

Påvirkning av skader og temperaturendringer på Bridge Weigh In Motion-systemer for jernbane

Hallvard Hotvedt

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Anders Rönquist, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk

Forord

Jeg vil rette en stor takk til Daniel Cantero og Gunnstein Frøseth som i praksis har fungert som mine veiledere. Daniel har hjulpet meg mye med den grunnleggende BWIM-teorien. Gunnstein har bidratt med mye til arbeidet i Abaqus, og gitt forslag til måter å forbedre rapporten på.

Før jeg begynte arbeidet med denne oppgaven hadde jeg aldri hørt uttrykket BWIM. Det har vært spennende å få brukt kunnskapen jeg har tilegnet meg de siste fem årene på måter jeg ikke hadde forestilt meg.



Mye av arbeidet mitt er basert på elementmodellen av Lerelva bro i Abaqus. Takk til Bartosz Siedziako som har utarbeidet modellen og har latt meg bruke denne i arbeidet med oppgaven.

Til slutt vil jeg takke HiB-gjengen på kontoret for to morsomme år i Trondheim!

Hallvard Sømme Hotvedt

.....
Hallvard Sømme Hotvedt

Sammendrag

På det norske jernbanenettet finnes det over 2500 broer som alle må gjennomgå årlige inspeksjoner. *Bridge Weigh In Motion*(BWIM)-systemer kan i fremtiden bli et viktig verktøy i arbeidet med å overvåke den norske jernbanen. Denne oppgaven er ment å gi en kort innføring i hvordan BWIM-systemer er bygd opp og hvordan de kan brukes til å samle informasjon om togene som passerer over broer samt broenes mekaniske egenskaper.

Oppgaven tar først og fremst for seg hvordan konstruksjonsmessige endringer i broer påvirker BWIM-systemer. Det er simulert flere skadescenarier for Lerelva bro i FEM-programmet Abaqus. For å etterligne påvirkningen på et BWIM-system, blir data fra Abaqus deretter behandlet i Matlab. Påvirkningen er beskrevet gjennom endringer i beregnede akselvekter og endringer i broas influenslinjer. Påvirkningen for influenslinjer er beskrevet kvantitativt med variabler for forskjell i amplitude og faseforskyvning for å gi et objektivt mål på endringene.

Funnene i arbeidet med oppgaven har vist at en sensorplassering lik dagens utforming på Lerelva bro ikke er gunstig for å oppdage mindre skader. Brotypen som er brukt i Lerelva bro består av mange konstruksjonsdeler i samvirke som fører kreftene ut i et hovedfagverk. Dette gjør at omfordeling av krefter pga. skader i konstruksjonen i stor grad fordeles jevnt på mellom tilstøtende konstruksjonsdeler. En jevn omfordeling gjør at skader ikke kan oppdages før de er av et så stort skadeomfang at de trolig hadde blitt oppdaget raskere og lettere gjennom manuelle inspeksjoner. Dersom skadene er så store at de gir tydelig utslag i influenslinjer, har det vist seg mulig å antyde skadeplasseringen ved å se hvor endringen i influenslinjene er størst og de relative endringene mellom influenslinjer for sensorene er størst.

For å se hvor tøyningssensorer bør plasseres for å lettest kunne oppdage mindre skader, er det gjennomført en vurdering av influenslinjene for elementer i nærheten av en sprekk. Området er delt inn i et rutenett og strekker seg ca. 300x300 mm ut fra sprekk. Sammenligningene viser at tøyningssensorer bør plasseres høyst 250 mm unna forventet skadeplassering for å kunne tydelig oppdage endringer i influenslinjene.

Stålet i broa vil gjennomgå forandringer ved endrede temperaturer. En del av oppgaven tar for seg endringer i stålets elastitetsmodul ved relevante temperaturer og betydningen av dette for BWIM-systemer. Oppgaven viser sammenhengen mellom temperatur og elastitetsmodul for stål og diskuterer mulige måter å ta hensyn til dette i BWIM-systemer.

Abstract

The Norwegian railroad network contains more than 2500 bridges, which all undergoes yearly inspections. Bridge Weigh In Motion-systems could become an important tool in the process of monitoring the railroad network. This paper is meant to give a brief introduction into the theory of a BWIM-system, and how they could be used to gather information about trains passing over the bridges, and the bridges' mechanical properties.

The paper primarily focuses on how structural changes can affect a BWIM-system. FEA-simulations of different damage scenarios have been carried out for the bridge «Lerelva bro». The FEA-data from Abaqus have subsequently been processed in Matlab, to simulate the effects on a theoretical BWIM-system. The effects are described as changes in the calculated axle weights, and plots of affected influence lines. The changes in influence lines are also described quantitatively through variables describing phase shifts and magnitude changes in influence lines to give an objective measurement.

The findings show that the sensors currently installed at Lerelva bro will not be able to easily detect small structural changes, such as cracks. Lerelva, and similar bridges, consists of an intricate system of structural elements, which redistributes the forces evenly around potential damages. An even redistribution of forces makes it difficult to detect damages before they are so severe, that they probably could be detected faster, and easier by manual inspection. If the damage is allowed to develop to a detectable size, it possible to predict the location based on changes in the influence lines.

To decide where strain gauges should be placed in order to be able to easily detect smaller damages, such as cracks, there has been conducted an assessment of the influence lines in the vicinity of about 300x300 mm from a crack. The comparisons show that strain gauges should be placed not further than around 250 mm from expected crack locations to be able to clearly detect a change in influence lines.

The material properties of steel will change with change in temperature. A part of the paper focuses on changes in the Young's modulus at relevant temperatures, and the impact of these changes on a BWIM-system. The Young's modulus' temperature dependency is discussed, and ways of compensating for these effects are suggested.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag.....	III
Abstract.....	V
1 Innledning.....	1
1.1 Weigh in Motion	1
1.2 Bridge Weigh In Motion	2
1.3 Train-BWIM.....	2
2 Feltmålinger	3
3 Teorien bak BWIM.....	5
3.1 Oppbygningen av en tøyningshistorikk	5
3.2 Signalprosessering.....	7
3.3 Matrisemetoden	9
3.4 Dynamiske effekter.....	10
4 Skadesimulering.....	11
4.1 Arbeid i Matlab	11
4.1.1 Forandringer i influenslinjer	11
4.1.2 Generering av tøyningshistorikk	13
4.1.3 Beregning av akselvekter	14
4.2 Arbeid i Abaqus.....	15
4.2.1 Modellering	15
4.2.2 Svakheter i modellen.....	15
4.2.3 Laster	17
4.2.4 Nøyaktighet.....	19
4.2.5 Nummerering	21
4.2.6 Metode for testing	21
4.2.7 Influenslinjer	22
4.3 Påvirkning på dagens sensorer	22
4.3.1 Grunntilstand.....	24

4.3.2	Skade på langbærer med sensorer – 1a	25
4.3.3	Skade på parallell langbærer – 1b.....	27
4.3.4	Skade på tilstøtende langbærer – 2a.....	29
4.3.5	Skade på parallell tilstøtende langbærer – 2b.....	31
4.3.6	Oppsummering dagens sensorer	33
4.4	Sensor ved skade	35
4.4.1	Tester i Abaqus.....	35
4.4.2	Oppsummering sensor ved skade	39
5	Temperatureffekter.....	41
5.1	Temperaturavhengig elastitetsmodul.....	41
5.1.1	Kompensering for temperaturavhengig elastitetsmodul	42
5.2	Temperaturpåvirkning på Lerelva bro.....	45
5.2.1	Påvirkning på influenslinjer og vektberegninger.....	46
5.2.2	Termisk ekspansjon	48
5.3	Oppsummering temperatureffekter.....	49
6	Konklusjon og forslag til videre arbeid	51
6.1	Konklusjoner	51
6.2	Forslag til videre arbeid	52
7	Referanser	53
8	Vedlegg.....	54

1 Innledning

I 2014 fantes det 2557 broer fordelt på 4219 km i det norske jernbanenettet. (Jernbaneverket 2014) Det er derfor en stor oppgave for Jernbaneverket å drifte og vedlikeholde disse broene. Det norske jernbanenettet strekker seg over store avstander, og traseene ligger ofte ugunstig til med tanke på inspeksjonsmuligheter. Broene må jevnlig inspiseres for skader og slitasje på grunn av påkjenninger fra daglig bruk samt vær og vind. Avhengig av broenes plassering og utforming kan slike inspeksjoner være svært arbeidskrevende

Et mulig hjelpemiddel i arbeidet med broinspeksjoner er *Bridge Weigh in Motion* - systemer(BWIM). BWIM er et system med hovedhensikt å beregne vekt av kjøretøy som passerer over en bro. BWIM-systemer kan også bidra til å overvåke endringer i broas lastrespons. Ved å benytte tøyningmålere og/eller andre sensorer til å oppdage endringer i en bros lastrespons, kan en tilegne seg informasjon om broas konstruksjonsmessige tilstand uten å inspisere broa manuelt. Hensikten med broovervåkning gjennom BWIM-systemer er å kunne erstatte eller utsette deler av inspeksjoner som i dag blir utført manuelt.

I 2004 ble persontransporten på Gjøvikbanen lagt ut på anbud som et forsøk for å vurdere påvirkningen av konkurranseutsetting. I 2016 gikk regjeringen inn for å legge persontransporten på flere togstrekninger ut på anbud. Det er derfor rimelig å anta at flere selskaper de nærmeste årene vil bruke det norske jernbanenettet. I en konkurranseutsatt bransje vil det være større fokus på å utnytte ressursene maksimalt. Det vil kunne bety at jernbanenettet som fremdeles eies og vedlikeholdes av Jernbaneverket, kan bli utsatt for større påkjenninger fra økt trafikk, tyngre tog eller høyere hastigheter. Et BWIM-system vil kunne være et godt hjelpemiddel for å kunne overvåke påkjenningen og tilstanden på broene, men også for å samle informasjon om togene på jernbanenettet.

1.1 Weigh in Motion

Weigh In Motion (WIM) er en teknikk som er i bruk over hele verden. Grunnprinsippet for alle WIM-systemer er å kunne bestemme vekt for et kjøretøy mens det er i bevegelse. WIM er mest brukt i forbindelse med vektkontroller av tyngre kjøretøy på veg.

Utstyr som brukes til WIM er ofte lastceller som måler tøyning i et internt medium, som for eksempel en metallfolie. Dette gjøres ved å sende en strøm gjennom mediet, og måle den elektriske motstanden. Motstanden avhenger av tøyningen i folien, som igjen er avhengig av de ytre kreftene som virker på sensoren. Gjennom disse sammenhengen kan det bestemmes hvilke krefter som virker på sensoren.

1.2 Bridge Weigh In Motion

Bridge Weigh in Motion(BWIM)-systemer har samme formål som WIM, men BWIM bruker en bros mekaniske egenskaper for å estimere kjøretøys aksel- og totalvekter. Metoden baserer seg på tolkning av tøyningene som oppstår i konstruksjonen når et kjøretøy passerer over. Ved hjelp av et BWIM-system kan en også vurdere broas tilstand ved å se på endringer i broas respons på kjente laster.

I motsetning til utstyret som brukes i WIM, måler utstyret i BWIM-systemer tøyninger på selve konstruksjonen, ikke internt i en lastcelle. Hele konstruksjonen virker da på samme måte som mediet i lastcellen. Den ytre påvirkningen bestemmes dermed ved å etablere en kjent sammenheng mellom tøyninger og ytre påkjenning. Til bruk på broer beskrives denne sammenhengen vha. en influenslinje (Beskrevet i kapittel 4.2.7).

1.3 Train-BWIM

Selv om de samme grunnprinsippene gjelder for tog som for biler og lastebiler, er det flere grunner som gjør at prosessen forenkles når den brukes til jernbane. Det vil som regel være en del variasjoner i bilers posisjon i vegbanen, noe som gir andre utfordringer i WIM-algoritmen (Quilligan 2003). For jernbane reduseres problemet til én dimensjon, da togene har neglisjerbar sideveis bevegelse. Et annet problem en unngår, er at det befinner seg flere kjøretøy innenfor influensområdet for sensorene mens målingene foregår. Det vil være større avstander mellom tog enn mellom biler og lastebiler. Men den korte avstanden mellom vognene i et tog kan føre til problemer med å skille mellom påvirkningene fra de enkelte vognene. For gitte jernbanestrekninger er det som regel større kunnskap om hvilke togtyper som trafikkerer strekningen, enn for vegstrekninger og biler. Dette gjør det enklere å estimere akselavstander og –vekter.

2 Feltmålinger

Den 16. mars 2016 ble det gjennomført målinger for seks togpasseringer over Lerelva bru. Fem av målingene ble gjort for passeringer med togtypen NSB92. Den siste målingen ble gjort for en passering av et lengre godstog. Målingene er gjort for å kunne relatere det teoretiske arbeidet i Matlab og Abaqus til en eksisterende bro. Tøyningsensorene var på forhånd montert av Gunnstein Frøset og Daniel Cantero.

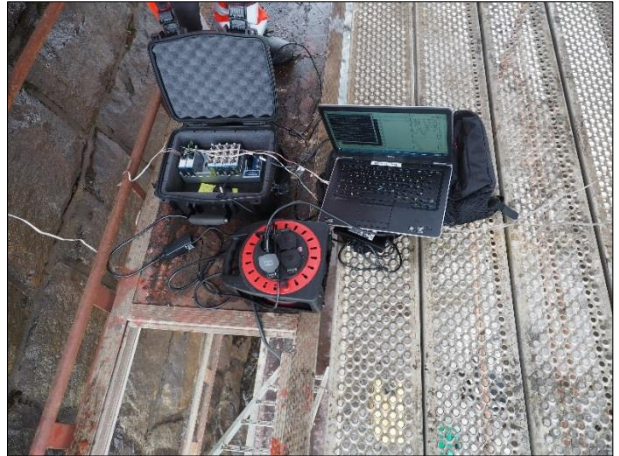


Figur 2.1 Passerende tog under feltmåling

Målingene ble utført ved hjelp av 3stk 3mm 120 ohms strekkklapper som sammen med en signalomformer (National Instruments NI 9235) registrerte tøyningene med en frekvens på 1024 Hz. Det ble brukt en bærbar generator til strømforsyning. Dette ga målingene litt uventet støy på rundt 50 Hz, sannsynligvis på grunn av ustabil bølgeform i strømforsyningen fra generatoren.

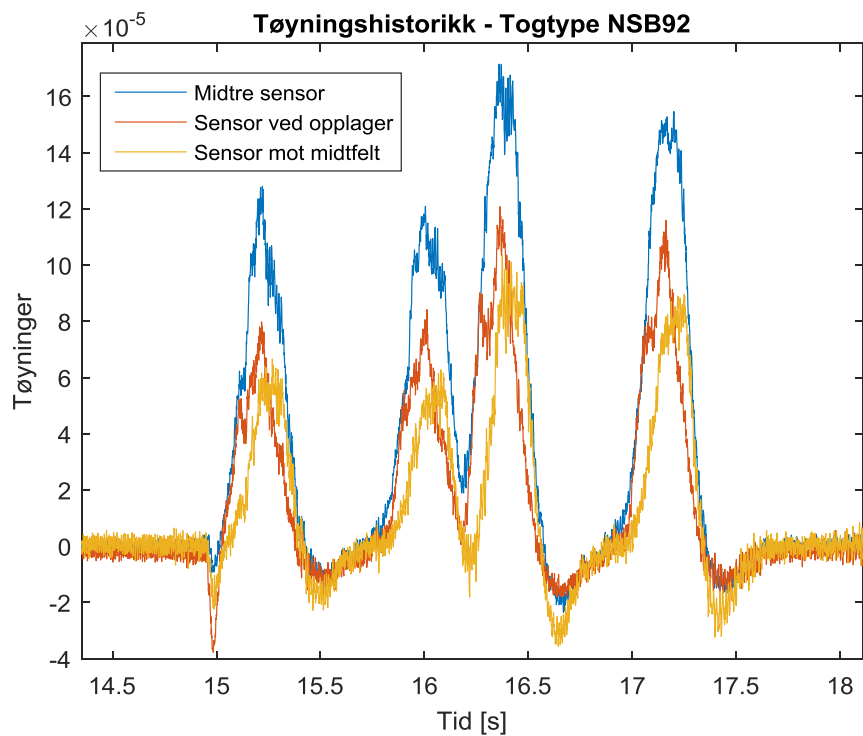


Figur 2.3 Tøyningssensor på underflens



Figur 2.2 Utstyr brukt til å logge tøyningshistorikken

Målingene ga tydelige utslag ved togpasseringer. Hver boggi gir en dobbel topp i signalet. Figur 2.4 viser de ufiltrerte signalene fra sensorene i tidsrommet for en togpassering.



Figur 2.4 Tøyningmålinger for en passering med togtype NSB92

3 Teorien bak BWIM

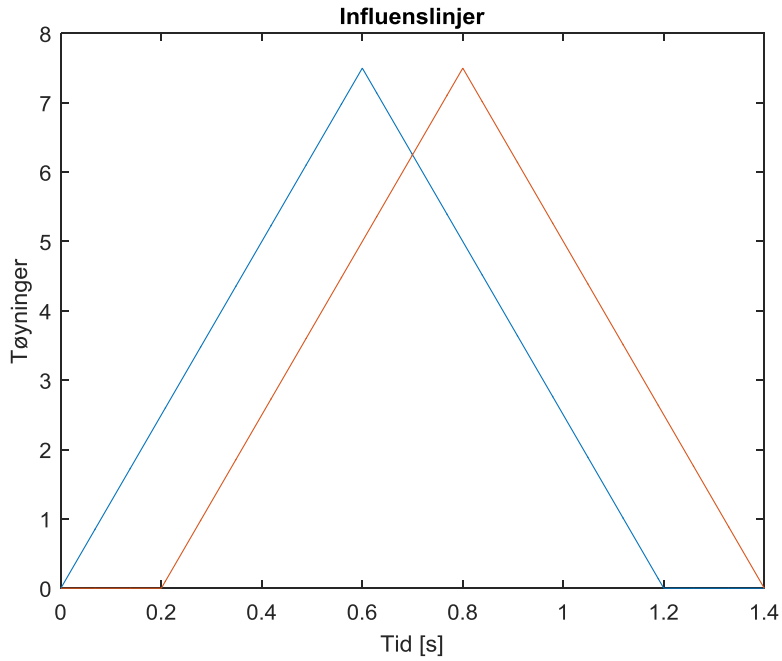
Det er en rekke egenskaper ved togene som kan bestemmes ved å behandle tøyningensdataen fra passeringer. Totalvekt og akselvekter er de viktigste produktene fra signalprosesseringen. Prosessen brukt i forbindelse med denne oppgaven baserer seg på Moses' algoritme, som beskrevet av (Quilligan 2003). I dette kapitlet er teorien forklart i korte trekk.

3.1 Oppbygningen av en tøyningshistorikk

En tøyningshistorikk er tøyningmålinger gjort på en konstruksjon under påkjenning av et passerende tog. Tøyningshistorikken bestemmes av broas og togets egenskaper. En BWIM-algoritme må kunne dekomponere et fullstendig tøyningsdiagram tilbake i dets komponenter for å kunne bestemme hvor stor innvirkning de ulike komponentene har hatt på tøyningshistorikken. Disse komponentene er broas influenslinje og togets akselvekter, akselavstander og hastighet

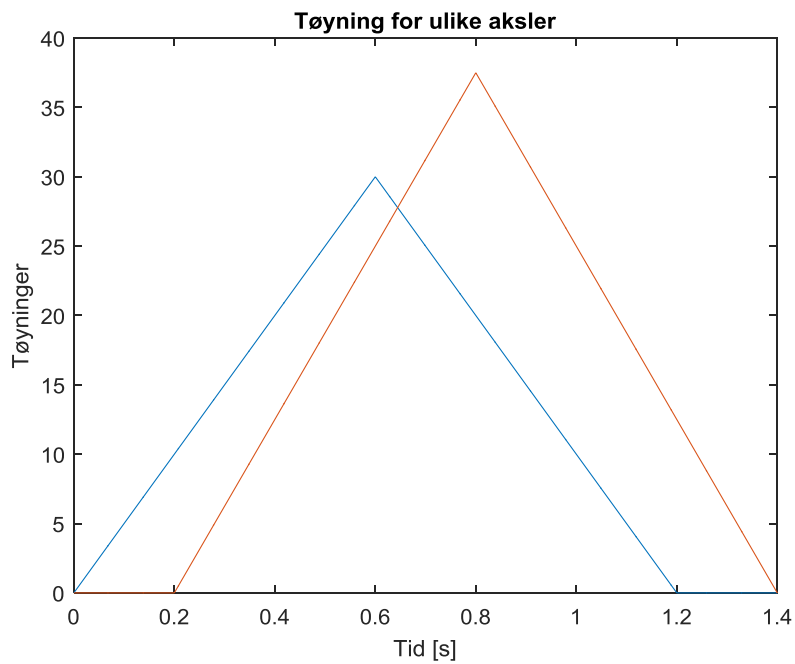
En influenslinje beskriver den lastresponsen et punkt i en konstruksjon utsettes for når den påvirkes av en enhetslast i alle posisjoner langs konstruksjonen. Ved å gi enhetslasten en kjent hastighet kan influenslinjene beskrives som en funksjon av tid. En influenslinje brukes som regel til å beskrive momenter eller skjærkrefter. I BWIM blir det brukt sensorer som måler tøyninger over tid. Derfor er det mest hensiktsmessig å beskrive influenslinjene som en tøyningfunksjon av tid $\varepsilon = f(t)$.

Lastresponsen for hver aksel kan beskrives vha. influenslinjen og tilhørende akselvekt. Influenslinjen for sensoren kopieres opp en gang for hver aksel og tilpasses for tiden den enkelte aksel influerer broa. I Figur 3.1 vises influenslinjer for to enhetslaster som beveger seg over en idealisert, fritt opplagret bjelkebro. Influenslinjene har samme form, da de beskriver tøyningene i det samme punktet i konstruksjonen. Faseforskyvningen kommer av at enhetslastene påvirker konstruksjonen i ulike tidsrom.



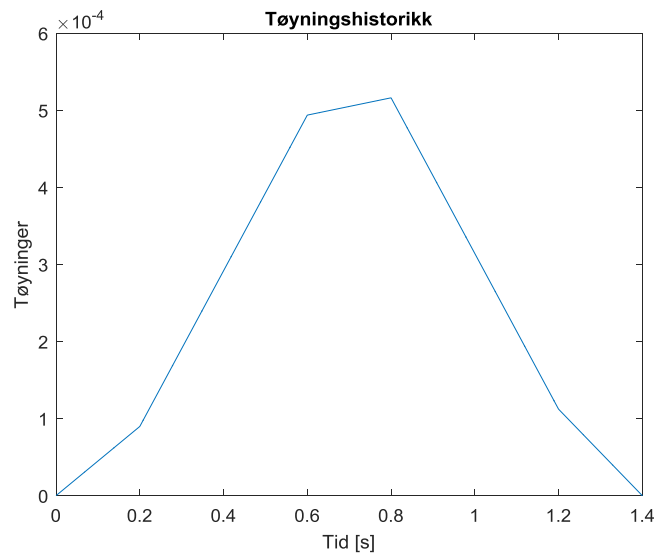
Figur 3.1 Eksempel på to influenslinjer for en idealisert bjelkebro.

Ulike akselvekter vil ha ulik påvirkning på det totale tøyningsdiagrammet. Ved å multiplisere influenslinjene med de tilhørende akselvektene, kan man bestemme lastvirkningen for hver enkelt aksel, som vist i Figur 3.2. Den oransje akselen har større vekt og har dermed innført større tøyninger i konstruksjonen.



Figur 3.2 Lastvirkning for hver aksel

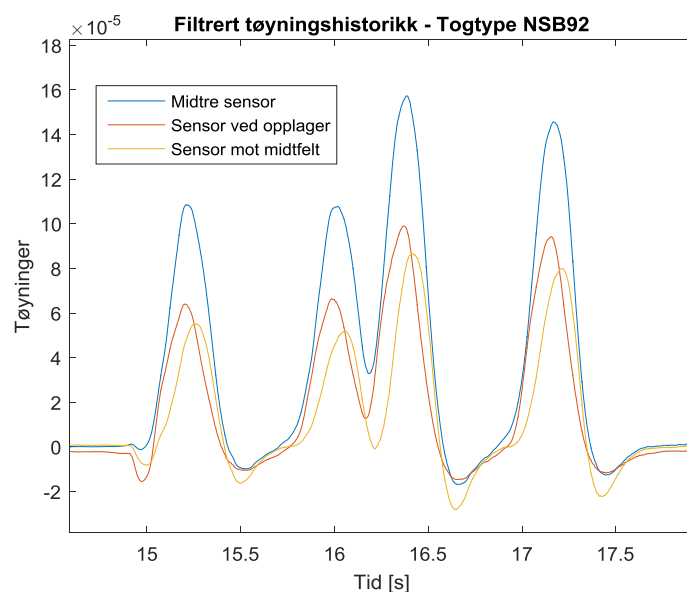
Ved å summere lastvirkningene for alle aksler, kan en bestemme tøyningsdiagrammet for en togpassering. I Figur 3.3 vises tøyningsdiagrammet for et tenkt tog med to aksler. Det er et slikt tøyningsdiagram en vil kunne registrere ved hjelp av tøyningmålere montert på en bro.



Figur 3.3 Total lastvirkning for to aksler

3.2 Signalprosessering

Figur 3.4 viser det samme tøyningsdiagrammet som Figur 2.4, men her filtrert for å eliminere støy i målingene. Filtrering er første steg i arbeidet med vektberegningene. En av de største utfordringene med et BWIM-system er å finne algoritmer som kan bestemme akselvekter ut i fra et slik tøyningsdiagram. En BWIM-algoritme må i korte trekk finne ut hvor mange aksler som påvirker tøyningen og hvor tung hver aksel er.



Figur 3.4 Filtrerte tøyningmålinger for en passering med togtype NSB92

Ved å anta at en befinner seg innenfor stålets elastiske tøyningsgrense, kan en bruke superposisjonsprinsippet og si at tøyningene, ε , til enhver tid er summen av akselvektene multiplisert med influenslinjens verdi i akselens posisjon.

$$\varepsilon(t) = \sum_0^{\text{Antall aksler}} [I(t)] * [A] \quad \text{Ligning 3.1}$$

En slik ligning settes opp for hvert datapunkt i målingen. Utstyret brukt i forbindelse med denne oppgaven registrerte tøyninger med en frekvens på 1024 Hz. Antall datapunkter for en passering vil variere med brolengde, toglangde og hastighet, men det er ofte snakk om flere tusen datapunkter, og dermed flere tusen ligninger for hver passering.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^{th}(t_1) \\ \varepsilon^{th}(t_2) \\ \varepsilon^{th}(t_3) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon^{th}(t_T) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1(t_1) & I_2(t_1) & \cdot & \cdot & I_n(t_1) \\ I_1(t_2) & I_2(t_2) & \cdot & \cdot & I_n(t_2) \\ I_1(t_3) & I_2(t_3) & \cdot & \cdot & I_n(t_3) \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ I_1(t_T) & I_2(t_T) & \cdot & \cdot & I_n(t_T) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{Bmatrix}$$

Figur 3.5 Ligningssett for en togpassering (Rowley 2007).

Hvert ligningssett gir én løsning for akselvektene. Man vil med andre ord få forskjellige beregnede akselvekter for hvert datapunkt i målingen. Ved å anta et sett akselvekter, kan en beregne hva tøyingsverdiene i konstruksjonen teoretisk sett skulle ha vært. Disse teoretiske tøyningene kan sammenlignes med de målte tøyningene for alle ligningene. Ved å justere de antatte, teoretiske akselvektene, kan en iterere seg frem til det settet med akselvekter som i gjennomsnitt oppfyller ligningene i Figur 3.5 best. Forskjellen mellom teoretiske og målte tøyninger beskrives gjennom en feilfunksjon basert på minste kvadraters metode (Ligning 3.2).

$$\psi = \sum_{i=1}^T (\varepsilon_i^{me} - \varepsilon_i^{th})^2 \quad \text{Ligning 3.2} \\ \text{(Rowley 2007)}$$

Ved å minimere feilfunksjonen (Ligning 3.2), kan det vises at settet med de mest sannsynlige akselvektene er gitt ved Ligning 3.3 (Rowley 2007).

$$\{A\} = ([I_A]^T [I_A])^{-1} ([I_A]^T \{\varepsilon^{me}\}) \quad \begin{array}{l} \text{Ligning 3.3} \\ \text{(Rowley 2007)} \end{array}$$

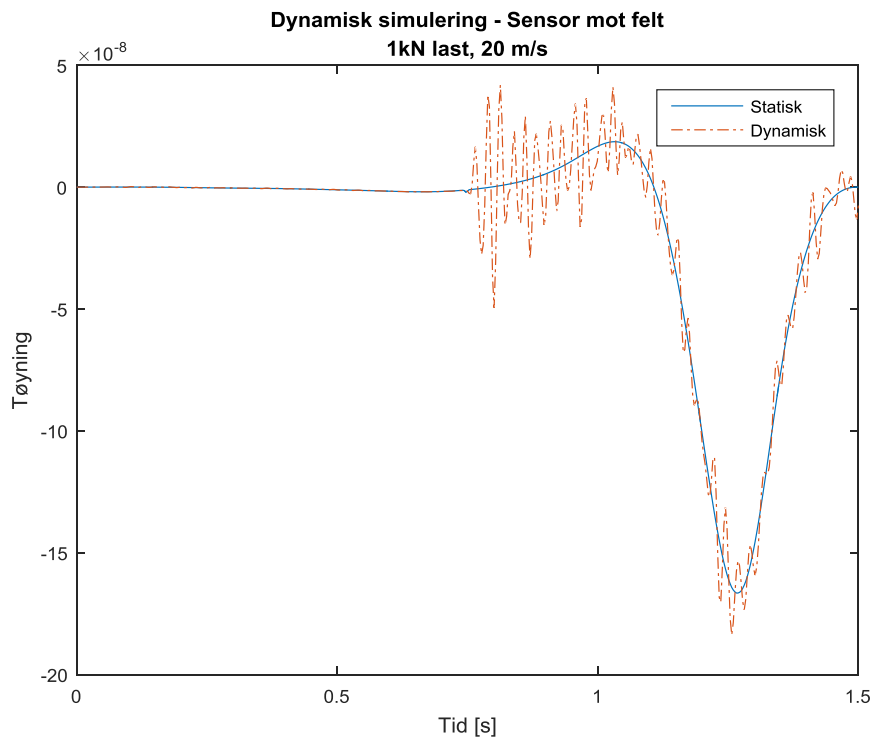
Når en finner settet med akselvekter som gir minst mulig forskjell i teoretiske og faktiske tøyingsverdier, har en funnet de mest sannsynlige akselvektene. Hvor nøyaktig akselvektene kan bestemmes, kommer an på hvor nøyaktig influenslinjen er bestemt, og i hvor stor grad en klarer å eliminere støy og ta hensyn til dynamiske effekter i målingene.

