kontakt mellom lederene, men også i kontakt med vannblokkeringslaget, som er nødvendig i undervannskabler. Karlsen beskriver også at SN-kurvene som ble laget var uforventet forskjellige. De mekaniske egenskapene på de to kablene som ble testet, økte ved redusert tverrsnitt. Dette forklares med at effekten av plastisk deformasjon har vært for signifikant for kalkulering av en korrekt helning. Det er tydelig at effekten av plastisk deformasjon ikke skal ignoreres når det etableres en utmattingstestprosedyre for strømleder (Karlsen, 2010).

Et annet prosjekt, som er utviklet under *International Energy Agency* (IEA), er *Offshore Code Comparison Collaboration* (OC3) og *Offshore Code Comparison Collaboration, Continuation* (OC4). I prosjektet er veileder, professor Tor Anders Nygaard, delaktig med modelleringsverktøyet, 3Dfloat, som brukes i denne masteroppgaven. Prosjektet OC4 er en videreutvikling av OC3, der hensikten var å verifisere nøyaktigheten av vindturbinens dynamiske simuleringskoder. I artikkelen (Robertson et al., 2014) er resultatene for fase 2

i OC4 prosjektet fremstilt, som inneholder en 5 MW vindturbin med en semisubmersible platform (DeepCwind). Det ble funnet at forskjellene i de hydrodynamsike teoriene var mer betydelig blant modelleringsverktøyene enn de aerodynamsike og strukturelle teoriene. Det konkluderes blant annet med at Morison-only løsninger gir lignende resultater, men gir større variasjon i pitch. Disse små forskjellene kan bli et problem i utmattingsanalyser, som ikke ble gjennomført i dette prosjektet. Det ble også konkludert at laster i forankringssystemet avviker betydelig mellom koder som bruker en kvasistatisk modell og de som brukte dynamiske modell. Dette hadde ikke noen stor innvirkning på systemets dynamikk, men det vil være svært viktig i en analyse på utmatting og spenninger i forankringsliner. Modelleringsverktøyet 3Dfloat benytter dynamsik/finite element (Robertson et al., 2014).

I rapporten (Silva de Souza et al., 2021) av SINTEF Ocean undersøkes forankringssystemet til en semi-submersible plattform, som bærer en 12 MW vindturbin. Hovedfokuset med dette prosjektet (WINDMOOR) var å forbedre forståelsen for forankringsdesign til flytende vindturbiner. Rapporten inneholder også en detaljert beskrivelse av plattform med tilhørende vindturbin. I denne masteroppgaven er bevegelsene fra denne flyteren brukt i simuleringer og analyser på strømkabelen. Flyteren er beskrevet i seksjon 2.3. I forskningsprosjektet benyttes modelleringsverktøyet SIMA, med underliggende programmer som SIMO og REFLEX. Prosjektet ledet til analyser på platformens hydrodynamiske bevegelser, samt design av den 12 MW vindturbinen (Silva de Souza et al., 2021).

1.2 Teoretisk grunnlag

I denne seksjonen blir relevant teori beskrevet. Seksjonen tar for seg miljøforhold som er inkludert i senere simuleringer samt beskrivelse av oppbyggingen til en dynamisk undervannskabel. Tilslutt blir utmattingsteori grundig gjennomgått.

1.2.1 Miljøforhold og miljøbelastning

For offshore konstruksjoner er det bølger og vind som gir de største påkjenningene. Det første steget i en rasjonell dynamisk analyse, for å finne laster på en offshore konstruksjon, er å sette miljøforholdene realistiske (Karimirad, 2014).

Bølger og vind oppstår ved tilfeldigheter, som gjør det vanskelig og nøyaktig kunne beregne dynamiske påkjenninger på konstruksjonene. Det er derfor ønskelig at disse tilfeldighetene gjenskapes så nøyaktig som mulig for å beregne de hydro-aero-dynamiske lastene. Bølgene og vinden er stokastiske variabler der størrelse, retning og periode varierer med tiden. Vinden oppstår ved at solens energi får luftmolekylene til å bevege seg, som videre forårsaker vindgenererte bølger og strømninger grunnet ruheten til vannets overflate (Karimirad, 2014). Ettersom fokuset i denne oppgaven er på strømkabelen vil strømninger bli vektlagt i denne seksjonen.

Havstrømmer

Havstrømmer kommer i flere former. De vanligste er:

- Vindgenererte strømmer
- Tidevannsstrømmer
- Sirkulasjonsstrømmer
- sløyfe- og virvelstrømmer
- solitonstrømmer
- Langlandsstrømmer

Havstrømmer som er inkludert i denne oppgaven vind- og tidevannsstrømmer.

Vindgenererte strømmer kan skrives som en lineær profil, som er gitt ved

$$v_{c,vind}(z) = v_{c,vind}(0)\left(\frac{d_0 + z}{d_0}\right) \qquad for \quad -d_0 \leq z \leq 0 \tag{1.1}$$

Der $v_{c,vind}(0)$ er vindgenerert strømning ved havoverflate, z er distanse fra havoverflate (positiv oppover) og d_0 er referansedybde for vindgenerert strømning (DNV, 2010).

$v_{c,vind}(0)$ kan beregnes med

$$v_{c,vind}(0) = kU_{snitt,10m} \tag{1.2}$$

Der k er en konstant som vanligvis er $0,015 - 0,03$ og $U_{snitt,10m}$ er gjennomsnittsvindstyrke på høyden 10 meter som anbefalt fra DNV-RP-C205. Gjennomsnittsvindstyrke $U_{snitt,10m}$ kan beregnes med følgende ligning:

$$U(z) = U_{hor,vind}\left(\frac{z}{H}\right)^{\alpha} \tag{1.3}$$

Der α er en eksponent som beskriver ruheten på terrenget.

Når detaljerte målinger ikke er tilgjengelig kan tidevannsstrømninger kan beregnes med

$$v_{c,tide}(z) = v_{c,tide}(0)\left(\frac{d+z}{d}\right)^{\alpha} \qquad for \quad z \leq 0 \tag{1.4}$$

der det antas å være ensrettet strøm. α er en eksponent som vanligvis er lik 1/7 ifølge DNV-RP-C205.

Total strømning med z høyde blir da

$$v_c(z) = v_{c,vind}(z) + v_{c,tide}(z) \tag{1.5}$$

der kun vindgenerert- og tidevannsstrøm er tatt hensyn til.

Pierson-Moskowitz og JONSWAP bølgespekter

Kortsiktige stasjonære irregulære sjøtilstander kan beskrives av et bølgespekter. Dette er en funksjon som beskriver den vertikale havoverflatebevegelsen. Bølgespekteret kan bli gitt i tabellform, eller med en parametrisert analytisk formel. De mest passende bølgespekterne er geografisk avhengig med lokal batymetri og sjøtilstandens alvorlighetsgrad (DNV, 2010).

Pierson-Moskowitz (PM) og JONSWAP bølgespekter er ofte brukt for vindutsatte hav. PM-spekteret er oprinnelig utviklet for et fullt utviklet hav. JONSWAP er en utvidelse av PM og beskriver et begrenset hav (DNV, 2010).

Pierson-Moskowitz spekteret $S_{PM}(\omega)$ er gitt ved

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \cdot H_S^2 \omega_P^4 \cdot \omega^{-5} exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_P}\right)^{-4}\right) \tag{1.6}$$

der

ω - Bølgens vinkelfrekvens.

H_s - Signifikant bølgehøyde.

ω_P - Vinkel toppfrekvens ($2\pi/T_p$).

T_p - Bølgeperiode.

JONSWAP-spekteret er en modifisert utgave av PM og er gitt ved

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{exp\left[-0{,}5\left(\frac{\omega-\omega_P}{\sigma\omega_P}\right)^2\right]} \tag{1.7}$$

der

γ - Toppformparameter.

σ - Spekter bredde parameter.

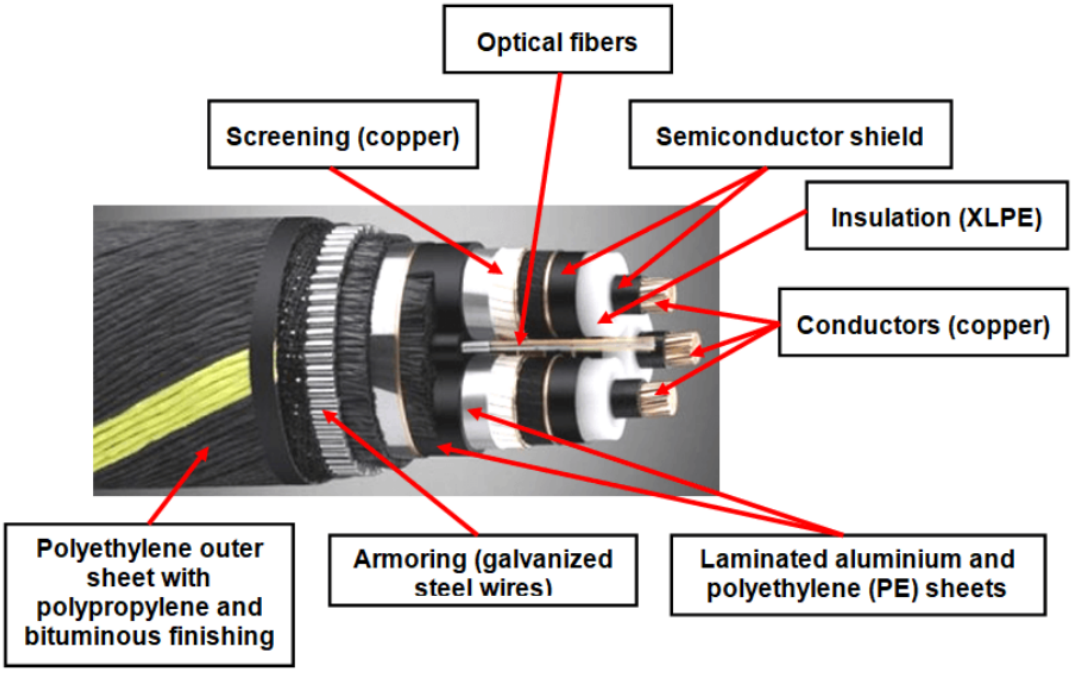
$A_\gamma = 1 - 0,287ln(\gamma)$ - Er en normaliserende faktor.

1.2.2 Statisk og dynamisk strømkabel for flytende vindturbiner

Sjøkabler har eksistert i århundre, men bruken har endret seg gjennom de siste tiårene. I starten ble sjøkabelen brukt primært til offshore-anlegg som fyrtårn, sanitetsskip osv. På nåværende tidspunkt brukes sjøkabler til å overføre elektrisk kraft til oljeplattformer og offshore vindparker, som leverer grønn energi til kraftnettet på land.

Det finnes mange forskjellig type design for en sjøkabel, men denne seksjonen tar kun for seg de vanligste typene som brukes i forbindelse med elektrisk kraftoverføring for flytende vindturbiner. Den generelle oppbygningen av kabelen er illustrert i figur 1.3.

Elektrisk leder: Den elektriske lederen er laget av kobbel eller aluminium. Selv om



Figur 1.3: Illustrerer en oppbygningen av en tre-kjerne kabel (Bolotinha, 2021).

aluminium er et mindre kostbart alternativ er kobber benyttet i de aller fleste tilfellene grunnet god konduktivitet. Kobber krever et mindre tverrsnitt for elektrisk overføring, som igjen fører til redusert mengde av de ytre materialene. Aluminium kan i noen tilfeller være fordelaktig hvis korrosjon er et problem, men hvis korrosjon er et problem har sjøvann allerede penetrert de ytre lagene og kablene må repareres eller erstattes (Worzyk, 2009, s.10).

Isolator: Dette er et viktig element i design av sjøkabelen. Isolatorsystemet må være jevn og ren, samt mekanisk robust og godt resistent mot temperatur og ha lang levetid. Det vanligste materialet for denne type kabel er polyetylen som er et hydrokarbon med en lang kjede av $CH_3 - (CH_2)_n - CH_3$. Det finnes flere varianter innenfor denne gruppen, men den mest brukte er Cross-linked polyethylene (XLPE). Denne varianten klarer å motstå temperaturer opp mot 300 °C og spenninger på over 500 kV (Worzyk, 2009, s. 17-19) (Nexans, 2021).

Vannblokkeringslag: Den dielektriske isolasjonen må beskyttes mot aggresjon for å vedlikeholde den dielektriske styrken. De fleste høyspenningskablene har metalliske blokkeringslag som eksempelvis, aluminium, bly og kobber, mens med mediumspenningskabler er dette mindre viktig grunnet lavere elektriske påkjenninger.

Samtidig beskytter det metalliske laget også godt mot såkalt Teredo skipormer, som ikke bare spiser på gamle sunkne skip, men også undervannskabler. Kobber anses å være godt egnet for dynamiske kabler grunnet god motstand for utmatting, som skyldes de duktile egenskapene (Worzyk, 2009, s.30-33).

Armering: Det mest fremtredende elementet i kabelen er armeringen, som sørger for strekkstabilitet og mekanisk beskyttelse. Armeringen må nøye designes ut i fra bruksområdet, der hver seksjon i kabelen har helt spesifikke egenskaper. Design av armeringen har stor innvirkning på kabelens mekaniske egenskaper, som eksempelvis bøyestivhet og torsjonsstivhet. Med spiralformet armering har aksiale krefter en direkte sammenheng med torsjonskreftene, ved at det tvinges på en vridning i kabelen. En lang leggelengde (pitch) på stålfiberene går nesten parallelt langs kabelens akse og kan ta opp aksiale krefter bedre, uten å bygge opp for store torsjonskrefter. I en tung og lang strømkabel er aksiale krefter meget store. Ved økt pitch øker også bøyestivheten til kabelen, som er uønsket

I tabell 1.1 vises noen sammenhenger for hvordan egenskapene til kabelen påvirkes utifra pitch til armeringsfiberene (Worzyk, 2009, s.33-34).

Tabell 1.1: Viser egenskaper til en strømkabel ved noen armeringskonsepter (Worzyk, 2009).

Egenskaper til en én-kjerne strømkabel med ettlags armering.		
	Lang pitch	Kort pitch
Motstå aksiale krefter	++	0
Bøyestivhet	-	+
Torsjonsstivhet	+	0
Sannsynlighet for kveiling av kabel	++	+

Egenskaper til en én-kjerne strømkabel med tolags armering.				
	Enveis legging		Mot-spiralformet legging	
	Lang pitch	Kort pitch	Lang pitch	Kort pitch
Motstå aksiale krefter	+	-	++	0
Bøyestivhet	-	+	-	+
Sannsynlighet for kveiling av kabel	+	0	-	-

I mange tilfeller benyttes dobbel armering. Dette gir mye bedre beskyttelse mot ekstærne krefter enn ett lags. Et eksempel på 2-lags armering er illustrert i figur 1.4.

Figur 1.4: Illustrerer en trefase undervannskabel med dobbel armering (Worzyk, 2009, s.35)

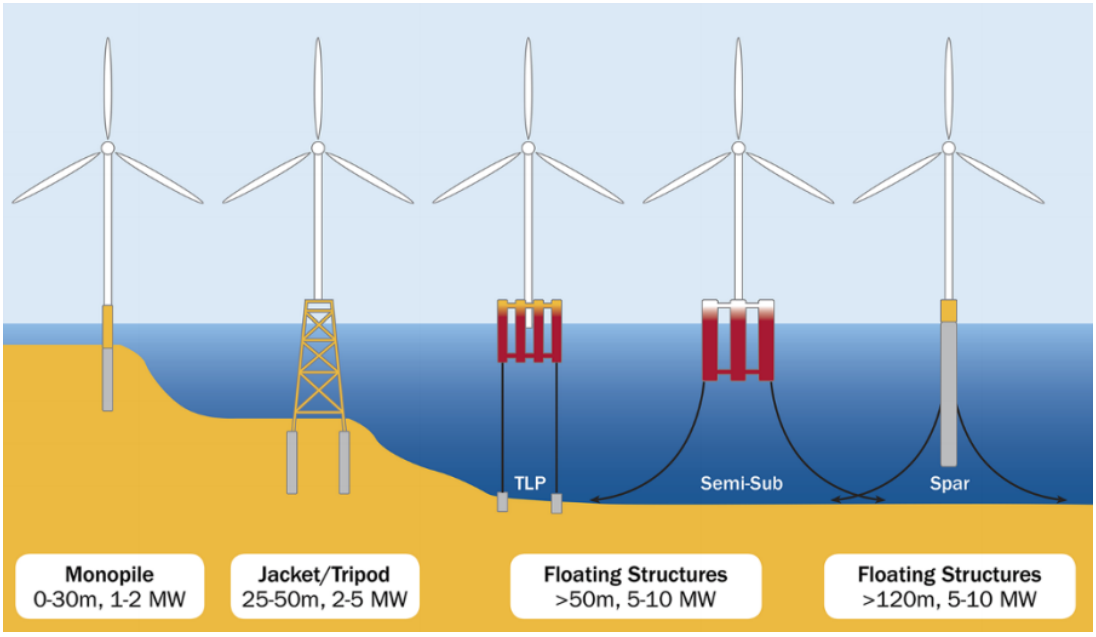
1.2.3 Plattform til vindturbin

For offshore vind er det et mangfold av ulike strukturer. De vanligste typene, illustrert i figur 1.5, er: *Monopile*, *Jacket/Tripod*, *Tension Leg Platform (TLP)*, *semi-submersible* og *Spar Buoy*. De tre sistnevnte er flytende strukturer/plattformer (Bailey et al., 2014).

De flytende strukturene brukes i vanndyp som er mer enn 50 m og kan potensielt brukes opp til 700 m dybde.

TLP: Er en struktur som har svært høy oppdrift der søyler er festet med anker på havbunnen. Noen fordeler med denne strukturen er (IRENA, 2016):

- Lavere masse.



Figur 1.5: Viser noen vanlige strukturer for offshore vindturbin-plattformer (Bailey et al., 2014).

- Mindre påvirket av bølgeindusert bevegelser.
- Kan monteres på land.
- Kan brukes på 50-60 meters vanndyp.

Og ulempene er (IRENA, 2016):

- Vanskeligere å holde stabile under transport og installasjon.
- Noe usikkerhet rundt påvirkningen av høye dynamiske frekvenser på turbinen.
- Høyere installasjonskostnader på forankringsliner.

Delvis nedsenket (semi-sub): Et antall søyler som er delvis nedsenket, som holdes på plass av forankringsliner. Noen fordeler med denne strukturen er (IRENA, 2016):

- Kan monteres på land.
- Fullt utstyrte plattformer (inkludert turbin) kan flyte med trekk under 10 meter ved transport.
- Transport til stedet kan konvensjonelle slepebåter brukes.
- Lavere installasjonskostnader på forankringsliner.

Og ulempene er (IRENA, 2016):

- Mer påvirket av bølgeindusert bevegelser.
- Har en tendens til å bruke mer materiale og større strukturer sammenlignet med andre.
- Kompleks fabrikasjon sammenlignet med andre konsepter, spesielt Spar-bøyer.

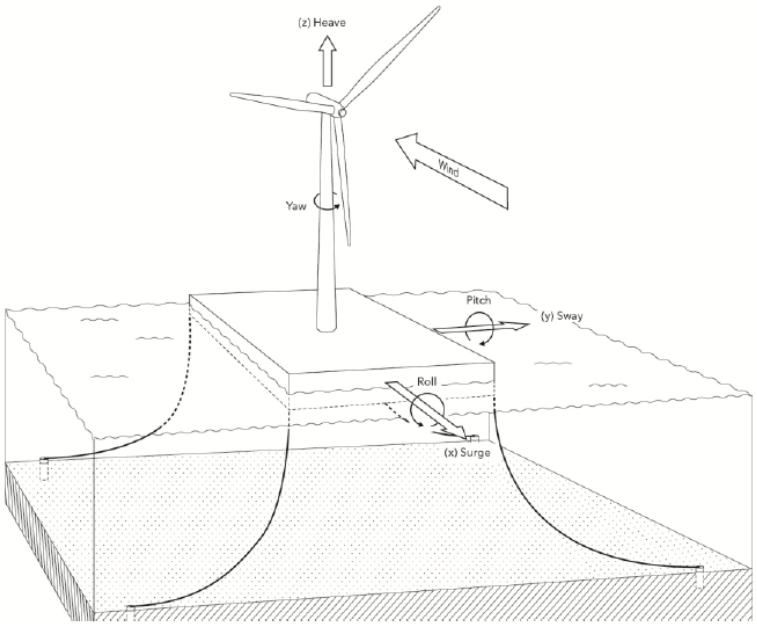
Spar-bøye (Spar): Et sylinder der størsteparten av arealet er nedsenket i vann. Fundamentet holdes på plass ved hjelp av forankringsliner. Noen fordeler med denne strukturen er (IRENA, 2016):

- Mindre påvirket av bølgeindusert bevegelser.
- Enkelt design
- Lave installasjonskostnader på forankringsliner.

Og ulempene er (IRENA, 2016):

- Offshoreoperasjonene krever tungløftsfartøy.
- Krever en vanndybde på minst 100 meter.

En flytende vindturbin kan bevege seg i alle retninger. I den forbindelse er det definert begreper for de ulike bevegelse. Bevegelsene er illustrert i figur 1.6 (DNV, 2018).



Figur 1.6: Illustrerer bevegelsene til en flytende vindturbin med tilhørende begreper (DNV, 2018).

Surge - Bevegelse langs x-aksen.

Sway - Bevegelse langs y-akse.

Heave - Bevegelse lang z-akse.

Roll - Rotasjon om x-akse.

Pitch - Rotasjon om y-akse.

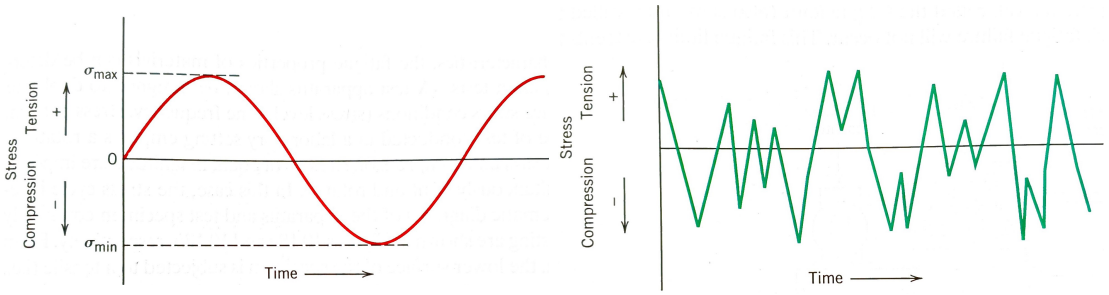
Yaw - Rotasjon om z-akse.

1.2.4 Utmatting

Utmatting er en skade i strukturer/materialer som forårsakes av dynamisk og vekslende påkjenninger, eksempelvis en dynamisk strømkabel. Dette kan føre til at brudd i strukturen skjer ved en betydelig lavere strekkfasthet og flytegrense. Utmatting er derfor en viktig faktor i dimensjoneringsprosessen til elementer som opplever slike påkjenninger (Callister og Rethwisch, 2014, s.304-306).

Påkjenningene kommer i form av strekk/trykk spenninger, bøying eller torsjon, med enten

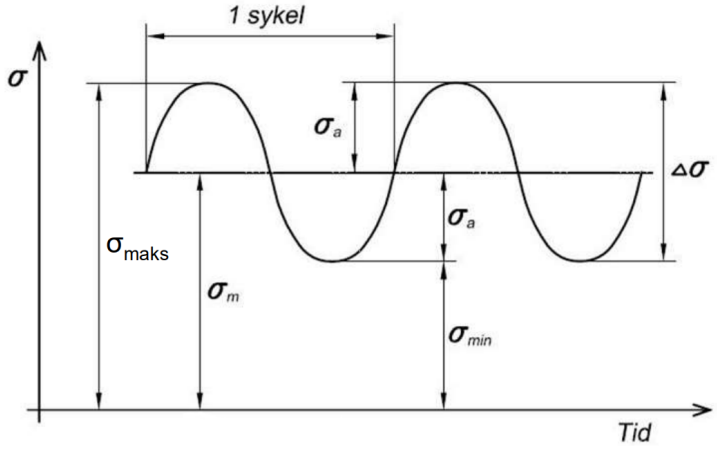
en symmetrisk- eller tilfeldig kurve, som illustrert i figur 1.7 (Callister og Rethwisch, 2014, s.304-306).



(a) Symmetrisk **(b)** Tilfeldig

Figur 1.7: Viser variasjonen i spenninger over tid. (a) viser en sinusoidal spenningskurve og (b) en kurve med tilfeldige spenninger (Callister og Rethwisch, 2014, s.305).

I beregninger av utmattingslevetid er spenningsvidden, $\Delta\sigma$, en svært viktig parameter. Spenningsvidden er det dobbelte av spenningsamplituden, σ_a, og middelspenningen er gjennomsnittet til kurven. Definisjonene er illustrert i figur 1.8 (Terjesen, 2020).



Figur 1.8: Illustrerer en tid-spenningskurve med tilhørende definisjoner (Terjesen, 2020).

Spenningsvidden er gitt ved

$$\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \tag{1.8}$$

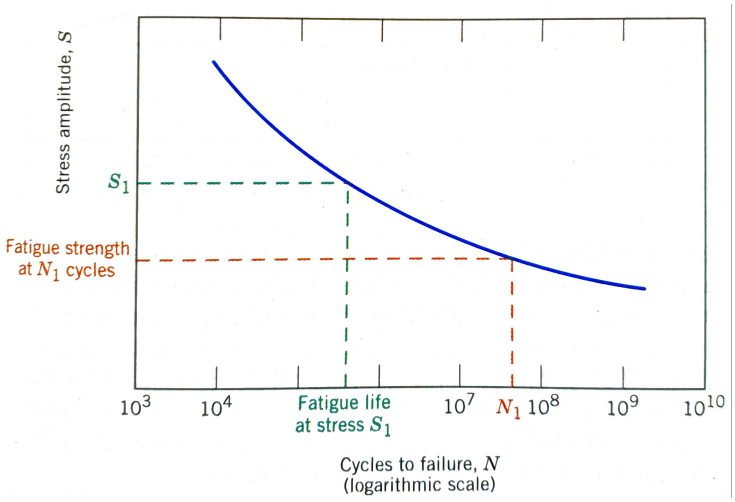
Spenningsamplituden blir da

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \tag{1.9}$$

og middelspenning er

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \tag{1.10}$$

For å beregne utmattingslevetid til et komponent, benyttes S-N kurve, eller også kalt Wöhlerkurve, som illustrert i figur 1.9. Ved å lese av denne kurven kan man estimere hvor mange sykluser et gitt komponent vil tåle før brudd. SN-kurver er er fremstilt ved laboratorieforsøk og hvert materiale har sin egen SN-kurve. Mange SN-kurver konvergerer mot en gitt spenning, som vil være den såkalte utmattingsgrensen, σ_D. Ved amplitudespenninger under denne grensen vil komponenten vare "uendelig"mange sykluser (Callister og Rethwisch, 2014).



Figur 1.9: Viser et eksempel på en S-N kurve (Callister og Rethwisch, 2014, s.307)

Vanligvis er en rett linje fra punkt til utmattingsgrense i et log-log diagram et godt estimat for SN-kurven. Denne metoden kales for Juvinall's metode og brukes når det ikke foreligger utmattingsdata for materialet. Det ble foreslått av Basquin i 1910 at SN-kurven kunne tegnes som en rett linje i en dobbeltlogaritmisk diagram, som gjør at amplitudespenningen kan skrives som

$$\sigma_a = A \cdot N^B \tag{1.11}$$

Der A er en konstant som representerer verdien til σ_a, og B beskriver stigningstallet til den dobbeltlogaritmiske SN-kurven (Terjesen, 2020).

Spenningsvidden kan uttrykkes ved

$$N = C \cdot \Delta\sigma^{-m} \tag{1.12}$$

Der konstantene m og C kan finnes ved utmattingsdata til materialet. Dette uttrykket kan også transformeres til en enkel regresjonsmodell ved å ta logaritmene. Utrykket blir da

$$\log N = \log C - m \cdot \log \Delta\sigma \tag{1.13}$$

Opp gjennom tidene har det blitt foreslått følgende empiriske sammenhenger mellom utmattingsgrense og middelspenning (Terjesen, 2020):

Söderberg (USA, 1930),

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_D} + \frac{\sigma_m}{R_e} = 1 \tag{1.14}$$

Goodman (England, 1899),

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_D} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1 \tag{1.15}$$

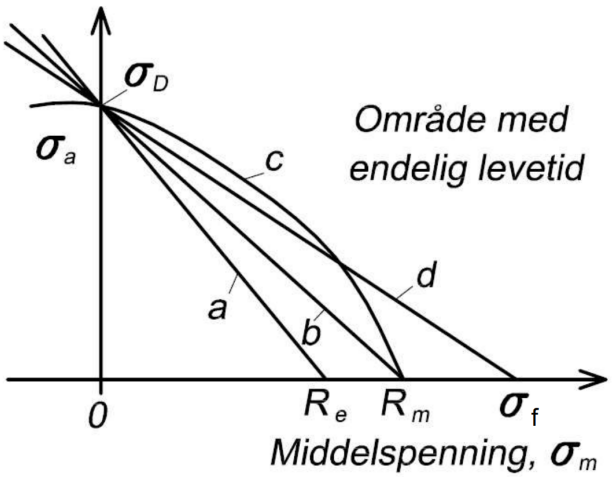
Gerber (Tyskland, 1874),

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_D} + \left(\frac{\sigma_m}{R_m}\right)^2 = 1 \tag{1.16}$$

Morrow (USA, 1972),

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_D} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f} = 1 \tag{1.17}$$

I disse sammenhengene er σ_a, utmattingsgrensen, R_m er strekkfastheten, R_e er flytegrensen og σ_f er spenning ved brudd. Hver av disse sammenhengene er representert i figur 1.10.



Figur 1.10: Viser en sammenligning mellom de empiriske sammenhengene mellom utmattingsgrense og middelspenning (a - Söderberg, b - Goodman, c - Gerber, d - Morrow).

1.2.5 Rainflow Counting

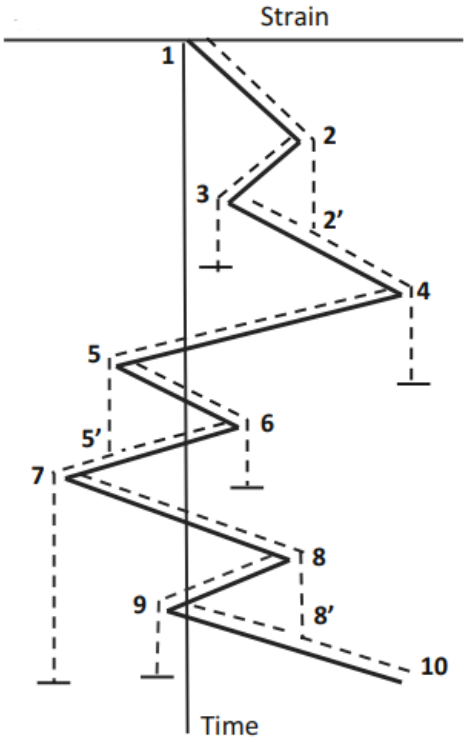
Når utmatting skjer i en konstant variasjon i last, kan levetid enkelt beregnes ved bruk av S-N kurven, men ved en helt tilfeldig variasjon i last er det vanskelig å estimere levetid. Det er flere metoder for å konvertere tilfeldige laster til sykluser, og Rainflow counting er en velkjent metode.

For å få et syklusantall fra den variable amplitudebelastningen, må vi først definere sekvenser av topper og bunner. For å få disse toppene og bunnene kan spenningskurven snus 90°med klokken, som vist i figur 1.11.

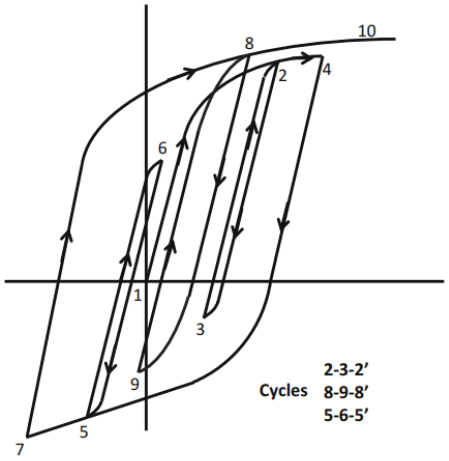
Algoritmen kan beskrives på følgende måte: Begynn ved å legge en vanndråpe (Rainflow) på første bunn. Hvis neste bunn er dypere eller lik den første, vil vanndråpen stoppe her og en syklus er talt. Hvis bunnen ikke er dypere enn den første vil strømmen fortsette til neste bunn, som vist i figur 1.11, eksempelvis ved punkt 5 i figuren. Prosedyren repeteres og syklusene blir talt opp. Syklusene kan deles inn i klasser med halvsykluser og sykluser. Syklusene illustreres tydeligere i figur 1.12 der spenning er plottet mot tøyning.

1.2.6 Miner-Palmgren

Miner-Palmgren har vist seg å være like god som flere andre metoder for kumulativ skade. Fordelen med Miner-Palmgren, er at metoden er relativ enkel. Miner-Palmgren teorien



Figur 1.11: Viser et tid-spenning plott som er snudd 90°.



Figur 1.12: Viser tøyning-spenning plott

antar at skaden er konstant under en gitt spenningsområde. Miner-Palmgren er gitt ved følgende uttrykk med k antall steg:

$$D_{tot} = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} \tag{1.18}$$

Der D er akkumulert skade, n_i er antall sykluser innenfor et gitt spenningsområdet og N_i

er antall sykluser det gitte elementet vil tåle før brudd.

Den akkumulerte faktoren forteller hvor stor andel av den akseptable skaden på materialet er gjort. Det vil si at $D_{tot} \leq 1$.

1.2.7 Damage equivalent load (DEL)

DEL er et konsept som reduserer en lang historie med tilfeldige laster til ett tall. Det blir dermed enklere og en mer effektiv metode å sammenligne mange lasttilfeller. DEL representerer en konstant spenningsamplitude som påfører samme skade på et materiale, som den tilfeldige spenningslasten. Antall sykluser er ofte forhåndsdefinert, enten eksplisitt med N_{EQ} sykler (vanligvis 10^7) eller implisitt med en konstant frekvens (ofte 1 Hz). Skaden forårsaket av N_{EQ} sykluser med spennigsvidde $S_{r,EQ}$ må være lik til skaden fra Miner Palmgren (ligning 1.18) (Abdallah et al., 2017) (Michalopoulos, 2015) (Hendriks og Bulder, 1995):

$$D_{tot} = \frac{N_{EQ}}{CS_{r,EQ}^{-m}} \tag{1.19}$$

Som gir

$$DEL = S_{r,EQ}^{m} = \frac{CD_{tot}}{N_{EQ}} \tag{1.20}$$

.

1.3 Beskrivelse av masteroppgaven

Strømkabelen for flytende vindturbiner er følsom for plattformens bevegelser, både når det gjelder ekstrembelastninger og utmatting. Designkriteriene for plattformens bevegelser blir derfor ofte unøyaktige og unødvendig konservative. I oppgaven blir ekstremlaster og utmatting for strømkabel beregnet i detalj, noe som kan danne et grunnlag for mer nøyaktige designkriterier for en dynamisk strømkabel, tilkoblet en flytende vindturbin.

Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i masteroppgaven til (Bakken, 2019), som er beskrevet i seksjon 1.1. (Bakken, 2019) brukes primært for å bygge et grunnlag for

strømkabelen i denne masteroppgaven, som skal simuleres i den aero-servo-hydro-elastiske tidsplan-modellen 3DFloat.

Hovedfokuset er, som nevnt, å gjøre beregninger på ekstremlaster og utmatting i strømkabelen. Det vil bli påsatt en tvungen bevegelse på strømkabelen, samt miljøforhold som bølger og strøm. Bevegelsen kommer fra simuleringer av flyteren WINDMOOR 12 MW ved 21 ulike sjøtilstander, som er gjennomført av masterstudent Ludvig Bergmann.

I masteroppgaven skal følgende steg gjennomføres:

1. Gjøre litteratursøk og gi en beskrivelse av relevant litteratur, samt oppgi relevant teori for masteroppgaven.
2. Bestemme scenarier for simuleringer og definere eventuelle forenklinger.
3. Sette opp en modell i 3DFloat med tilhørende monitorer for laster.
4. Analysere resultater.
5. Beregne delskade, levetid og damage equivalent load (DEL).
6. Utforske forbedringer (hvis tid).
7. Konkludere

1.3.1 Problemstilling

Utforske de dynamiske påkjenningene og utmatting i armeringen til strømkabelen for en flytende vindturbin med lazy wave konfigurasjon, samt undersøke utmattingsutvikling i øvre og bøyd seksjon av strømkabel og definere DEL forholdene.

2 Metode

Kapitlet tar for seg hvilke metoder som er benyttet for å komme frem til resultatene. Kapittelet starter med en beskrivelse av utgangspunktet til strømkabelen. Her beskrives hvor design og dimensjoner kommer fra, samt mekaniske egenskaper som blir brukt videre. Deretter blir scenario beskrevet, der miljøforhold er et viktig tema.

Kapittelet avslutter med gjennomgang av den flytende vindturbinen for det aktuelle scenariet og en forklaring av simuleringsverktøyet som benyttes.

2.1 Utgangspunkt for strømkabelen

For å ha noe å jobbe ut i fra, benyttes design og spesifikasjoner til (Bakken, 2019) masteroppgave, beskrevet i seksjon 1.1.

I den globale modellen til (Bakken, 2019) benyttes *lazy wave* konfigurasjon. Modellen er delt inn i tre seksjoner, der en av de er oppdriftsseksjon. Noden som er festet til havoverflaten har tre posisjoner utfra hvilken vindretning som benyttes. Posisjonen $Neutral = 73,25$ m benyttes i denne oppgaven, som er avstanden fra noden som er festet til havbunnen til noden ved havoverflaten, i x-retning.

Designkriterier som benyttes av (Bakken, 2019) var ingen kompresjon og en maks krumning på 1.3675 m^{-1}. Kabelen fikk endelige mål som vist i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Viser målene som benyttes i konfigurasjonen til Bakken.

Seksjon nummer	Tverrsnitt areal [m^2]	Lengde [m]
1	0,006171	30
2	0,03	40
3	0,006171	130

Lengder på strømkabelen oppskaleres for å passe til et havdyp på 150 m. Oppskaleringen ble gjennomført ved å ta forholde mellom seksjonslengde og havdyp. Nye mål på strømkabelen er gitt i tabell 2.2.

Tabell 2.2: Viser oppskalerte mål fra Bakken's konfigurasjon.

Seksjon nummer	Tverrsnitt areal [m^2]	Lengde [m]
1	0,006171	38,136
2	0,03	50,848
3	0,006171	165,256

Strømkabelens mekaniske egenskaper er tilsvarende Bakken's, som vist i tabell 2.3.

Tabell 2.3: Viser mekaniske egenskaper til strømkabel.

Egenskap	Verdi
Vekt [kg/m]	15,75
Aksial stivhet [N]	2,0e+08
Bøyestivhet [Nm^2]	1481
Torsjonsstivhet [Nm^2]	5403

Tverrsnittet til strømkabelen inneholden 3 ledere med et tverrsnitt på 95 mm^2. Det benyttes 63 stål armeringsfiber i det indre laget av armering og 71 for ytre laget. Ellers er tverrsnittet bygget opp av elektrisk isolasjon og vannblokkeringslag. Dimensjoner for tverrsnitt er tilsvarende Bakkes's, og er vist i tabell 2.4.

Tabell 2.4: Dimensjoner i kabeltverrsnitt

Komponent	Radius [mm]	Tykkelse [mm]
Leder + isolasjon	15	
Senter rør	2,32	
Lag 1	33,07	1,5
Armering	1,5	
Vannblokkeringslag	37,57	0,5
Lag 2	42,82	3

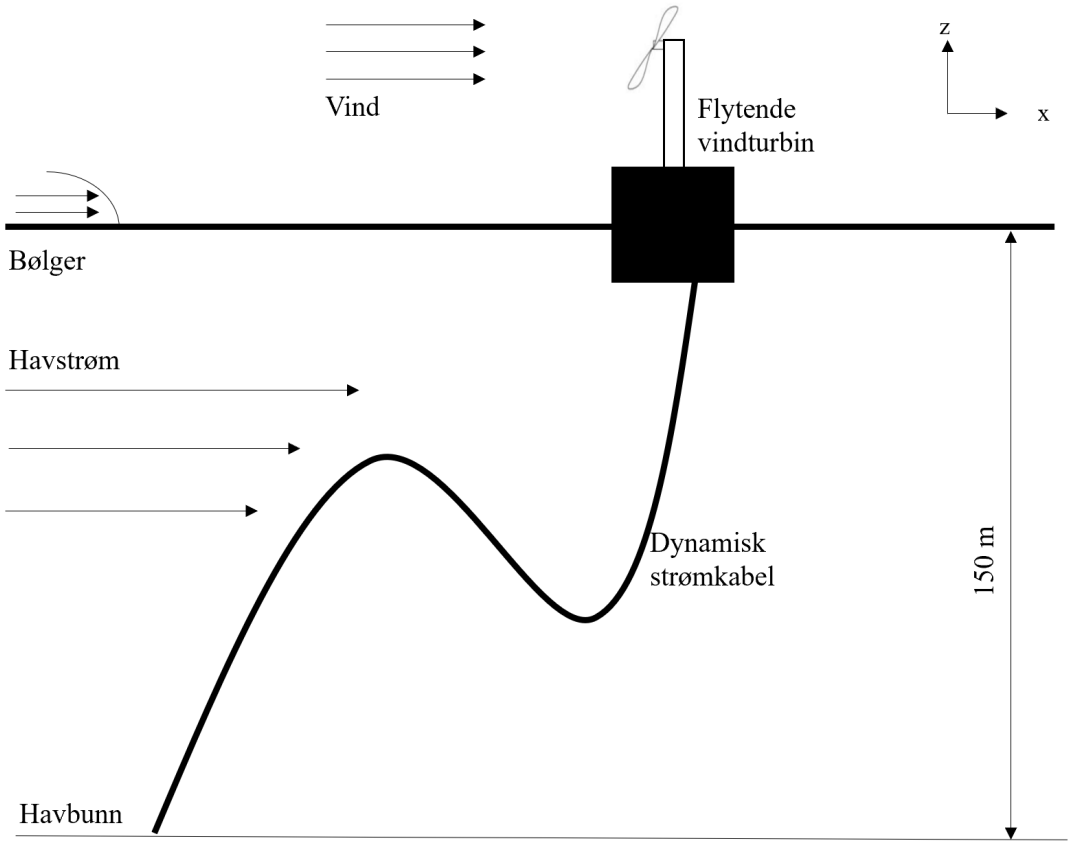
Med denne informasjonen kan strømkabelen rekonstrueres i simuleringsverktøyet 3DFloat, der kabelen er tilsvarene Bakken's.

2.2 Scenario for simulering av strømkabel

Parallelt med denne masteroppgaven, undersøker Ludvik Bergmann middelspenninger i forankringsliner på flyteren WINDMOOR 12 MW (Flyter beskrevet i seksjon 2.3). Fra Bergmann sine simuleringer hentes det ut plattformbevegelser, som blir omgjort til (X,

Y, Z)-koordinater, samt *Roll*, *Pitch* og *Yaw*, ved et gitt tidspunkt, t. For å hente ut bevegelsene, benyttes et script i Python.

I simulering av strømkabel inkluderes også havstrømmer og bølger. Det benyttes samme havdybde, koeffisienter for strøm og bølger som i scenariet til Bergmann. I denne simuleringen er x-retning satt i strømningsretning og z i positiv retning opp. I figur 2.1 illustreres oppsettet av strømkabelen og hvilke retninger som er gjeldene for dette scenariet. Kabelen er delt inn i 3 seksjoner, som i Bakken's scenario. Seksjon 1 er delt inn i 10 elementer, 2 har 15 elementer og seksjon 3 har 15 elementer.



Figur 2.1: viser en skjematisk tegning av scenariet som simuleres, der retninger for vind, bølger og havstrømmer er inkludert.

2.2.1 Sjøtilstander

I oppgaven til Bergmann simuleres 21 sjøtilstander, der nr.21 er en ekstremtilstand. Sjøtilstandene vises i tabell 2.5. Se appendiks C for plott av bevegelsene for de 21 sjøtilstandene.

Tabell 2.5: Viser sjøtilstandene som simuleres.

Sjøtilstand nr:	Bølgehøyde [m]	Bølgeperiode [s]	Vindhastighet [m/s]	Sannsynlighet for inntreffelse [%]
1	1,5	8,1	4	13,764718
2	1,5	7,9	8	27,069097
3	1,5	7,5	10,6	11,397941
4	1,5	6,8	14	15,752486
5	1,5	6,2	17	5,725809
6	1,5	5,7	23,5	2,407441
7	3	9,9	8	2,963756
8	3	9,4	10,6	1,556702
9	3	8,6	14	4,683125
10	3	7,8	17	4,694512
11	3	7,3	23,5	6,195911
12	5,5	10,4	8	0,055303
13	5,5	9,9	10,6	0,079703
14	5,5	10,4	14	0,309061
15	5,5	10,2	17	0,408286
16	5,5	9,3	23,5	1,244385
17	5,5	8,9	38	1,629901
18	7,5	10	10,6	0,001624
19	7,5	9,8	23,5	0,019517
20	7,5	10,4	38	0,040663
21	10,9	16	44,5	0,000055

2.2.2 Havstrømmer

For hver av disse sjøtilstandene med forskjellig vindstyrke, er det forskjellige strømningsprofiler. I simuleringene er det tatt hensyn til vindgenerert- og tidevannsstrømninger.

Ved bruk av ligning 1.3 der $U_{hor,vind}$ er horisontal vind som treffer vindturbinen, $z = 10$ m som anbefalt fra DNV-RP-C205, $\alpha = 1/7$ og $H = 131,7$ m, som er høyden til vindturbinen.

Setter $U_{hor,vind}$ inn i ligning 1.2, og beregner $v_{c,vind}(0)$ for hver av sjøtilstandene. $k = 0,021$ som er hentet fra (Life50+, 2015).

Ligning 1.1 benyttes for å finne strømningsprofilen med de forskjellige vindstyrkene. Med anbefaling fra DNV-RP-C205 er d_0 satt til å være halvparten av havdybden ($d = 150$), som gir $d_0 = 75$ m.

Fra (Life50+, 2015) er tidevannstrømmen, er blitt estimert til havoverflaten som forskjellen

mellom den totale gjennomsnittlige strømhastigheten og vindkomponenten til den aktuelle strømmen.

$$v_{c,tide} = 0,016 m/s$$

Med dette benyttes ligning 1.4 for å beregne strømningsprofil indusert av tidevann.

I tabellene 2.6 - 2.13 vises strømningsprofil for de forskjellige vindstyrkene.

Tabell 2.6: Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $4m/s$

Dybde [m] (z)	**Vind generert strøm** ($v_{c,vind}$) **[m/s]**	**Tidevanns-strøm** ($v_{c,tide}$) **[m/s]**	**Total strøm** (v_c) **[m/s]**
0	0,05855	0,01600	0,07455
-10	0,05074	0,01585	0,06659
-40	0,02732	0,01532	0,04264
-70	0,00390	0,01465	0,01856
-100	0	0,01372	0,01372
-150	0	0	0

Tabell 2.7: Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $8m/s$

Dybde [m] (z)	**Vind generert strøm** ($v_{c,vind}$) **[m/s]**	**Tidevanns-strøm** ($v_{c,tide}$) **[m/s]**	**Total strøm** (v_c) **[m/s]**
0	0,11710	0,01600	0,13310
-10	0,10149	0,01585	0,11734
-40	0,05464	0,01532	0,06997
-70	0,00781	0,01465	0,02246
-100	0	0,01372	0,01372
-150	0	0	0

Tabell 2.8: Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $10,6m/s$

Dybde [m] (z)	**Vind generert strøm** ($v_{c,vind}$) **[m/s]**	**Tidevanns-strøm** ($v_{c,tide}$) **[m/s]**	**Total strøm** (v_c) **[m/s]**
0	0,15516	0,01600	0,17116
-10	0,13447	0,01585	0,15032
-40	0,07241	0,01532	0,08773
-70	0,01034	0,01465	0,02500
-100	0	0,01372	0,01372
-150	0	0	0

Tabell 2.9: Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $14m/s$

Dybde [m] (z)	**Vind generert strøm** ($v_{c,vind}$) **[m/s]**	**Tidevanns-strøm** ($v_{c,tide}$) **[m/s]**	**Total strøm** (v_c) **[m/s]**
0	0,20493	0,01600	0,22093
-10	0,17761	0,01585	0,19345
-40	0,09563	0,01532	0,11095
-70	0,01366	0,01465	0,02831
-100	0	0,01372	0,01372
-150	0	0	0

Tabell 2.10: Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $17m/s$

Dybde [m] (z)	**Vind generert strøm** ($v_{c,vind}$) **[m/s]**	**Tidevanns-strøm** ($v_{c,tide}$) **[m/s]**	**Total strøm** (v_c) **[m/s]**
0	0,24884	0,01600	0,26484
-10	0,21566	0,01585	0,23151
-40	0,11613	0,01532	0,13145
-70	0,01659	0,01465	0,03124
-100	0	0,01372	0,01372
-150	0	0	0

Tabell 2.11: Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $23,5m/s$

Dybde [m] (z)	**Vind generert strøm** ($v_{c,vind}$) **[m/s]**	**Tidevanns-strøm** ($v_{c,tide}$) **[m/s]**	**Total strøm** (v_c) **[m/s]**
0	0,34399	0,01600	0,35999
-10	0,29812	0,01585	0,31397
-40	0,16053	0,01532	0,17585
-70	0,02293	0,01465	0,03758
-100	0	0,01372	0,01372
-150	0	0	0

Tabell 2.12: Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $38m/s$

Dybde [m] (z)	**Vind generert strøm** ($v_{c,vind}$) **[m/s]**	**Tidevanns-strøm** ($v_{c,tide}$) **[m/s]**	**Total strøm** (v_c) **[m/s]**
0	0,55624	0,01600	0,57224
-10	0,48207	0,01585	0,49792
-40	0,25958	0,01532	0,27490
-70	0,03708	0,01465	0,05173
-100	0	0,01372	0,01372
-150	0	0	0

Tabell 2.13: Havstrømprofil for sjøtilstand med vindstyrke $44,5 m/s$

Dybde [m] (z)	**Vind generert strøm** ($v_{c,vind}$) **[m/s]**	**Tidevanns-strøm** ($v_{c,tide}$) **[m/s]**	**Total strøm** (v_c) **[m/s]**
0	0,65285	0,01600	0,66885
-10	0,56580	0,01585	0,58165
-40	0,30466	0,01532	0,31998
-70	0,04352	0,01465	0,05818
-100	0	0,01372	0,01372
-150	0	0	0

2.2.3 Bølger

For å legge til bølger benyttes JONSWAP bølgespekter (Ligning 1.7). Verdier for T_p og H_s samsvarer med tabell 2.5. Resterende verdier for input til 3DFloat vises i tabell 2.14.

Tabell 2.14: Inngangsparameter for bølger i 3DFloat.

Beskrivelse	**Verdi**
Toppformparameter γ	3,3
Periodisitet [s]	3600
Dybde [m]	150
Spredningsparameter s	2

γ og s er oppgitt parametere fra Ludvik Bergmann sine simuleringer fra SIMA. I 3DFloat benyttes samme spredningsfunksjon som i SIMA.

Fra 3DFloat genereres det bølgetabeller. Hvis man ønsker å bruke samme realisering (seed) av bølgene som i tidligere simulering, leses eksisterende tabell inn igjen fremfor å generere ny.

2.3 Beskrivelse av WINDMOOR 12 MW

Den flytende plattformen, som ble vedtatt i Windmoorprosjektet, ble designet av Inocean og Equinor, og består av en semi-sub stålkonstruksjon med tre søyler, forbundet med pontonger og dekkbjelker. Vindturbintårnet er installert på toppen av den fremste kolonnen, som vist i figur 2.2. Designet var basert på en iterativ tilnærming med flere kombinasjoner av trekk, kolonnediameter/høyde, pontongbredde/høyde, kolonners senter til senter avstand,

hydrostatiske begrensninger, nødvendig ballast, naturlige perioder med heving/stigning og statisk stigning ved nominell tilstand (Silva de Souza et al., 2021).

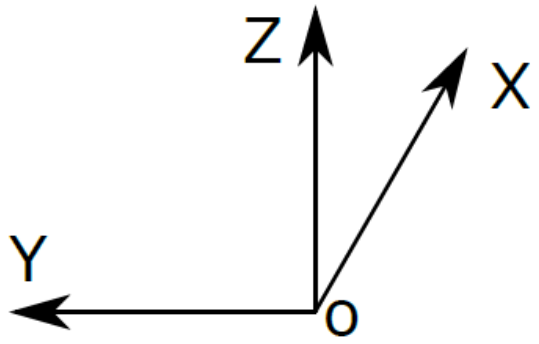
Figur 2.2: Viser flyteren WINDMOOR 12 MW (Silva de Souza et al., 2021).

I tillegg til platformen, designet Inocean et forankringssystem bestående av tre hybridliner (kjetting + polyester) med en forspenning på 1050 kN, der antatt vanndybde var 150 m (Silva de Souza et al., 2021).

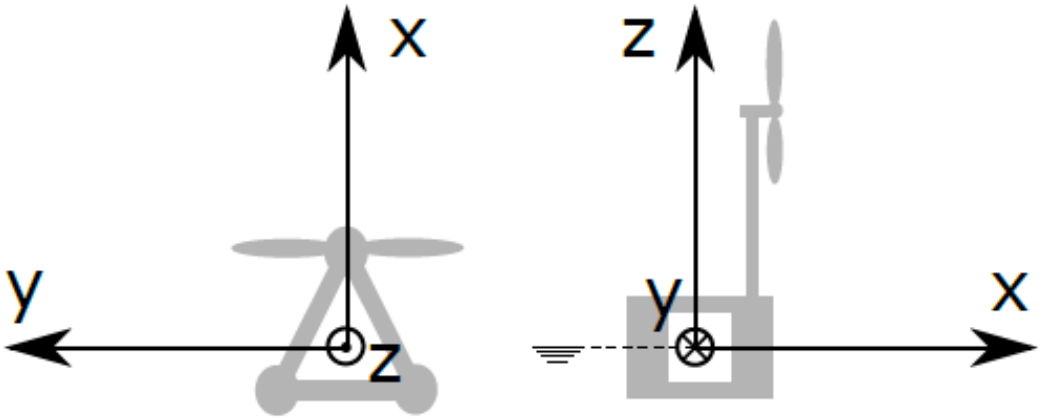
Det globalet koordinatsystemet til flyteren er et kartesisk høyrehånd system, som er jordfestet. XY-planet ligger ved gjennomsnitts vannivå, Z-aksen er positiv oppover og X-retning er positiv mot vindretning, som vist i figur 2.3a (Silva de Souza et al., 2021).

Plattformen har et eget lokalt koordinatsystem med origo ved snitt vannivå, som vist i figur 2.3b. Det lokalet systemet er festet til plattformen og vil derfor bevege med plattformen (Silva de Souza et al., 2021).

I tabell 2.15 vises hoveddimensjonene for plattformen til vindturbinen.



(a) Globalt koordinatsystem.



(b) Lokalt koordinatsystem.

Figur 2.3: Viser globalt og lokalt koordinatsystem for WINDMOOR 12 MW (Silva de Souza et al., 2021).

Tabell 2.15: Viser plattformdimensjoner til vindturbinen (Silva de Souza et al., 2021)

Beskrivelse	Verdi
Kolonne diameter [m]	15,0
Kolonne høyde	31,0
Pontonger bredde [m]	10,0
Pontonger høyde [m]	4,0
Senter-senter avstand [m]	61,0
Bjelkebredde [m]	3,5
Bjelkehøyde [m]	3,5
Total masse, plattform [t]	11974,0

Vindturbinen er modellert i dataprogrammet, SIMA, som Bergmann også benytter seg av. Bemerk at X-retning i SIMA har positiv retning mot vinden. Bevegelser fra Bergmann sine simuleringer er dermed motsatt av oppsettet i 3DFloat. Dette er tatt hensyn til i simuleringene.

2.4 3DFloat

I simuleringene benyttes det aero-hydro-servo-elastic programmet 3DFloat, som er utviklet av IFE og UMB. Programmet er kodet i FORTAN90, med lineær algebra rutiner fra biblioteket LAPACK. 3DFloat var en av modellene som ble anvendt under OC3-HYWIND prosjektet, som er beskrevet i seksjon 1.1.

Kjernen i den strukturelle modellen er et ikke-lineært corotational FEM-rammeverk, der beregningsnoder er sammenkoblet med elementer. Elementene er basert på Euler-Bernoulli-bjelker med 12 frihetsgrader (DOF). Kabelelementer med redusert bøyestivhet brukes til forankringsliner og og strømkabel. Geometriske ikke-lineariteter er redegjort for med en FEM-tillnærming, der referansekonfigurasjonen er en nylig transformert tilstand. Elementligningene er angitt i et koordinatsystem som er festet til midtpunktet til elementet i referansetilstand, og deretter deformert til et felles komponent-koordinatsystem. Dette muliggjør belastningsberegninger av små elementer, for store globale avbøyninger, så lenge elementoppløsningen er tilstrekkelig.

Laster fra tyngdekraften, oppdrift, bølger, havstrøm og vind påføres som eksterne belastninger på strukturen. Kreftene er evaluert ved Gauss-punkter i elementene og en Galerkin-tilnærming for nodelaster. Vind håndteres som et ikke-lineært luftmotstand-uttrykk på strukturen over bølgeoverflaten, bortsett fra rotorbladene, der egne tabeller brukes. Oppdrift for de våte elementene beregnes fra trykkfeltet oppnådd fra bølgekinematikkmodellen.

2.5 Inngangsparameter for simuleringen

I simuleringen er det tatt stilling til en rekke inngangsparametere, som er nøye vurdert, med god veiledning fra professor, Tor Anders Nygård.

Strømkabelens geometri beregnes med utgangspunkt fra (Bakken, 2019). Ytre diameter for seksjon 1 og 3 beregnes til

$$d_{y1} = \sqrt{4 \cdot \frac{a_2}{\pi}} = \sqrt{4 \cdot \frac{0,006171}{\pi}} = 0,08864m$$

og seksjon 2 til

$$d_{y2} = \sqrt{4 \cdot \frac{a_2}{\pi}} = \sqrt{4 \cdot \frac{0,03}{\pi}} = 0,19544m$$

E-modul beregnes med

$$E_1 = EA/a_1 = 32.4e9Pa$$
$$E_2 = EA/a_2 = 6.66e9Pa$$

der EA er aksial stivhet.

fractional stiffness av materialet beregnes da med

$$f_{stiff1} = \frac{ei}{E_1 \cdot I1} = 0,015079$$

$$f_{stiff1} = \frac{ei}{E_2 \cdot I2} = 0,015079$$

der ei er bøyestivhet og I er annet arealmoment.

De 2 ulike massetetthetene til strømkabelen beregnes med

$$\rho_1 = mww/a_1 = 2552,26\frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_2 = mww/a_2 = 525,0\frac{kg}{m^3}$$

der mww er vekt per lengdeenhet til strømkabelen.

Totalt kjøres simuleringen i 3999,5 sek der de første 200 sek er satt med høy demping

for å raskt få kabelen i posisjon. Etter 200 sek starter bevegelser fra Bergmann, der filen inneholder bevegleser for 3799,5 sek. Simuleringen kjøres ved bruk av generalisert alpha-metode og har et tidssteg på 0,01 s.

2.6 Utmatting

Etter noen runder med analysering og simulering blir det bestemt å fokusere på utmatting i øverste del av strømkabel og i bøyd seksjon i bunn. Dette er grunnet høye spenninger.

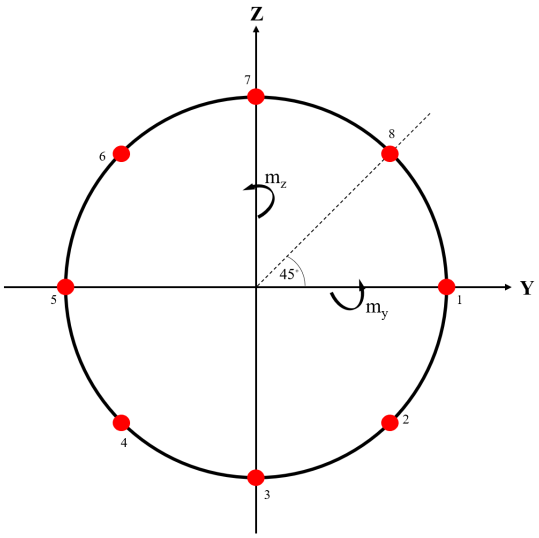
Det ble plassert ut sensorer for måling av krefter og momenter i de interessante elementene. Elementene som undersøkes i øvre seksjon er: 74, 72, 70 og 68. Det ble også satt på sensor i element 75, men grunnet usikkerhet rund overgang til kabel ble ikke denne tatt inn i utmattingsberegninger. Elementer som ble undersøkes i bøyd seksjon er: 35, 36, 37 og 38.

Kraftkomponenter i elementets koordinatsystem er følgende:

- Aksialkraft - fx
- Skjærkrefter - fy og fZ
- Torsjon - mx
- Bøyemomenter - my og mz

2.6.1 Spenninger i tverrsnitt

Etter noen vurderinger blir det bestemt å se nærmere på utmatting i stålarmeringen i strømkabelen. Det beregnes aksialspenninger på 8 punkter i tverrsnittet, som vist i figur 2.4, der bøye- og strekkspenninger kombineres ved bruk av aksiale krefter og bøyemomenter. I beregningen benyttes I og A for stålarmeringen, og ikke I og A til strømkabelen i simuleringene. Med dette antas det at stålarmeringen tar opp alle spenningene i tverrsnittet som oppstår under bevegelsene. Det benyttes en samlet I_y, I_z og A for hele armeringstverrsnittet, som betyr at det også antas at tverrsnittet forblir plant.



Figur 2.4: Illustrerer de 8 spenningspunktene i tversnittet på elementet.

Strømkabelen har to lag med stålarmering. Arealet for stålarmeringen beregnes til $A_{armering} = 0.000947m^2$

For at spenningene skal stemme overens med simuleringen må massen også stemme med geometri for spenningsberegningene. Dette stemmer ved å beregne beregne en tilpasset indre diameter, $d_{i,tilpasset}$ med

$$d_{i,tilpasset} = \sqrt{d_y^2 - \frac{4A_{armering}}{\pi}}$$

der d_y er ytre diameter til strømkabel.

Videre beregnes annet arealmoment for sylinderen med

$$I_{syl} = \pi \cdot \frac{d_y^4 - d_i^4}{64}$$

Tilslutt beregnes spenningene for 8 forskjellige punkter i kabelen med følgende metode:

$$S_x = f_x / A_{armering}$$
$$S_{b,y} = m_y \cdot \frac{0,5 d_y}{I_{syl}}$$
$$S_{b,z} = -m_z \cdot \frac{0,5 d_y}{I_{syl}}$$

$$S_1 = S_x + S_{b,z}$$
$$S_2 = S_x + S_{b,y} sin(45°) + S_{b,x} cos(45°)$$
$$S_3 = S_x + S_{b,y}$$
$$S_4 = S_x + S_{b,y} sin(45°) - S_{b,x} cos(45°)$$
$$S_5 = S_x - S_{b,z}$$
$$S_6 = S_x - S_{b,y} sin(45°) - S_{b,x} cos(45°)$$
$$S_7 = S_x - S_{b,y}$$
$$S_8 = S_x - S_{b,y} sin(45°) + S_{b,x} cos(45°)$$

Metoden er scriptet i Python. Spenningene som genereres fra hvert punkt puttes videre inn i utmattingsfunksjoner for beregning av delskade, levetid og DEL.

2.6.2 Delskade, levetid og DEL

Spenningsseriene for hvert av punktene beregnes ved bruk av et python-script, der selve rainflow-countingen skjer i et script fra Marit kvittem i Sintef Ocean. Denne Rainflow-countingen er basert på matlab wafo's tp2arfc4p. Ut av denne funksjonen kommer ferdig beregnet delskade som beregnet med Miner Palmgren (ligning 1.18).

Delskaden og levetiden til strømkabelen beregnes for samtlige spenningspunkter i alle elementene. Delskade D og levetid i antall år beregnes med

$$Levetid = \frac{1}{D \cdot P(I)} \cdot \frac{T_{sim}}{3600 \cdot 24 \cdot 365} \tag{2.1}$$

Der T_{sim} er tidsserien til Rainflow-counting, som i dette tilfellet er 3599,45 sek, og $P(I)$ er

sannsynlighet for inntreffelse av sjøtilstanden.

Senere i prosessen blir det bestemt å undersøke DEL, grunnet høy sensitivitet rundt levetid forårsaket av materialvalg og SN-kurve. Levetiden blir derfor irrelevant for resultater og konklusjon.

DEL beregnes med ligning 1.20 der Whöler eksponenten er satt til $m = 3$ med tilhørende konstant $C = 2,50^{11}$. Verdiene er hentet fra DNV-RP-C203, seksjon 2.4.4, som beskriver SN-kurven til stål i luft.

Avslutningsvis undersøkes forholdet til DEL mellom elementene. Dette kan gi en pekepinn på hvordan skaden utvikler seg nedover strømkabelen, samt i bøyd seksjon.

Det blir besluttet å se på forholdet mellom element 74 og resterende elementer nedover. Forholde beregnes på følgende måte:

$$DEL_{forhold} = \frac{E_x}{E_{74}} \tag{2.2}$$

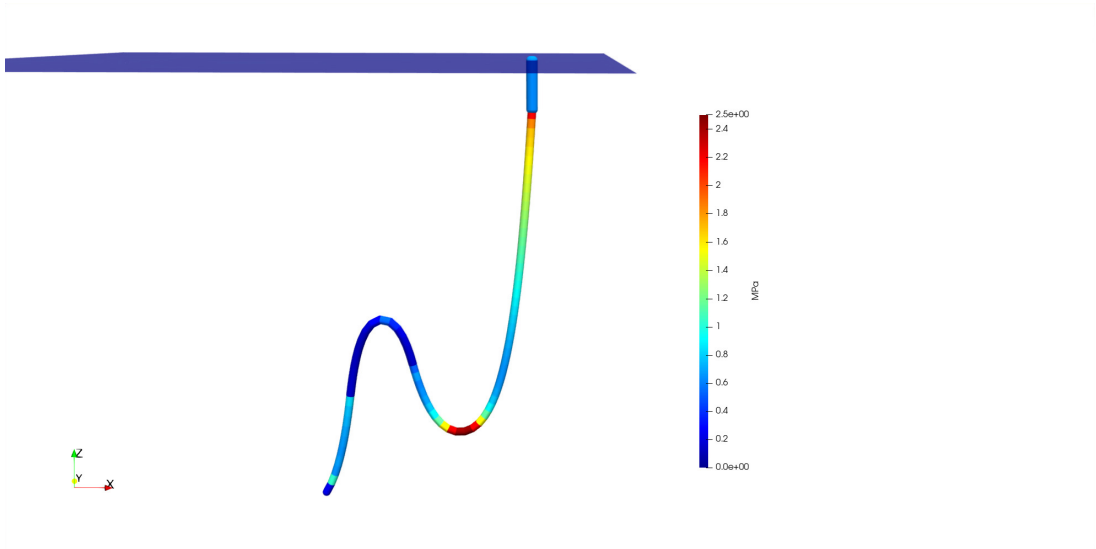
Der E_x er DEL element nr x i strømkabelen.

3 Simuleringer og analyser

Fra simuleringene kommer det ut resultater i form av spenninger langs strømkabel, samt tidsserier av krefter og momenter. I dette kapittelet fremvises resultatene for hver sjøtilstand. Plott for krefter og momenter er hentet fra monitorer som er plassert ut langs kabelen. Monitorene som er av interesse er vektlagt.