3.3 Matrisemetoden

BWIM-algoritmer krever en nøyaktig influenslinje for å fungere optimalt. Denne kan beregnes teoretisk, eller den kan estimeres vha. kalibrasjonskjøretøy med kjente akselavstander og -ekter. Metoden som brukes til å beregne influenslinjer vha. kalibrasjonskjøretøy kalles matrisemetoden. De grunnleggende sammenhengene beskrevet i avsnittet over brukes også i matrisemetoden, men her minimeres feilfunksjonen (Ligning 3.2) ved å justere verdiene for influenslinjen, ikke akselvektene (Quilligan 2003). På denne måten er det mulig å oppdage endringer i influenslinjer på grunn av skader eller temperatureffekter og kompensere for dette under beregningen av akselvektene. Endringer i influenslinjen for en konstruksjon vil også kunne fortelle noe om endringer i mekaniske egenskaper.

3.4 Dynamiske effekter

Metoden beskrevet i kapitlene over behandler hver tøyningmåling som en løsning på et statisk problem, som vist i Figur 3.5. Dersom en betrakter en togpassering som en rekke statiske problemer, er sammenhengene mellom vekt og posisjon forholdsvis enkle å forholde seg til. I praksis derimot, vil tøyningmålingene til enhver tid være avhengige av de tidligere målingene, da broa utsettes for dynamiske effekter fra lastene som forflytter seg langs konstruksjonen.



Figur 3.6 Sammenligning dynamisk og statisk influenslinje

Dynamiske effekter på grunn av flere laster lar seg ikke superposisjonere på samme måte som statiske laster. Det er derfor en del usikkerheter knyttet til å benytte statiske influenslinjer for tog som passerer i ulike hastigheter, da algoritmene tradisjonelt sett baserer seg på superposisjonsprinsippet. Harmoniske vibrasjoner er mulig å ta hensyn til ved bruk av en statisk influenslinje, da tøyningene vil oscillere på begge sider av den statiske løsningen og i gjennomsnitt utjevne hverandre (Cantero og Gonzalez 2014). Figur 3.6 viser hvordan den dynamiske influenslinjen oscillerer rundt den statiske. Den dynamiske influenslinjen er generert i Abaqus med en lasthastighet på 20 m/s.

Når flere ulike laster virker på broa, er det vanskelig å ta hensyn til den kombinerte effekten med en felles, statisk influenslinje. For å redusere antall variabler i arbeidet med skadesimulering er videre simuleringer beregnet som statiske problemer.

4 Skadesimulering

For å se på ulike skadescenario som kan påvirke et BWIM-system for tog, er det gjort en rekke simuleringer i FEM-programmet Abaqus. Dataene er etterbehandlet i Matlab. Det er ønskelig å se hvor stor en skade må være før den kan oppdages som endringer i influenslinje, hvordan endringen i så fall påvirker et BWIM-system, og om det er mulig å lokalisere skaden på grunnlag av endringen i influenslinjene. Alle simuleringer er gjort for Lerelva bro.

4.1 Arbeid i Matlab

«Matlab er et kraftfullt matematisk program som brukes på veldig mange høyskoler og universiteter over hele verden. Det kan brukes til numeriske beregninger av tall, vektorer og matriser, symbolsk beregninger av algebraiske uttrykk og plotting av både todimensjonale og tredimensjonale grafer. Matlab tilbyr i tillegg til dette et eget programmeringsspråk som gjør mulighetene tilnærmet endeløse.»

(Matematikk.net 2016)

En stor del av oppgaven har gått ut på å simulere et BWIM-system i Matlab. Det er utviklet script som behandler data fra Abaqus på samme måte som et BWIM-system ville gjort.

For å se hvordan endringer i en bro mekaniske egenskaper vil påvirke beregningene i et BWIM-system, er det utviklet script som genererer tøyningshistorikker for tenkte togpasseringer. Scriptet bruker influenslinjer fra Abaqus og data om togene fra NSB. Det er også laget script som prosesserer tøyningshistorikkene på en lignende måte som et BWIM-system ville gjort.

4.1.1 Forandringer i influenslinjer

Forandringer i influenslinjer kan beskrives grafisk gjennom plot av datasett, men dette vil i stor grad være en subjektiv og ikke-kvantifiserbar vurdering. For å kunne beskrive forskjellene i to influenslinjer er det derfor benyttet «Sprague and Geers metric», som beskrevet av (Schwer 2007). Sprague and Geers metric beskriver magnitodeforskjell(M_{SG}) og faseforskjell(P), samt et felles måltall(C_{SG}) for forskjellene i to målinger, som for eksempel to influenslinjer.

Måltallene beregnes vha. Ligning 4.1, Ligning 4.2 og Ligning 4.3.

$$M_{SG} = \sqrt{\vartheta_{cc}/\vartheta_{mm}} - 1 \quad \text{Ligning 4.1 (Schwer 2007)}$$

$$P = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(\vartheta_{mc} / \sqrt{\vartheta_{mm}\vartheta_{cc}} \right) \quad \text{Ligning 4.2 (Schwer 2007)}$$

$$C_{SG} = \sqrt{M_{SG}^2 + P^2} \quad \text{Ligning 4.3 (Schwer 2007)}$$

Hvor

$$\vartheta_{mm} = (t_2 - t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_2} m^2(t) dt \quad \text{Ligning 4.4 (Schwer 2007)}$$

$$\vartheta_{cc} = (t_2 - t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_2} c^2(t) dt \quad \text{Ligning 4.5 (Schwer 2007)}$$

$$\vartheta_{mc} = (t_2 - t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_2} m(t)c(t) dt \quad \text{Ligning 4.6 (Schwer 2007)}$$

Der **m(t)** er referanse-influenslinjen for aktuell sensorplassering, og **c(t)** er influenslinjen for den samme sensorplasseringen, men med endret konstruksjon.

M_{SG} beskriver den relative, gjennomsnittlige amplitudeforskjellen mellom to influenslinjer og kan vise om tøyningene øker eller minker.

P beskriver den relative faseforskjellen mellom to influenslinjer og kan vise om det oppstår tøyninger andre steder enn tidligere.

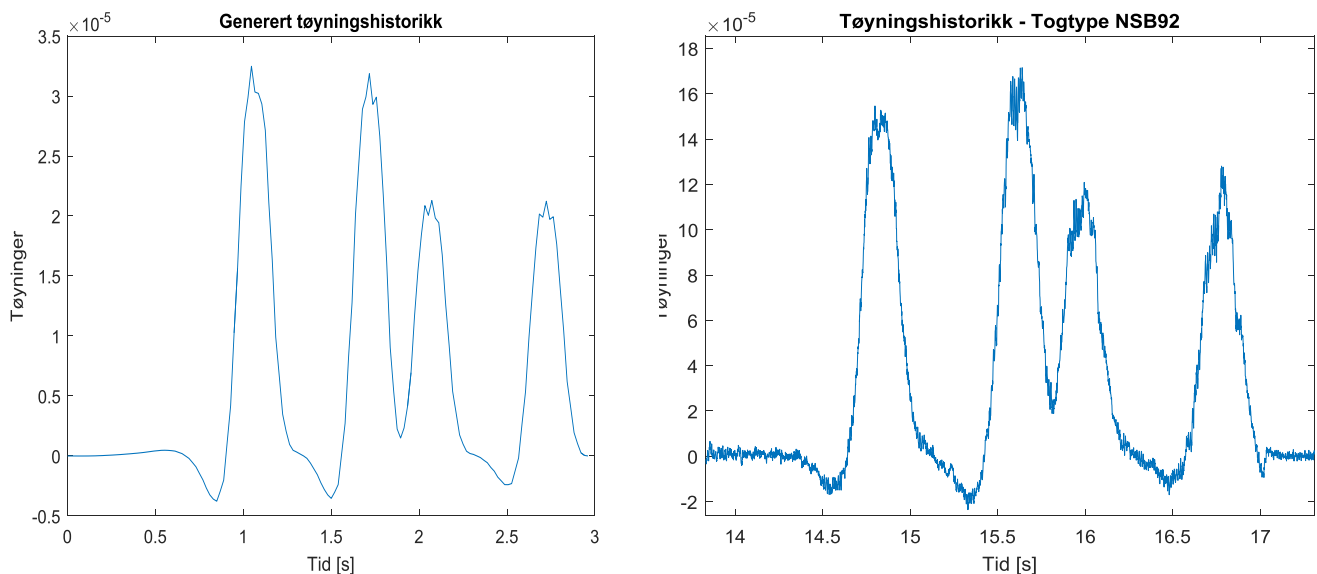
C_{SG} er et felles måltall på både amplitude- og faseforskjellen.

En influenslinje som beholder formen, men øker i amplitude, vil gi høyere utslag på **M_{SG}** enn **P**. En influenslinje som endrer form, men beholder tilnærmet samme amplitude, vil gi høyere utslag på **P** enn **M_{SG}**. For influenslinjer uten endringer vil alle de tre måltallene alltid være null.

Influenslinjene er lagret som vektorer i Matlab og ikke som funksjoner av tid. Alle datapunkter er lagret med likt tidsintervall. Konstantene i Ligning 4.4, Ligning 4.5 og Ligning 4.6 er derfor regnet ved å summere produktene av de respektive datapunktene (m^2, c^2 og mc). Alle influenslinjene strekker seg over en lik tidsperiode. Leddet $(t_2-t_1)^{-1}$ er utelatt, da det ikke ville påvirket sammenligningene.

4.1.2 Generering av tøyningshistorikk

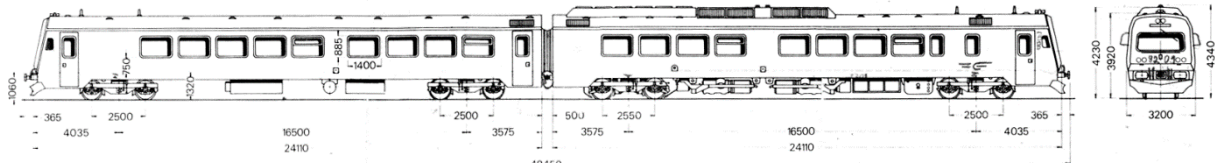
Det er generert tøyningshistorikker for alle simuleringer i Abaqus. Tøyningshistorikken er generert med akselavstander og -vektor tilhørende togtypen NSB92. Det er denne togtypen som gjennomfører flest passeringer over Lerelva bro og er dermed mest aktuell for bruk til eventuelle videre forsøk. Et passasjertog vil ha mindre variasjoner i akselvektor fra passering til passering enn for eksempel godstog og egner seg dermed bedre til å se på endringer i BWIM-målinger over lengre tidsperioder. Tøyningshistorikken er generert i et Matlabscript som følger fremgangsmåten i kapittel 3.1. Scriptet er vist i vedlegg F



Figur 4.1 Generert- og faktisk tøyningshistorikk

Figur 4.1 viser den genererte- og den faktiske tøyningshistorikken for en passering med NSB92. Ved å generere tøyningshistorikken på denne måten, er influenslinjen den eneste variabelen som påvirker beregningene av akselvektene.

Akselvektene er bestemt ut i fra vognvekt og akselantall. For motorvogn er vekten 58,3 tonn og for styrevogn 38,3 tonn (Tognett.no 2016). Det er fire aksler på hver vogn, akselvektene er satt til 145.5 kN for motorvogn, og 95.8 kN for styrevogn. Akselavstander er hentet fra Figur 4.2.



Figur 4.2 Akselavstander togtype NSB92

4.1.3 Beregning av akselvekter

For å se hvordan endringer i influenslinjene vil påvirke et BWIM-system, blir tøyningshistorikken for togpasseringer over de skadede modellene behandlet i et BWIM-script. Scriptet beregner akselvektene på grunnlag av tøyningshistorikken generert med endrede influenslinjer, men det bruker influenslinjen for uendret konstruksjon i beregningene. Dersom BWIM-systemet ikke kompensere for stivhetsforandringer eller skader, er det influenslinjen for uendret konstruksjon som legges til grunne for beregningene av akselvekter. Scriptet er basert på fremgangsmåten beskrevet i kapittel 3.2.

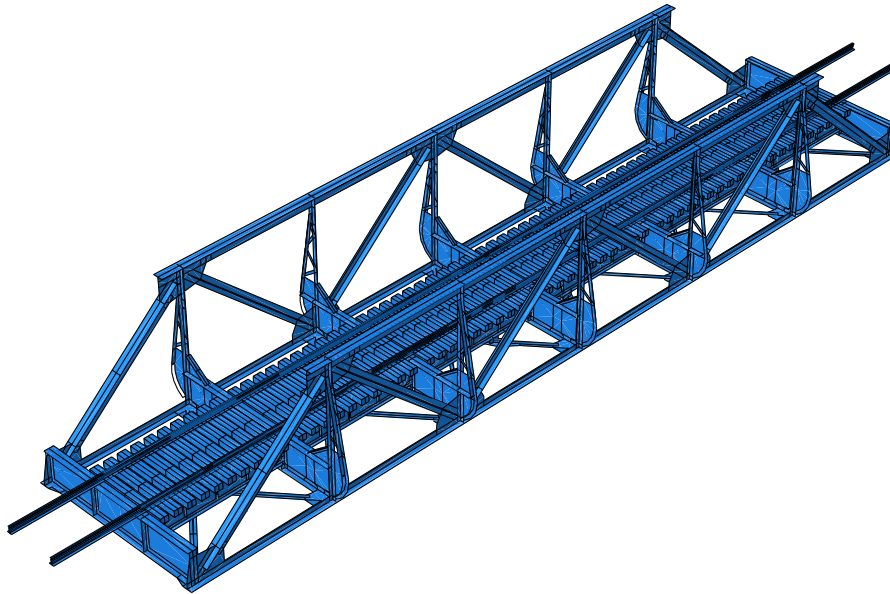
Hovedformålet er å se om det er mulig å oppdage skader eller endringer i stivhet på grunnlag av beregnede akselvekter.

4.2 Arbeid i Abaqus

Abaqus er elementmetode-programmet som er tilgjengelig for studenter ved NTNU. Programmet er svært omfattende og gir mange muligheter for modellering av ulike materialer og laster.

4.2.1 Modellering

Broa er modellert av Bartosz Siedziako (Stipendiat, NTNU).

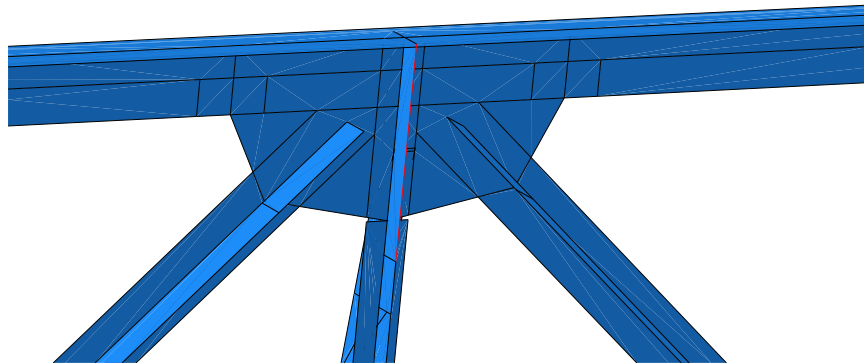


Figur 4.3 Abaqusmodellen

Modellen svært detaljert. Den består av 42 ulike konstruksjonsdeler som til sammen er brukt 188 ganger for å danne FEM-modellen av broa. Profilene er modellert i 19 forskjellige tykkelser, fra 7 til 60 mm, noe som gjør modellen svært virkelighetsnær. Alle konstruksjonsdeler er modellert som stål med elastitetsmodul lik 210 000 MPa. Tresvillene er modellert med elastitetsmodul lik 10 000 MPa.

4.2.2 Svakheter i modellen

I sammenføyningene av de ulike konstruksjonsdelene er det gjort forenklinger. I virkeligheten er alle forbindelser utført vha. naglede skjøte- og forbindelsesplater. I modellen er alle konstruksjonsdeler fullstendig sammenføyd. Dette vil gjøre at modellen oppfører seg stivere enn hva virkeligheten tilsier. Festbraketter og -vinkler er modellert som tykkere tverrsnitt der disse overlapper med andre konstruksjonsdeler.



Figur 4.4 Modellert knutepunkt

Broa har en dosering på ca. 7 grader, dette gjør at vann fra nedbør renner langs tresvillene mot en side. Dette har ført til økt korrosjon i overflensen på den ene langbæreren. I modellen er langbærerne modellert uskadd på begge sider.



Figur 4.5 Korrosjonsskader toppflens langbærer

Det er utført en del vedlikehold på broa. Ved opplageret i nord er for eksempel en skjøteplate byttet ut, og naglene er erstattet av bolter. Slike reparasjoner vil gjøre at initialspenningene i stålet pga. egenvekt og setninger omfordeles. Dette er det ikke tatt hensyn til i modellen.

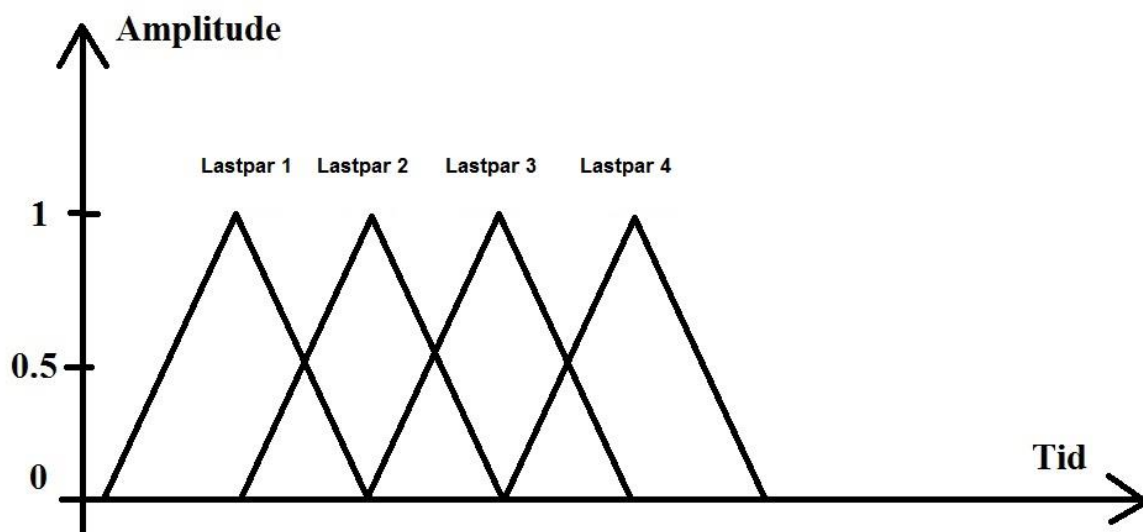


Figur 4.6 Reparert skjøteplate ved opplager

4.2.3 Laster

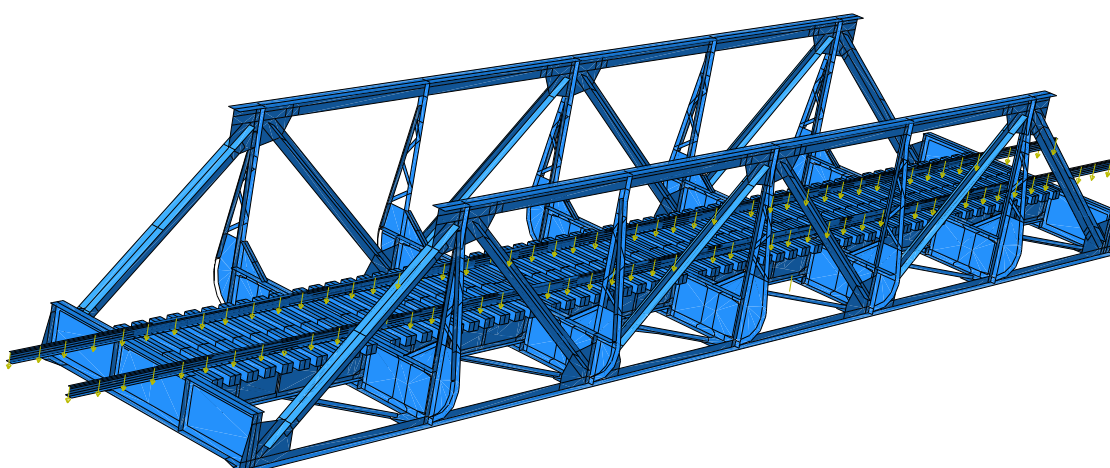
Ved hjelp av et pythonscript skrevet av Gunnstein Frøseth (Stipendiat, NTNU), er det opprettet tidsavhengige laster i modellen. Amplitudene endres lineært fra 0 til 1 i rekkefølge over tid slik at lastsettet oppfører seg som en bevegende last langs skinnegangene over broa som vist i Figur 4.7. Lastene virker i par. To og to laster på 0,5 kN opererer med samme amplitudetider på hver sin skinnegang slik at det til enhver tid virker en last på 1kN på konstruksjonen.

Figur 4.7 viser hvordan amplituder for to og to lastpar overlapper slik at summen av alle laster alltid er lik 1 kN.



Figur 4.7 Tidsavhengige lastamplituder

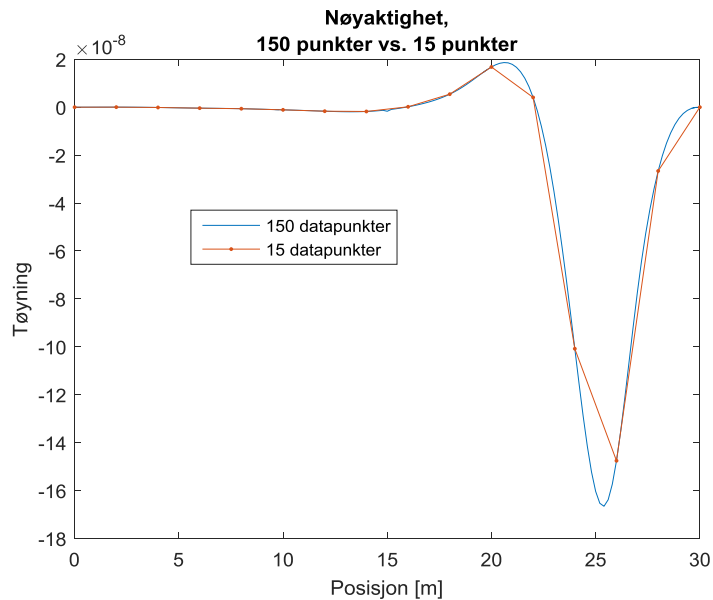
Scriptet leter etter noder i en ønsket senteravstand og oppretter en last i noden nærmest ønsket posisjon. For å oppnå best mulig presisjon, ble senteravstanden satt til 90,09 mm. Det er avstanden mellom nodene i elementene som utgjør skinnegangene. Dersom senteravstanden ble satt til noe annet enn et multiplum av denne avstanden, stemte ikke lengre tidene for last-amplitudene overens med plasseringen, da tidene blir bestemt ut fra ønskede lastplasseringer og ikke faktiske posisjoner (som kun kan være i noder). Resultatet ble da at lasten ikke hadde konstant amplitude og hastighet gjennom simuleringen.



Figur 4.8 Laster på modellen

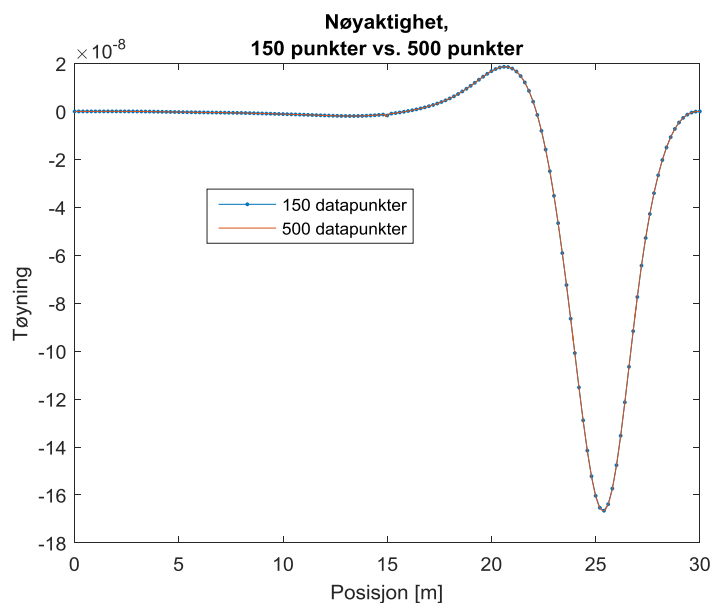
4.2.4 Nøyaktighet

For å bestemme hvor mange datapunkter som anses tilstrekkelig for å kunne oppdage endringer i influenslinjene, er det utført beregninger på grunnmodellen med 15, 150 og 500 datapunkter. Influenslinjen som er hentet ut er gjeldende for den midtre av dagens sensorer på Lerelva bro.



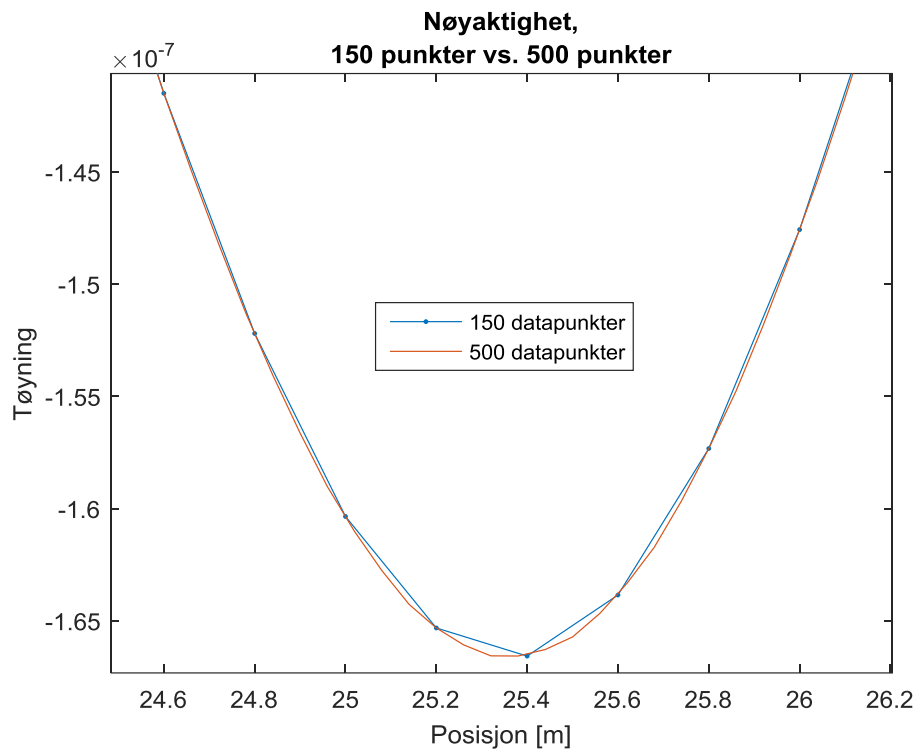
Figur 4.9 Influenslinje for midtsensor

Figur 4.9 viser influenslinjen beregnet med 15 datapunkter og 150 datapunkter. Grafene sammenfaller til en viss grad, og det er mulig å oppdage større endringer i formen på influenslinjen, selv med 15 datapunkter.



Figur 4.10 Influenslinje midtsensor 150 og 500 datapunkter

Figur 4.10 viser influenslinjen beregnet med 150 datapunkter og 500 datapunkter. Grafene sammenfaller i stor grad. Forstørret en området ved 25 meter, ser en forskjellene mellom influenslinjene.

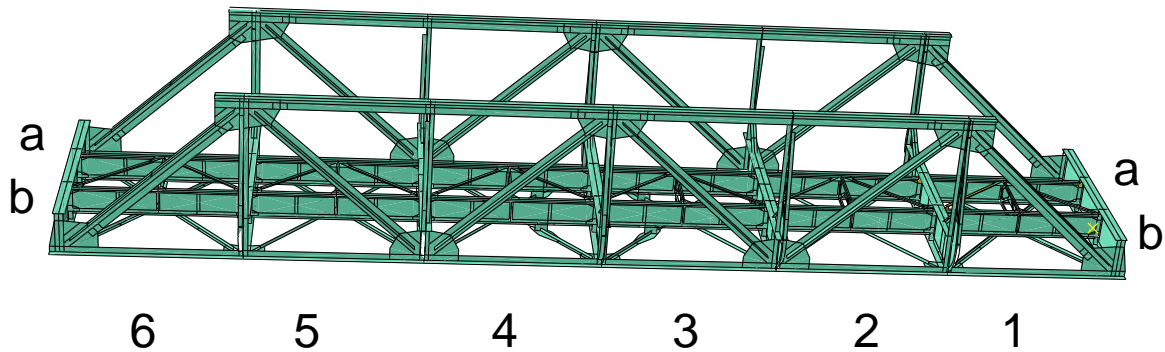


Figur 4.11 Influenslinjene fra Figur 4.10 ved posisjon=25 m

Beregningene ser ut til å konvergere mot samme løsning fra ca. 150 datapunkter og oppover. Beregninger i Abaqus utført med 150 «time steps» (datapunkter) anses å være tilstrekkelig for å oppdage forskjeller i influenslinjene.

4.2.5 Nummerering

I de følgende testene er feltene på broa nummerert ifølge Figur 4.12. Tverrbærerne deler broa i felt. Hver langbærer representerer ett felt.

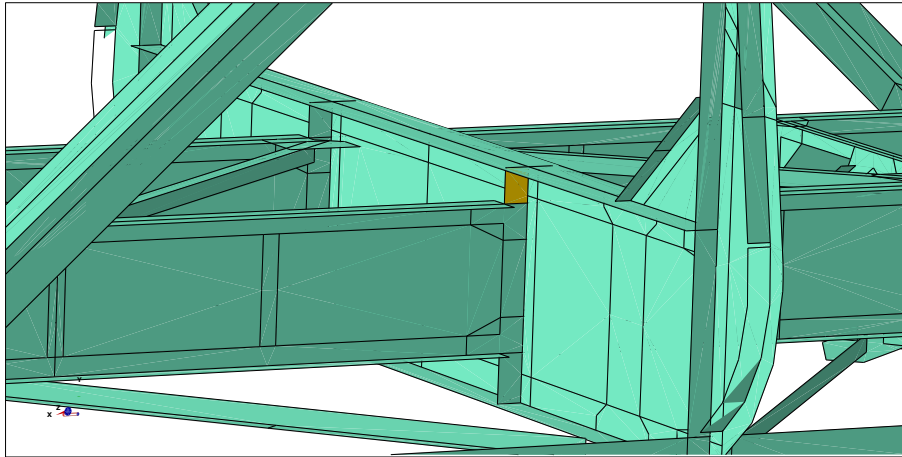


Figur 4.12 Nummerering av felt

Sensorene som er montert på Lerelva bro, sitter på langbærer 1a. Langbærere som kalles parallelle, ligger langs b-linjen. Langbærere som kalles tilstøtende, ligger i felt 2.

4.2.6 Metode for testing

De to mest åpenbare måtene å endre broas mekaniske egenskaper på, er å endre broas geometri eller materialegenskaper. Å endre broas geometri, for eksempel ved å innføre sprekker, vil være mest riktig med tanke på hvilke type skader som kan opptre for Lerelva bro. Å gjøre geometriske endringer i en så detaljert FEM-modell, fører derimot med seg en del utfordringer. Når det gjøres geometriske endringer, må elementene i modellen tilpasses geometrien på nytt (re-meshing). Dette kan innføre flere endringer i modellen enn bare den tiltenkte geometriske endringen. For å utelukke flest mulige ukjente påvirkninger, er det valgt å endre deler av broas materialegenskaper. Dette gjøres ved å tildele konstruksjonsdelene et nytt tverrsnitt. Det er opprettet et «bruddtverrsnitt», med et tilhørende «bruddmateriale» i Abaqus. Dette tverrsnittet har en elastitetsmodul ~ 0 MPa, og dermed stivhet ~ 0 . Det vil med andre ord ikke kunne overføre krefter, i likhet med en sprekk i konstruksjonen.



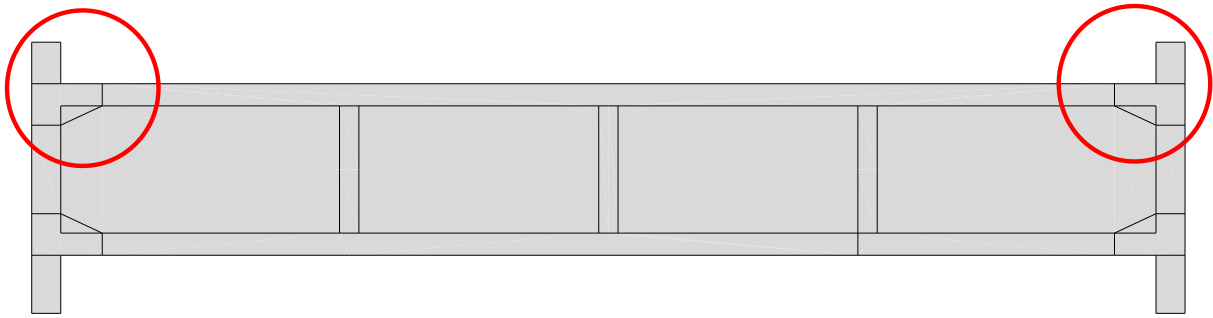
Figur 4.13 Eksempel på element-sett som er gitt andre materialegenskaper

4.2.7 Influenslinjer

Influenslinjene hentes ut i form av tøyningene i elementer i ønskede posisjoner, som for eksempel dagens sensorplasseringer på Lerelva bro. En simulering i Abaqus er 1,5 sekund lang, og det hentes ut tøyningverdier hvert 0,01 sekund. Det gir 150 datapunkter for hver influenslinje. I virkeligheten måler sensorer tøyningen i en bestemt retning. Det er derfor hentet ut tøyninger i broas lengderetning for sensorene i dagens plassering. Disse står på en konstruksjonsdel som uansett vil ha neglisjerbare tøyninger i andre retninger. I Abaqus er dette oppgitt som «E11» for elementene på langbæreren. For sensorer andre steder er det hentet ut tøyninger i to retninger for å se hvordan sensorens orientering kan påvirke målinger i samme posisjon.

4.3 Påvirkning på dagens sensorer

Det er mange ulike skadescenarier som kan inntreffe på en bro som Lerelva bro. Et av de mest sannsynlige scenariene er oppsprekking i enden av langbærerne. Her vil det oppstå store strekk- og skjærkrefter. Nedenfor er det gjennomført simuleringer i Abaqusmodellen der målet er å oppdage endringer i sensorenes influenslinjer ved sprekkdannelse på langbærerne i områdene som vist på Figur 4.14. Fullstendig oversikt over alle simuleringer gjennomført finnes i vedlegg A.

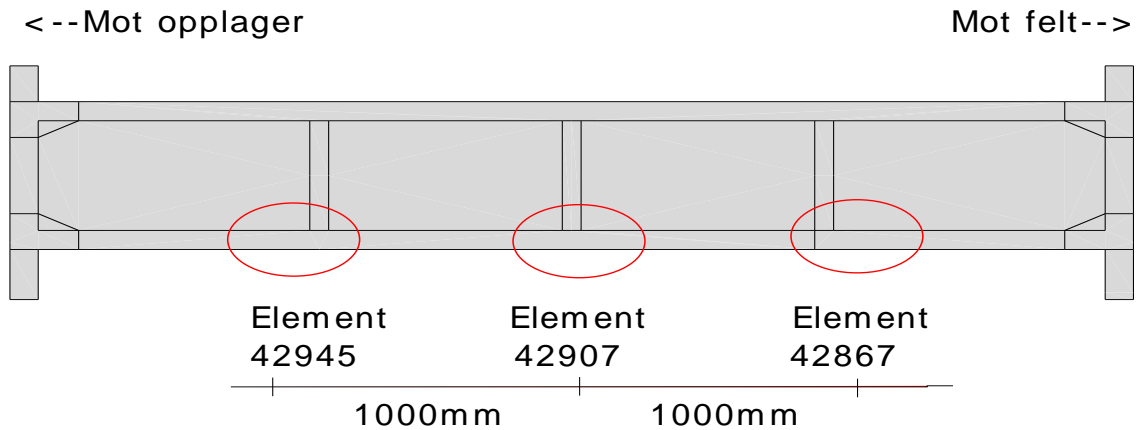


Figur 4.14 Mulig posisjon for brudd

Per mai 2016 er det plassert 3 tøyningssensorer på Lerelva bro. Disse er plassert på langbærer 1a. For å se hvordan endringer i broas konstruksjon vil påvirke sensorene, er det opprettet et sett med elementer i modellen. Settet er lagt til posisjonene for sensorene som er montert på Lerelva bro. Sensorene er montert på oversiden av underflensen.

Elementene som er valgt til sensorposisjoner, er

- Element 42907 – Midt på langbærer 1a.
- Element 42945 – 1000 mm fra element 42907, mot opplager.
- Element 42867 – 1000 mm fra element 42907, mot senter bro.

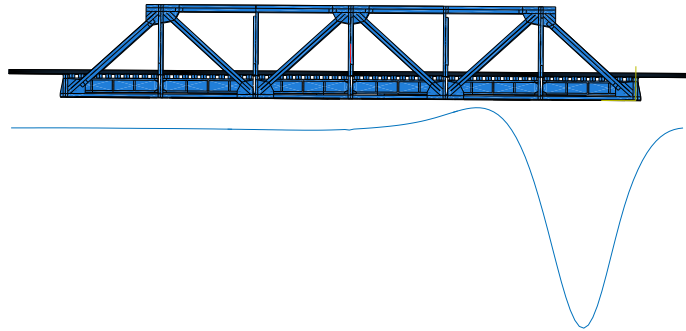


Figur 4.15 Sensorplasseringer på langbærer i Abaqusmodellen.

Ideen med å ha tøyningssensorene på langbæreren, er at disse i stor grad kun blir påvirket av laster som virker direkte over langbæreren. Langbærerne, sammen med tverrbærerne fører lastene ut i hovedbæringen (fagverket), slik at de nærliggende langbærerne blir påvirket i liten grad. Kortere influensområde gjør det lettere å skille mellom virkningene fra ulike aksler.

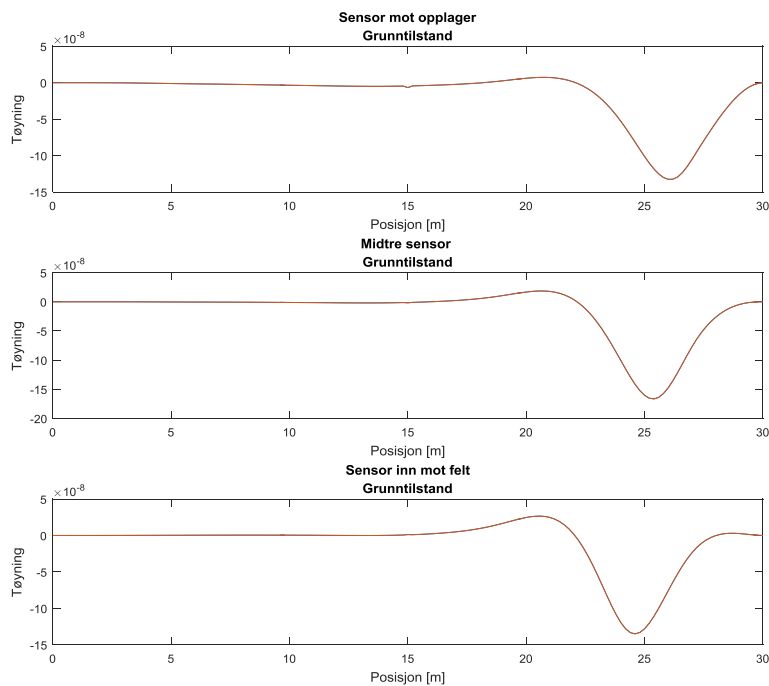
4.3.1 Grunntilstand

Alle tester vurderes opp mot grunntilstanden. I grunntilstanden er alle konstruksjonsdeler uendret, og elastitetsmodulen er lik 210 000 MPa.



Figur 4.16 Bro med influenslinje for sensor midt på langbærer 1a (uendret konstruksjon)

Figur 4.16 viser hvordan langbærerne først blir aktivisert når lasten virker på det tilstøtende feltet.

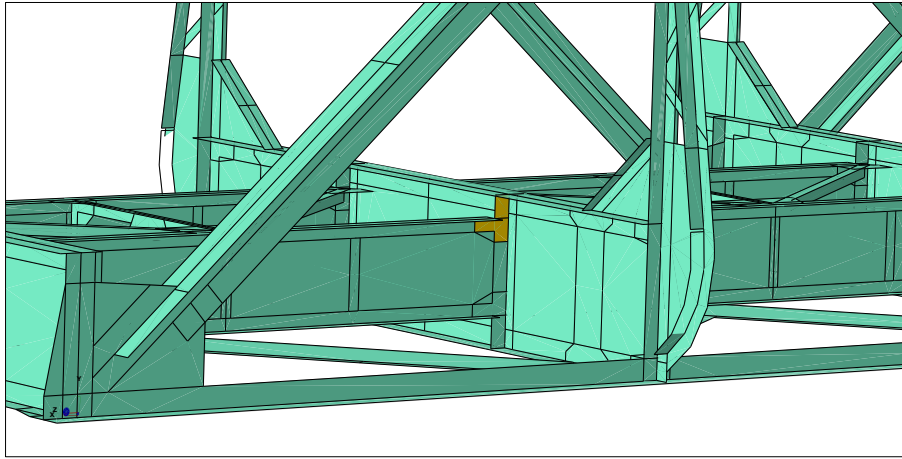


Figur 4.17 Influenslinjene for alle dagens sensorer i grunntilstand

De tre influenslinjene i Figur 4.17 skal sammenlignes mot tilsvarende influenslinjer for skadet bro.

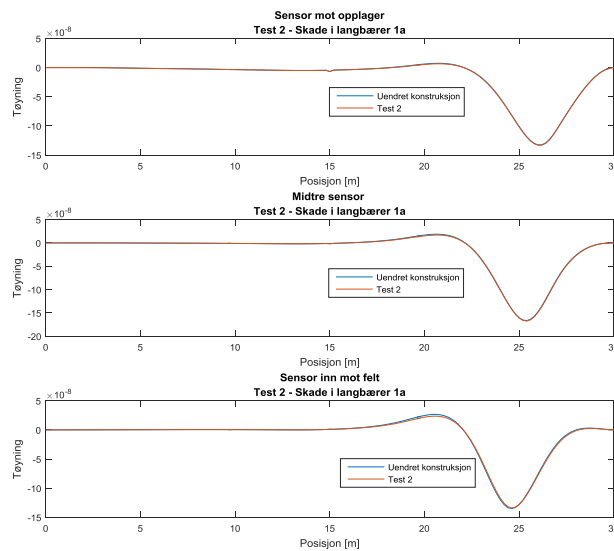
4.3.2 Skade på langbærer med sensorer – 1a

Det er gjennomført flere simuleringer der det innføres skader i endene av langbærer 1a. Det antas at skader vil være lettere å oppdage på samme konstruksjonsdel som sensorene er plassert.



Figur 4.18 Skadeområde høyre side langbærer 1a

Det ble gjort to tester med ulikt skadeomfang på enden inn mot broas midtfelt for å se hvor stor en skade må være for å ha en signifikant påvirkning på influenslinjen. Figur 4.18 viser de to panelene som ble gitt stivhet ~ 0 . Først ble kun det øverste panelet endret for å simulere en sprekk mellom de to panelene. Dette ga ingen synlige endringer i influenslinjen.



Figur 4.19 Influenslinjer for skadet konstruksjon

Når hele området i Figur 4.18 ble gitt stivhet ~ 0 , var det mulig å se en liten endring i influenslinjen for sensoren nærmest skadestedet, som vist nederst i Figur 4.19. I området rundt skaden (ved ca. 20m) har influenslinjen en noe lavere amplitude. Endringen i influenslinjene førte kun til en unøyaktighet på ca. $\pm 0,5\%$.

Test 2	Magnitideforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell influenslinje	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i totalvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	-0,010	0,010	0,014	963,7	-0,002
Sensor midt	0,003	0,004	0,005	970,6	0,006
Sensor opplager	0,003	0,003	0,004	968,5	0,003

Tabell 4.1 Endringer i influenslinjer og beregnede akselvekter.

Det ble også gjort forsøk på å innføre en lik skade på opplagersiden av langbærer 1a. Testen ga ingen tydelige utslag i influenslinjene eller akselvektene. Sannsynligvis kommer dette av at skaden ligger i umiddelbar nærhet til et opplager. Når enhetslasten befinner seg i området rundt opplageret, går kreftene i større grad direkte ned i opplageret og innfører ikke tøyninger bakover i langbæreren.

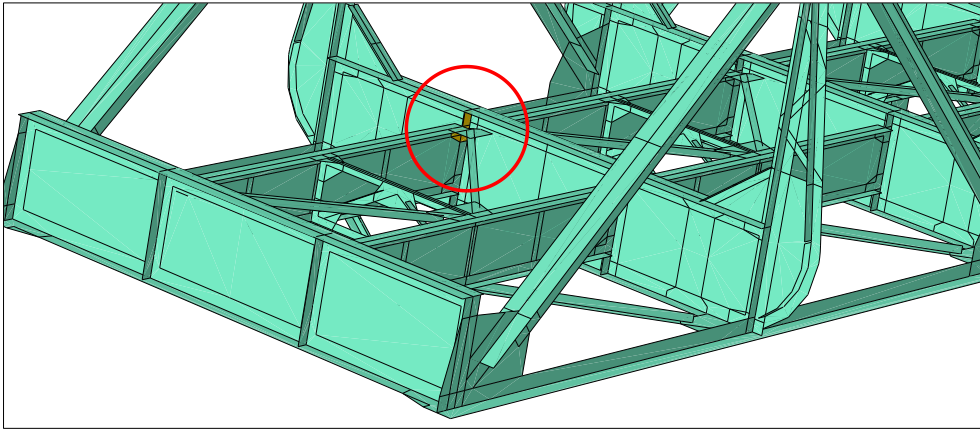
Skaden på opplagersiden førte ikke til synlige endringer i influenslinjene. Totalforskjellen i kolonne nummer 4 i Tabell 4.2 viser derimot hvordan påvirkningen på influenslinjene avtar med avstanden fra skaden.

Test 3	Magnitideforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell influenslinje	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i totalvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,000	0,002	0,002	966,6	0,001
Sensor midt	0,012	0,006	0,014	979,4	0,015
Sensor opplager	-0,020	0,004	0,020	947,0	-0,019

Tabell 4.2 Endringer i influenslinjer og beregnede akselvekter.

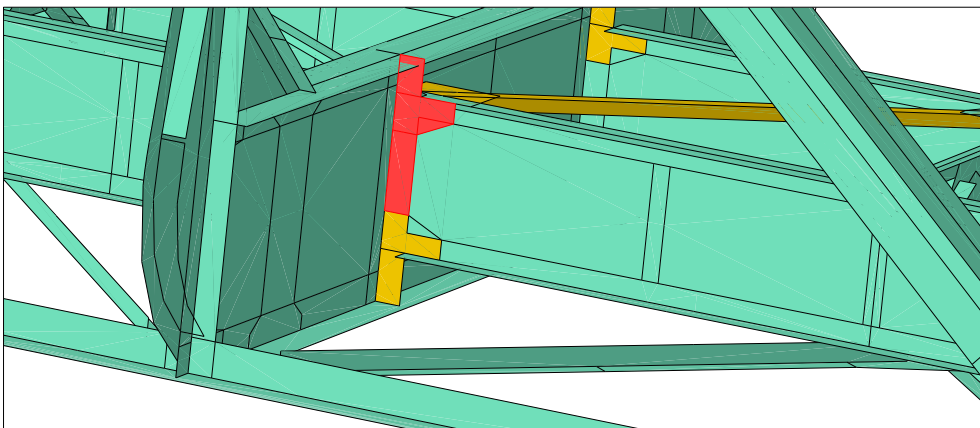
4.3.3 Skade på parallell langbærer – 1b

For å se hvordan en skade på parallell langbærer vil påvirke sensorene, er det gjennomført tre simuleringer med ulikt skadeomfang i posisjonen vist på Figur 4.20.



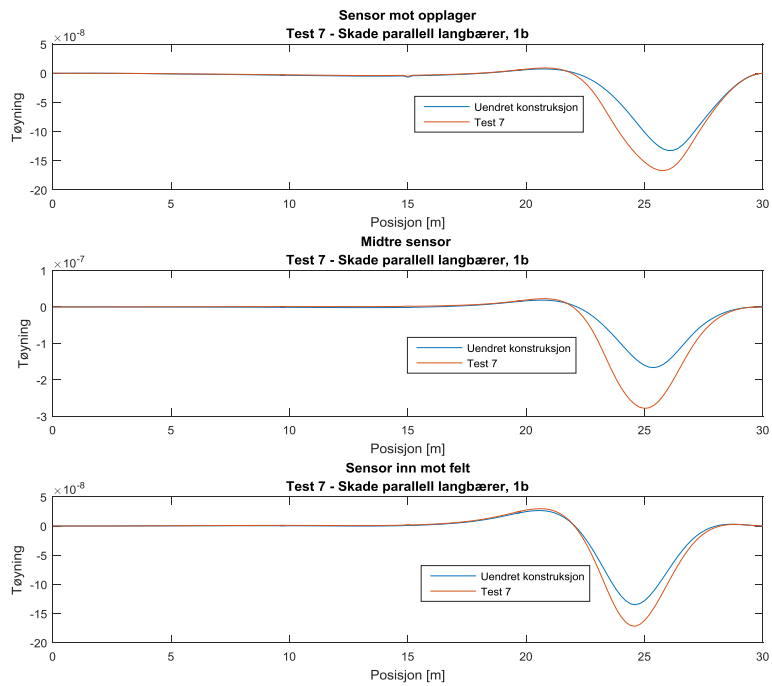
Figur 4.20 Skade på parallell langbærer 1b

Det ble simulert samme skader som for langbærer 1a i kapittel 4.3.2, men endringene ga ingen merkbare utslag. Selv ikke skaden vist i rødt i Figur 4.21 ga tydelige utslag i influenslinje.



Figur 4.21 Skade på parallell langbærer 1b. Kun rødt område fikk endrede materialegenskaper.

Kun ved å separere langbæreren fullstendig fra tverrbæreren var det mulig å oppnå endringer i influenslinjen. I en annen test ble derfor også de to panelene under det røde område gitt stivhet ~ 0 . Dette ga tydelige utslag i influenslinje, vist i Figur 4.22.



Figur 4.22 Influenslinjer for stor skade høyre side langbærer 1b

Testen viser at det er mulig å oppdage endringer i influenslinjen ved skader på parallell langbærer. Men skaden må være meget omfattende.

Test 7	Magnitudo-forskjell	Faseforskjell	Totalforskjell influenslinje	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i totalvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,277	0,010	0,277	1241,8	0,287
Sensor midt	0,731	0,051	0,732	1661,8	0,722
Sensor opplager	0,339	0,058	0,344	1286,4	0,333

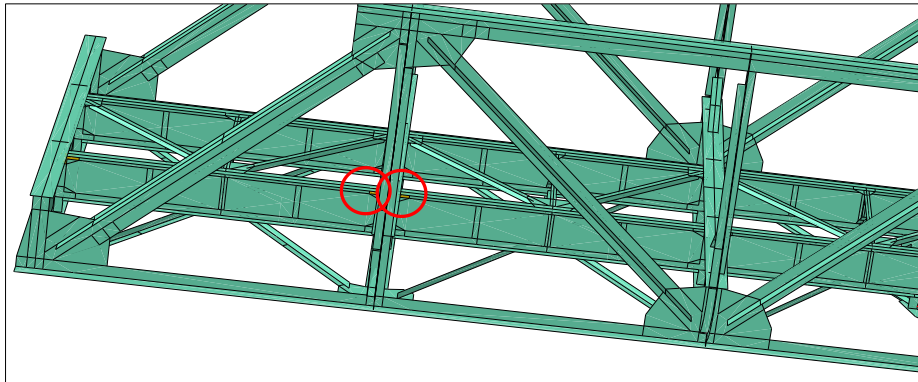
Tabell 4.3 Endringer i influenslinjer og beregnede akselvekter.

4.3.4 Skade på tilstøtende langbærer – 2a

For å se hvordan skader på tilstøtende langbærer vil påvirke influenslinjene ble det gjort simuleringer med to ulike skadescenarier (høyre og venstre side) på langbærer 2a.

Skade venstre side

Det er ønskelig å kunne skille mellom skader på ulik side av tverrbæreren ved å se på endringer i influenslinjer. For å se hvilken effekt skader på ulik side av tverrbæreren har på sensorene ble det innført samme skade som i avsnitt 4.3.2, men nå på langbærer 2a.

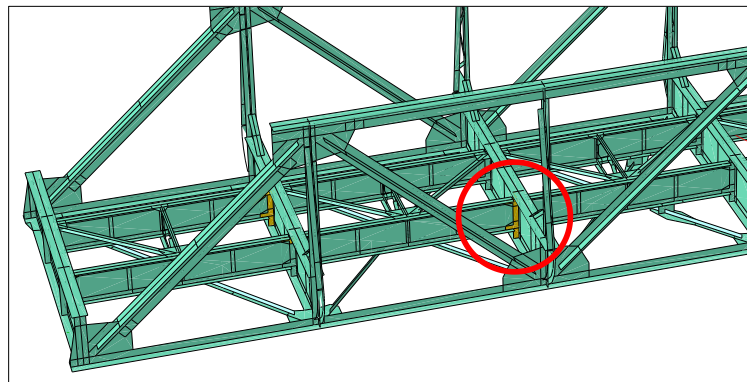


Figur 4.23 Skade på langbærer 1a og 2a

Testene med skader vist i Figur 4.23 hadde begge en marginal, men veldig lik påvirkning for influenslinjene, både i form og amplitude. Det vil derfor være vanskelig å kunne skille mellom skader på ulik side av tverrbæreren.

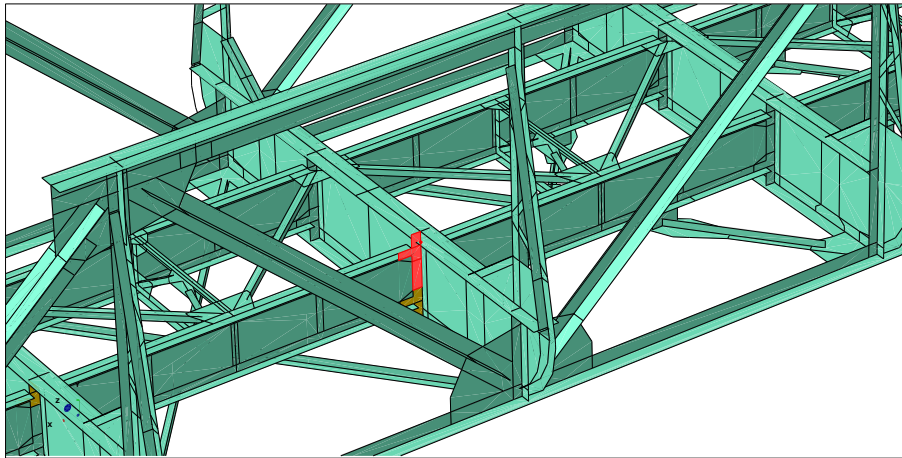
Skade høyre side

For å se om det er mulig å oppdage skader på tilstøtende langbærer, ble det også gjort simuleringer med skader i området vist i Figur 4.24.



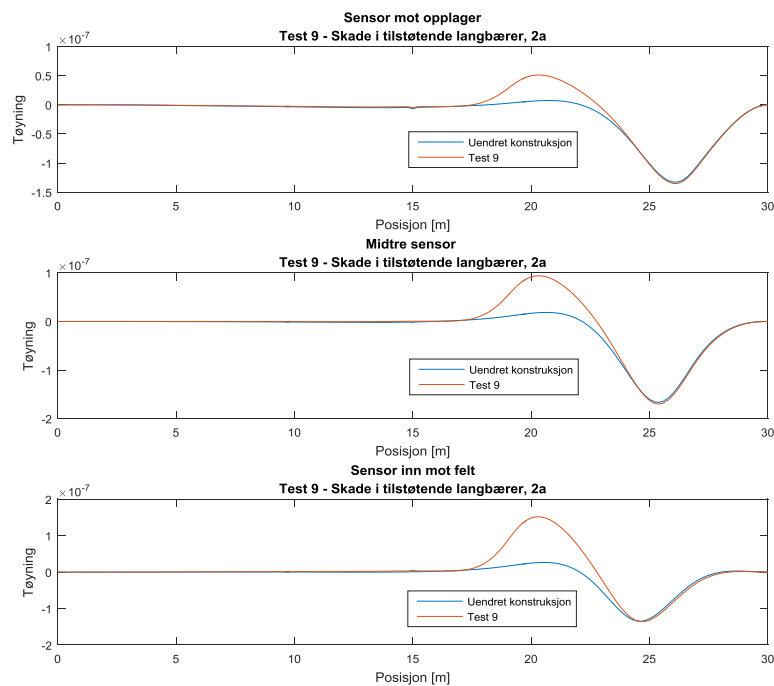
Figur 4.24 Skadested høyre side, langbærer 2a

Det ble gjennomført simuleringer med ulikt skadeomfang. Også her viste det seg vanskelig å oppdage skader. Selv ikke en omfattende skade, vist med rødt i Figur 4.25, førte til noen synlig forandring i influenslinjene.



Figur 4.25 Omfattende skade, høyre side, langbærer 2a

Først når langbæreren ble fullstendig fraskilt fra tverrbæreren kunne det observeres betydelige endringer i influenslinjen. Figur 4.26 viser tydelige utslag i området for langbærer 2a. I det lasten passerer over til langbæreren med sensorene(1a), normaliserer influenslinjene seg. Det er sensoren nærmest skaden som opplever størst forandringer i influenslinjen. Langbærer 2a fungerer nå som en utkraget forlengelse av 1a og gir derfor store momenter i 1a.