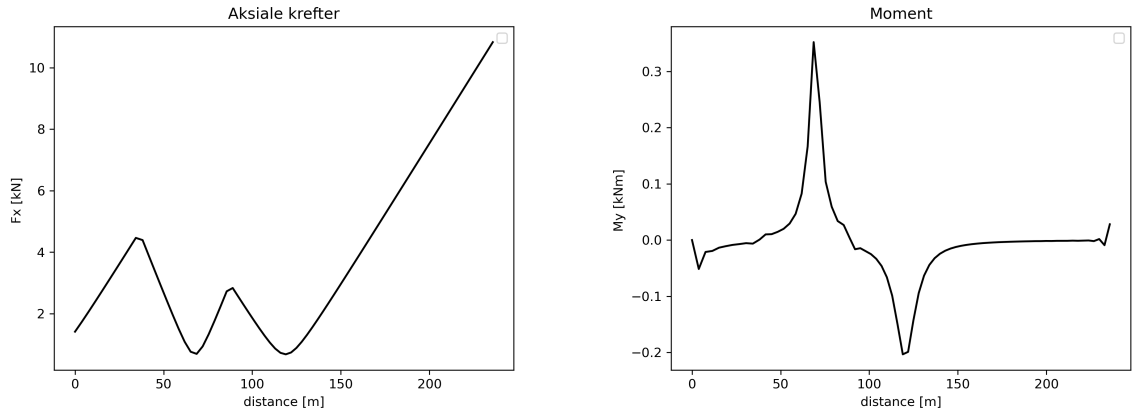
3.1 Strømkabel i likevekts-tilstand

For å undersøke hvilke spenninger strømkabelen opplever uten bevegelser fra plattform, strøm og bølger, blir det kjørt en simulering i 500 s (til likevekt) uten disse lastene. I figur 3.1 vises spenninger langs strømkabelen fra denne simuleringen. Spenningsskalaen er satt fra 0 til 2.5 MPa.



Figur 3.1: Viser spenninger langs strømkabel når strømkabel ligger i likevekts-tilstand.

I simuleringen er det lagt til såkalt "Element_status", viser krefter og momenter akkurat på tidspunktet det kalles på funksjonen under simuleringen.



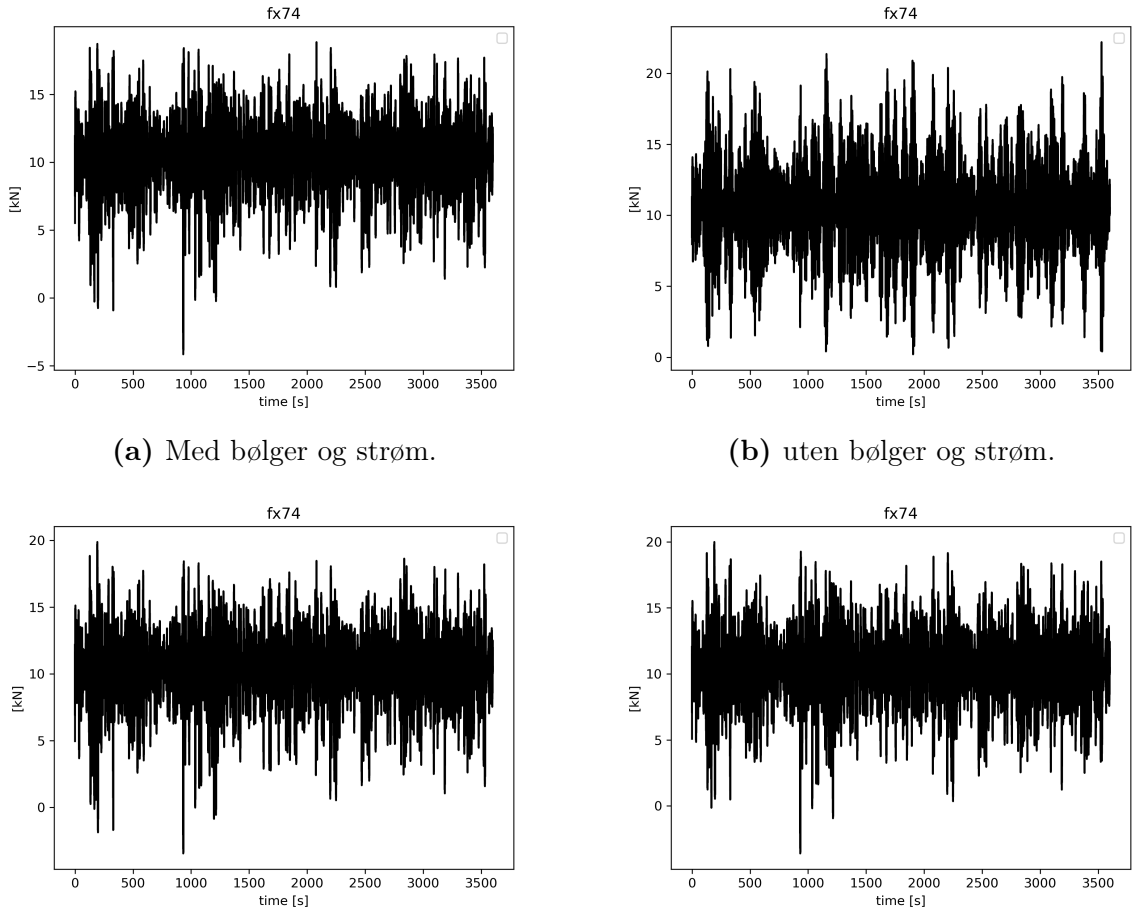
(a) Aksiale krefter **(b)** Moment om Y

Figur 3.2: Viser moment og aksiale krefter langs kabelen ved likevekts-tilstand.

3.2 Sensitivitetsanalyse

Etter flere simuleringer med uforventet resultater ble det besluttet å gjennomføre en sensitivitetsanalyse, med samme inngangsparametere som i endelige simuleringer. Dette innebar å vurdere endringer i krefter og momenter, i to utvalgte sjøtilstander. Under disse simuleringene ble det først kjørt en uten bølger og strøm, deretter kun strøm og tilslutt kun bølger.

For å se mest mulig utslag ble sjøtilstand 21 valg. Resultater for simuleringene er vist i figur 3.3-3.7



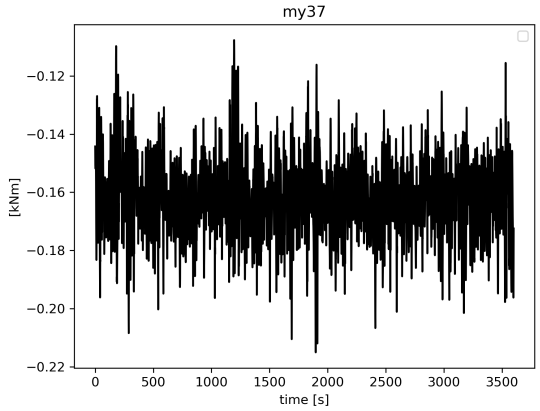
(a) Med bølger og strøm.

(b) uten bølger og strøm.

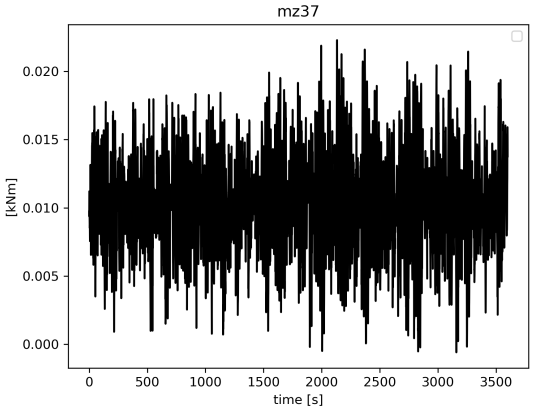
(c) Uten bølger med strøm.

(d) Med bølger uten strøm.

Figur 3.3: Viser aksiale krefter i sjøtilstand 21 som er målt i monitor 74 i de forskjellige tilfellene.

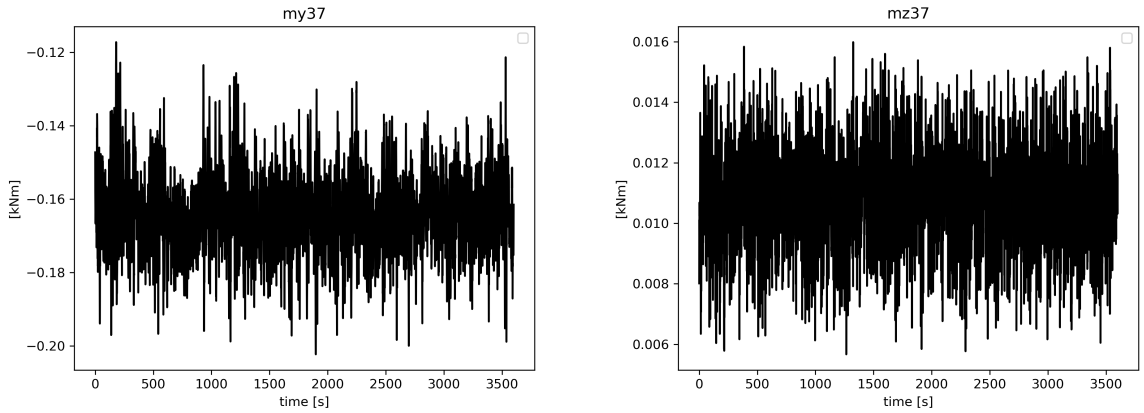


(a) Moment om Y.



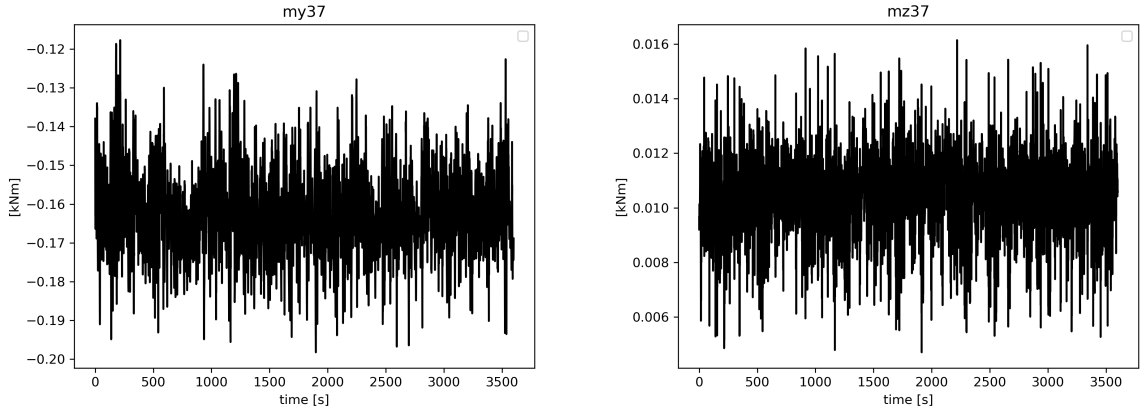
(b) Moment om Z.

Figur 3.4: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21 med bølger og strøm, som er målt fra monitor i element 37 .



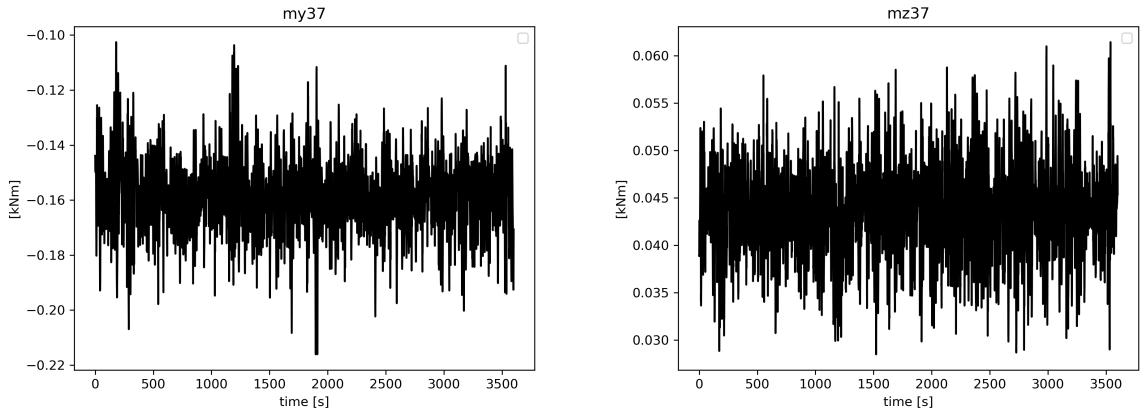
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur 3.5: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21 uten bølger og strøm, som er målt fra monitor i element 37 .



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur 3.6: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21 uten bølger med strøm, som er målt fra monitor i element 37 .

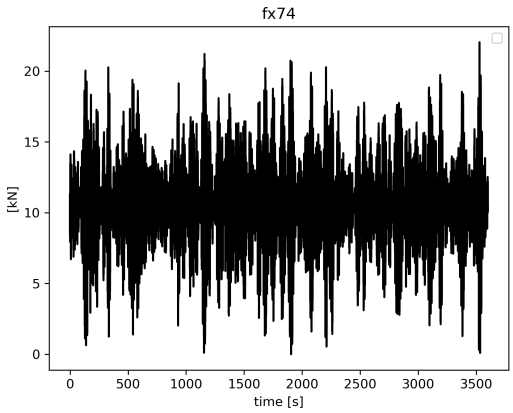


(a) Moment om Y.

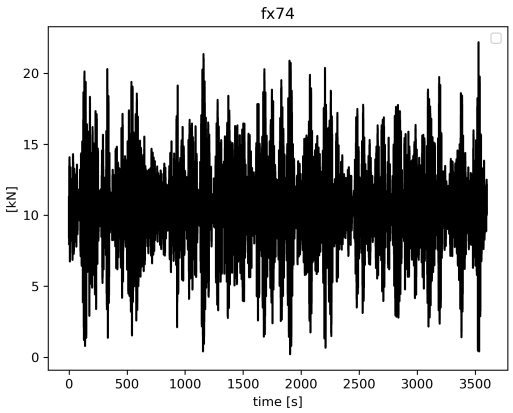
(b) Moment om Z.

Figur 3.7: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21 med bølger uten strøm, som er målt fra monitor i element 37 .

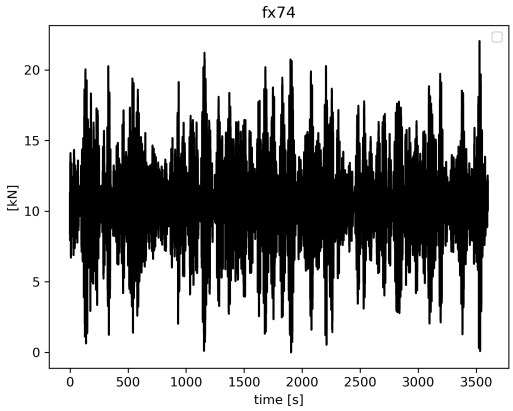
For analysen ble også sjøtilstand 19 valgt, grunnet noen underlige resultater fra monitorer. Det ble derfor gjennomført simulering på samme måte som i sjøtilstand 21. Resultatene for analysen er vist i figur



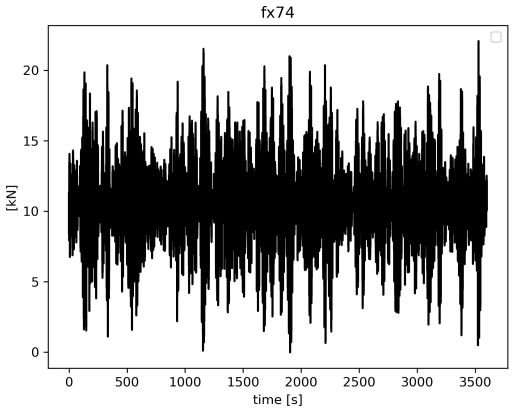
(a) Med bølger og strøm.



(b) uten bølger og strøm.

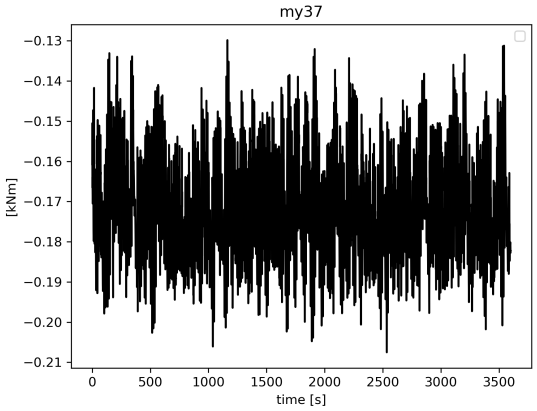


(c) Uten bølger med strøm.

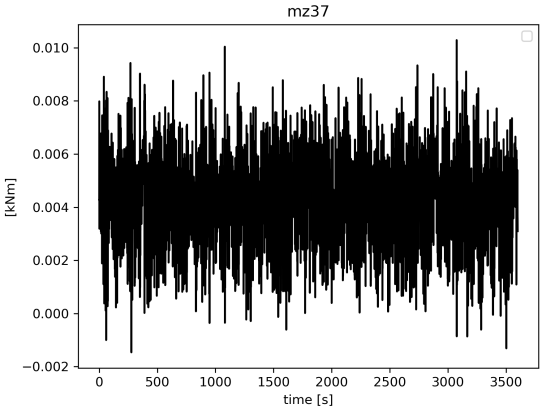


(d) Med bølger uten strøm.

Figur 3.8: Viser aksiale krefter i sjøtilstand 19 som er målt i monitor 74 i de forskjellige tilfellene.

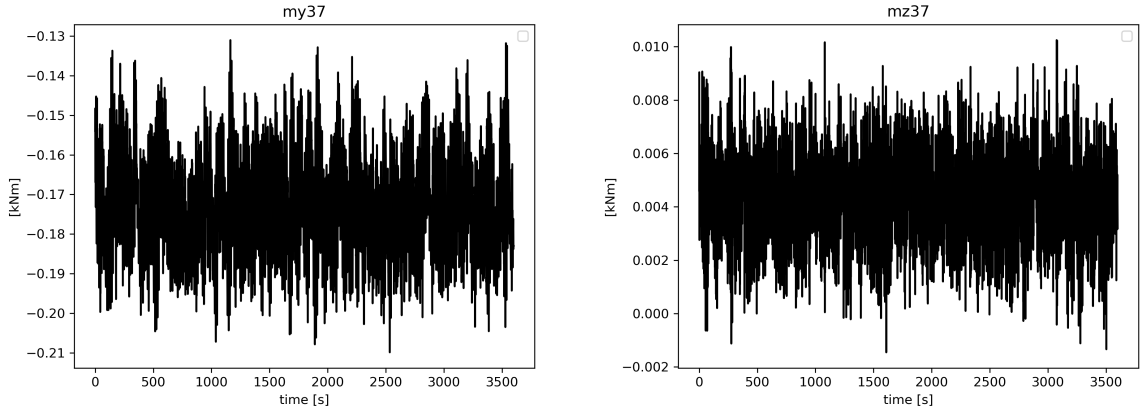


(a) Moment om Y.



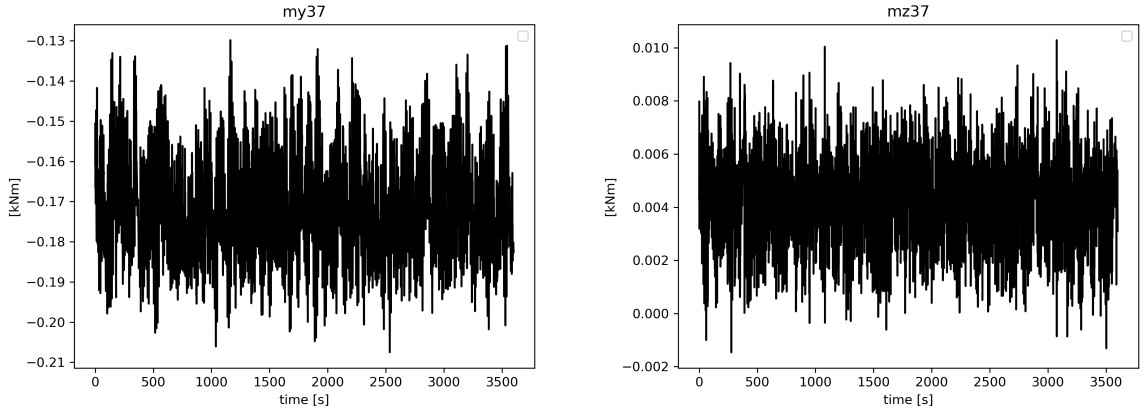
(b) Moment om Z.

Figur 3.9: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19 med bølger og strøm, som er målt fra monitor i element 37 .



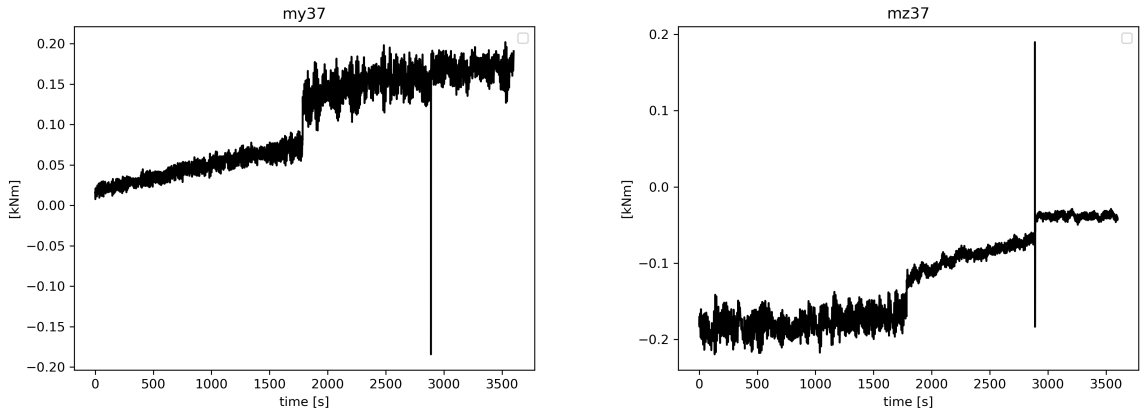
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur 3.10: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19 uten bølger og strøm, som er målt fra monitor i element 37 .



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur 3.11: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19 uten bølger med strøm, som er målt fra monitor i element 37 .



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur 3.12: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19 med bølger uten strøm, som er målt fra monitor i element 37 .

Vi ser at spenningsvariasjonene i kabelen i stor grad drives av plattformbevegelsene. For enkelte sjøtilstander, som i eksempelet over, får vi i simuleringer med bølger bøyning på tvers av kabelen. Dette skyldes at plattformbevegelsen som tvinges på kommer fra en annen simulering, og derved ikke er konsistent med bølgene. Bølgene blir derfor skrudd av i simuleringene som viste seg å ha dette problemet. Det er ikke noe i veien for å simulere alt samtidig i 3DFloat. Grepet med å simulere kabelen med påførte bevegelser er gjort for begrense kompleksiteten.

3.3 Resultater fra simulering

Som tidligere beskrevet er monitorer av høyest interesse vektlagt i dette kapittelet. Monitor i element 74 har vist seg å kjenne på de største kreftene. Samtidig her det interessant å undersøke spenningene som oppstår i den bøyde seksjonen av kabelen. Element 37 er valgt ut for denne analysen.

I tabell 3.1 og 3.2 vises en samlet oversikt over hvordan spenningene i tverrsnittet av kabelen utvikles i ved de forskjellige sjøtilstandene. I tabellene er det fokusert på spenningspunktet som opplever det største gjennomsnittet og spenningspunktet som har den største spenningsvidden. Som er beregnet ved å ta $\sigma_{maks} - \sigma_{min}$ i løpet av hele tidsserien.

Tabell 3.1: Viser maksimal spenningsvidde og maksimal gjennomsnittsspenning i de forskjellige sjøtilstandene for element 74.

Sjøtilstand	Bølgehøyde Hs [m]	Havstrøm $v_{c,vind}$ (0) [m/s]	Vindstyrke Ws [m/s]	Spenningsvidde [MPa]	Gjennomsnitt i spenningspunkt [MPa]
1	1.5	0.05855	4	2.15	6.12
2	1.5	0.11710	8	2.00	5.88
3	1.5	0.15516	10.6	1.76	5.90
4	1.5	0.20493	14	1.17	5.99
5	1.5	0.24884	17	0.76	6.02
6	1.5	0.34399	23.5	0.68	6.08
7	3	0.11710	8	5.60	5.88
8	3	0.15516	10.6	5.35	5.91
9	3	0.20493	14	4.78	5.99
10	3	0.24884	17	3.77	6.03
11	3	0.34399	23.5	2.92	6.09
12	5.5	0.11710	8	10.08	5.89
13	5.5	0.15516	10.6	9.66	5.91
14	5.5	0.20493	14	10.01	5.99
15	5.5	0.24884	17	9.96	6.03
16	5.5	0.34399	23.5	9.16	6.09
17	5.5	0.55624	38	8.62	6.27
18	7.5	0.15516	10.6	13.20	5.93
19	7.5	0.34399	23.5	12.56	6.11
20	7.5	0.55624	38	12.48	6.28
21	10.9	0.65285	44.6	13.70	6.30

Tabell 3.2: Viser maksimal spenningsvidde og maksimal gjennomsnittsspenning i de forskjellige sjøtilstandene for element 37.

Sjøtilstand	Bølgehøyde Hs [m]	Havstrøm $v_{c,vind}$ (0) [m/s]	Vindstyrke Ws [m/s]	Spenningsvidde [MPa]	Gjennomsnitt i spenningspunkt [MPa]
1	1.5	0.05855	4	1.35	5.72
2	1.5	0.11710	8	1.25	5.34
3	1.5	0.15516	10.6	0.96	5.29
4	1.5	0.20493	14	1.07	5.51
5	1.5	0.24884	17	1.00	5.61
6	1.5	0.34399	23.5	0.79	5.73
7	3	0.11710	8	1.36	5.23
8	3	0.15516	10.6	1.33	5.29
9	3	0.20493	14	1.40	5.47
10	3	0.24884	17	1.40	5.54
11	3	0.34399	23.5	1.46	5.72
12	5.5	0.11710	8	2.35	5.27
13	5.5	0.15516	10.6	2.27	5.20
14	5.5	0.20493	14	2.32	5.40
15	5.5	0.24884	17	2.48	5.50
16	5.5	0.34399	23.5	2.31	5.55
17	5.5	0.55624	38	2.07	5.40
18	7.5	0.15516	10.6	2.86	5.22
19	7.5	0.34399	23.5	2.93	5.49
20	7.5	0.55624	38	3.14	5.28
21	10.9	0.65285	44.6	3.65	5.22

I tabellene kan man tydelig se en sammenheng mellom gjennomsnittsspenning og vindstyrke. Spenningsvidden har et litt mer variert mønster, men man kan allikevel se at den øker ved

økt vind og bølgehøyde. For mer detaljert informasjon om spenninger, se seksjon B.

4 Utmattingsresultater

I dette kapittelet fremvises endelige resultater for utmatting. Resultatene fremvises i form av tabeller som inneholder skaden for hver sjøtilstand samt total skade og DEL.

Tabell 4.1 inneholder utmattingsdata for de øvre elementene i strømkabelen. Hvert element har en lengde på $\approx 3,3$ meter, der skaden er beregnet i midtpunktet til hvert element. Skaden i hvert element er for ett punkt i tverrsnittet hvor skaden var størst. Bemerk at skaden som oppgis i tabellene er for tilnærmet 1 time (3599,45s).

Skaden for hver sjøtilstand har tatt hensyn til sannsynlighet for inntreffelse av disse miljøfaktorene. Skadene er tilslutt summert opp for hvert element og det beregnes DEL utfra denne verdien. Resultatene viser at element 74 har den største skaden og spenningsamplituden med de angitte materialegenskapene og valgt geometri.

Tabell 4.1: Viser resultater for skaden for hver sjøtilstand i element 74-68, samt total skade og DEL for alle sjøtilstander. D - Skade [skade/3599,45s].

Sjøtilstand nr.	**D element 74**	**D element 72**	**D element 70**	**D element 68**
1	5.04E-10	4.36E-10	4.05E-10	3.87E-10
2	8.52E-10	7.39E-10	6.84E-10	6.53E-10
3	2.17E-10	1.89E-10	1.74E-10	1.66E-10
4	9.21E-11	8.07E-11	7.36E-11	7.03E-11
5	1.06E-11	9.34E-12	8.49E-12	8.09E-12
6	2.59E-12	2.26E-12	2.01E-12	1.91E-12
7	1.86E-09	1.62E-09	1.52E-09	1.45E-09
8	9.19E-10	8.02E-10	7.50E-10	7.17E-10
9	6.55E-10	5.72E-10	5.34E-10	5.10E-10
10	9.67E-10	8.47E-10	7.86E-10	7.51E-10
11	6.21E-10	5.48E-10	5.07E-10	4.84E-10
12	2.04E-10	1.79E-10	1.67E-10	1.60E-10
13	2.92E-10	2.58E-10	2.40E-10	2.30E-10
14	1.09E-09	9.56E-10	8.91E-10	8.55E-10
15	1.43E-09	1.25E-09	1.17E-09	1.12E-09
16	3.94E-09	3.47E-09	3.23E-09	3.10E-09
17	4.51E-09	3.97E-09	3.70E-09	3.54E-09
18	1.47E-11	1.30E-11	1.20E-11	1.15E-11
19	1.36E-11	1.20E-11	1.11E-11	1.07E-11
20	3.13E-10	2.78E-10	2.58E-10	2.48E-10
21	3.53E-13	3.10E-13	2.89E-13	2.78E-13
Tot skade	**1.85E-08**	**1.62E-08**	**1.51E-08**	**1.45E-08**
Tot DEL [MPa]	**7.73E-02**	**7.41E-02**	**7.23E-02**	**7.13E-02**

For å illustrere hvilken sjøtilstand som gir størst bidrag til skade, er det gjort beregning på forholdet mellom skade for sjøtilstanden og total skade, som oppgis i prosent. I tabell 4.2 vises resultatene for hvor mye hver sjøtilstand bidrar der sannsynlighet for inntreffelse er inkludert.

Tabell 4.2: Viser prosentvis bidrag til totalskade i element 74, 72, 70 og 68 når sannsynlighet for inntreffelse av sjøtilstandene er inkludert.

Sjøtilstand	**Bidrag Element 74**	**Bidrag Element 72**	**Bidrag Element 70**	**Bidrag Element 68**
1	2.72 %	2.69 %	2.68 %	2.67 %
2	4.61 %	4.55 %	4.52 %	4.51 %
3	1.17 %	1.16 %	1.15 %	1.14 %
4	0.50 %	0.50 %	0.49 %	0.49 %
5	0.06 %	0.06 %	0.06 %	0.06 %
6	0.01 %	0.01 %	0.01 %	0.01 %
7	10.03 %	9.99 %	10.03 %	10.02 %
8	4.97 %	4.94 %	4.96 %	4.95 %
9	3.54 %	3.52 %	3.53 %	3.52 %
10	5.23 %	5.21 %	5.20 %	5.19 %
11	3.36 %	3.38 %	3.35 %	3.34 %
12	1.10 %	1.10 %	1.10 %	1.11 %
13	1.58 %	1.59 %	1.59 %	1.59 %
14	5.87 %	5.88 %	5.89 %	5.90 %
15	7.71 %	7.73 %	7.73 %	7.74 %
16	21.32 %	21.38 %	21.39 %	21.41 %
17	24.37 %	24.44 %	24.45 %	24.48 %
18	0.08 %	0.08 %	0.08 %	0.08 %
19	0.07 %	0.07 %	0.07 %	0.07 %
20	1.69 %	1.71 %	1.71 %	1.71 %
21	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

I tabell 4.3 vises de samme resultatene, men sannsynlighet for inntreffelse er ikke inkludert.

Tabell 4.3: Viser prosentvis bidrag til totalskade i element 74, 72, 70 og 68 når sjøtilstandene vektes likt

Sjøtilstand	Bidrag Element 74	Bidrag Element 72	Bidrag Element 70	Bidrag Element 68
1	0.07 %	0.07 %	0.07 %	0.07 %
2	0.06 %	0.06 %	0.06 %	0.06 %
3	0.04 %	0.03 %	0.03 %	0.03 %
4	0.01 %	0.01 %	0.01 %	0.01 %
5	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
6	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
7	1.16 %	1.15 %	1.16 %	1.15 %
8	1.10 %	1.09 %	1.09 %	1.09 %
9	0.78 %	0.77 %	0.78 %	0.77 %
10	0.38 %	0.38 %	0.38 %	0.38 %
11	0.19 %	0.19 %	0.19 %	0.18 %
12	6.84 %	6.83 %	6.83 %	6.82 %
13	6.81 %	6.81 %	6.81 %	6.80 %
14	6.53 %	6.51 %	6.53 %	6.52 %
15	6.48 %	6.47 %	6.48 %	6.47 %
16	5.88 %	5.87 %	5.89 %	5.87 %
17	5.13 %	5.13 %	5.14 %	5.13 %
18	16.76 %	16.81 %	16.72 %	16.76 %
19	15.60 %	15.59 %	15.54 %	15.57 %
20	14.29 %	14.37 %	14.39 %	14.37 %
21	11.90 %	11.86 %	11.89 %	11.93 %

Resultatene viser at sjøtilstand 18, 19 og 20 gir mest skade på kabelen, men med sannsynligheten for inntreffelse tatt i betraktning er det sjøtilstand 16 og 17 som gir størst bidrag

Tabell 4.4 viser skadene for den bøyde seksjonen av kabelen. Lengden på hvert element er tilsvarende som i den øvre. Skaden i denne delen av strømkabelen er lavere, som bekrefter at den øvre seksjonen er mer utsatt for utmatting. Element 37 og 38 opplever de største påkjenningene.

Tabell 4.4: Viser resultater for skaden for hver sjøtilstand i element 38-35, samt total skade og DEL for alle sjøtilstander. D - Skade [skade/3599,45s].

Sjøtilstand nr.	D element 35	D element 36	D element 37	D element 38
1	1.34E-11	3.29E-11	5.69E-11	3.04E-11
2	1.90E-11	4.01E-11	5.83E-11	4.33E-11
3	7.56E-12	1.61E-11	2.17E-11	1.43E-11
4	9.39E-12	2.54E-11	3.86E-11	1.88E-11
5	2.78E-12	1.04E-11	1.29E-11	4.78E-12
6	7.07E-13	2.11E-12	2.11E-12	8.13E-13
7	4.40E-12	1.16E-11	1.74E-11	1.23E-11
8	2.38E-12	5.43E-12	9.42E-12	7.08E-12
9	2.72E-12	5.06E-12	1.02E-11	7.25E-12
10	8.54E-12	1.69E-11	3.04E-11	2.02E-11
11	9.02E-12	1.92E-11	2.91E-11	2.08E-11
12	2.26E-13	5.84E-13	1.29E-12	1.07E-12
13	3.19E-13	7.51E-13	1.40E-12	1.37E-12
14	1.13E-12	2.80E-12	6.49E-12	4.48E-12
15	1.64E-12	3.92E-12	9.31E-12	6.31E-12
16	5.23E-12	9.75E-12	2.48E-11	1.88E-11
17	5.96E-12	9.77E-12	2.54E-11	2.27E-11
18	1.43E-14	2.79E-14	7.41E-14	7.38E-14
19	1.40E-14	2.36E-14	7.18E-14	6.58E-14
20	2.87E-13	5.45E-13	1.60E-12	1.48E-12
21	1.50E-15	1.12E-15	2.51E-15	2.57E-15
Tot skade	**9.47E-11**	**2.13E-10**	**3.57E-10**	**2.36E-10**
Tot DEL [MPa	**1.33E-02**	**1.75E-02**	**2.08E-02**	**1.81E-02**

Videre følger prosentvis bidrag i de forskjellige sjøtilstandene for den bøyde seksjon, som er illustrert i tabell 4.5

Tabell 4.5: Viser prosentvis bidrag til totalskade i element 35, 36, 37 og 38 når sannsynlighet for inntreffelse av sjøtilstandene er inkludert.

Sjøtilstand	**Bidrag Element 35**	**Bidrag Element 36**	**Bidrag Element 37**	**Bidrag Element 38**
1	14.11 %	15.42 %	15.93 %	12.84 %
2	20.06 %	18.80 %	16.31 %	18.33 %
3	7.99 %	7.53 %	6.08 %	6.06 %
4	9.91 %	11.90 %	10.79 %	7.95 %
5	2.94 %	4.86 %	3.60 %	2.02 %
6	0.75 %	0.99 %	0.59 %	0.34 %
7	4.65 %	5.46 %	4.86 %	5.22 %
8	2.52 %	2.54 %	2.64 %	2.99 %
9	2.87 %	2.37 %	2.85 %	3.07 %
10	9.02 %	7.93 %	8.50 %	8.53 %
11	9.52 %	8.99 %	8.14 %	8.78 %
12	0.24 %	0.27 %	0.36 %	0.45 %
13	0.34 %	0.35 %	0.39 %	0.58 %
14	1.20 %	1.31 %	1.82 %	1.90 %
15	1.73 %	1.84 %	2.61 %	2.67 %
16	5.52 %	4.57 %	6.94 %	7.94 %
17	6.29 %	4.58 %	7.10 %	9.62 %
18	0.02 %	0.01 %	0.02 %	0.03 %
19	0.01 %	0.01 %	0.02 %	0.03 %
20	0.30 %	0.26 %	0.45 %	0.62 %
21	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

I tabell 4.5 vises de samme resultatene, men sannsynlighet for inntreffelse er ikke inkludert.

Tabell 4.6: Viser prosentvis bidrag til totalskade i element 35, 36, 37 og 38 når sjøtilstandene vektes likt.

Sjøtilstand	Bidrag Element 35	Bidrag Element 36	Bidrag Element 37	Bidrag Element 35
1	1.11 %	1.65 %	1.22 %	0.75 %
2	0.81 %	1.02 %	0.64 %	0.55 %
3	0.76 %	0.97 %	0.56 %	0.43 %
4	0.68 %	1.11 %	0.72 %	0.41 %
5	0.56 %	1.25 %	0.66 %	0.28 %
6	0.34 %	0.60 %	0.26 %	0.12 %
7	1.70 %	2.71 %	1.73 %	1.42 %
8	1.76 %	2.41 %	1.79 %	1.55 %
9	2.01 %	2.25 %	1.94 %	1.59 %
10	2.09 %	2.49 %	1.91 %	1.47 %
11	1.67 %	2.14 %	1.39 %	1.14 %
12	4.70 %	7.29 %	6.92 %	6.62 %
13	4.59 %	6.50 %	5.18 %	5.86 %
14	4.21 %	6.26 %	6.20 %	4.95 %
15	4.62 %	6.63 %	6.74 %	5.28 %
16	4.82 %	5.41 %	5.89 %	5.15 %
17	4.20 %	4.14 %	4.60 %	4.76 %
18	10.07 %	11.85 %	13.48 %	15.50 %
19	9.92 %	10.03 %	13.07 %	13.82 %
20	8.10 %	9.25 %	11.61 %	12.39 %
21	31.29 %	14.02 %	13.48 %	15.95 %

Resultatene for bøyd seksjon av kabel viser at sjøtilstand 18 til 21 gir størst bidrag, men sjøtilstand 1 og 2 gir størst bidrag hvis sannsynlighet for inntreffelse av sjøtilstanden er inkludert.

Avslutningsvis illustreres det hvordan utmattingen utvikler seg nedover strømkabelen. Tabell 4.7 viser forholde mellom de ulike elementene og element 74. Det kommer tydelig frem i tabell at element 74 er den delen av kabelen som opplever de største påkjenningene og at og at de gradvis synker nedover strømkabelen. Bøyd seksjon opplever bare omtrent 1/5 av DEL i forhold til element 74

Tabell 4.7: Viser forholde til DEL mellom element 74 og elementene nedover strømkabelen.

Element nr.	**Forholdstall DEL**
74	1,000
72	0,957
70	0,935
68	0,922
38	0,234
37	0,268
36	0,226
35	0,172

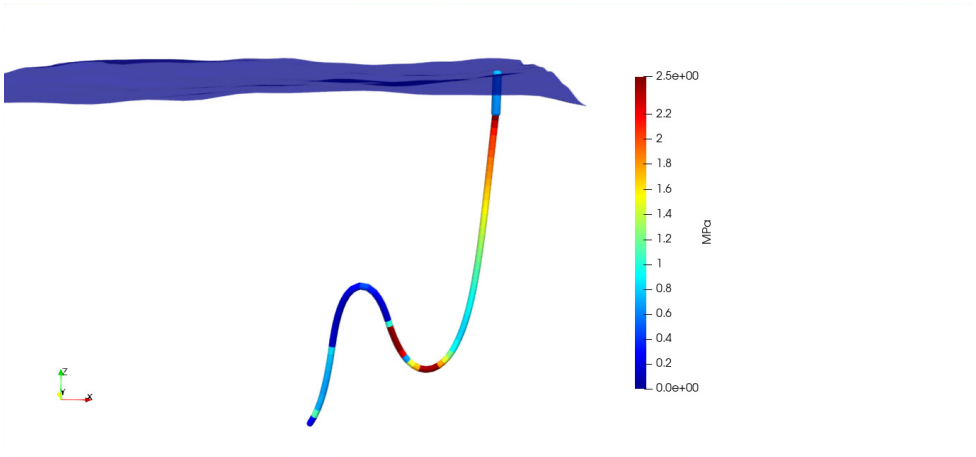
5 Diskusjon

I dette kapittelet blir resultater diskutert. Diskusjonen går innpå temaer som har spilt en stor rolle for resultatene. Temaene innebærer strømkabelens geometri og materialegenskaper, plattformbevegelser og miljøforhold, samt utmatting. Tilslutt nevnes forslag for videre arbeid.

5.1 Strømkabelens geometri og materialegenskaper

Som nevnt tidligere er utgangspunktet for geometri og materialegenskaper til strømkabelen basert på masteroppgaven til Karoline Bakken (Bakken, 2019). Informasjonen fra oppgaven er i noen tilfeller litt vanskelig å hente ut, slik at det må gjøres egne beregninger for å finne ønsket inngangsparametere. Det kan derfor være noen parametere som ikke samsvarer med Bakkens. Samtidig er det verdt å nevne Bakkens strømkabel er selvlaget med veiledningshjelp, som betyr at det er rom for feil og at materialdefinisjoner kan avvike fra faktiske dynamiske strømkabler som produseres.

I startfasen av simuleringene av strømkabelen ble det benyttet en skjærmodul på $G = 5e9$ Pa i kabelseksjonene og $G = 2e9$ Pa i oppdriftsseksjonen. Med disse materialdefinisjonene ble kabelen veldig stiv i torsjon sammenlignet med bøyestivhetene. Ettersom fraksjonsstivhet skalerer bøyestivheten, men ikke torsjonsstivheten ble det problemer og resultatene viste høyere torsjonsmomenter enn bøyemomenter. Skjærmodul måtte derfor reduseres til $G = 2e8$ Pa i kabelseksjon og $G = 8e6$ Pa i oppdriftsseksjon. En av de problematiske simuleringene er vist i figur 5.1, som viser von Mises spenningene i strømkabelen.



Figur 5.1: Viser de underlige spenninger som oppstod i sjøtilstand 15 med gammel skjærmodul.

Lengden på kabelen ble oppskalert ved å se på forholdet mellom lengden på seksjonene og havdypden. Det er ukjent om kabelens geometri endres ved endring av havdybde. Det er ikke usannsynlig at diameter på kabel øker proporsjonalt med havdybden. Dette vil isåfall forårsake en høyere masse og resultere i høyere aksiale krefter. Dette kan derfor undersøkes nærmere ved videre arbeid. Det kan også være nyttig å få detaljerte materialegenskaper fra en produsent, for å være trygg på at spenningene er mer realistiske. Samtidig vil det være nyttig å undersøke andre konfigurasjoner enn lazy wave, eller optimalisere lazy wave ved å se på forskjellige avstander mellom plattform og havbunn, samt hvor stor del av kabelen som skal ha oppdrift.

5.2 Tvungen bevegelse og miljøforhold

Bevegelsene og miljøforhold er et viktig aspekt i simuleringene. Generelt er det vanskelig å skape de eksakte vær og sjø forholdene der plattformen skal plasseres, men samlet data over tid gjør det mulig å regenerere tilstandene.

Samlet bevegelse på strømkabelen er en kombinasjon av strøm, bølger og bevegelser fra Ludvik Bergmann. På et sent tidspunkt oppdaget Bergmann at det var en grov feil i simuleringene han hadde gjennomført. Innkommende vind var kun generert på halve rotoren, som spesielt påvirket yaw-bevegelsene på plattformen. Det ble derfor besluttet å ta bort yaw-bevegelsene tvungne bevegelsen.

For å prøve å skape et realistisk scenario for strømkabelen ble det satt på både bølge og strøm. Et lite problem med å sette på bølger er at plattformbevegelsene og bølgene ikke er konsistente. Noen av simuleringene fikk veldig underlige resultater, og det ble derfor besluttet å undersøke miljøforholdene nærmere med en sensitivitetsanalyse. Etter analysen viser det seg at bølgene skaper noen komplikasjoner. På de problematiske simuleringene ble derfor bølgene slått av, mens resterende simuleringer ble beholdt grunnet tidspress.

For videre arbeid vil det være nyttig å importere de nye bevegelsene fra Bergmann for å inkludere yaw, men den mest logiske fremgangsmåten er å simulere en komplett konfigurasjon med vindturbin, plattform, forankringsliner og strømkabel i en integrert simuleringsmodell som 3DFloat. Dette vil gi konsistens mellom plattformbevegelser, strøm og bølger. Fremgangsmåten i denne masteroppgaven ble valgt for å redusere kompleksiteten i simuleringene.

5.3 Utmatting og spenninger i strømkabel

I beregningen benyttes I og A for stålarmeringen, og ikke I og A til strømkabelen i simuleringene. Med dette antas det at stålarmeringen tar opp alle spenningene i tverrsnittet som oppstår under bevegelsene. Det benyttes en samlet I_y, I_z og A for hele armeringstverrsnittet, som betyr at det også antas at tverrsnittet forblir plant.

I utmattingsberegningene er det gjort en del antagelser. Det blir blant annet antatt at stålarmeringen er helt solid og 0°pitch på stålfibere. Som nevnt antas det at plane tverrsnitt forblir plane, som ikke vil være tilfelle i virkeligheten. Dette blir gjort for å kunne bruke en samlet I_y, I_z og A for hele tverrsnittet. Det blir beregnet ny I og A for tverrsnittet med stålarmering for beregning av spenninger. Nytt areal er vesentlig mindre og opplever derfor mye høyere spenninger enn tverrsnittet som er benyttet i simuleringene. Med dette antas det dermed at alle krefter og momenter som måles i simuleringene bli tatt opp i armering, som heller ikke vil samsvare med realiteten.

I simulering og analyse kapittelet oppgis det maksimale gjennomsnittsspenninger og spenningsvidde i kabeltverrsnittet i de 21 ulike sjøtilstand. Det er viktig å bemerke at dette gjelder kun for én realisering av sjøtilstandene, som vil si at maks og min spenninger kan endre seg med flere realiseringer. For undersøkelse av dette er det nødvendig med

flere realiseringer og beregne maks/min spenninger ut fra en statistisk betraktning. For en utmattingsanalyse godtas én realisering.

Når det kommer til selve utmattingen og beregning av skade er valg av SN-kurve helt avgjørende. SN-kurve som ble valgt til armeringen var fra DNV standarden RP-C203 som beskriver offshore stålstrukturer. Stigningstallet m til log-log diagrammet er 3 i de fleste tilfellene, men konstanten C (a_1 i RP-C203) varierer for hver kurve. Dette påvirker resultatene for skaden i relativt stor grad, som påvirker levetid i enda større grad. Det ble derfor bestemt i senere tid å undersøke DEL, og gjøre forholdsberegninger mellom elementene. Ved bruk av S-N kurver uten knekkpunkt, og relativ sammenligning av DEL, endrer ikke en opp- eller nedskalering av spenningene, med en fast faktor, resultatet. Ved å se på disse forholdene kan man da se hvordan utmattingen utvikler seg nedover kabelen og man får et forhold på hvor mye spenningsvidden til DEL øker/reduseres i de forskjellige elementene.

I denne oppgaven er det ikke vektlagt hvilket spenningspunkt som får den største skaden, men heller spenningspunktet som får den høyeste verdien for skade. I den øvre seksjonen av kabelen er det lite bøyemomenter og det blir dermed relativt like spenninger i de 8 punktene. Ved en eventuell annen realisering av miljøforhold kan maksimalt skadepunkt flytte seg, men dette er ikke ansett som en viktig faktor for utmattingsresultatene. Det interessante for denne oppgaven er hva som er den høyeste skaden og ikke hvor. Hvor i tverrsnittet den største skaden skjer kan eventuelt undersøkes i videre arbeid.

5.4 Videre arbeid

For videre arbeid er det som nevnt, nyttig å få spesifikke materialspesifikasjoner for å kunne beregne en relativt nøyaktig levetid for strømkabelen. Det vil også være nødvendig å inkludere alle elementene i tverrsnittet av kabelen og kjøre en lokal simulering på dette i eksempelvis ANSYS.

Det kunne også vært interessant å undersøke endepunktene/overganger til strømkabelen. I disse områdene vil det være nødvendig å inkludere spenningskonsentrasjonsfaktor (SCF), som kan være et vanskelig parameter å finne uten testing.

6 Konklusjon

I denne oppgaven var fokuset på å utforske de dynamiske påkjenningene i armeringen til strømkabelen for flytende vindturbin.

Med lazy wave konfigurasjon blir det kjørt simuleringer med plattformbevegelser fra Ludvik Bergmann, samt bølger og strøm i 3DFoat. I simuleringene undersøkes elementer i øvre og bøyd seksjon av strømkabelen i form av krefter og momenter. Resultatene viser at element 74 kjenner på de største påkjenningene med en DEL på 77 kPa og en gradvis nedgang i spenningsvidde i underliggende elementer. I bøyd seksjon av strømkabel er spenningsviddene omtrent 1/5 av de øvre elementene.

Med dette konkluderes det med at den øvre regionen av strømkabelen er mest utsatt for dynamiske påkjenninger med lazy wave konfigurasjon, sett bort fra eventuelle overganger.

Referanser

Abdallah, I., Tatsis, K., og Chatzi, E. (2017). Fatigue assessment of a wind turbine blade when output from multiple aero-elastic simulators are available. Hentet fra https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.509.

Bailey, H., Brookes, K. L., og Thompson, P. M. (2014). Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future. *Aquatic biosystems*, 10(1). 1-13. https://doi.org/10.1186/2046-9063-10-8.

Bakken, K. (2019). *Fatigue of Dynamic Power Cables Applied in Offshore Wind Farms.* (Masteroppgave). Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim.

Bolotinha, M. (2021). An introduction to submarine cables & subsea power cables. (Bilde). Hentet fra https://www.electricaltechnology.org/2018/02/submarine-cables-subsea-power-cables.html.

Callister, W. D. og Rethwisch, D. G. (2014). *Material Science and Engineering: 9th Edition.* (1.utg). Asia: Jhon Wiley & Sons Pte Ltd.

DNV (2010). Recomended practice dnv-rp-c205: Enviromental conditions and enviromental loads. Hentet fra https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnv/codes/docs/2010-10/rp-c205.pdf.

DNV (2018). Floating wind turbine structures: Dnvgl-st-0119. Hentet fra https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/ST/2018-07/DNVGL-ST-0119.pdf.

FN-sambandet (2021). Stoppe klimaendringene. Hentet fra https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/stoppe-klimaendringene.

Gao, Z., Bingham, H., Ingram, D., Kolios, A., Karmakar, D., Utsunomiya, T., Capitovic, I., Colicchio, G., Rodrigues, J. M., Adam, F., Karr, D., Fang, C., Shin, H.-K., Slätte, J., Ji, C., Sheng, W., Liu, P., og Stoev, L. (2018). Issc 2018 committee v.4: Offshore renewable energy. (s.193-277). https://www.researchgate.net/publication/326261155_ISSC_2018_committee_V4_OFFSHORE_RENEWABLE_ENERGY.

Hendriks, H. og Bulder, B. (1995). Fatigue equivalent load cycle method: A general method to compare the fatigue loading of different load spectrums. Hentet fra https://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-C--95-074.

IRENA (2016). High voltage submarine cable, 36-525 kv. Hentet fra https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Offshore_Wind_Floating_Foundations_2016.pdf.

Karimirad, M. (2014). *Offshore energy structures: for wind power, wave energy and hybrid marine platforms.* (1.utg). Cham: Springer.

Karlsen, S. (2010). Fatigue of copper conductors for dynamic subsea power cables. *29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 6.* Hentet fra https://doi.org/10.1115/OMAE2010-21017.

Life50+ (2015). Qualification of innovative floating substructures for 10mw wind turbines and water depths greater than 50m: Deliverable 1.1 oceanographic and meteorological conditions for the design.

Michalopoulos, V. (2015). *Simplified fatigue assessment of offshore wind support structures accounting for variations in a farm.* (Masteroppgave). Delft University of Technology.

Nexans (2021). High voltage submarine cable, 36-525 kv. Hentet fra https://www.nexans.no/eservice/Norway-en/navigate_335223/High_voltage_submarine_cable_36_525_kV.html#.

Robertson, A., Jonkman, J., Vorpahl, F., Popko, W., Qvist, J., Frøyd, L., ..., og Guérinel, M. (2014). Offshore code comparison collaboration continuation within iea wind task 30: Phase ii results regarding a floating semisubmersible wind system. https://doi.org/10.1115/OMAE2014-24040.

Silva de Souza, C. E., Berthelsen, P. A., Eliassen, L., Bachynski, E., Engebretsen, E., og Haslum, H. (2021). Definition of the ino windmoor 12 mw base case floating wind turbine. Hentet fra https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2723188.

Terjesen, G. (2020). *Bok 2: Grunnleggende om utmatting og metaller.* Ås: REALTEK, NMBU.

WindEurope (2017). *Floating Offshore Wind Vision Statement.* Brussel: WindEurope. Hentet fra https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/Floating-offshore-statement.pdf.

WindEurope (2021). Oceans of opportunity. Hentet fra https://windeurope.org/policy/topics/offshore-wind-energy/.

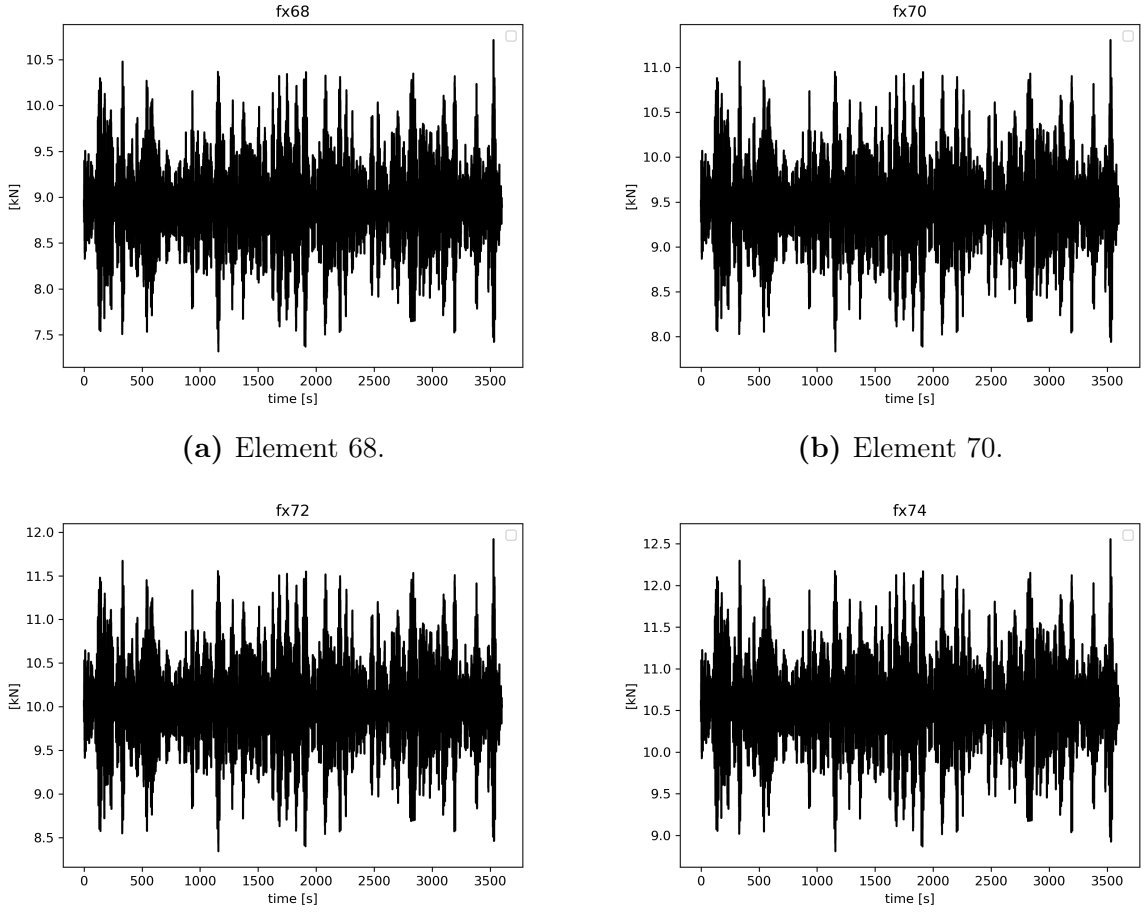
Worzyk, T. (2009). *Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects.* (1.utg). Heidelberg: Springer.

Appendiks

A Krefter og momenter i simuleringene

Underveis har det blitt gjort en rekke simuleringer. I denne seksjonen vises plott for krefter og momenter som ikke er inkludert i selve oppgaven. Seksjonen er delt inn i 2 underseksjoner der seksjonene viser plott for simulering som er brukt til videre beregning av utmatting og plott for de problematiske simuleringene med bølger.

A.1 Flere plott fra endelig simulering



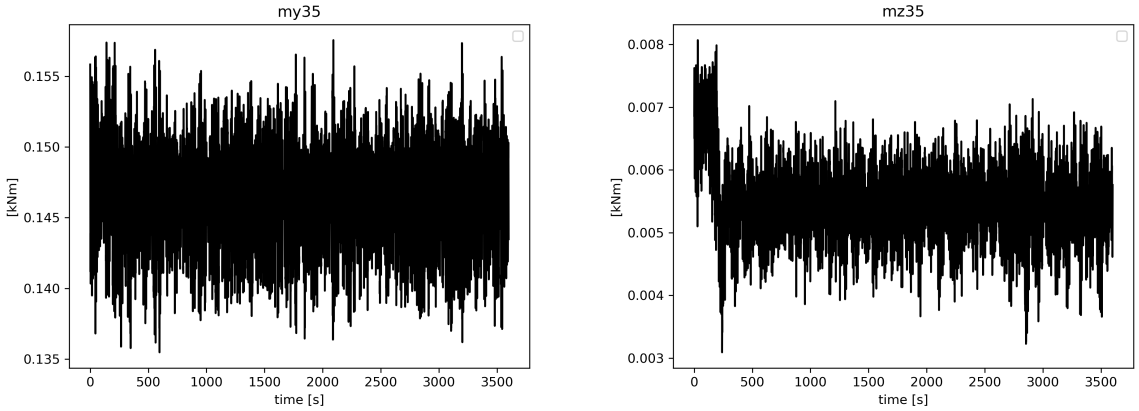
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

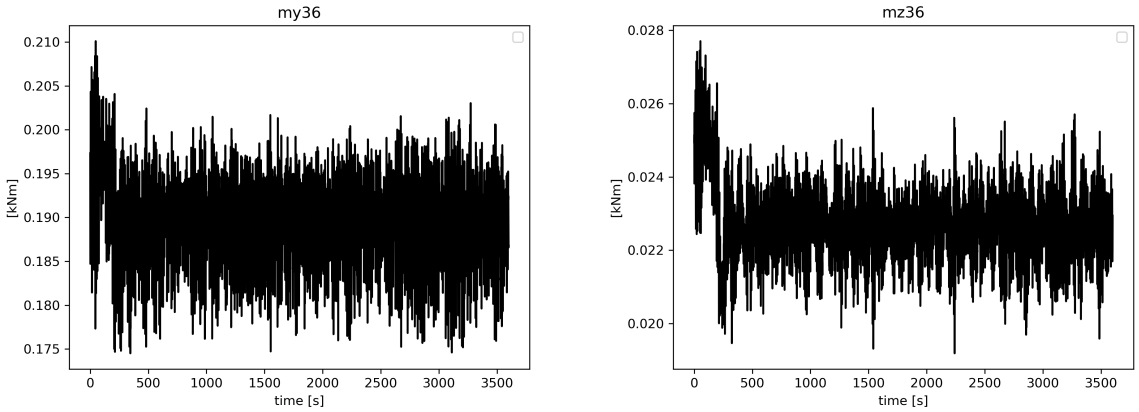
(d) Element 74.

Figur A.1: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 1.



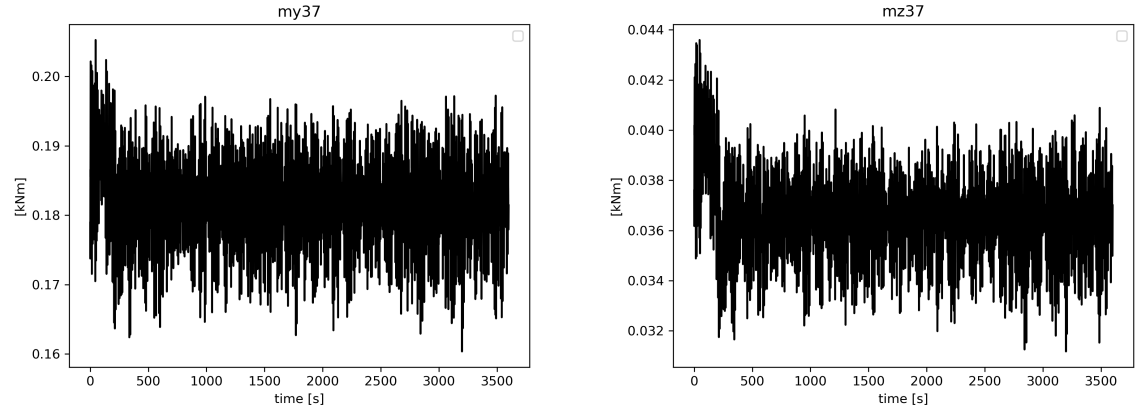
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.2: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 1, som er målt fra monitor i element 35.



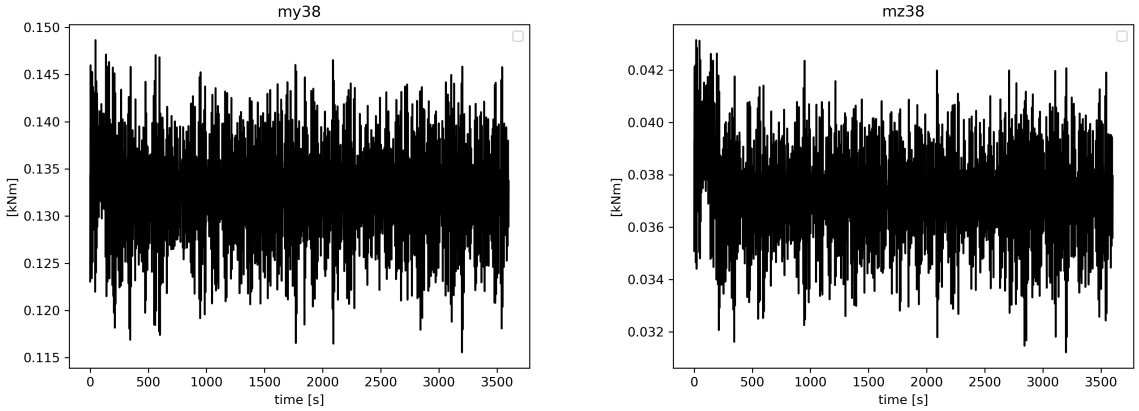
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.3: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 1, som er målt fra monitor i element 36.



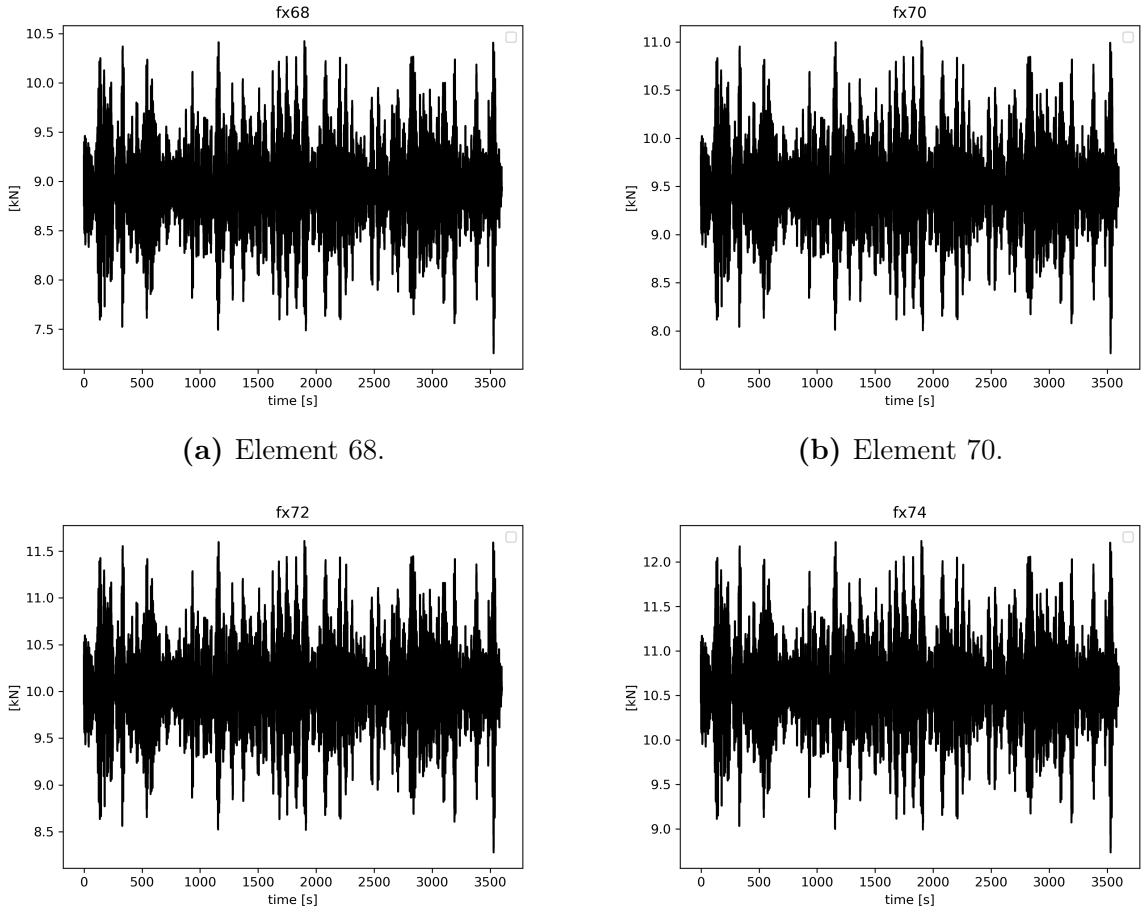
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.4: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 1, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

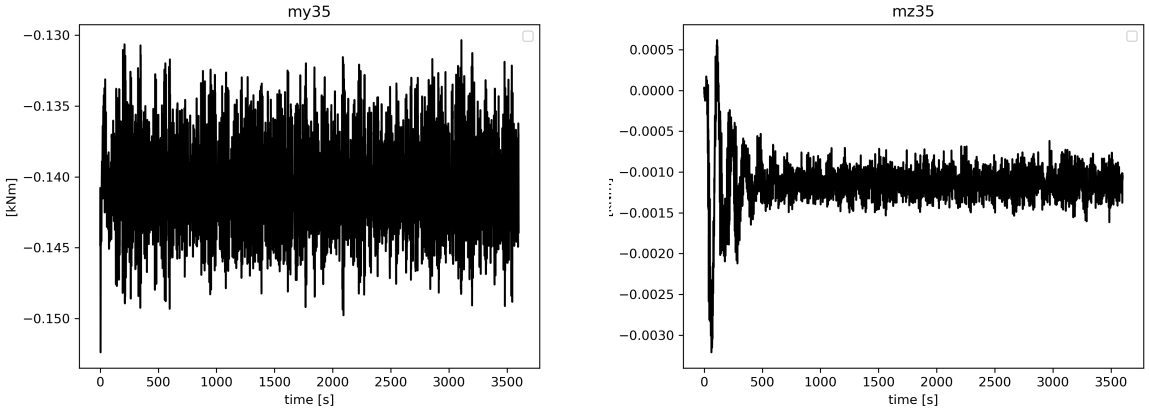
Figur A.5: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 1, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

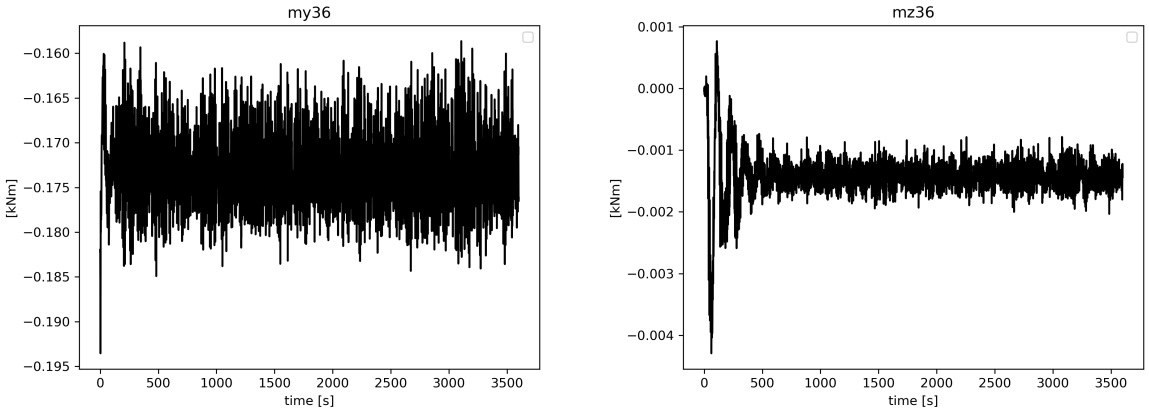
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.6: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 2.