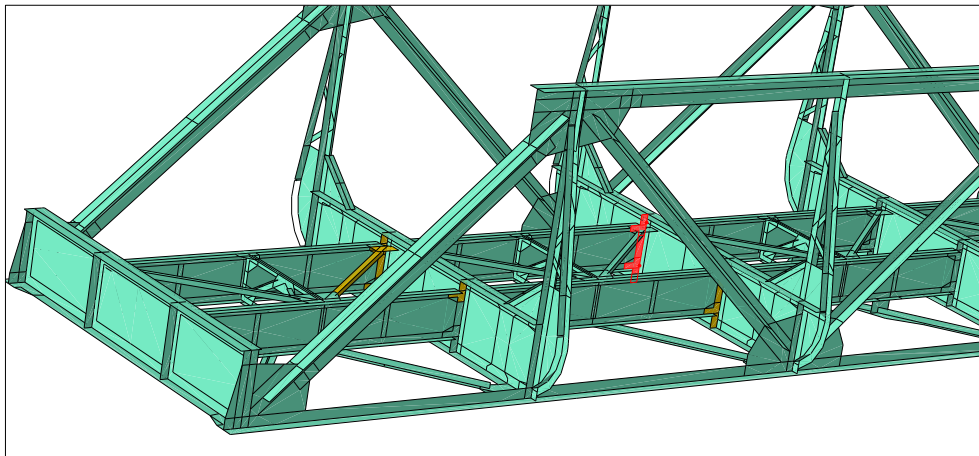
Figur 4.26 Influenslinjer, stor skade høyre side langbærer 2a

Test 9	Magnitudo- forskjell	Faseforskjell	Totalforskjell influenlinje	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i totalvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,488	0,222	0,536	850,2	-0,119
Sensor midt	0,146	0,131	0,196	962,5	-0,003
Sensor opplager	0,072	0,098	0,121	905,1	-0,062

Tabell 4.4 Endringer i influenslinjer og beregnede akselvekter.

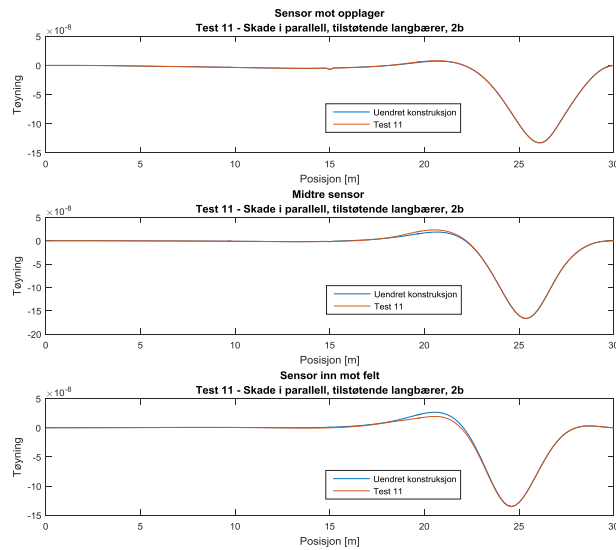
4.3.5 Skade på parallell tilstøtende langbærer – 2b

Formålet med denne testen er å se hvordan den samme skaden på en parallell langbærer, vil påvirke influenslinjene for sensorene på langbærer 1a.



Figur 4.27 Skade på langbærer 2b

Også her måtte skaden være veldig stor før det kunne oppdages endringer i influenslinjene. Fullstendig brudd mellom lang- og tverrbæreren førte til endringen vist i Figur 4.28.



Figur 4.28 Influenslinjer for stor skade på langbærer 2b

Det er interessant å merke seg at i motsetning til endringen i Figur 4.26, viser influenslinjen for sensoren nærmest felt i Figur 4.28 at skaden på langbærer 2b fører til lavere tøyninger ved sensorene. Skaden på langbærer 2a førte til høyere tøyninger ved sensorene på langbærer 1a.

Test 11	Magnitudo-forskjell	Faseforskjell	Totalforskjell influenslinje	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i totalvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	-0,002	0,019	0,019	979,6	0,015
Sensor midt	0,005	0,009	0,010	964,4	-0,001
Sensor opplager	0,002	0,002	0,003	966,2	0,001

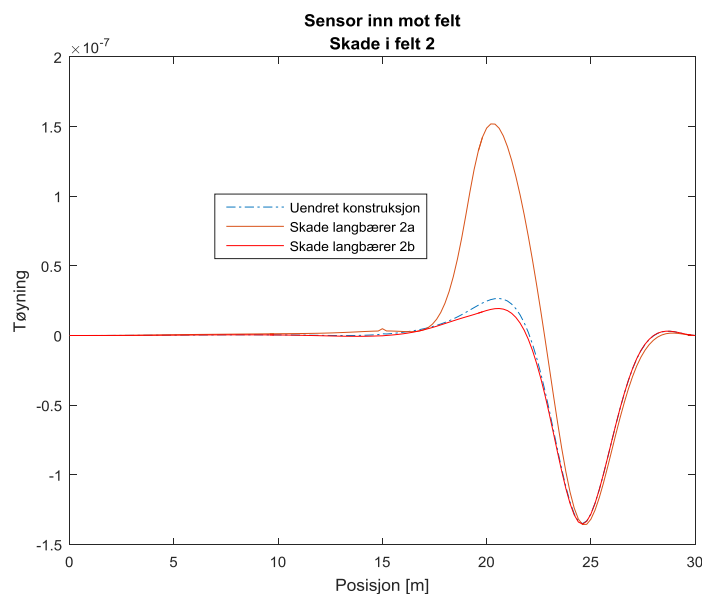
Tabell 4.5 Endringer i influenslinjer og beregnede akselvekter

4.3.6 Oppsummering dagens sensorer

Lerelva bro er konstruert på en måte som gir gode muligheter for lastomfordeling ved en eventuell skade. Laster bæres gjennom lang- og tverrbærere ut i et hovedfagverk. Dette begrenser virkningen en skade har på sensorer som ikke er i umiddelbar nærhet til skaden. Det vil si at en sensor må plasseres i nærheten av skadestedet for å kunne oppdage mindre skader. Influensområdet for dagens sensorplassering er omtrent halve broas lengde. Det vil derfor være svært usannsynlig at det vil kunne oppdages skader utenfor dette området.

Influenslinjene kan endres over et større lengdeintervall selv om skaden har liten utstrekning, men den største endringen i influenslinjene vil normalt sett ligge der skaden har oppstått. Det vil derfor kunne være mulig å bestemme hvor skaden har oppstått dersom skaden er så omfattende at det skjer en markant endring i influenslinjene.

En gjennomgående observasjon er at det er sensoren nærmest sprekker og skader som blir påvirket i størst grad. Det kan derfor også være mulig å estimere posisjonen for eventuelle skader ved å se på den relative forskjellen i influenslinjer og beregnede akselvekter mellom de ulike sensorene på konstruksjonen.



Figur 4.29 Sammenligning skade felt 2a og 2b

Det har vist seg mulig å skille mellom skader på høyre og venstre langbærer i tilstøtende felt. I Figur 4.29 ser en at en skade i tilstøtende langbærer gir mye større tøyninger enn grunntilstanden. Med samme skade på den parallelle tilstøtende langbæreren vil tøyningene være lavere i samme posisjon, men endringen er ikke like markant.

4.4 Sensor ved skade

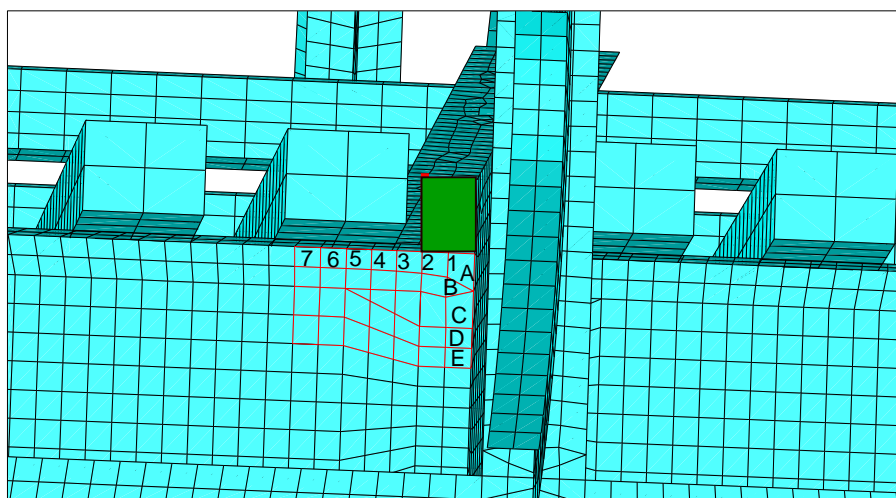
For Lerelva bro har forsøkene i Abaqus vist at det er vanskelig å oppdage mindre skader med dagens sensorplasseringer. Skadeomfanget må være i en slik størrelsesorden at skaden trolig hadde blitt oppdaget tidligere og lettere gjennom en manuell inspeksjon. I det følgende kapittel er det derfor gjennomført forsøk med en av de mest sannsynlige skadene for broer av typen brukt for Lerelva bro. Tøyningene blir nå hentet ut for punkter som er plassert slik at de forhåpentligvis vil kunne detektere forandringer i influenslinjen ved mindre skadeomfang.

En sprekk i konstruksjonen vil bety at kreftene som tidligere gikk gjennom stålet ved sprekken nå må omfordeles til andre konstruksjonsdeler. En sprekk kan derfor oppdages på to ulike måter vha. tøyningssensorer. Enten kan en sensor i området som nå må ta en større del av kreftene registrere større tøyninger, eller så kan en sensor i området der kreftene minker registrere lavere tøyninger. Formålet med følgende eksperimentering er å bestemme hvor en sensor bør plasseres for å oppdage sprekker i en bestemt posisjon.

4.4.1 Tester i Abaqus

Det er hentet ut influenslinjer for elementene nummerert «Kolonne 1-5» og «Rad A-D» for å se virkningen av en sprekk i underkant av det grønne området vist i Figur 4.30. Influenslinjene blir hentet ut for tøyninger i elementets to hovedretninger. Dette gjøres for å se hvilken retning som gir størst mulighet for å oppdage sprekkdannelser.

Hele det grønne området er gitt stivhet ~ 0 for å simulere en sprekk i underkant av det grønne området. Det antas at dette området uansett ikke kunne tatt opp krefter ved sprekkdannelse i underkant av det grønne området.



Figur 4.30 Aktuelle sensorplasseringer for sprekk-deteksjon

Alle firkantede elementer i modellen er S4R-elementer, trekantede er S3-elementer. S4R-elementene fungerer best dersom de beholder sin grunnform – kvadratisk. Dersom de forvrenges for mye, kan de gi urimelige resultater. Det er derfor i hovedsak fokusert på elementene A2-A5, B2-B5 og E2 og E7, som har beholdt sin form i stor grad. Hvert element tilsvarer ca. 50x50 mm.

Kolonne 7	Kolonne 6	Kolonne 5	Kolonne 4	Kolonne 3	Kolonne 2	Kolonne 1	
44535	44537	102940	102941	102942	102932	102933	Rad A
44534	44536	102936	102939	102935	102938	102931	Rad B
-	-	102973	102974	102975	102934	102937	Rad C
44726	44725	44724	44723	44722	44448	44449	Rad D
44706	44705	44704	44703	44702	44450	44451	Rad E

Tabell 4.6 Elementnummerering for Figur 4.30. Skaden ligger over celle A1 og A2.

Endringene i influenslinjer er beregnet etter fremgangsmåten i kapittel 4.1.1. Det er kun vist den totale forskjellen, « C_{SG} ». Amplitude- og faseforskjell er vist hver for seg i vedlegg D. For å lettest kunne oppdage skader, er det ønskelig å plassere sensorene der endringen i influenslinjene vil være størst.

Kolonne 7	Kolonne 6	Kolonne 5	Kolonne 4	Kolonne 3	Kolonne 2	Kolonne 1	
0,0104	0,0068	0,0544	0,0599	0,2391	0,1284	0,2632	Rad A
0,0141	0,0065	0,0235	0,0969	0,2196	0,1487	0,144	Rad B
-	-	0,0515	0,1349	0,1061	0,5479	0,0781	Rad C
0,0079	0,0409	0,0837	0,0849	0,0617	0,0763	0,0196	Rad D
0,057	0,0882	0,1086	0,0503	0,0689	0,0533	0,0846	Rad E

Tabell 4.7 Kombinert amplitude- og faseforskjell for tøyninger i broas lengderetning

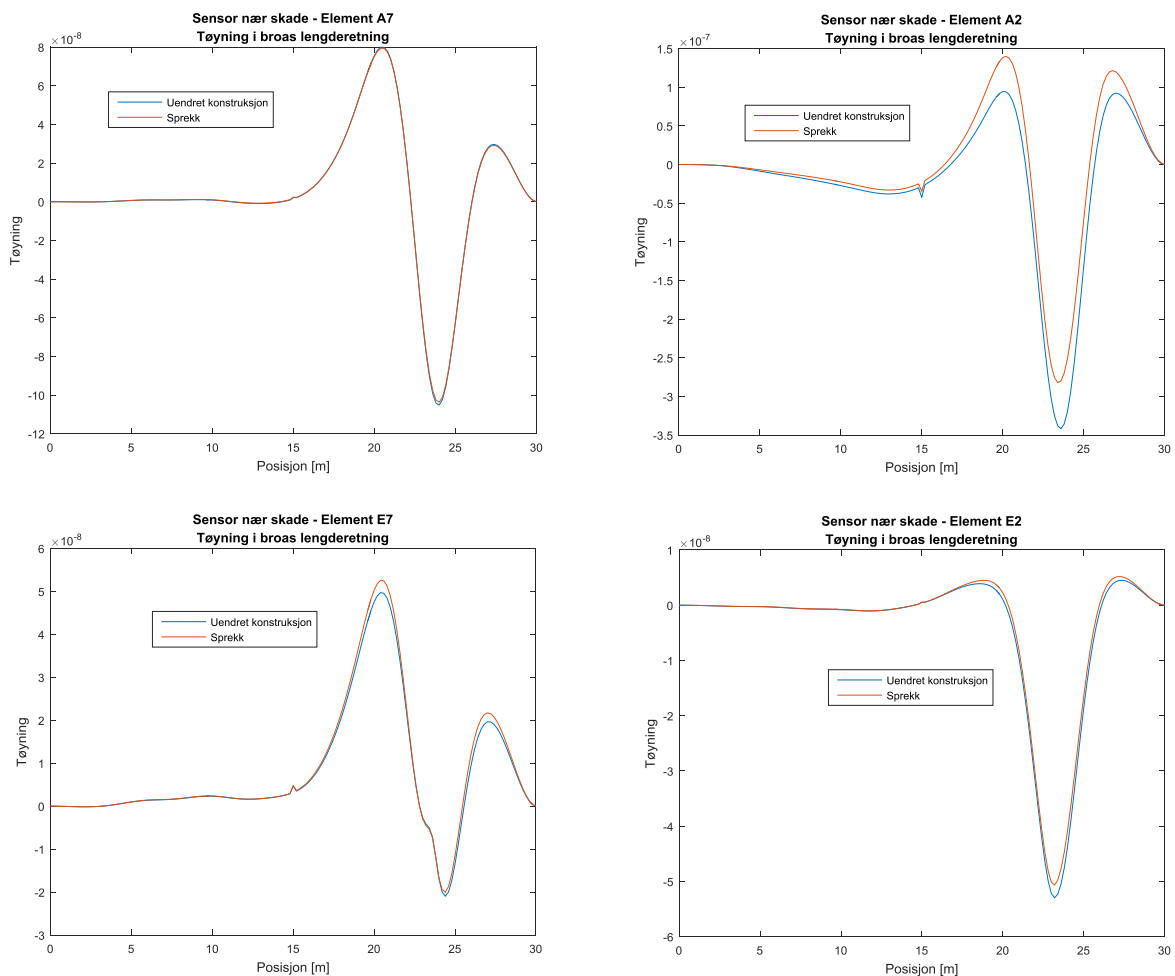
Tabell 4.7 viser den relative forskjellen for tøyninger i broas lengderetning. Cellene er farget etter hvor stor forandringen er. Det er tydelig at påvirkningen avtar i stor grad rundt rad D/E og kolonne 6/7. Disse ligger ca. 200-250 mm fra skaden.

Kolonne 7	Kolonne 6	Kolonne 5	Kolonne 4	Kolonne 3	Kolonne 2	Kolonne 1	
0,0427	0,0086	0,1461	0,1832	0,5575	0,6702	0,0589	Rad A
0,0065	0,0733	0,076	0,0511	0,7645	0,9268	0,3802	Rad B
-	-	0,091	0,6055	0,777	0,7482	0,2143	Rad C
0,1405	0,1815	0,7008	2,5659	0,9347	0,7444	0,3811	Rad D
0,1644	0,3101	0,5503	0,7402	0,6799	0,3633	0,2021	Rad E

Tabell 4.8 Kombinert amplitude- og faseforskjell for tøyninger i langbærerens høyderetning

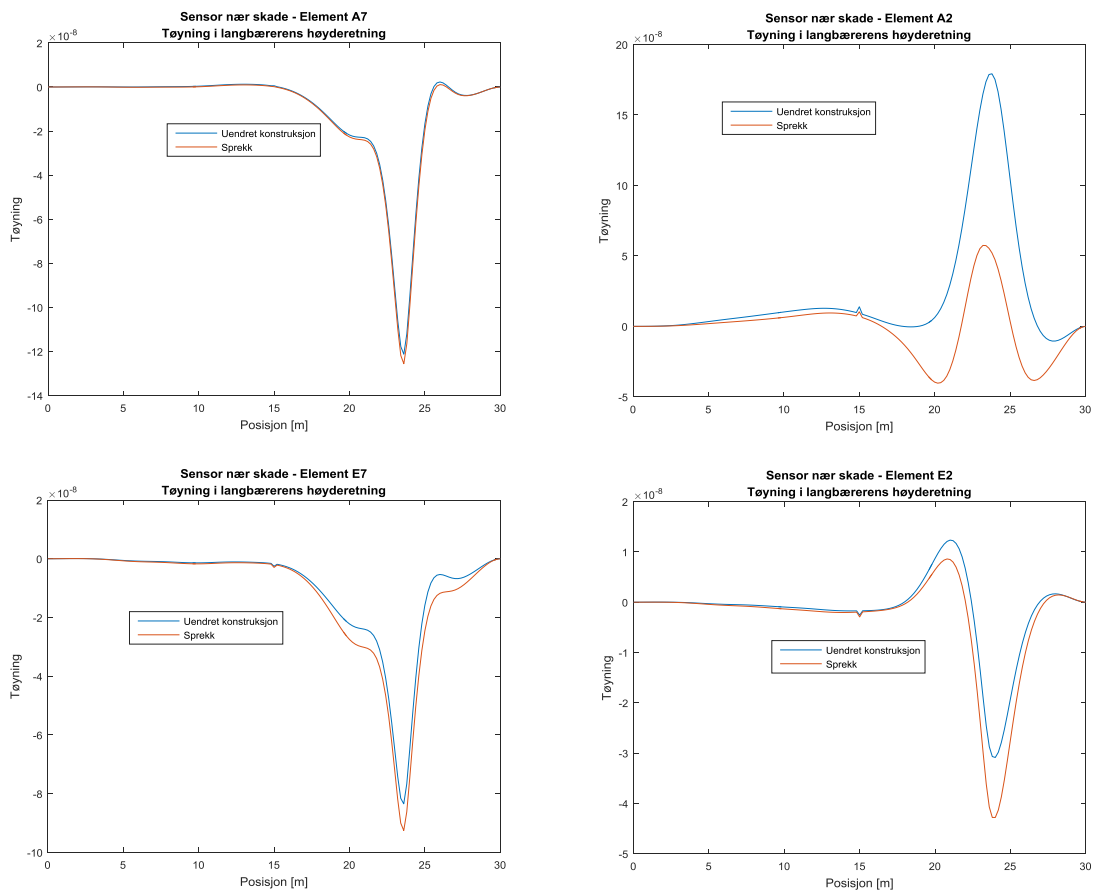
Tabell 4.8 viser den relative forskjellen for tøyninger i broas høyderetning. Området under skaden viser at tøyningene i vertikal retning har blitt mindre i området opp mot skaden. Spesielt for elementene A2 og B2, som ligger rett under enden av sprekken.

Influenslinjene i Figur 4.31 og Figur 4.32 viser tøyninger i hhv. broas lengde- og høyderetning for elementene A2, A7, E2 og E7. Influenslinjene er plassert slik elementene ligger i forhold til hverandre i Abaqusmodellen, vist i Figur 4.30. Elementet A2 ligger direkte under den åpne enden av sprekken. De tre resterende elementene ligger omtrent 250 mm fra element A2.



Figur 4.31 Influenslinjer for tøyninger i broas lengderetning

Influenslinjene for broas lengderetning viser at påvirkningen i broas lengderetning er tilnærmet utlignet for elementene som ligger 250 mm fra skaden. Skaden har ført til en endring i influenslinjen for element A2. Hele influenslinjen har blitt forskjøvet i positiv retning (mer trykk i elementet) Legg merke til at x-aksen for element A2 er skalert 10 ganger så stor som de øvrige.



Figur 4.32 Influenslinjer for tøyninger i langbærerens høyderetning

Influenslinjene for tøyninger i langbærerens høyderetning viser at disse normaliserer seg i større grad med horisontal avstand fra skaden enn vertikal avstand. Elementene 250 mm under skaden viser fremdeles en signifikant påvirkning. For element A7 er påvirkningen minimal.

4.4.2 Oppsummering sensor ved skade

I umiddelbar nærhet av en sprekk kan to ting skje; tøyningene kan minke eller øke. I dette forsøket kan begge deler observeres, fordi det skjer ulike ting i hver hovedretning. Spenningene kan ikke lenger kan føres opp i det grønne området. Dermed vil de vertikale tøyningene bli lavere. De horisontale tøyningene vil bli høyere, fordi krefter som tidligere ble ført opp i det grønne området i stor grad må føres horisontalt ut i tverrbæreren. Influenslinjene normaliserer seg i en avstand på ca. 200-250 mm fra skaden. Skaden i eksempelet simulerer en noe usannsynlig stor sprekk, så det påvirkede området vil trolig ligge i en avstand under 250 mm for en mindre sprekk.

Dersom et BWIM-system kun skal brukes til å beregne vekter og akselvekter, er det en fordel at sensorene ikke blir påvirket av mindre sprekker. For lignende konstruksjoner som langbærerne på Lerelva bro bør sensorer plasseres minimum 250 mm fra sannsynlig skadesteder. For bruk i et overvåkningssystem er det ønskelig at sensorene skal bli påvirket av skader i størst mulig grad. Sensorer ment til skadeovervåkning bør derfor ligge 250mm eller nærmere fra sannsynlige skadesteder.

Influenslinjene har lignende form og amplitude som sensorene i dagens plassering. Det skal derfor være uproblematisk å benytte sensorer i plasseringen vist i Figur 4.30 til både BWIM og skadeovervåkning.

Vedlegg D viser influenslinjer for samtlige elementer.

5 Temperatureffekter

Et BWIM-system vil påvirkes av endringer i stivhet, fordi influenslinjen for konstruksjonen endres. Dersom en vet hvordan influenslinjen for instrumenterte konstruksjoner forandres med temperatur, er det mulig å justere målingene for stivhetsforandringer på grunn av temperaturendringer.

5.1 Temperaturavhengig elastitetsmodul

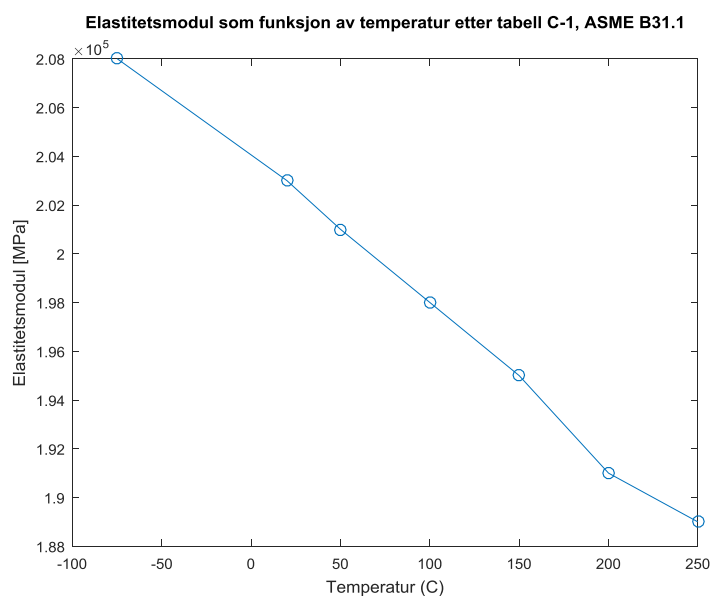
Elastitetsmodulen for stål varierer med temperaturen, dermed vil også en stålbro's stivhet variere med temperaturen. Lufttemperaturen i Trondheim kan i ekstreme tilfeller variere mellom -20 °C og 35°C (Wikipedia 2016). E-modulen kan dermed variere mellom ca. 210 000 MPa og 200 000 MPa (Engineering Toolbox 2016).

Table C-1 (SI) Moduli of Elasticity for Ferrous Material (A08)

Material	<i>E</i> = Modulus of Elasticity, MPa (Multiply Tabulated Values by 10 ³) [Note (1)]																	
	Temperature, °C																	
	-75	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
Carbon steels with carbon content 0.30% or less	208	203	201	198	195	191	189	185	179	172	162	150	136	122	107
Carbon steels with carbon content above 0.30%	207	202	200	197	194	190	188	184	178	171	161	149	135	121	106

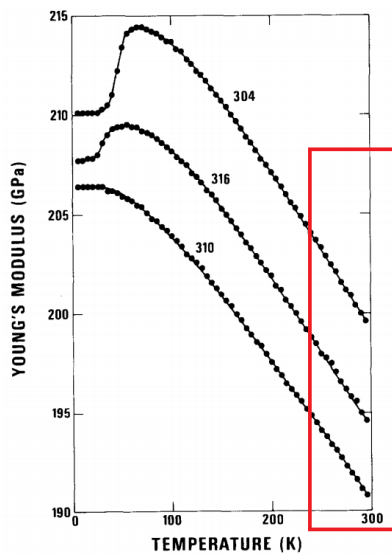
Figur 5.1 Temperaturavhengig elastitetsmodul. (The American Society of Mechanical Engineers 2007)

Figur 5.1 viser elastitetsmodulen ved ulike temperaturer for to typer «Carbon steel», som er vanlig, ikke-rustfritt stål.

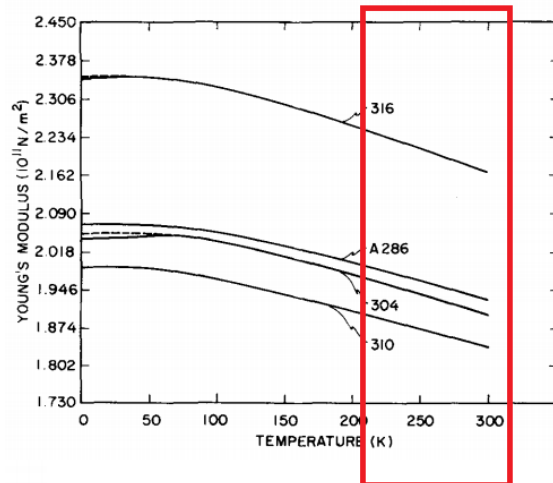


Figur 5.2 Plot av tabell i Figur 5.1

Figur 5.2 viser et plot av øverste linje i Figur 5.1. Plottet viser tydelig den tilnærmet lineære sammenhengen mellom temperatur og stivhet i temperaturområdet som er aktuelt for BWIM-systemer under normale forhold.



Figur 5.3 Temperaturavhengig elastitetsmodul (Journal of Applied Physics 1981)



Figur 5.4 Temperaturavhengig elastitetsmodul (Journal of Applied Physics 1975)

Det er funnet flere referanser som alle beskriver en lineær sammenheng mellom temperatur og elastitetsmodul i temperaturområdet $0 \pm 50^{\circ} \text{C}$ (225-325 K). Figur 5.4 og Figur 5.3 viser begge en tydelig lineær tendens i det aktuelle området.

5.1.1 Kompensering for temperaturavhengig elastitetsmodul

Det har blitt foreslått å behandle temperaturavhengige endringer i elastitetsmodul vha. Ligning 5.1 på en lignende måte som termiske utvidelser blir tatt hensyn til vha. en termisk utvidelseskoeffisient, α . (Corbally, Cantero og Kalin 2013)

$$E = E_0 * (1 + \beta * \Delta T)$$

Ligning 5.1 (Corbally, Cantero og Kalin 2013)

Ligningen tar utgangspunkt i en grunnverdi for elastitetsmodulen E_0 , og et temperaturavhengig ledd i form av konstanten β med benevnning $\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$. Ligningen er gyldig for alle materialer innenfor temperaturområder med en lineær sammenheng mellom elastitetsmodul og temperatur. I områder der elastitetsmodulen ikke lenger endres lineært med temperaturen, må formelen modifieres. For vanlige konstruksjonsmaterialer skjer dette ved høye temperaturer, og det

finnes ligninger som tar hensyn til ikke-lineære sammenhenger mellom elastitetsmodul og temperatur. (Spittel 2009)

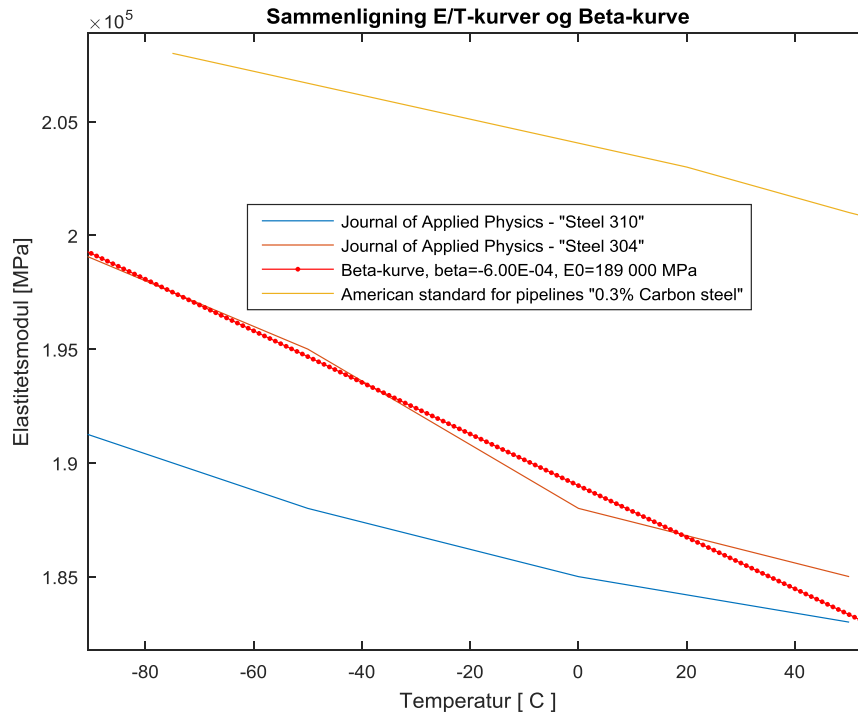
Det er gjort mange forsøk som beskriver elastitetsmodulen til stål ved ulike temperaturer, men i hovedsak ved høye temperaturer, som ved for eksempel brann. I Journal of Applied Physics rapporteres det om forsøk ved lavere temperaturer. Der beskrives også en konstant, «*Temperature coefficients of the elastic constants*», som i likhet med den foreslåtte β -konstanten beskriver endringen i elastitetsmodul ved lavere temperaturer. Forsøkene er gjort for rustfritt stål.

TABLE IV. Temperature coefficients of the elastic constants at room temperature (10^{-4} K^{-1}).

Alloy	$\frac{1}{B} \frac{dB}{dT}$	$\frac{1}{E} \frac{dE}{dT}$	$\frac{1}{G} \frac{dG}{dT}$	$\frac{1}{\nu} \frac{d\nu}{dT}$
304	-1.69	-4.15	-4.54	1.78
310	-1.39	-3.71	-4.05	1.45
316	-1.41	-4.17	-4.61	1.89
A286	-1.22	-3.77	-4.18	1.81

Figur 5.5 β -verdier for ulike stållegeringer, (Journal of Applied Physics 1975)

Figur 5.6 er et estimat på hva en slik β -verdi vil ligge på for noen legeringer av rustfritt stål. Verdiene er i størrelsesorden $\beta = 4 \cdot 10^{-4} / ^\circ \text{C}$



Figur 5.6 Sammenligning E/T-kurver fra Figur 2.1 og Ligning 5.1

På Figur 5.6 kan en se et eksempel på bruk av β -konstanten. Blå, oransje og gule grafer beskriver elastitetsmodulen ved ulike temperaturer for tre ulike ståltyper. Den røde grafen er et eksempel på hvordan elastitetsmodul kan beskrives ved hjelp av Ligning 5.1, her justert med $E_0 = 189\,000$ MPa og $\beta = -6.0 \cdot 10^{-4}$, for å passe overens med grafen for legeringen «Steel 304». Det er også mulig å definere E_0 og β for ulike temperaturintervaller. Da vil det være mulig å ta hensyn til ikke-lineære sammenhenger.

Tøyningene i konstruksjonen er omvendt proporsjonalt avhengig av elastitetsmodulen. Sammenhengen mellom influenslinjene og elastitetsmodulen blir derfor:

$$\frac{IL_{\text{justert}}}{IL_{\text{Referanse}}} = \frac{E^{-1}}{E_0} \quad \text{Ligning 5.2}$$

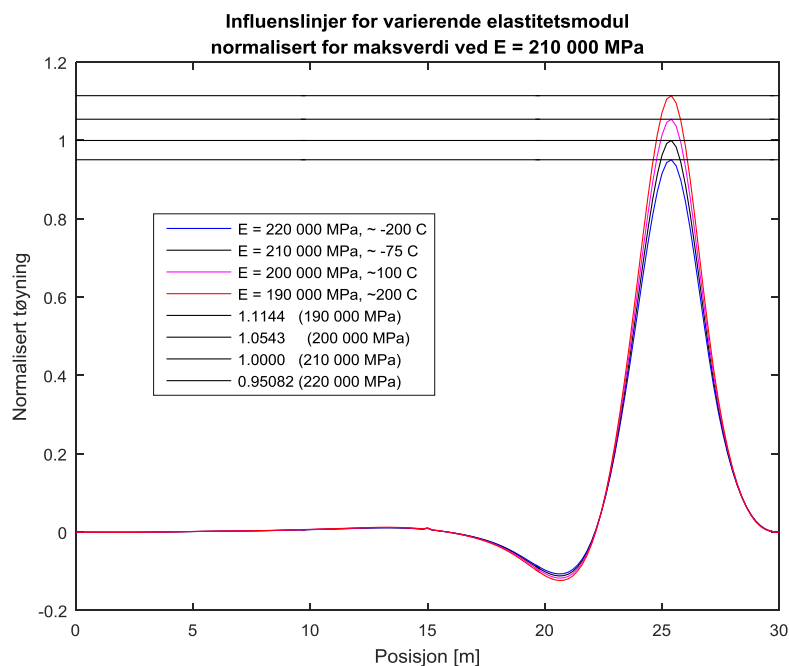
Ved å substituere inn justert elastitetsmodul fra Ligning 5.1, ender man opp med følgende sammenheng mellom temperatur og influenslinje:

$$IL_{\text{justert}} = IL_{\text{Referanse}} * \frac{1}{1 + \beta * \Delta T} \quad \text{Ligning 5.3}$$

Kompensering for temperaturavhengig elastitetsmodul kan derfor skje ved å benytte Ligning 5.3 for alle punkter i influenslinjen. Det må da bestemmes en referanse-influenslinje for konstruksjonen ved en kjent temperatur, og materialets β -verdi må være kjent. ($\beta < 0$ for bruk i Ligning 5.3)

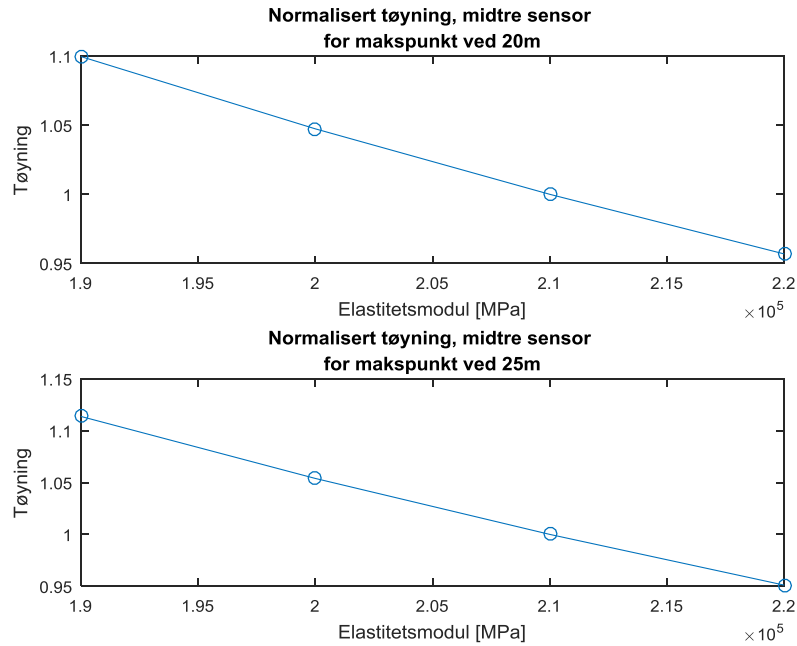
5.2 Temperaturpåvirkning på Lerelva bro

For å se på temperatureffekter på Lerelva bro er det gjennomført simuleringer med elastitetsmodul i området 190 000 MPa – 220 000 MPa. Dette går langt utover forventede temperatursvingninger i Trondheim, men det er ønskelig å se om det finnes en sammenheng mellom stivhetsendring og endringer i influenslinjene over hele temperaturområdet.



Figur 5.7 Influenslinjer normalisert for maks tøyning ved referansetilfellet, $E = 210\,000\text{ MPa}$

Figur 5.7 viser influenslinjene for Lerelva bro med fire ulike elastitetsmoduler. Hele konstruksjonen fikk endret elastitetsmodul. Som et mål på skaleringen er det hentet ut maksverdier for områdene 20 m og 25 m.



Figur 5.8 Maks tøyning ved ulik elastitetsmodul. Synkende temperatur mot høyre.

Maksverdiene i begge punkter viser tydelig tendenser til en lineær sammenheng mellom amplituden på influenslinjene og stivhet. Stivhetsendringer på grunn av temperaturforandringer vil kun skalere influenslinjen proporsjonalt med stivhetsendringen. Det er ikke tatt hensyn til termisk ekspansjon i tilfellene vist i Figur 5.7 og Figur 5.8.

5.2.1 Påvirkning på influenslinjer og vektberegninger

For å se hvordan temperatureffekter kan påvirke resultater i et BWIM-system, er det gjennomført beregninger av akselvekter på samme måte som forklart i kapittel 4.1.3. Forholdene som er simulert, er:

- $E = 190\,000\text{ Mpa}$ ($\approx +200^{\circ}\text{ C}$) – en faktor på 0,90 i forhold til referansen på $210\,000\text{ Mpa}$
- $E = 200\,000\text{ MPa}$ ($\approx +50^{\circ}\text{ C}$) – en faktor på 0,95 i forhold til referansen på $210\,000\text{ Mpa}$
- $E = 220\,000\text{ Mpa}$ ($\approx -100^{\circ}\text{ C}$) – en faktor på 1,05 i forhold til referansen på $210\,000\text{ Mpa}$

E = 190 000 Mpa ($\approx 200^{\circ}\text{ C}$)	Magnitudo-forskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i totalvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,109	0,003	0,109	1066,4	0,105
Sensor midt	0,107	0,004	0,107	1063,7	0,102
Sensor opplager	0,105	0,002	0,105	1064,0	0,102

Tabell 5.1 Endringer i influenslinjer og beregnede akselvekter – Elastitetsmodul = 190 000 Mpa

E = 200 000 Mpa (≈ 50° C)	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i totalvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,052	0,001	0,052	1013,3	0,050
Sensor midt	0,051	0,002	0,051	1012,1	0,049
Sensor opplager	0,050	0,001	0,050	1012,2	0,049

Tabell 5.2 Endringer i influenslinjer og beregnede akselvekter – Elastitetsmodul = 200 000 Mpa

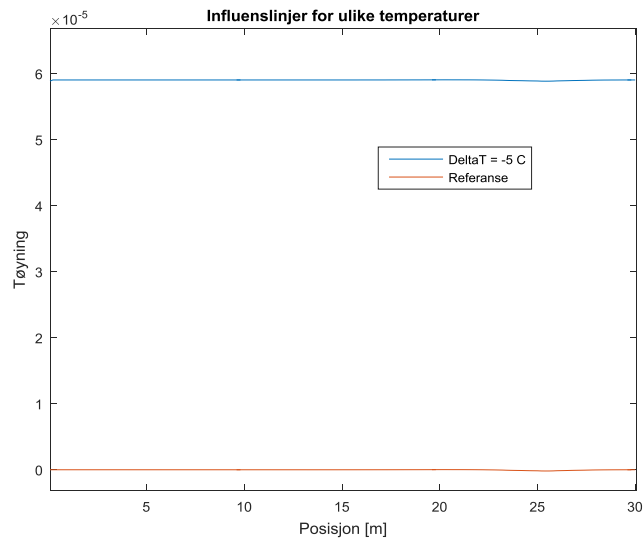
E = 220 000 Mpa (≈ -100° C)	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i totalvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	-0,047	0,001	0,047	921,5	-0,045
Sensor midt	-0,046	0,002	0,046	922,5	-0,044
Sensor opplager	-0,045	0,001	0,045	922,3	-0,044

Tabell 5.3 Endringer i influenslinjer og beregnede akselvekter – Elastitetsmodul = 220 000 MPa

Alle simuleringene viser tydelig korrelasjon mellom elastitetsmodulene og magnitodeforskjellene for influenslinjene, samt beregnede akselvekter. Det skal derfor være mulig å kompensere for temperaturforandringer ved å skalere influenslinjene vha. en beta-verdi.

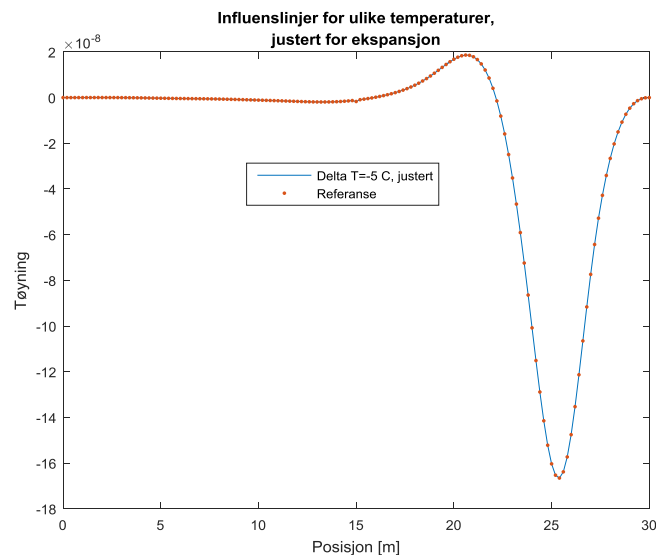
5.2.2 Termisk ekspansjon

Det ble også forsøkt å gjennomføre simuleringer der det ble tatt hensyn til stålets temperaturkoeffisient, $\alpha=1.2 \cdot 10^{-5}$. Influenslinjene produsert i denne oppgaven har tøyingsverdier i størrelsesorden $0 - 2 \cdot 10^{-7}$ /kN. En temperaturforskjell på en grad vil med andre ord skape tøyninger ca. 100 ganger større enn tøyningene for influenslinjene generert med en last på 1 kN.



Figur 5.9 Influenslinjer ved ulike temperaturer

Figur 5.9 viser influenslinjer for grunntilstanden og ved en temperatursenkning på 5 grader. Ved å justere influenslinjen tilsvarende $\varepsilon = \alpha * \Delta T = \underline{2,4 \cdot 10^{-4}}$ sammenfaller influenslinjene.



Figur 5.10 Influenslinjer, justert for tøyning pga. temperatur

5.3 Oppsummering temperatureffekter

Stivhetsforandringene for stål er små i området for temperaturene som kan opptre i Trondheim. En temperaturvariasjon på $\sim 50^{\circ}$ C kan være sannsynlig gjennom året. Dette vil kunne påvirke målingene for Lerelva bro i størrelsesorden $\pm 5\%$. Den termiske utvidelsen til stålet vil i mye større grad påvirke tøyningene, men denne vil bare endre grunntøyningene i stålet. Målingene kan justeres for temperaturutvidelser ved å bruke en tøyningsverdi fra tidsrommet før toget kommer innenfor sensorenes influensområde.

Lerelva bro er konstruert med glidelager ved det ene opplageret. Dermed vil ikke temperaturutvidelser påvirke stivheten for konstruksjonen i like stor grad som broer med fastlager eller innspenning i begge ender. Det antas at stivhetsendringer på grunn av termiske utvidelser vil ha en større innflytelse på konstruksjoner med fastlager og/eller innspenninger da dette vil innføre tvangsspenninger i konstruksjonen.

Betong har tilnærmet lik temperaturutvidelseskoeffisient som stål (nde-ed.org 2016). Tøyninger på grunn av temperaturutvidelser vil derfor ha lignende effekter i betong- og stålkonstruksjoner. Stål har forholdsvis lave endringer i elastitetsmodul i temperaturområdene som er aktuelle for en jernbane i drift. Betong gjennomgår større endringer i elastitetsmodul i det samme temperaturområdet. Til sammenligning har betong en foreslått β -verdi i størrelsesorden $1,4 \cdot 10^{-3}$ til $1,2 \cdot 10^{-2}$. Det tilsvarer ca. 3-30 ganger den tilsvarende verdien for stål (Corbally, Cantero og Kalin 2013). Betongkonstruksjoner vil derfor gjennomgå stivhetsforandringene i større grad enn stålkonstruksjoner.

6 Konklusjon og forslag til videre arbeid

6.1 Konklusjoner

I dag er alle de tre sensorene montert på samme konstruksjonsdel. Dette gjør at det vil være en stor sammenheng mellom endringer i influenslinjene og dermed vektberegningene for alle sensorene. Det er vanskelig å estimere en kontrollvekt for togene som passerer over broa uten å ha foretatt en statisk veiing på forhånd. Derfor er det også vanskelig å kunne konkludere om endringer i tøyninger skjer på grunn av endringer i togvekt eller endringer i konstruksjonen. Influenslinjer er definert ene og alene gjennom broas mekaniske egenskaper. Derfor skal de kunne beskrive endringer uavhengig av togvekt. Men dersom det skal kunne oppdages endringer, må influenslinjene kalibreres ofte, som igjen baserer seg på en statisk veiing. Ved å benytte sensorer på flere konstruksjonsdeler på broa, bør det i større grad være mulig å oppdage lokale endringer i konstruksjonen, for eksempel ved uoverensstemmelser mellom beregnede akselvekter for sensorer i ulike plasseringer.

Skadesimuleringene har vist at sensorene i dagens plassering vanskelig kan oppdage skader, selv i enden av samme langbærer som de er plassert på. Simuleringen med sensorer i nærheten av en skade har vist at influenslinjene ligner på dagens plassering i både form og amplitude. Det bør derfor være mulig å benytte tøyningssensorer til både skadeovervåkning og vektberegninger ved en plassering innenfor ca. 200 mm fra sannsynlig skadested.

Endringer i elastitetsmodul for stål er små for vanlige temperaturer, men det er uansett en effekt som kan være verdt å korrigere for. Å innføre temperatur som en parameter i vektberegningen vil være et steg videre i arbeidet mot presise BWIM-systemer.

Måltallet for amplitude (M_{SG}) viser stor korrelasjon med beregnede akselvekter, og bør derfor kunne brukes som et pålitelig estimat til hvordan en endring i influenslinje vil påvirke beregnede akselvekter.

Eldre broer er laget for tog med lavere akselvekt enn dagens tog (Jernbaneverket 2014). Derfor er hastigheten over mange broer redusert i forhold til resten av strekningen. Hvis en med sikkerhet kan vite hvilke tøyninger som oppstår i konstruksjonen når tog passerer, er det mulig at høyere hastigheter kan tillates dersom man med sikkerhet kan si at tøyningene er innenfor tillatte grenseverdier.

Alle jernbanebroer er utsatt for utmatting. Dersom BWIM-systemer kan ha en pålitelig «oppetid» over lang tid, kan antallet lastsykluser broa har blitt utsatt for bestemmes nøyaktig. Dette vil gi et bedre grunnlag for utmattingsberegninger og kan dermed gi rom for mindre konservative anslag for lastsykluser, Dette kan gjøre at vedlikehold, eller utskifting kan utsettes.

6.2 Forslag til videre arbeid

Dynamiske effekter er et stort usikkerhetsmoment i BWIM-systemer. Det er ønskelig å se på hvordan ulike hastigheter kan påvirke målinger og influenslinjer. Det bør være mulig å simulere hele togpasseringer med dynamiske effekter i Abaqus. Det må i så fall opprettes et pythonscript som lager laster på samme måte som Gunnstein Frøseths last-script. Men det må kunne opprette flere amplituder og tilhørende amplitudetider for samme last, slik at det kan defineres ulike akselvekter og –plasseringer.

For å ta hensyn til dynamiske effekter kan det beskrives dynamisk influenslinje. Denne kan beskrives gjennom en sammenheng med den statiske influenslinje, eller dannes helt på eget grunnlag.

For å se på temperatureffekter på BWIM-systemer, er sannsynligvis betongkonstruksjoner mer interessant enn stål. Betongkonstruksjoner vil oftere være innspente og er dermed mer utsatt for endringer i geometriskstivhet pga. temperaturutvidelser. Betong er også mer utsatt for endringer i elastitetsmodul. Betongkølverter er ofte brukt som planoverganger og finnes derfor mange steder langs jernbanen. Disse vil ha enkle influenslinjer og vil derfor kunne være interessante kandidater for BWIM-eksperimentering.

Etter at et tog har passert over en bro, vil det oppstå frie svingninger i konstruksjonen. Ved å se på forandringer i de frie svingningene, kan endringer i konstruksjonens naturlige frekvens oppdages. Dette kan gi informasjon om endringer i konstruksjonen.

7 Referanser

- Cantero, Daniel, og Arturo Gonzalez. *Bridge Damage Detection Using Weigh-in-Motion Technology*. Technical paper, American Society of Civil Engineers, 2014.
- Corbally, Robert, Daniel Cantero, og Jan Kalin. «Collaborative project FP7-315629 Seventh Framework Programme Research for SMEs. BridgeMon, Deliverable D1.2.» Forskningsrapport, 2013.
- Engineering Toolbox. *Engineering Toolbox*. 2016. http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_773.html (funnet 2016).
- Jernbaneverket. *Jernbaneverket*. 2014. <http://www.jernbaneverket.no/Jernbanen-i-tall/> (funnet 03 2016).
- Journal of Applied Physics. «Low-temperature elastic properties of four austenitic stainless steels.» *Journal of Applied Physics* 46, Februar 1975: 3855.
- Journal of Applied Physics. «Stainless-steel elastic constants at low temperatures.» *Journal of Applied Physics* 52, 1587, Mars 1981: 1587.
- Matematikk.net. *Matematikk.net*. 2016. <http://matematikk.net/side/Matlab> (funnet 2016).
- nde-ed.org. *nde-ed.org*. 2016. https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Physical_Chemical/ThermalExpansion.htm (funnet 2016).
- Quilligan, Michael. *Bridge Weigh-in-Motion*. Master thesis, Stockholm: Royal Institute of Technology, 2003.
- Rowley, Cillian William. *Moving Force Identification of Axle Forces on Bridges*. Doktoravhandling, National University of Dublin, University College Dublin, UCD School of Architecture Landscape & Civil Engineering, 2007.
- Schwer, Leonard E. *Validation metrics for response histories*. Article, London: Springer-Verlag, 2007.
- Spittel, M. «Landholt Börnstein -Group VIII Advanced Materials and Technologies.» 2009.
- The American Society of Mechanical Engineers. «Code for Pressure Piping.» The American Society of Mechanical Engineers, 2007.
- Tognett.no. *Tognett*. 2016. <http://www.tognett.no/article.asp?s=13&ID=244> (funnet 2016).
- Wikipedia. *Wikipedia*. 04 2016. https://no.wikipedia.org/wiki/Norske_v%C3%A6rrekorder#Fylkesvis (funnet 04 2016).

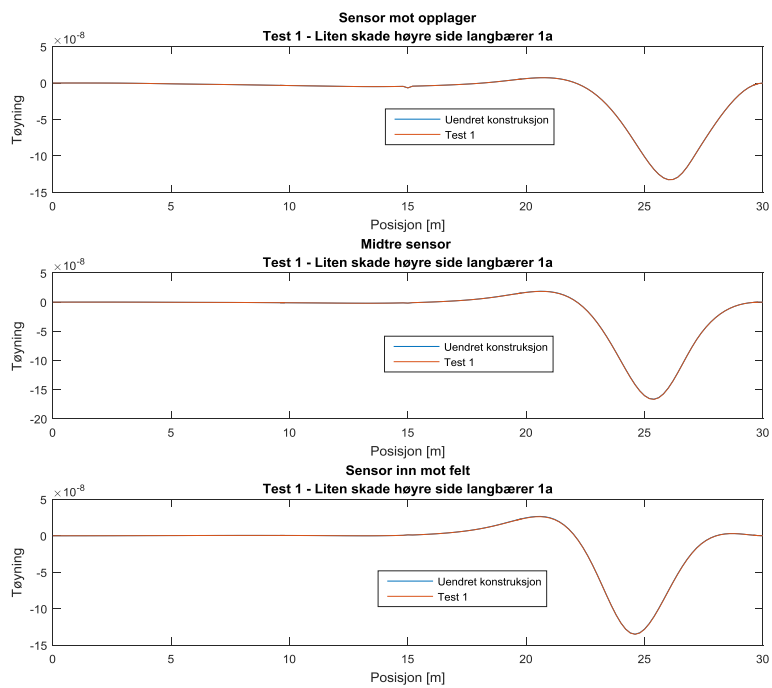
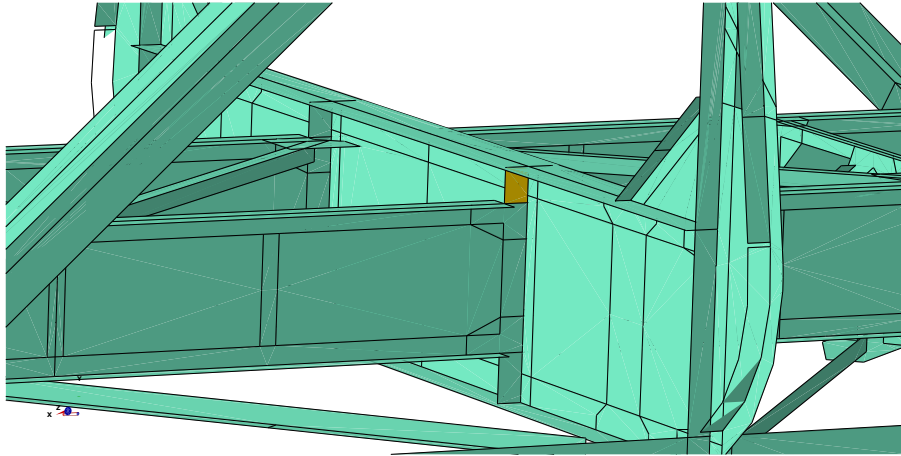
8 Vedlegg

Innhold

Vedlegg A. Alle skadesimuleringer.....	1
a) Test 1 – langbærer 1a.....	1
b) Test 2 – langbærer 1a.....	2
c) Test 3 – langbærer 1a.....	3
d) Test 4 – langbærer 1a.....	4
e) Test 5 – langbærer 2a.....	5
f) Test 6 – langbærer 1b.....	6
g) Test 7 – langbærer 1b.....	7
h) Test 8 – langbærer 1b.....	8
i) Test 9 – langbærer 2a.....	9
j) Test 10 – langbærer 2a	10
k) Test 11 – langbærer 2b	11
Vedlegg B. Influenslinjer for alle elementer, sensor ved skade. Horisontale tøyninger	12
a) Rad A.....	12
b) Rad B.....	13
c) Rad C.....	14
d) Rad D.....	15
e) Rad E.....	16
Vedlegg C. Influenslinjer for alle elementer, sensor ved skade. Vertikale tøyninger.....	17
a) Rad A.....	17
b) Rad B.....	18
c) Rad C.....	19
d) Rad D.....	20
e) Rad E.....	21
Vedlegg D. Forskjeller i influenslinjer for sensor nær skade.....	22
a) Tøyninger i broas lengderetning.....	22
b) Tøyninger i langbærerens høyderetning.....	23
Vedlegg E. Temperaturforandringer.....	24
Vedlegg F. Generering av tøyningshistorikk.....	27
Vedlegg G. Beregning av akselvekter	29
Vedlegg H. Script for å beregne forskjeller i influenslinjer.....	30