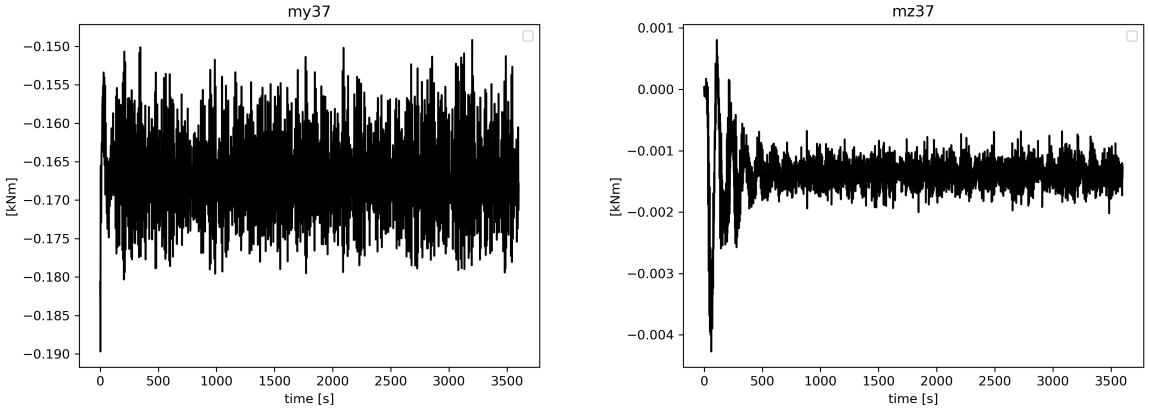
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.7: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 2, som er målt fra monitor i element 35.



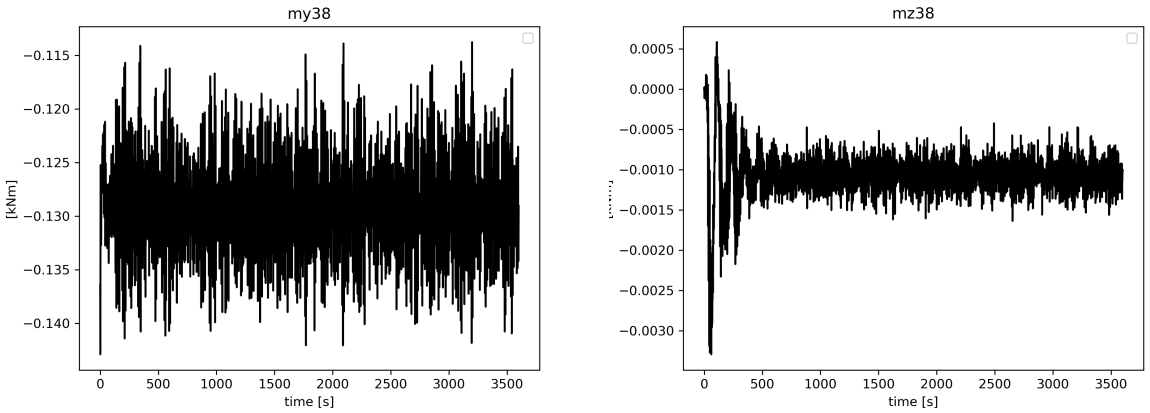
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.8: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 2, som er målt fra monitor i element 36.



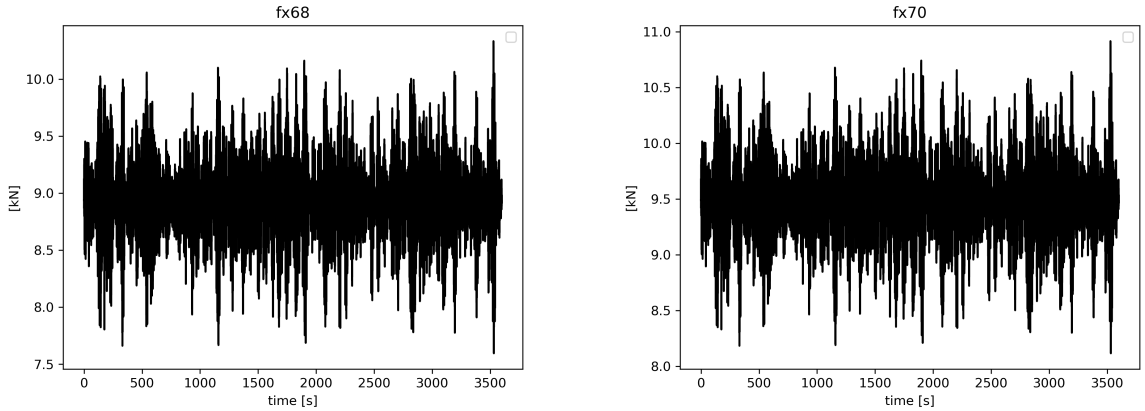
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.9: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 2, som er målt fra monitor i element 37.

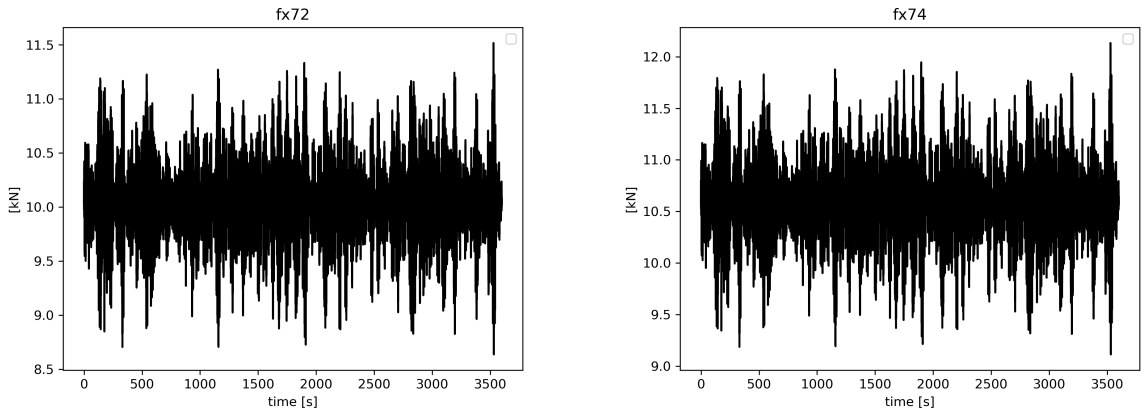


(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.10: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 2, som er målt fra monitor i element 38.

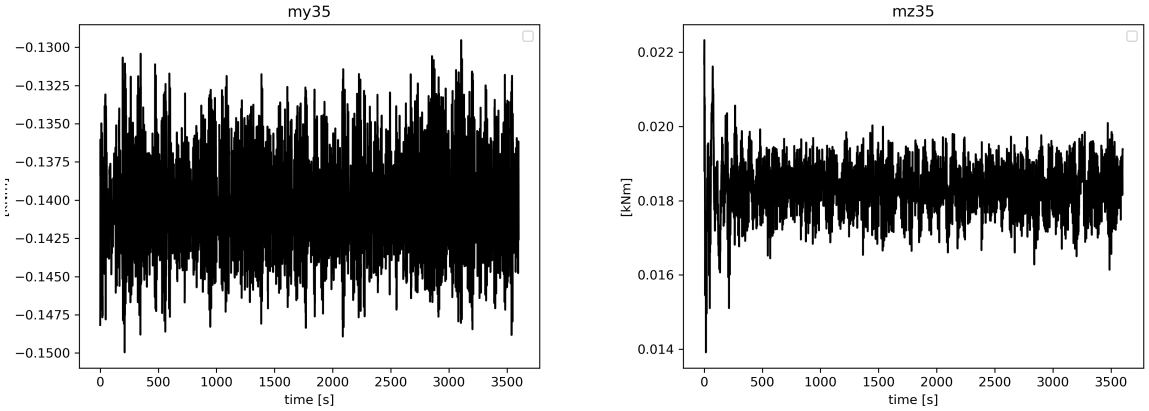


(a) Element 68. **(b)** Element 70.



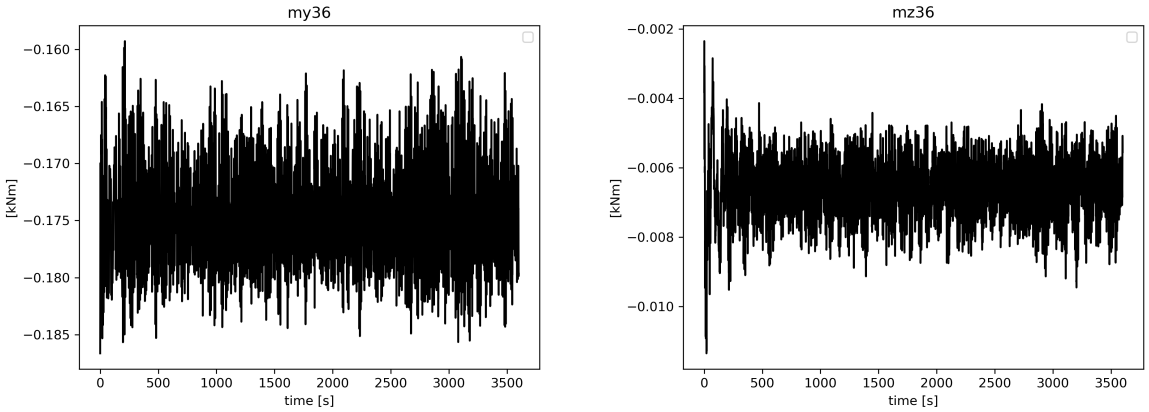
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.11: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 3.



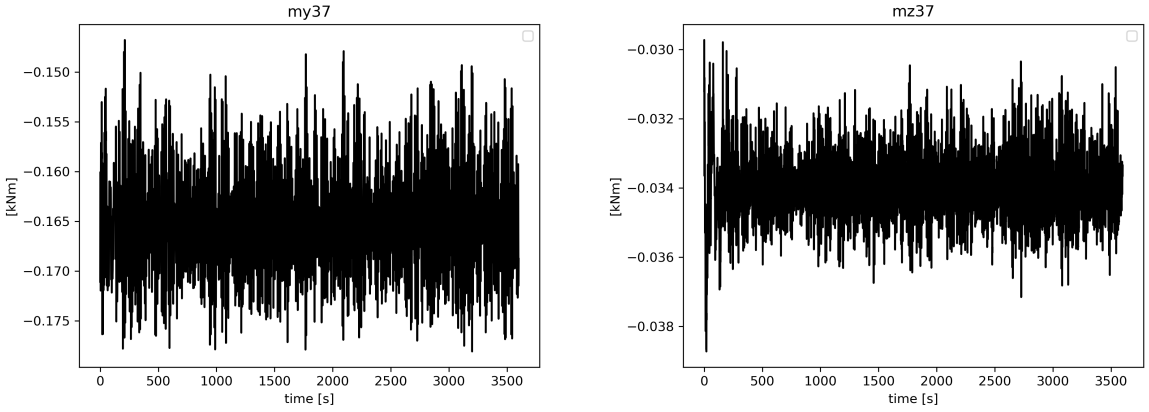
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.12: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 3, som er målt fra monitor i element 35.



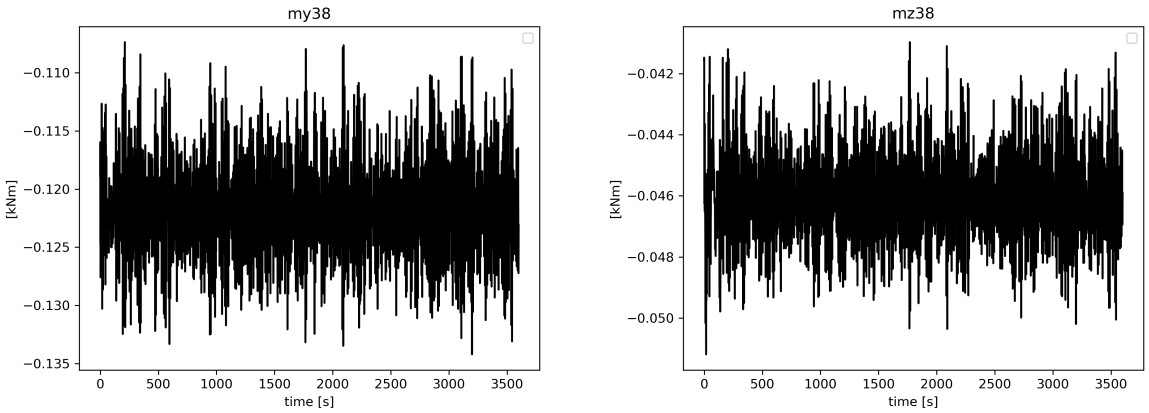
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.13: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 3, som er målt fra monitor i element 36.



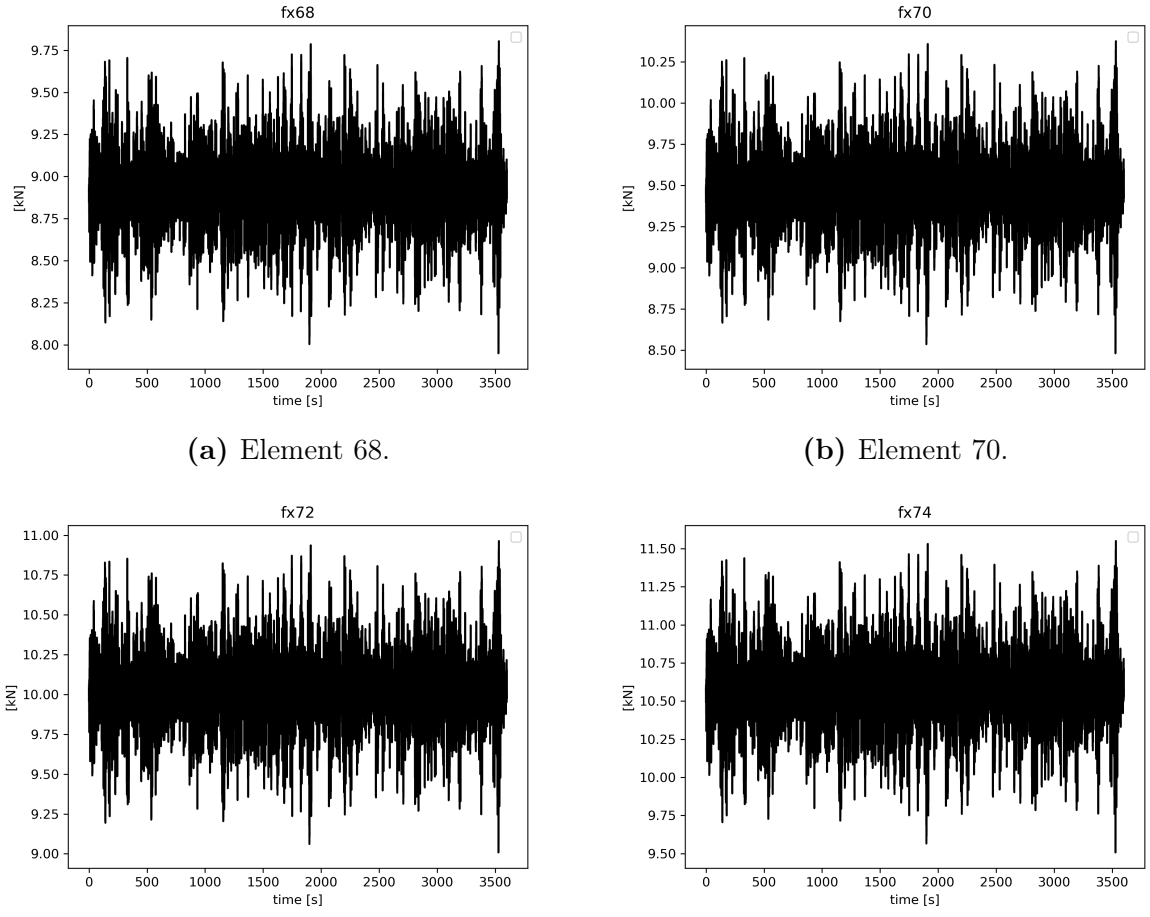
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.14: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 3, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

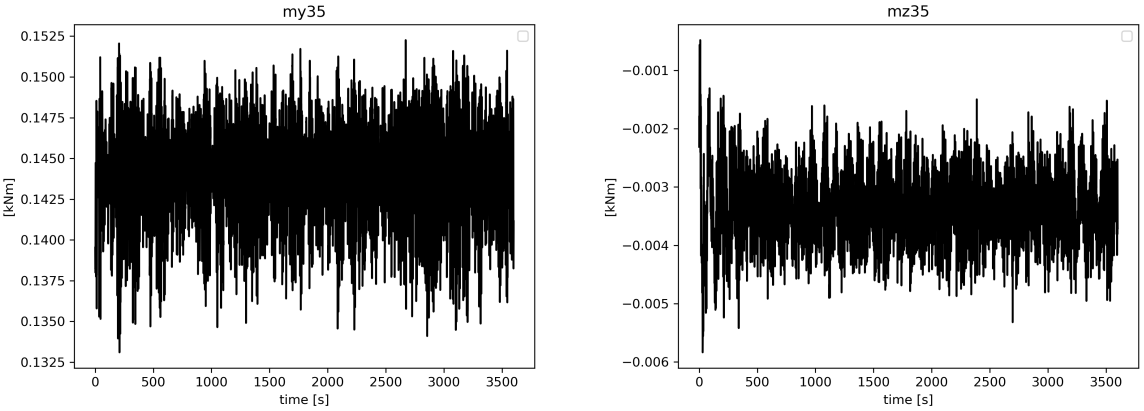
Figur A.15: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 3, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

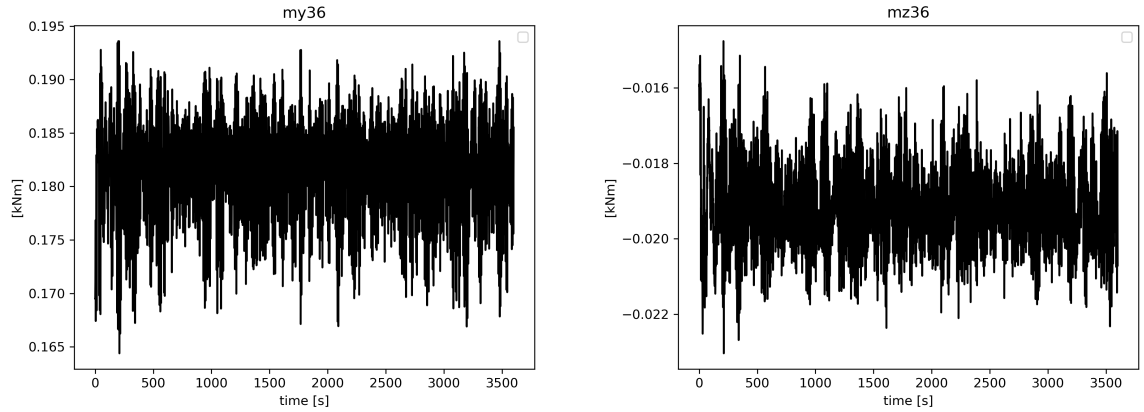
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.16: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 4.



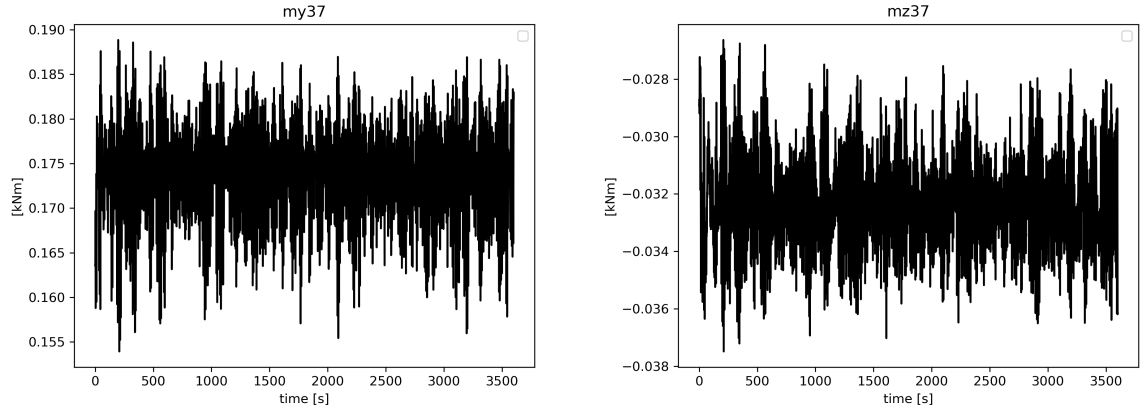
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.17: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 4, som er målt fra monitor i element 35.



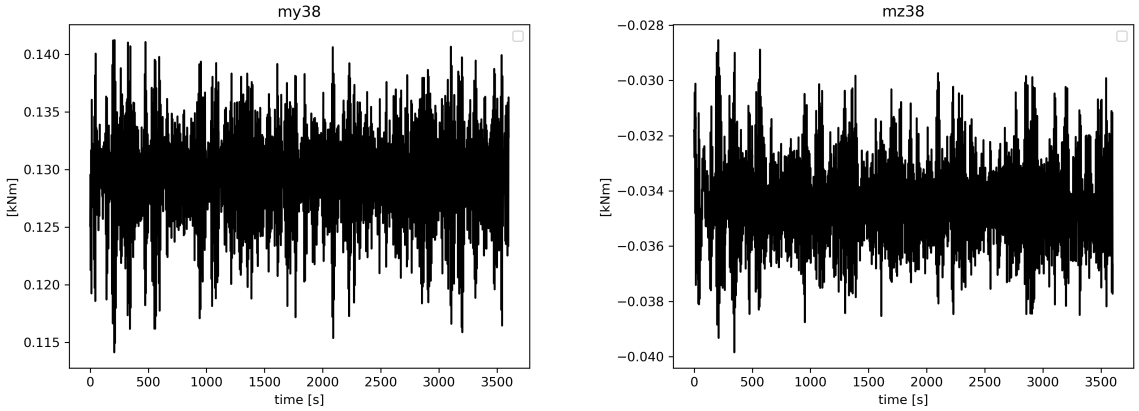
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.18: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 4, som er målt fra monitor i element 36.



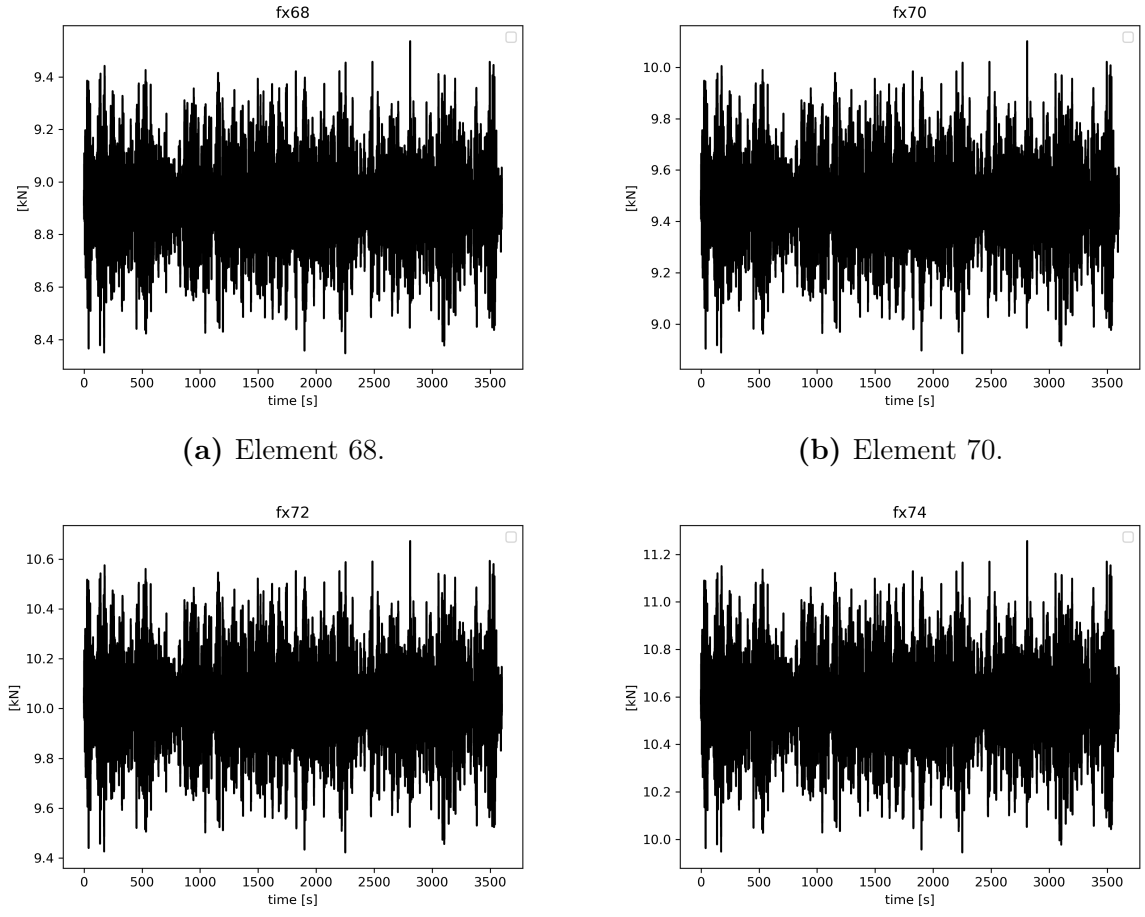
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.19: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 4, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

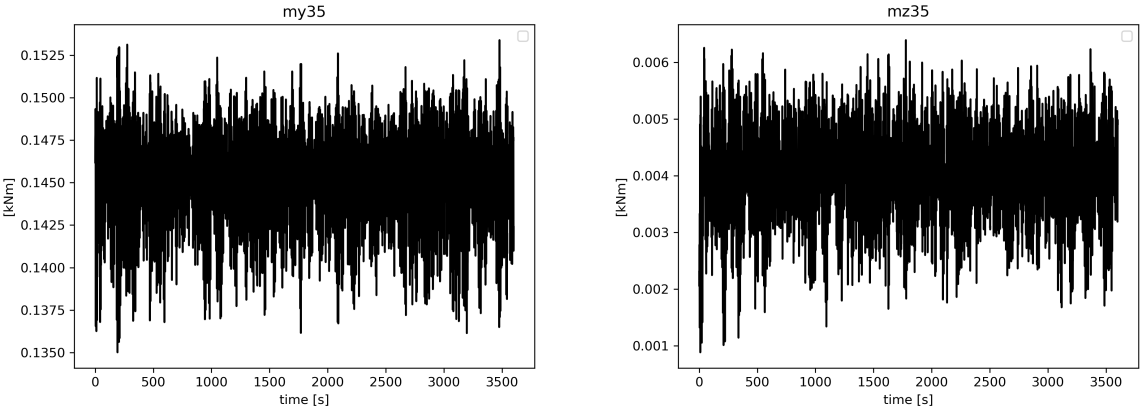
Figur A.20: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 4, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

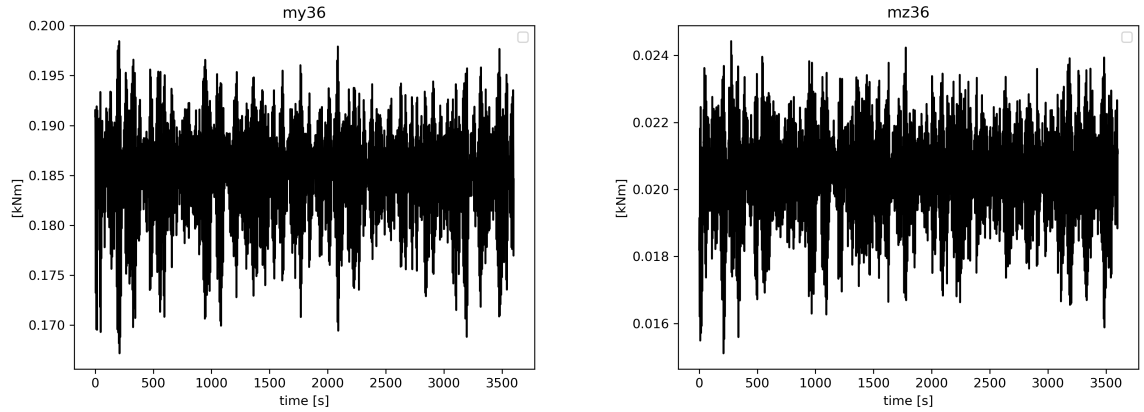
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.21: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 5.



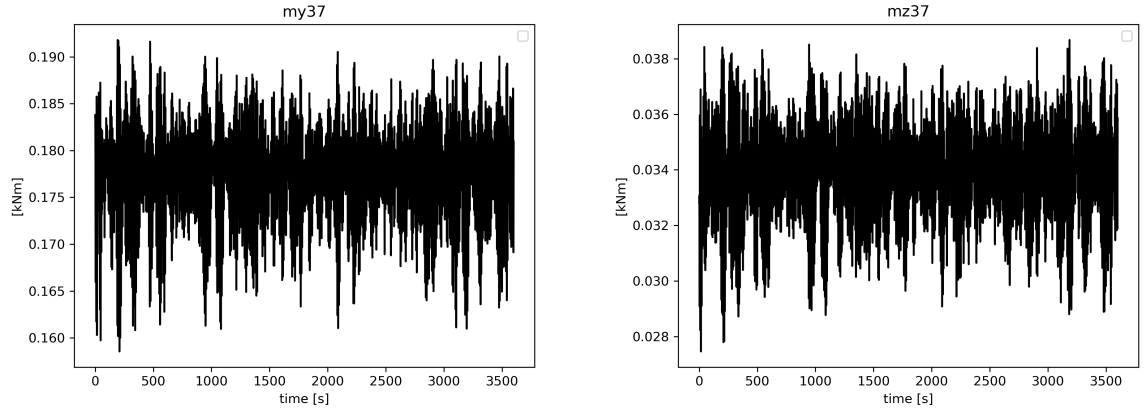
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.22: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 5, som er målt fra monitor i element 35.



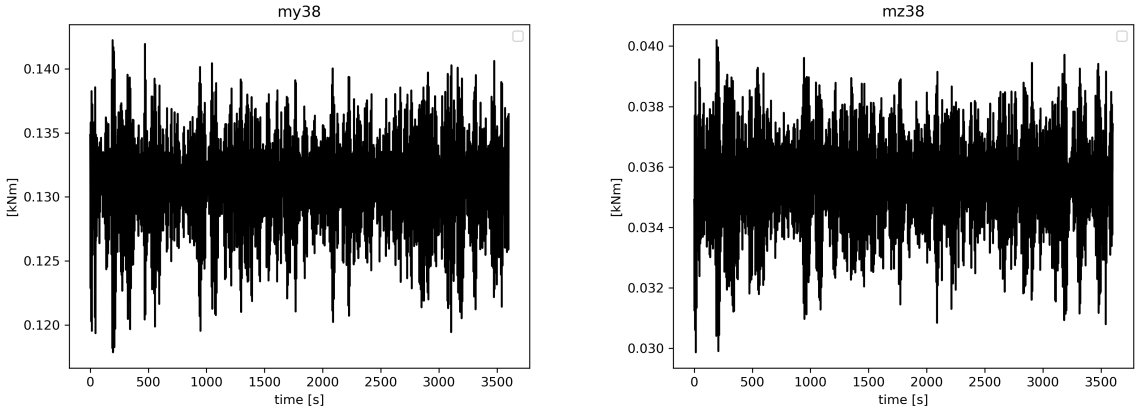
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.23: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 5, som er målt fra monitor i element 36.



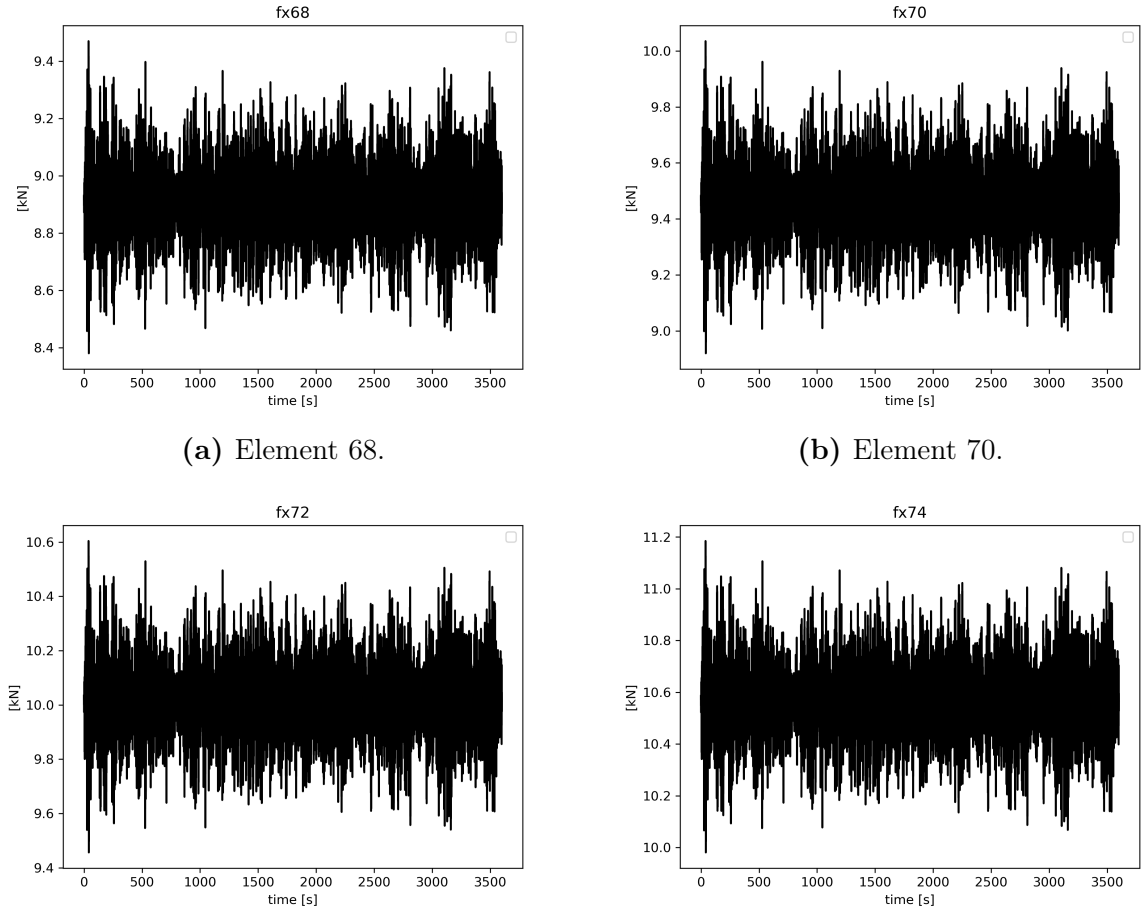
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.24: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 5, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

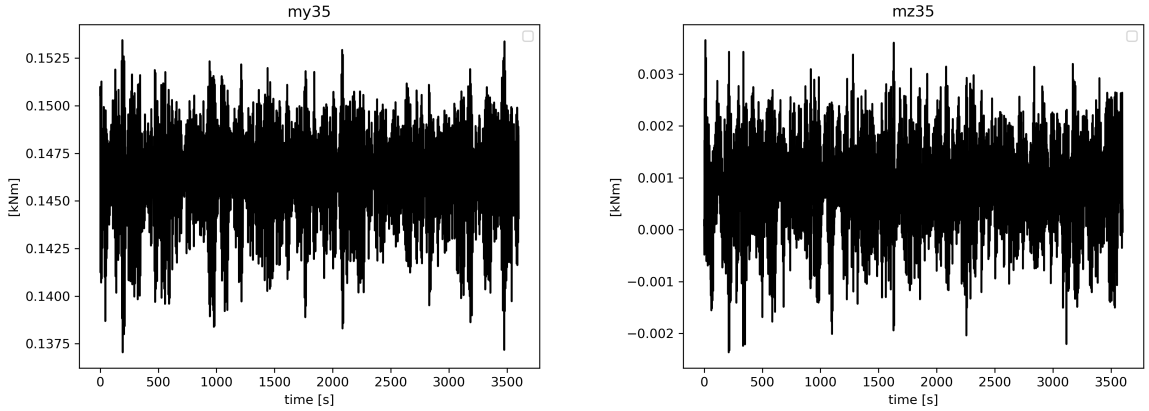
Figur A.25: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 5, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

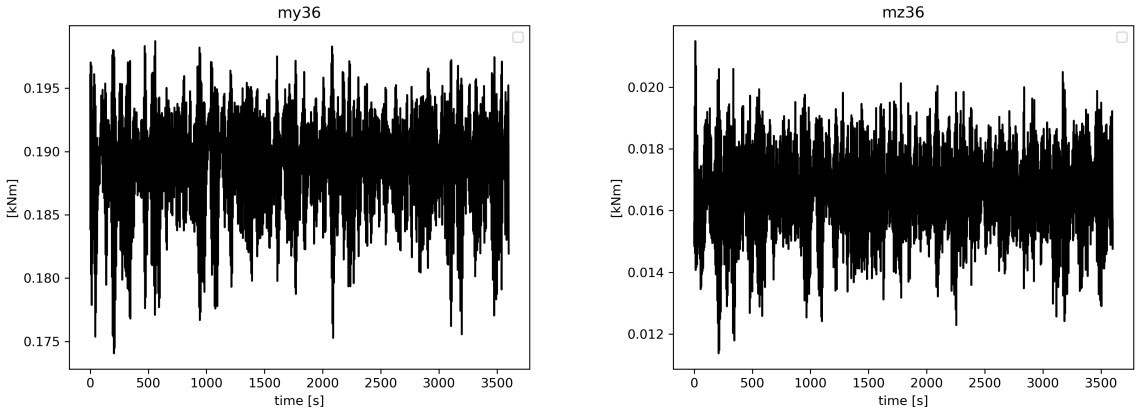
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.26: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 6.



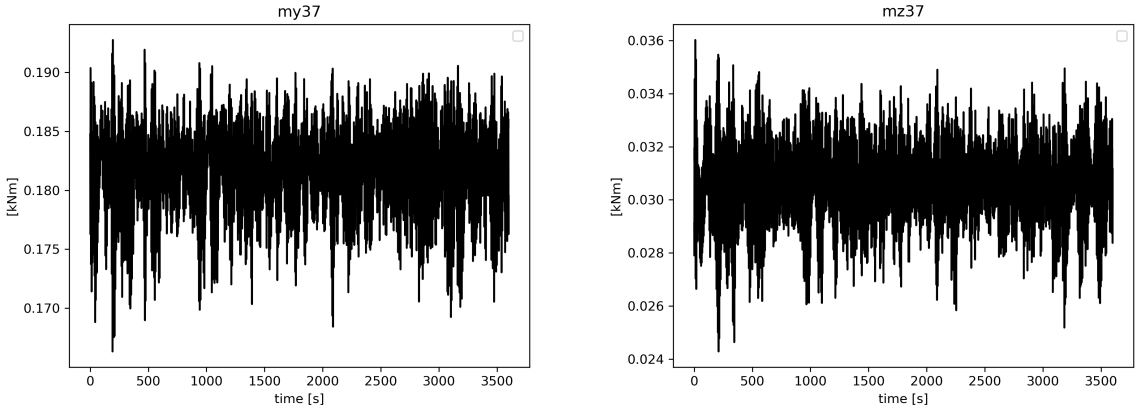
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.27: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 6, som er målt fra monitor i element 35.



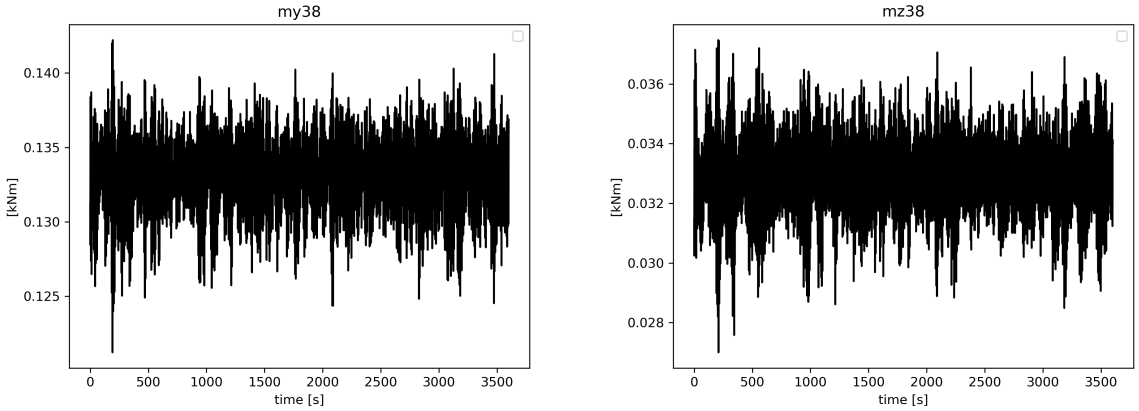
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.28: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 6, som er målt fra monitor i element 36.



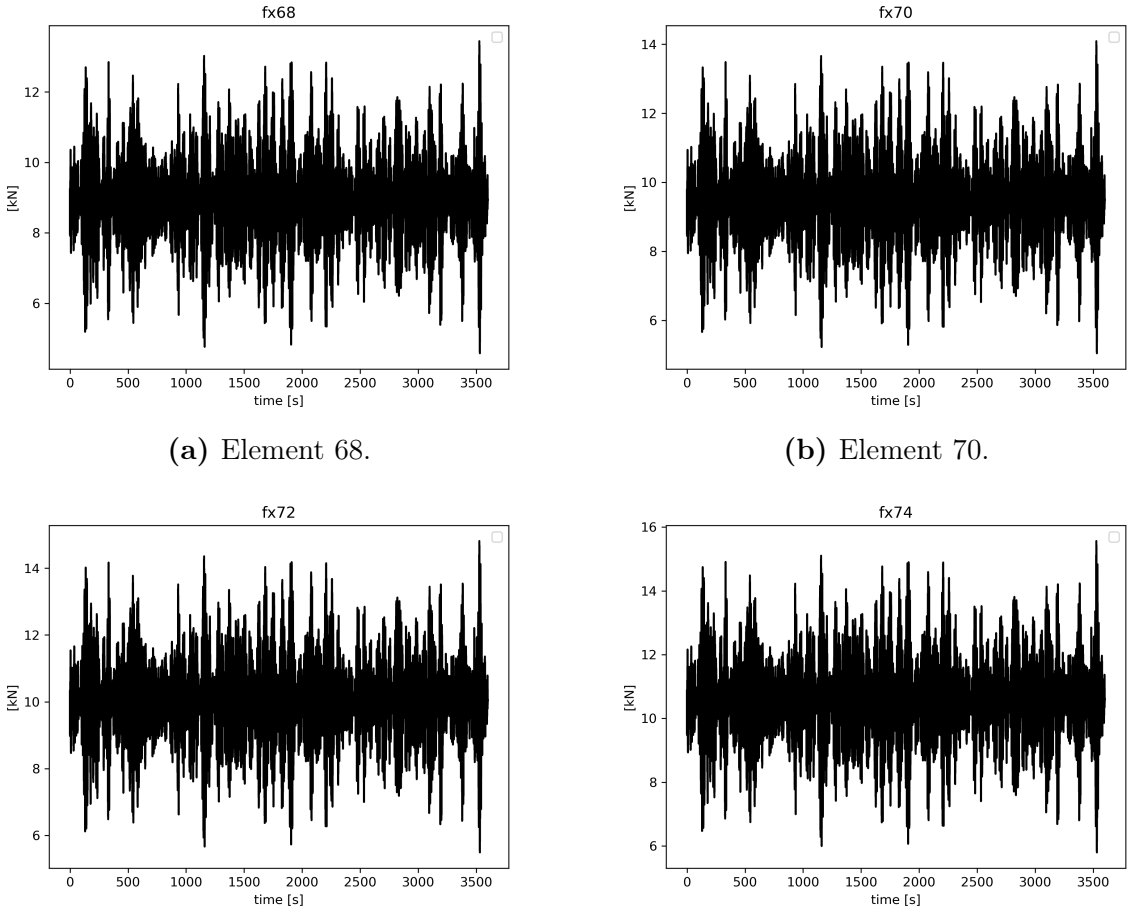
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.29: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 6, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

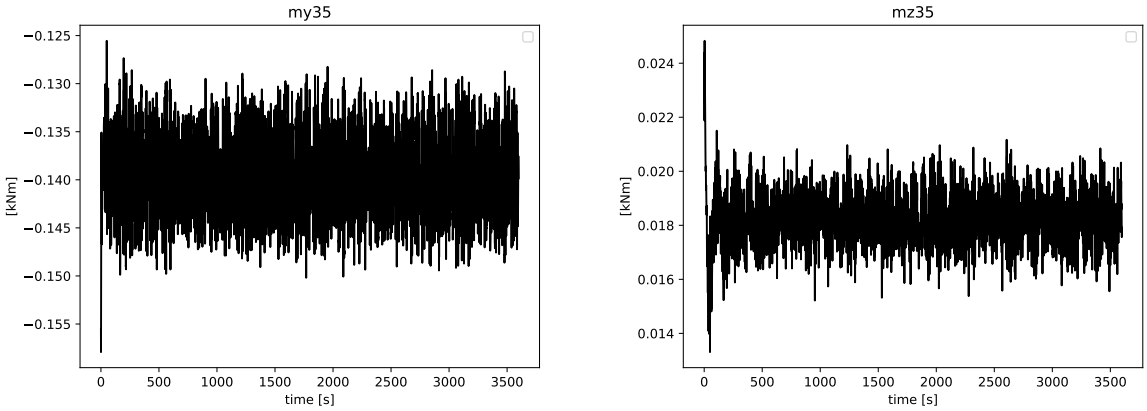
Figur A.30: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 6, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

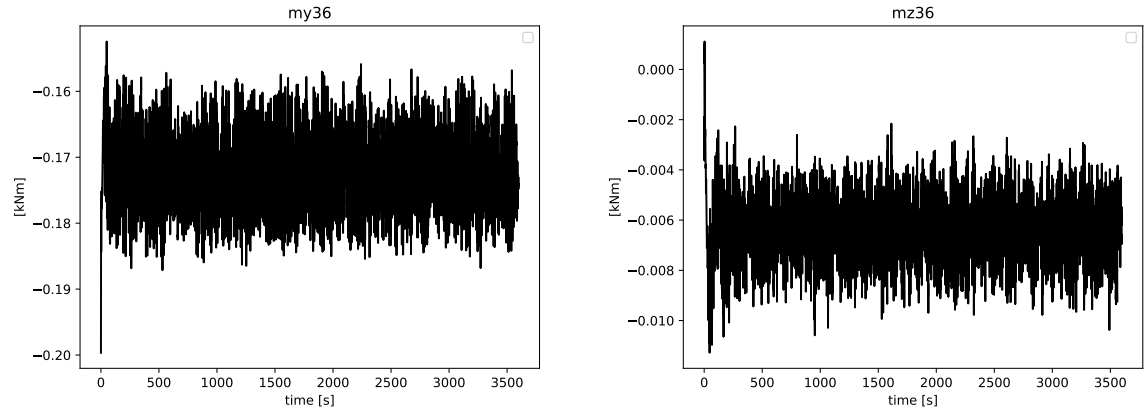
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.31: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 7.



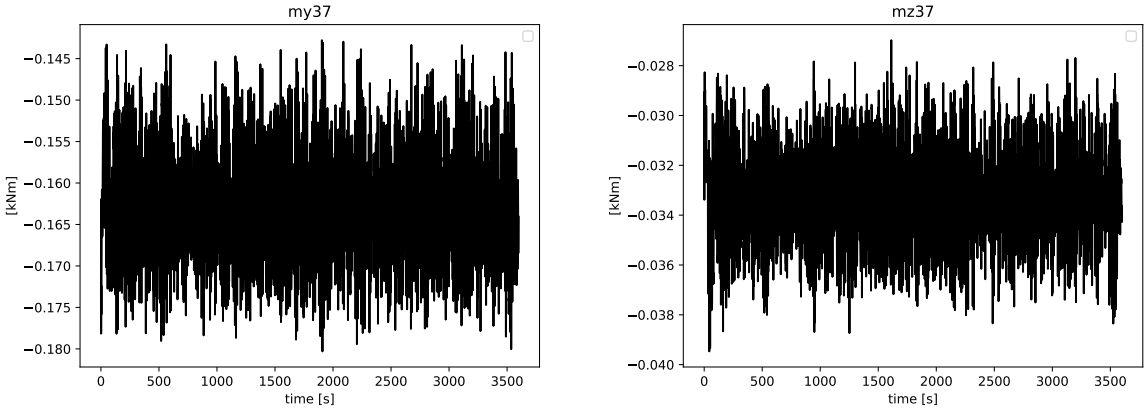
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.32: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 7, som er målt fra monitor i element 35.



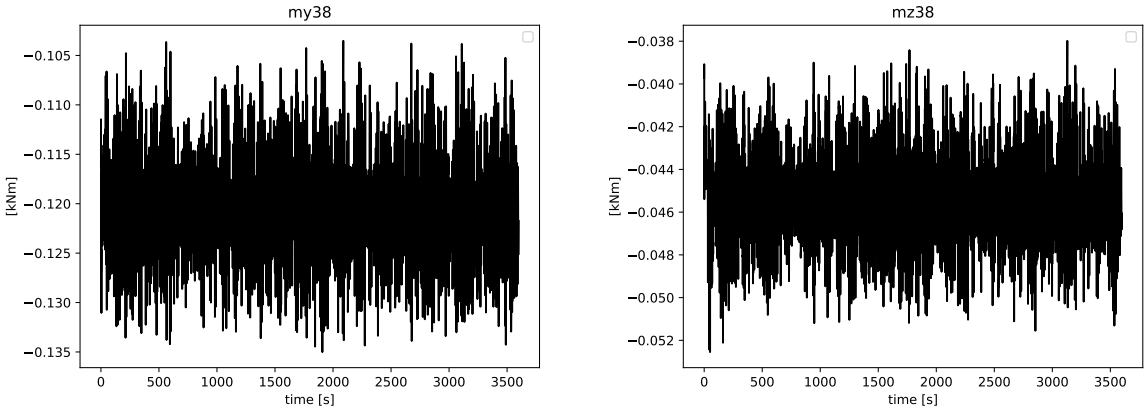
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.33: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 7, som er målt fra monitor i element 36.



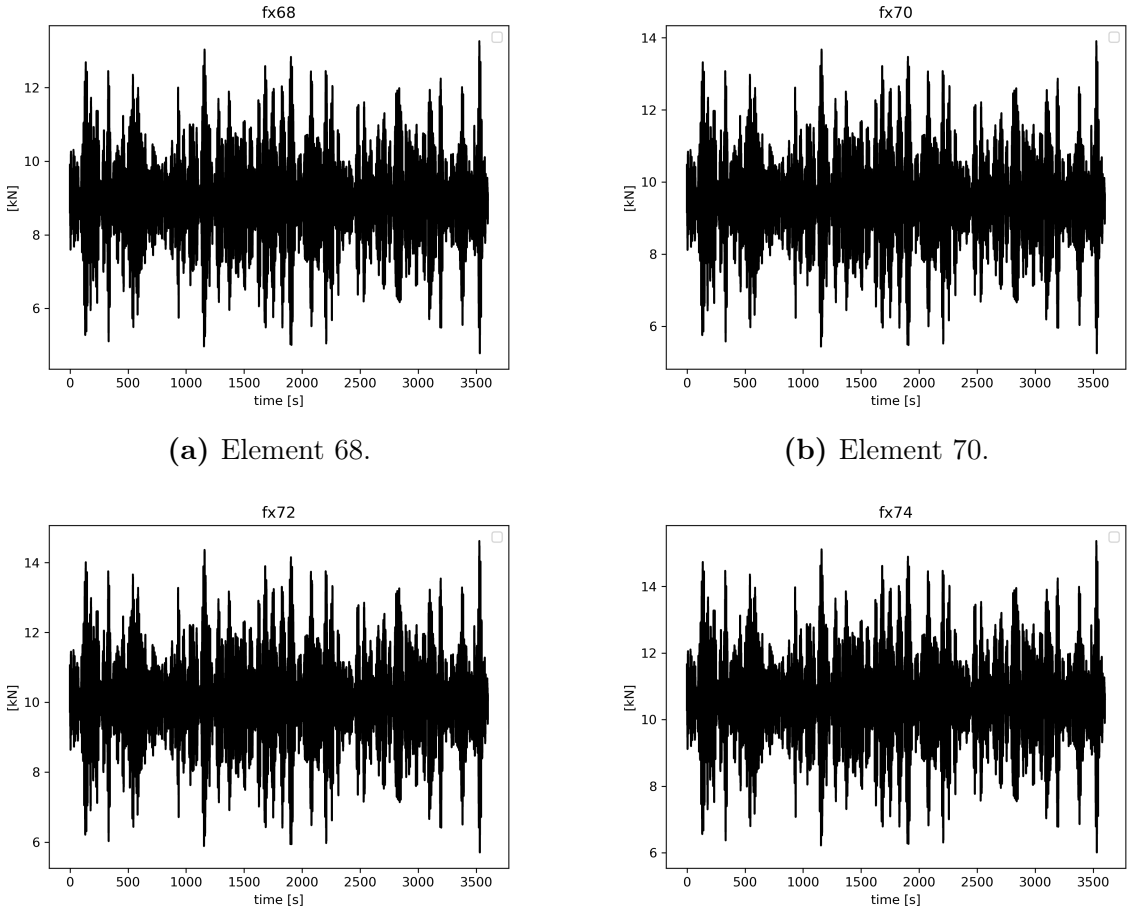
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.34: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 7, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

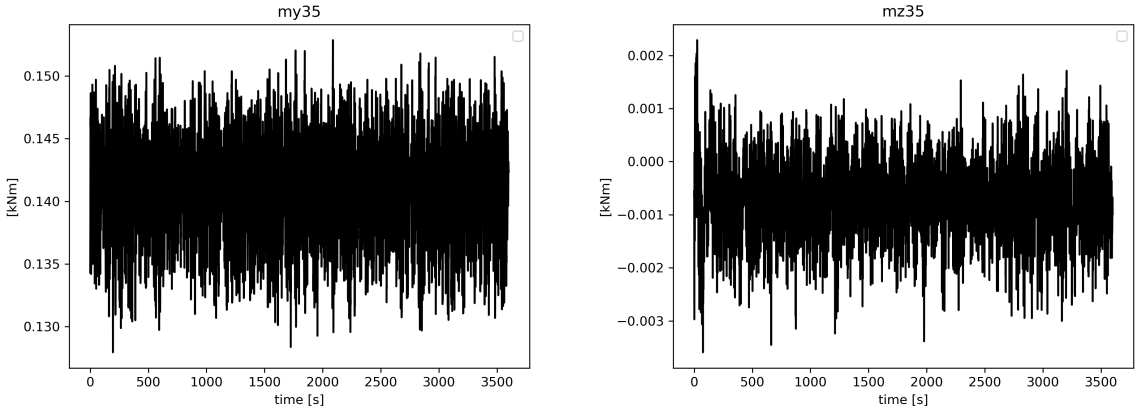
Figur A.35: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 7, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

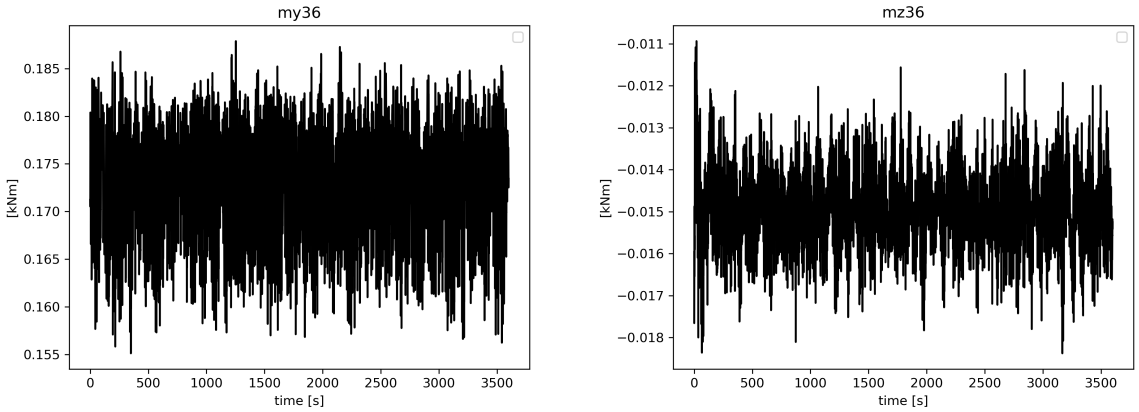
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.36: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 8.



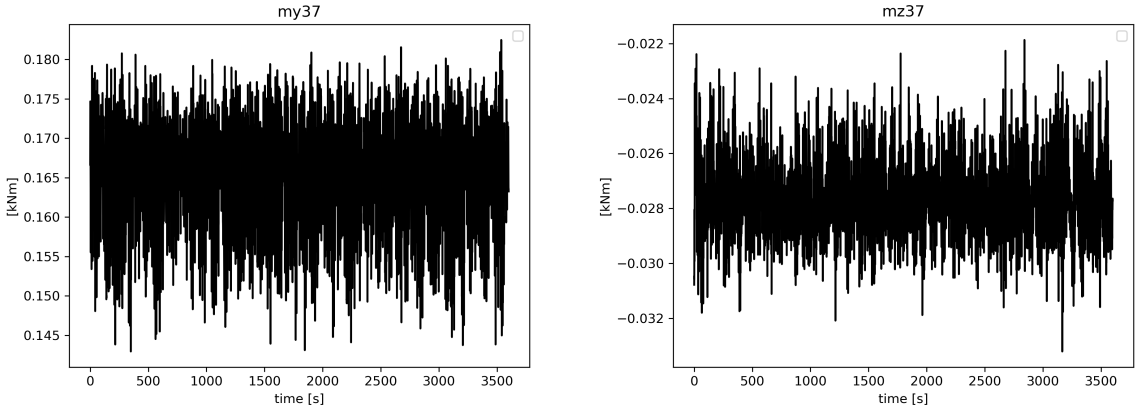
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.37: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 8, som er målt fra monitor i element 35.



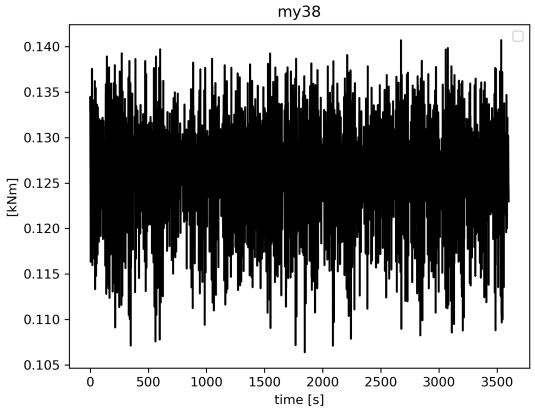
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.38: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 8, som er målt fra monitor i element 36.

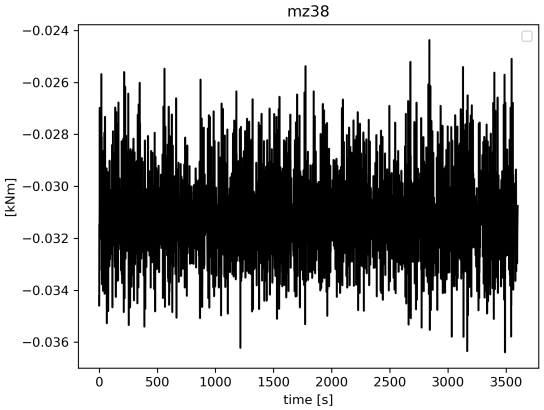


(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.39: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 8, som er målt fra monitor i element 37.

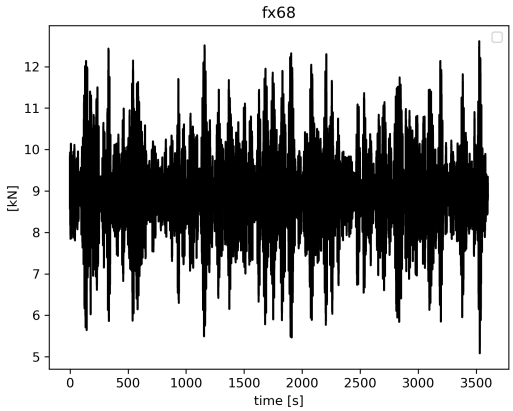


(a) Moment om Y.

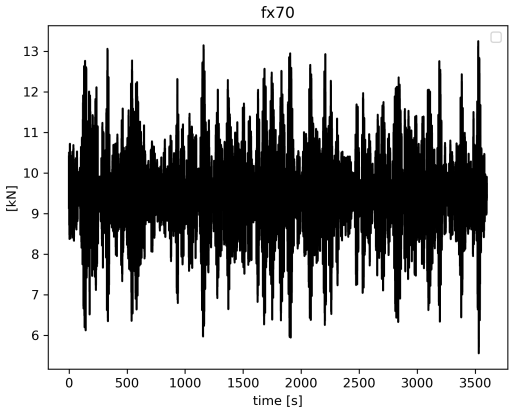


(b) Moment om Z.

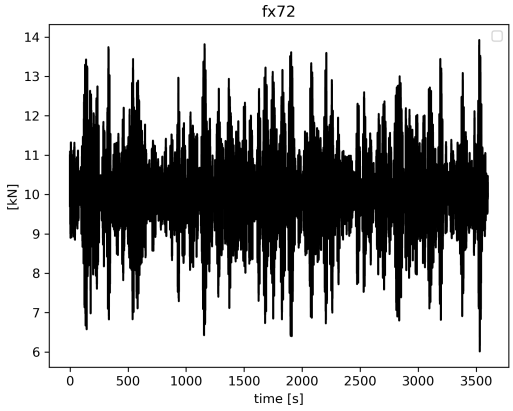
Figur A.40: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 8, som er målt fra monitor i element 38.



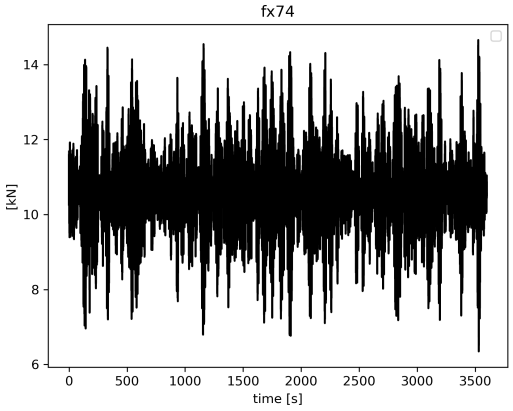
(a) Element 68.



(b) Element 70.

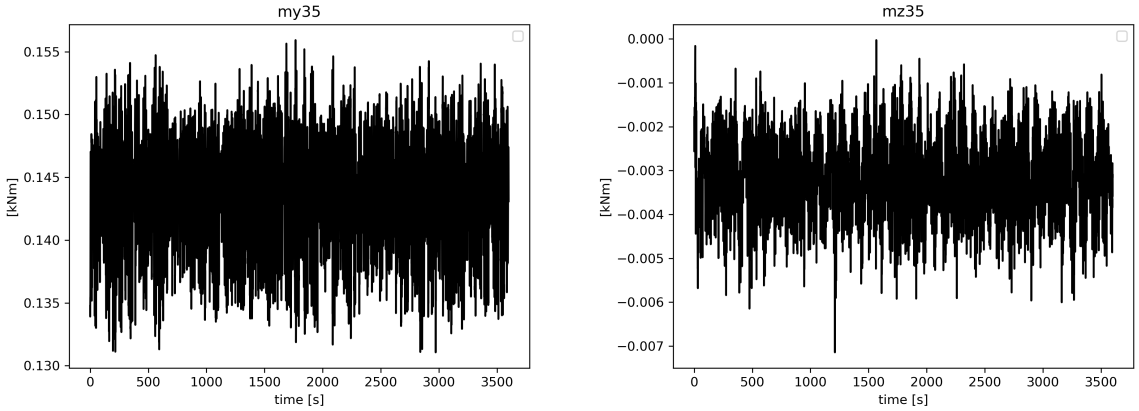


(c) Element 72.



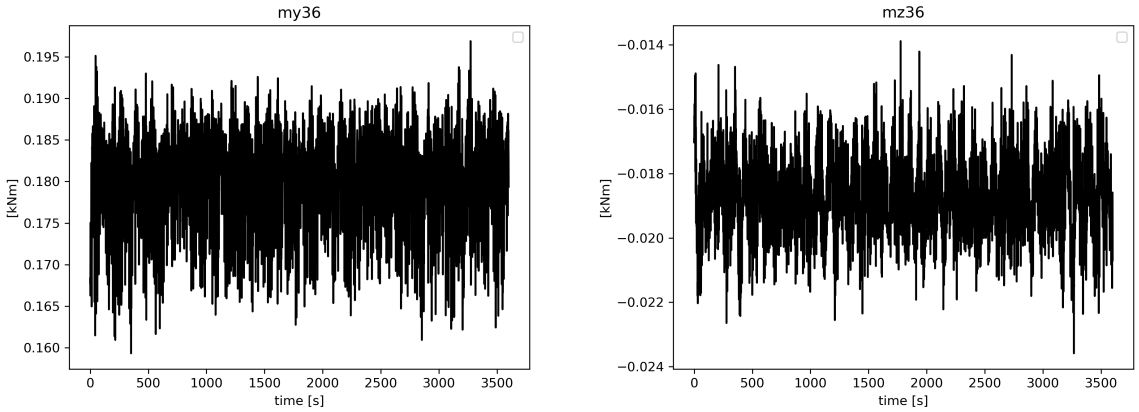
(d) Element 74.

Figur A.41: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 9.



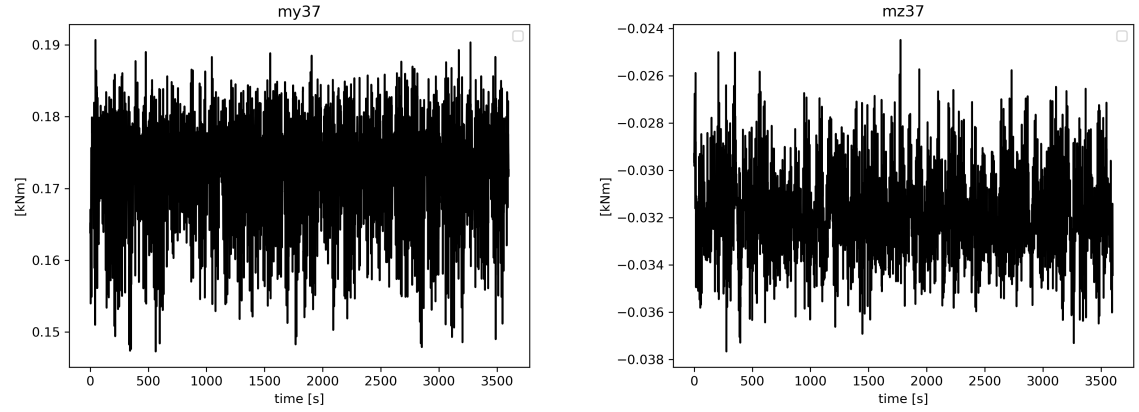
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.42: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 9, som er målt fra monitor i element 35.