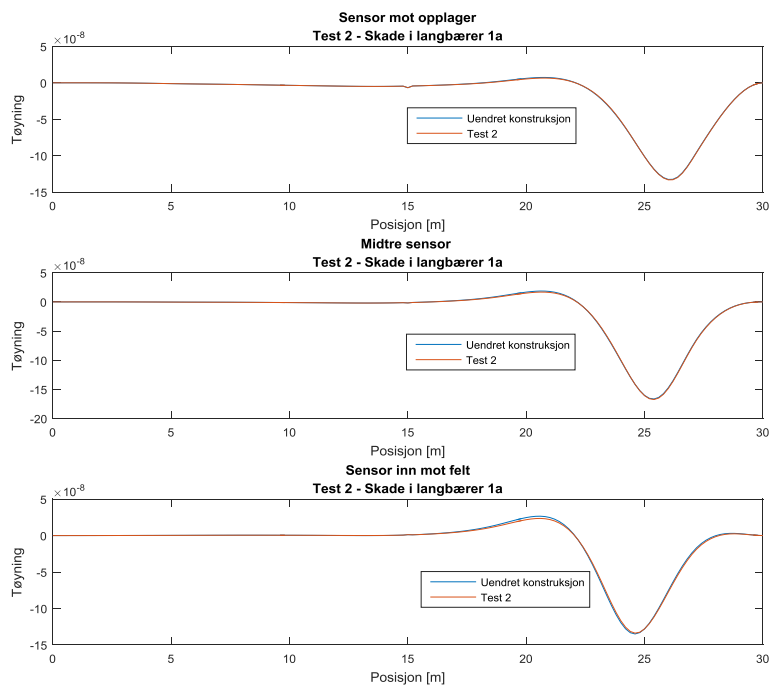
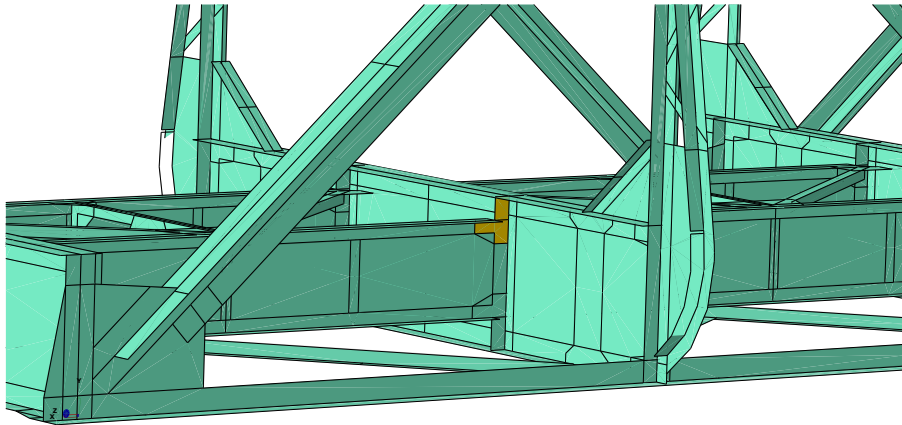
Vedlegg A. Alle skadesimuleringer

a) Test 1 – langbærer 1a



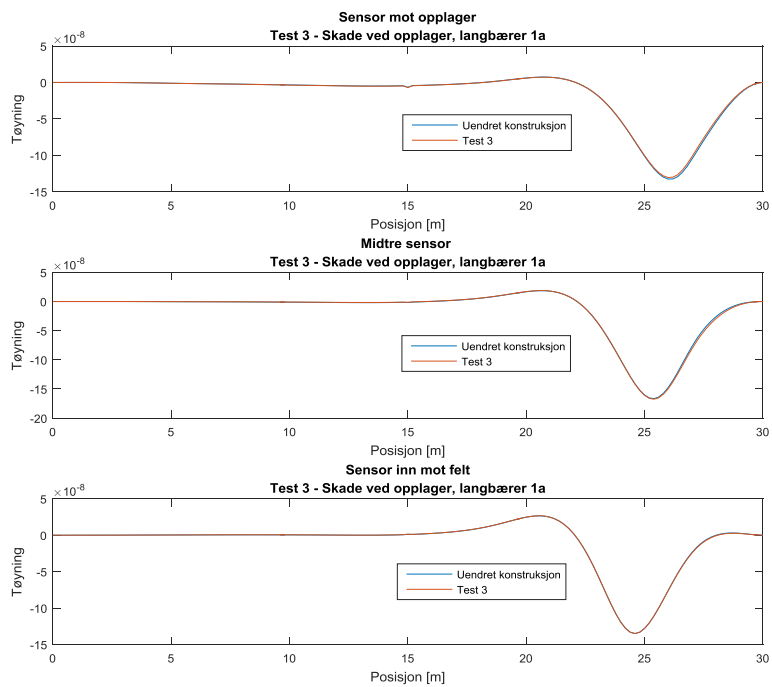
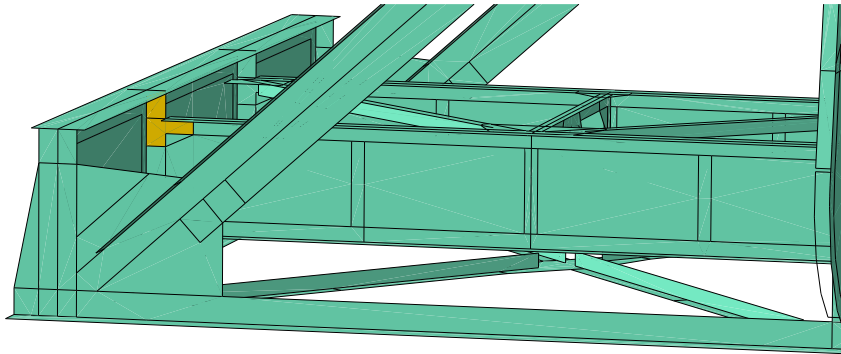
Test 1	Magnitude-forskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,0015	0,0012	0,002	967,9	0,003
Sensor midt	0,002	0,0006	0,002	967,4	0,002
Sensor opplager	0,001	0,000	0,001	966,3	0,001

b) Test 2 – langbærer 1a



Test 2	Magnitudo-forskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	-0,010	0,010	0,014	963,7	-0,002
Sensor midt	0,003	0,004	0,005	970,6	0,006
Sensor opplager	0,003	0,003	0,004	968,5	0,003

c) Test 3 – langbærer 1a

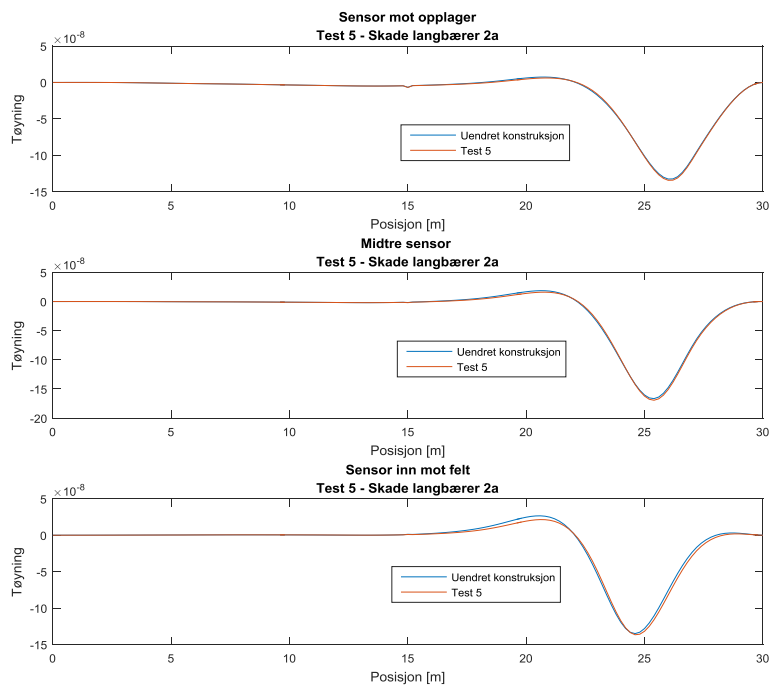
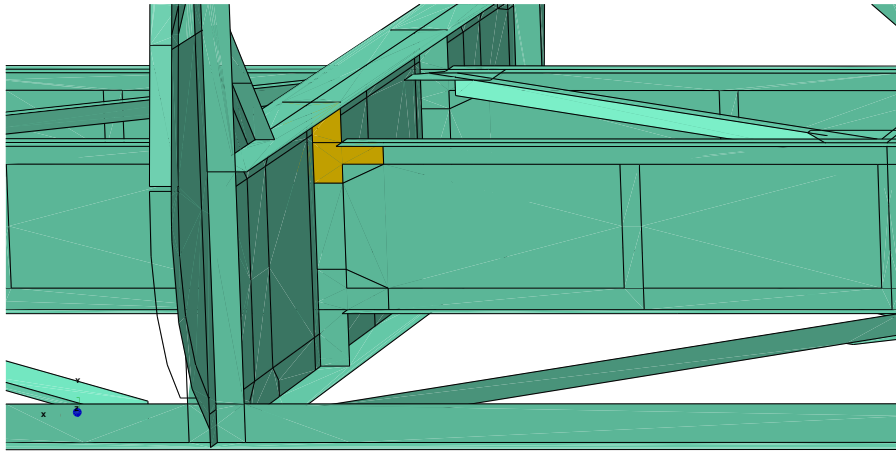


Test 3	Magnitudo-forskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,000	0,002	0,002	966,6	0,001
Sensor midt	0,012	0,006	0,014	979,4	0,015
Sensor opplager	-0,020	0,004	0,020	947,0	-0,019

d) Test 4 – langbærer 1a

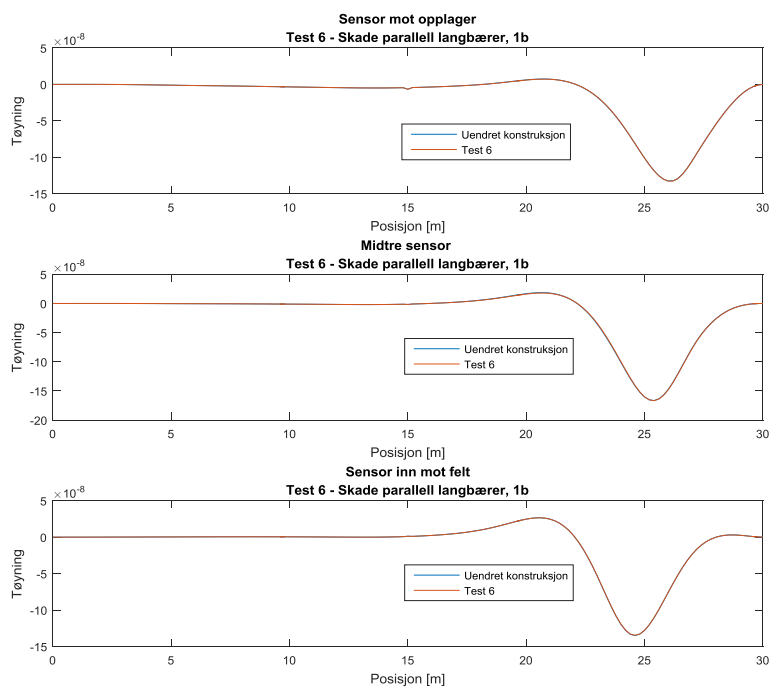
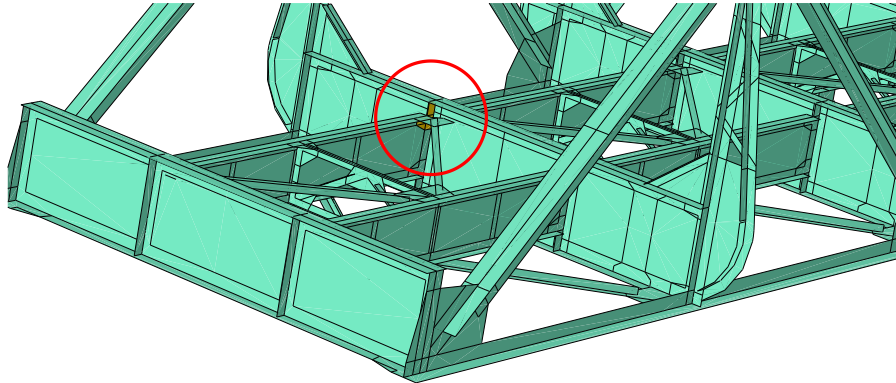
Ble utelatt.

e) Test 5 – langbærer 2a



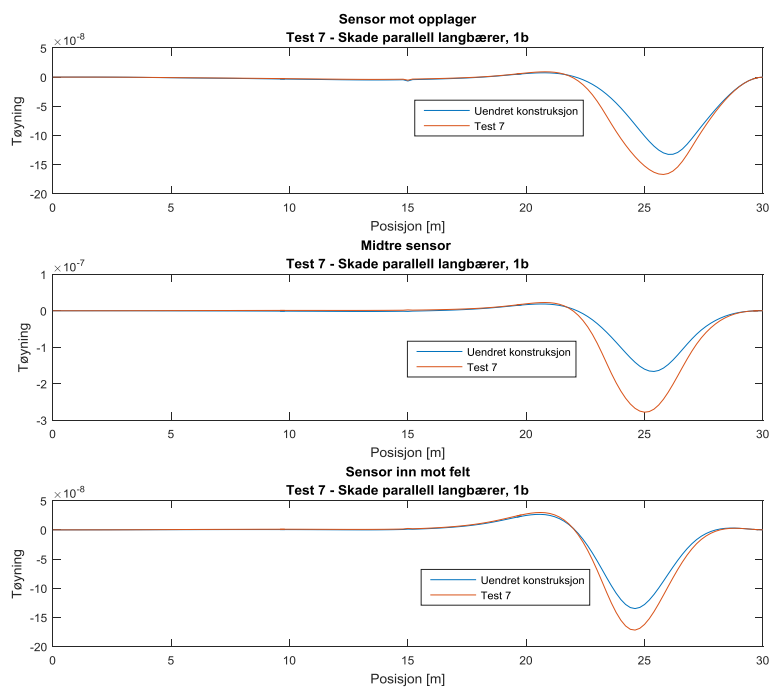
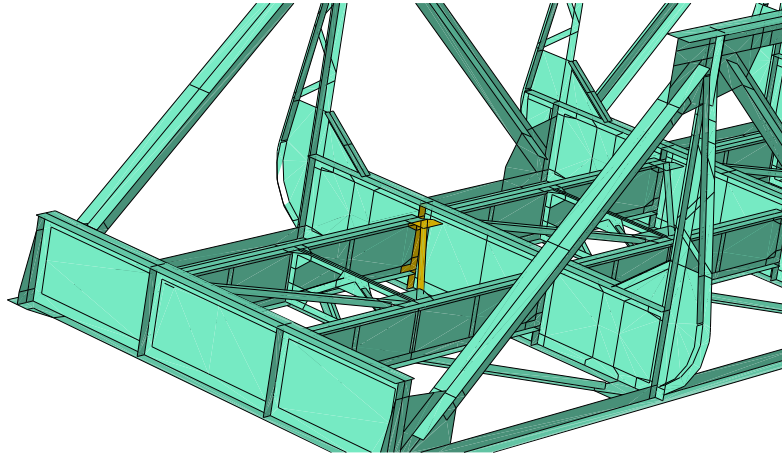
Test 5	Magnitudo-forskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,008	0,021	0,023	987,1	0,023
Sensor midt	0,011	0,008	0,014	978,4	0,014
Sensor opplager	0,010	0,005	0,011	974,6	0,010

f) Test 6 – langbærer 1b



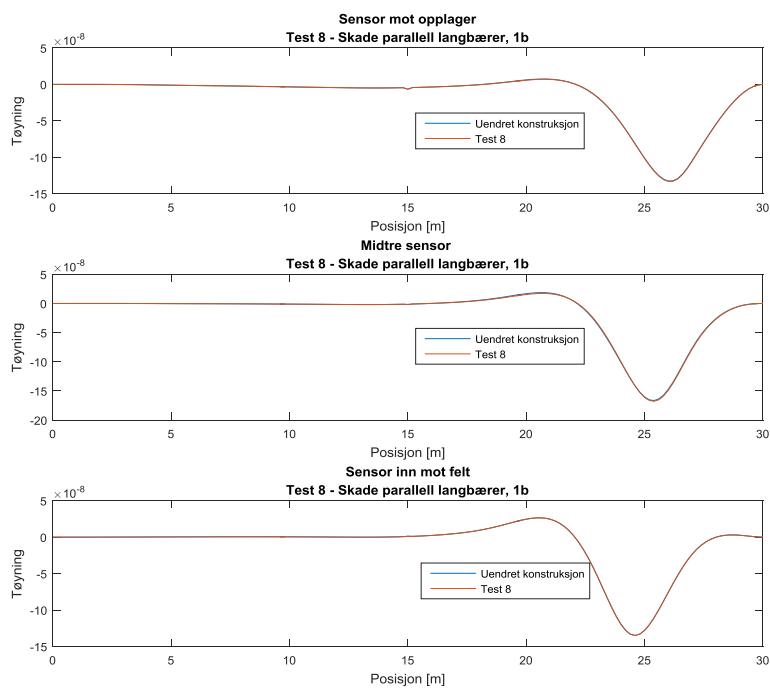
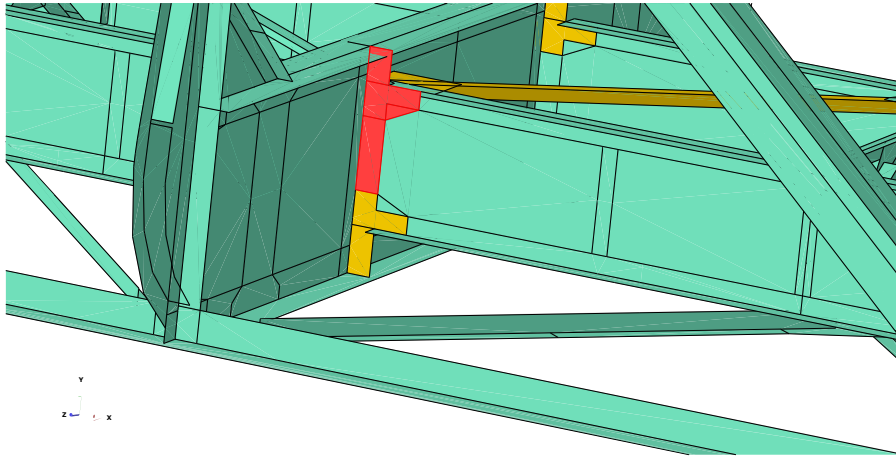
Test 6	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	-0,002	0,001	0,002	963,1	-0,002
Sensor midt	-0,001	0,003	0,003	964,2	-0,001
Sensor opplager	0,000	0,001	0,001	965,4	0,000

g) Test 7 – langbærer 1b



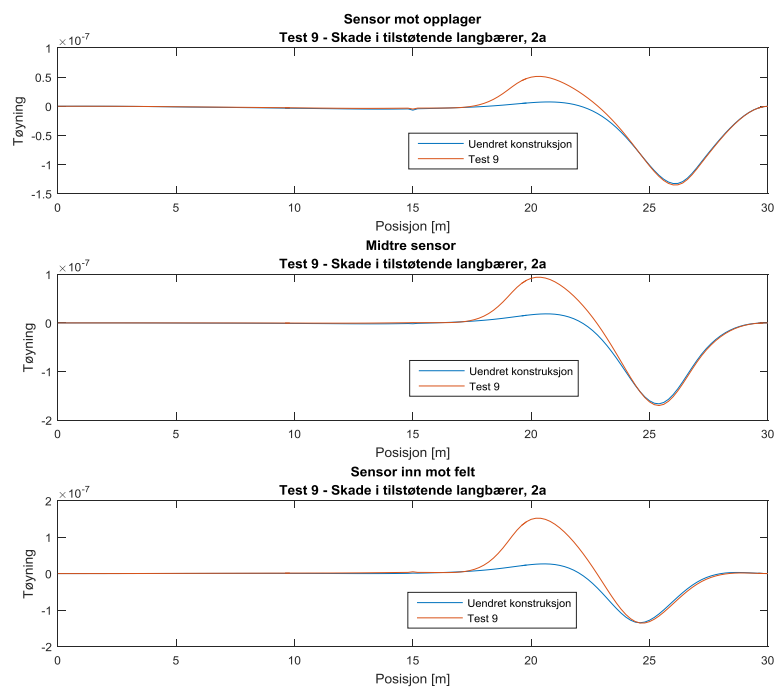
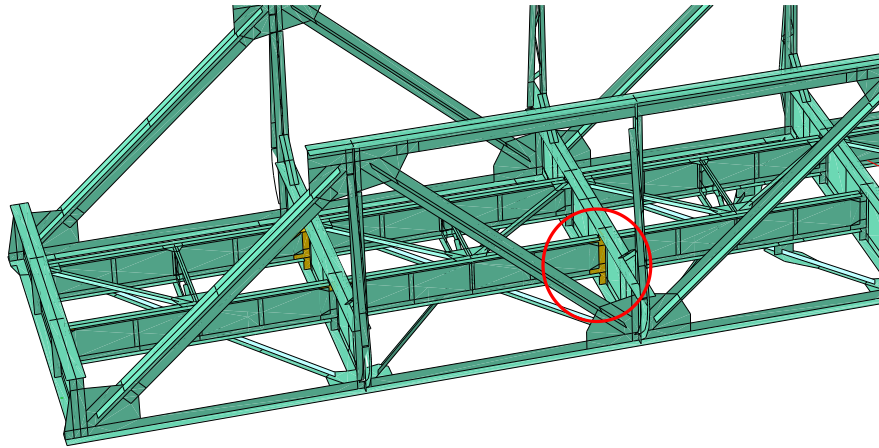
Test 7	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,277	0,010	0,277	1241,8	0,287
Sensor midt	0,731	0,051	0,732	1661,8	0,722
Sensor opplager	0,339	0,058	0,344	1286,4	0,333

h) Test 8 – langbærer 1b



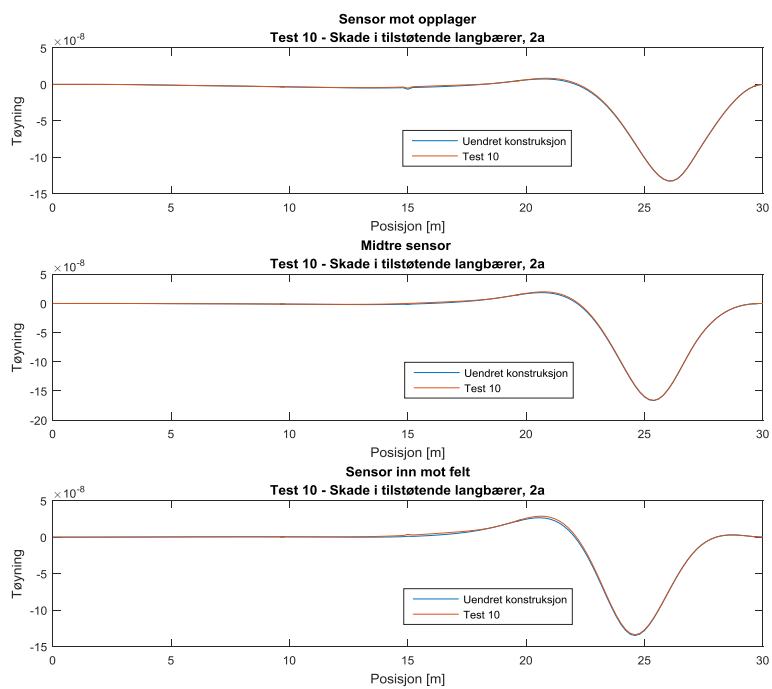
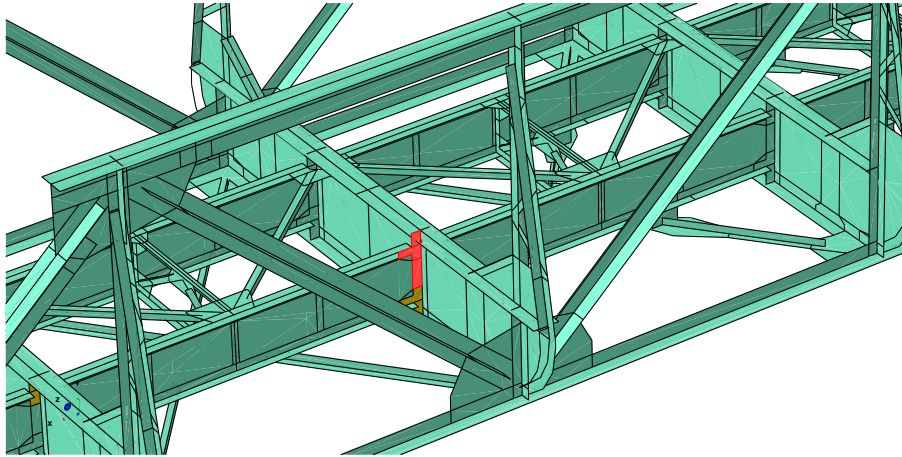
Test 8	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	-0,001	0,001	0,002	964,0	-0,001
Sensor midt	0,004	0,005	0,006	969,8	0,005
Sensor opplager	0,003	0,001	0,004	968,3	0,003

i) Test 9 – langbærer 2a



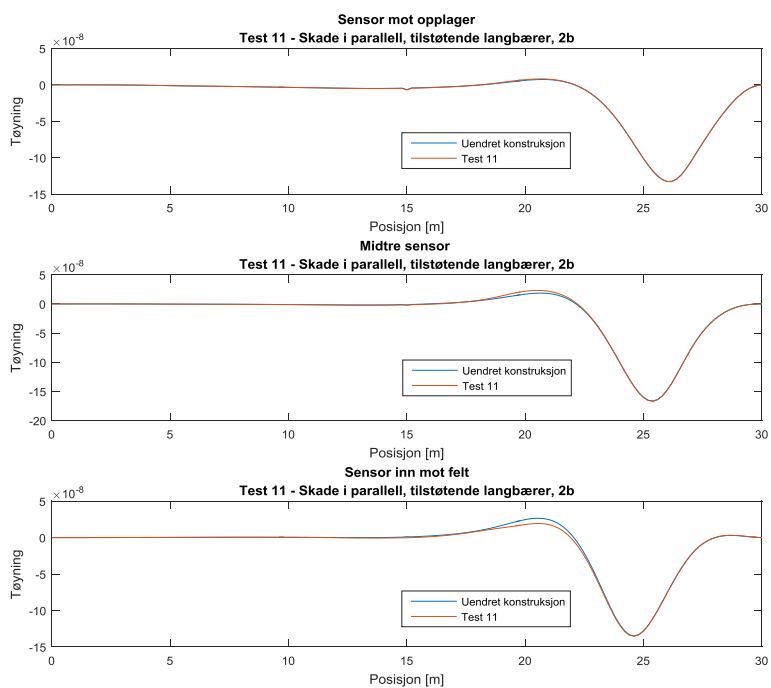
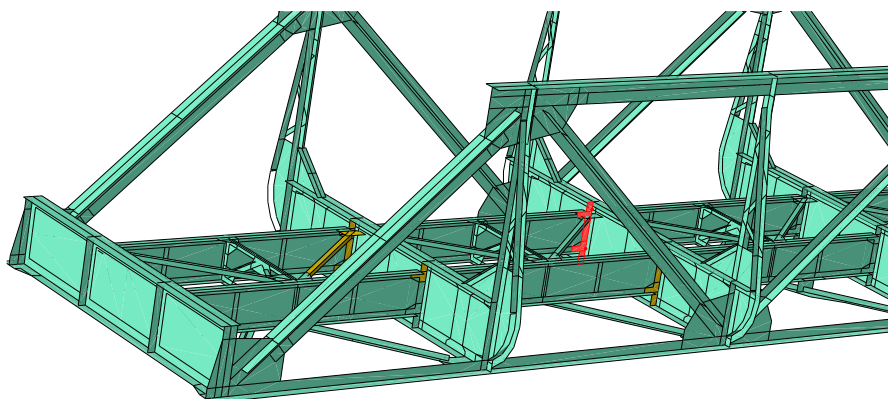
Test 9	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,488	0,222	0,536	850,2	-0,119
Sensor midt	0,146	0,131	0,196	962,5	-0,003
Sensor opplager	0,072	0,098	0,121	905,1	-0,062

j) Test 10 – langbærer 2a



Test 10	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	-0,007	0,010	0,012	947,8	-0,018
Sensor midt	-0,004	0,005	0,006	956,7	-0,009
Sensor opplager	-0,003	0,005	0,006	957,3	-0,008

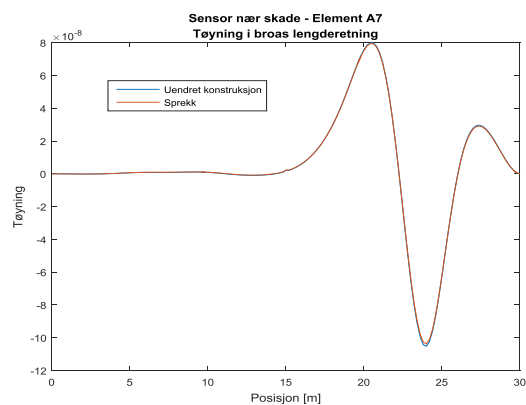
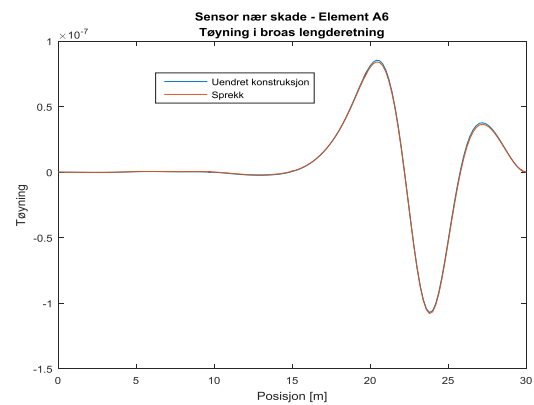
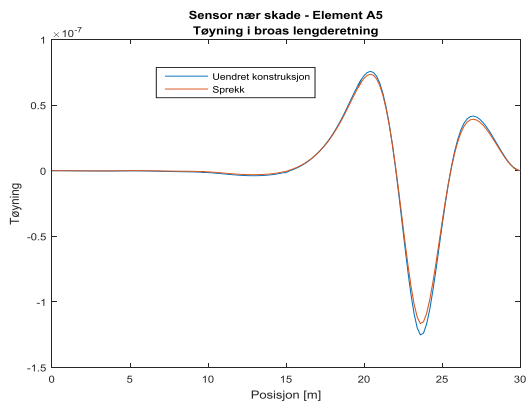
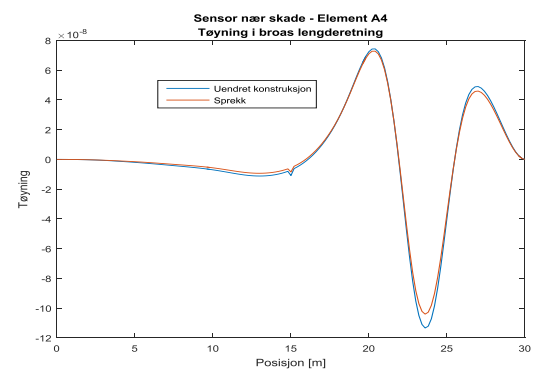
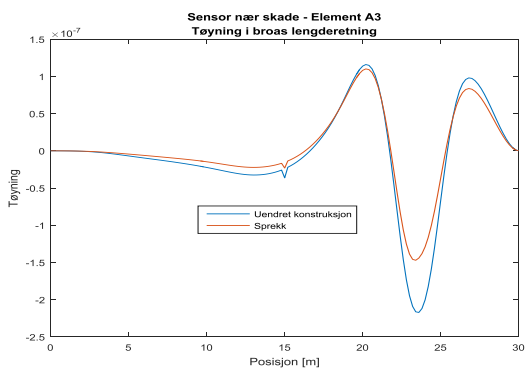
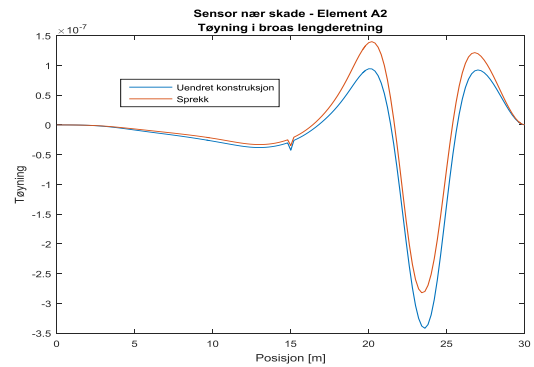
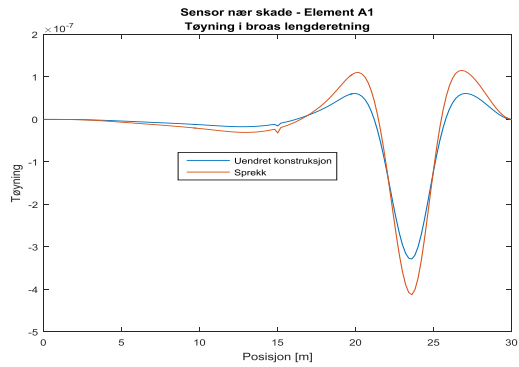
k) Test 11 – langbærer 2b