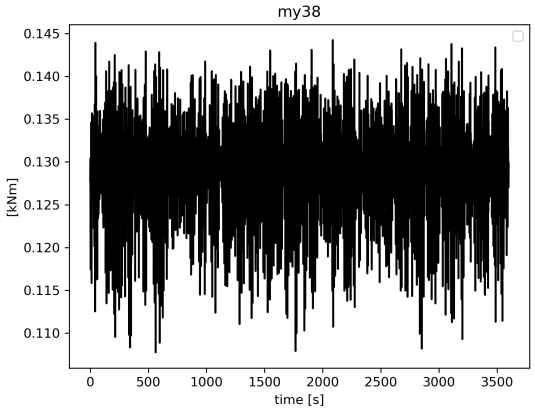
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.43: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 9, som er målt fra monitor i element 36.

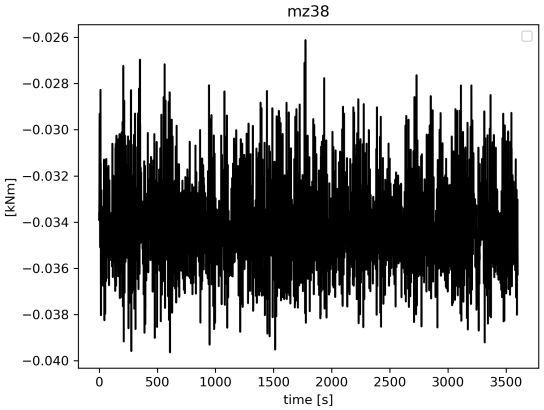


(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.44: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 9, som er målt fra monitor i element 37.

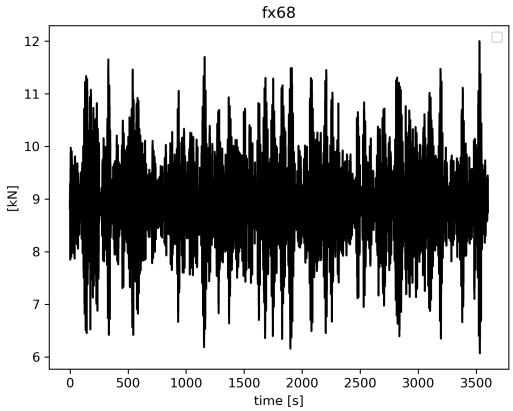


(a) Moment om Y.

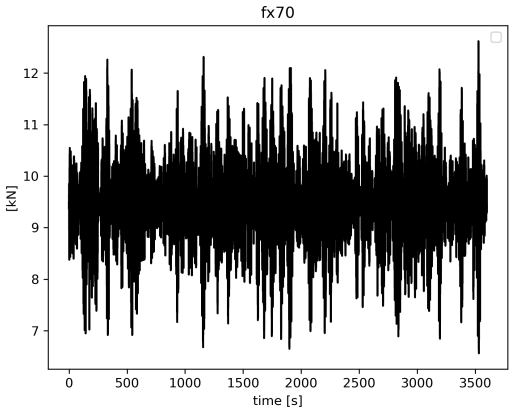


(b) Moment om Z.

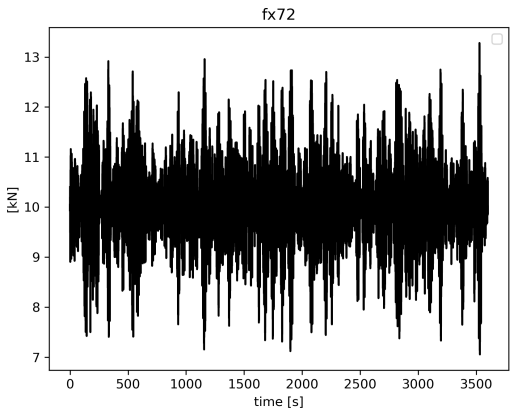
Figur A.45: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 9, som er målt fra monitor i element 38.



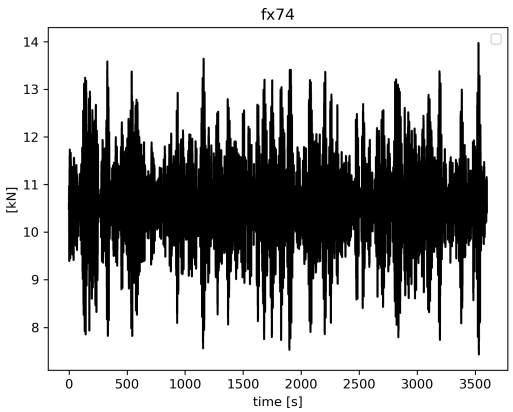
(a) Element 68.



(b) Element 70.

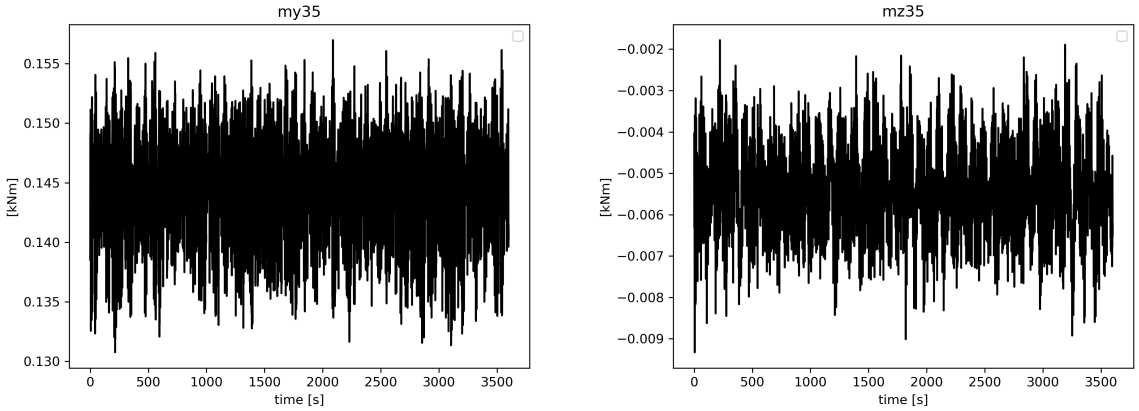


(c) Element 72.



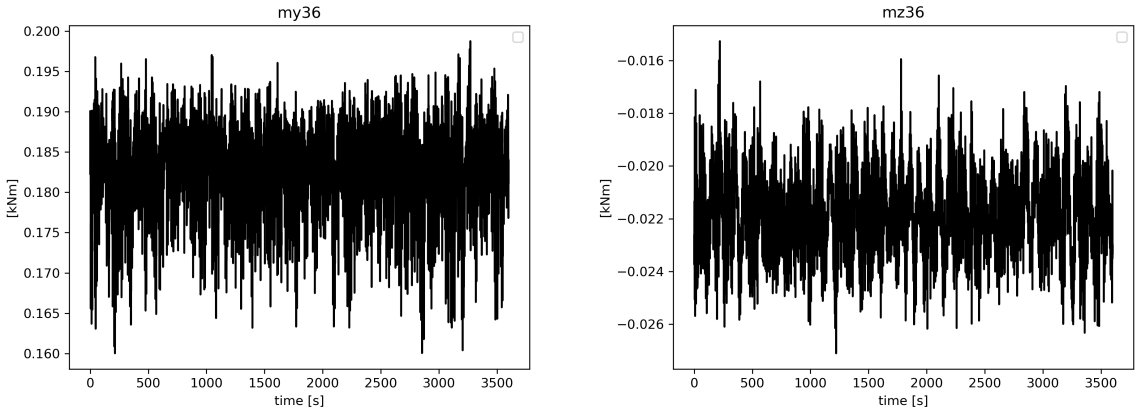
(d) Element 74.

Figur A.46: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 10.



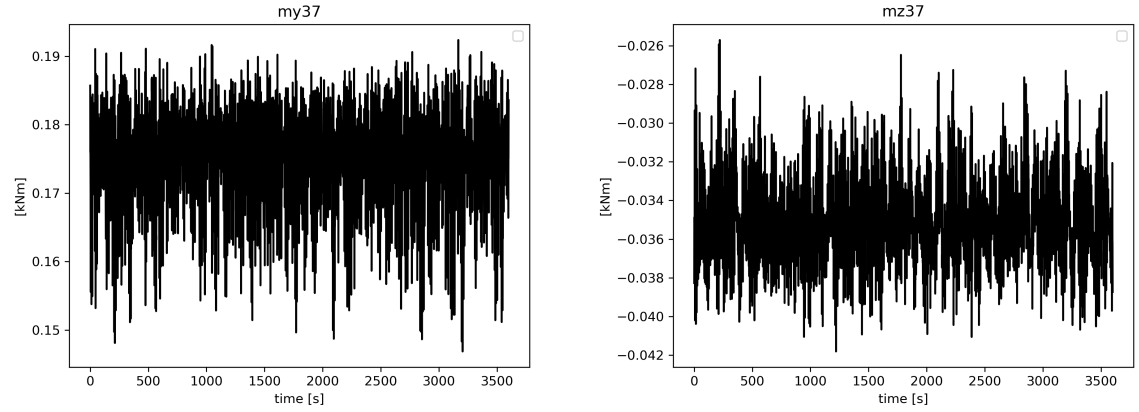
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.47: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 10, som er målt fra monitor i element 35.



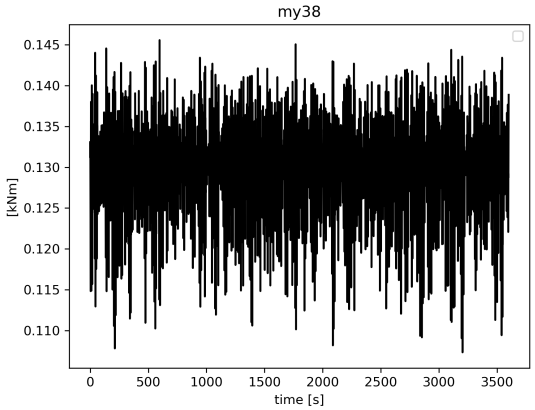
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.48: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 10, som er målt fra monitor i element 36.

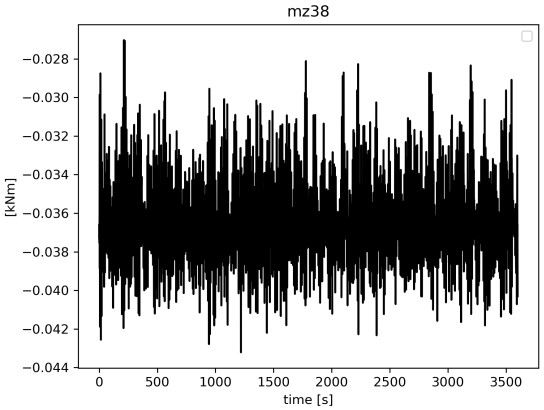


(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.49: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 10, som er målt fra monitor i element 37.

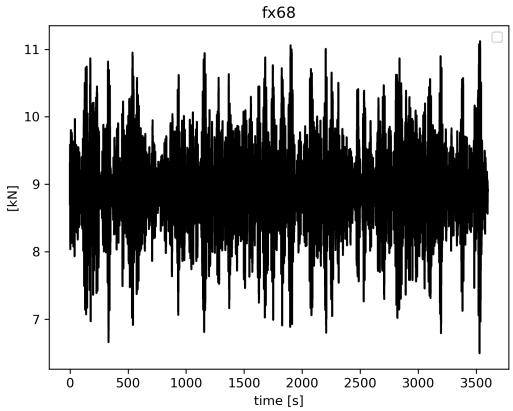


(a) Moment om Y.

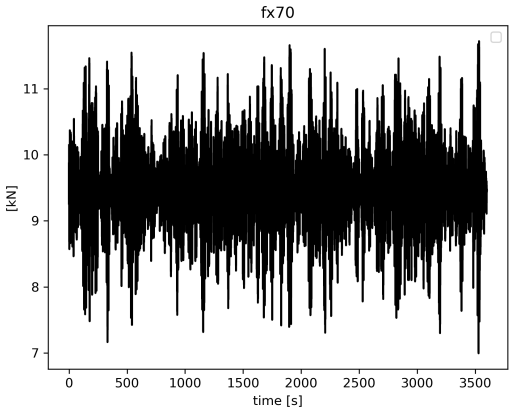


(b) Moment om Z.

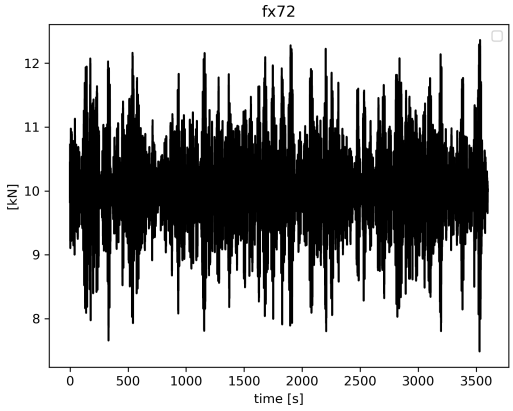
Figur A.50: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 10, som er målt fra monitor i element 38.



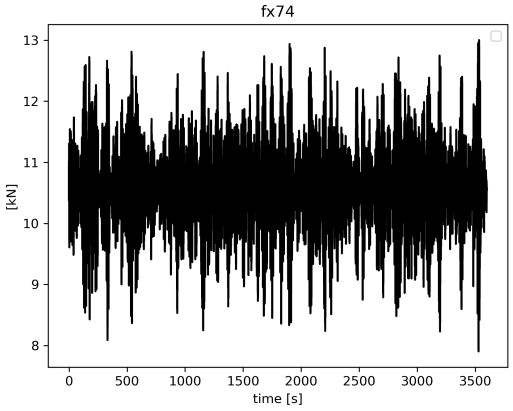
(a) Element 68.



(b) Element 70.

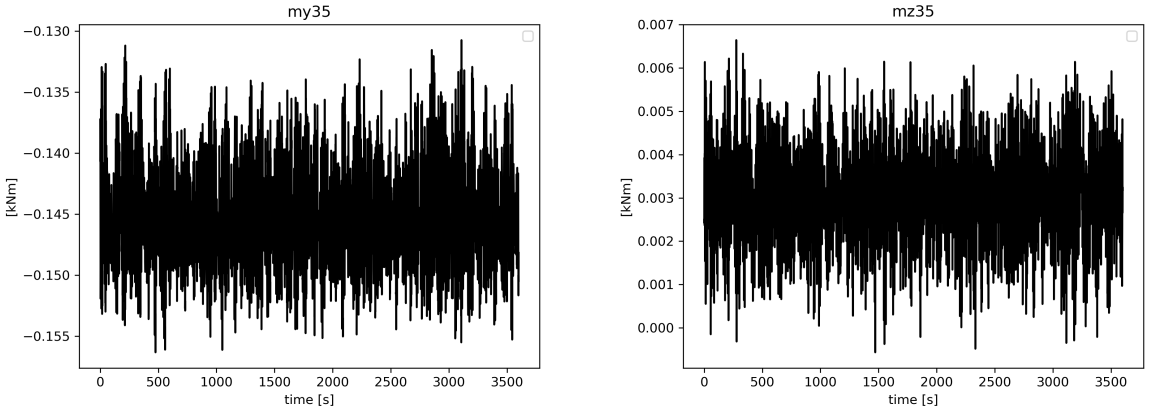


(c) Element 72.



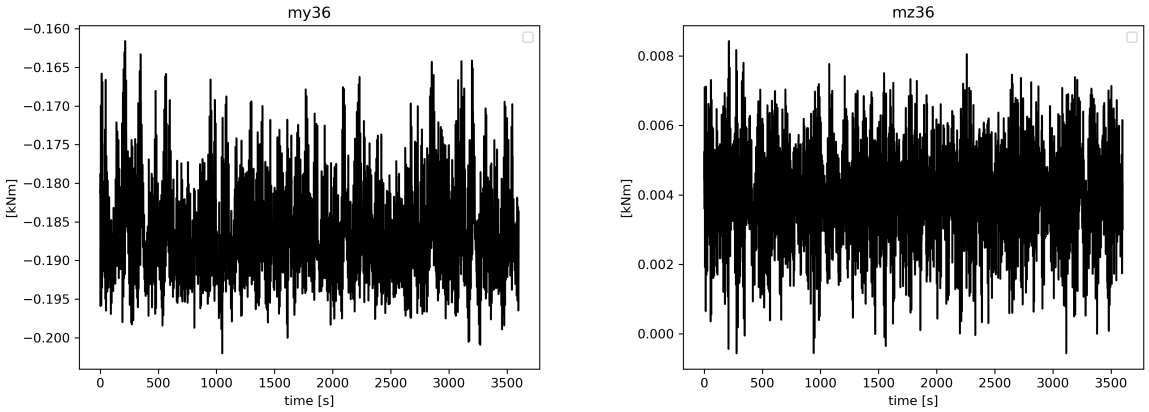
(d) Element 74.

Figur A.51: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 11.



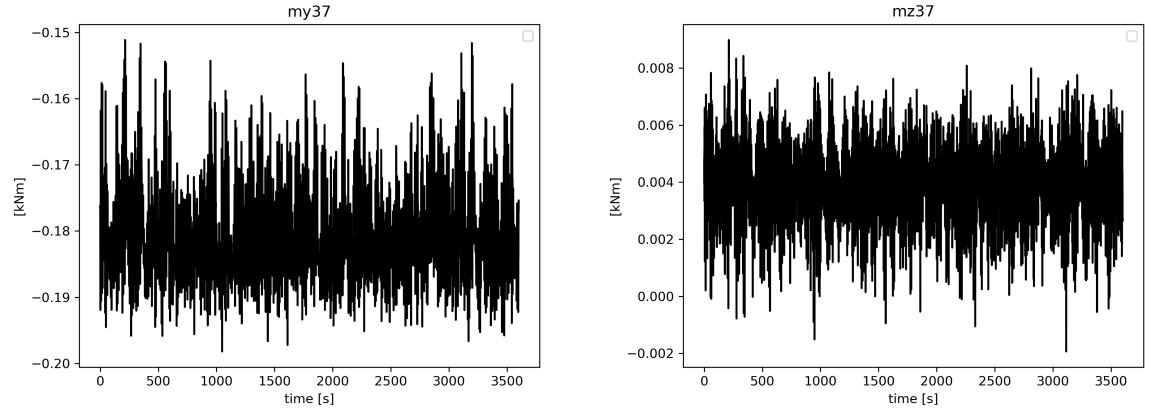
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.52: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 11, som er målt fra monitor i element 35.



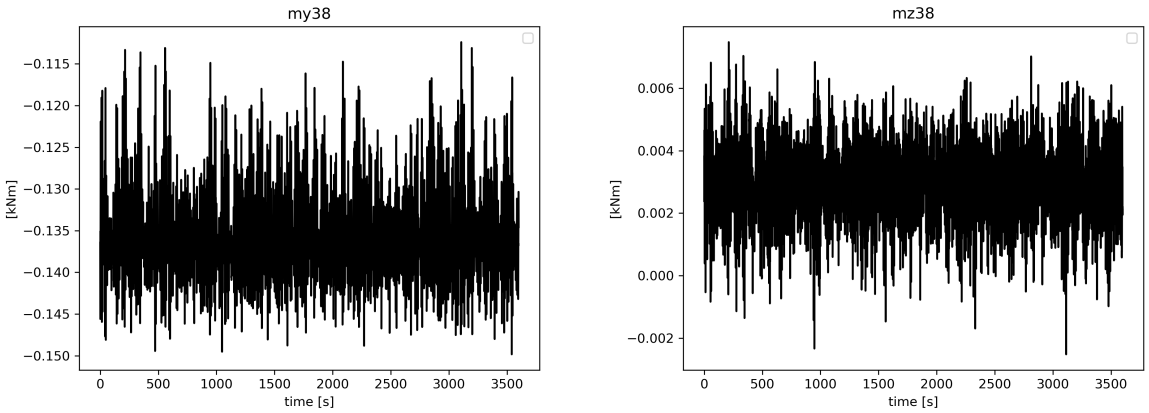
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.53: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 11, som er målt fra monitor i element 36.



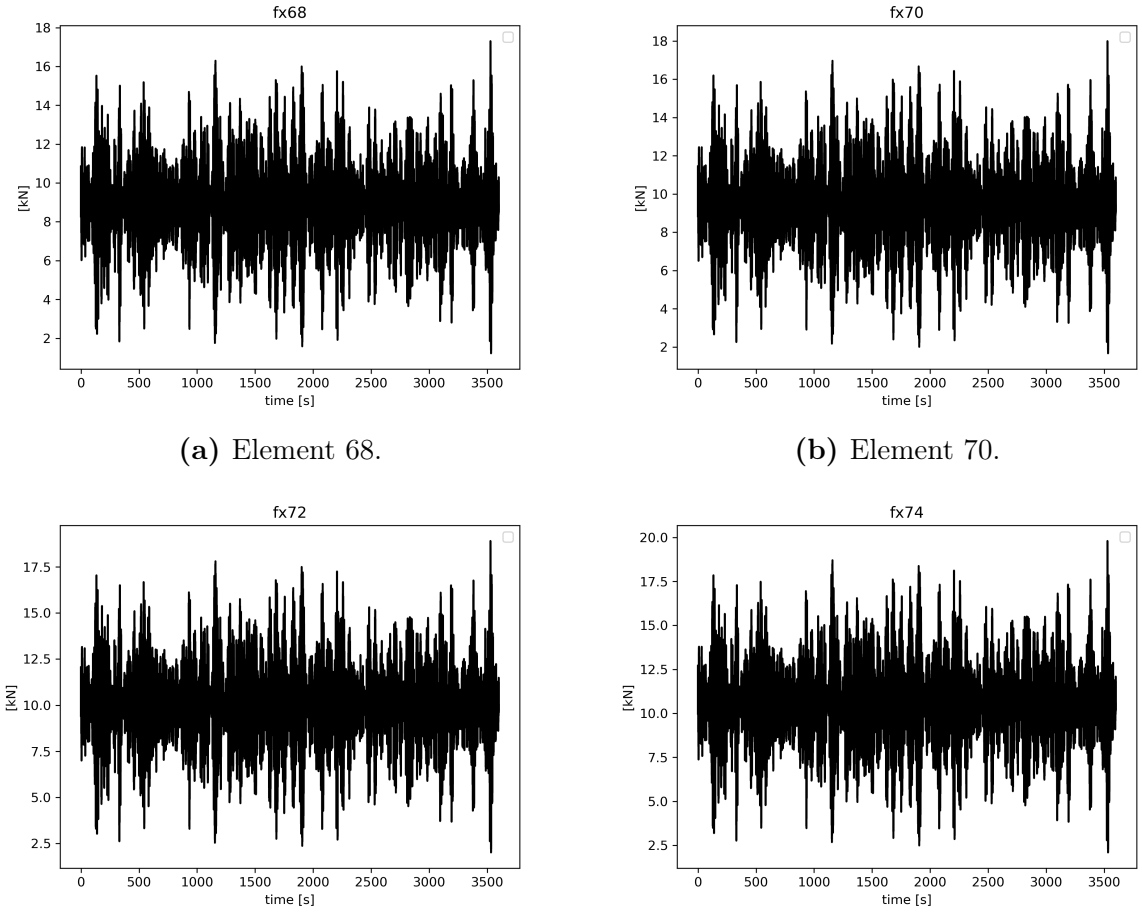
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.54: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 11, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

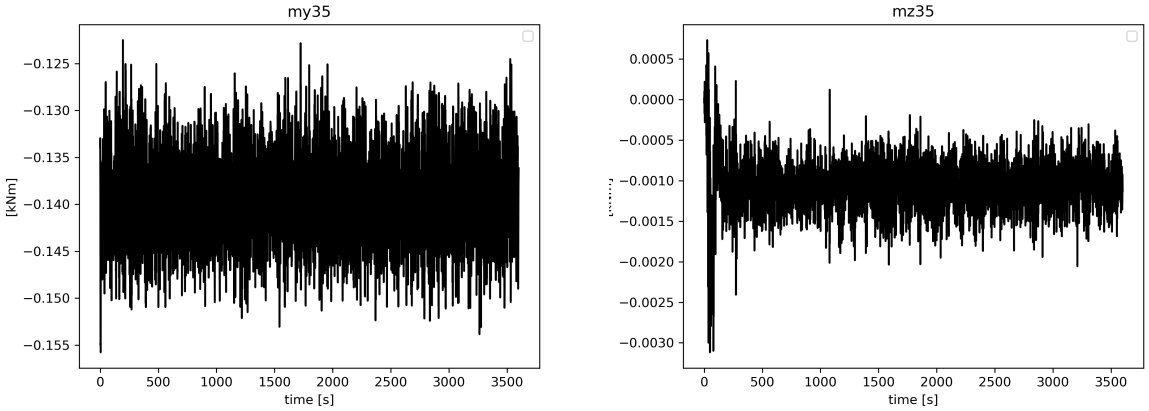
Figur A.55: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 11, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

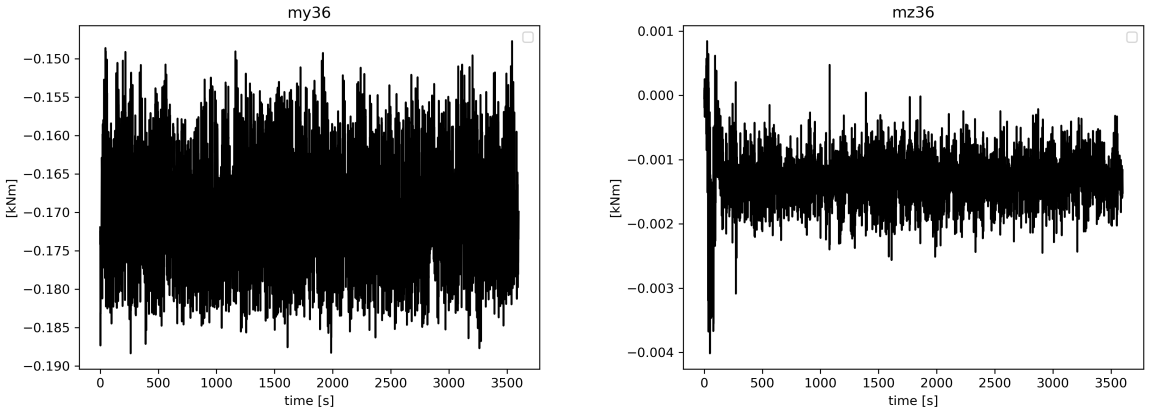
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.56: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 12.



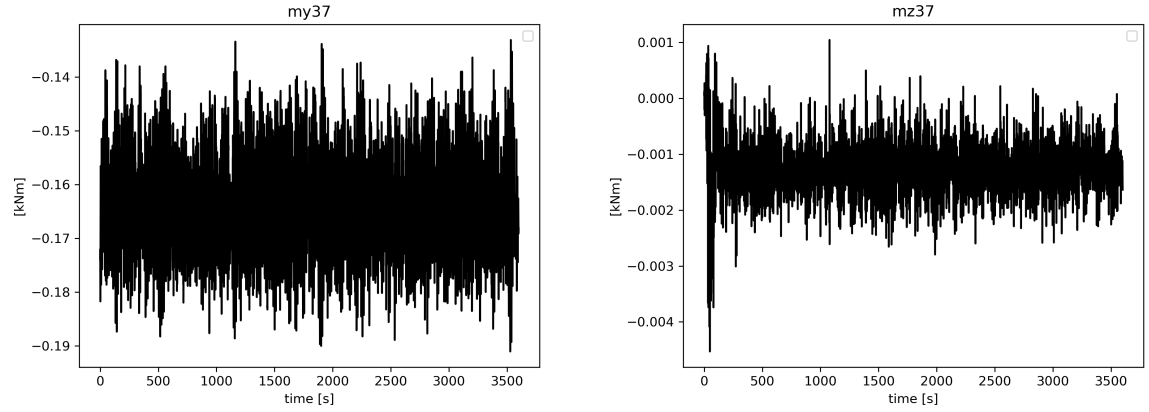
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.57: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 35.



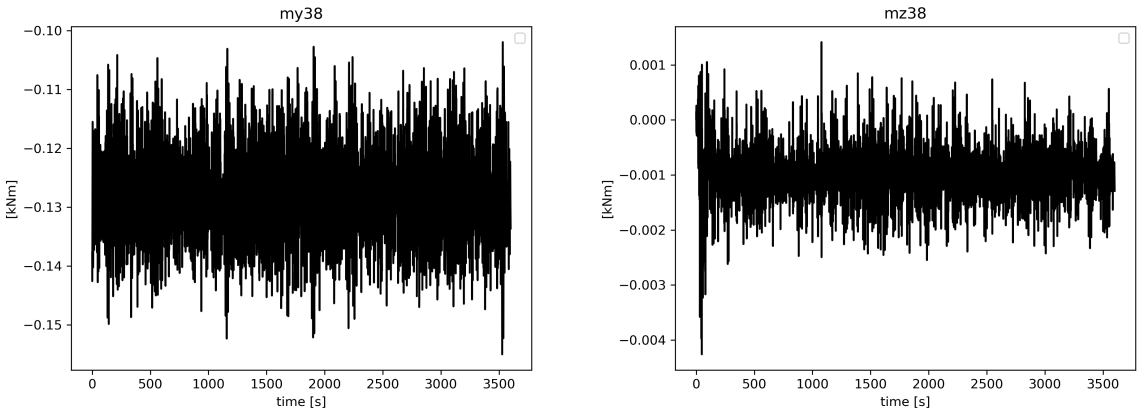
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.58: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 36.



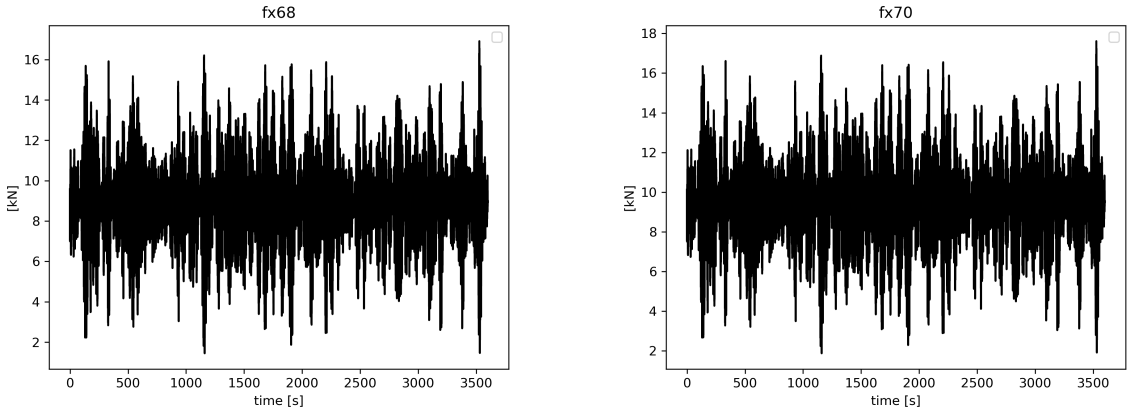
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.59: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 2, som er målt fra monitor i element 37.

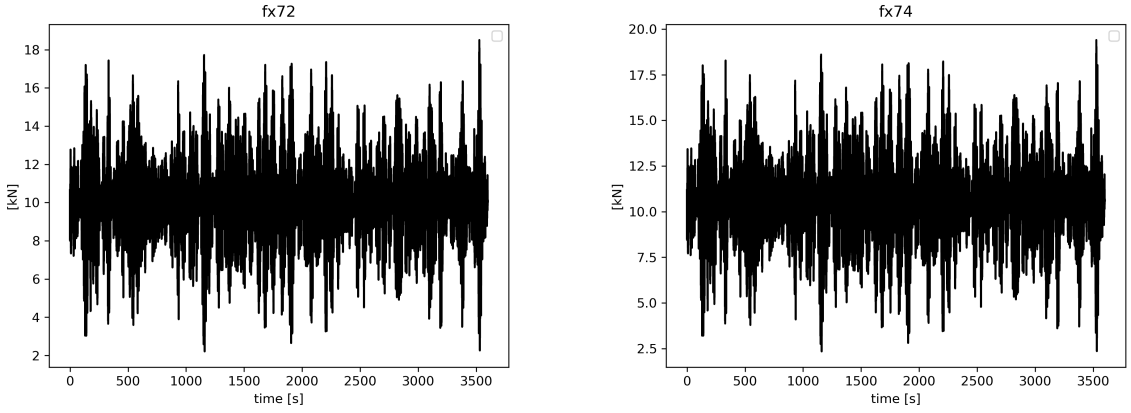


(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.60: Viser bøyemomenter som er målt fra monitor i element 38.

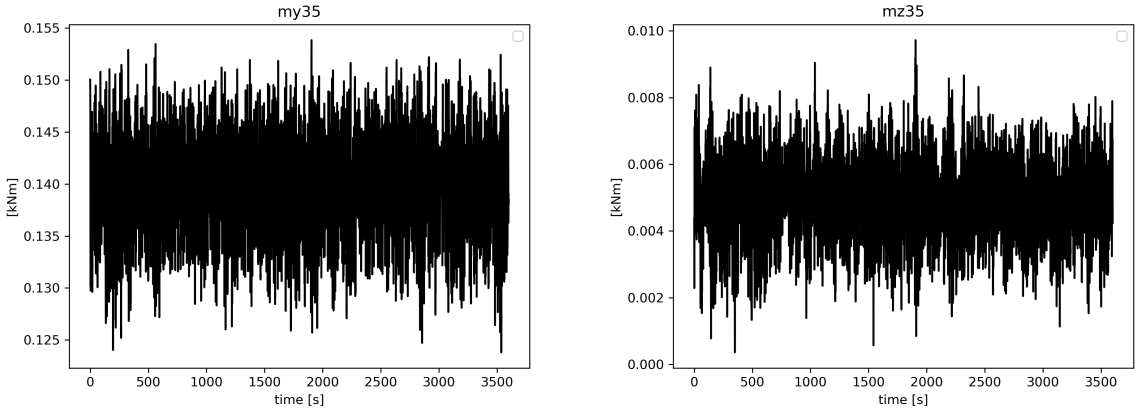


(a) Element 68. **(b)** Element 70.



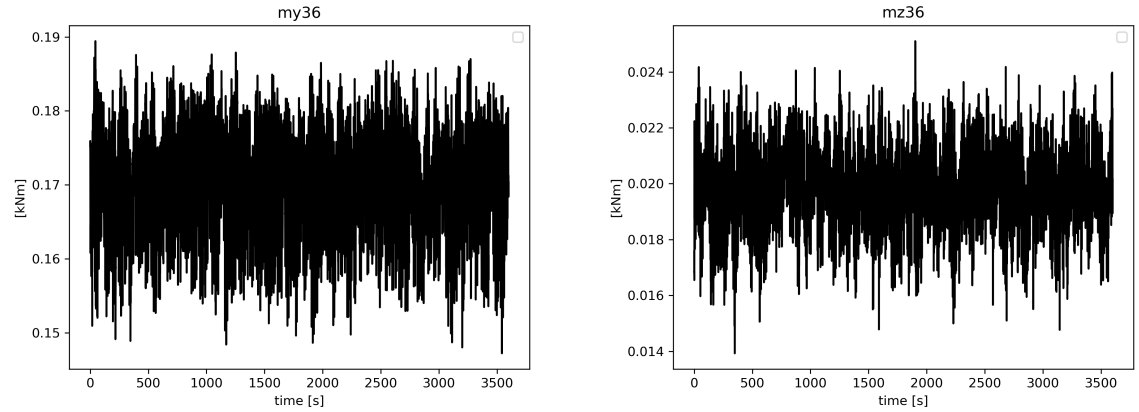
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.61: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 13.



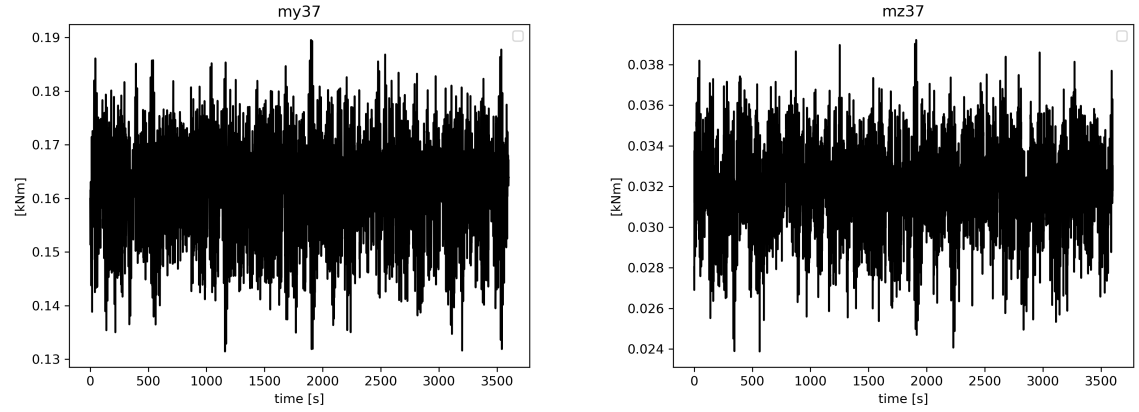
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.62: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 13, som er målt fra monitor i element 35.



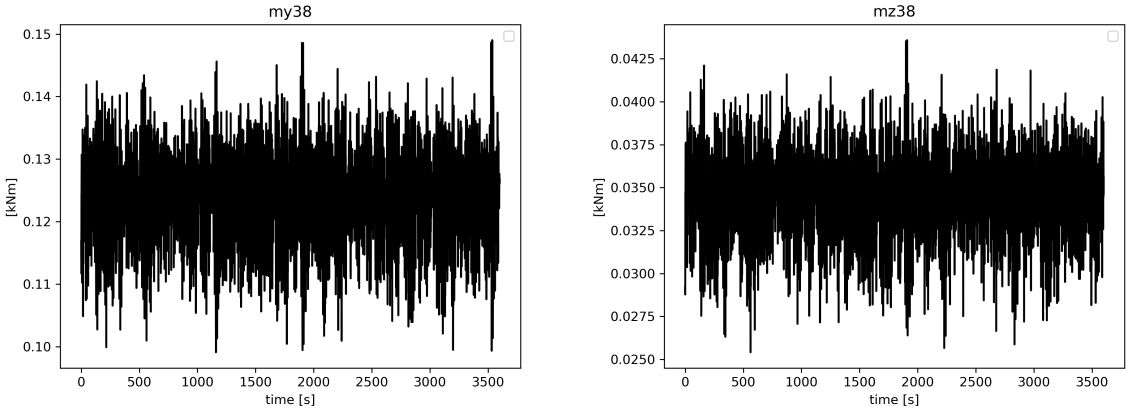
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.63: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 13, som er målt fra monitor i element 36.



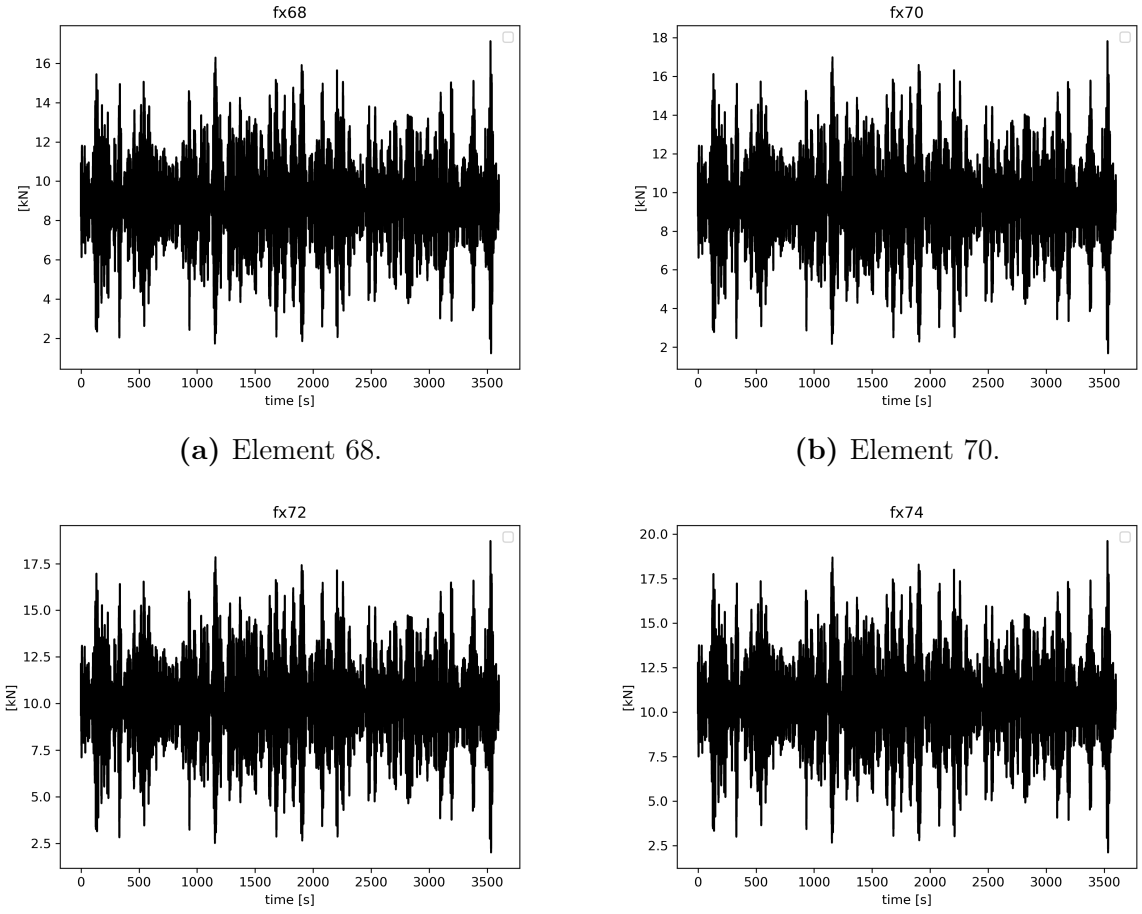
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.64: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 13, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

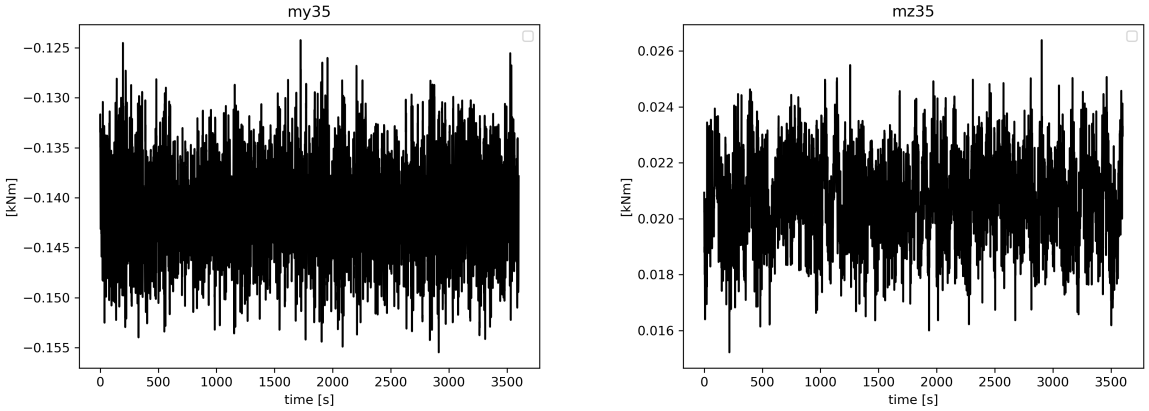
Figur A.65: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 13, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

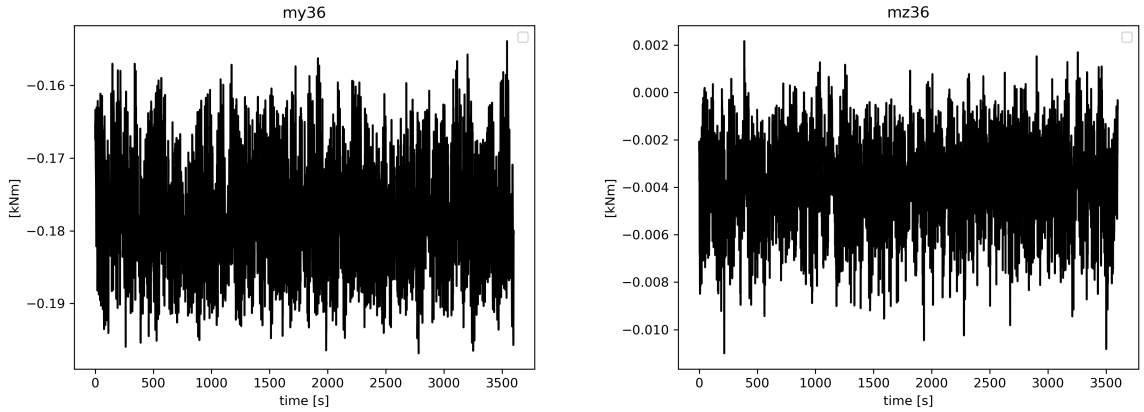
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.66: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 14.



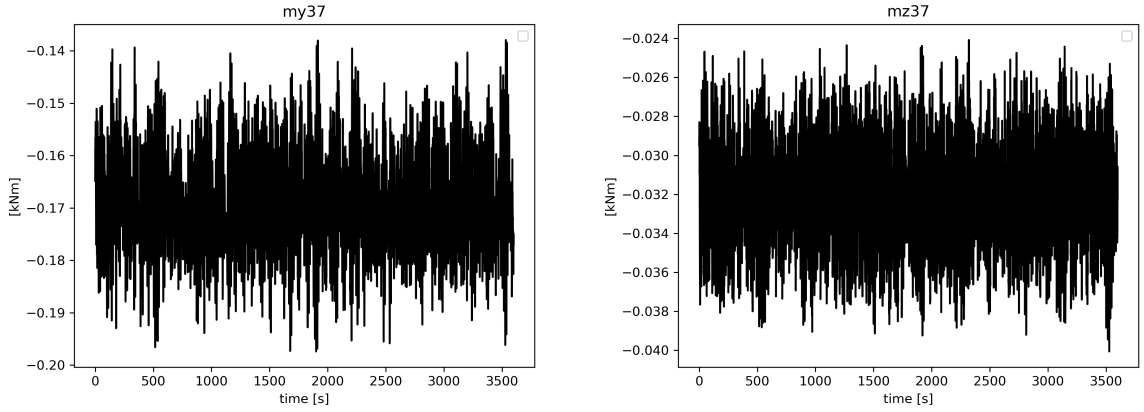
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.67: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 14, som er målt fra monitor i element 35.



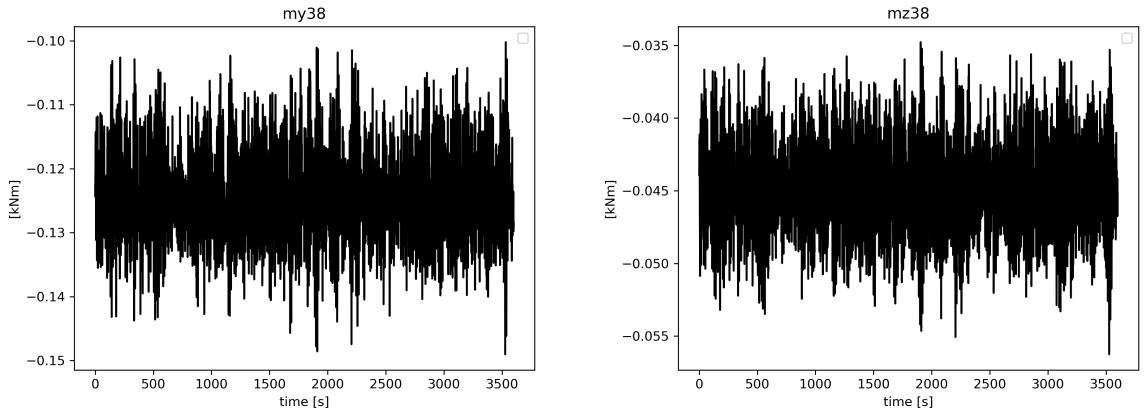
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.68: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 14, som er målt fra monitor i element 36.



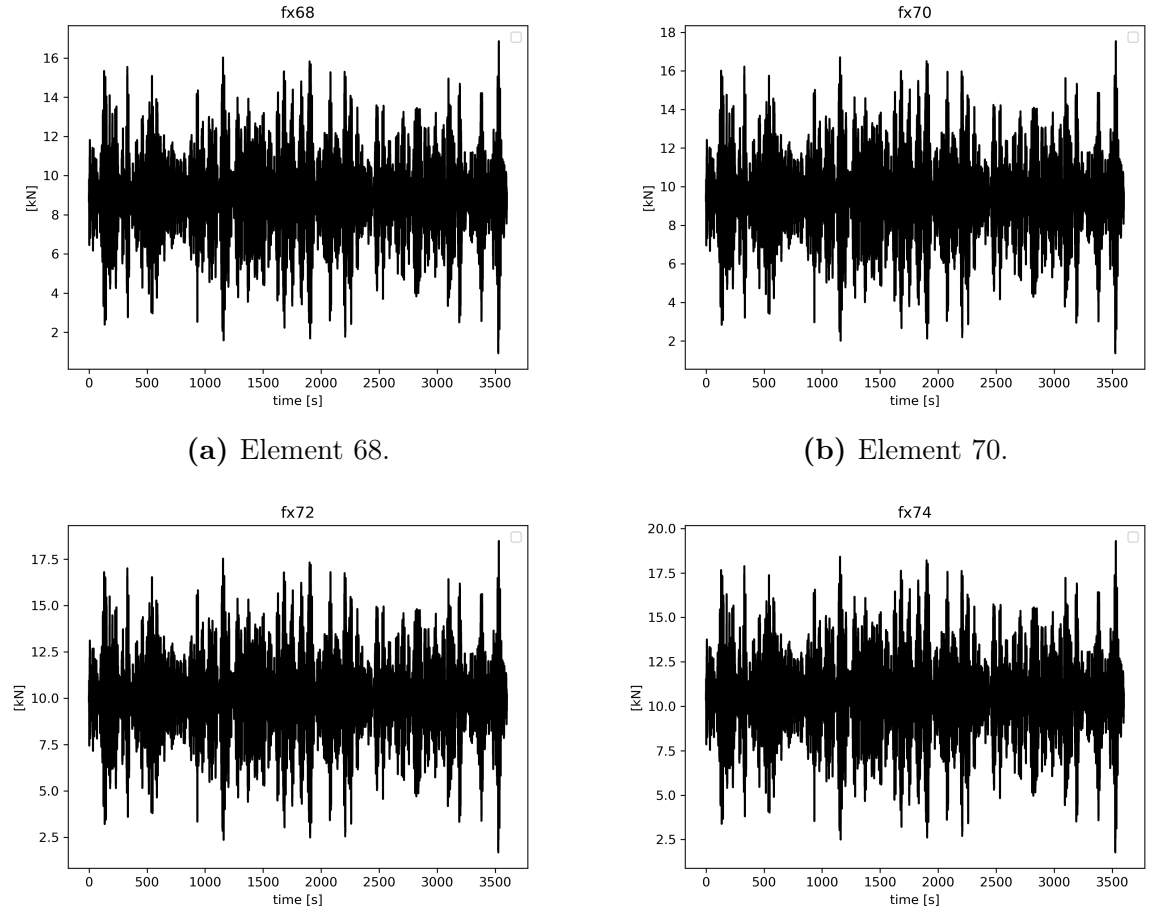
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.69: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 14, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

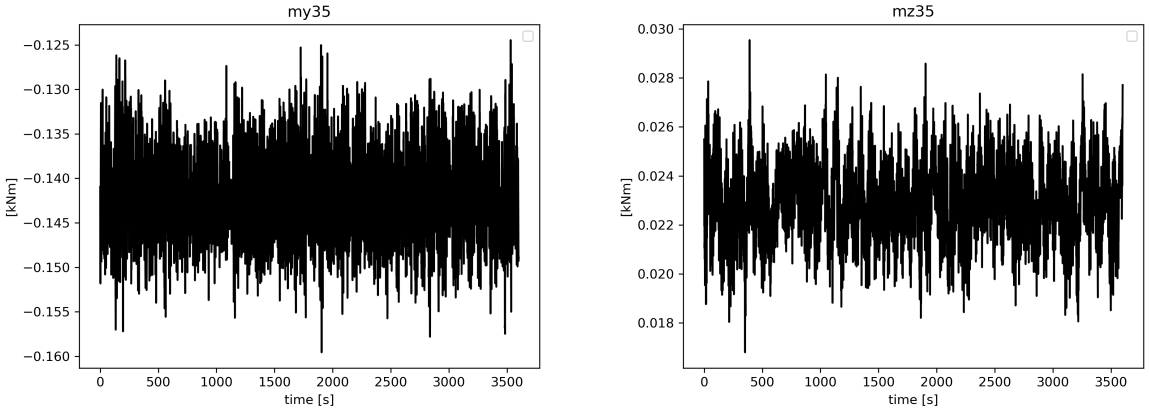
Figur A.70: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 14, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

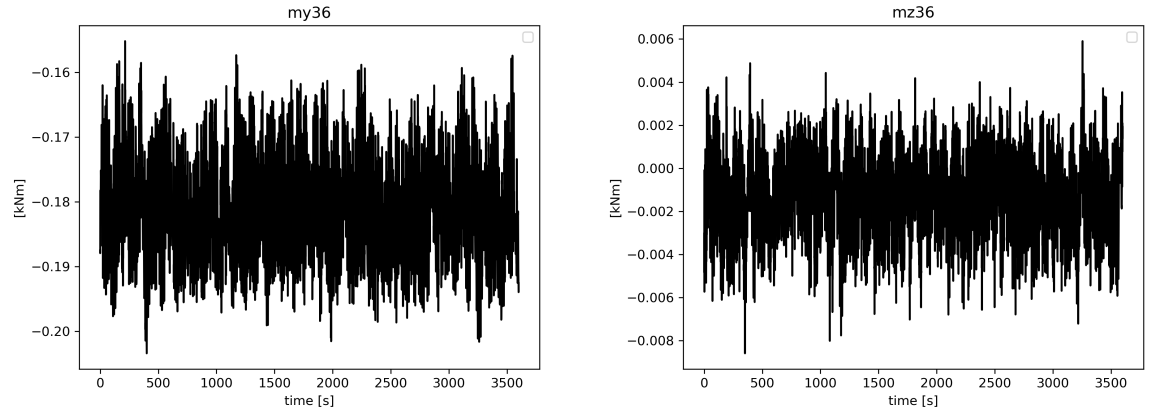
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.71: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 15.



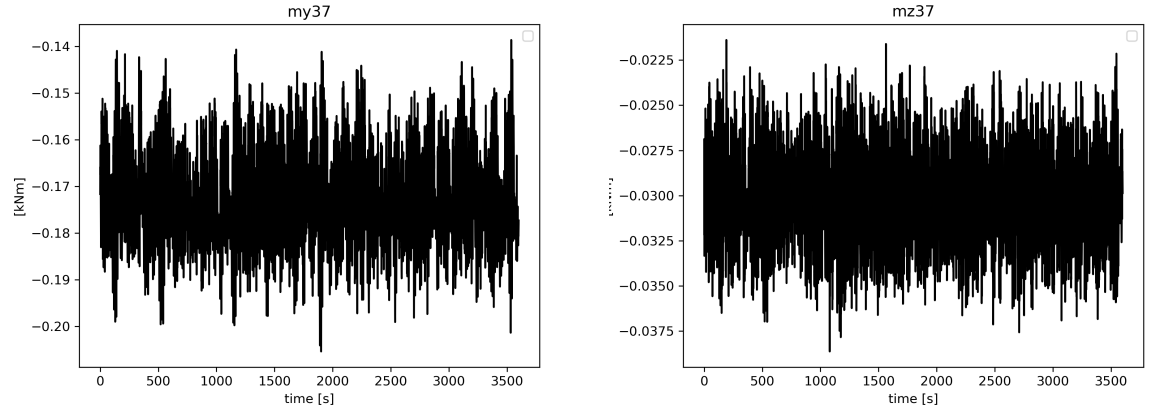
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.72: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 15, som er målt fra monitor i element 35.



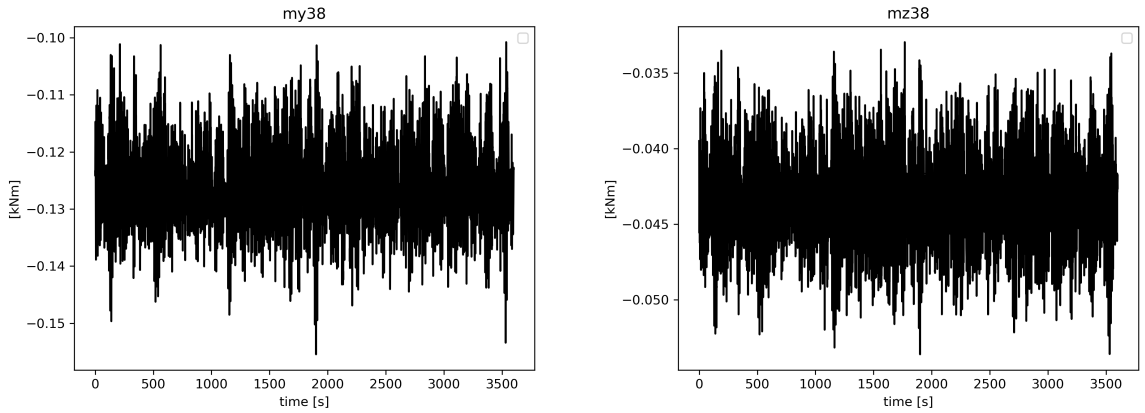
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.73: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 15, som er målt fra monitor i element 36.



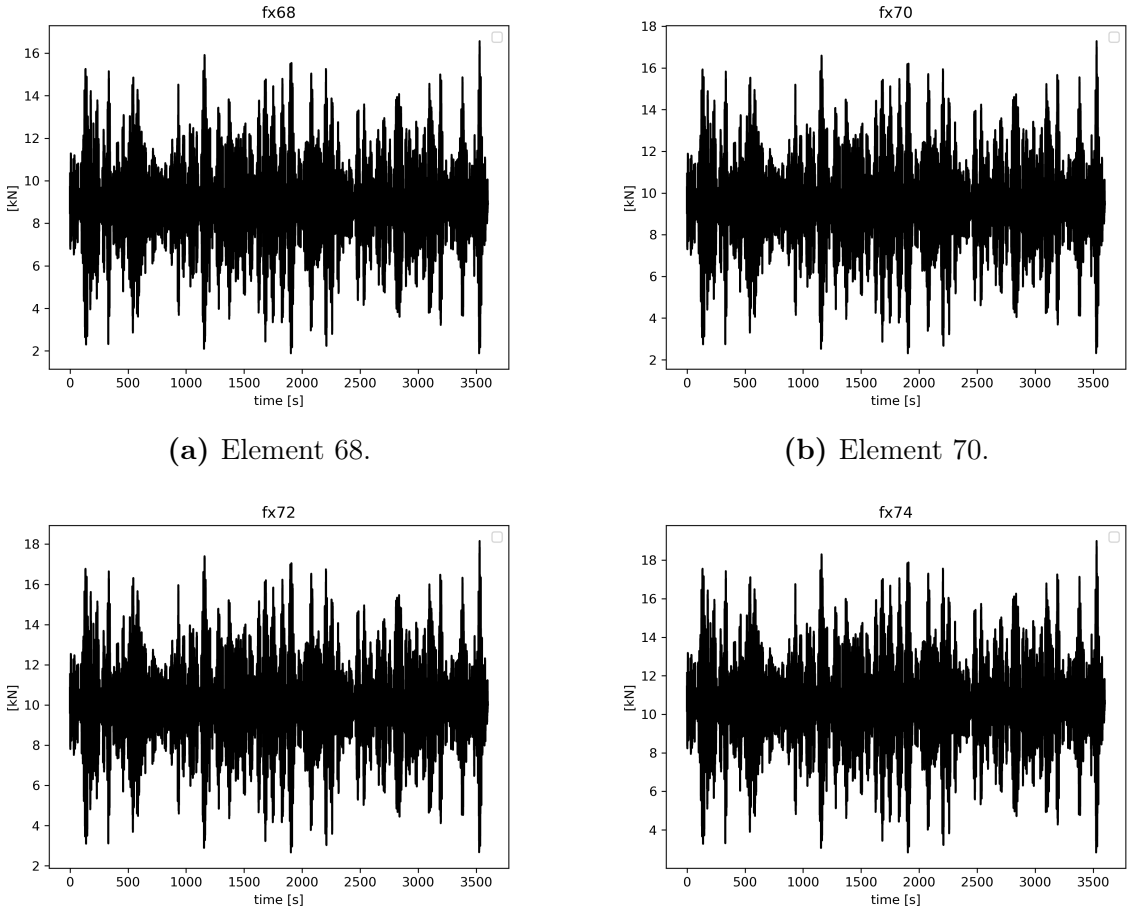
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.74: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 1, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

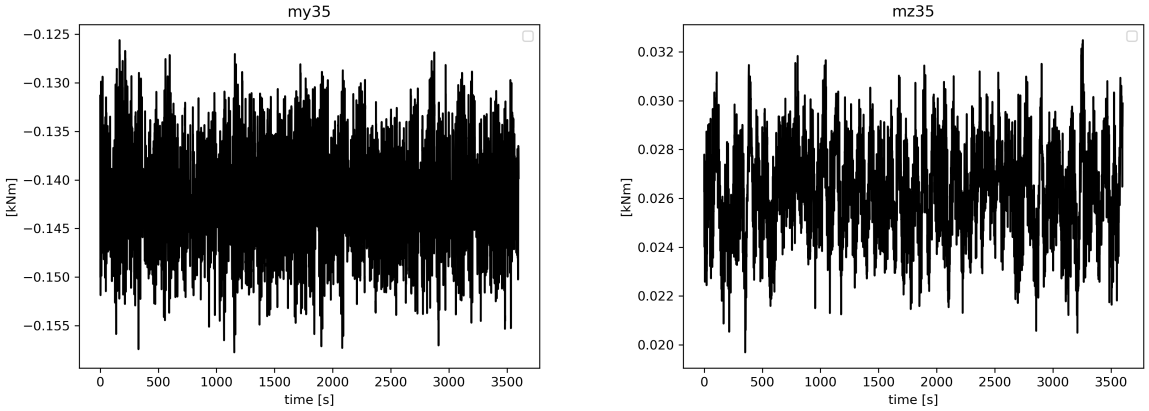
Figur A.75: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 15, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

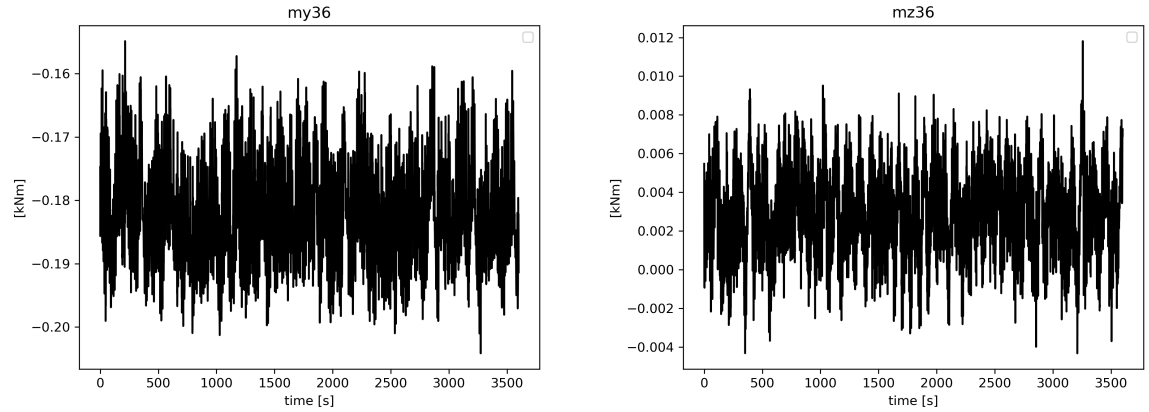
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.76: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 16.



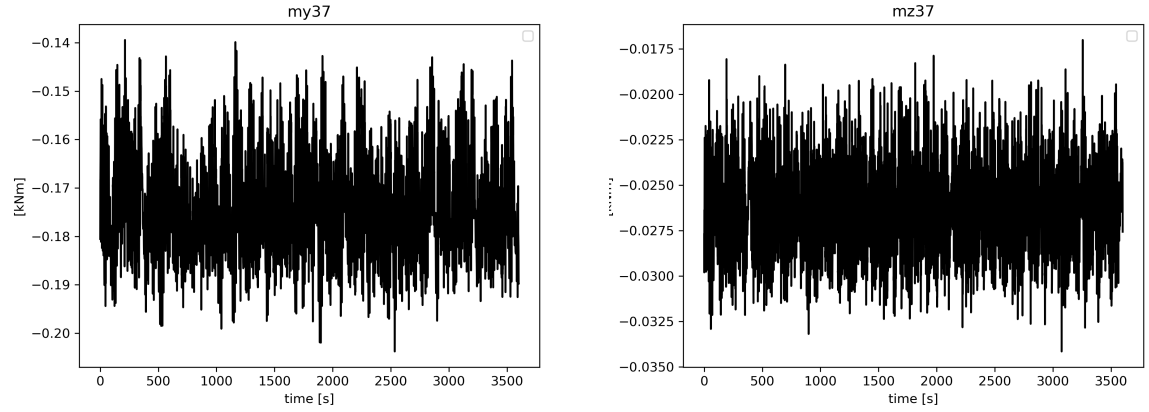
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.77: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 16, som er målt fra monitor i element 35.



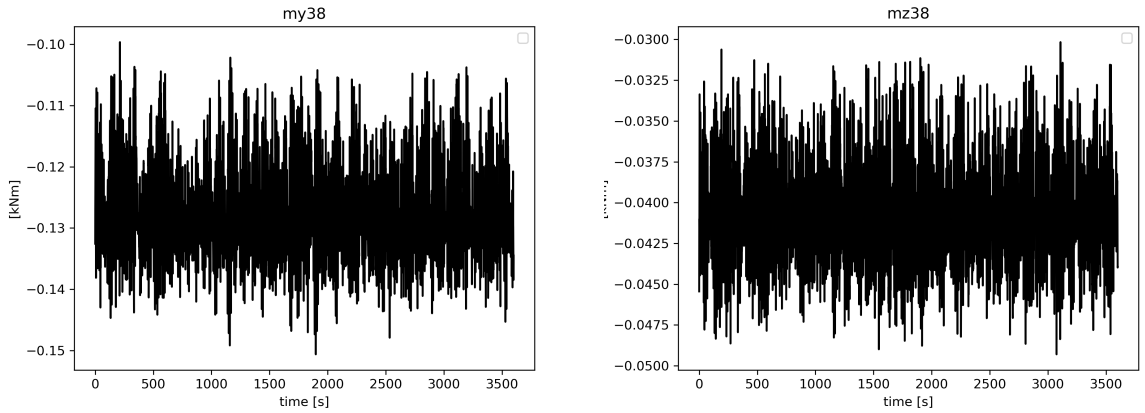
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.78: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 16, som er målt fra monitor i element 36.



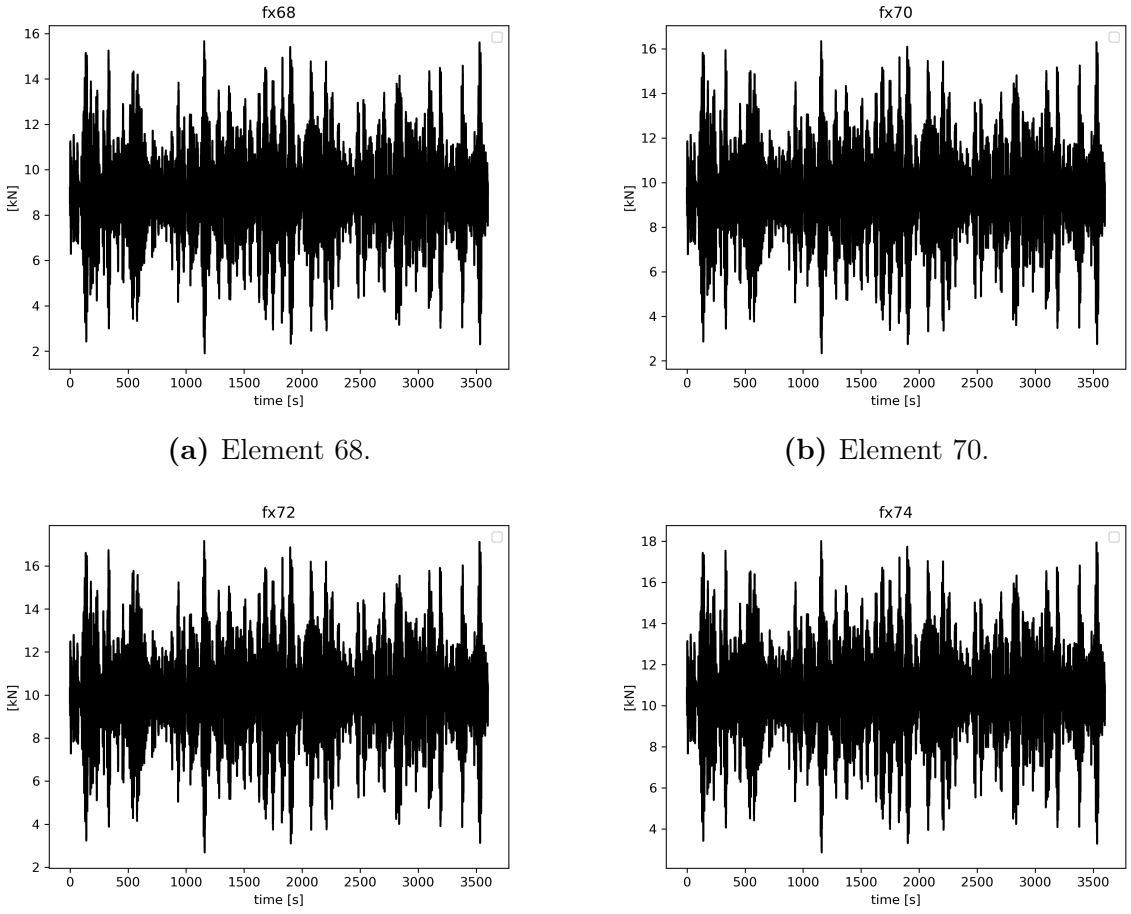
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.79: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 16, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

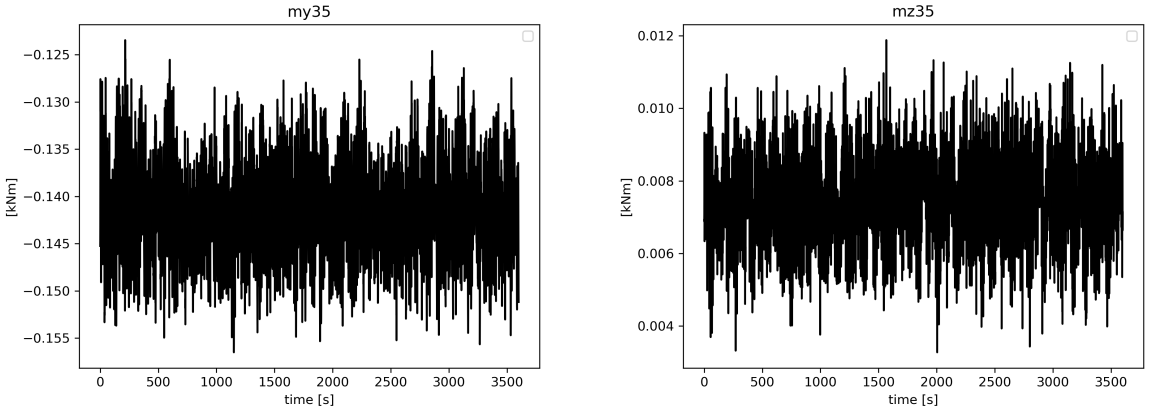
Figur A.80: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 16, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

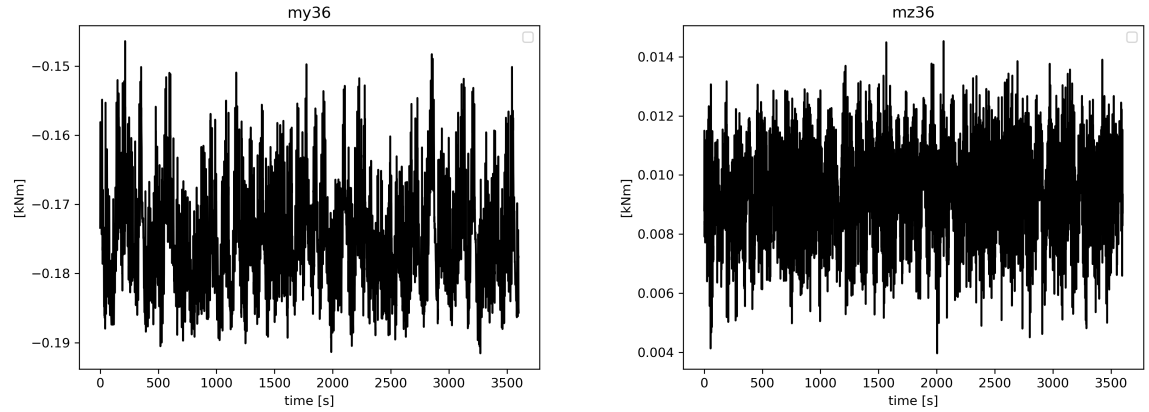
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.81: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 17.



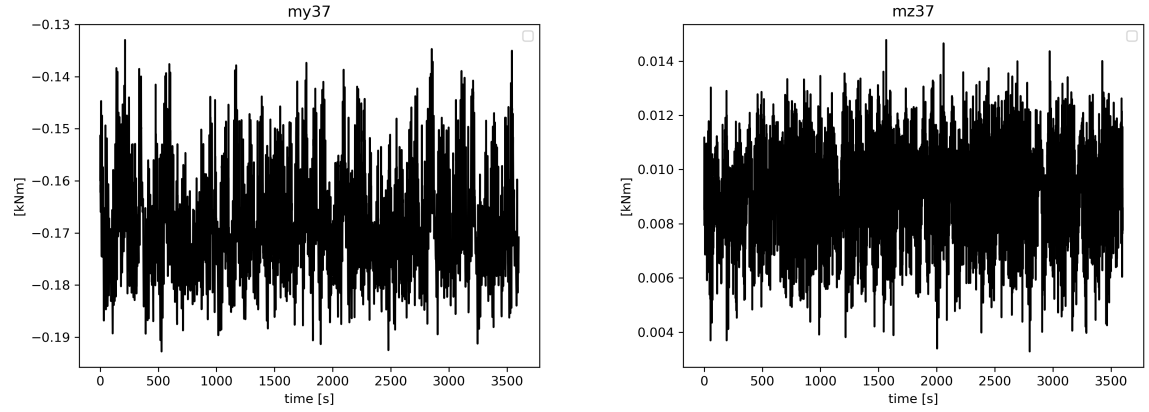
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.82: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 35.



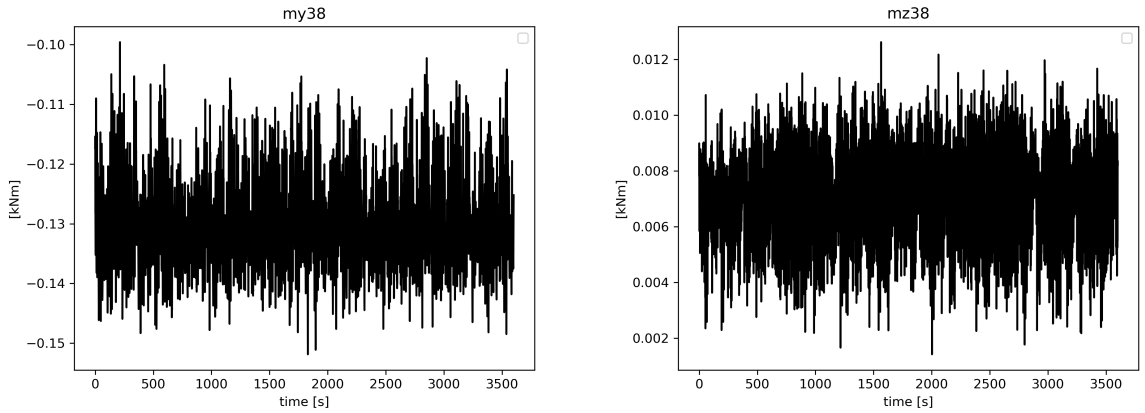
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.83: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 36.



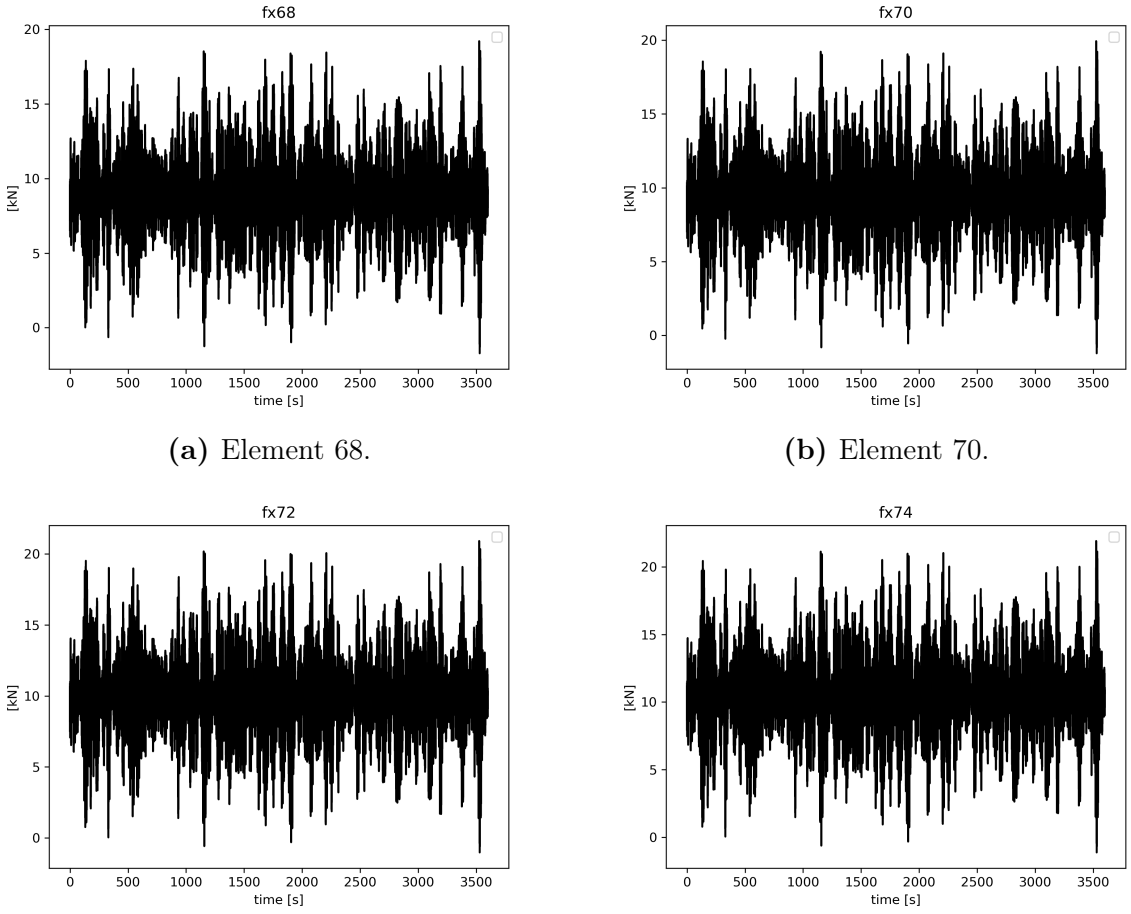
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.84: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

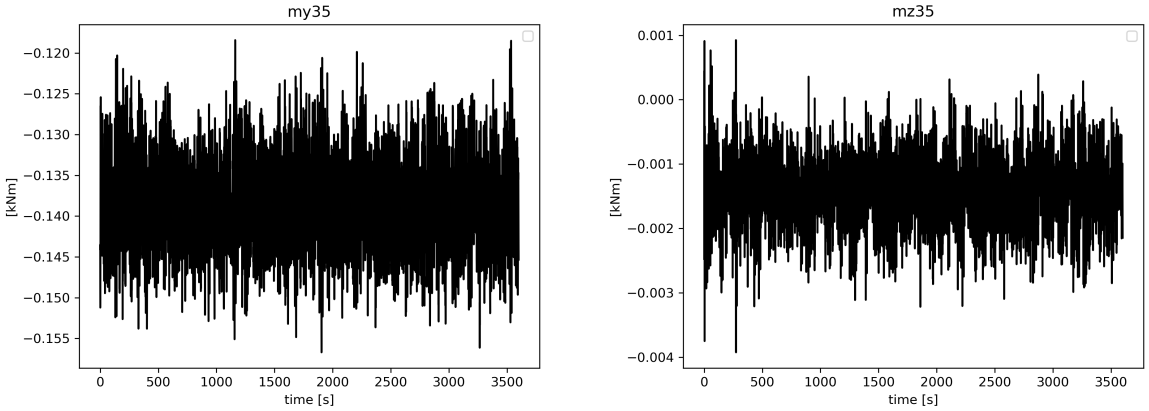
Figur A.85: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

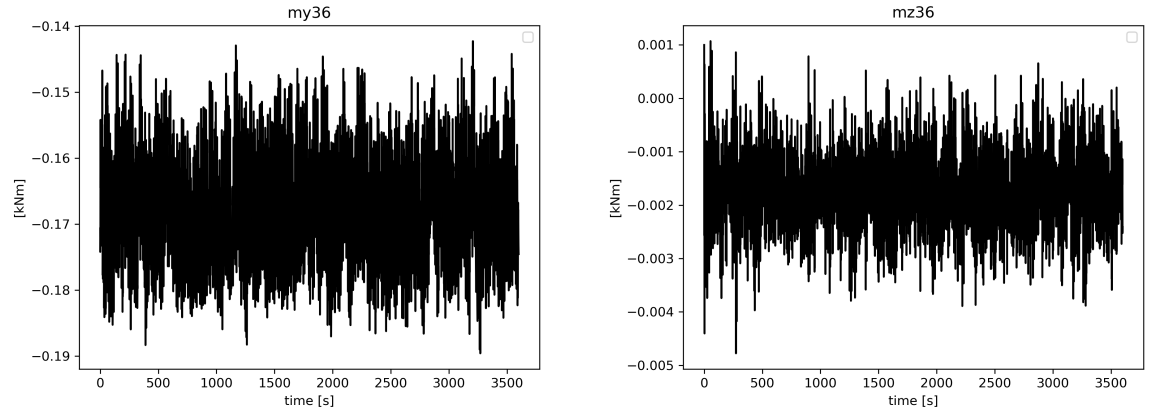
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.86: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 18.



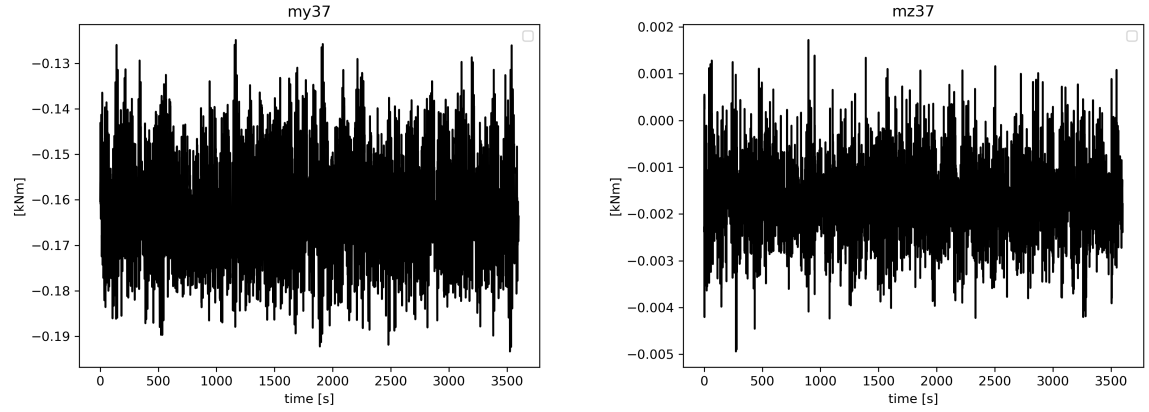
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.87: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 35.



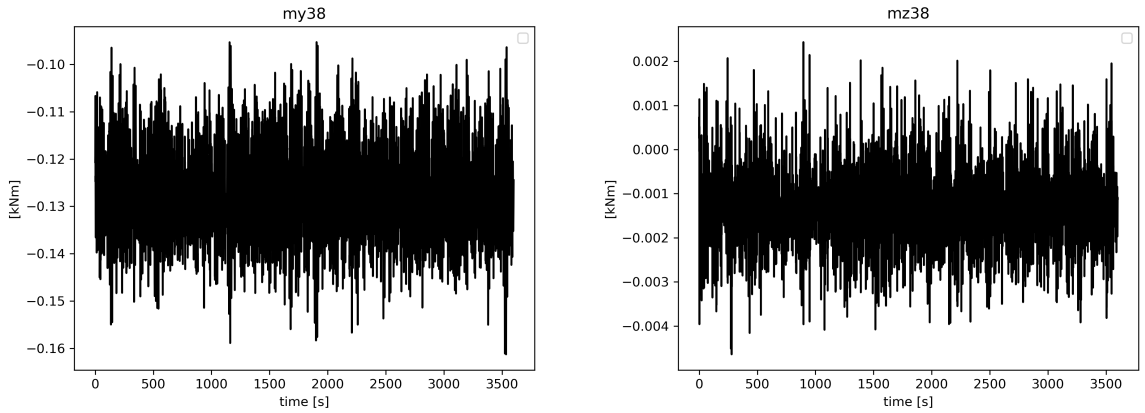
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.88: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 36.



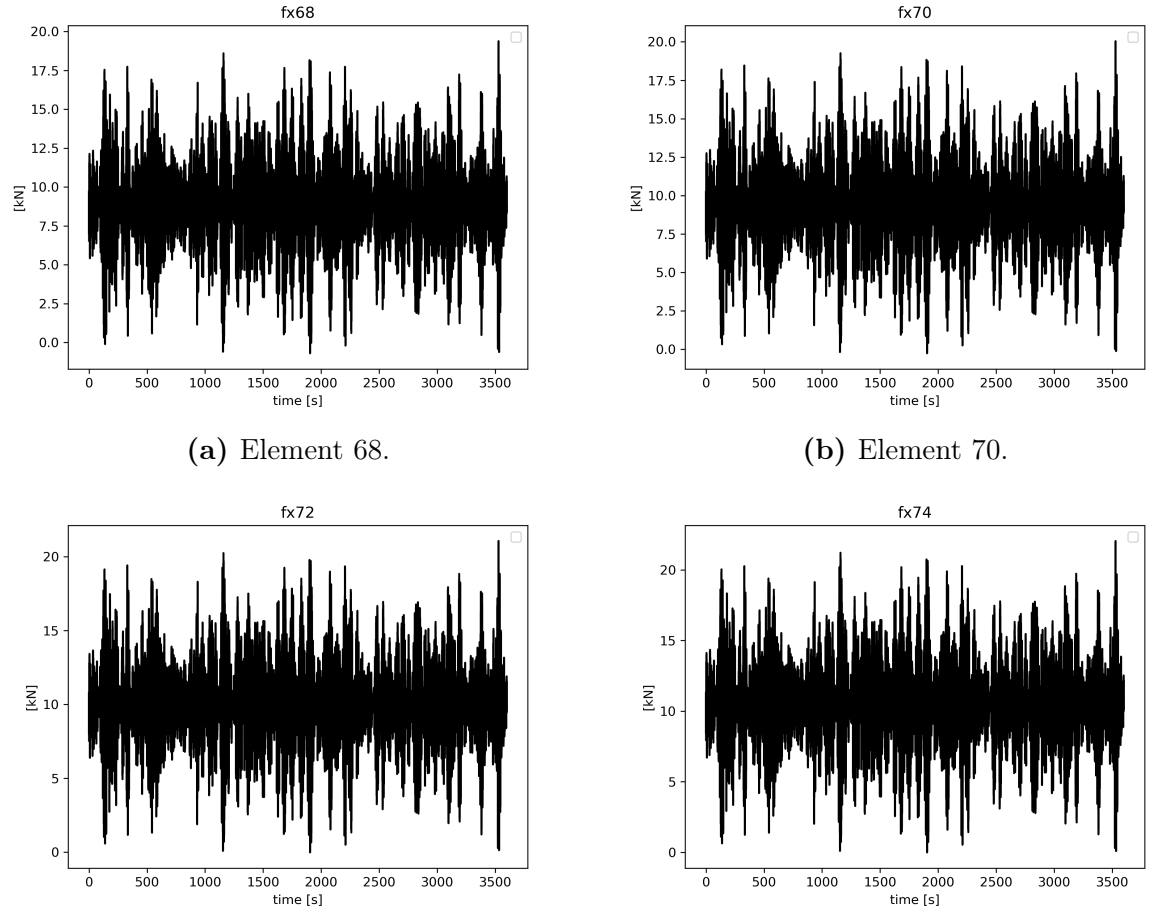
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.89: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

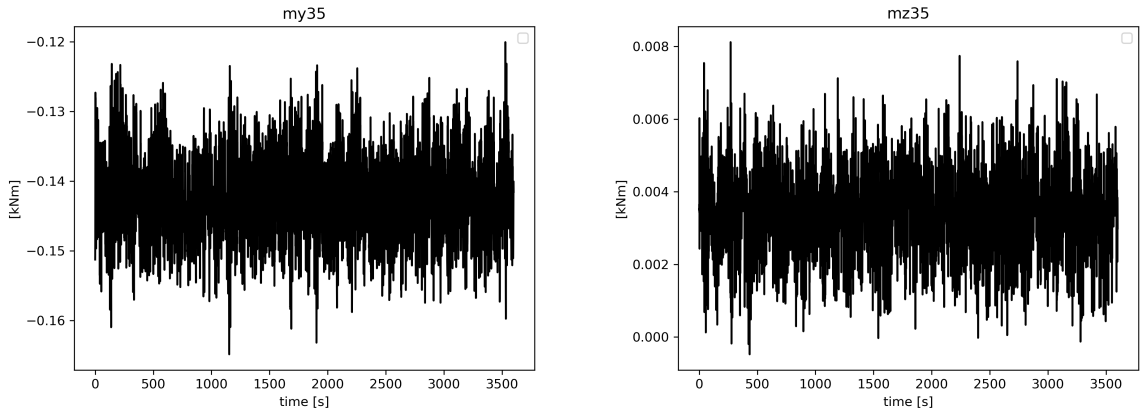
Figur A.90: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

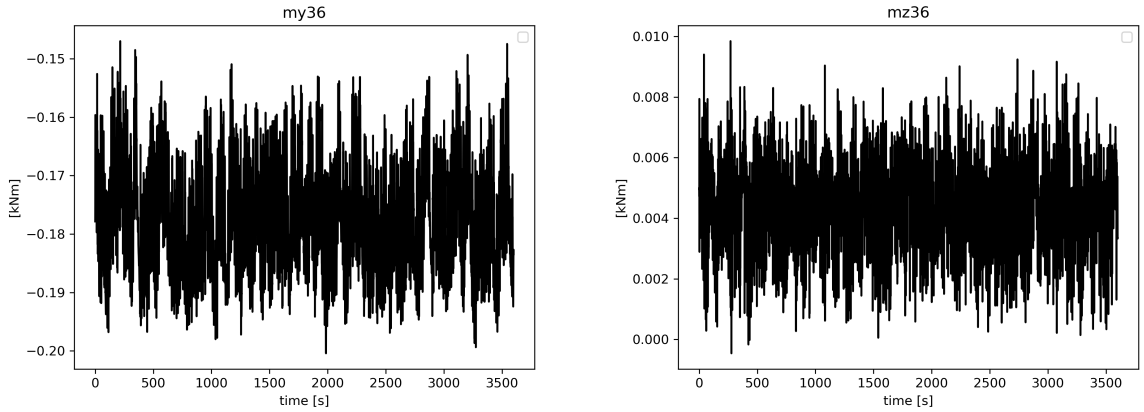
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.91: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 19.



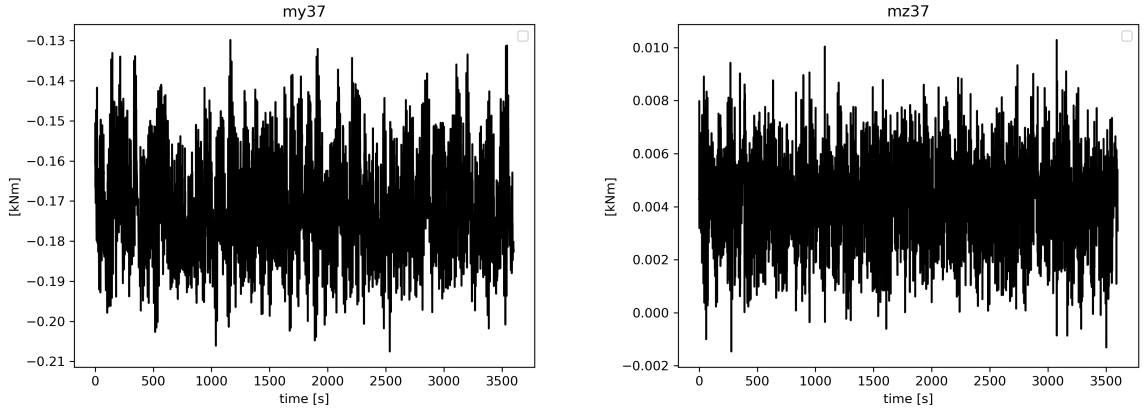
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.92: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 35.



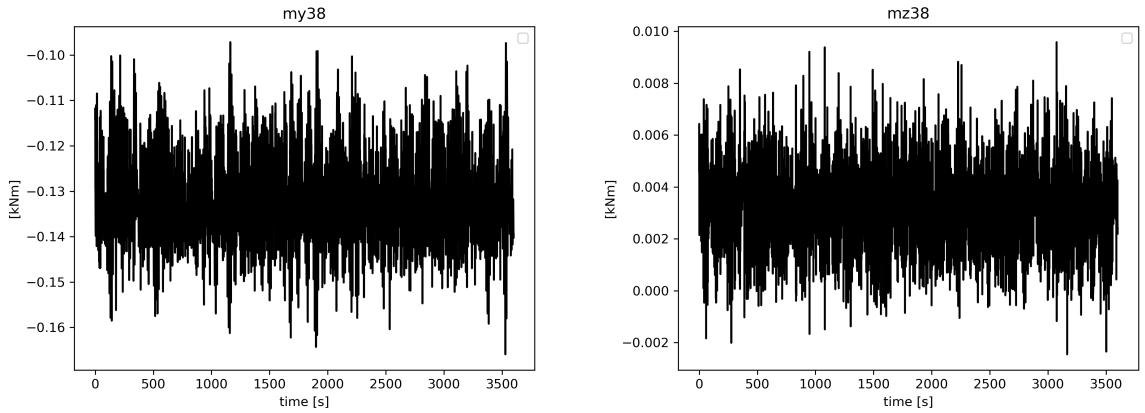
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.93: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 36.



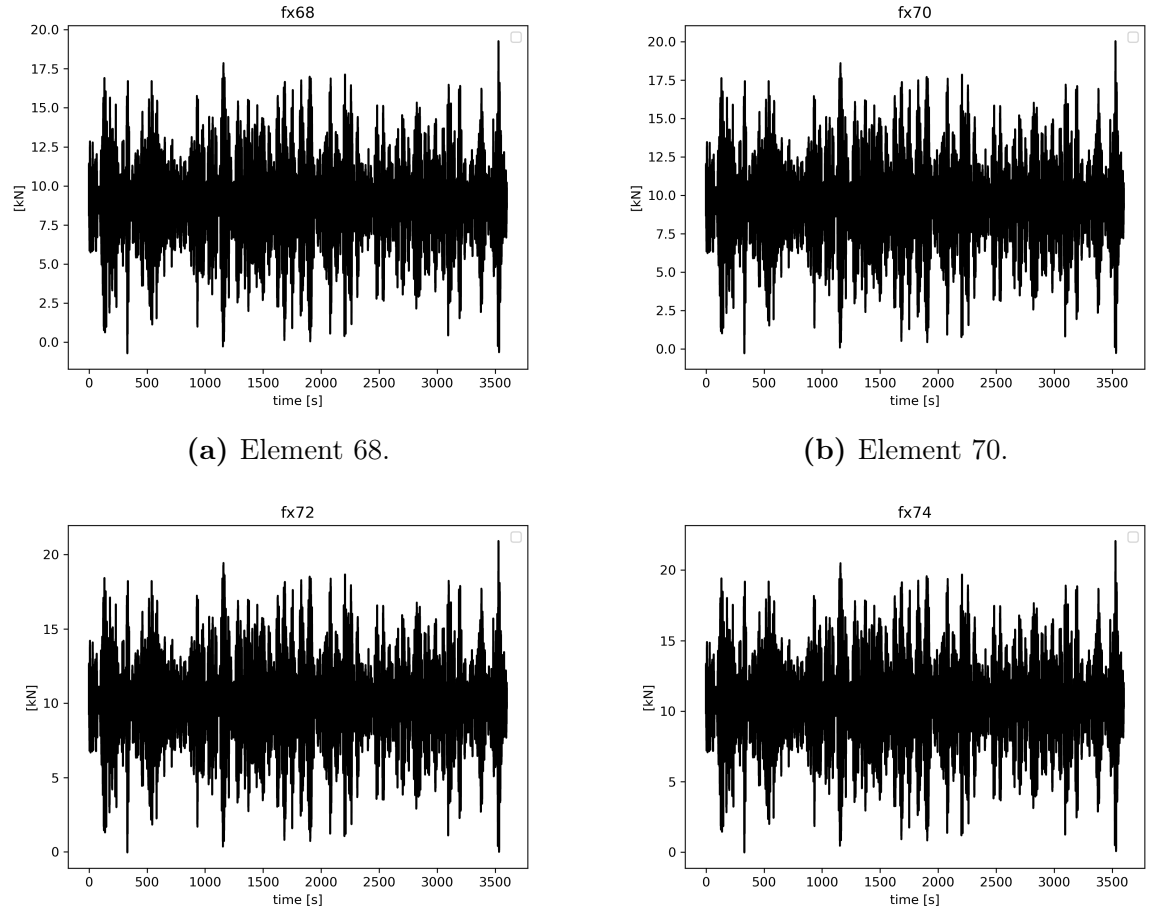
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.94: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

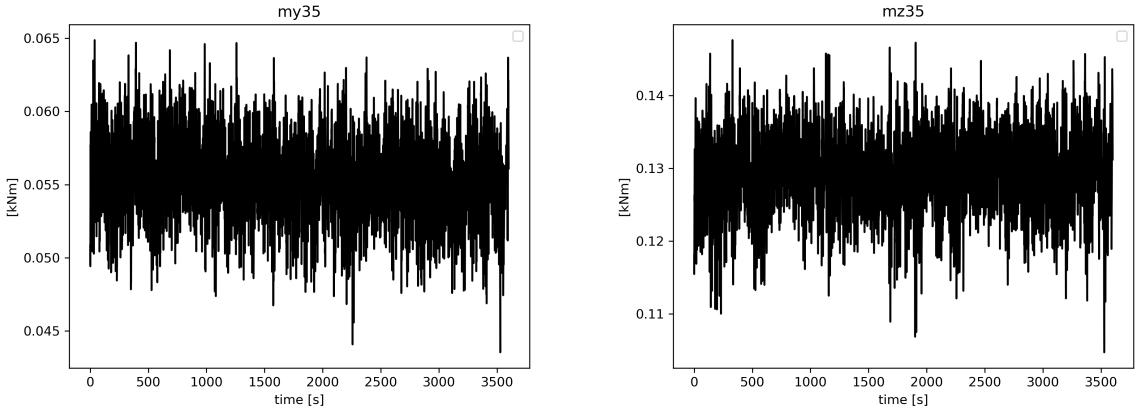
Figur A.95: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 38.



(a) Element 68. **(b)** Element 70.

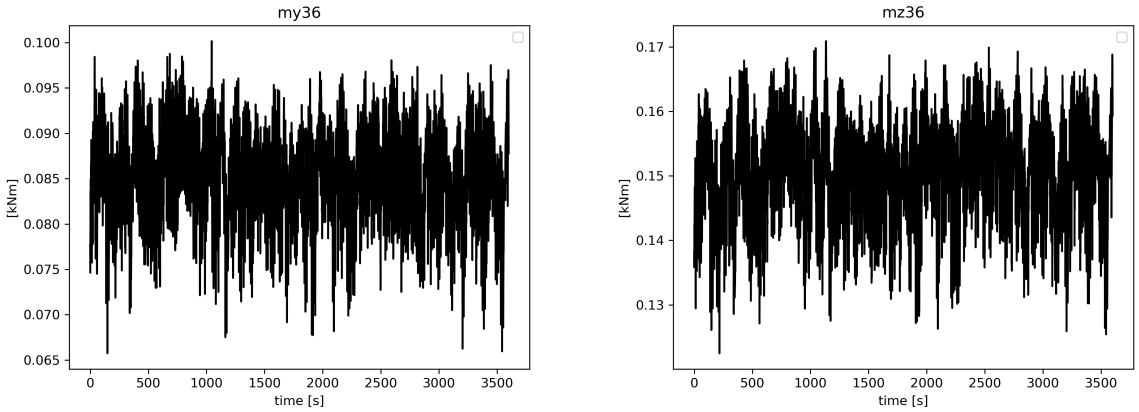
(c) Element 72. **(d)** Element 74.

Figur A.96: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 20.



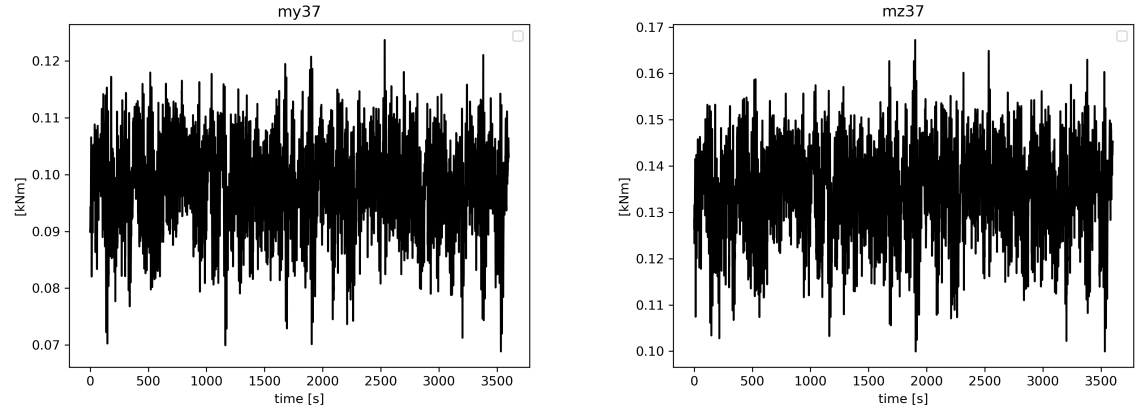
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.97: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 20, som er målt fra monitor i element 35.



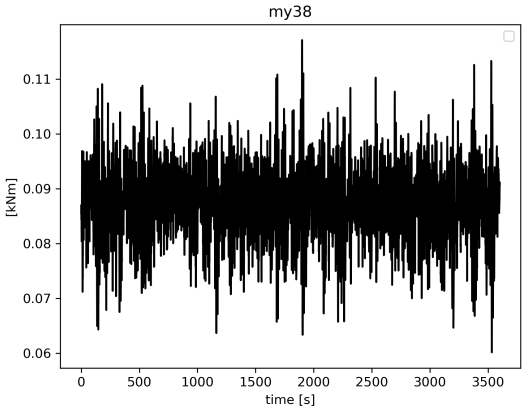
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.98: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 20, som er målt fra monitor i element 36.

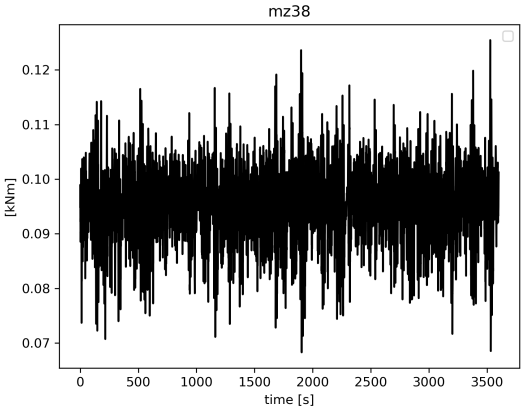


(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.99: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 20, som er målt fra monitor i element 37.

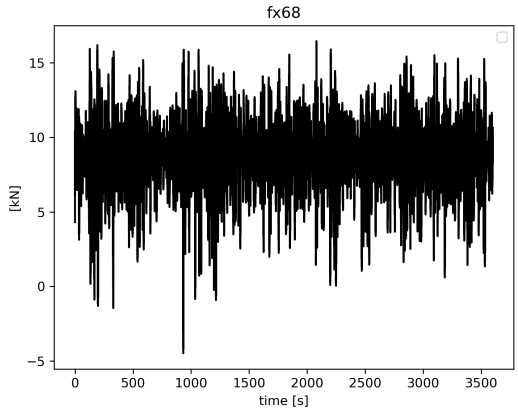


(a) Moment om Y.

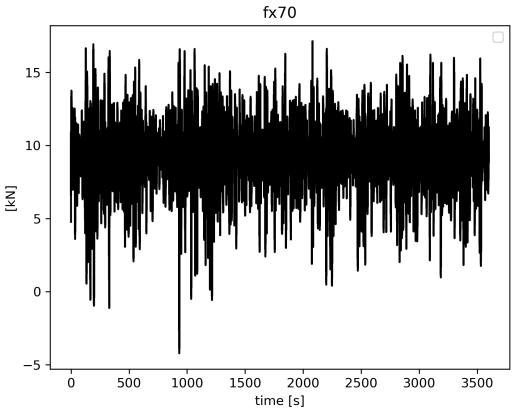


(b) Moment om Z.

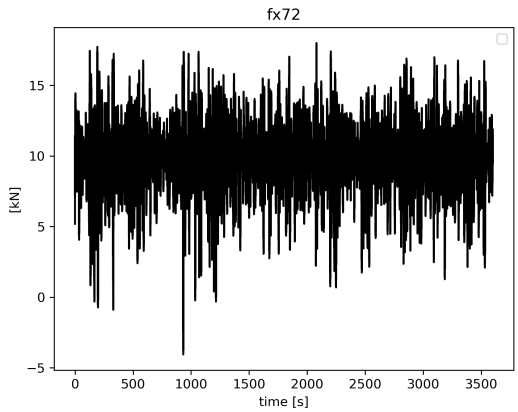
Figur A.100: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 20, som er målt fra monitor i element 38.



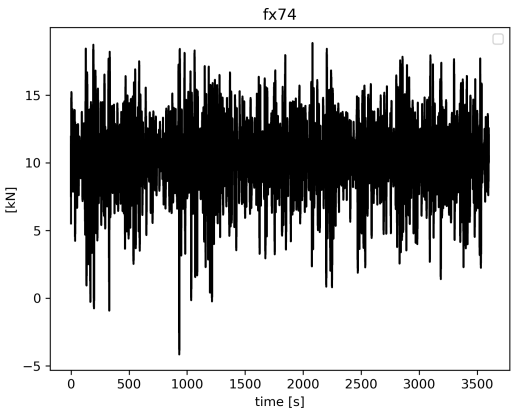
(a) Element 68.



(b) Element 70.

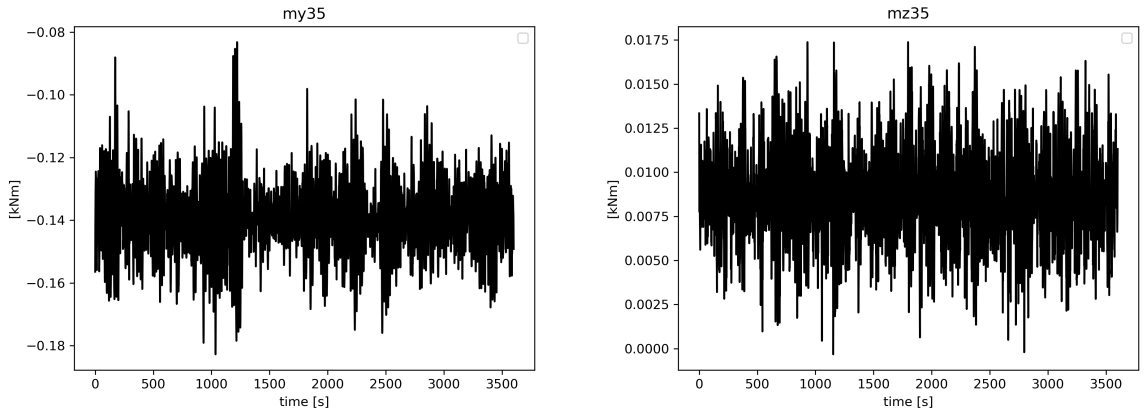


(c) Element 72.



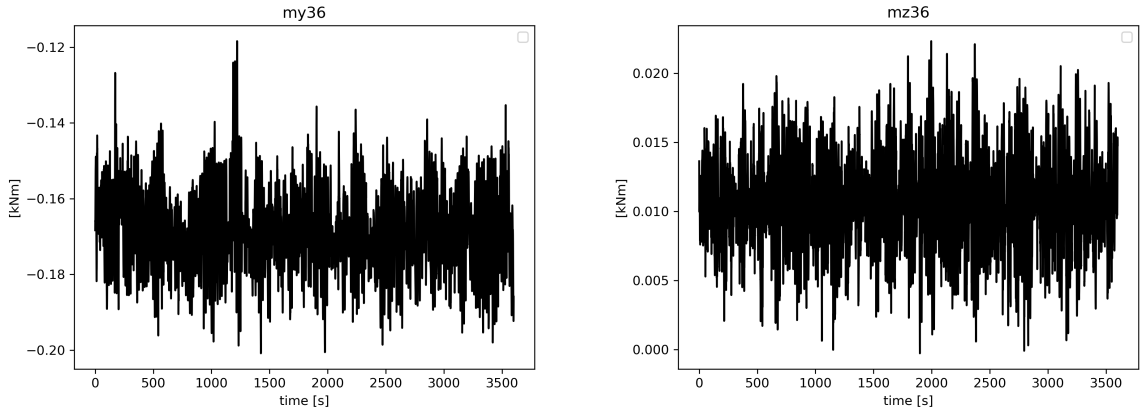
(d) Element 74.

Figur A.101: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 21.



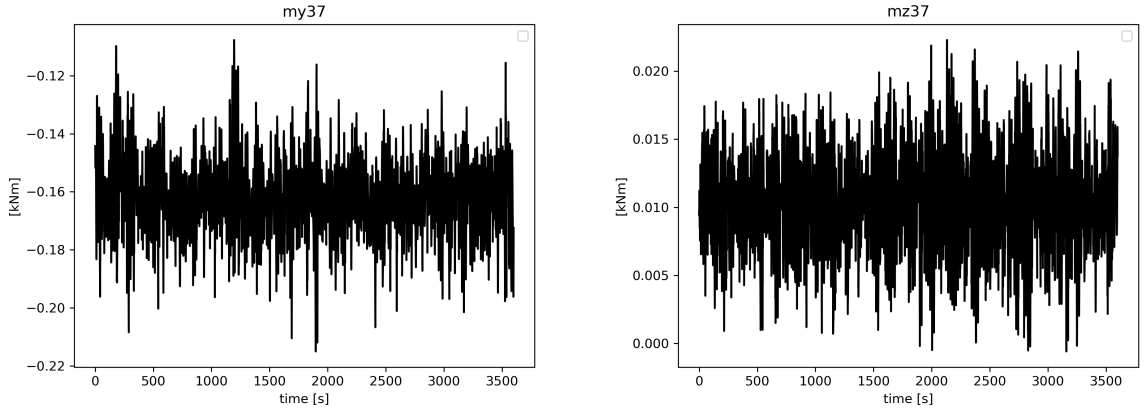
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.102: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21, som er målt fra monitor i element 35.



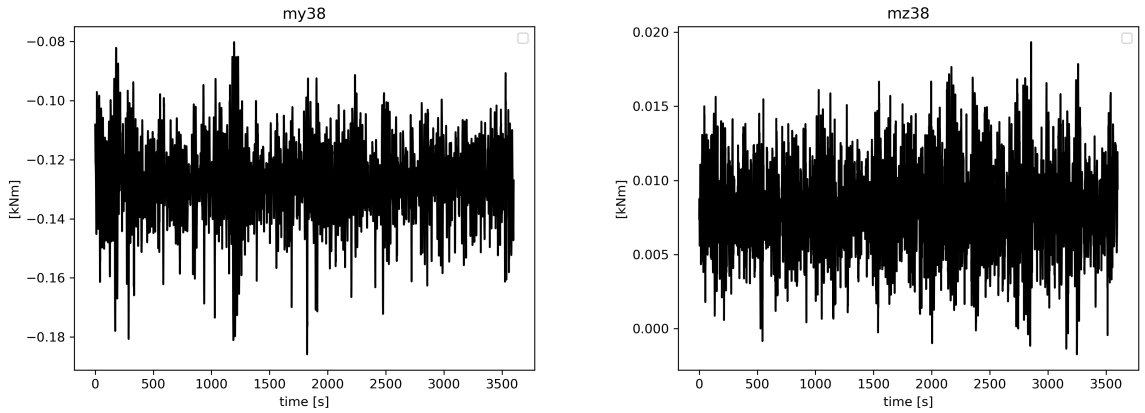
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.103: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21, som er målt fra monitor i element 36.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

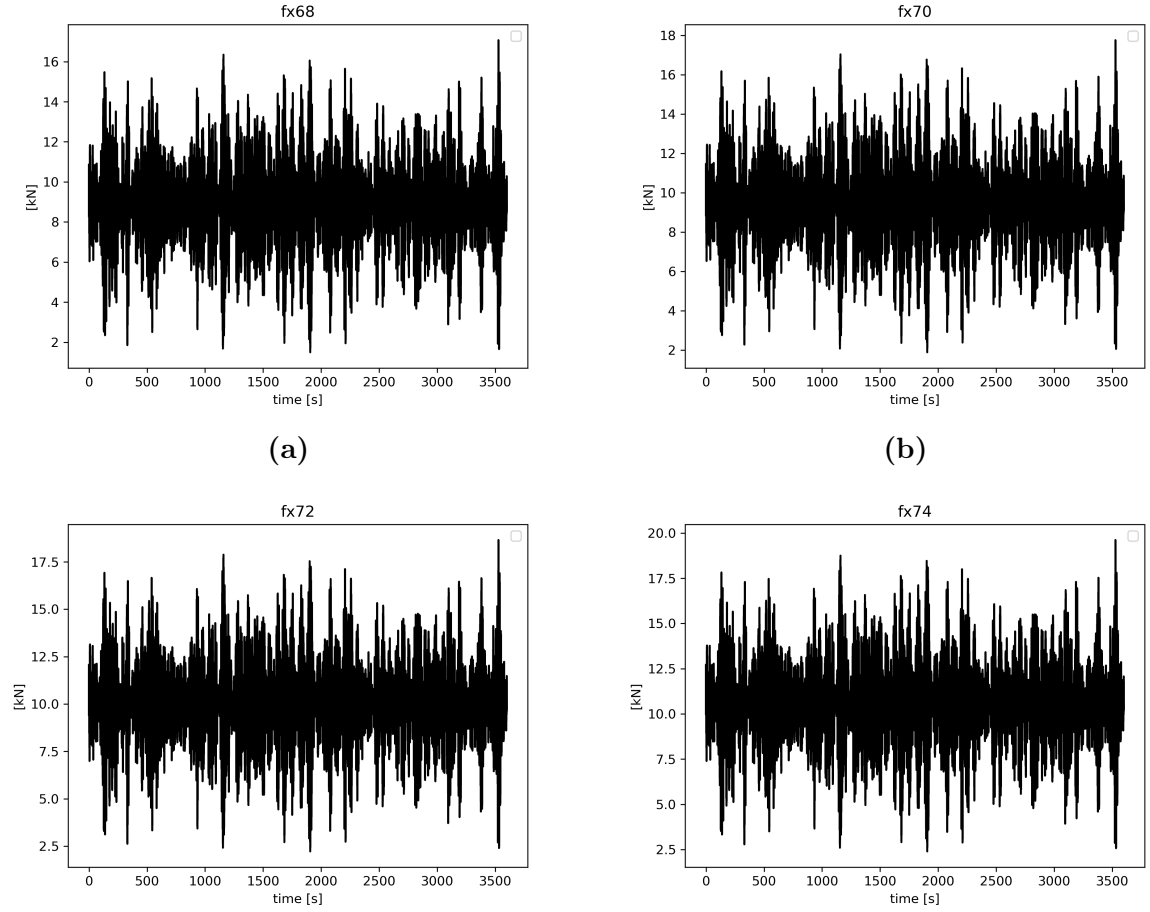
Figur A.104: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.105: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 21, som er målt fra monitor i element 38.

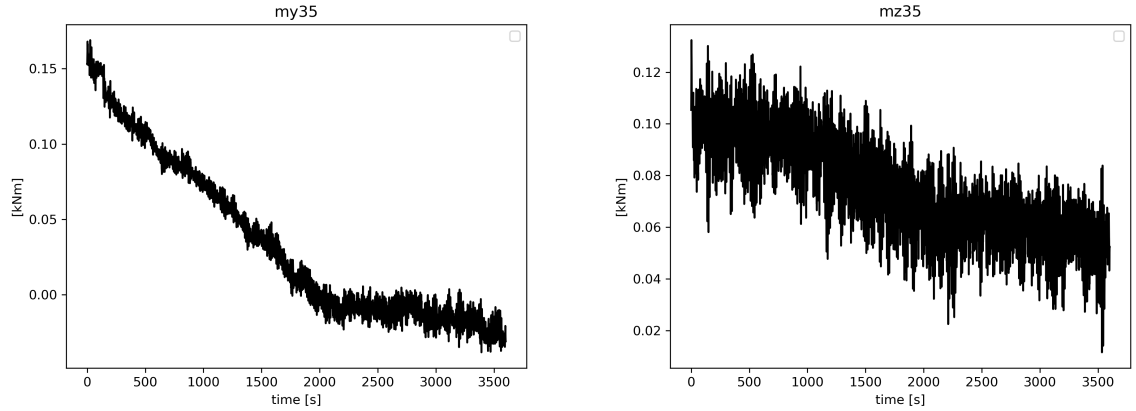
A.2 Simuleringer med bølger som ikke ble brukt



(a) **(b)**

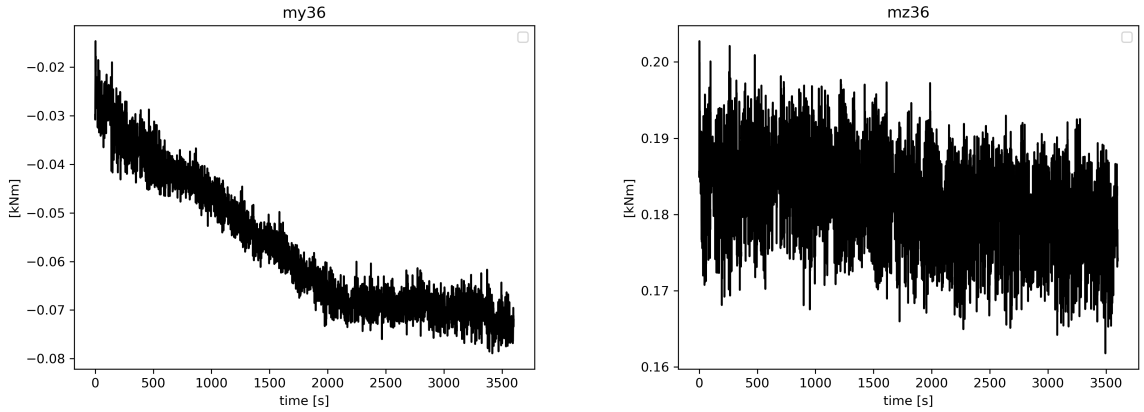
(c) **(d)**

Figur A.106: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 12.



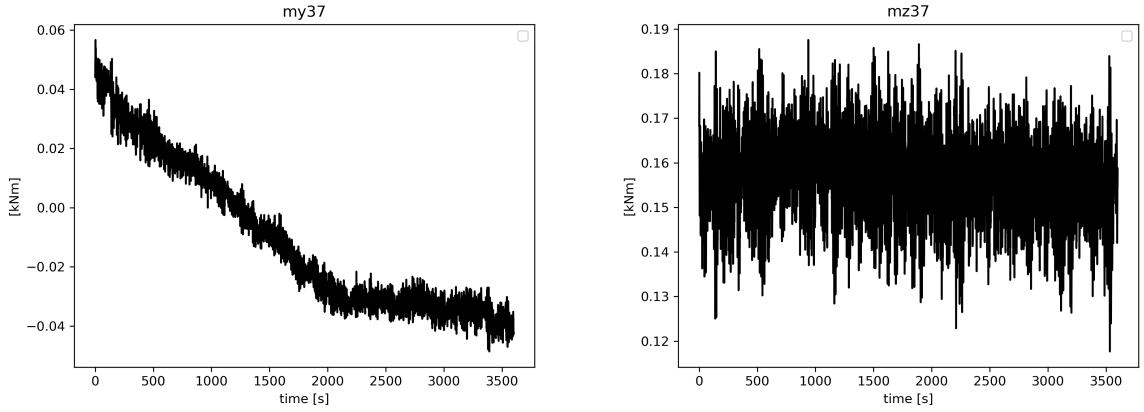
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.107: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 35.



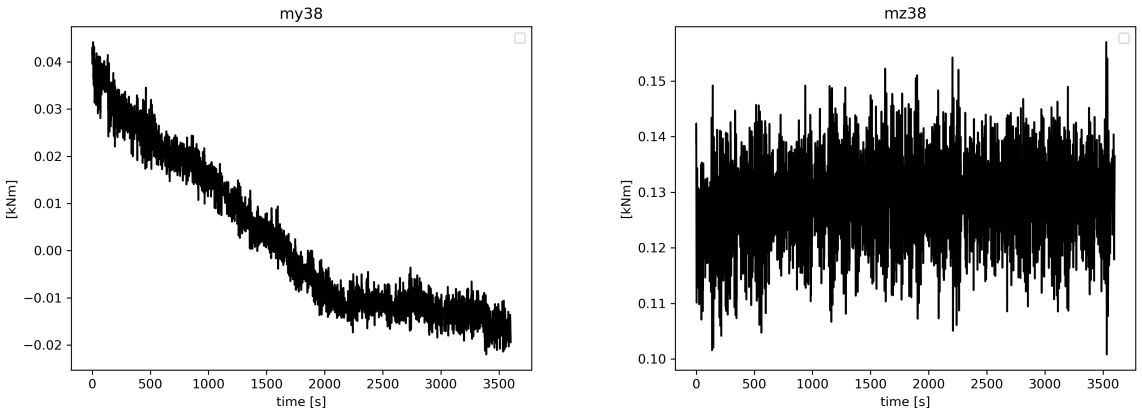
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.108: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 36.



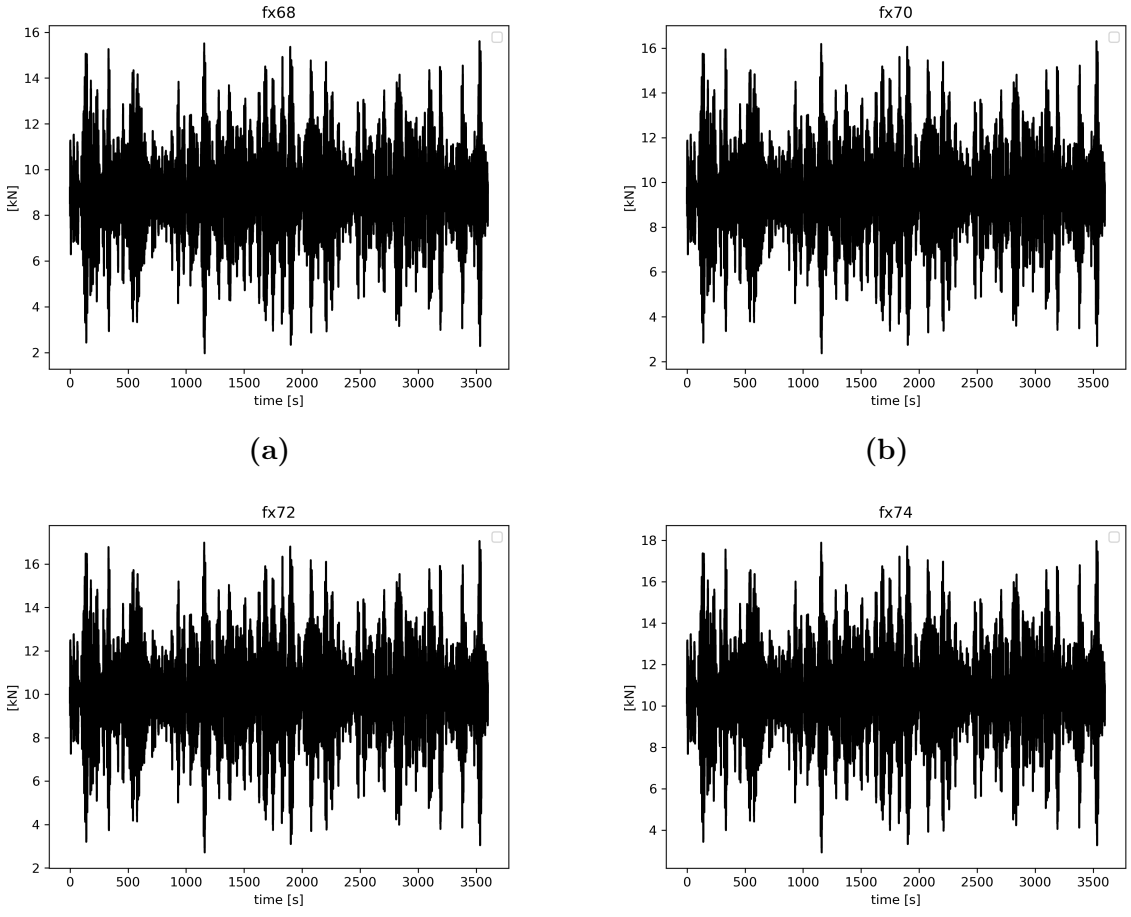
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.109: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

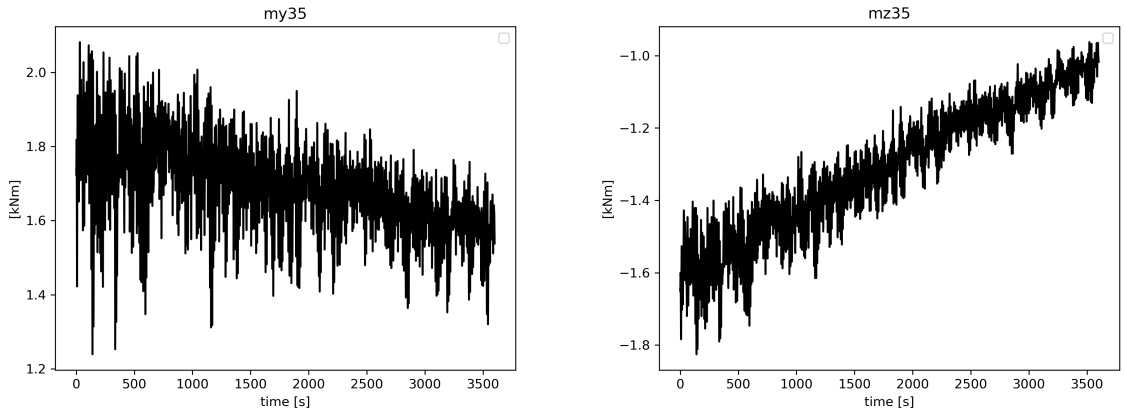
Figur A.110: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 12, som er målt fra monitor i element 38.



(a) **(b)**

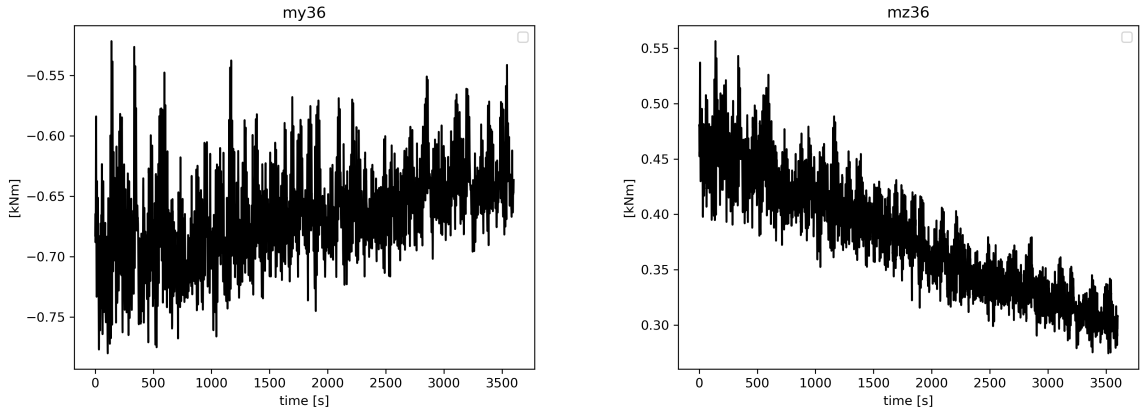
(c) **(d)**

Figur A.111: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 17.



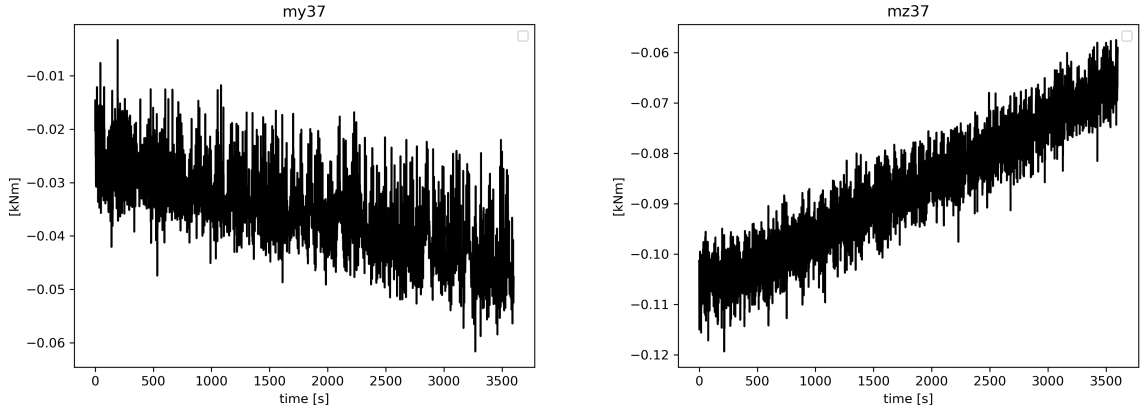
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.112: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 35.



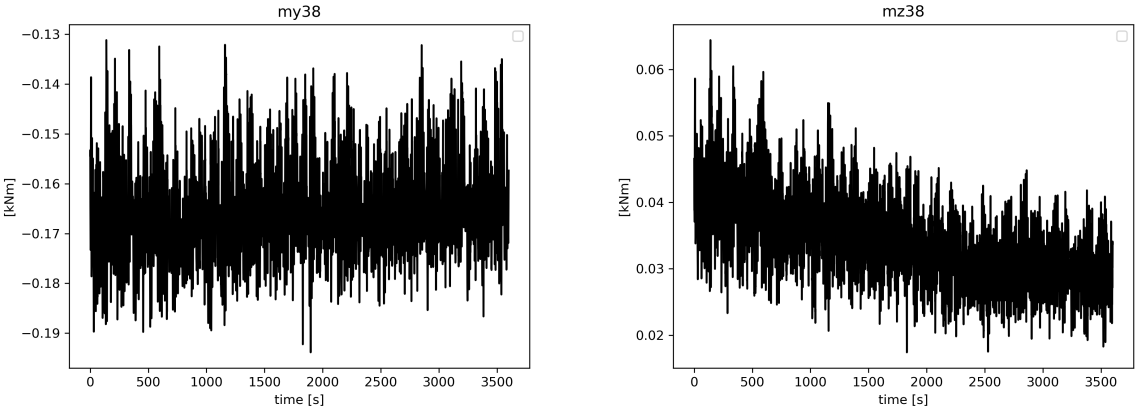
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.113: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 36.



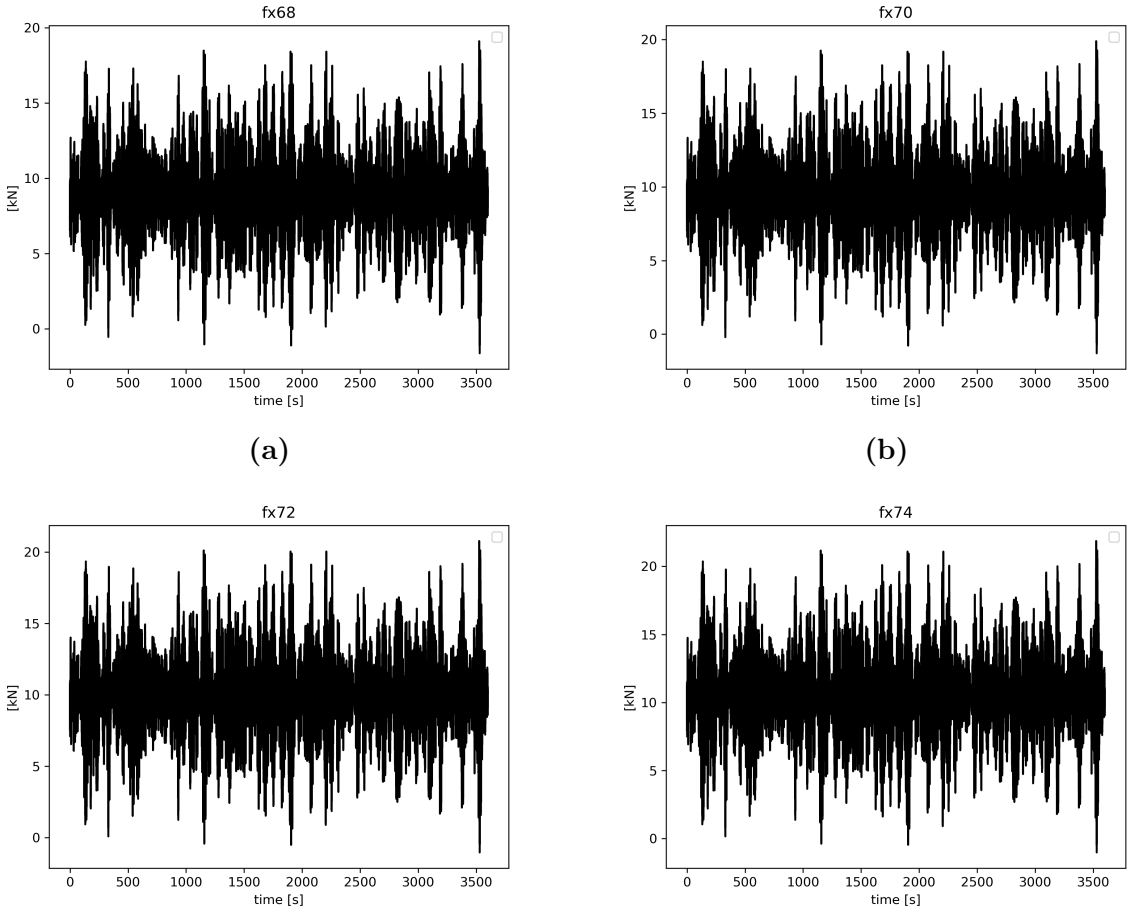
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.114: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

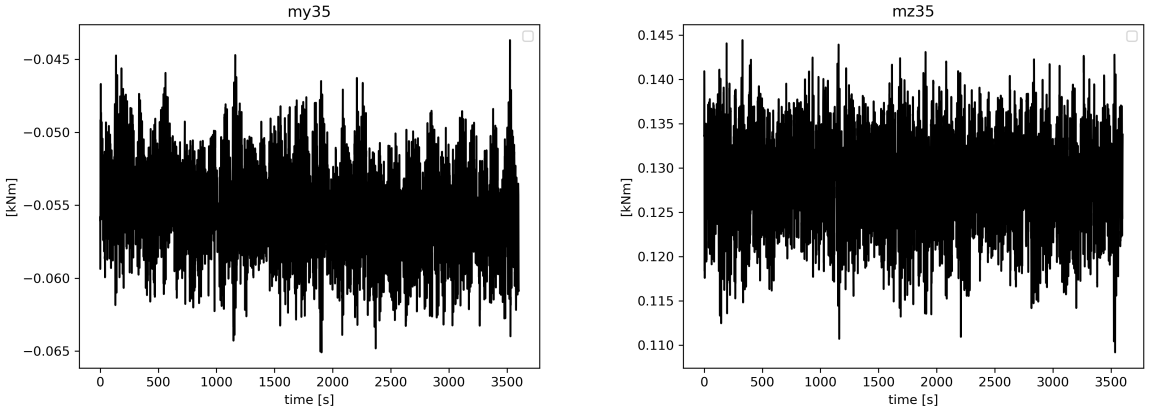
Figur A.115: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 17, som er målt fra monitor i element 38.