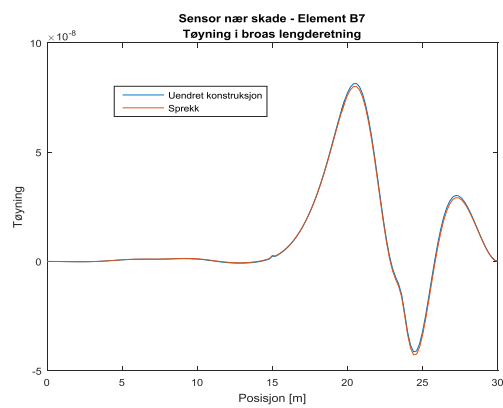
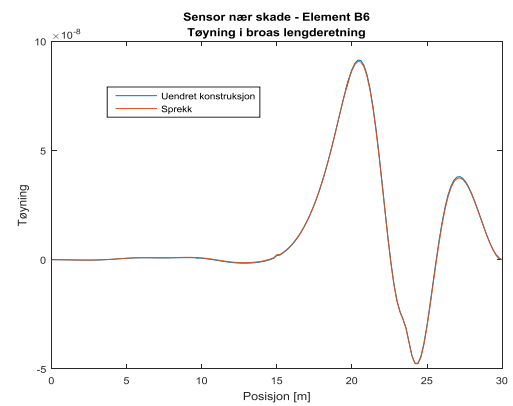
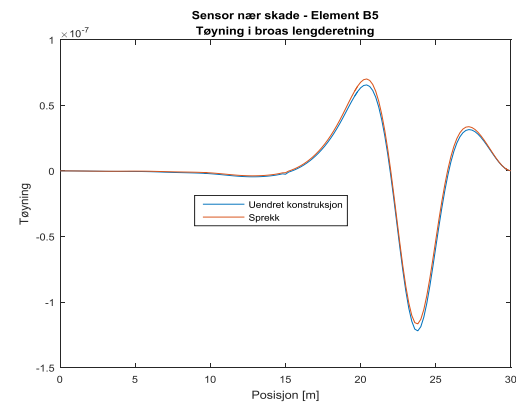
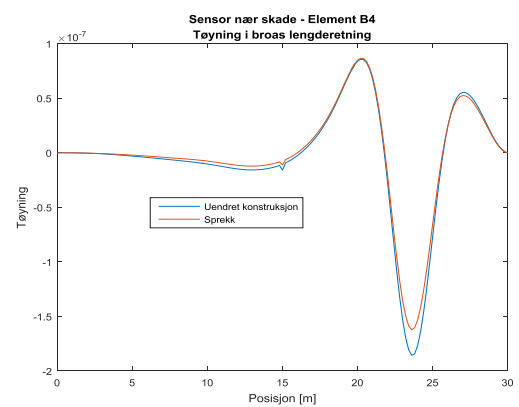
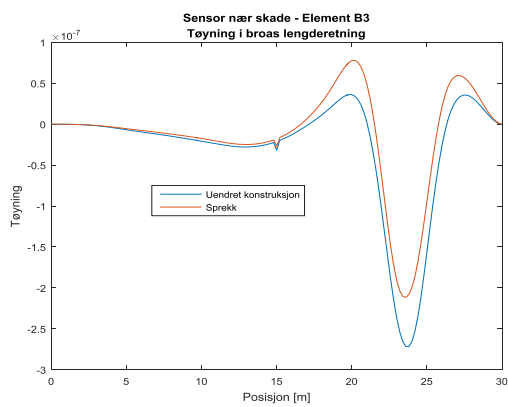
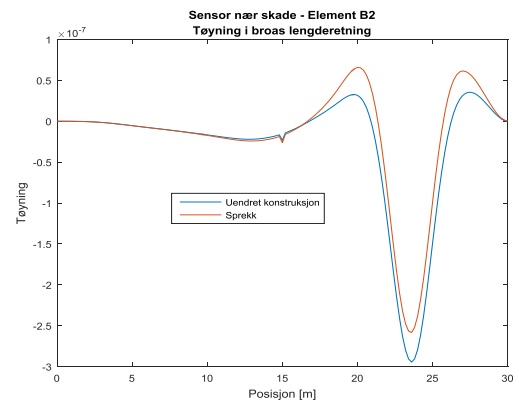
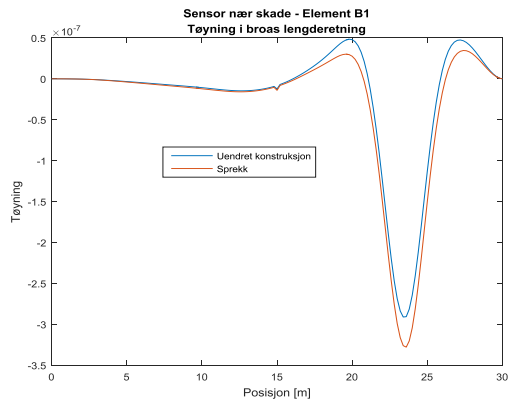
Test 11	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	-0,002	0,019	0,019	979,6	0,015
Sensor midt	0,005	0,009	0,010	964,4	-0,001
Sensor opplager	0,002	0,002	0,003	966,2	0,001

Vedlegg B. Influenslinjer for alle elementer, sensor ved skade. Horisontale tøyninger

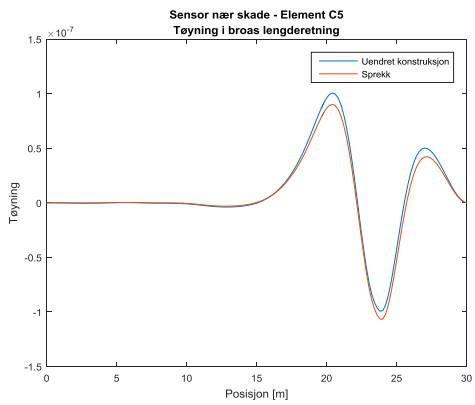
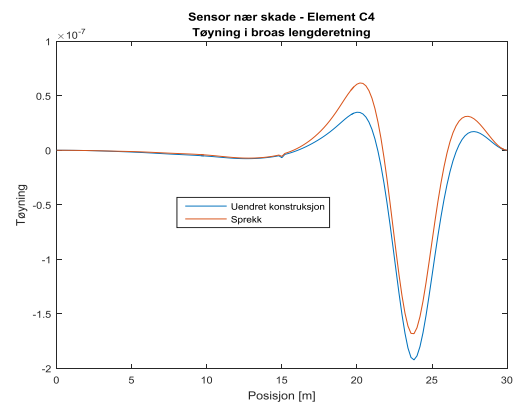
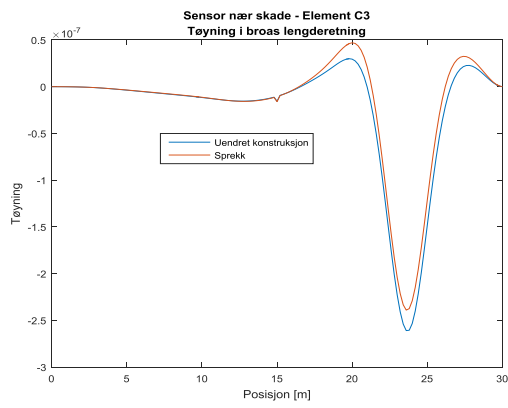
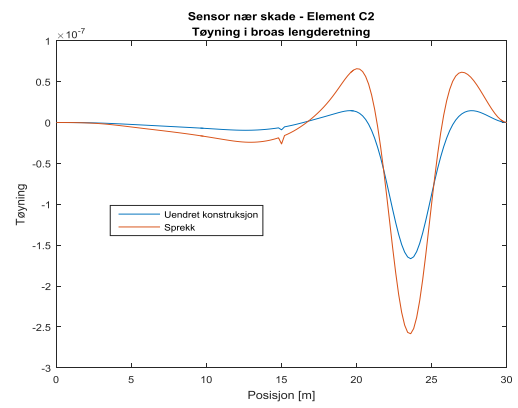
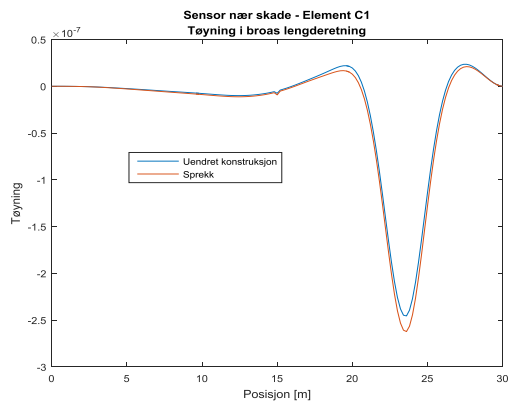
a) Rad A



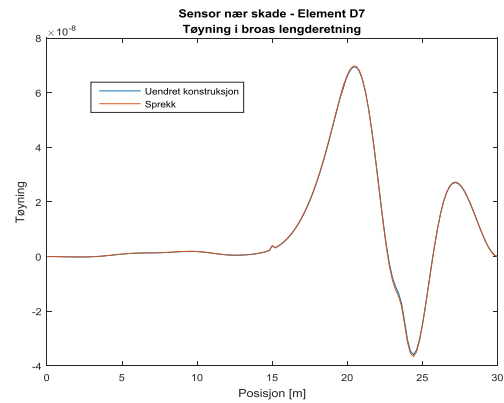
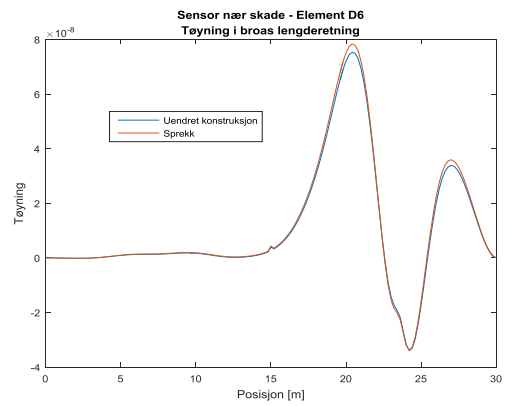
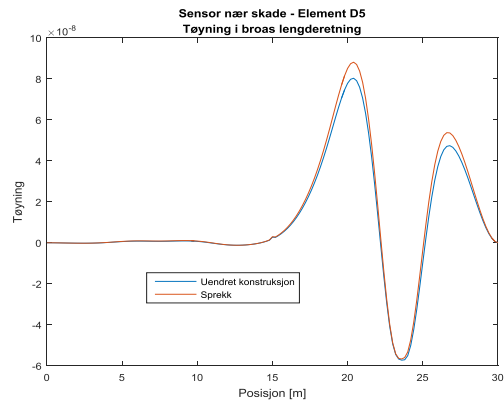
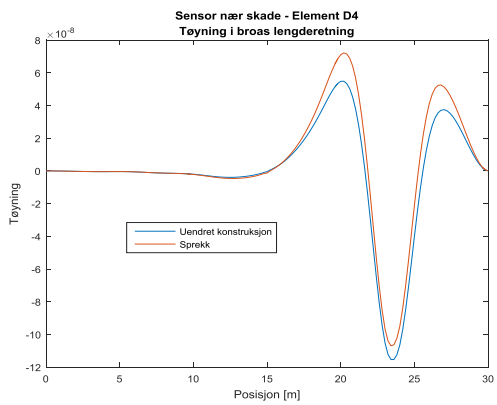
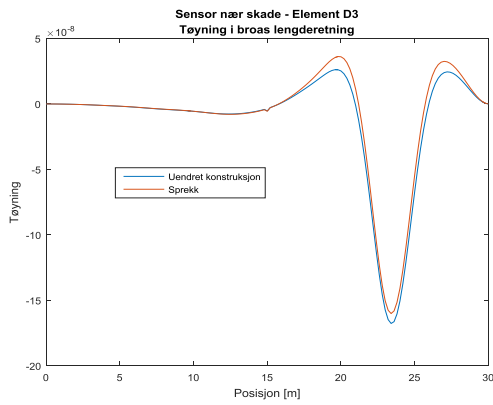
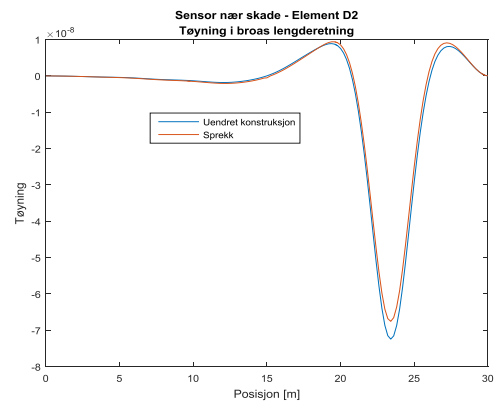
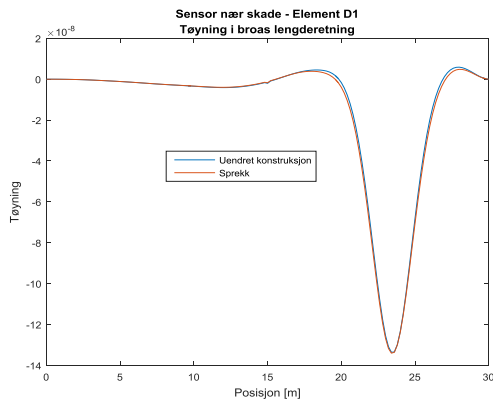
b) Rad B



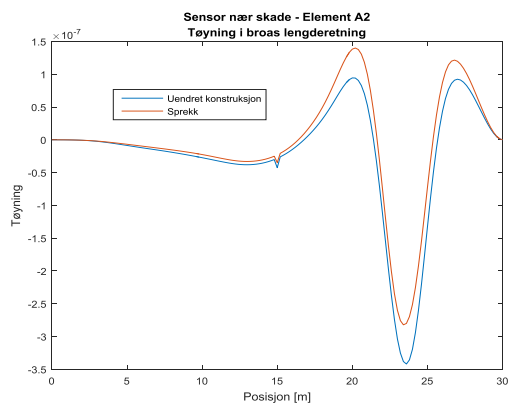
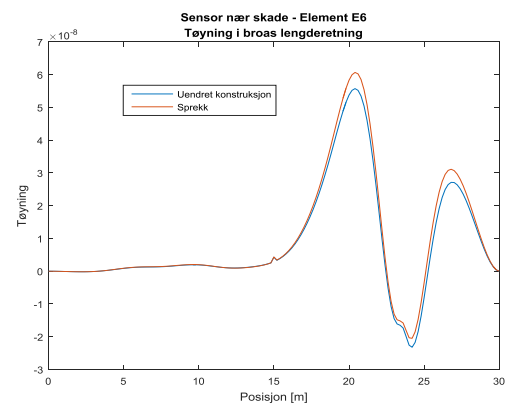
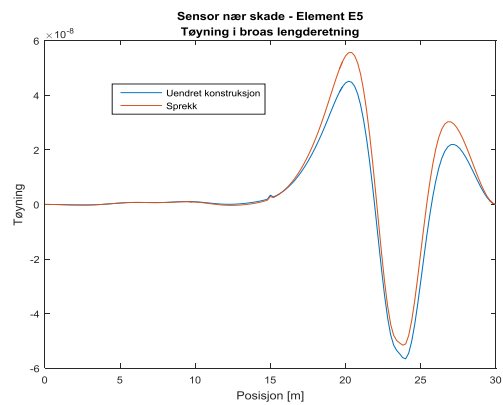
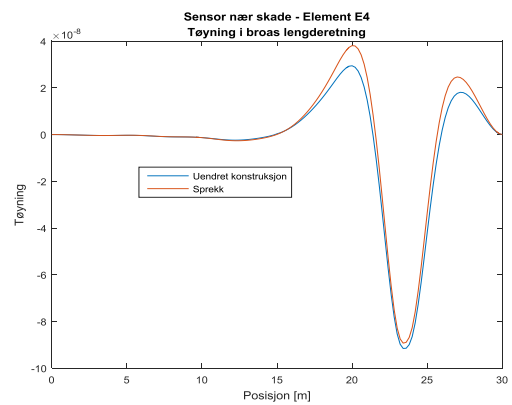
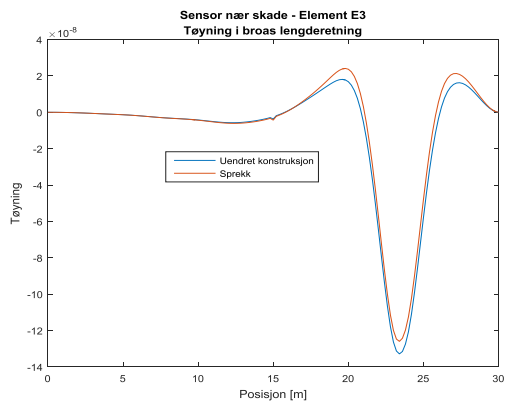
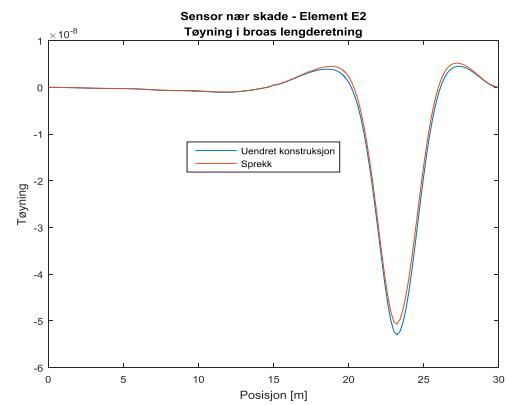
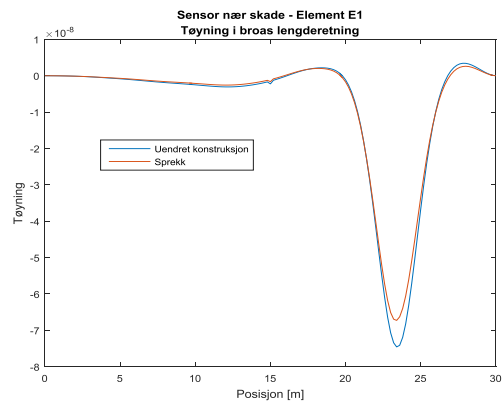
c) Rad C



d) Rad D

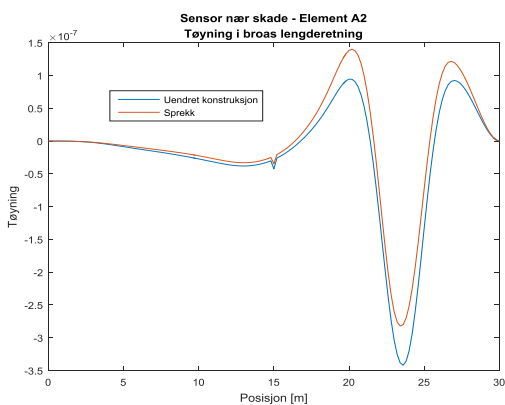
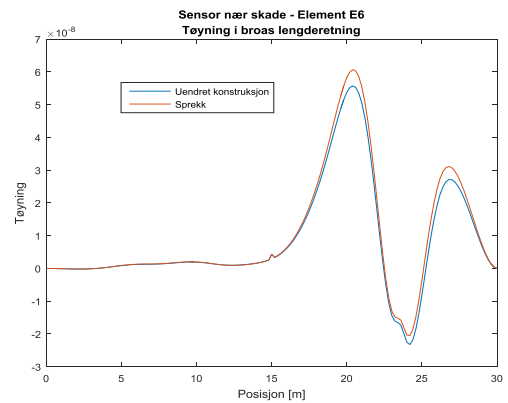
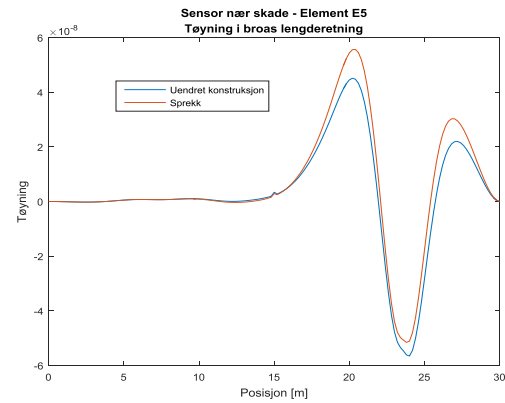
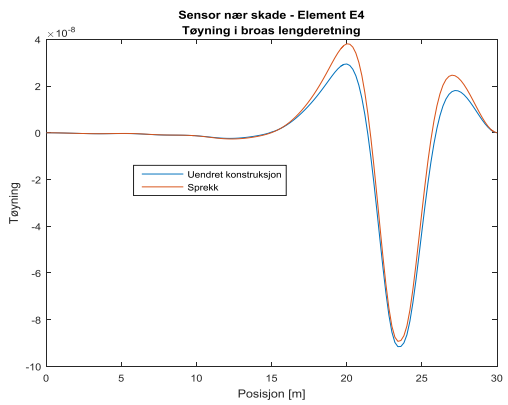
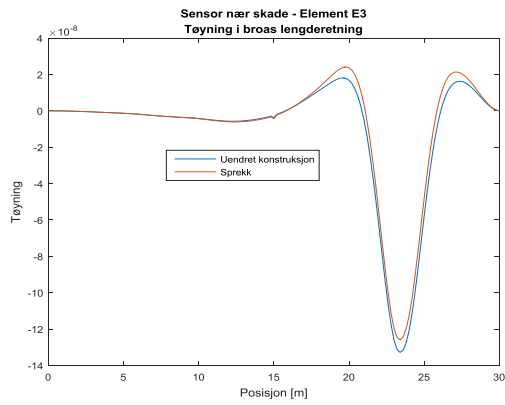
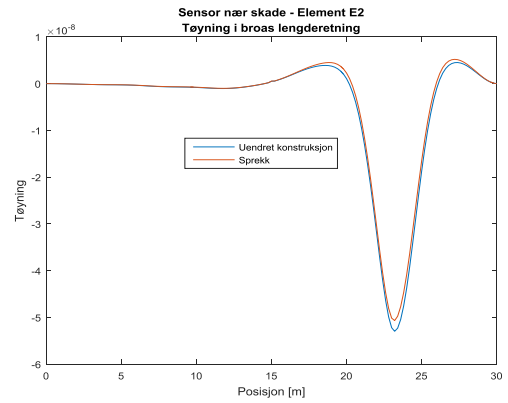
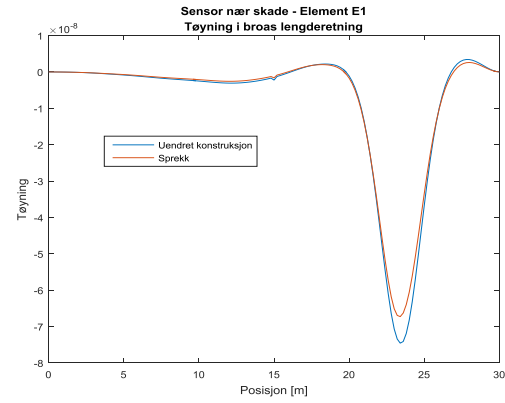


e) Rad E

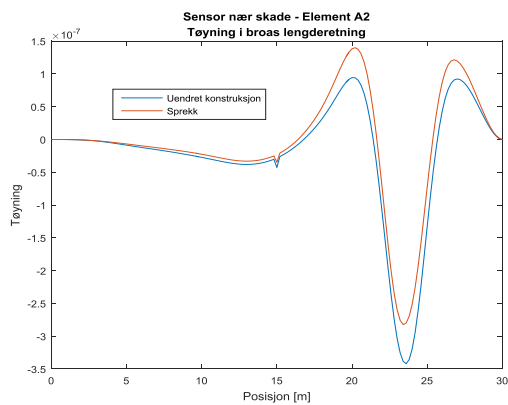
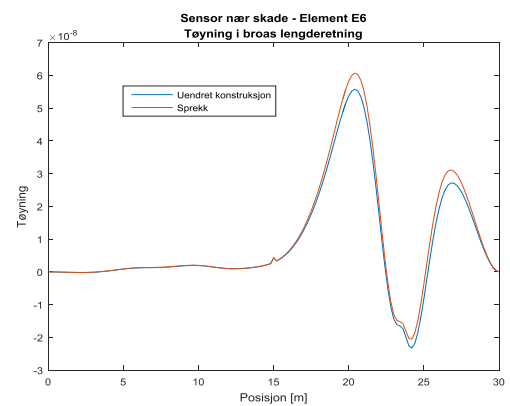
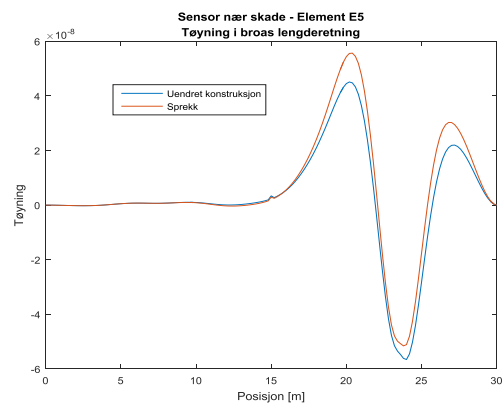
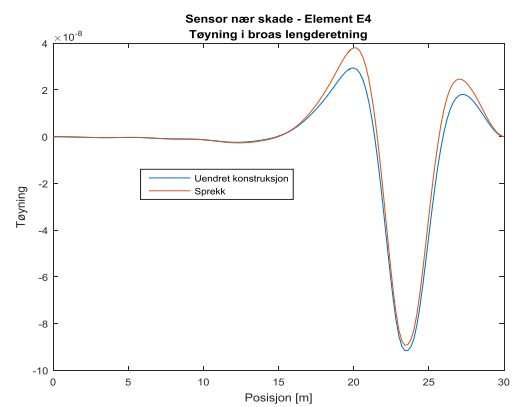
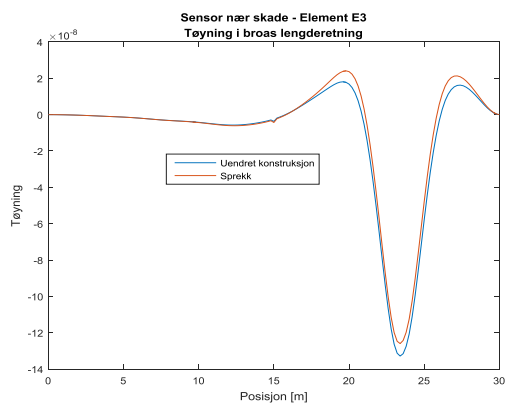
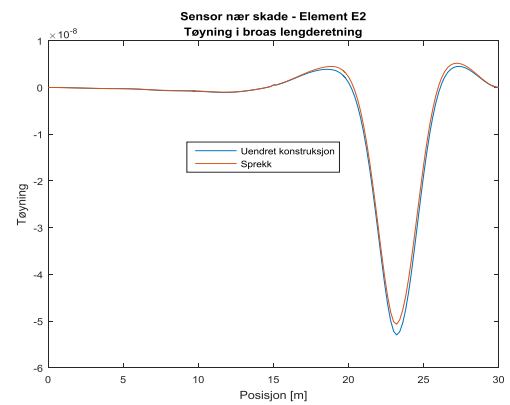
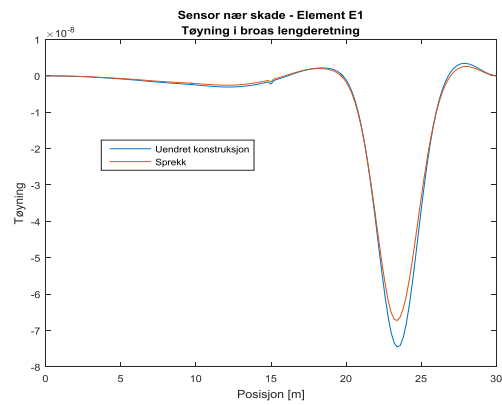


Vedlegg C. Influenslinjer for alle elementer, sensor ved skade. Vertikale tøyninger