(a) **(b)**

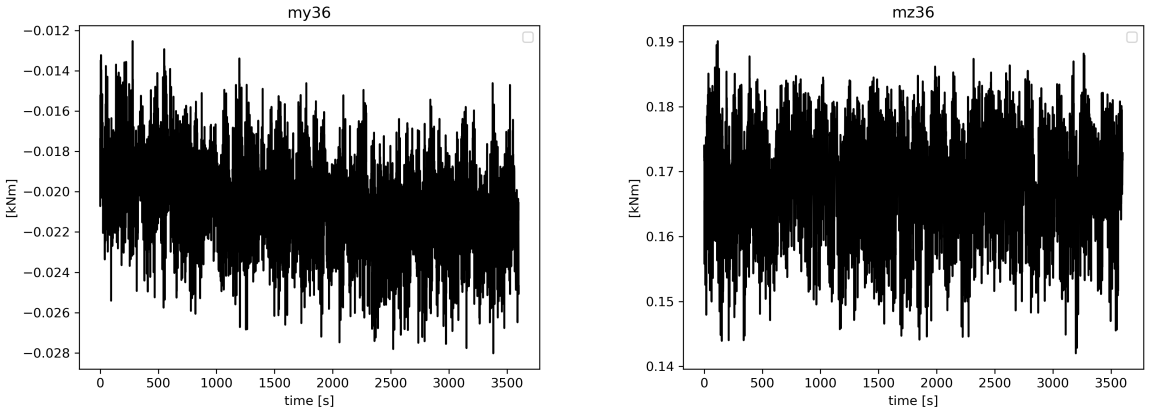
(c) **(d)**

Figur A.116: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 18.



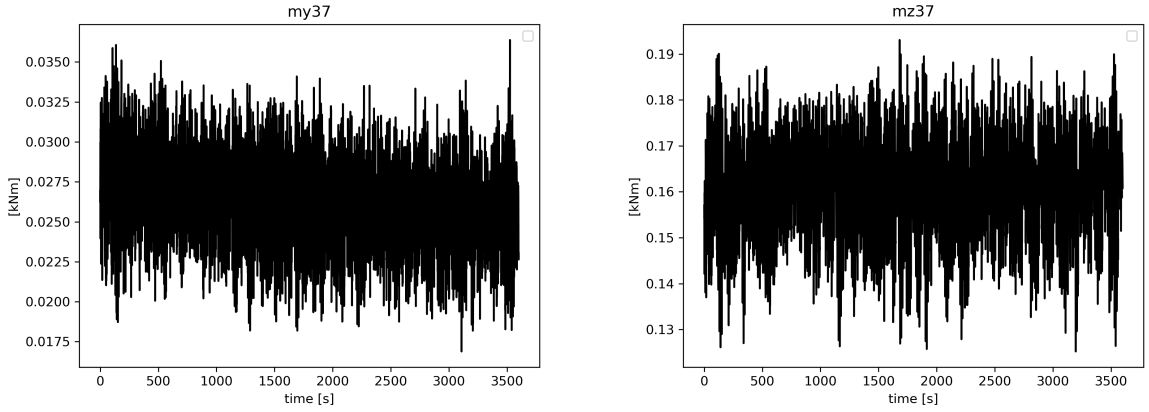
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.117: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 35.



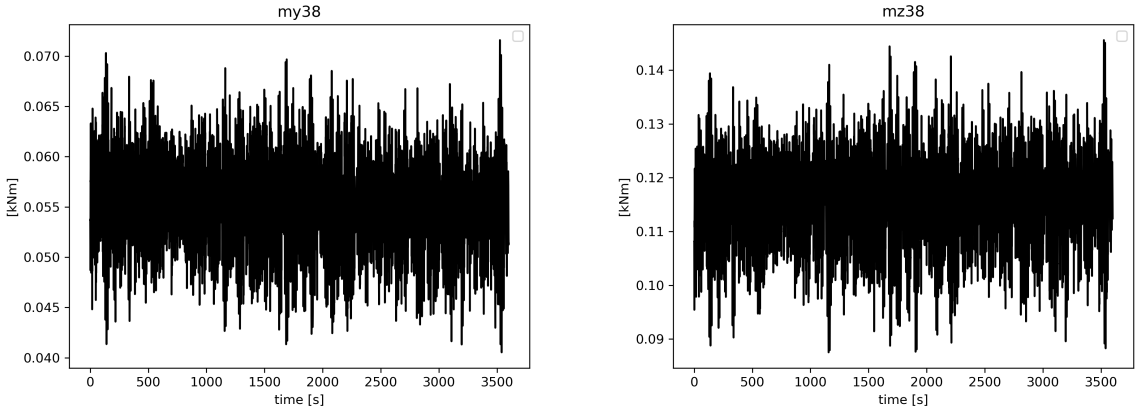
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.118: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 36.



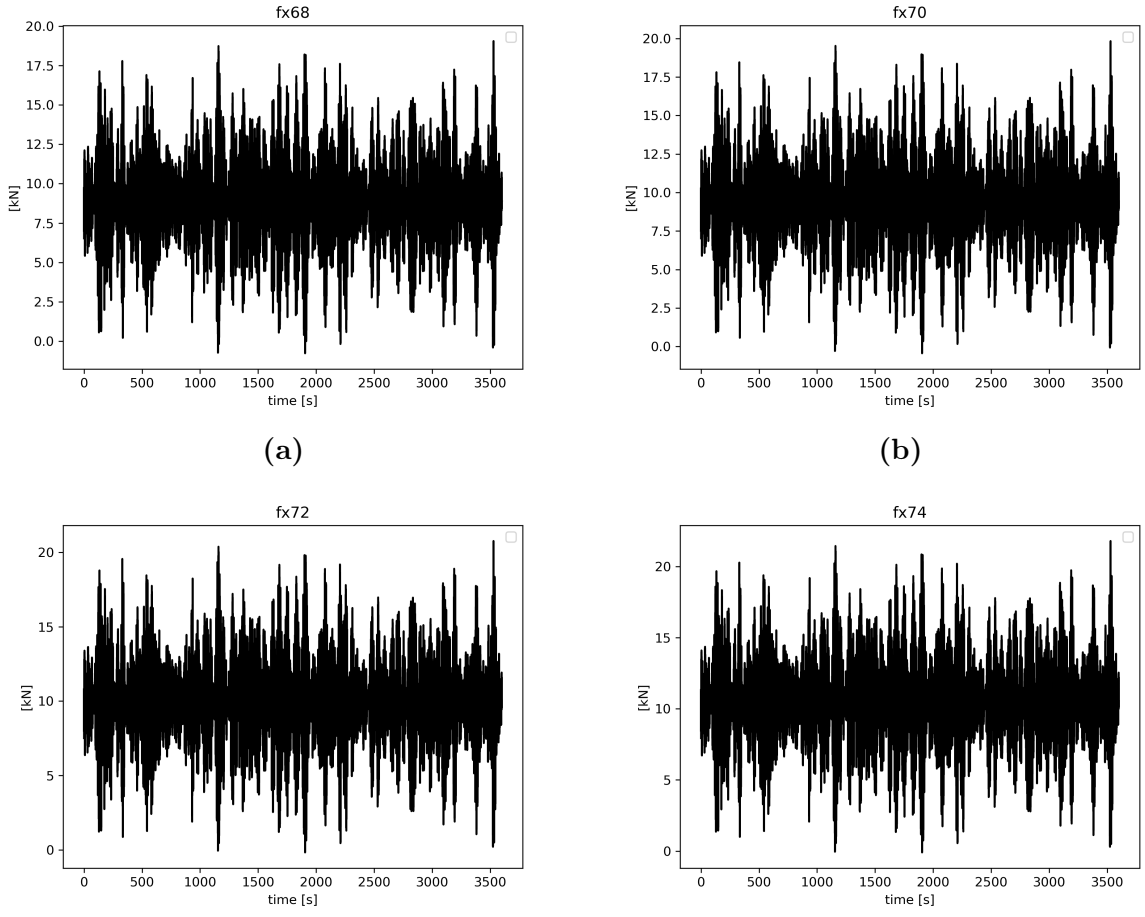
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.119: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 37.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

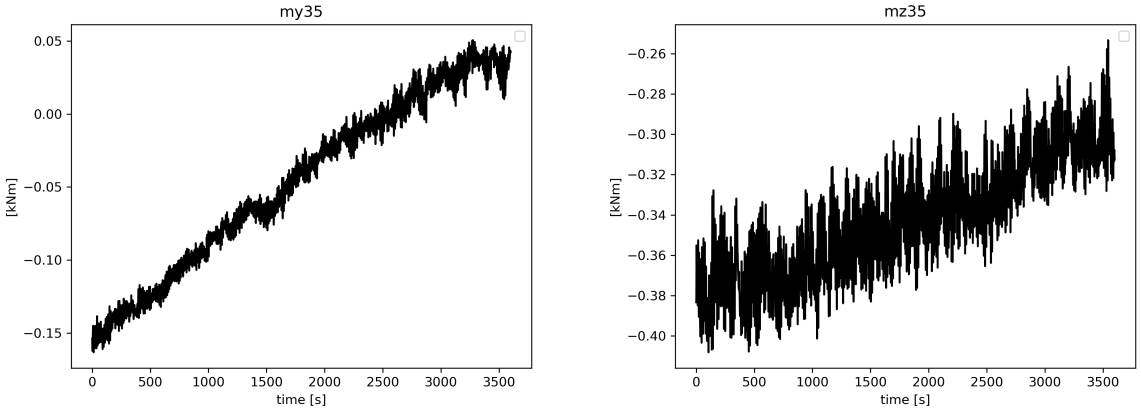
Figur A.120: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 18, som er målt fra monitor i element 38.



(a) **(b)**

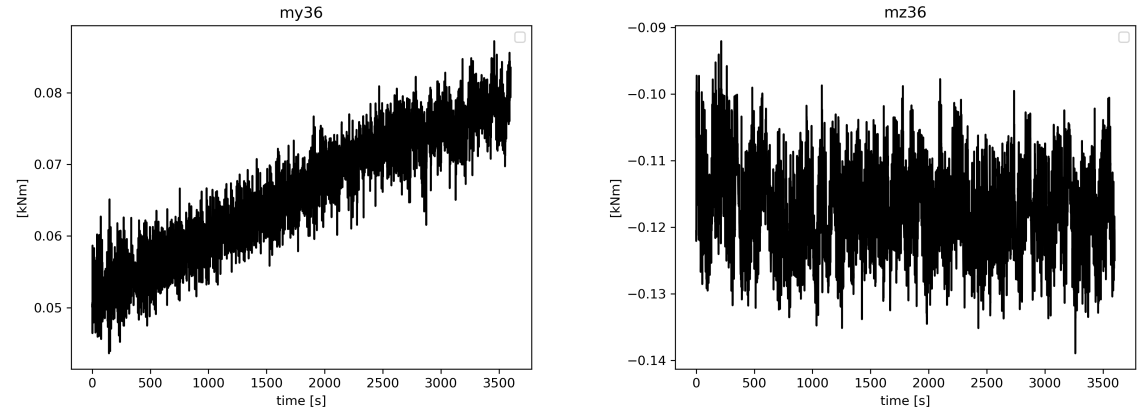
(c) **(d)**

Figur A.121: Viser aksiale krefter som er målt fra monitor i sjøtilstand 19.



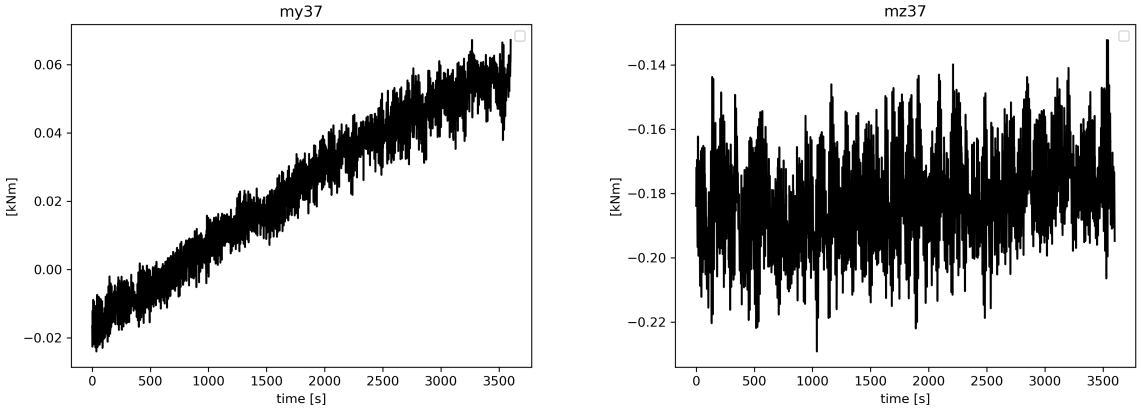
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.122: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 35.



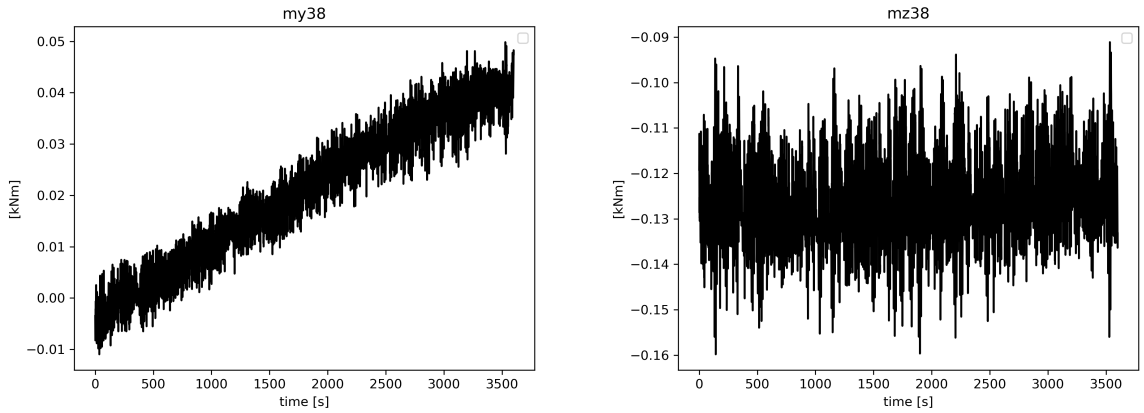
(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.123: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 36.



(a) Moment om Y. **(b)** Moment om Z.

Figur A.124: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 37.

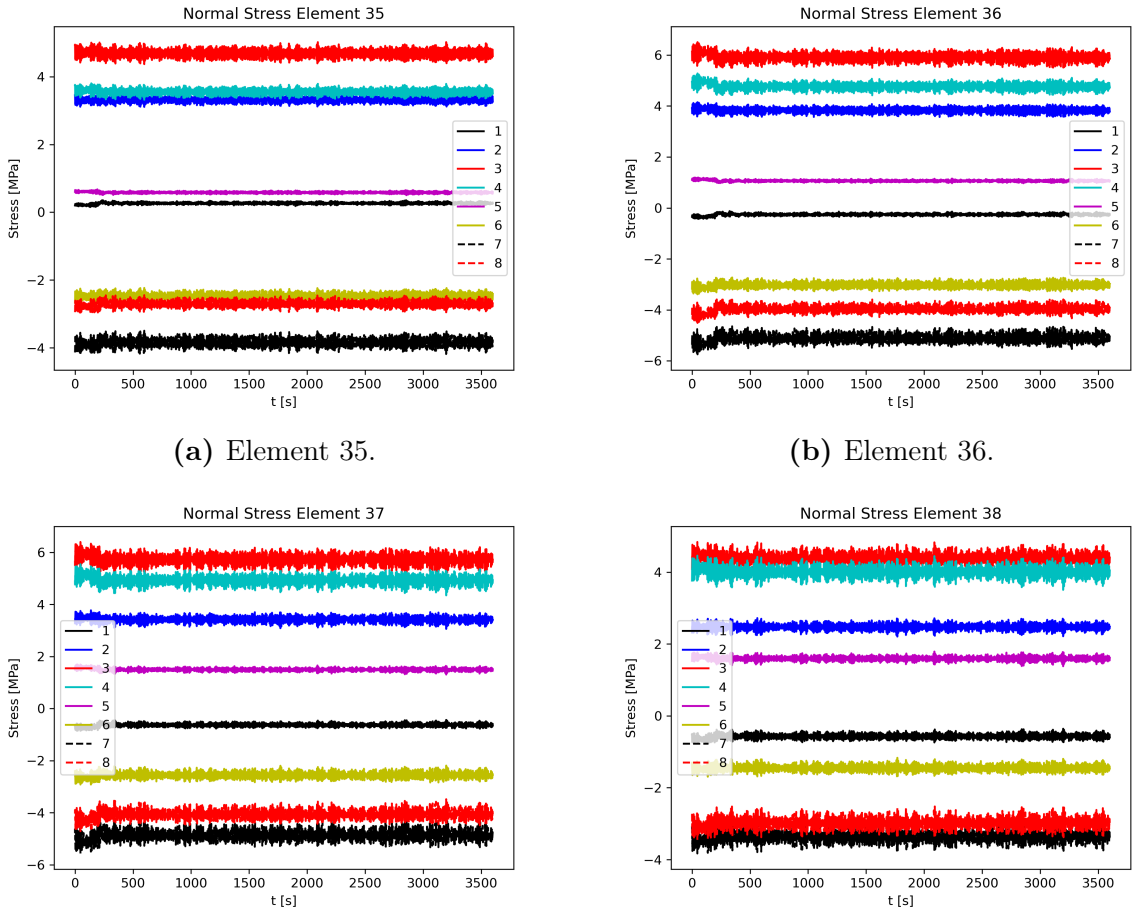


(a) Moment om Y.

(b) Moment om Z.

Figur A.125: Viser bøyemomenter i sjøtilstand 19, som er målt fra monitor i element 38.

B Spenninger i utvalgte elementer



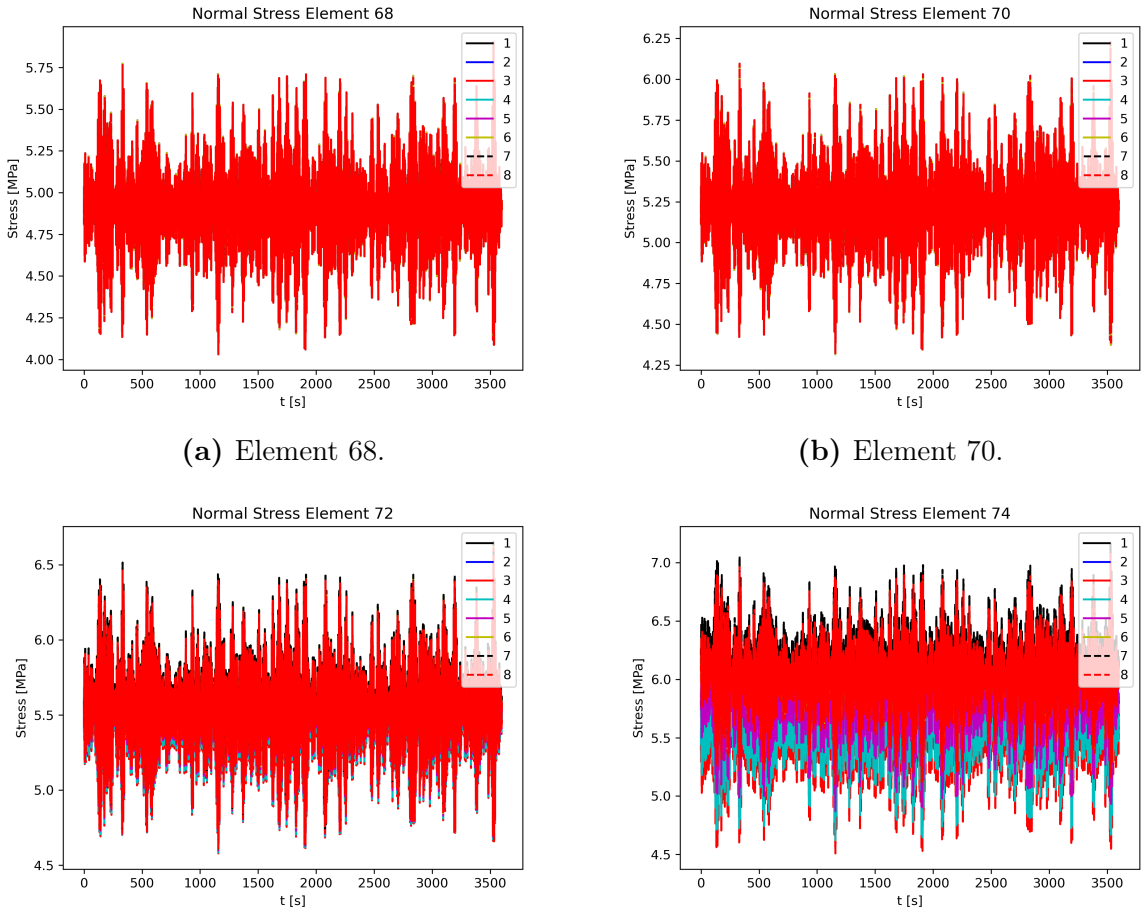
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.1: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 1. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



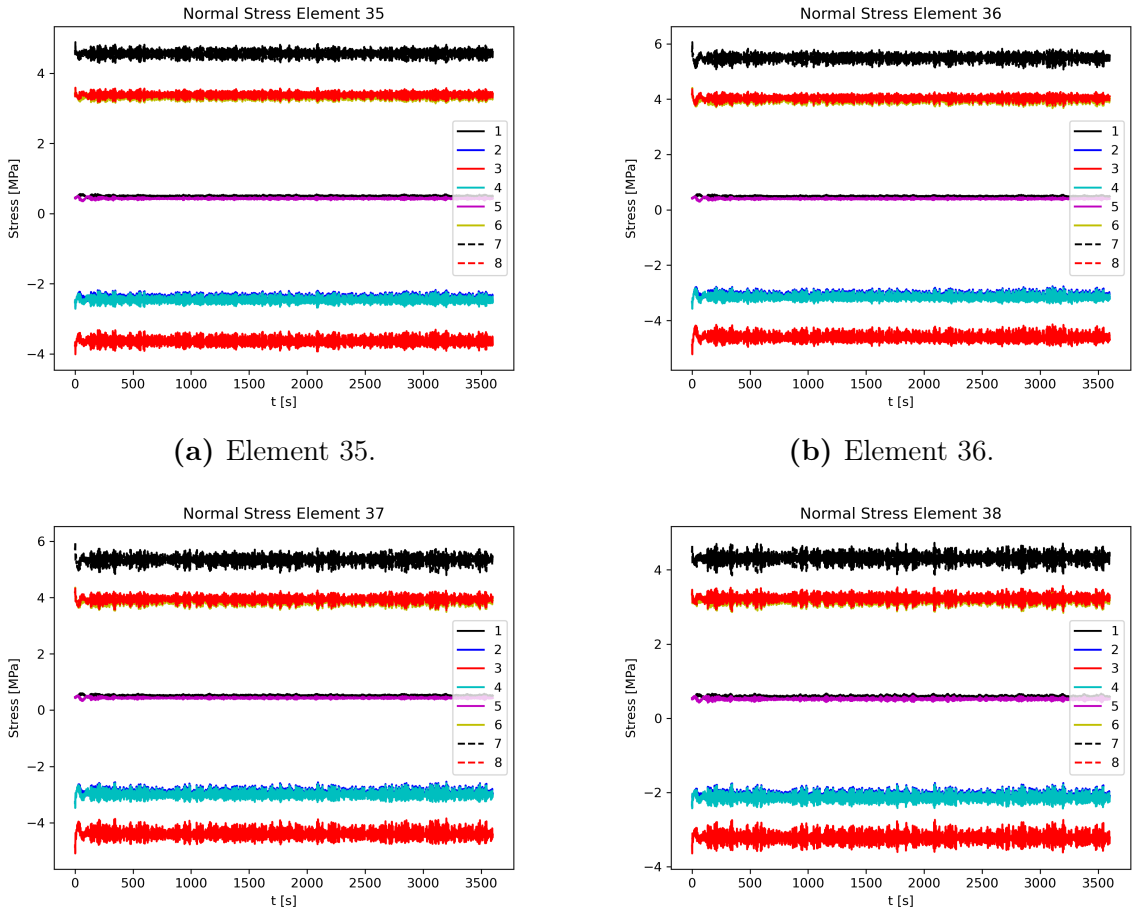
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.2: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 1. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



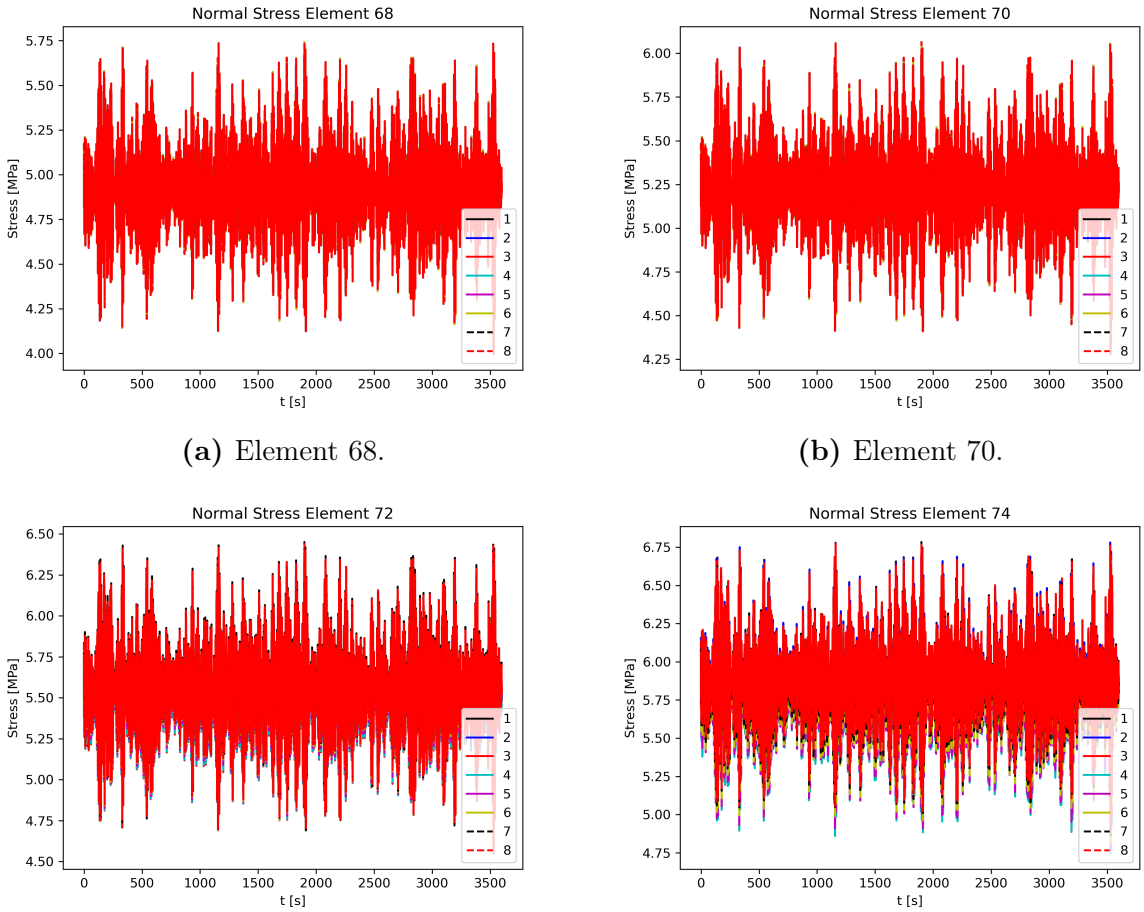
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.3: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 2. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



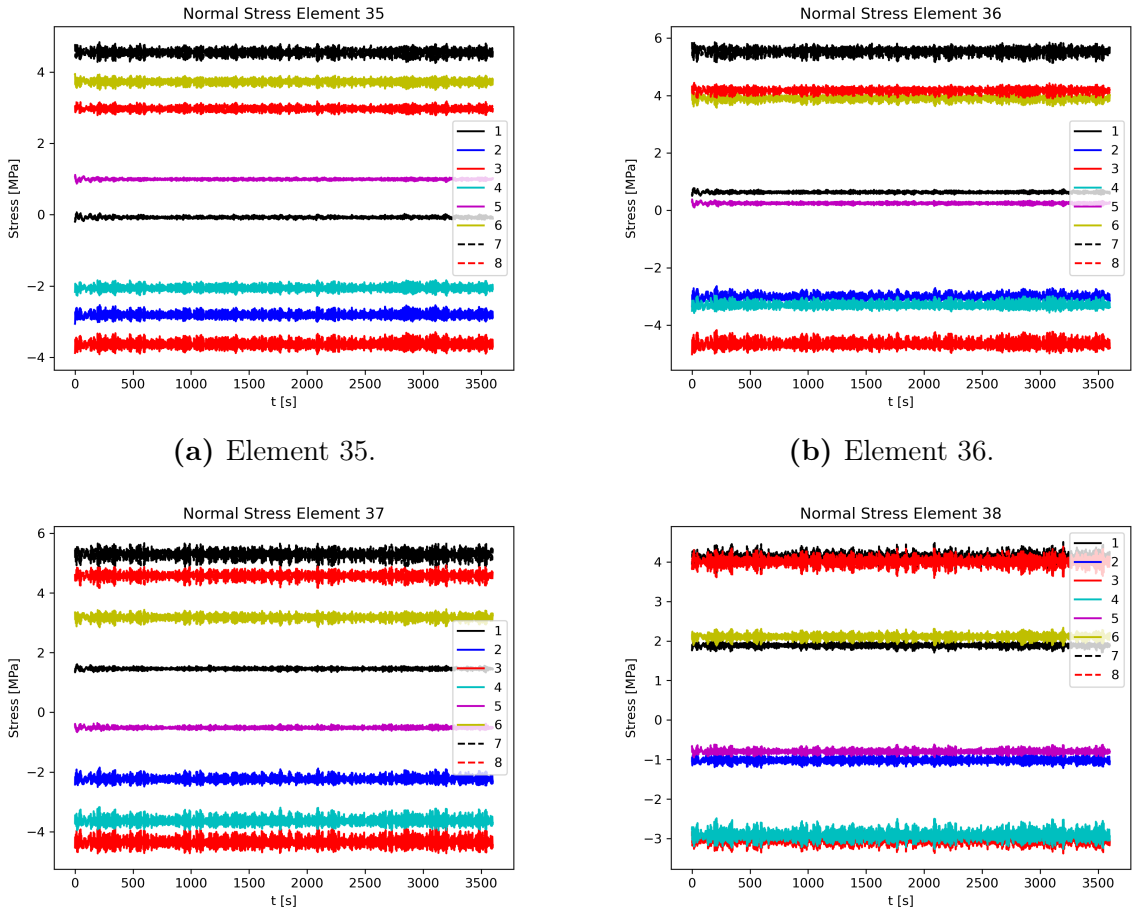
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.4: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 2. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



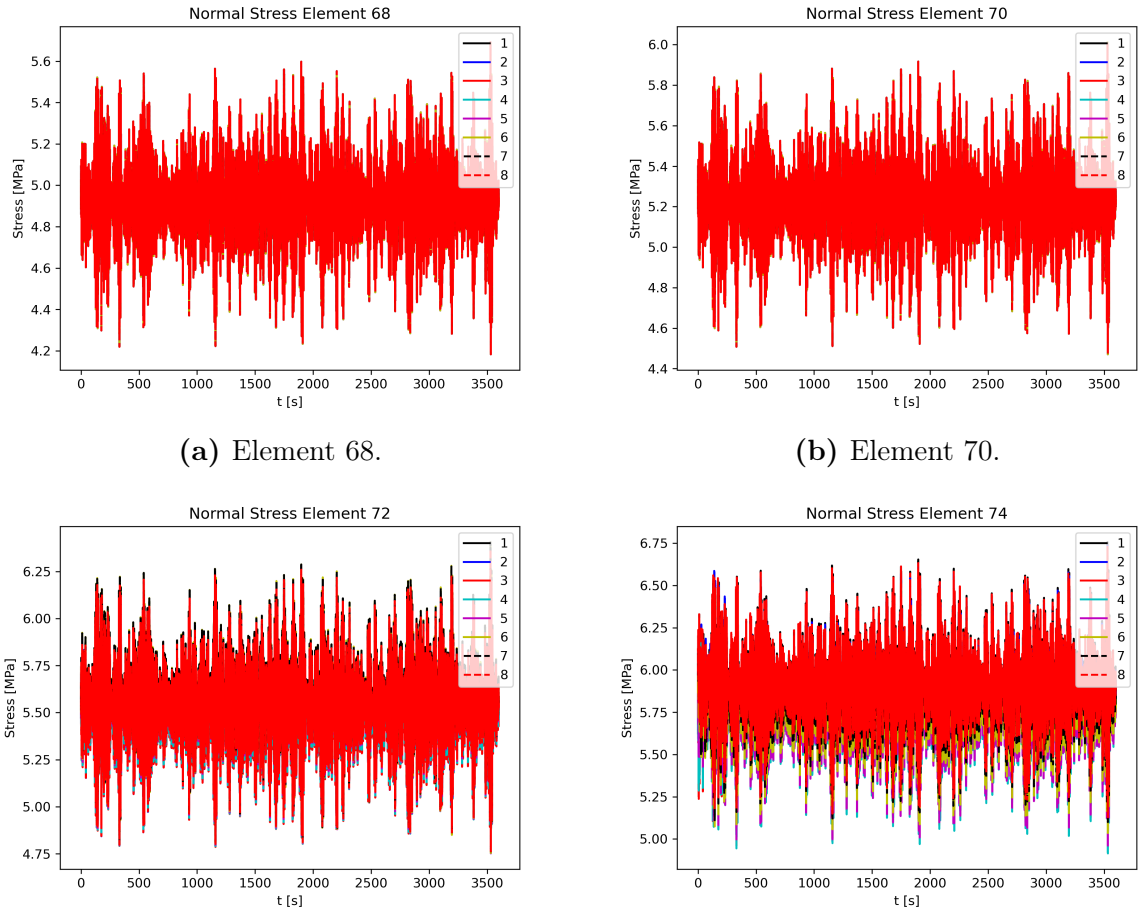
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.5: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 3. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



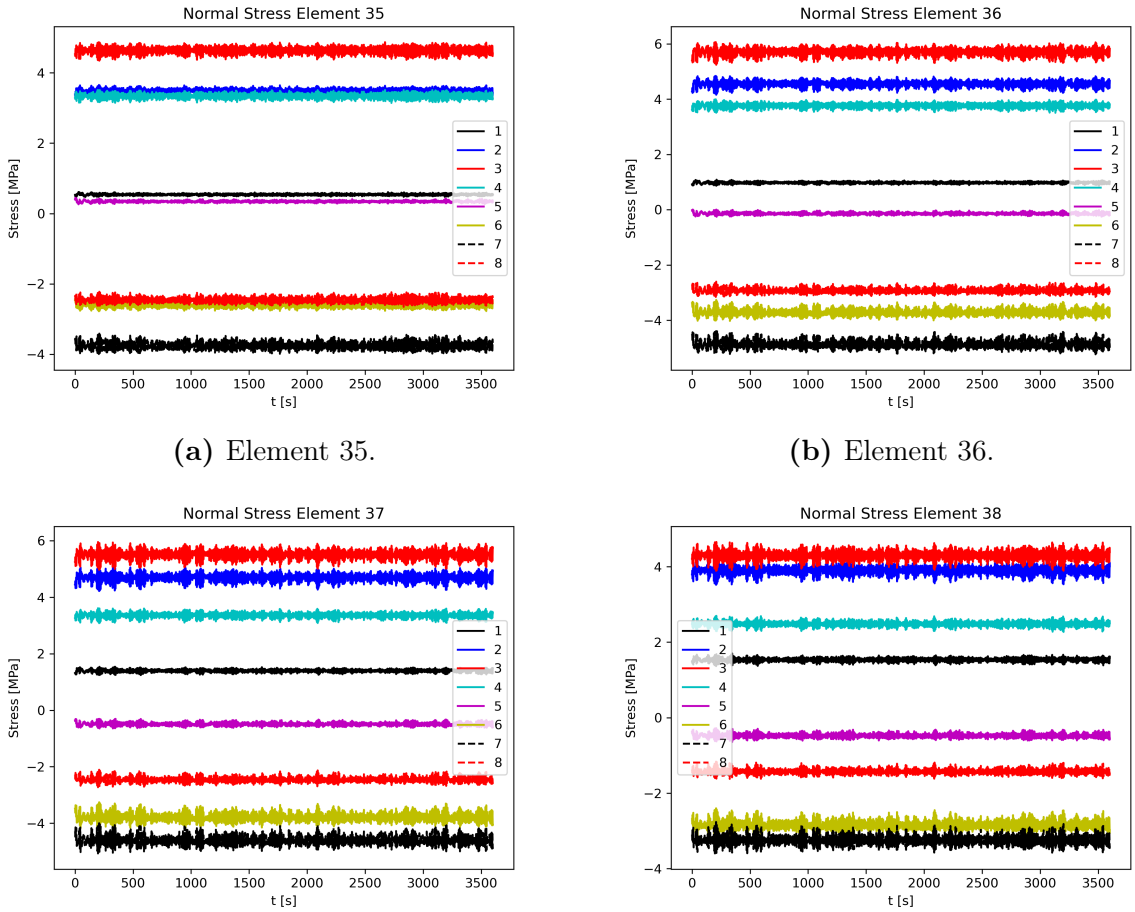
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.6: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 3. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



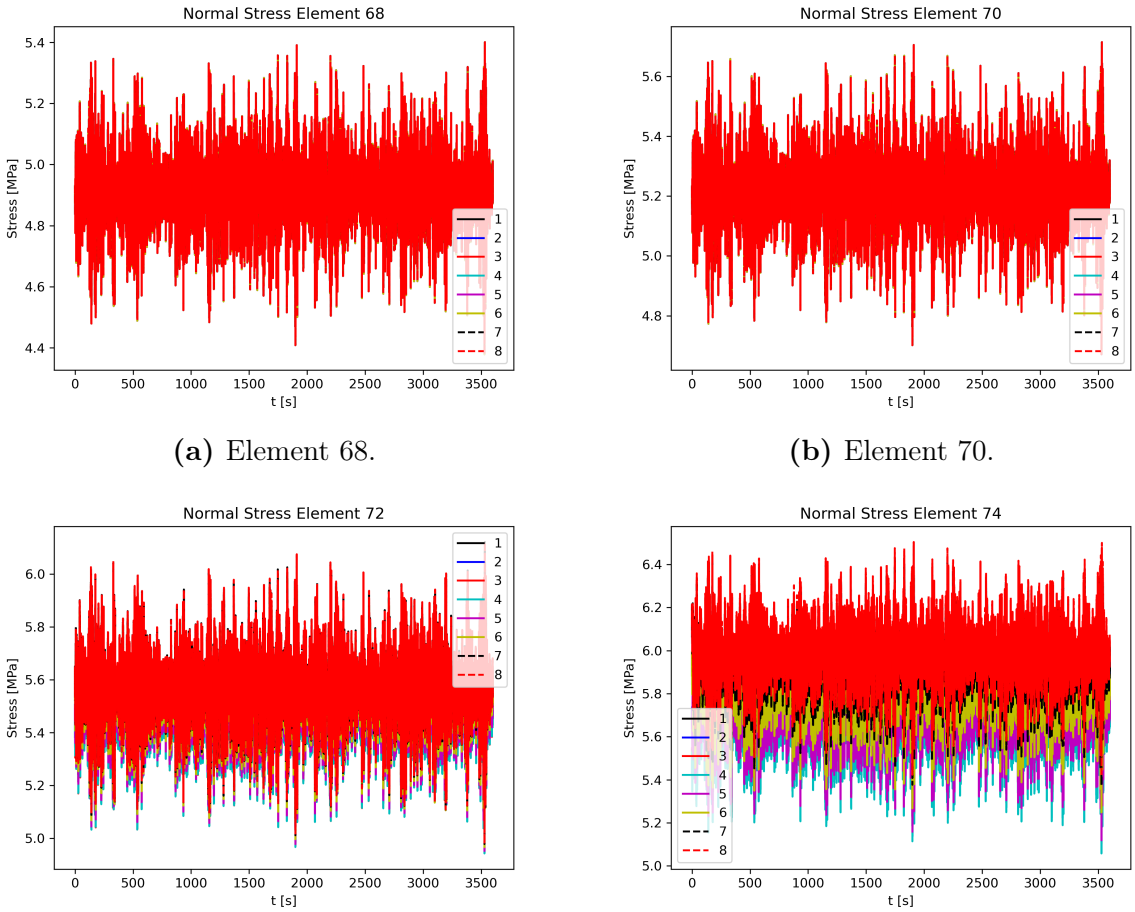
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.7: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 4. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



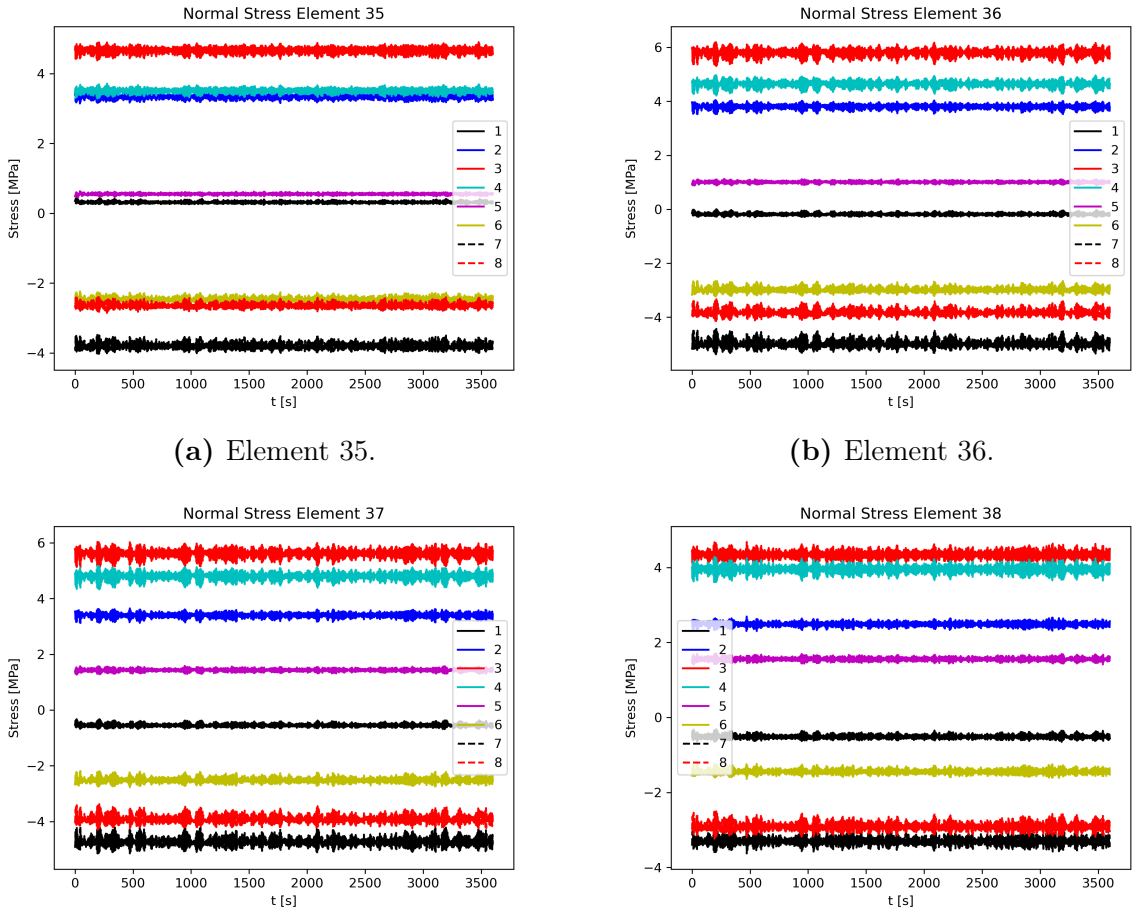
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.8: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 4. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



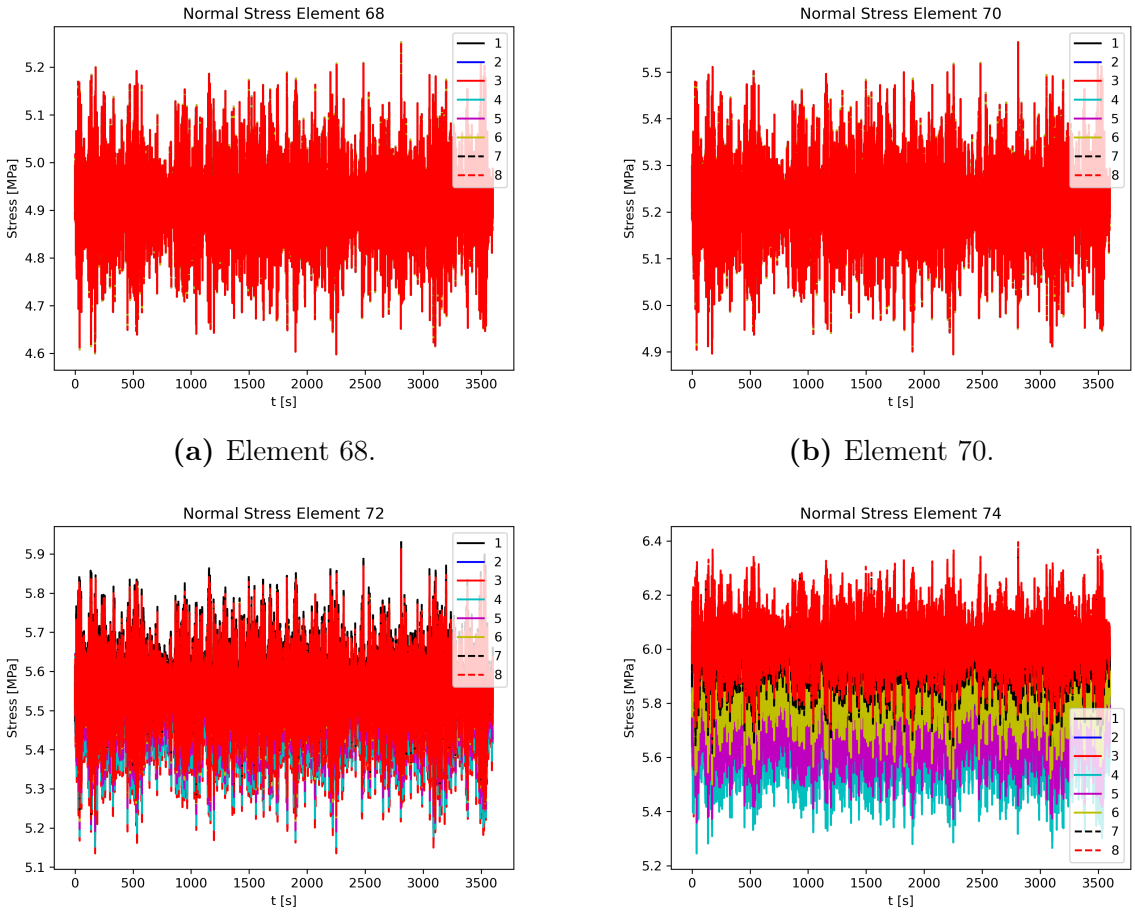
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.9: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 5. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



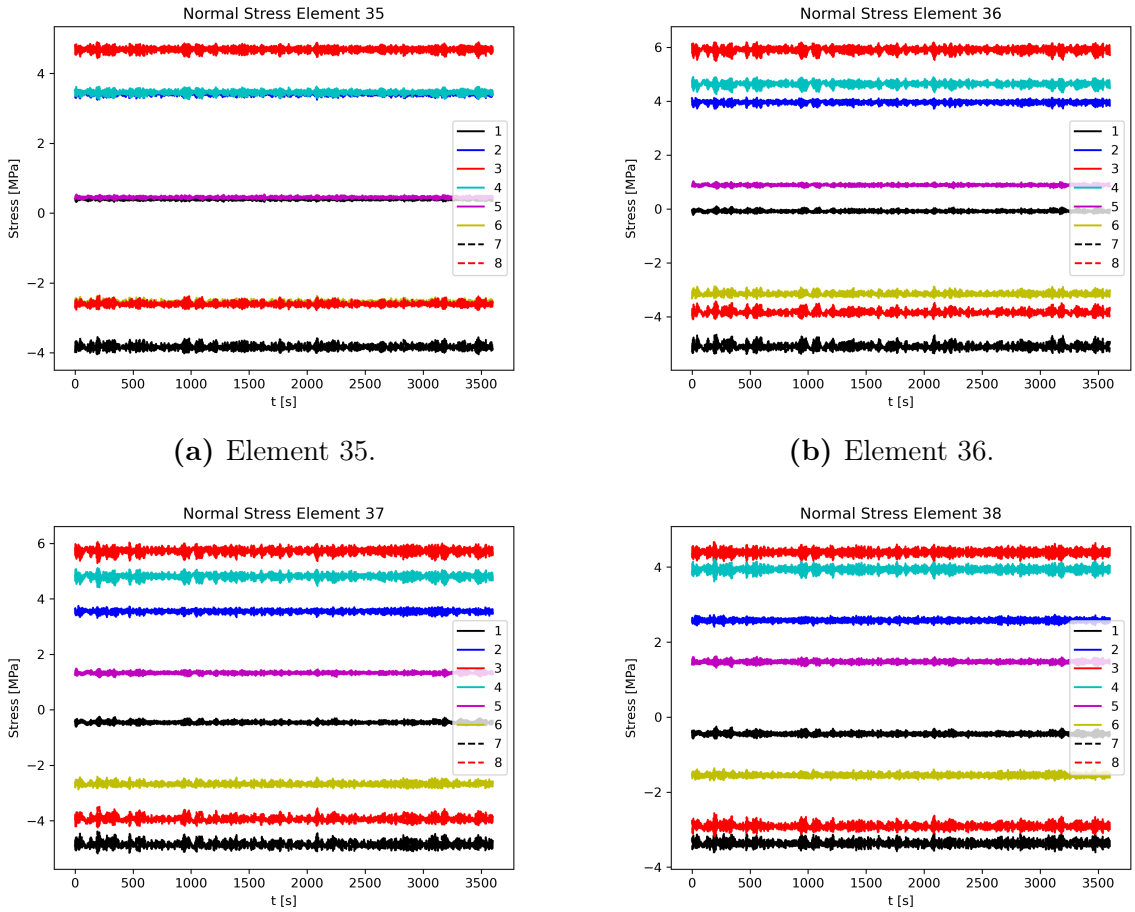
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.10: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 5. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



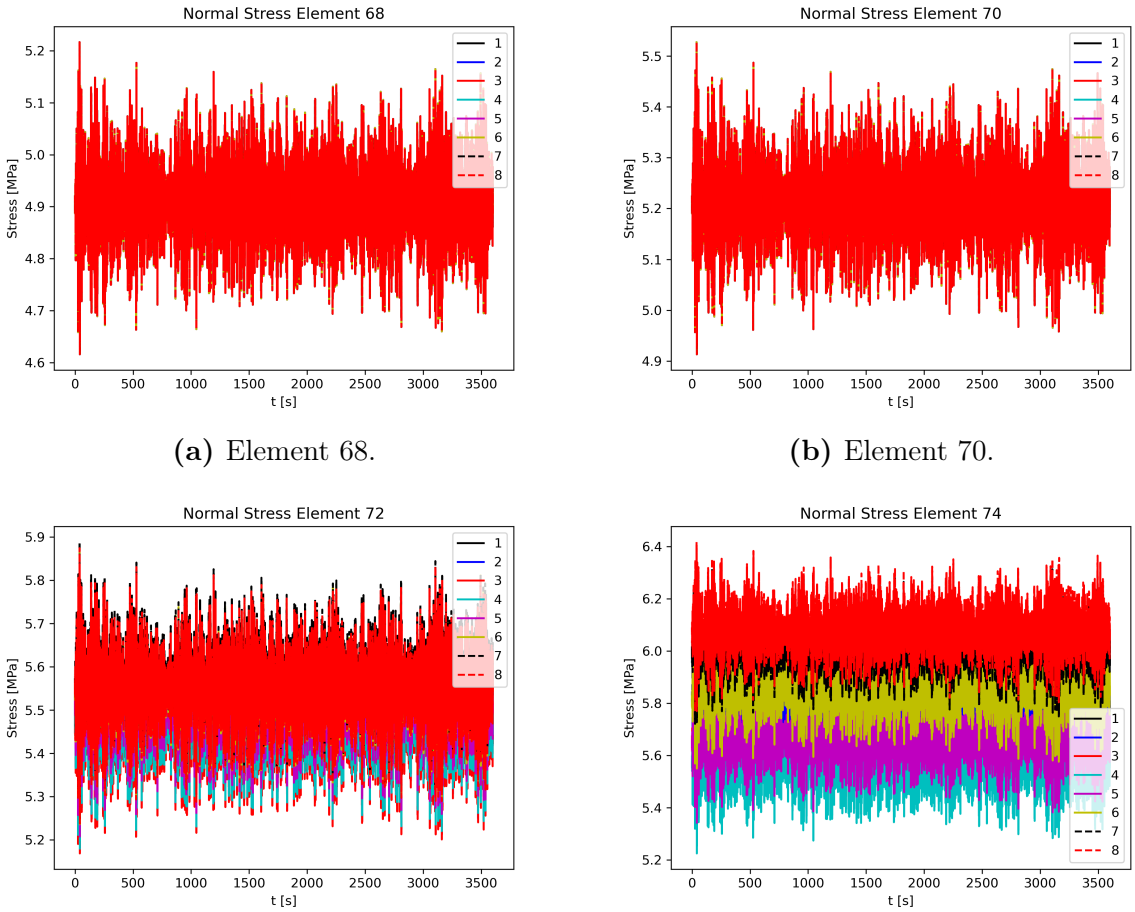
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.11: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 6. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



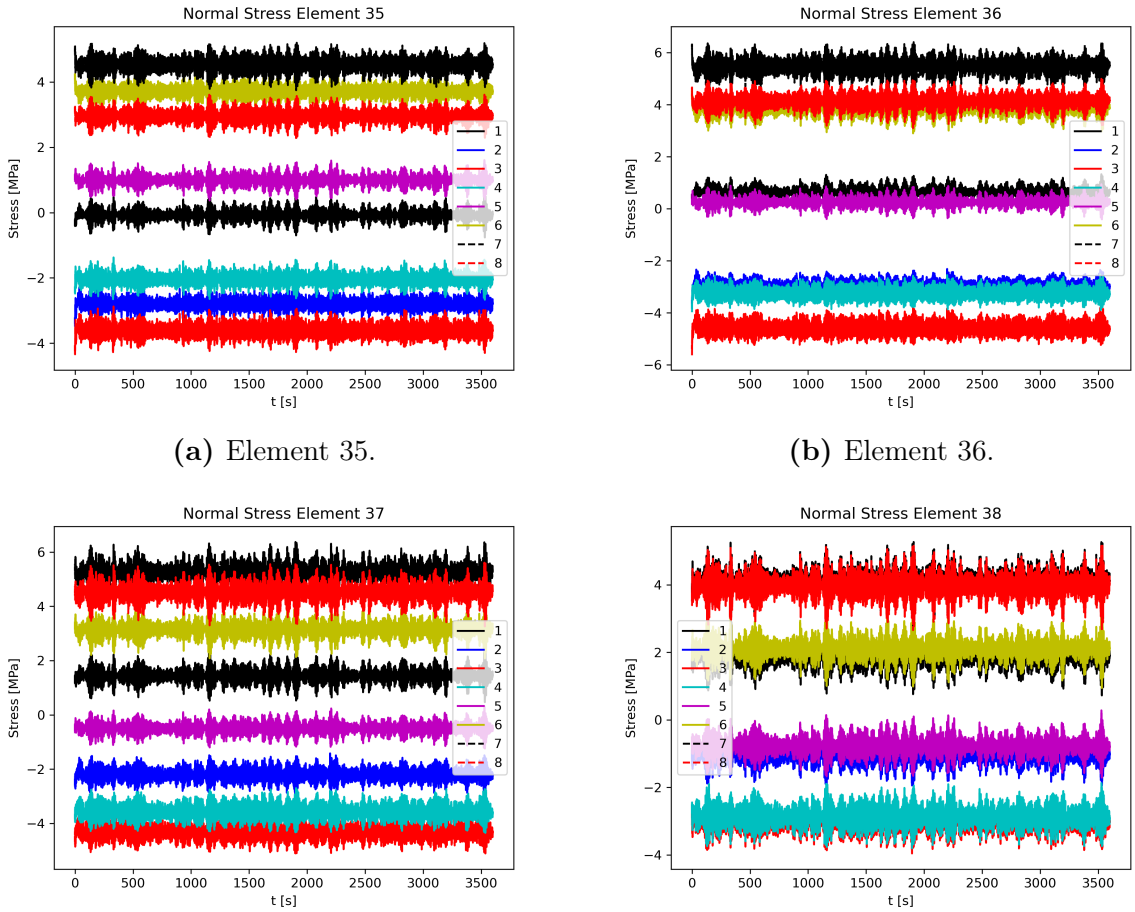
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.12: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 6. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



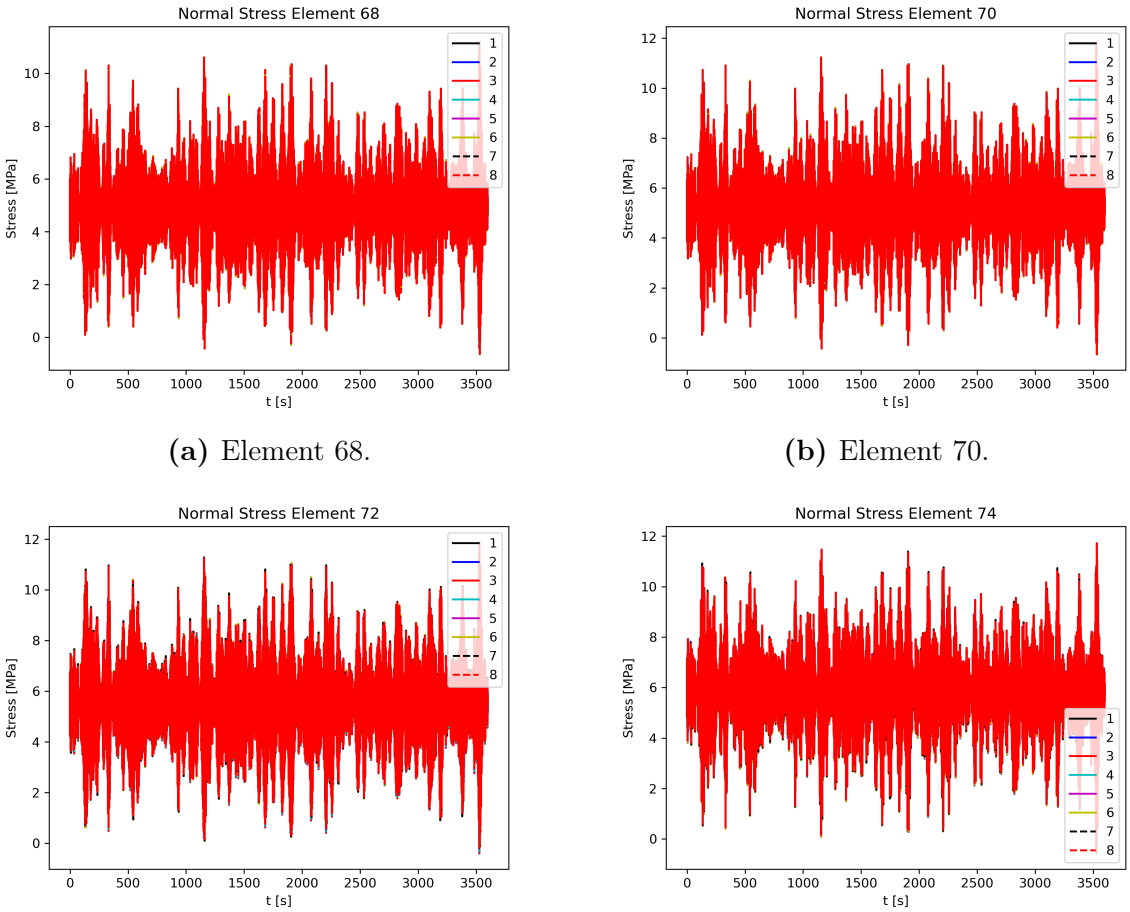
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.13: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 7. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



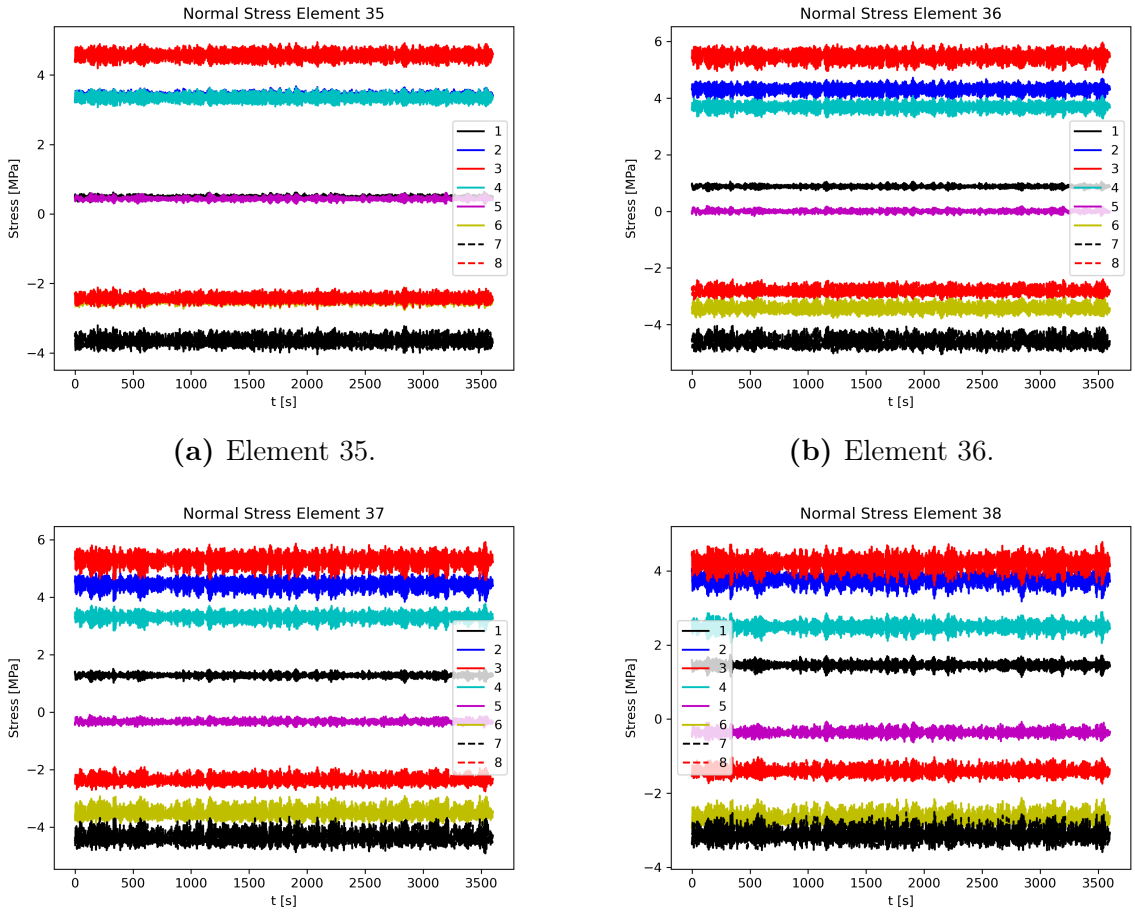
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.14: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 7. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



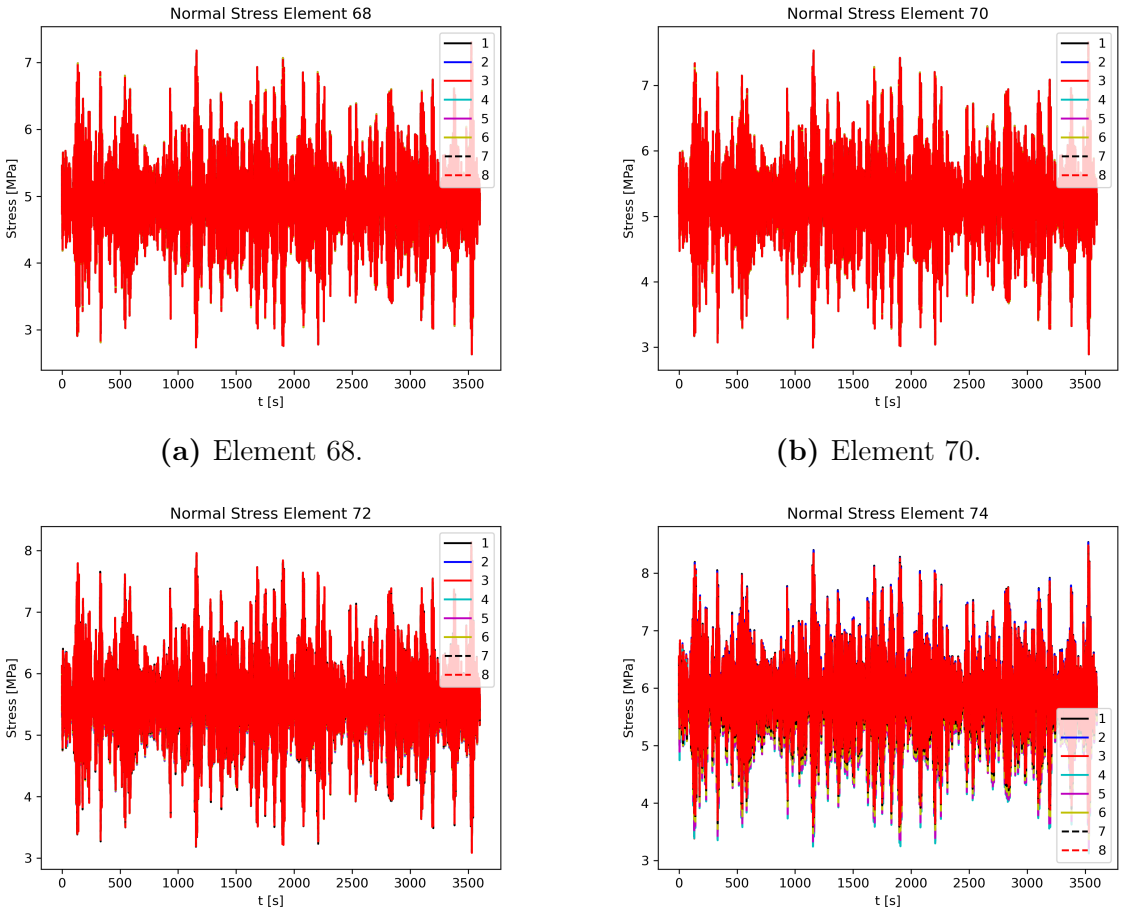
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.15: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 8. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