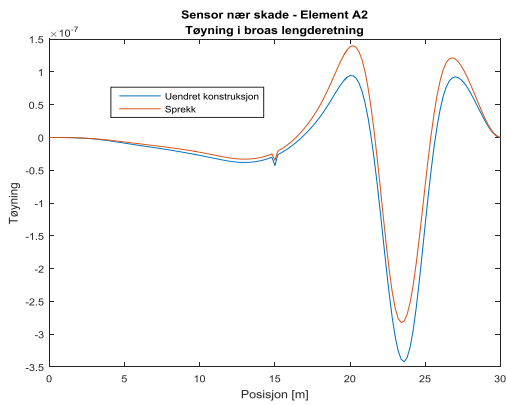
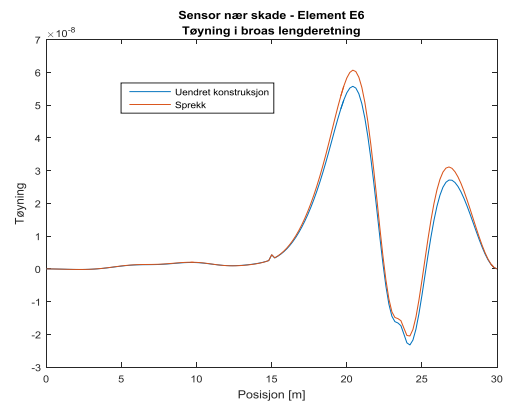
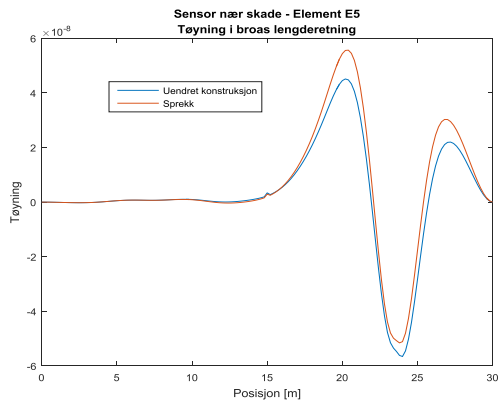
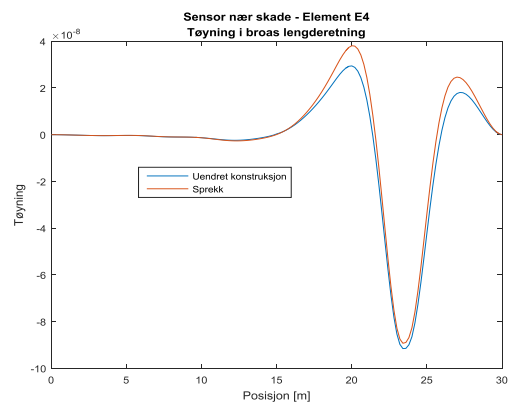
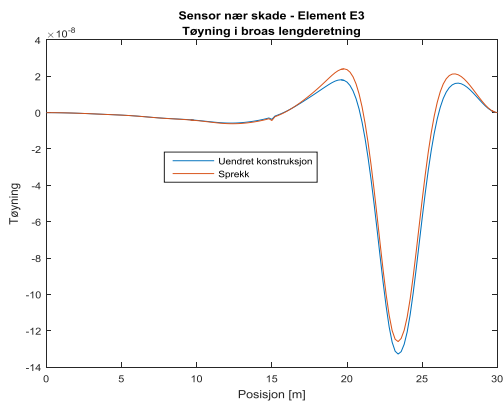
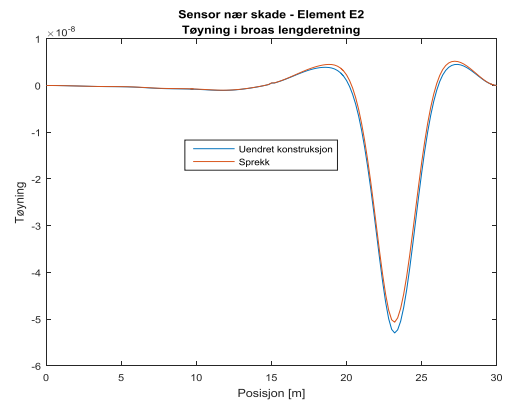
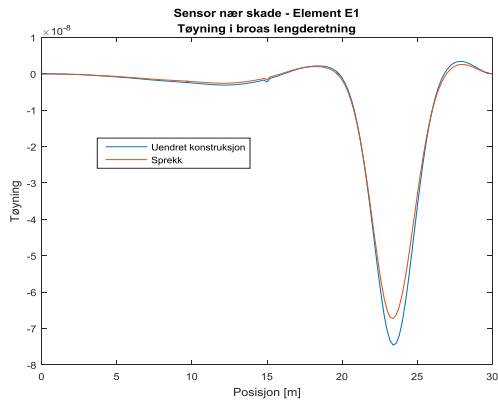
a) Rad A



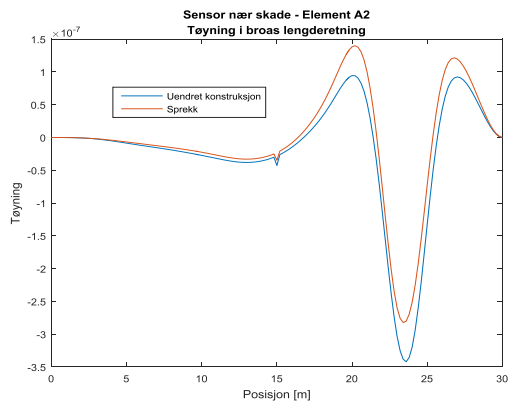
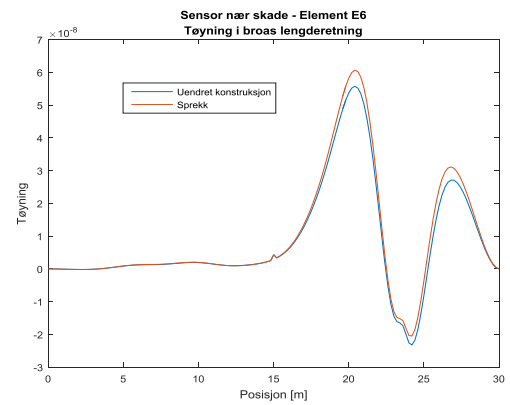
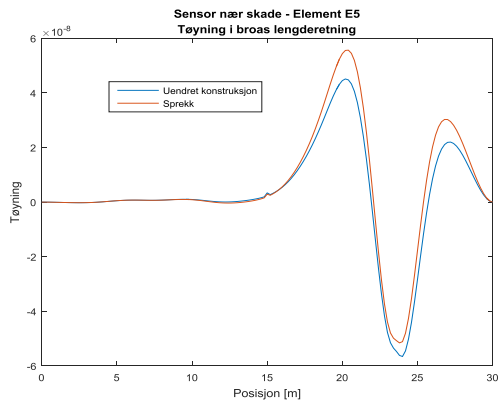
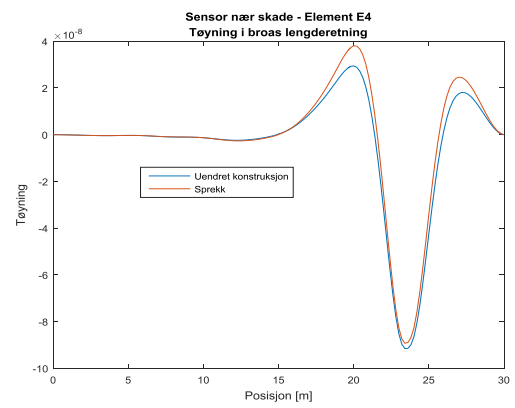
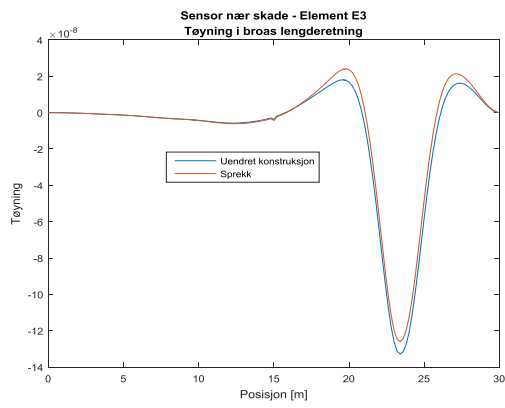
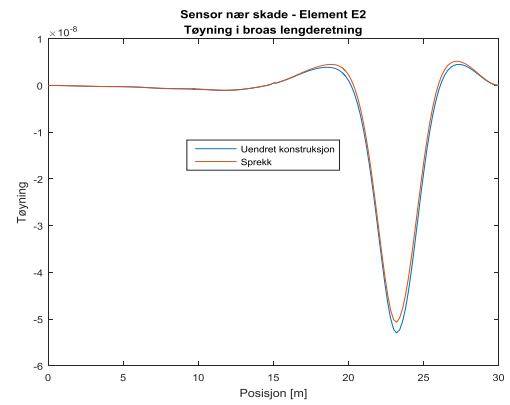
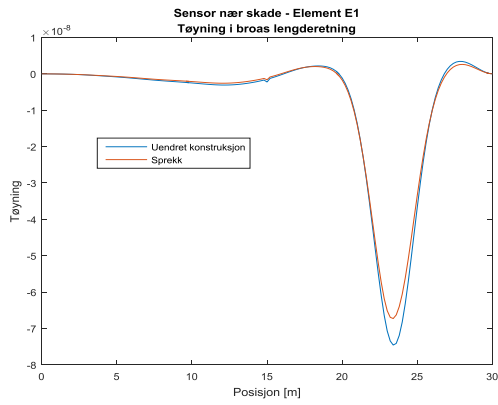
b) Rad B



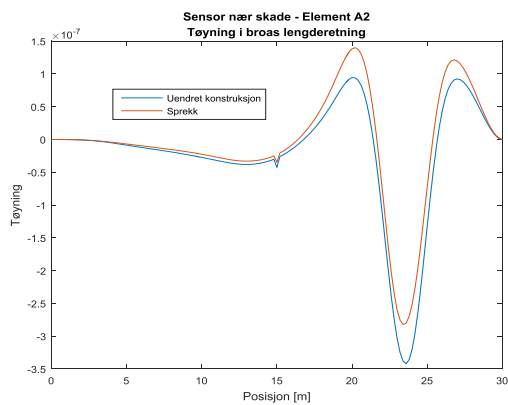
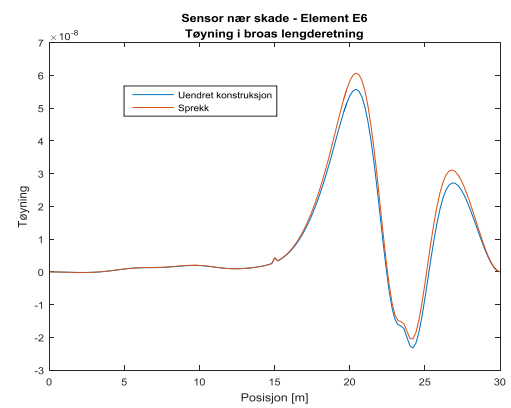
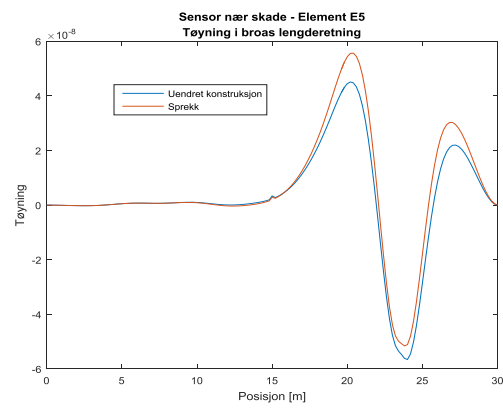
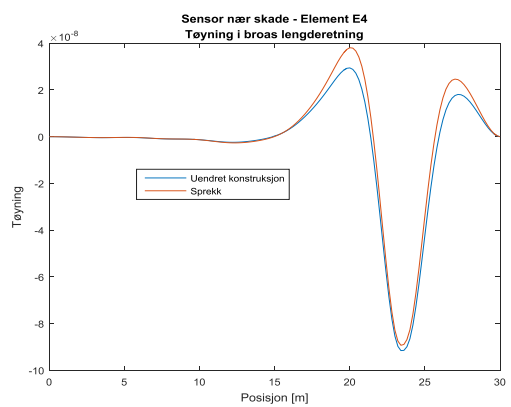
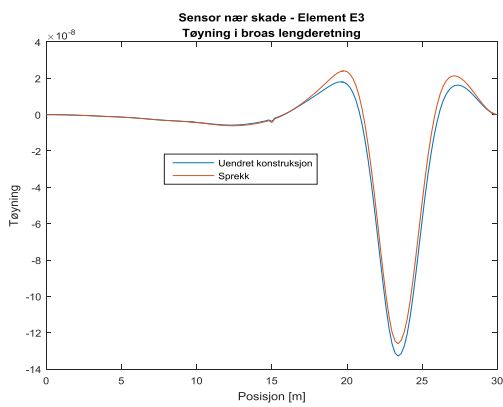
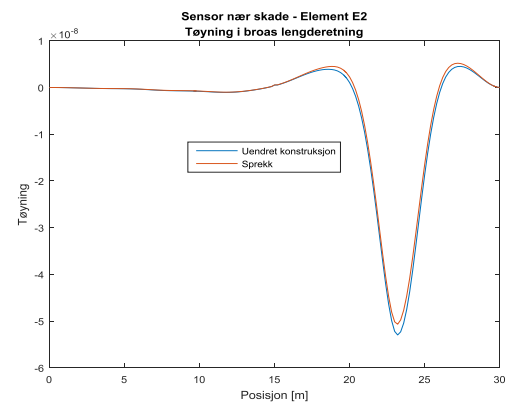
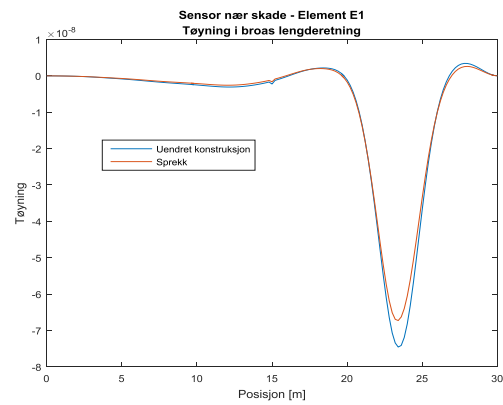
c) Rad C



d) Rad D



e) Rad E



Vedlegg D. Forskjeller i influenslinjer for sensor nær skade

a) Tøyninger i broas lengderetning

Kolonne 7	Kolonne 6	Kolonne 5	Kolonne 4	Kolonne 3	Kolonne 2	Kolonne 1	
-0,0102	-0,0035	-0,0539	-0,0587	-0,2327	-0,0944	0,2572	Rad A
-0,0118	-0,0058	-0,0103	-0,0103	-0,195	-0,1267	0,138	Rad B
-	-	-0,0343	-0,1062	-0,0977	0,5392	-0,768	Rad C
0,0071	0,0403	0,0807	0,0329	-0,0482	-0,0747	0,0172	Rad D
0,0556	0,0849	0,0827	-0,0036	-0,0608	-0,0517	-0,0839	Rad E

Amplitudeforskjell

Kolonne 7	Kolonne 6	Kolonne 5	Kolonne 4	Kolonne 3	Kolonne 2	Kolonne 1	
0,0104	0,0068	0,0544	0,0599	0,2391	0,087	0,0557	Rad A
0,0078	0,0031	0,0211	0,023	0,101	0,0779	0,0414	Rad B
-	-	0,0385	0,0832	0,0415	0,0972	0,0145	Rad C
0,0036	0,0068	0,0221	0,0783	0,0385	0,0154	0,0093	Rad D
0,0127	0,0239	0,0704	0,0501	0,0324	0,0131	0,0112	Rad E

Faseforskjell

Kolonne 7	Kolonne 6	Kolonne 5	Kolonne 4	Kolonne 3	Kolonne 2	Kolonne 1	
0,0104	0,0068	0,0544	0,0599	0,2391	0,1284	0,2632	Rad A
0,0141	0,0065	0,0235	0,0969	0,2196	0,1487	0,144	Rad B
-	-	0,0515	0,1349	0,1061	0,5479	0,0781	Rad C
0,0079	0,0409	0,0837	0,0849	0,0617	0,0763	0,0196	Rad D
0,057	0,0882	0,1086	0,0503	0,0689	0,0533	0,0846	Rad E

Totalforskjell

b) Tøyninger i langbærerens høyderetning

Kolonne 7	Kolonne 6	Kolonne 5	Kolonne 4	Kolonne 3	Kolonne 2	Kolonne 1	
0,0422	-0,0083	-0,1409	-0,1743	-0,1821	-0,594	0,0562	Rad A
-0,0061	0,0719	0,0548	0,0548	-0,3231	-0,7244	-0,3054	Rad B
-	-	-0,0858	-0,3754	0,3902	0,5341	-0,1931	Rad C
0,1384	0,1781	0,6862	2,5535	0,9219	0,7327	0,3684	Rad D
0,1624	0,307	0,5428	0,7315	0,6617	0,3543	0,193	Rad E

Amplitudeforskjell

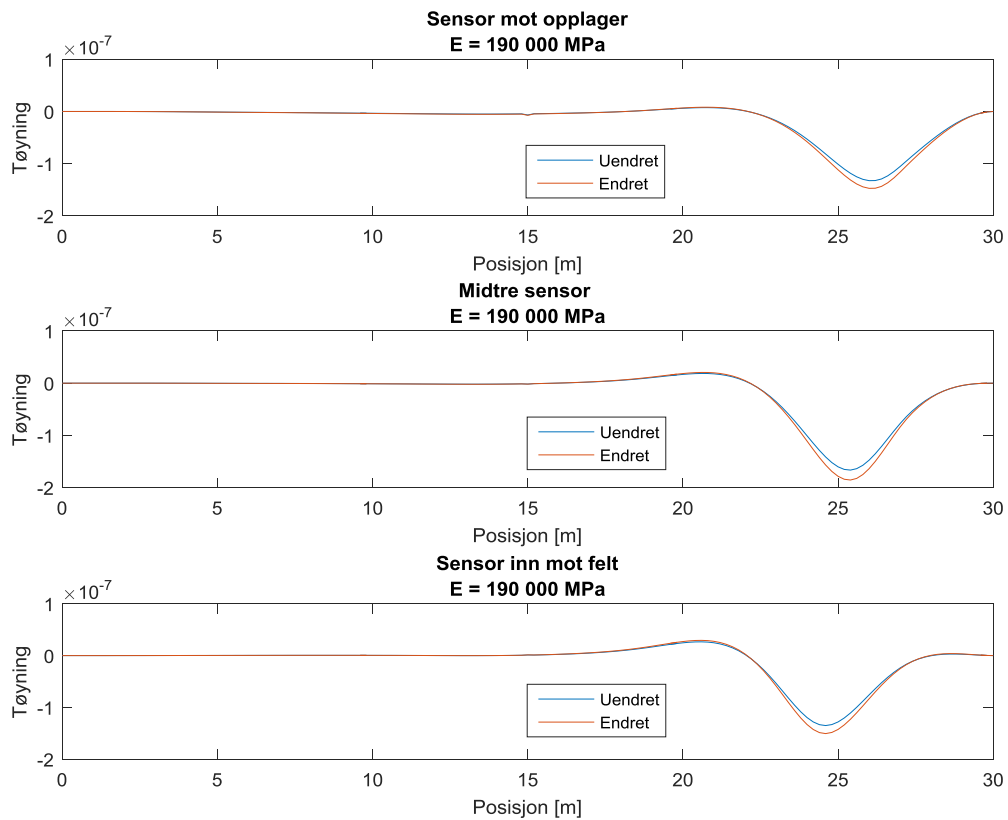
Kolonne 7	Kolonne 6	Kolonne 5	Kolonne 4	Kolonne 3	Kolonne 2	Kolonne 1	
0,0427	0,0086	0,1461	0,1832	0,5575	0,3104	0,0177	Rad A
0,0023	0,014	0,0526	0,0429	0,6929	0,5781	0,02264	Rad B
-	-	0,0303	0,475	0,6719	0,524	0,093	Rad C
0,0241	0,035	0,1422	0,2523	0,1542	0,1315	0,0973	Rad D
0,0259	0,0437	0,0901	0,1129	0,1565	0,0802	0,0599	Rad E

Faseforskjell

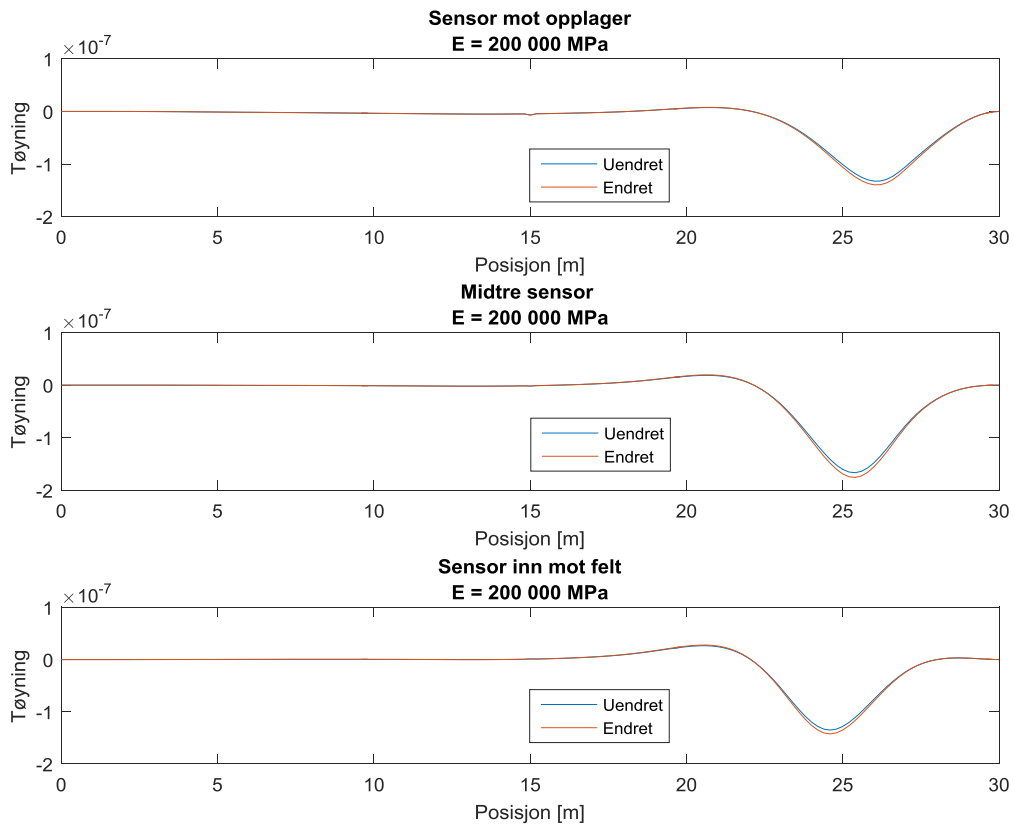
Kolonne 7	Kolonne 6	Kolonne 5	Kolonne 4	Kolonne 3	Kolonne 2	Kolonne 1	
0,0427	0,0086	0,1461	0,1832	0,5575	0,6702	0,0589	Rad A
0,0065	0,0733	0,076	0,0511	0,7645	0,9268	0,3802	Rad B
-	-	0,091	0,6055	0,777	0,7482	0,2143	Rad C
0,1405	0,1815	0,7008	2,5659	0,9347	0,7444	0,3811	Rad D
0,1644	0,3101	0,5503	0,7402	0,6799	0,3633	0,2021	Rad E

Totalforskjell

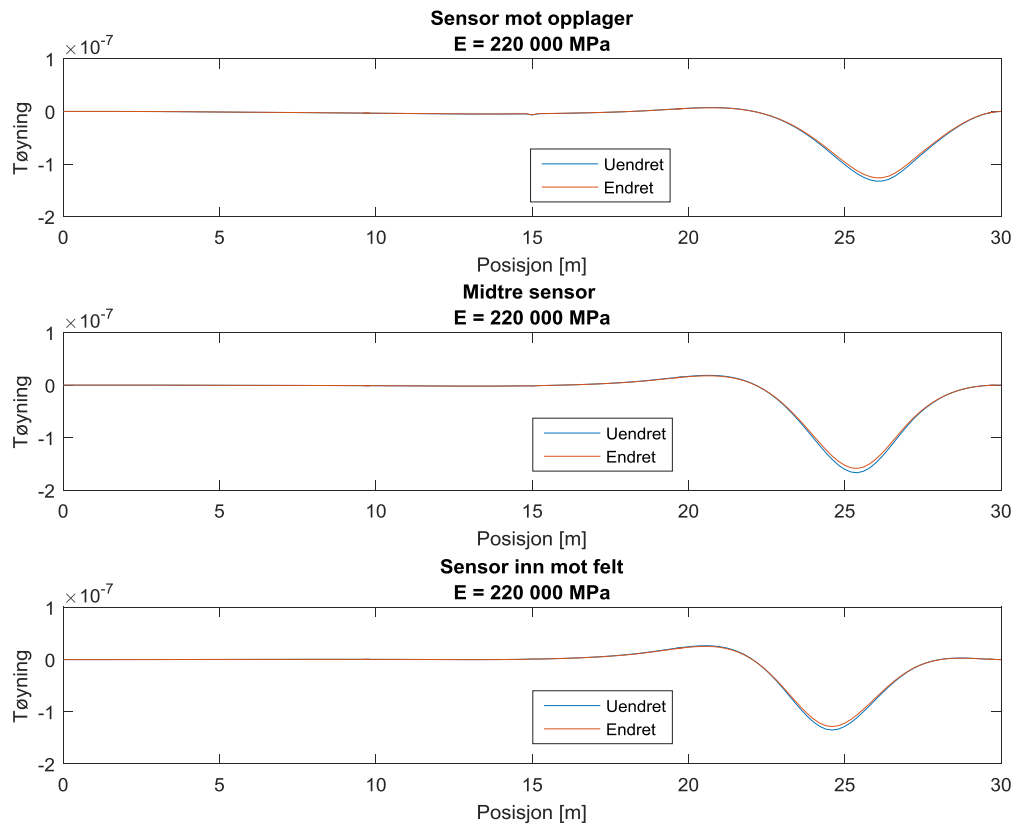
Vedlegg E. Temperaturforandringer



E = 190 000 Mpa	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,109	0,003	0,109	1066,4	0,105
Sensor midt	0,107	0,004	0,107	1063,7	0,102
Sensor opplager	0,105	0,002	0,105	1064,0	0,102



E = 200 000 MPa	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	0,052	0,001	0,052	1013,3	0,050
Sensor midt	0,051	0,002	0,051	1012,1	0,049
Sensor opplager	0,050	0,001	0,050	1012,2	0,049



E = 220 000 Mpa	Magnitodeforskjell	Faseforskjell	Totalforskjell	Beregnet totalvekt [kN]	Relativ endring i akselvekt
Uendret	0	0	0	965,2	0,00
Sensor felt	-0,047	0,001	0,047	921,5	-0,045
Sensor midt	-0,046	0,002	0,046	922,5	-0,044
Sensor opplager	-0,045	0,001	0,045	922,3	-0,044

Vedlegg F. Generering av tøyningshistorikk

Funksjoner er ikke vist i sin helhet.

```
%%Script for å generere tøyningshistorikker med influenslinjer fra Abaqus
clear all
close all
clc

%%Importerer influenslinjer generert i Abaqus
[x,sensor1,sensor2,sensor3]=
Import_3_sensors('C:\Users\Hallvard\Dropbox\Master\Abaqus
\Dokumentasjon\Default.rpt',2, 152)

% Gjør om x til meter i stedet for tid. Målinger over 1.5 sek, bro lengde 30 m
x=x*30/1.5

% Influenslinje som skal brukes

Influence_line=sensor2

%%Bro-data
L=30                                %[m]

%%Last-data

Axleweights=[145.5 145.5 145.5 145.5 95.8 95.8 95.8 95.8] %Ca. akselvekter
for togtypetype - NSB92

Axledist=-[0 2.5 16.5 19 25 27.5 41.5 44] %Ca.
akselavstander for
togtype - NSB92

v=25 %Hastighet [m/s]

thenumber=151 %Antall datapunkter
i influenslinjen

Timeonbridge=(L-axledist(length(Axledist)))/v %Total tid for
passeringen

Lengthoftrain=-Axledist(length(Axledist)) %Toglengde

Numberofaxles=length(Axledist) %Antall aksler

t=linspace(0,Timeonbridge,thenumber) %Tids-intervaller
```

```
x=linspace(0,L,thenumber)
```

```
%Avstands-  
intervaller
```

```
pos1=transpose(v*t);
```

```
%Posisjon første  
aksel
```

```
Axlepositions=Axlepositions(pos1,thenumber, Axledist,L)
```

```
%Posisjon alle  
aksler
```

```
%Funksjon som kopierer opp influenslinjen til hver aksel, justerer til riktig tid.
```

```
IFL=Influence_matrix(Axledist,t,Axlepositions,L,Influence_line);
```

```
%Beregner tøyninger
```

```
Strains=IFL*transpose(Axleweights);
```

```
%Summerer tøyningene for hvert tidsintervall
```

```
Strain_history= sum(Strains,2);
```

Vedlegg G. Beregning av akselvekter

Funksjoner er ikke vist i sin helhet.

```
%%Script for å beregne akselvekter fra tøyningshistorikk
```

```
clc
```

```
clear all
```

```
close all
```

```
%Importerer influenslinjer generert i Abaqus
```

```
[x,inf_Default_sensor1,inf_Default_sensor2,inf_Default_sensor3]  
=Import_3_sensors('C:\Users\Hallvard\Dropbox\Master\Abaqus  
\Dokumentasjon\Default.rpt',2, 152)
```

```
%Importerer tøyningshistorikk generert i annet script
```

```
test1_sensor1=cell2mat(struct2cell(load('C:\Users\Hallvard\Dropbox\Master\Matlab  
\Mai\Strain_histories\Sensor 1\test1.mat','-mat','Strain_history')))
```

```
%Importerer akselposisjoner
```

```
Axlepositions=importfile('Axlepositions.txt', 1, 151)
```

```
%Influenslinje til beregning av akselvekter
```

```
Influence_line = inf_Default_sensor3
```

```
%Tøyningshistorikk som skal brukes
```

```
Strain_history=temp_220000_sensor3
```

```
%Oppretter en influenslinje-matrise med dimensjoner  
[Målinger x aksler]
```

```
IFL=create_influence_matrix(Axlepositions,Influence_line)
```

```
%Beregner akselvekter vha. Moses' ligning
```

```
Calculated_axleweights=-pinv(IFL)*Strain_history
```

Vedlegg H. Script for å beregne forskjeller i influenslinjer

```
%Script for å beregne forskjeller i influenslinjer
Signal=temp_190000_sensor3 %Endret influenslinje

Referanse = Default_sensor3 %Referanse-influenslinje

mm_vector=zeros(151,1) %Oppretter en vektor for mm
cc_vector=zeros(151,1) %Oppretter en vektor for cc
mc_vector=zeros(151,1) %Oppretter en vektor for mc

%Beregner alle ledd i konstantene
for i=1:151
    mm_vector(i,1)=Referanse(i)*Referanse(i)
    cc_vector(i,1)=Signal(i)*Signal(i)
    mc_vector(i,1)=Referanse(i)*Signal(i)
end

%Summerer (Integrerer) konstantene

mm=sum(mm_vector)
cc=sum(cc_vector)
mc=sum(mc_vector)

%Beregner måltallene

MSG = sqrt(cc/mm)-1 %Måltall for amplitude
PSG = (1/pi)*acos(mc/(sqrt(mm*cc))) %Måltall for faseskift
CSG = sqrt(MSG.^2+PSG.^2) %Felles måltall.
```