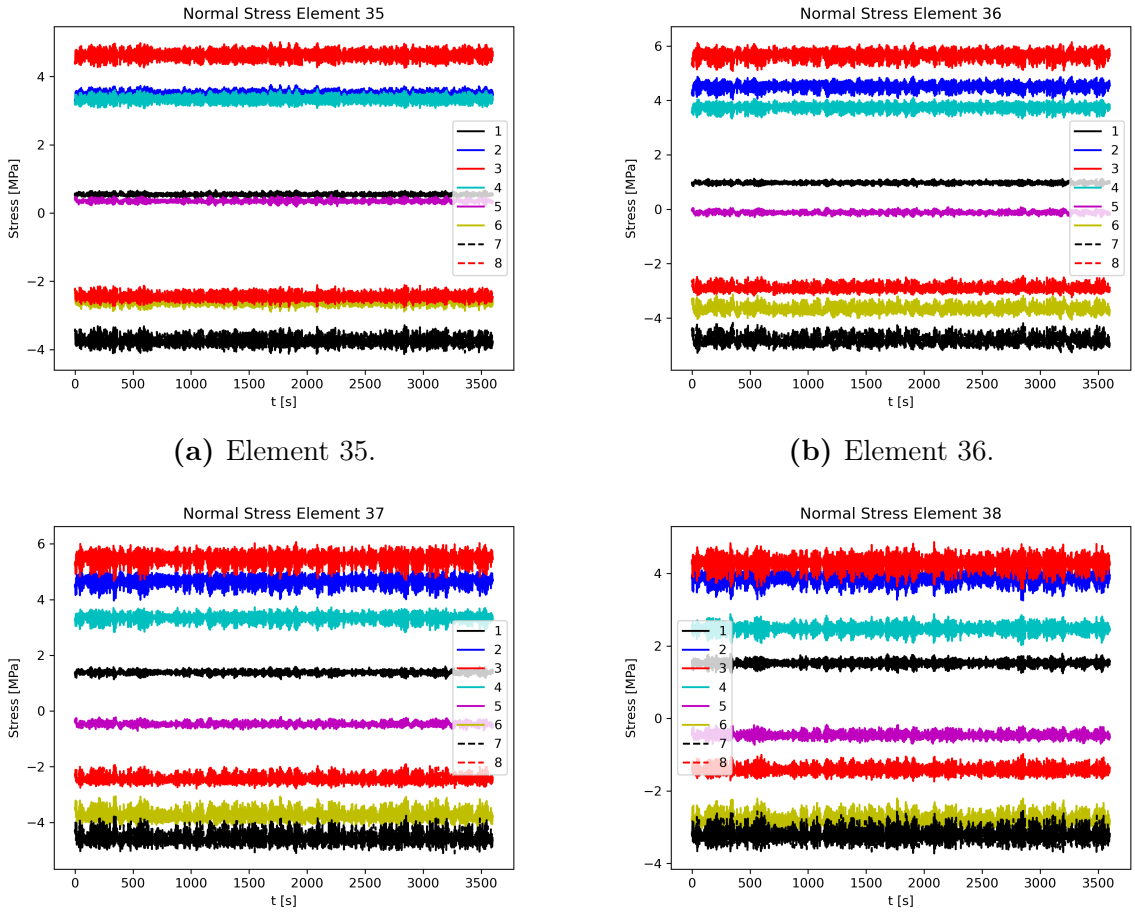
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.16: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 8. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



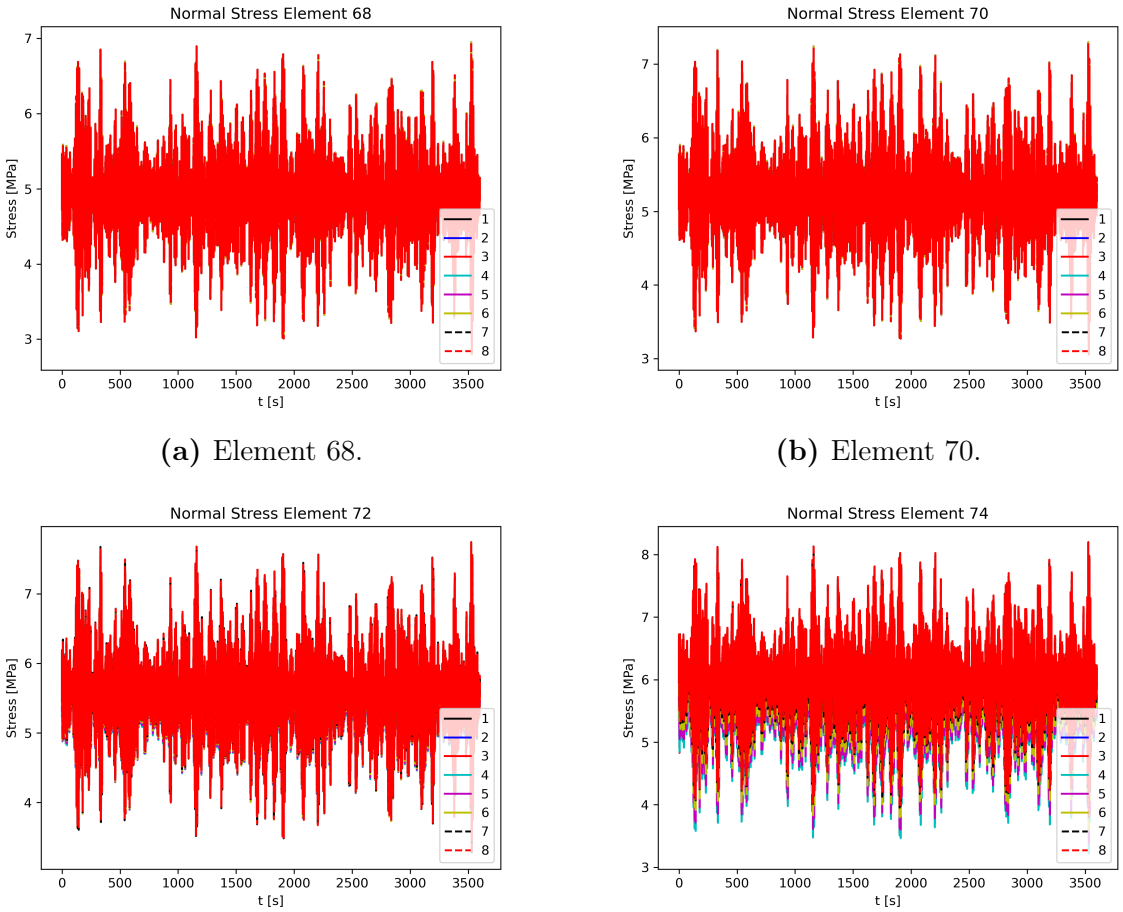
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.17: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 9. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



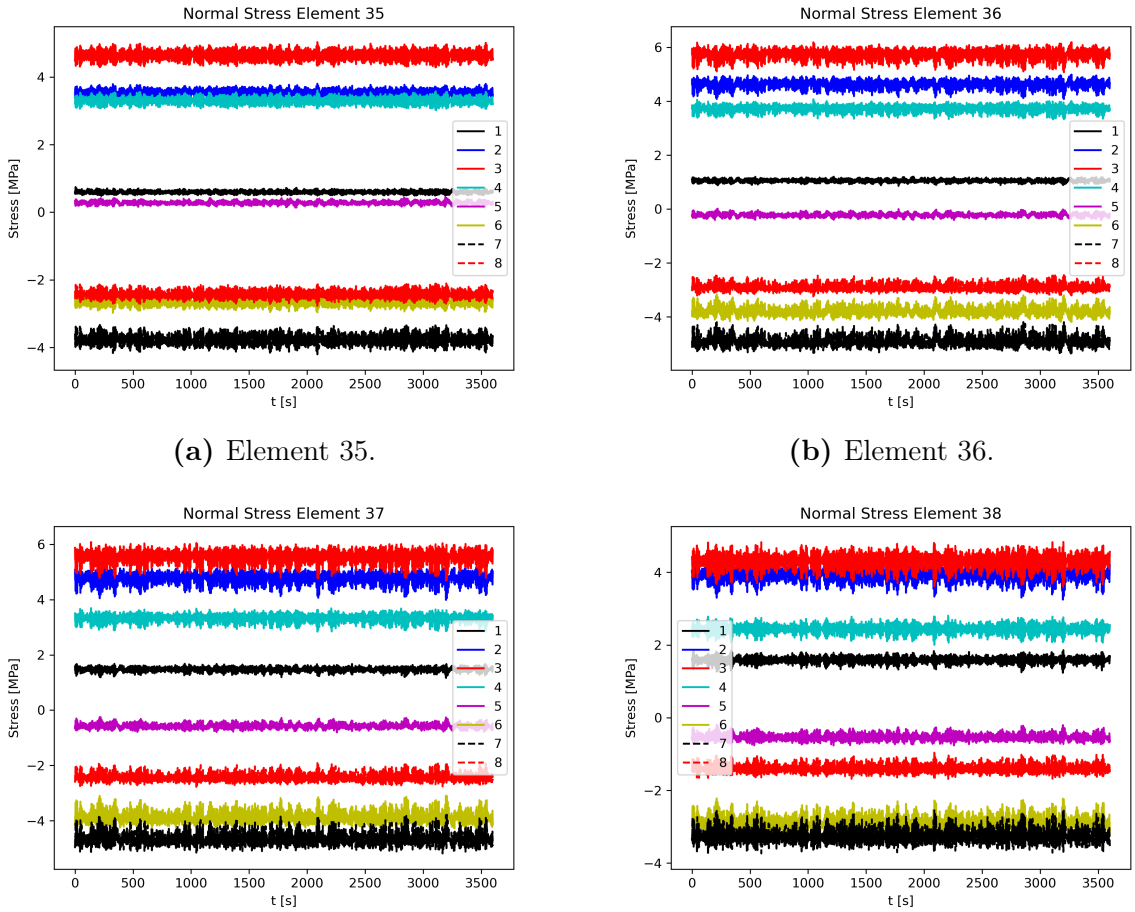
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.18: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 9. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



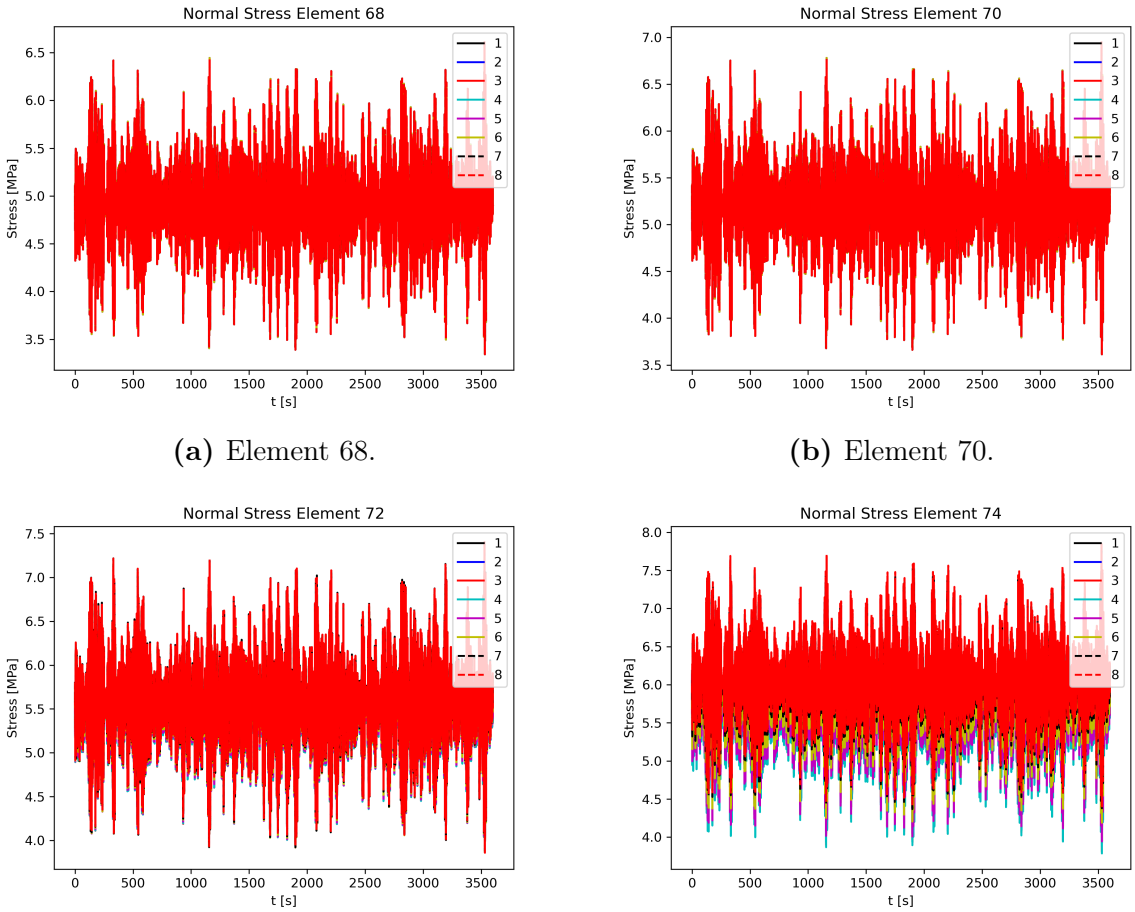
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.19: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 10. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



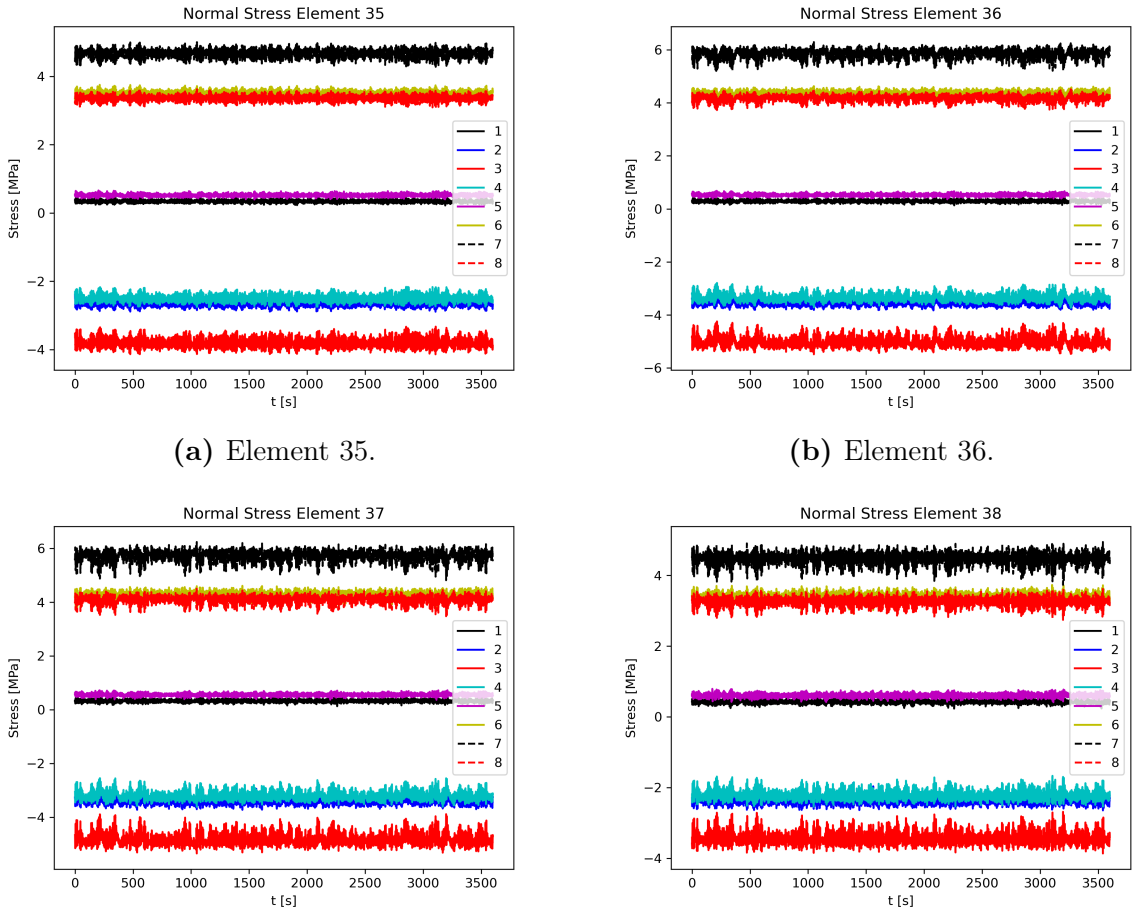
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.20: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 10. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



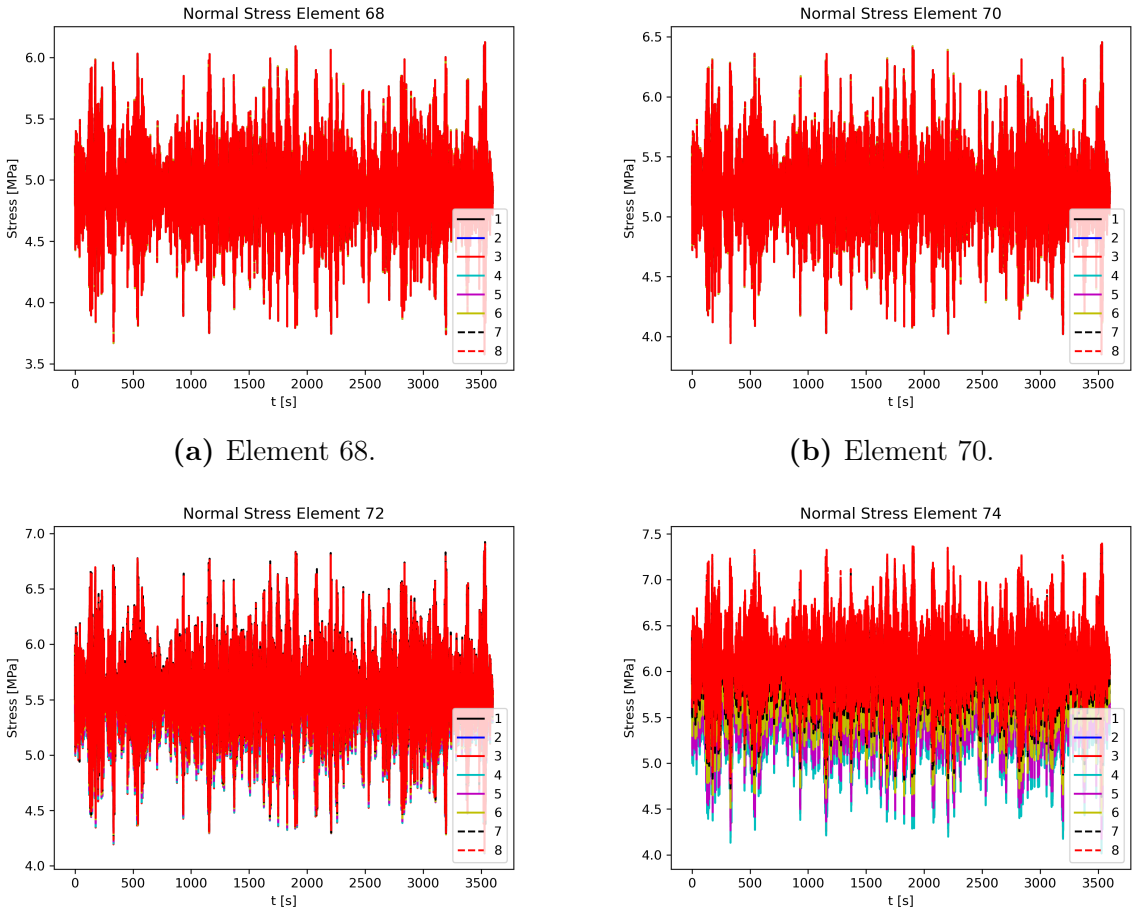
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.21: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 11. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



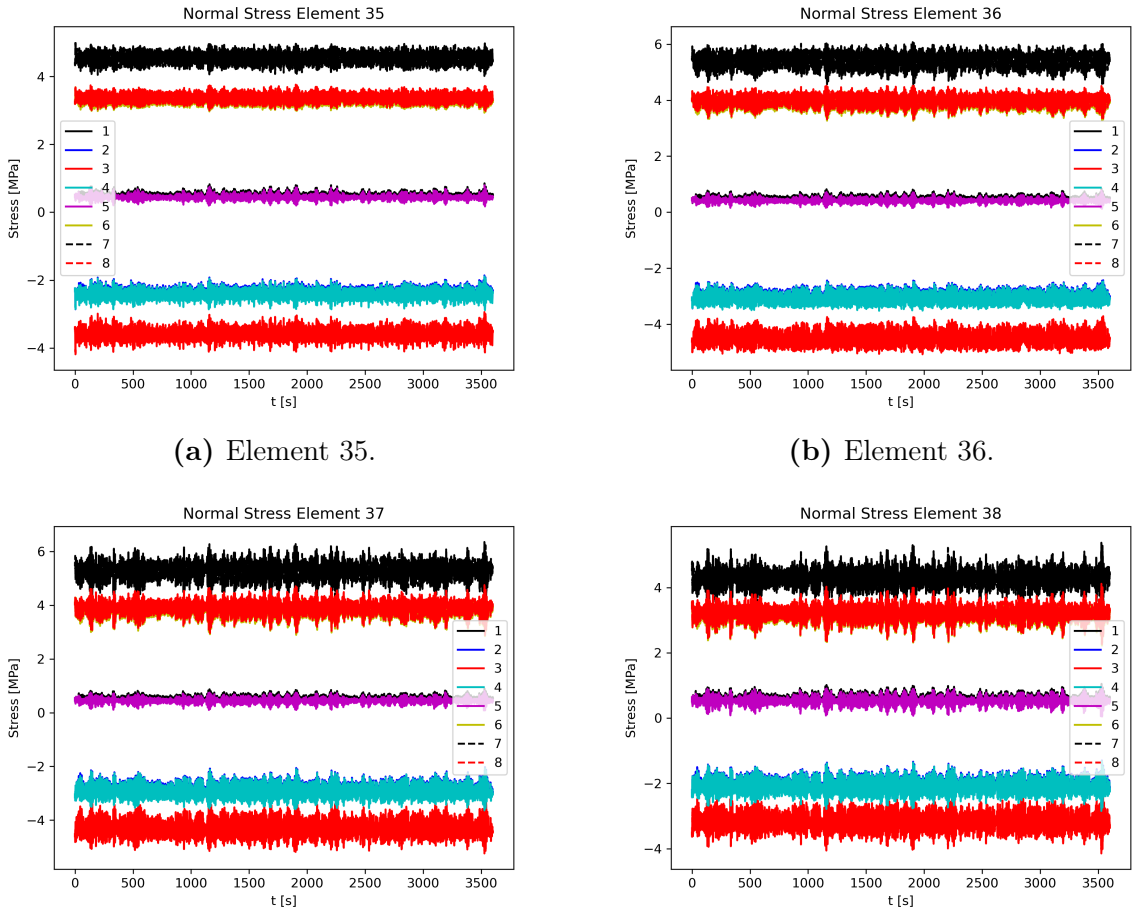
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.22: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 11. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



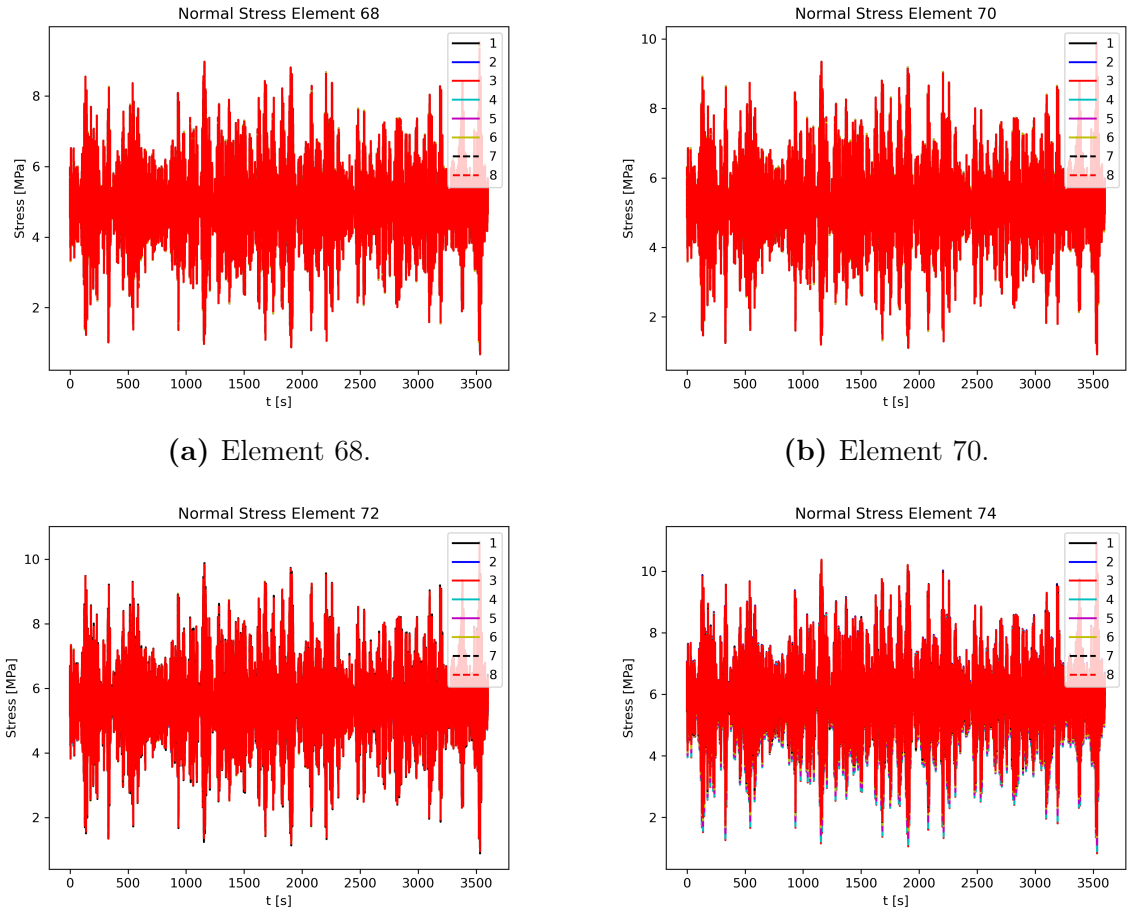
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.23: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 12. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



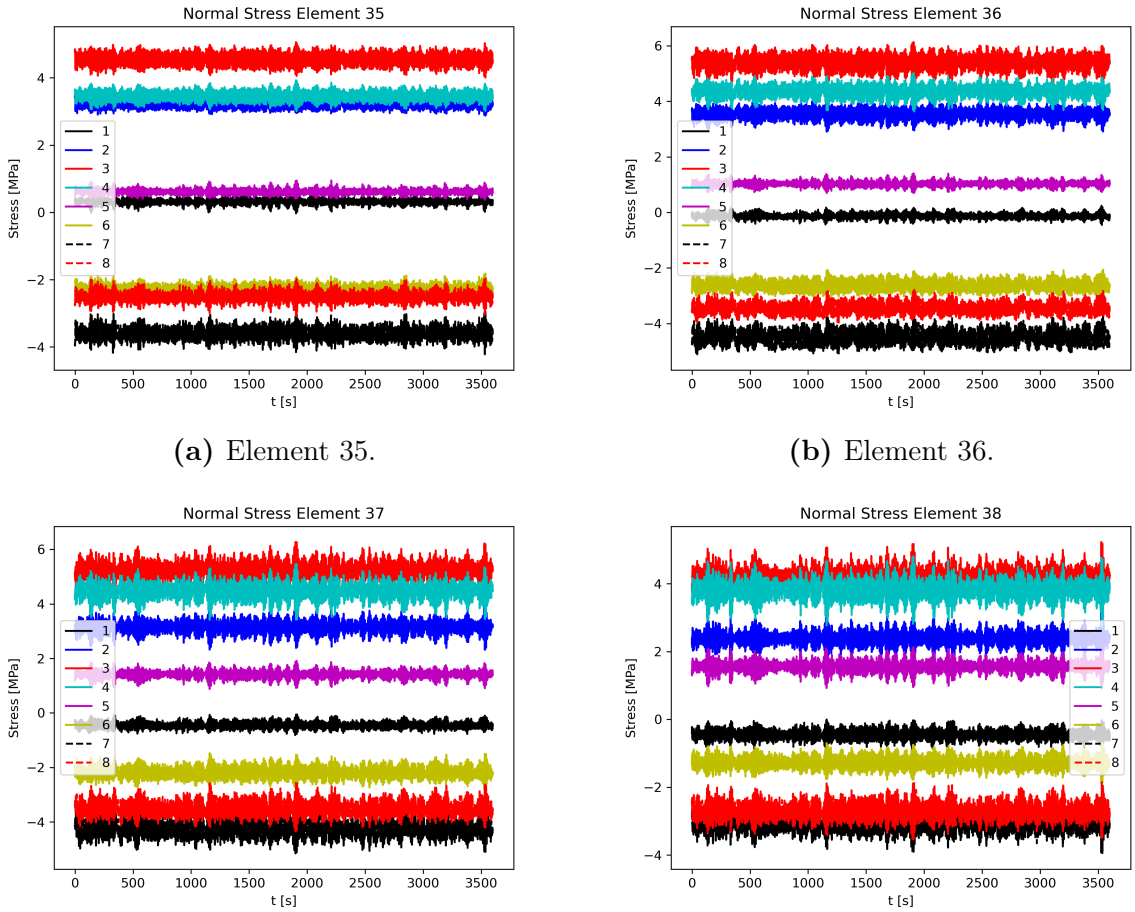
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.24: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 12. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



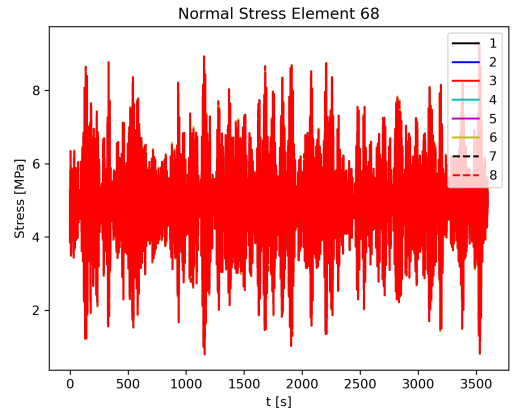
(a) Element 35.

(b) Element 36.

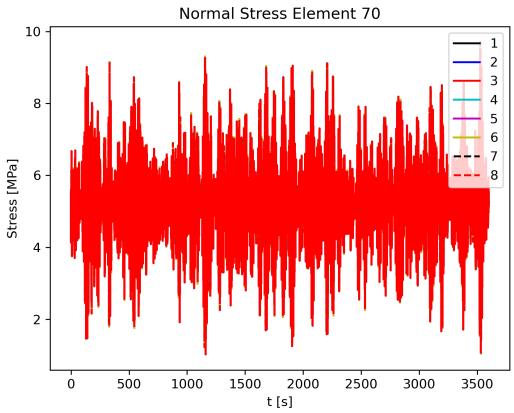
(c) Element 37.

(d) Element 38.

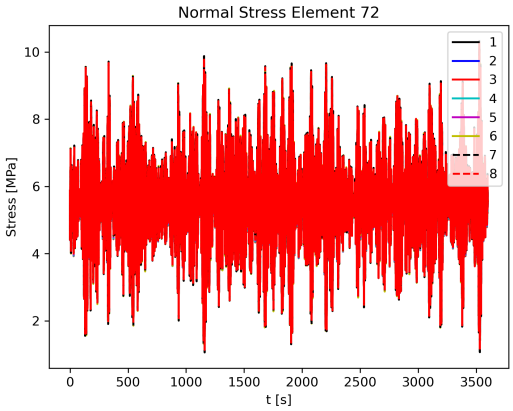
Figur B.25: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 13. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



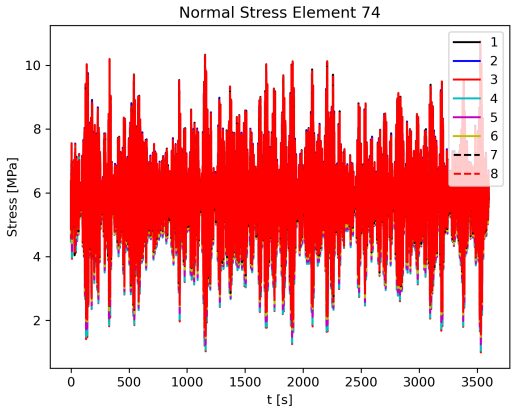
(a) Element 68.



(b) Element 70.

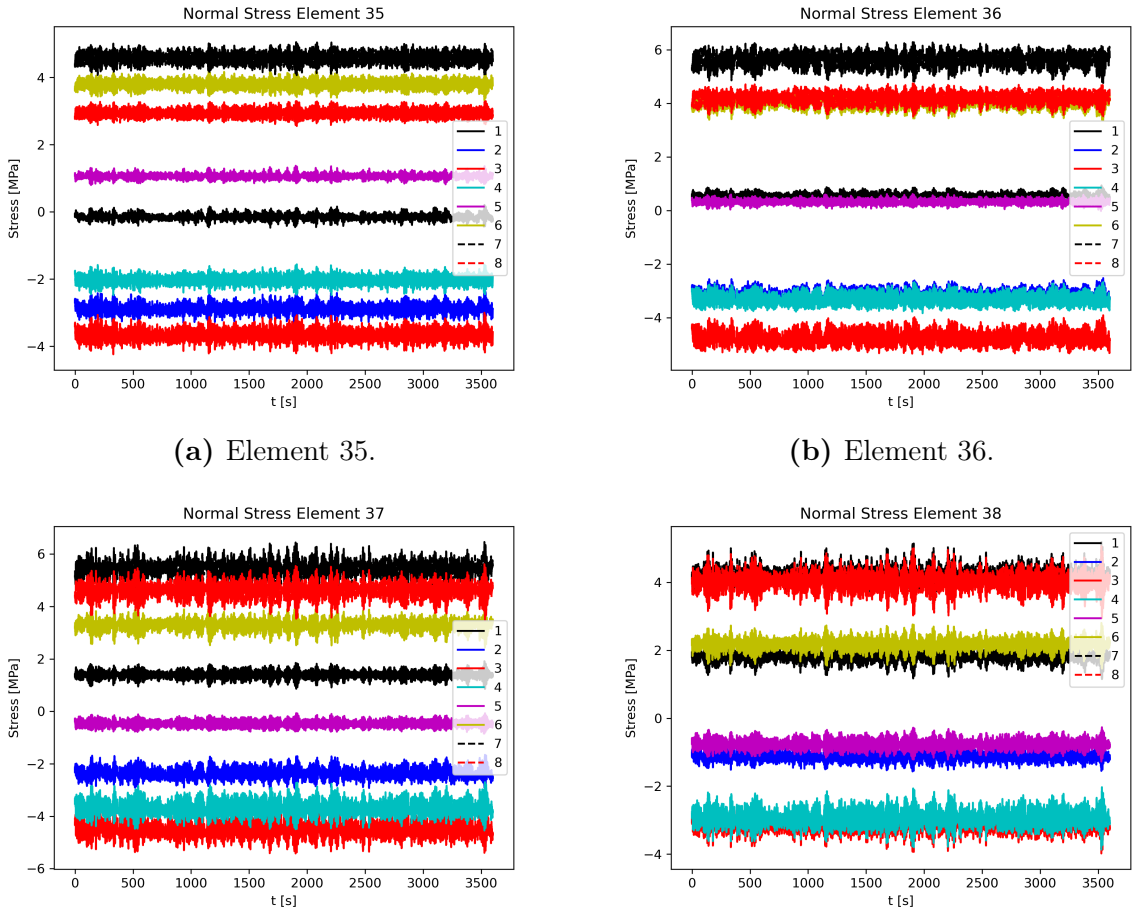


(c) Element 72.



(d) Element 74.

Figur B.26: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 13. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



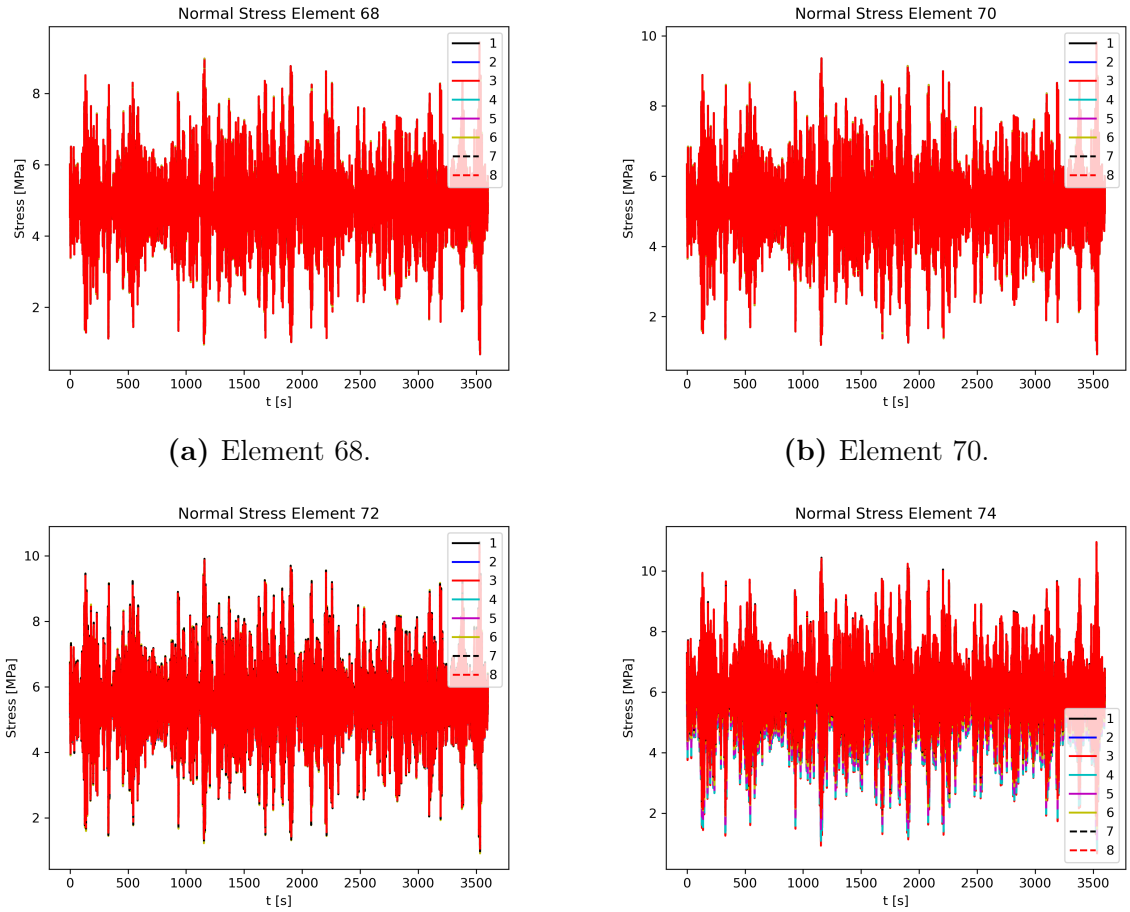
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.27: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 14. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



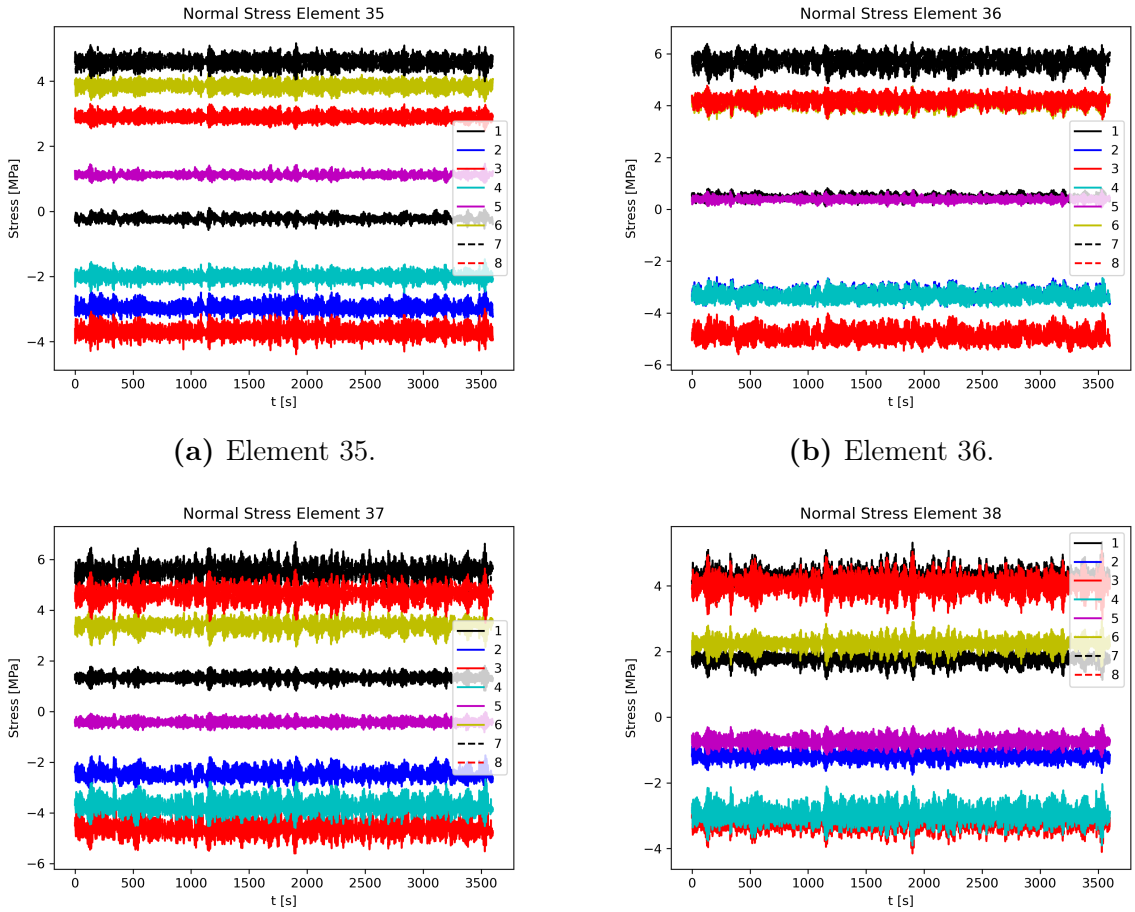
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.28: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 14. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



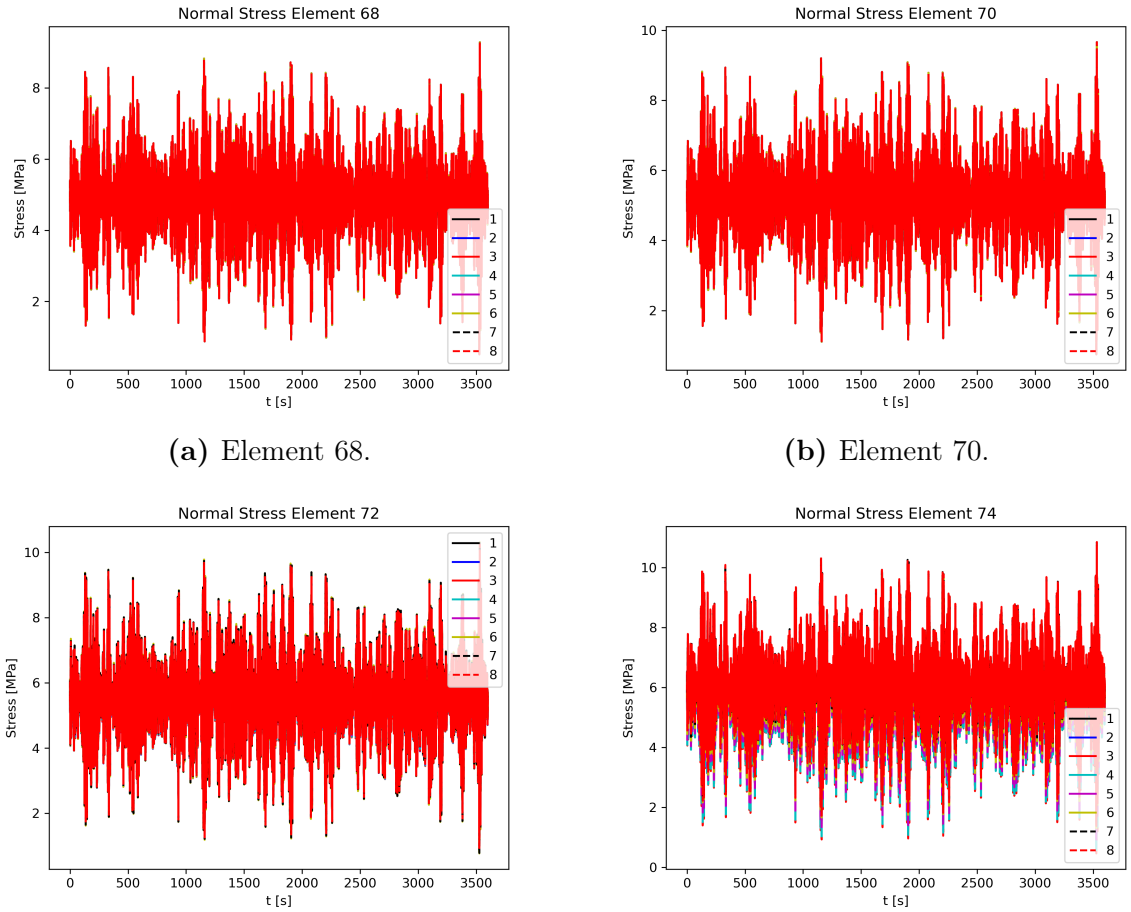
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.29: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 15. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



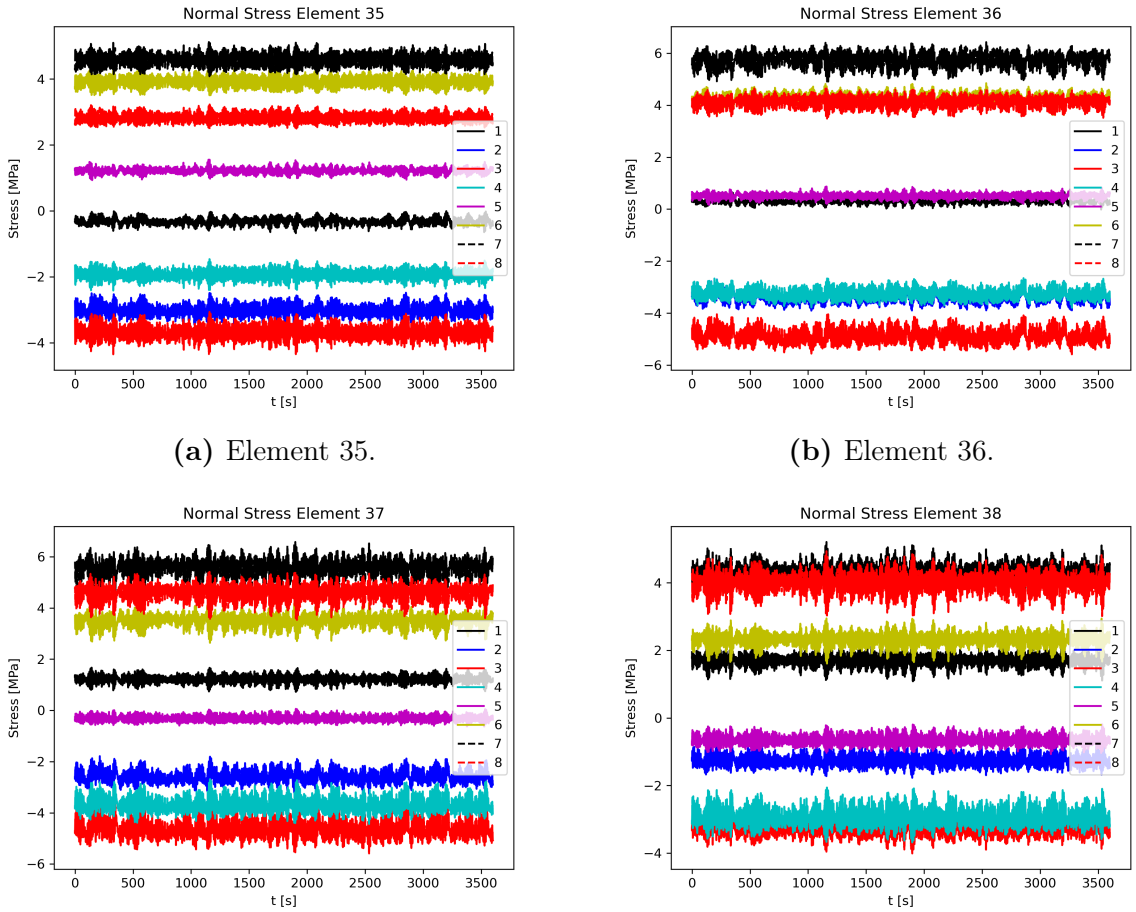
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.30: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 15. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



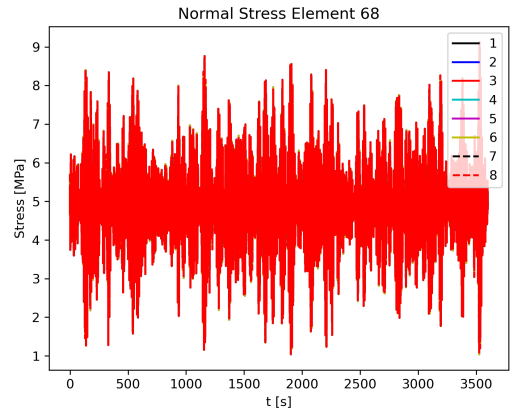
(a) Element 35.

(b) Element 36.

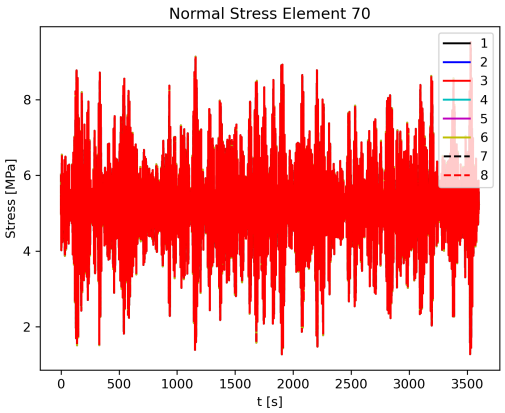
(c) Element 37.

(d) Element 38.

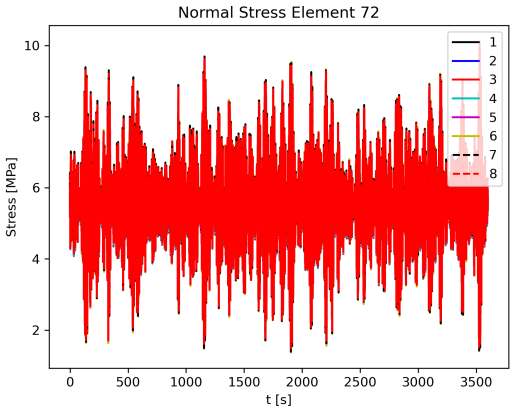
Figur B.31: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 16. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



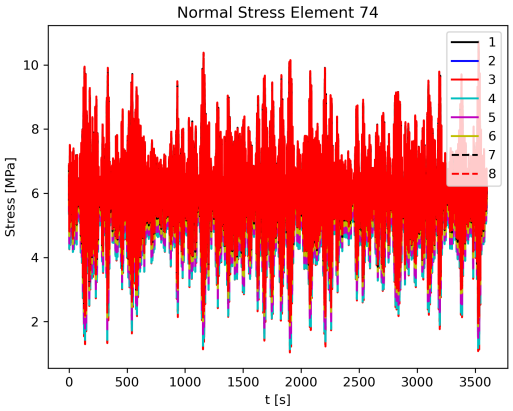
(a) Element 68.



(b) Element 70.

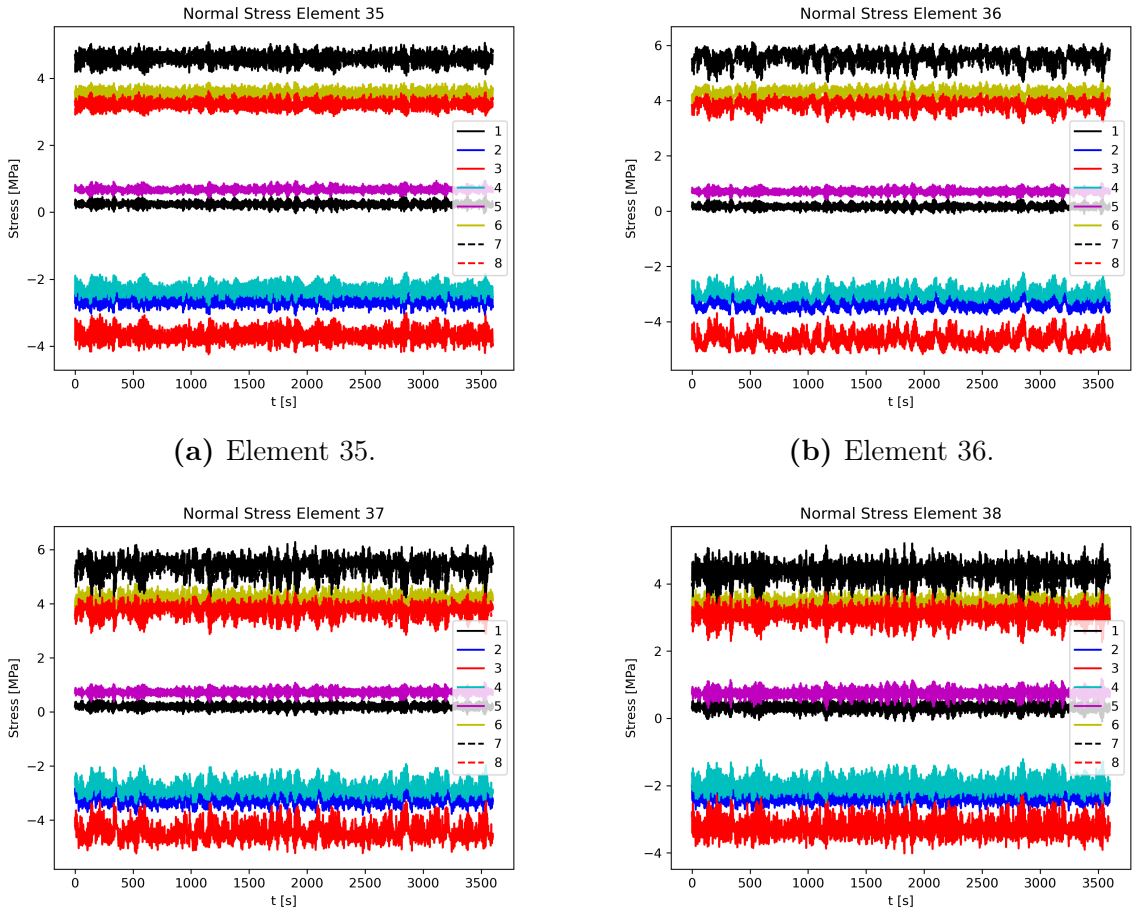


(c) Element 72.



(d) Element 74.

Figur B.32: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 16. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



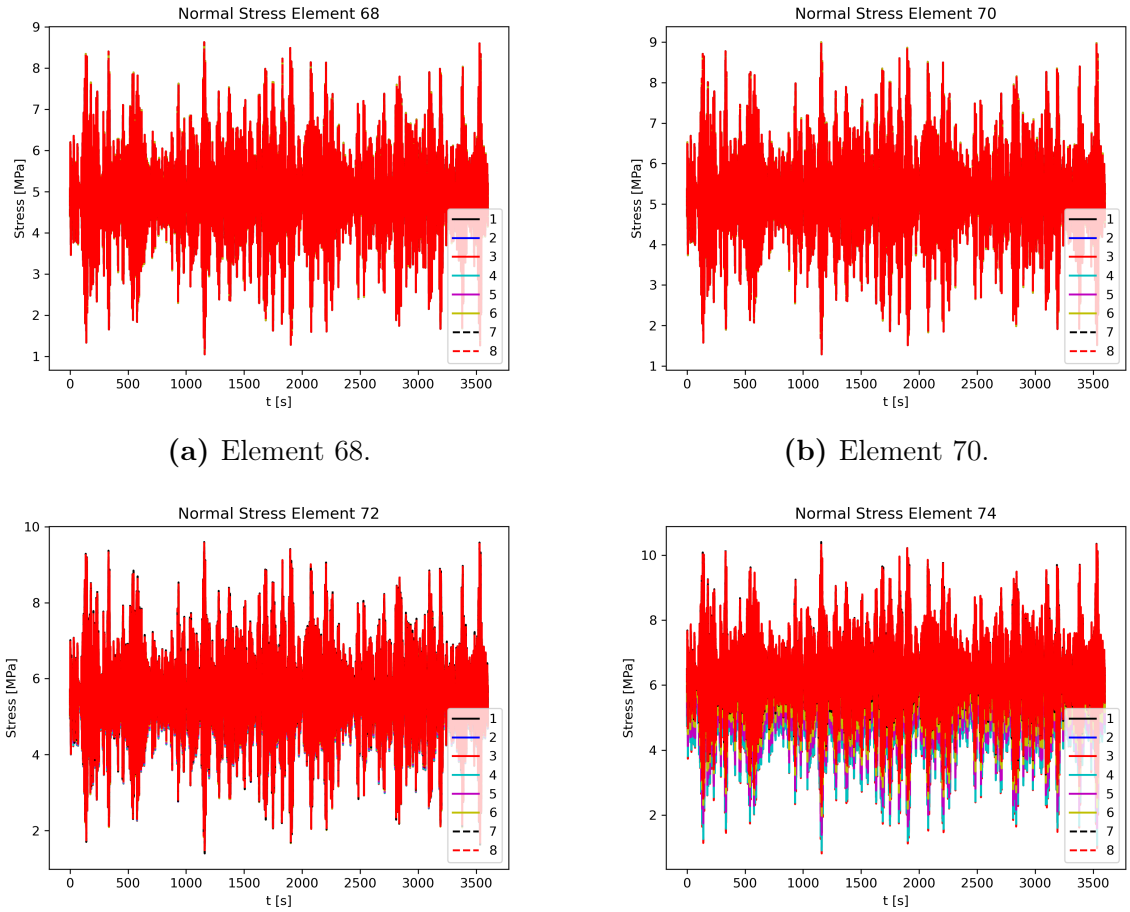
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.33: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 17. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



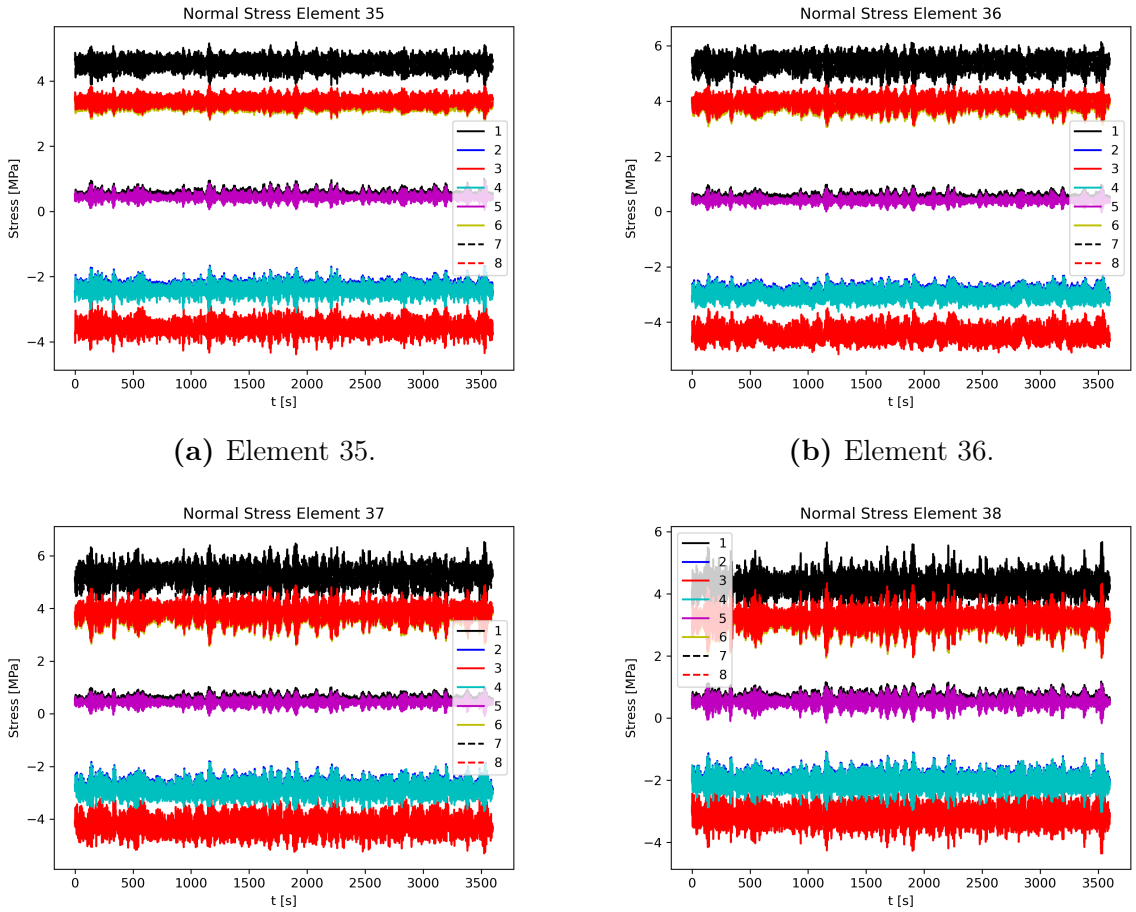
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.34: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 17. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



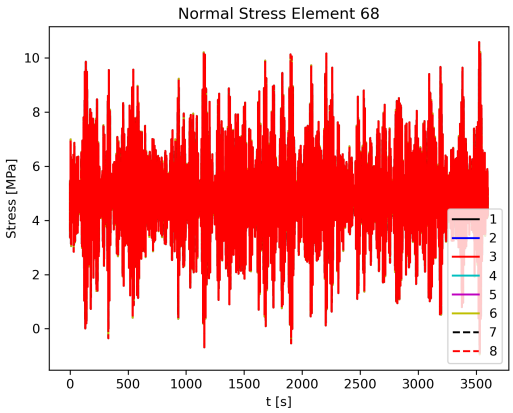
(a) Element 35.

(b) Element 36.

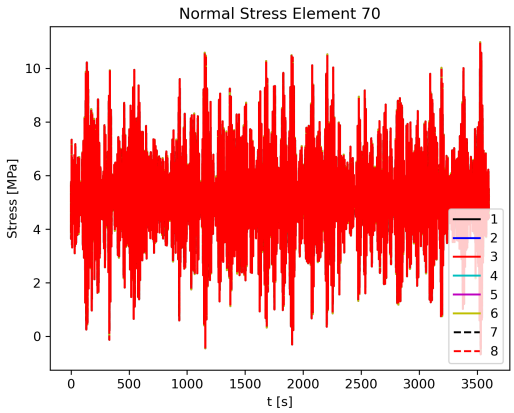
(c) Element 37.

(d) Element 38.

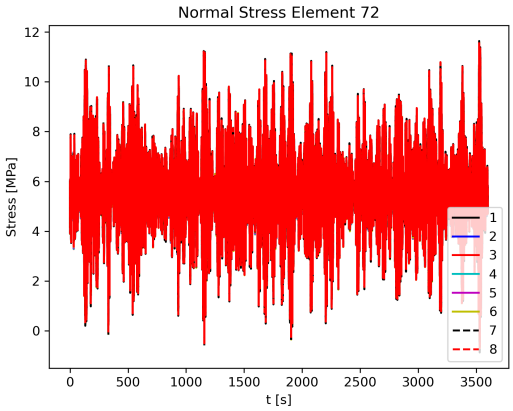
Figur B.35: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 18. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



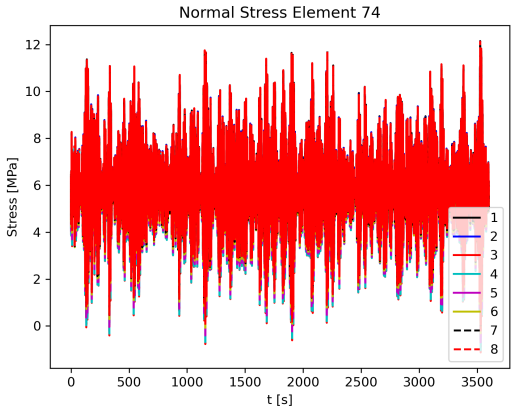
(a) Element 68.



(b) Element 70.

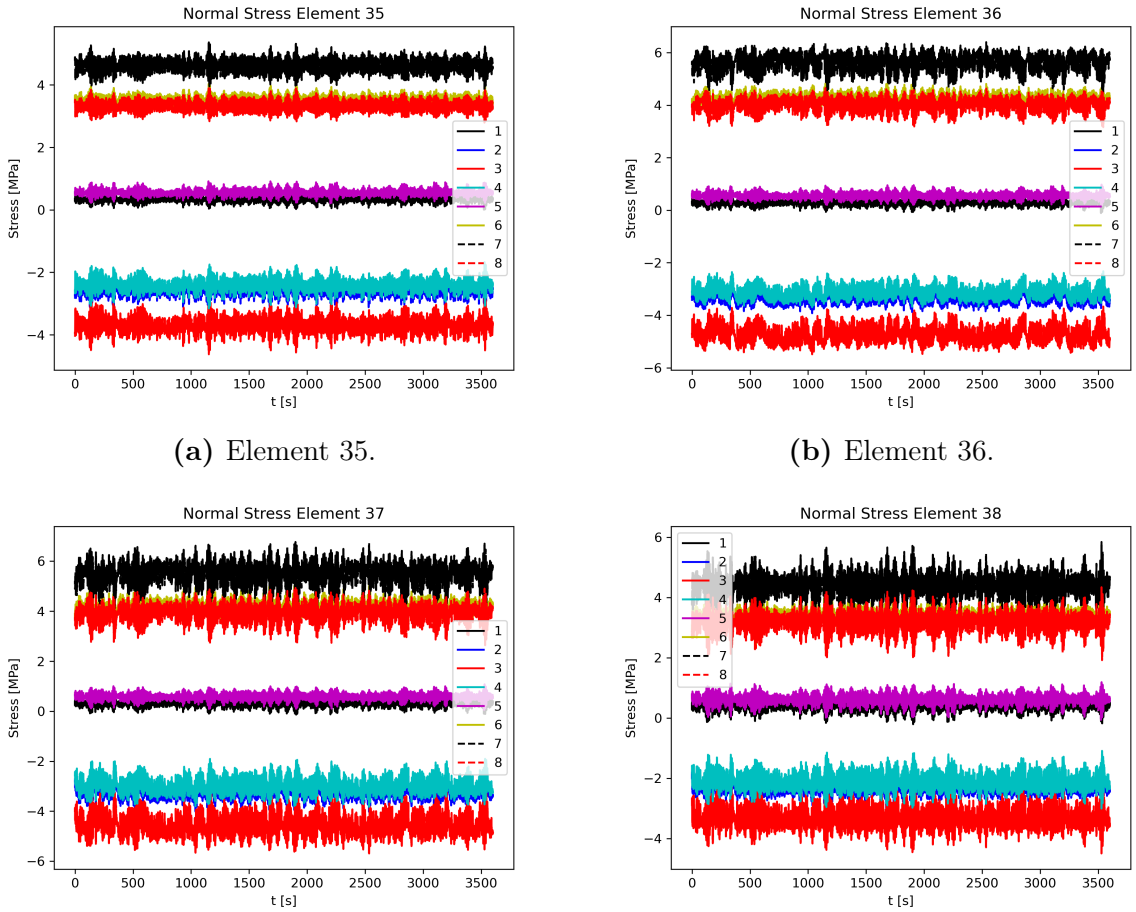


(c) Element 72.



(d) Element 74.

Figur B.36: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 18. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



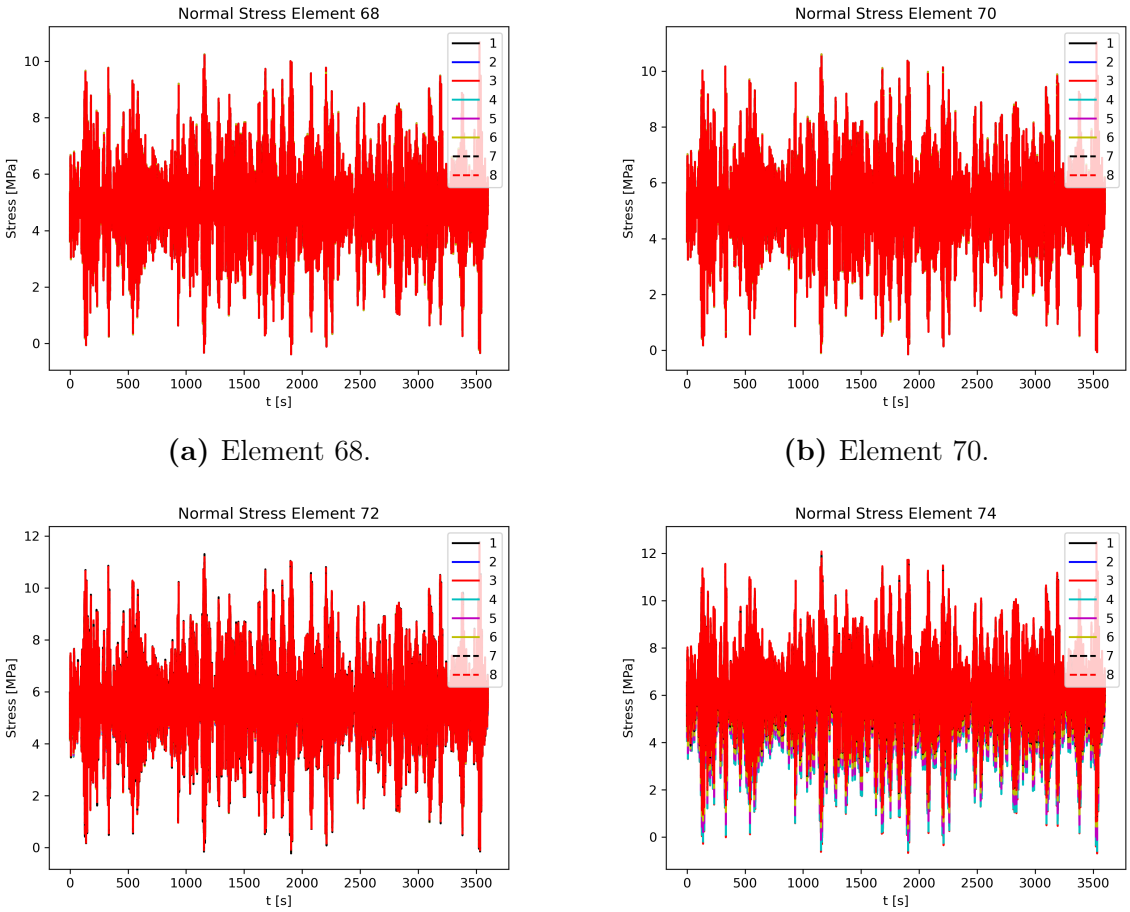
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.37: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 19. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



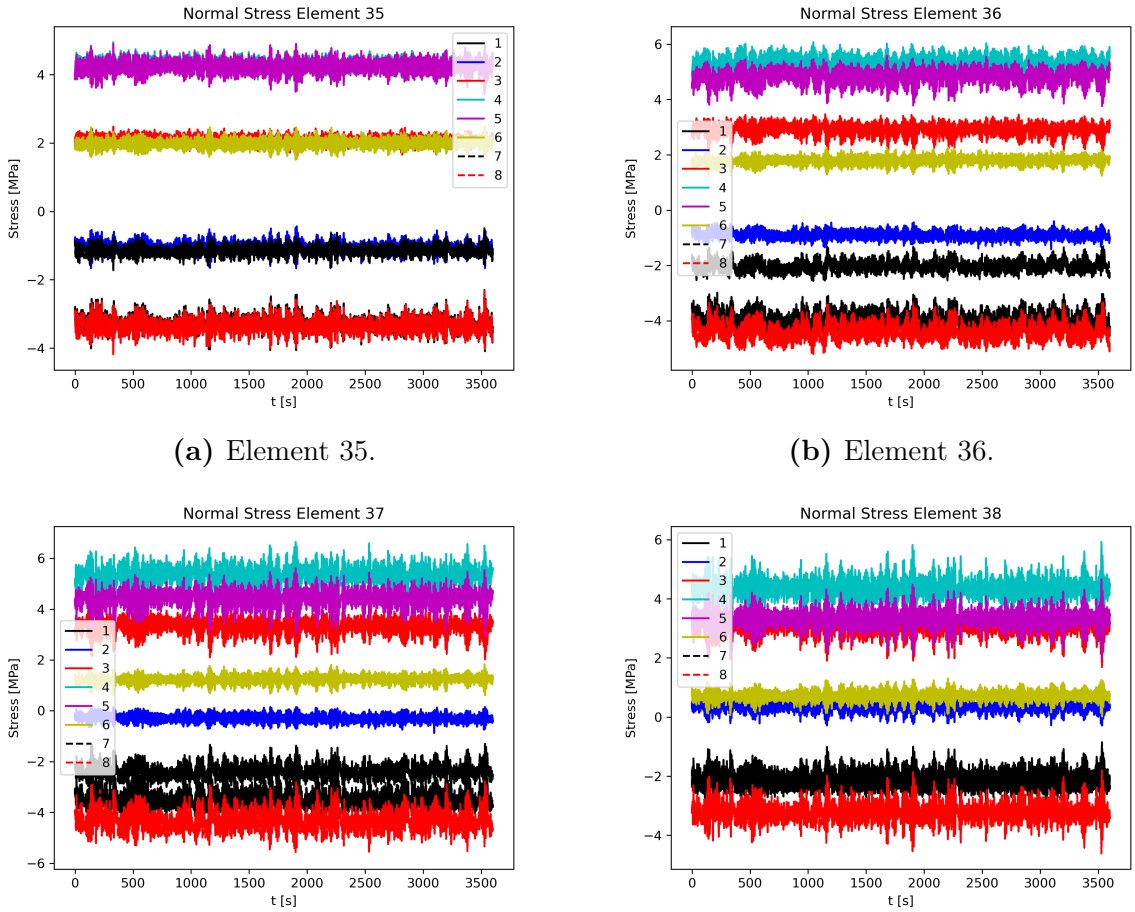
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.38: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 19. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



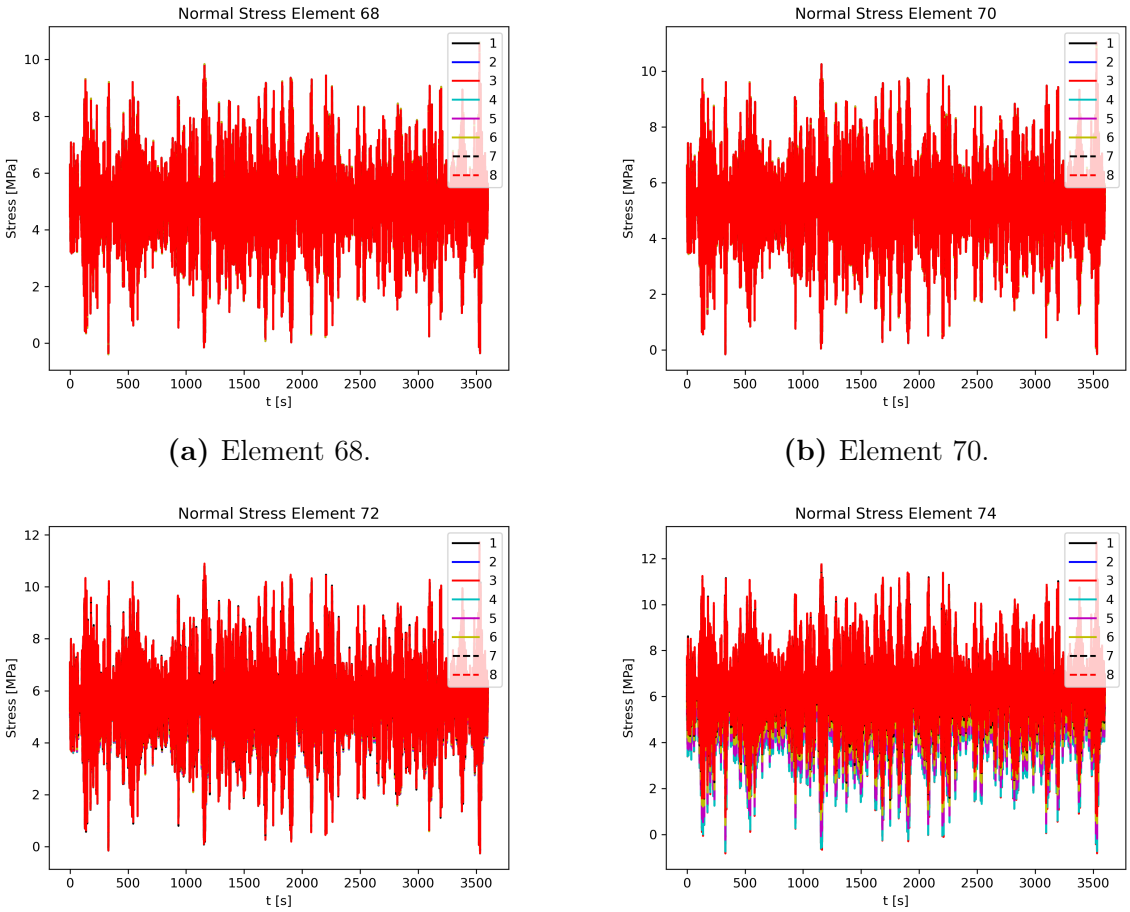
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.39: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 20. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



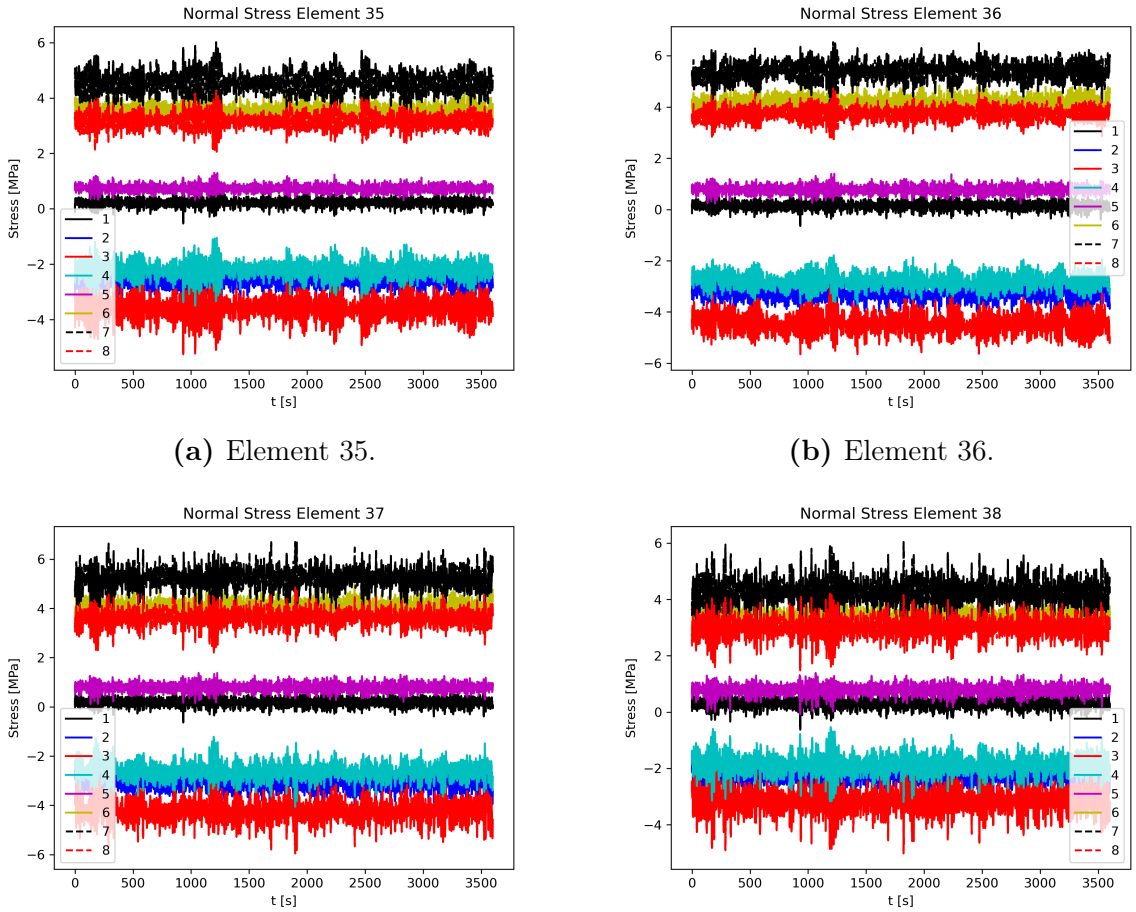
(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.40: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 20. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



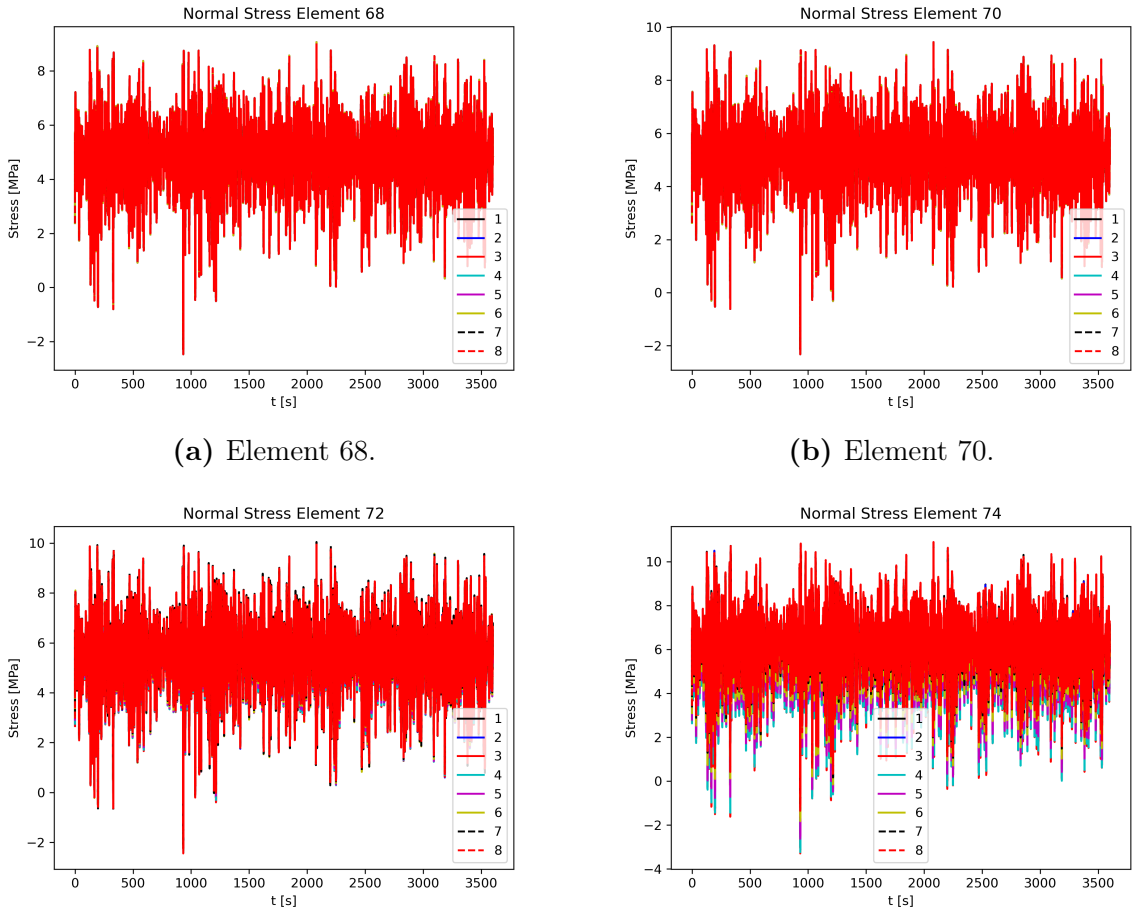
(a) Element 35.

(b) Element 36.

(c) Element 37.

(d) Element 38.

Figur B.41: Viser aksiale spenninger for bøyd seksjon av strømkabel i sjøtilstand 21. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.



(a) Element 68.

(b) Element 70.

(c) Element 72.

(d) Element 74.

Figur B.42: Viser aksiale spenninger for øvre seksjon av strømkabel i sjøtilstand 21. Navn 1-8 beskriver de 8 forskjellige punktene i tverrsnittet.

B.1 Maksimal spenninger i 8 punkter i tverrsnittet for element 74 og 37

Tabell B.1: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 1.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	0,85	6,91
2	3,78	6,72
3	6,40	6,65
4	5,55	6,74
5	1,70	6,93
6	2,92	7,11
7	5,56	7,18
8	4,71	7,10

Tabell B.2: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 2.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	0,60	6,78
2	3,47	6,78
3	5,10	6,76
4	3,47	6,72
5	0,52	6,69
6	4,35	6,72
7	5,97	6,75
8	4,37	6,78

Tabell B.3: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 3.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	1,61	6,75
2	2,50	6,74
3	4,73	6,68
4	3,96	6,63
5	0,66	6,61
6	3,45	6,63
7	5,71	6,68
8	4,92	6,73

Tabell B.4: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 4.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	1,54	6,47
2	5,10	6,37
3	5,96	6,27
4	3,61	6,22
5	0,65	6,26
6	4,19	6,35
7	5,07	6,45
8	2,73	6,50

Tabell B.5: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 5.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	0,69	6,31
2	3,65	6,16
3	6,03	6,03
4	5,18	6,01
5	1,59	6,10
6	2,78	6,24
7	5,15	6,37
8	4,29	6,40

Tabell B.6: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 6.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	0,61	6,31
2	3,75	6,12
3	6,05	5,95
4	5,11	5,90
5	1,49	6,00
6	2,87	6,20
7	5,18	6,37
8	4,25	6,42

Tabell B.7: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 7.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	1,73	8,62
2	2,58	8,63
3	4,85	8,61
4	4,10	8,57
5	0,72	8,53
6	3,57	8,51
7	5,86	8,54
8	5,09	8,57

Tabell B.8: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 8.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	1,74	8,54
2	4,27	8,54
3	4,78	8,49
4	2,89	8,42
5	0,63	8,38
6	3,12	8,39
7	3,63	8,44
8	1,74	8,51

Tabell B.9: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 9.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	1,60	8,19
2	5,17	8,11
3	6,07	8,00
4	3,75	7,94
5	0,72	7,96
6	4,23	8,04
7	5,12	8,14
8	2,79	8,20

Tabell B.10: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 10.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	1,68	7,83
2	5,23	7,71
3	6,09	7,58
4	3,70	7,52
5	0,80	7,56
6	4,33	7,68
7	5,19	7,81
8	2,77	7,87

Tabell B.11: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 11.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	0,53	7,33
2	3,73	7,15
3	5,35	6,98
4	3,62	6,91
5	0,72	6,99
6	4,61	7,17
7	6,24	7,35
8	4,50	7,41

Tabell B.12: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 12.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	0,89	10,95
2	3,58	10,94
3	5,24	10,91
4	3,64	10,87
5	0,81	10,86
6	4,69	10,87
7	6,35	10,90
8	4,75	10,94

Tabell B.13: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 13.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	0,81	10,76
2	3,93	10,71
3	6,27	10,65
4	5,47	10,61
5	1,91	10,62
6	2,81	10,67
7	5,16	10,73
8	4,34	10,76

Tabell B.14: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 14.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	1,91	10,89
2	2,98	10,78
3	5,42	10,68
4	4,54	10,66
5	0,85	10,72
6	4,01	10,84
7	6,46	10,94
8	5,61	10,96

Tabell B.15: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 15.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	1,81	10,73
2	3,19	10,56
3	5,60	10,43
4	4,59	10,43
5	0,82	10,53
6	4,21	10,70
7	6,69	10,84
8	5,68	10,85

Tabell B.16: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 16.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	1,67	10,59
2	3,26	10,37
3	5,59	10,19
4	4,44	10,18
5	0,63	10,33
6	4,28	10,56
7	6,59	10,73
8	5,43	10,75

Tabell B.17: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 17.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	0,57	10,10
2	3,85	9,72
3	5,24	9,44
4	3,40	9,45
5	1,01	9,74
6	4,91	10,14
7	6,29	10,41
8	4,46	10,39

Tabell B.18: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 18.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	1,03	12,15
2	3,61	12,13
3	5,31	12,07
4	3,70	12,01
5	0,89	11,99
6	4,83	12,01
7	6,52	12,07
8	4,92	12,13

Tabell B.19: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 19.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	0,81	12,34
2	4,03	12,10
3	5,69	11,88
4	3,82	11,82
5	1,07	11,95
6	5,13	12,20
7	6,77	12,42
8	4,93	12,48

Tabell B.20: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 20.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	4,48	12,46
2	0,87	12,02
3	4,26	11,66
4	6,64	11,59
5	5,61	11,85
6	1,83	12,29
7	3,27	12,65
8	5,62	12,72

Tabell B.21: Viser maks spenning i 8 punkter i tverrsnittet til element 37 og 74. Spenningene er for sjøtilstand 21.

Punkt nr.	Element 37 [MPa]	Element 74 [MPa]
1	0,85	10,64
2	4,36	10,51
3	5,95	10,40
4	4,06	10,24
5	1,38	10,12
6	5,26	10,54
7	6,70	10,86
8	4,85	10,90

B.2 Maks gjennomsnittsspenninger og maks spennvidder i tverrsnittet på strømkabel i de forskjellige sjøtilstandene

Sjøtilstand 1

maks mean el 38 = 4.372019386086964

maks spennvidde el 38 = 1.0014067001103508

maks mean el 37 = 5.7288927824915605

maks spennvidde el 37 = 1.3564163371240385

maks mean el 36 = 5.921699204354308

maks spennvidde el 36 = 1.0989996893479907

maks mean el 35 = 4.694507806691367

maks mean el 74 = 6.123749855399974

maks spennvidde el 74 = 2.1466697782728903

maks mean el 72 = 5.566208668391511

maks spennvidde el 72 = 2.041721832098931

maks mean el 70 = 5.213419558655209

maks spennvidde el 70 = 1.912481858557162

maks mean el 68 = 4.90938315246508

maks spennvidde el 68 = 1.8712008731293701

Sjøtilstand 2

maks mean el 38 = 4.317940183185055

maks spennvidde el 38 = 0.9129375573339719

maks mean el 37 = 5.341752719286963

maks spennvidde el 37 = 1.2457592546532237

maks mean el 36 = 5.492300557098266

maks spennvidde el 36 = 1.08269863406998

maks mean el 35 = 4.565289939118668

maks mean el 74 = 5.876563444441535

maks spennvidde el 74 = 2.0006989156981985

maks mean el 72 = 5.561411124128669

maks spennvidde el 72 = 1.901874585820837

maks mean el 70 = 5.224465474395281

maks spennvidde el 70 = 1.7855681380734332

maks mean el 68 = 4.9206262712610025

maks spennvidde el 68 = 1.7465630984170997

Sjøtilstand 3

maks mean el 38 = 4.096363883579226

maks spennvidde el 38 = 0.8381496071648612

maks mean el 37 = 5.287735574443651

maks spennvidde el 37 = 0.9644307377735134

maks mean el 36 = 5.5353749737750855

maks spennvidde el 36 = 0.8441618509357115

maks mean el 35 = 4.552952667541012

maks mean el 74 = 5.904848686000618

maks spennvidde el 74 = 1.760402360220599

maks mean el 72 = 5.559173404225282

maks spennvidde el 72 = 1.6542055565656937

maks mean el 70 = 5.223469914820738

maks spennvidde el 70 = 1.5422556546996617

maks mean el 68 = 4.919605696064992

maks spennvidde el 68 = 1.5092197400010432

Sjøtilstand 4

maks mean el 38 = 4.298713821589534

maks spennvidde el 38 = 0.8354113322413448

maks mean el 37 = 5.513720900923747

maks spennvidde el 37 = 1.0725324844817463

maks mean el 36 = 5.7105941833995235

maks spennvidde el 36 = 0.8911651125994008

maks mean el 35 = 4.639515478205443

maks mean el 74 = 5.986249267286162

maks spennvidde el 74 = 1.1699242964158123

maks mean el 72 = 5.561154987286641

maks spennvidde el 72 = 1.1425659275521076

maks mean el 70 = 5.218167716617307

maks spennvidde el 70 = 1.043565751800618

maks mean el 68 = 4.9141967193303335

maks spennvidde el 68 = 1.0217294511801795

Sjøtilstand 5

maks mean el 38 = 4.335695702245363

maks spennvidde el 38 = 0.7387022129630959

maks mean el 37 = 5.614622771339355

maks spennvidde el 37 = 1.0009911793791488

maks mean el 36 = 5.808708337038877

maks spennvidde el 36 = 0.943629341409606

maks mean el 35 = 4.665639741915589

maks mean el 74 = 6.02217481134375

maks spennvidde el 74 = 0.7617272725385744

maks mean el 72 = 5.563966991096019

maks spennvidde el 72 = 0.7027146010417752

maks mean el 70 = 5.21584152958519

maks spennvidde el 70 = 0.6693604985111207

maks mean el 68 = 4.911823109501599

maks spennvidde el 68 = 0.6546478200257877

Sjøtilstand 6

maks mean el 38 = 4.391198499116203

maks spennvidde el 38 = 0.6356270240749796

maks mean el 37 = 5.727898334464192

maks spennvidde el 37 = 0.7934043492992474

maks mean el 36 = 5.91075685912211

maks spennvidde el 36 = 0.7431199037810685

maks mean el 35 = 4.690262093307427

maks mean el 74 = 6.0816366337922

maks spennvidde el 74 = 0.6836449135667356

maks mean el 72 = 5.567453103868458

maks spennvidde el 72 = 0.6402036603143066

maks mean el 70 = 5.214041084939197

maks spennvidde el 70 = 0.614183134606055

maks mean el 68 = 4.909973757963823

maks spennvidde el 68 = 0.6006827883189274

Sjøtilstand 7

maks mean el 38 = 4.0744349620265226

maks spennvidde el 38 = 1.0897670071958276

maks mean el 37 = 5.231307802318812

maks spennvidde el 37 = 1.3599456887199106

maks mean el 36 = 5.476877866099154

maks spennvidde el 36 = 1.4844200394406584

maks mean el 35 = 4.532697778112877

maks mean el 74 = 5.877865237321097

maks spennvidde el 74 = 5.600131702080645

maks mean el 72 = 5.562242277040984

maks spennvidde el 72 = 5.303453904401035

maks mean el 70 = 5.225595809036792

maks spennvidde el 70 = 4.979112231949995

maks mean el 68 = 4.921657970242595

maks spennvidde el 68 = 4.876903429119071

Sjøtilstand 8

maks mean el 38 = 4.214646211241203

maks spennvidde el 38 = 1.1787232915692423

maks mean el 37 = 5.286814745053188

maks spennvidde el 37 = 1.334531335094367

maks mean el 36 = 5.483742607579401

maks spennvidde el 36 = 1.0748423867066708

maks mean el 35 = 4.569797067369252

maks mean el 74 = 5.9124991303234555

maks spennvidde el 74 = 5.348628382377872

maks mean el 72 = 5.5627933703101204

maks spennvidde el 72 = 5.064994045405745

maks mean el 70 = 5.22473001734826

maks spennvidde el 70 = 4.768528862259667

maks mean el 68 = 4.9207762039627

maks spennvidde el 68 = 4.670599300159251

Sjøtilstand 9

maks mean el 38 = 4.280961939476249

maks spennvidde el 38 = 1.2995777181303603

maks mean el 37 = 5.466696599966117

maks spennvidde el 37 = 1.4017418866825029

maks mean el 36 = 5.664402106977788

maks spennvidde el 36 = 1.1592594230328537

maks mean el 35 = 4.6275888263736285

maks mean el 74 = 5.990139793646508

maks spennvidde el 74 = 4.778501181908206

maks mean el 72 = 5.564389513516876

maks spennvidde el 72 = 4.474642867896136

maks mean el 70 = 5.219670901459978

maks spennvidde el 70 = 4.238238454797634

maks mean el 68 = 4.91564417511375

maks spennvidde el 68 = 4.149223197238665

Sjøtilstand 10

maks mean el 38 = 4.300625882431573

maks spennvidde el 38 = 1.2374890459449357

maks mean el 37 = 5.541243018225594

maks spennvidde el 37 = 1.402844267831371

maks mean el 36 = 5.7425724614191935

maks spennvidde el 36 = 1.1972263022544394

maks mean el 35 = 4.650389539181985

maks mean el 74 = 6.03211647932927

maks spennvidde el 74 = 3.7721735587855

maks mean el 72 = 5.565584013271183

maks spennvidde el 72 = 3.55246248487491

maks mean el 70 = 5.217533042499899

maks spennvidde el 70 = 3.3369176612839264

maks mean el 68 = 4.913471441826253

maks spennvidde el 68 = 3.2666998871089175

Sjøtilstand 11

maks mean el 38 = 4.473173167569315

maks spennvidde el 38 = 1.2129810628787834

maks mean el 37 = 5.717178586983799

maks spennvidde el 37 = 1.4632662803454008

maks mean el 36 = 5.8528169834345345

maks spennvidde el 36 = 1.2415366005957993

maks mean el 35 = 4.670622453744662

maks mean el 74 = 6.089737994676443

maks spennvidde el 74 = 2.922788372353574

maks mean el 72 = 5.570661101710061

maks spennvidde el 72 = 2.792024417355828

maks mean el 70 = 5.215985637552502

maks spennvidde el 70 = 2.6032837271180203

maks mean el 68 = 4.911876200787493

maks spennvidde el 68 = 2.5481069140226777

Sjøtilstand 12

maks mean el 38 = 4.28877677229065

maks spennvidde el 38 = 2.276458583897951

maks mean el 37 = 5.270383252382702

maks spennvidde el 37 = 2.34649957302219

maks mean el 36 = 5.417453790787042

maks spennvidde el 36 = 1.5045743830282046

maks mean el 35 = 4.54030425243688

maks mean el 74 = 5.885428087344587

maks spennvidde el 74 = 10.077733350705602

maks mean el 72 = 5.568533158802924

maks spennvidde el 72 = 9.65013355997192

maks mean el 70 = 5.2285481578233695

maks spennvidde el 70 = 8.989426174578407

maks mean el 68 = 4.924246055828396

maks spennvidde el 68 = 8.85737835667557

Sjøtilstand 13

maks mean el 38 = 4.161199195958323

maks spennvidde el 38 = 2.2340880523817637

maks mean el 37 = 5.198213800178182

maks spennvidde el 37 = 2.271393224565013

maks mean el 36 = 5.402999651256588

maks spennvidde el 36 = 1.5730328656685446

maks mean el 35 = 4.546355746580374

maks mean el 74 = 5.914251229087025

maks spennvidde el 74 = 9.660475986321494

maks mean el 72 = 5.570386308760577

maks spennvidde el 72 = 9.268660259023756

maks mean el 70 = 5.227890933445764

maks spennvidde el 70 = 8.67312038684028

maks mean el 68 = 4.923599534083847

maks spennvidde el 68 = 8.519297959005874

Sjøtilstand 14

maks mean el 38 = 4.160655549238773

maks spennvidde el 38 = 2.1183323960793183

maks mean el 37 = 5.404003796287842

maks spennvidde el 37 = 2.3241119344609773

maks mean el 36 = 5.630848055718856

maks spennvidde el 36 = 1.5256328875118987

maks mean el 35 = 4.572078562284212

maks mean el 74 = 5.987740240297929

maks spennvidde el 74 = 10.010332698256732

maks mean el 72 = 5.570504448868762

maks spennvidde el 72 = 9.50983468493722

maks mean el 70 = 5.2228698709957975

maks spennvidde el 70 = 8.896100280134775

maks mean el 68 = 4.9184806064189655

maks spennvidde el 68 = 8.758956370683654

Sjøtilstand 15

maks mean el 38 = 4.210206044912244

maks spennvidde el 38 = 2.197858672265324

maks mean el 37 = 5.496564759210802

maks spennvidde el 37 = 2.482571217404591

maks mean el 36 = 5.7101805640792085

maks spennvidde el 36 = 1.6317238157602045

maks mean el 35 = 4.586580717007667

maks mean el 74 = 6.026143002895009

maks spennvidde el 74 = 9.963897323972548

maks mean el 72 = 5.572991708189568

maks spennvidde el 72 = 9.55168767674087

maks mean el 70 = 5.221072215892321

maks spennvidde el 70 = 8.9165265078668

maks mean el 68 = 4.916630318063189

maks spennvidde el 68 = 8.775216273678186

Sjøtilstand 16

maks mean el 38 = 4.247766277638218

maks spennvidde el 38 = 1.9980123388427367

maks mean el 37 = 5.546565273556378

maks spennvidde el 37 = 2.309088683309028

maks mean el 36 = 5.744570415952542

maks spennvidde el 36 = 1.5469532665484622

maks mean el 35 = 4.5830604625948785

maks mean el 74 = 6.0878140326756975

maks spennvidde el 74 = 9.155402362997814

maks mean el 72 = 5.578511001271614

maks spennvidde el 72 = 8.75761881864467

maks mean el 70 = 5.220304099271139

maks spennvidde el 70 = 8.248341437302507

maks mean el 68 = 4.91586896341521

maks spennvidde el 68 = 8.08404756584245

Sjøtilstand 17

maks mean el 38 = 4.339261889501279

maks spennvidde el 38 = 1.9643703954792795

maks mean el 37 = 5.402669114026891

maks spennvidde el 37 = 2.069265181695776

maks mean el 36 = 5.554517314093122

maks spennvidde el 36 = 1.4927488294411981

maks mean el 35 = 4.589389944096858

maks mean el 74 = 6.267780400866471

maks spennvidde el 74 = 8.620136269183117

maks mean el 72 = 5.610128924020409

maks spennvidde el 72 = 8.200397658583375

maks mean el 70 = 5.225408137552283

maks spennvidde el 70 = 7.714355096605605

maks mean el 68 = 4.92098665589369

maks spennvidde el 68 = 7.5811246902295535

Sjøtilstand 18

maks mean el 38 = 4.269957925811721

maks spennvidde el 38 = 2.8895239056785367

maks mean el 37 = 5.222823514065292

maks spennvidde el 37 = 2.8553098487676687

maks mean el 36 = 5.368778062838062

maks spennvidde el 36 = 1.823150660167573

maks mean el 35 = 4.526698996690923

maks mean el 74 = 5.925999465261424

maks spennvidde el 74 = 13.199668534120034

maks mean el 72 = 5.574811045232287

maks spennvidde el 72 = 12.510062592625601

maks mean el 70 = 5.231749593757885

maks spennvidde el 70 = 11.650066268861869

maks mean el 68 = 4.9268952055160335

maks spennvidde el 68 = 11.531210343801822

Sjøtilstand 19

maks mean el 38 = 4.383689668339955

maks spennvidde el 38 = 3.0295932852236676

maks mean el 37 = 5.489268488462665

maks spennvidde el 37 = 2.934173792545643

maks mean el 36 = 5.630094931846589

maks spennvidde el 36 = 1.8913171929321726

maks mean el 35 = 4.615062821964368

maks mean el 74 = 6.110972547198289

maks spennvidde el 74 = 12.564858157648816

maks mean el 72 = 5.5874019057068365

maks spennvidde el 72 = 11.99188510568007

maks mean el 70 = 5.2248358595672695

maks spennvidde el 70 = 11.187042947893895

maks mean el 68 = 4.919842149226603

maks spennvidde el 68 = 11.064491365003837

Sjøtilstand 20

maks mean el 38 = 4.3171683359696695

maks spennvidde el 38 = 3.287301784162442

maks mean el 37 = 5.284161060497185

maks spennvidde el 37 = 3.1363025457745417

maks mean el 36 = 5.306577637967721

maks spennvidde el 36 = 1.9852751294725406

maks mean el 35 = 4.2767877109121

maks mean el 74 = 6.282612888161547

maks spennvidde el 74 = 12.481604843894093

maks mean el 72 = 5.620300017217069

maks spennvidde el 72 = 11.987083509707297

maks mean el 70 = 5.229510611146441

maks spennvidde el 70 = 11.202458404503572

maks mean el 68 = 4.924960279113082

maks spennvidde el 68 = 11.005168166482944

Sjøtilstand 21

maks mean el 38 = 4.273136913276623

maks spennvidde el 38 = 3.6573972023093475

maks mean el 37 = 5.219165026458225

maks spennvidde el 37 = 3.6456991250440076

maks mean el 36 = 5.371104932641225

maks spennvidde el 36 = 2.746455400764926

maks mean el 35 = 4.543907598409159

maks mean el 74 = 6.302191291222526

maks spennvidde el 74 = 13.69914967904286

maks mean el 72 = 5.657048341266626

maks spennvidde el 72 = 12.462270663595449

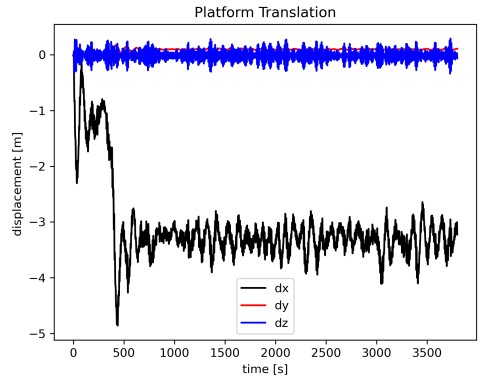
maks mean el 70 = 5.238704545186575

maks spennvidde el 70 = 11.766468336610243

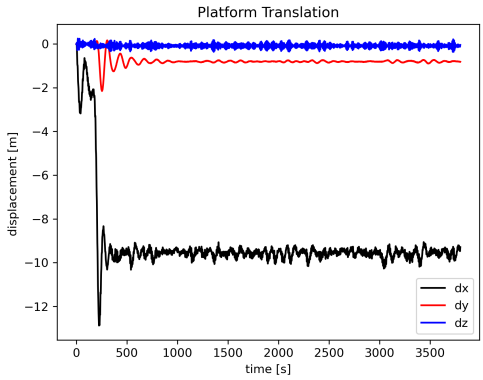
maks mean el 68 = 4.932654170288208

maks spennvidde el 68 = 11.538149444680046

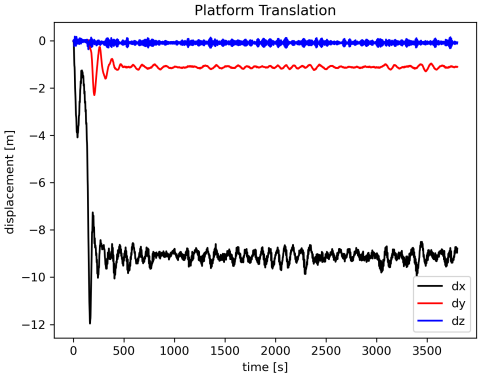
C Platformbevegelser



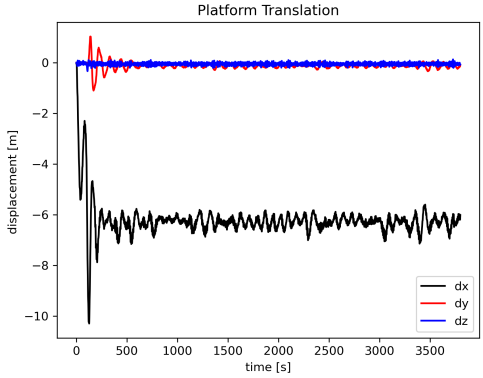
(a) Sjøtilstand 1



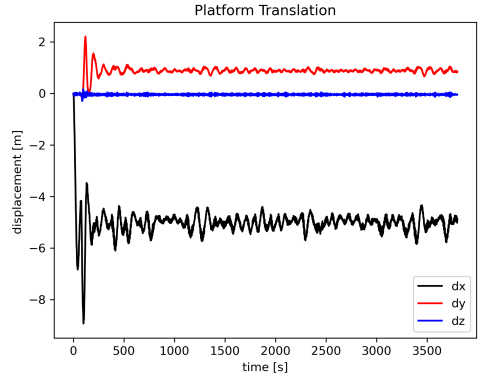
(b) Sjøtilstand 2



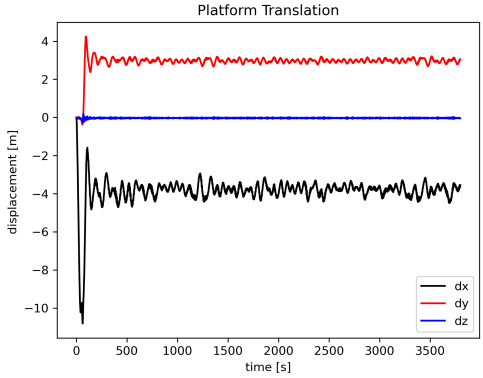
(c) Sjøtilstand 3



(d) Sjøtilstand 4

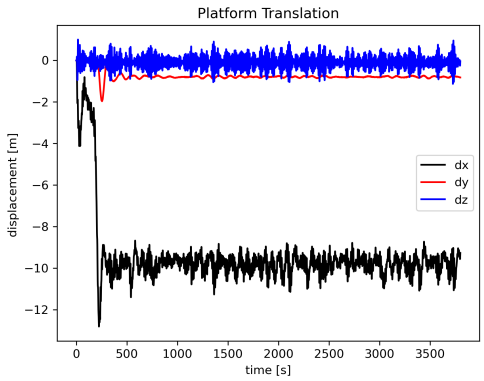


(e) Sjøtilstand 5

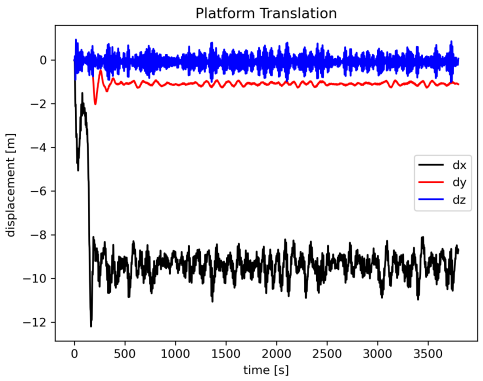


(f) Sjøtilstand 6

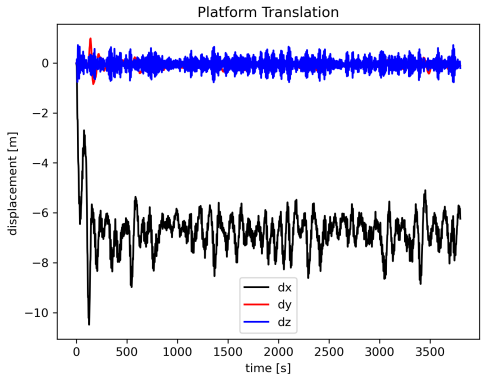
Figur C.1: Viser plott for 22 sjøtilstander i X, Y, Z.



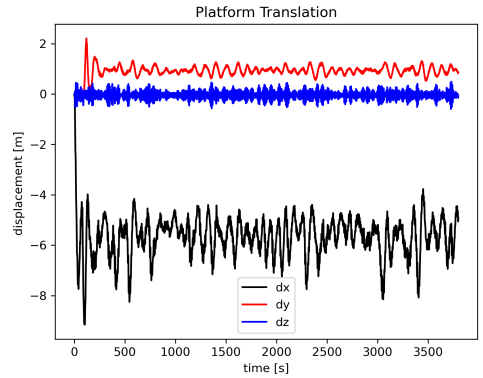
(a) Sjøtilstand 7



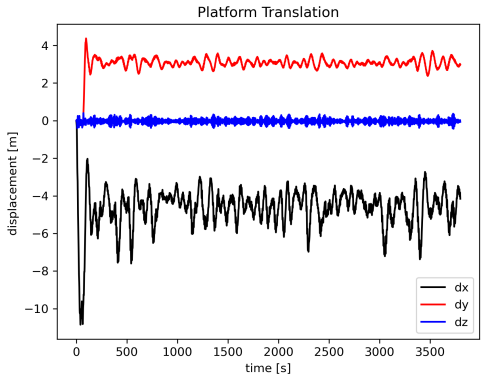
(b) Sjøtilstand 8



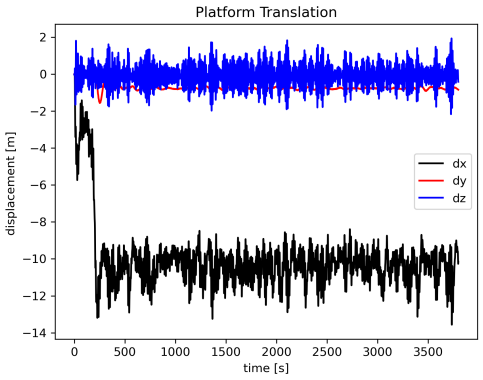
(c) Sjøtilstand 9



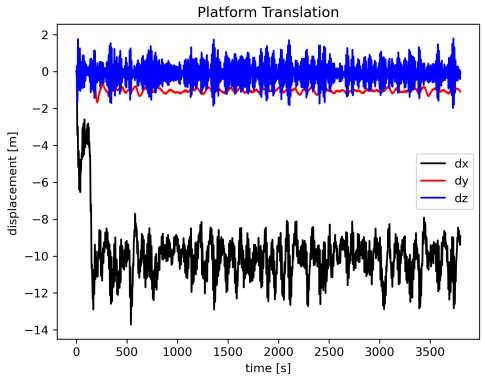
(d) Sjøtilstand 10



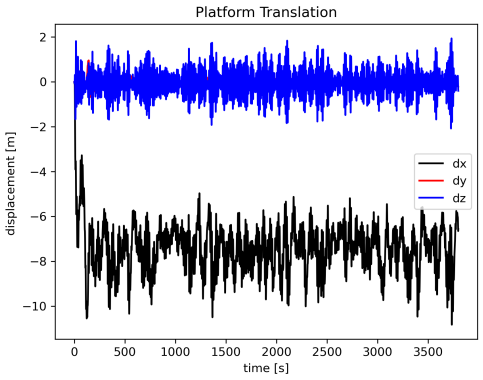
(e) Sjøtilstand 11



(f) Sjøtilstand 12

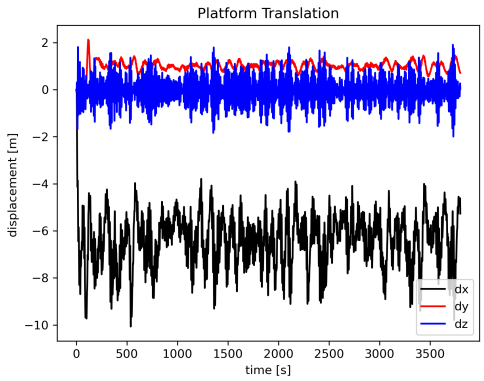


(g) Sjøtilstand 13

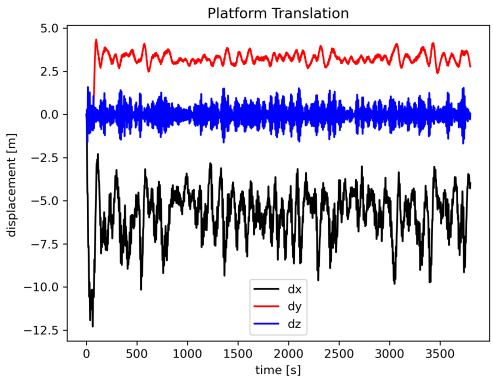


(h) Sjøtilstand 14

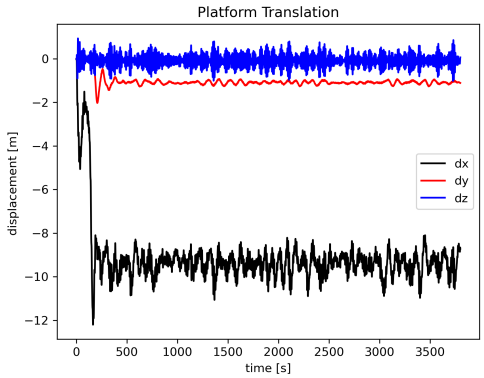
Figur C.2: Viser plott for 22 sjøtilstander i X, Y, Z.



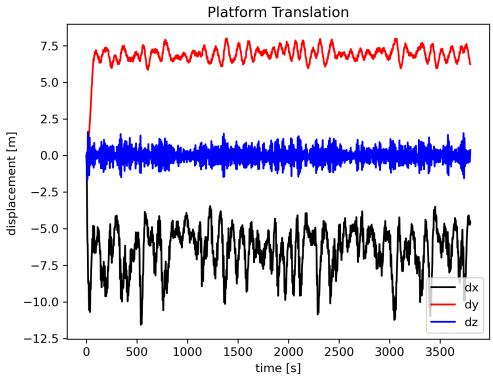
(a) Sjøtilstand 15



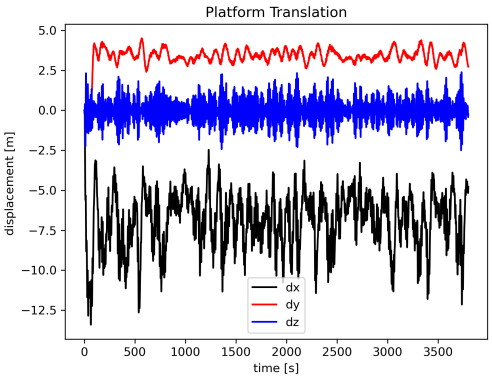
(b) Sjøtilstand 16



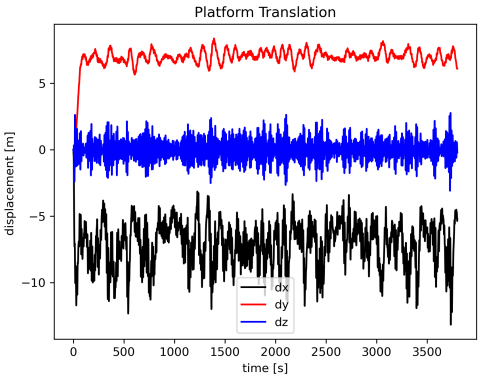
(c) Sjøtilstand 17



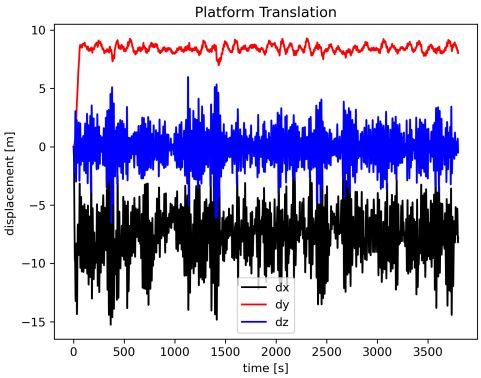
(d) Sjøtilstand 18



(e) Sjøtilstand 19



(f) Sjøtilstand 20



(g) Sjøtilstand 21

Figur C.3: Viser plott for sjøtilstander i X, Y, Z.

D Komplette tabeller for havstrømmer

	Havstrømning			
sjøtilstand	Vind, U(H)	U_mean_10m	v_c,vind(0)	v_c,tide(0)
1	4	2.79	0.05855	0.016
2	8	5.58	0.11710	0.016
3	10.6	7.39	0.15516	0.016
4	14	9.76	0.20493	0.016
5	17	11.85	0.24884	0.016
6	23.5	16.38	0.34399	0.016
7	8	5.58	0.11710	0.016
8	10.6	7.39	0.15516	0.016
9	14	9.76	0.20493	0.016
10	17	11.85	0.24884	0.016
11	23.5	16.38	0.34399	0.016
12	8	5.58	0.11710	0.016
13	10.6	7.39	0.15516	0.016
14	14	9.76	0.20493	0.016
15	17	11.85	0.24884	0.016
16	23.5	16.38	0.34399	0.016
17	38	26.49	0.55624	0.016
18	10.6	7.39	0.15516	0.016
19	23.5	16.38	0.34399	0.016
20	38	26.49	0.55624	0.016
21	44.6	31.09	0.65285	0.016

Figur D.1: Skjermbilde av Excel ark for beregning av havstrømmer ved overflaten.

Sjøtilstand 4m/s				Sjøtilstand 8m/s				Sjøtilstand 10m/s			
Dybde z	v_c,vind(z)	v_c,tide(z)	v_c(z)	Dybde z	v_c,vind(z)	v_c,tide(z)	v_c(z)	Dybde z	v_c,vind(z)	v_c,tide(z)	v_c(z)
0	0.05855	0.01600	0.07455	0	0.11710	0.01600	0.13310	0	0.15516	0.01600	0.17116
-5	0.05465	0.01592	0.07057	-5	0.10930	0.01592	0.12522	-5	0.14482	0.01592	0.16074
-10	0.05074	0.01585	0.06659	-10	0.10149	0.01585	0.11734	-10	0.13447	0.01585	0.15032
-15	0.04684	0.01577	0.06261	-15	0.09368	0.01577	0.10945	-15	0.12413	0.01577	0.13989
-20	0.04294	0.01568	0.05862	-20	0.08588	0.01568	0.10156	-20	0.11378	0.01568	0.12947
-25	0.03903	0.01560	0.05463	-25	0.07807	0.01560	0.09367	-25	0.10344	0.01560	0.11904
-30	0.03513	0.01551	0.05064	-30	0.07026	0.01551	0.08577	-30	0.09310	0.01551	0.10860
-35	0.03123	0.01542	0.04664	-35	0.06245	0.01542	0.07787	-35	0.08275	0.01542	0.09817
-40	0.02732	0.01532	0.04264	-40	0.05465	0.01532	0.06997	-40	0.07241	0.01532	0.08773
-45	0.02342	0.01522	0.03864	-45	0.04684	0.01522	0.06206	-45	0.06206	0.01522	0.07729
-50	0.01952	0.01512	0.03463	-50	0.03903	0.01512	0.05415	-50	0.05172	0.01512	0.06684
-55	0.01561	0.01501	0.03062	-55	0.03123	0.01501	0.04624	-55	0.04138	0.01501	0.05639
-60	0.01171	0.01490	0.02661	-60	0.02342	0.01490	0.03832	-60	0.03103	0.01490	0.04593
-65	0.00781	0.01478	0.02258	-65	0.01561	0.01478	0.03039	-65	0.02069	0.01478	0.03547
-70	0.00390	0.01465	0.01856	-70	0.00781	0.01465	0.02246	-70	0.01034	0.01465	0.02500
-75		0.01452	0.01452	-75		0.01452	0.01452	-75		0.01452	0.01452
-80		0.01438	0.01438	-80		0.01438	0.01438	-80		0.01438	0.01438
-85		0.01423	0.01423	-85		0.01423	0.01423	-85		0.01423	0.01423
-90		0.01407	0.01407	-90		0.01407	0.01407	-90		0.01407	0.01407
-95		0.01390	0.01390	-95		0.01390	0.01390	-95		0.01390	0.01390
-100		0.01372	0.01372	-100		0.01372	0.01372	-100		0.01372	0.01372
-105		0.01352	0.01352	-105		0.01352	0.01352	-105		0.01352	0.01352
-110		0.01330	0.01330	-110		0.01330	0.01330	-110		0.01330	0.01330
-115		0.01305	0.01305	-115		0.01305	0.01305	-115		0.01305	0.01305
-120		0.01277	0.01277	-120		0.01277	0.01277	-120		0.01277	0.01277
-125		0.01245	0.01245	-125		0.01245	0.01245	-125		0.01245	0.01245
-130		0.01207	0.01207	-130		0.01207	0.01207	-130		0.01207	0.01207
-135		0.01159	0.01159	-135		0.01159	0.01159	-135		0.01159	0.01159
-140		0.01095	0.01095	-140		0.01095	0.01095	-140		0.01095	0.01095
-145		0.00994	0.00994	-145		0.00994	0.00994	-145		0.00994	0.00994
-150		-	-	-150				-150			

Figur D.2: Skjermbilde av Excel ark for strømningsprofil av havstrømmer ved 4, 8 og 10 m/s.

Sjøtilstand 14m/s				Sjøtilstand 17m/s				Sjøtilstand 23.5m/s			
Dybde z	v_c,vind(z)	v_c,tide(z)	v_c(z)	Dybde z	v_c,vind(z)	v_c,tide(z)	v_c(z)	Dybde z	v_c,vind(z)	v_c,tide(z)	v_c(z)
0	0.20493	0.01600	0.22093	0	0.24884	0.01600	0.26484	0	0.34399	0.01600	0.35999
-5	0.19127	0.01592	0.20719	-5	0.23225	0.01592	0.24818	-5	0.32106	0.01592	0.33698
-10	0.17761	0.01585	0.19345	-10	0.21566	0.01585	0.23151	-10	0.29812	0.01585	0.31397
-15	0.16394	0.01577	0.17971	-15	0.19907	0.01577	0.21484	-15	0.27519	0.01577	0.29096
-20	0.15028	0.01568	0.16596	-20	0.18249	0.01568	0.19817	-20	0.25226	0.01568	0.26794
-25	0.13662	0.01560	0.15222	-25	0.16590	0.01560	0.18149	-25	0.22933	0.01560	0.24492
-30	0.12296	0.01551	0.13847	-30	0.14931	0.01551	0.16481	-30	0.20639	0.01551	0.22190
-35	0.10930	0.01542	0.12471	-35	0.13272	0.01542	0.14813	-35	0.18346	0.01542	0.19888
-40	0.09563	0.01532	0.11095	-40	0.11613	0.01532	0.13145	-40	0.16053	0.01532	0.17585
-45	0.08197	0.01522	0.09719	-45	0.09954	0.01522	0.11476	-45	0.13760	0.01522	0.15282
-50	0.06831	0.01512	0.08343	-50	0.08295	0.01512	0.09806	-50	0.11466	0.01512	0.12978
-55	0.05465	0.01501	0.06966	-55	0.06636	0.01501	0.08137	-55	0.09173	0.01501	0.10674
-60	0.04099	0.01490	0.05588	-60	0.04977	0.01490	0.06466	-60	0.06880	0.01490	0.08369
-65	0.02732	0.01478	0.04210	-65	0.03318	0.01478	0.04796	-65	0.04587	0.01478	0.06064
-70	0.01366	0.01465	0.02831	-70	0.01659	0.01465	0.03124	-70	0.02293	0.01465	0.03758
-75		0.01452	0.01452	-75	-	0.01452	0.01452	-75	-	0.01452	0.01452
-80		0.01438	0.01438	-80		0.01438	0.01438	-80		0.01438	0.01438
-85		0.01423	0.01423	-85		0.01423	0.01423	-85		0.01423	0.01423
-90		0.01407	0.01407	-90		0.01407	0.01407	-90		0.01407	0.01407
-95		0.01390	0.01390	-95		0.01390	0.01390	-95		0.01390	0.01390
-100		0.01372	0.01372	-100		0.01372	0.01372	-100		0.01372	0.01372
-105		0.01352	0.01352	-105		0.01352	0.01352	-105		0.01352	0.01352
-110		0.01330	0.01330	-110		0.01330	0.01330	-110		0.01330	0.01330
-115		0.01305	0.01305	-115		0.01305	0.01305	-115		0.01305	0.01305
-120		0.01277	0.01277	-120		0.01277	0.01277	-120		0.01277	0.01277
-125		0.01245	0.01245	-125		0.01245	0.01245	-125		0.01245	0.01245
-130		0.01207	0.01207	-130		0.01207	0.01207	-130		0.01207	0.01207
-135		0.01159	0.01159	-135		0.01159	0.01159	-135		0.01159	0.01159
-140		0.01095	0.01095	-140		0.01095	0.01095	-140		0.01095	0.01095
-145		0.00994	0.00994	-145		0.00994	0.00994	-145		0.00994	0.00994

Figur D.3: Skjermbilde av Excel ark for strømningsprofil av havstrømmer ved 14, 17 og 23,5 m/s.

Sjøtilstand 38m/s				Sjøtilstand 44.5m/s			
Dybde z	v_c,vind(z)	v_c,tide(z)	v_c(z)	Dybde z	v_c,vind(z)	v_c,tide(z)	v_c(z)
0	0.55624	0.01600	0.57224	0	0.65285	0.01600	0.66885
-5	0.51916	0.01592	0.53508	-5	0.60932	0.01592	0.62525
-10	0.48207	0.01585	0.49792	-10	0.56580	0.01585	0.58165
-15	0.44499	0.01577	0.46076	-15	0.52228	0.01577	0.53804
-20	0.40791	0.01568	0.42359	-20	0.47876	0.01568	0.49444
-25	0.37083	0.01560	0.38642	-25	0.43523	0.01560	0.45083
-30	0.33374	0.01551	0.34925	-30	0.39171	0.01551	0.40722
-35	0.29666	0.01542	0.31208	-35	0.34819	0.01542	0.36360
-40	0.25958	0.01532	0.27490	-40	0.30466	0.01532	0.31998
-45	0.22250	0.01522	0.23772	-45	0.26114	0.01522	0.27636
-50	0.18541	0.01512	0.20053	-50	0.21762	0.01512	0.23273
-55	0.14833	0.01501	0.16334	-55	0.17409	0.01501	0.18910
-60	0.11125	0.01490	0.12614	-60	0.13057	0.01490	0.14547
-65	0.07417	0.01478	0.08894	-65	0.08705	0.01478	0.10182
-70	0.03708	0.01465	0.05173	-70	0.04352	0.01465	0.05818
-75	-	0.01452	0.01452	-75	-	0.01452	0.01452
-80		0.01438	0.01438	-80		0.01438	0.01438
-85		0.01423	0.01423	-85		0.01423	0.01423
-90		0.01407	0.01407	-90		0.01407	0.01407
-95		0.01390	0.01390	-95		0.01390	0.01390
-100		0.01372	0.01372	-100		0.01372	0.01372
-105		0.01352	0.01352	-105		0.01352	0.01352
-110		0.01330	0.01330	-110		0.01330	0.01330
-115		0.01305	0.01305	-115		0.01305	0.01305
-120		0.01277	0.01277	-120		0.01277	0.01277
-125		0.01245	0.01245	-125		0.01245	0.01245
-130		0.01207	0.01207	-130		0.01207	0.01207
-135		0.01159	0.01159	-135		0.01159	0.01159
-140		0.01095	0.01095	-140		0.01095	0.01095
-145		0.00994	0.00994	-145		0.00994	0.00994
-150				-150		-	-

Figur D.4: Skjermbilde av Excel ark for strømningsprofil av havstrømmer ved 38, og 44,5 m/s.

E Python koder for utmatting og spenninger i 8 punkter av tverrsnittet

Dette er python koder som er benyttet til utmatting i 8 punkter av strømkabelen. Funksjonen mik_fatigue_funcs gjennomfører rainflow counting samt delskade. Denne fuksjonen er fått fra Marit Kvittem i SINTEF OCEAN. Funksjonen cyl_beam_stresses er utviklet av veileder Tor Anders Nygård.

Nederst i koden illustreres metoden for utregning av de 8 punktene i elementene.

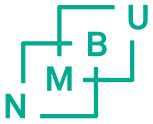
Dette er ikke den komplette koden som er benyttet, men en liten del for å vise fremgangsmåte.

```
1
2  import numpy as np
3  import pandas as pd
4  import sys
5  import rainflow
6  from mik_fatigue_funcs import fatiguedamage_twoslope
7  from mik_fatigue_funcs import turningpoints,turningpoints_steffen
8  from mik_fatigue_funcs import findrfc_wafo
9  from pylab import *
10 from numpy import loadtxt
11 from scipy import interpolate
12
13 def movavg2(f,navg):
14     nf = size(f)
15     fe = zeros(nf+navg) # extended
16     fe[0:nf] = f[0:nf]
17     fe[nf-1:nf+navg] = f[nf-1]
18     fa = copy(f)
19     for i in range(nf):
20         fa[i] = mean(f[i:i+navg] )
21     return fa
22
23
24 def cyl_beam_stresses(t,fx,fy,fz,mx,my,mz,d,twall):
25     #
26     # Stresses for box beam
27     # Signs are for monitors set for node 2. Forces can be seen as
       acting on node 2
28     # from the neighbor element
29     # Calculation ponts in element coordinate system:
30     # Point 1 on y axis, then positive rotation about x axis
31     #
32     #  Point    y     z
33     #  1        0.5*d   0
34     #  2        0.5*d*cos45  0.5d*sin45
35     #  3        0     b/2
```

```
36     #  and so on
37     #  iy means bending stiffness ABOUT y axis,  integral of z^2dA
38
39     di = d - 2.*twall
40     a = .25*pi*(d**2-di**2)
41     icyl = pi*(d**4-di**4)/64.
42
43     # normal stresses for points 1-8
44     sax    =  fx/a  # axial stress, positive tension
45     sbendy =  my*.5*d/icyl  # positive moment gives tension (positive
    for pos z)
46     sbendz = -mz*.5*d/icyl    # positive moment gives tension (positive
    for neg y)
47
48     sin45 = sin(pi*45./180.)  # z coordinate
49     cos45 = cos(pi*45./180.)  # y coordinate
50
51     s1     =  sax                  + sbendz
52     s2     =  sax  + sbendy*sin45 + sbendz*cos45
53     s3     =  sax  + sbendy
54     s4     =  sax  + sbendy*sin45 - sbendz*cos45
55     s5     =  sax                  - sbendz
56     s6     =  sax  - sbendy*sin45 - sbendz*cos45
57     s7     =  sax  - sbendy
58     s8     =  sax  - sbendy*sin45 + sbendz*cos45
59
60     # shear stress
61     symax = fy/a*(4./3)*(d**2 + d*di + di**2)/(d**2 + di**2) # on z axis
62     szmax = fz/a*(4./3)*(d**2 + d*di + di**2)/(d**2 + di**2) # on y axis
63     # torsion stress, thin wall approx
64     dm = .5*(d+di)
65     sx = mx/(2.*twall*.25*pi*dm**2)
66
67     # shear stresses, positive along section, positive x rotation
68     ssh1 = sx + szmax
69     ssh2 = sx           # ignore shear stress due to shear forces here
    TODO
70     ssh3 = sx - symax
```

```
71      ssh4 = sx           # ignore shear stress due to shear forces here
    TODO
72      ssh5 = sx - szmax
73      ssh6 = sx
74      ssh7 = sx + symax
75      ssh8 = sx
76
77      # von Mises stress
78      svm1 = sqrt(s1**2 + 3.*ssh1**2)
79      svm2 = sqrt(s2**2 + 3.*ssh2**2)
80      svm3 = sqrt(s3**2 + 3.*ssh3**2)
81      svm4 = sqrt(s4**2 + 3.*ssh4**2)
82      svm5 = sqrt(s5**2 + 3.*ssh5**2)
83      svm6 = sqrt(s6**2 + 3.*ssh6**2)
84      svm7 = sqrt(s7**2 + 3.*ssh7**2)
85      svm8 = sqrt(s8**2 + 3.*ssh8**2)
86
87
88      return [sax,sbendy,sbendz,\
89              s1,  s2,  s3,  s4,  s5,  s6,  s7,  s8,  \
90              ssh1,ssh2,ssh3,ssh4,ssh5,ssh6,ssh7,ssh8,\
91              svm1,svm2,svm3,svm4,svm5,svm6,svm7,svm8,\
92              sx,symax,szmax]
93
94 twall = t_tilpasset
95 d     =d_ytre_tilpasset   # Ytre dia
96
97 b = loadtxt('sensors_offset400.txt',skiprows=3,dtype='float',delimiter='
    ;')  # load file
98 t      = b[:,0];
99
100  #------------Element 38-------------------
101
102 fx_el38 = b[:,49]*1.e3;
103 mx_el38 = b[:,52]*1.e3;
104 my_el38 = b[:,53]*1.e3;
105 mz_el38 = b[:,54]*1.e3;
106
```

```
107 [sax,sbendy,sbendz,s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,ssh1,ssh2,ssh3,ssh4,ssh5,ssh6
    ,ssh7,ssh8,svm1,svm2,svm3,svm4,svm5,svm6,svm7,svm8,sx,sy,sz] = \
108     cyl_beam_stresses(t,fx_el38,0,0,mx_el38,my_el38,mz_el38,d,twall)
109
110 damage_el38_s1 = fatiguedamage_twoslope(t,s1,m1,loga1,m2,loga2,Nlim,th,
    tref=25E-3,k=0.25)
111 damage_el38_s2 = fatiguedamage_twoslope(t,s2,m1,loga1,m2,loga2,Nlim,th,
    tref=25E-3,k=0.25)
112 damage_el38_s3 = fatiguedamage_twoslope(t,s3,m1,loga1,m2,loga2,Nlim,th,
    tref=25E-3,k=0.25)
113 damage_el38_s4 = fatiguedamage_twoslope(t,s4,m1,loga1,m2,loga2,Nlim,th,
    tref=25E-3,k=0.25)
114 damage_el38_s5 = fatiguedamage_twoslope(t,s5,m1,loga1,m2,loga2,Nlim,th,
    tref=25E-3,k=0.25)
115 damage_el38_s6 = fatiguedamage_twoslope(t,s6,m1,loga1,m2,loga2,Nlim,th,
    tref=25E-3,k=0.25)
116 damage_el38_s7 = fatiguedamage_twoslope(t,s7,m1,loga1,m2,loga2,Nlim,th,
    tref=25E-3,k=0.25)
117 damage_el38_s8 = fatiguedamage_twoslope(t,s8,m1,loga1,m2,loga2,Nlim,th,
    tref=25E-3,k=0.25)
118
119
120 Liste_delskade_el38 = [damage_el38_s1, damage_el38_s2, damage_el38_s3,
    damage_el38_s4, damage_el38_s5,
121                        damage_el38_s6, damage_el38_s7, damage_el38_s8 ]
122
123 maks_delskade_el38 = max(Liste_delskade_el38)
124
125  #-----------------DEL-----------------
126
127 DEL_el38 = ((maks_delskade_el38*k_del)/N_eq)**(1/m1)
128
129 print('Maks delskade i element 38 = %.5e ' %maks_delskade_el38)
130 print('DEL element 38 = %.5e ' %DEL_el38)
```



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitskapelege universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway