

---

# ANALYS AV RISK FÖR UTMATTNINGSSKADOR PÅ HÖGSPÄNNINGSKABLAR VID FOGNING TILL HAVS

---

Alexander Hani El-Zein & Erfan Parviz



Examensarbete Göteborg, Sverige 2023

Maskinteknik 15 HP



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---

## FÖRORD

Detta examensarbete startades den första november 2022 i Göteborg i samarbete med NKT HV Cables AB i Karlskrona och färdigställdes februari 2023 som ett avslutande moment i högskoleingenjörsprogrammet i Maskinteknik. Arbetets fokus är att studera, analysera och behandla data från NKT och slutligen komma till en slutsats. Data avser krökningar som uppstår längs kabeln under fogningsprocessen till havs. Denna information kommer att användas till att utförligt bedöma om kabeln under fogningsprocessen utsätts för kritisk skada med hjälp utav simulationer och funktioner i MATLAB.

Vi vill tacka alla som har hjälpt oss med diskussioner, förslag på idéer samt olika synpunkter som har förenklat framställningen av arbetet som omfattar det stora begripandet av utmattningsbrott. Ett stort tack till Andreas Tyrberg och Vilhelm Ryden på NKT som erbjudit oerhört mycket tid och vägledning under arbetets gång samt vår handledare och examinator Peter Hammersberg som upplyst mycket när projektet har varit i behov utav klarhet.

24 januari 2023, Göteborg

## **SAMMANFATTNING**

---

Globala förhållanden har tvingat mänskligheten att söka efter nya metoder till att generera förnybar el. I framkanten av detta befinner sig NKT HV Cables AB i Karlskrona med deras metod att generera el via vindkraftverk i så kallade *Offshore vindkraftspark*. El produceras av vindkraftverk som befinner sig till havs och transporteras till land med hjälp av högspänningskablar. Vindkraftverken befinner sig ute till havs och det innebär långa avstånd till land. Det krävs att högspänningskablarna måste skarvas och sammanfogas på fartyg.

Medan fogningsprocessen sker, hänger högspänningskablar från fartyget. Vågor och rörelser i fartyget utsätter kabeln för dynamiska rörelser i form av böjningar, därav dynamiska töjningar och spänningar. Dessa händelser kan leda till skada och därför är det oerhört viktigt att studera, analysera och förstå konsekvenserna. Det är viktigt att säkra att ingen kritisk skada utsätts på högspänningskabeln som skulle kosta både tid och pengar för NKT.

NKT har utvecklat en ny sensor som kan övervaka krökningsvariationer i 25 punkter längs kabeln som sker under fogningsoperationen.

Målet med detta arbete är att med hjälp av grafer och insamlade data från NKTs sensor göra en bedömning om kabeln utsätts för kritisk skada och resonera kring det. Dessa grafer framställs med hjälp av programmet MATLAB.

I resultat delen presenteras 25 grafer som illustrerar krökningsvariationer i x och y led samt hur kabeln böjs under en timmes övervakning. Dessutom presenteras Rainflow diagram som tyder på hur många cykler vid olika kröksvariationer inträffar.

Slutligen diskuteras detta resultat samt inverkan av olika cykler och krökningsvariationer på kabeln i sista kapitlet i rapporten. I detta avsnitt diskuteras noggrannheten av resultatet och även metoden. Dessutom dras slutsats om hur användbart resultatet är och om NKT har kunnat uppnå deras avsikt med projektet och om kabeln har skadats till en farlig nivå.

## **ABSTRACT**

---

Global conditions have forced humanity to look for new methods to generate renewable energy. At the forefront of this innovation is NKT HV Cables AB in Karlskrona with the promising as well as effective method to generate electricity through wind turbines in areas named *Offshore wind turbine parks*. Large quantities of electricity are produced through wind turbines that are located at sea which need transportation to land via high voltage cables. To maximize this energy production, more and more wind turbines are located further out at sea which means that high voltage cables need to be jointed on a vessel at sea.

The jointing operation can take several days, during this process, the cable is hanging from the vessel which can cause damage. Waves and movement of the vessel can cause bending motions along the cable which can be problematic for a longer period. It is necessary to ensure that no critical damage is induced on these high voltage cables as it can cost the company not only precious time but also a lot of money.

NKT has developed a new sensor that can monitor bending variations during a jointing operation.

The goal of this thesis is to develop the process and provide graphs used by data from the sensor, that can be analyzed and finally discuss the possible damage. MATLAB is used in order to produce the plots and graphs.

25 plots are presented at the result chapter which show the curvature variations in x and y axis and how the cable bends for one hour surveillance. Rainflow diagram is also presented in this chapter which indicates the number of cycles and corresponding curvature variation.

The result and the effect of these cycles and variations is discussed in the last chapter. The accuracy of the result and method is discussed as well. Further, a conclusion and judgement to determine if the result is useful and valid, and whether NKT has been able to achieve their objectives with the project and if the cable has been damaged to a dangerous level.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

---

<b>SAMMANFATTNING</b> .....	- 1 -
<b>ABSTRACT</b> .....	- 2 -
<b>1 Inledning</b> .....	- 5 -
1.1 Bakgrund.....	- 5 -
1.2 Syfte .....	- 5 -
1.3 Precisering av frågeställning .....	- 5 -
1.4 Avgränsningar.....	- 6 -
<b>2 APPLICATION AV UNDERVATTEN HÖGSPÄNNINGSKABLAR</b> .....	- 6 -
2.1 BRUK AV HÖGSPÄNNINGSKABLAR UNDER VATTEN .....	- 6 -
2.2 KOPPLING TILL AUTONOMA ELNÄT .....	- 6 -
2.3 VINDKRAFTSPARKER (OFFSHORE WIND PARKS (OWP)) .....	- 6 -
<b>3 KABEL KOMPONENTER</b> .....	- 8 -
3.1 LEDARE .....	- 8 -
3.2 INRE LEDANDE SKIKT .....	- 8 -
3.3 ISOLATION .....	- 8 -
3.4 YTTRE LEDANDE SKIKT .....	- 9 -
3.5 BLYMANTEL .....	- 9 -
3.6 ARMERING .....	- 9 -
3.7 YTTRE HÖLJ.....	- 9 -
<b>4 Kritiska förhållanden</b> .....	- 10 -
4.1 TYPER AV LAST UNDER DRIFT.....	- 10 -
4.1.1 Extern vattentryck .....	- 10 -
4.1.2 Intern tryck .....	- 11 -
4.1.3 Statisk och dynamisk belastning.....	- 11 -
<b>5 TEORETISKt underlag och antagande FÖR beräkning och uppskattning av MEKANISK belastning</b> .....	- 12 -
5.1 YOUNG'S MODUL.....	- 12 -
5.2 TÖJNING.....	- 13 -
5.3 KRÖKNING OCH KRÖKNINGSRADIE .....	- 13 -

<b>5.4 VARIERANDE BELASTNING OCH CYKLER.....</b>	<b>- 14 -</b>
<b>5.5 SN-KURVA .....</b>	<b>- 15 -</b>
<b>5.6 OREGELBUNDNA CYKLER.....</b>	<b>- 16 -</b>
<b>5.7 PALMGREN-MINERS LAG.....</b>	<b>- 16 -</b>
<b>6. Metod.....</b>	<b>- 17 -</b>
<b>7 Resultat .....</b>	<b>- 20 -</b>
<b>8 Diskussion och slutsats.....</b>	<b>- 28 -</b>
<b>8.1 Uppskattade noggrannhet.....</b>	<b>- 29 -</b>
<b>9 Rekommendation för vidare studier.....</b>	<b>- 31 -</b>
<b>10 Källförteckning .....</b>	<b>- 32 -</b>

---

## **1 INLEDNING**

---

### **1.1 Bakgrund**

Tillämpning av vindturbiner är ett sätt att generera el genom att omvandla kinetisk energi från vind till elektricitet. Många vindturbiner är utplacerade utanför städer där det blåser med mindre motstånd, till exempel höga byggnader och berg. För att kunna utnyttja av ännu starkare vindar, därav större mängder av el, konstrueras vindturbiner till havs. Dessa vindturbiner ligger längst ut i havet och elektriciteten bör föras vidare till land och därefter komma i bruk. Elektriciteten förs till land via högspänningskablar, men eftersom avståndet mellan vindkraftsparken och land är relativt mycket, måste kortare kabelsegment skarvaras och fogas ihop så att kabeln blir tillräckligt långt. Det är ogenomförbart och opraktiskt att både tillverka långa högspänningskablar samt transportera dem. NKT genomför fogningsoperationen till havs på deras fartyg och skarvar dessa kortade kabelsegment.

### **1.2 Syfte**

Fogningsoperationen tar flera dagar att genomföra, under denna tid så hänger högspänningskabeln från fartyget som eventuellt orsakar utmattningsskada på kabeln på grund av vågorna i havet [1]. Syftet är att analysera om de böjningsrörelser av kabeln som registreras av NKTs sensor kan räknas om till en kumulativ delskada, som kan ligga till grund för en bedömning om kabeln utsätts för skada. I detta examensarbete utreds även om kabeln utsätts för kritiska skador som leder till utmattningsbrott. NKT har för avsikt att tillämpa en säkerhetsfaktor och målet med detta arbete är att bedöma om eventuella skador överskrider säkerhetsfaktorn, därav farliga och kritiska skador.

### **1.3 Precisering av frågeställning**

1. Är det möjligt att illustrera hur kabeln påverkas av cykliskbelastning med hjälp av den angivna data från NKT, MATLAB funktioner samt Rainflow Counting Method?
2. Är beräkningar genomförbara för den totala utmattningsskadan som verkar på högspänningskabeln under installation/fogningsprocess med hjälp utav cykliskbelastning och S-N kurva för bly samt Palmgren Miner ekvation?
3. Utsätts kabeln av kritisk utmattningsskada under installation/fogningsprocess?

## **1.4 Avgränsningar**

- Data angiven av NKT motsvarar 60 minuter av fogningsprocessen och tar inte hänsyn till faktorer som kan ha påverkat innan eller efter mättningsperioden.
- Vid framställning av data har FBG sensor använts. Detta arbete behandlar inte hur sensor fungerar, utan behandlar själva data.
- Detta arbete behandlar inte fogningsprocessen i sig, utan behandlar den mekaniska verkan på kabeln som hänger från fartyget, när fogningsprocessen utförs ombord.
- Endast komponenten som består av Blymanteln kommer att analyseras samt behandlas i detta arbete.
- Högspänningskabeln utsätts för olika belastningar så som Termiska, elektriska och mekaniska. Endast mekanisk spänning kommer att tillämpas i detta arbete.

## **2 APPLICATION AV UNDERVATTEN HÖGSPÄNNINGSKABLAR**

---

### **2.1 BRUK AV HÖGSPÄNNINGSKABLAR UNDER VATTEN**

Högspänningskablar under vatten är en enhet vars funktion är att transportera genererad energi under vatten. Det finns många användningar till dessa kablar, några som är beskrivna under.

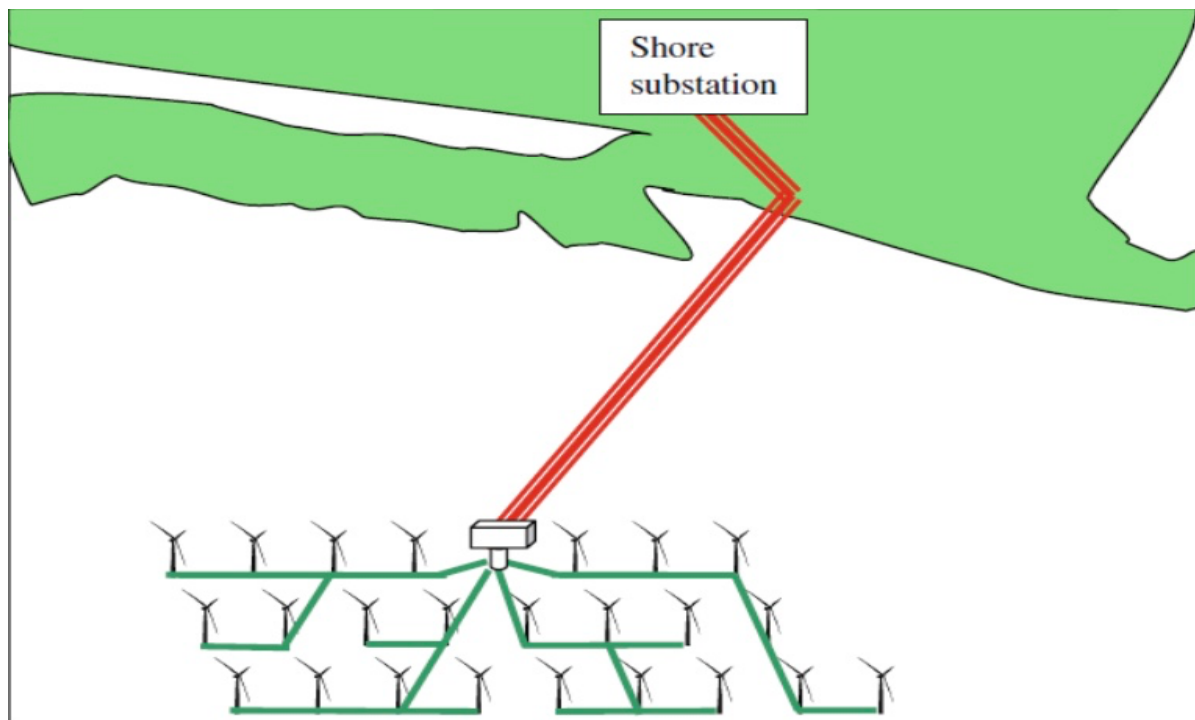
### **2.2 KOPPLING TILL AUTONOMA ELNÄT**

Med hjälp av högspänningskablar kan flera elnät från olika länder sammankopplas för att effektivisera energiförbrukningen. Till exempel Sverige – Tyskland, Danmark – Sverige, Grekland – Italien, Frankrike – Storbritannien [2].

### **2.3 VINDKRAFTSPARKER (OFFSHORE WIND PARKS (OWP))**

Vindkraftsparker är en stor sammankoppling av vindkraftsgeneratorer med 300–800 m avstånd från varandra. Vindkraftsgeneratorerna är kopplade via högspänningskablar som överlåter energigenereringen från generatorerna till elnätet som befinner sig på land [2].

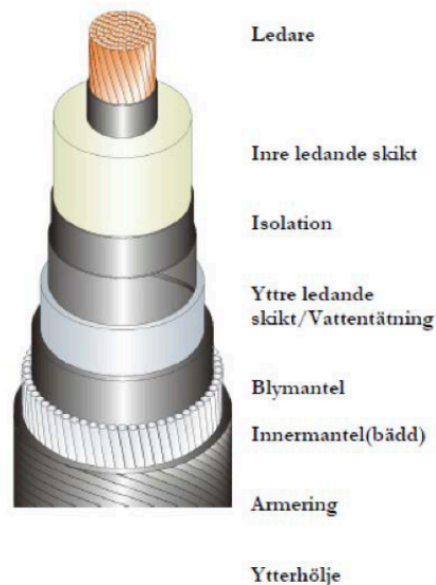




Figur 1 Vindkraftspark som befinner sig till havs kopplade till elnät på fastland [2]

### 3 KABEL KOMPONENTER

---



Figur 2 Kabel komponenter [3]

#### 3.1 LEDARE

Ledaren är formad efter profil för att kunna uppnå en kompakt form med egenskaper som passar för den elektriska energin som den leder vidare. Det finns två material som har egenskaperna som kan användas som ledare, Koppar och aluminium. Koppar har hög elektricitetsförmåga vilket är väldigt praktiskt. Aluminium har  $\frac{2}{3}$  av koppars ledningsförmåga men väger däremot tre gånger mindre och därför är mer praktisk för bruk där vikt är fundamental [2].

#### 3.2 INRE LEDANDE SKIKT

Säkerställer en bra kontakt samt fyller allt tomrum mellan ledaren och isoleringen. Gjort av PEX som är tvär bunden polyeten (PE), polyeten och PEX är gjorda av plast. PEX används då den har en högre värmeresistans som bibehåller låga temperaturer, bättre krypströmshållfasthet samt hög nötningshållfasthet [2].

#### 3.3 ISOLATION

Kabel isolation säkrar att ledningsförmågan inte störs under ledning. Kritiska egenskaper för en bra isolation är motstånd för temperaturändringar, åldring, kompaktet samt styrka [2].

### **3.4 YTTRE LEDANDE SKIKT**

Har samma funktion som det inre ledande skiktet därav gjort av samma material men dess huvudfunktion är att fylla tomrummet mellan isolationen och blymanteln. Bly och blylegeringar är väldigt mjuka och därför måste skyddas mot mekanisk skada under tillverkning, installation och transport. PEX lager gör blymanteln starkare och även motverkar korrosion samt nedbrytning [2].

### **3.5 BLYMANTEL**

Isolation systemet måste skyddas mot intrång av vatten och detta görs via användning av blymantel. Blymantel har egenskapen att fullständigt utesluta vatten och diffusion av fukt från isolation systemet. Långvarig stabilitet, flexibilitet samt styrka mot utmattning är önskvärda egenskaper som kan uppnås med hjälp av blylegeringar [2][4].

### **3.6 ARMERING**

Högspänningskablar armering är byggt från metalltrådar, oftast ståltrådar. Konstruktionen av armeringen har en hög påverkan på kabelns egenskaper så som styvhet, spänning samt vridning. Det är viktigt att ha bra armering för att underlätta och garantera en säker transport och uppsättning. Armeringen ger kabeln styrkan till att bibehålla och undvika onödiga deformationer samt yttre skador [2].

### **3.7 YTTRE HÖLJ**

En extern mantel som är tillsatt för att skydda det inre komponenterna mot korrosion och bibehålla kabelns struktur [2].

## **4 KRITISKA FÖRHÅLLANDEN**

---

Alla undervattenskablar måste vara anpassade till kritiska förhållanden: Elektriska, termiska och mekaniska [1][2]. Målet med att konstruera en lämplig undervattens högspänningskabel som klarar av elektriska, termiska samt mekaniska förhållanden är dimensioneringen av kabeln och isolering systemet. För att kunna leda strömmen under säkra och praktiska förhållanden utan att utsätta kabeln för höga temperaturer som kan skada kabeln under användning [1][2]. Undervattenskablar måste även vara konstruerade till att kunna motstå hög mekanisk påverkan under olika förutsättningar.

### **4.1 TYPER AV LAST UNDER DRIFT**

Det är viktigt att förstå att det finns olika typer av last som verkar på kabeln. Detta arbete fokuserar dock inte på alla dessa typer, utan det behandlar endast den dynamiska belastningen och dess påverkan. Resultatet som framställs i slutet av rapporten är baserat på den dynamiska aspekten, vilket ligger i arbetets fokus. Däremot är det viktigt att nämna de övriga typerna av last för att ha en bättre överblick på det hela.

Från en strukturell synvinkeln under användning så är det kritiska elementet i kabelkonstruktionen blylegerings manteln. Bly är använd för materialets utmärkta tillverknings egenskaper samt egenskapen att vara ogenomtränglig för vatten, däremot så uppvisar bly inte stora mekaniska egenskaper. När undervattenskablar oftast slutar fungera, beror det på att det finns en spricka/brott i blylegerings manteln. Det är även svårt att diagnoserna vad som orsakar dessa brott i bly på grund av olika orsaker

Den första orsaken är att bly beter sig likvärdigt för temperaturer över 0.5 vilket innebär att termiska aktiveringsfenomenen och viskositets beteendet av materialet är viktigt för att kunna bedöma blymantelns livslängd [2].

Den andra orsaken är att kraft påverkan på blymanteln inte kan bestämmas då det finns olika variabler som kan påverka detta. Med en specifik längd på kabeln kan det vara möjligt att producera en tydlig bild på vilka krafter som påverkar blymanteln.

#### **4.1.1 Extern vattentryck**

Detta är den lättaste typ av kraft att identifiera då den endast påverkas av hur långt ner kabeln ska ligga undervatten. En hydrostatisk kraft är tillämpad på kabeln men har ingen direkt påverkan på elasticiteten på kabeln eller materialet [1].

### **4.1.2 Intern tryck**

När kabeln når sitt operations tillstånd, temperaturen av insulations systemet ökar som orsakar att oljor som finns i systemet expanderar mot blymanteln. Detta skapar ett radially tryck mot blymanteln som orsakar permanent deformation [1].

Under användning så ökar temperaturen på ledaren samt insulations systemet beroende på hur mycket elektrisk belastning som kabeln leder, som skapar olika radiella tryck som kan skada kabeln, specifikt blymanteln [1].

### **4.1.3 Statisk och dynamisk belastning**

Statisk belastning sker när kabeln hänger från fartyget och utsätts för axiella krafter på grund av tyngden[1]. Dessutom böjs kabeln primärt på chuten som utsätter kabeln för böjspänning. Under längre tid kan denna spänning vara kritiska och det kan leda till krypning.

Dynamisk belastning sker beroende på tidvattnet och vågor som påverkar fartygets rörelser. Det är viktigt att förstå att det är väldigt svårt att förutspå hur amplituden för en cykel påverkas eftersom det finns flera faktorer som påverkar den verkliga amplituden på cykeln. Detta presenterar oss därav med en ytterligare faktor som kan skada kabeln.

Det finns alltså olika faktorer som påverkar kabelns livslängd. Detta arbete behandlar endast den dynamiska belastningen som utsätts på kabeln, trots att termiska förhållanden samt mekanisk påverkan, det vill säga dynamisk och statisk belastning hänger ihop och kan påverka varandra när det gäller utmattning. Vidare i rapporten presenteras resultat utifrån dynamisk påverkan. Däremot beaktas övriga faktorer i slutsats och diskussion.

## 5 TEORETISKT UNDERLAG OCH ANTAGANDE FÖR BERÄKNING OCH UPPSKATTNING AV MEKANISK BELASTNING

I detta kapitel presenteras och beskrivs de teoretiska kunskaper som behövs för att läsaren ska kunna följa arbetets process. Grunden till dessa teorier och antaganden ligger i kunskaper inom hållfasthetslära och materialteknik.

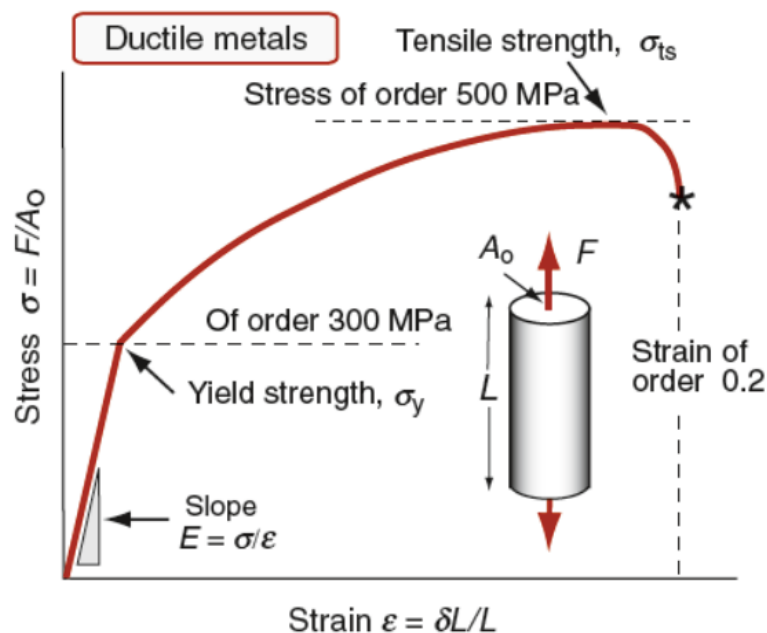
### 5.1 YOUNG'S MODUL

Kabeln utsätts för mekaniska spänningar under operationen. Vågor samt rörelser av fartyget leder till att kabeln deformeras och böjs. Ekvationen

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

känd som Hookes lag förklarar hur stor mekanisk spänning som uppstår av en viss töjning beroende på materialets inneboende elasticitet. Enligt Hookes lag finns det en proportionell relation mellan spänning och töjning, där  $\sigma$  är spänningen som materialet har utsatts för och  $\varepsilon$  är den motsvarande töjningen och deformationen.  $E$  är en inneboende materialegenskap och är olika för alla material, även känd som "elasticitetsmodulen" [5][6].

Figuren nedan illustrerar hur spänning och töjning samverkar. Hook's lag beskriver sambandet mellan spänning och töjning upp till sträckgränsen (yield strength) och beskriver inte den plastiska töjningen däröver. Vårt antagande är att kabeln inte överskrider sträckgränsen och vi bortser från plasticering.

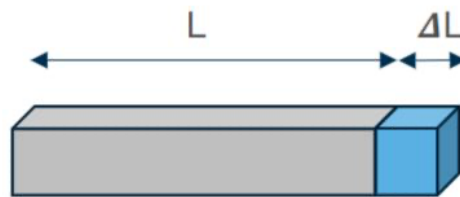


Figur 3 elasticitetsmodul [6]

## 5.2 TÖJNING

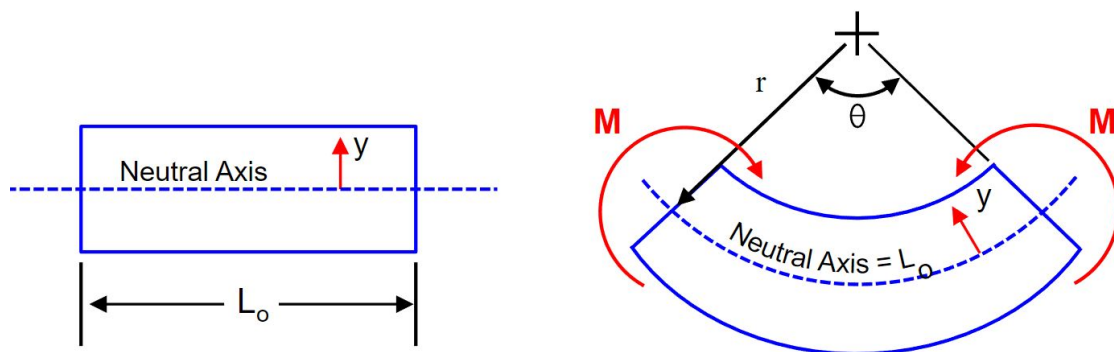
Töjning  $\varepsilon$  inom hållfasthetslära syftar på deformationer på ett objekt orsakat av spänningar  $\sigma$  [5][6].

$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$  där  $\Delta L$  är deformationen och  $L$  är den ursprungliga längden. Om  $\Delta L > 0$  så är töjningen positiv vilket resulterar i positiv spänning  $\sigma$ , vilket innebär dragspänning. På samma sätt, ifall  $\Delta L < 0$ , är töjningen negativ, vilket i sin tur innebär tryckspänning. I detta arbete kommer endast den lägre töjningsnivån behandlas eftersom den statiska belastningen är förhållandevis låg och orsakar inte någon kvarstående deformation.



Figur 4 töjning [8]

Eftersom kabeln utsätts för böjningar, är det viktigt att studera töjningar i sådana omständigheter. Figuren nedan visar hur töjningarna varierar i kabeln beroende på avståndet till centrala axeln.



Figur 5 böjningsmoment [7]

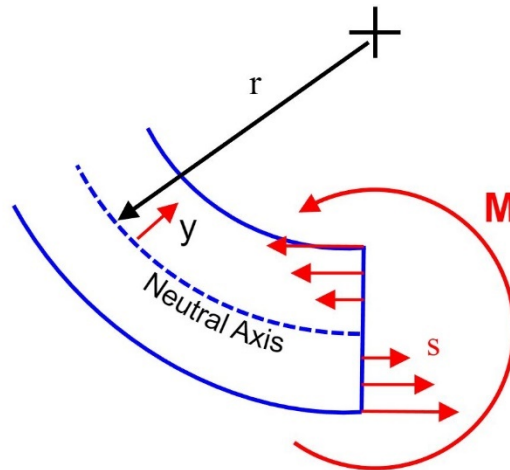
## 5.3 KRÖKNING OCH KRÖKNINGSRADIE

När kabeln är i vila, har den sin naturliga längd  $L_0$ . Vid krökningar ändras längden på kabeln, störst på ytan. Avståndet mellan O och neutrala axeln kallas **krökningsradien** [5] och visas med  $r$  i figuren. Ekvationen för krökningen är enligt följande, där  $r$  är radien som har

uppkommit på grund av krökning:

$$k = \frac{1}{r} \quad (2)$$

Ju längre ut från neutrala axeln, desto mer ändring i längden. Ändringar längs neutrala axeln är 0. Notera att neutrala axeln ligger i mitten eftersom tvärsnittarean alltid är symmetrisk och materialegenskaperna inte ändras längs kabeln.



Figur 6 drag och tryckspänning på grund av böjningsmoment [7]

Vid belastning av böjspänningar utsätts kabeln på både drag och tryckspänningar.

Ytterskiktet av kabeln, det vill säga längst ut ifrån neutrala axeln och mitten av kabeln, utsätts för störst spänning eftersom längden på kabeln har antingen krympt eller töjts.

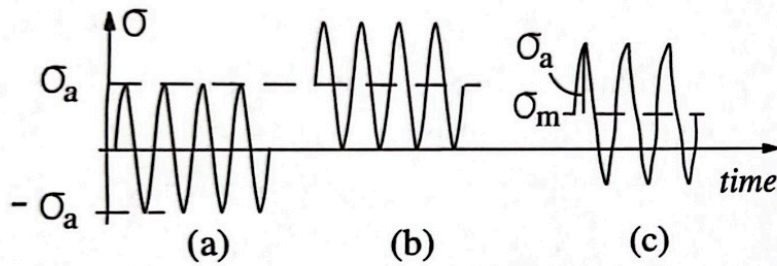
Töjningsekvationen för böjspänningar är då enligt nedan, där  $y$  är avståndet från neutrala axeln till ytterskiktet, med andra ord, radien av kabeln:

$$\varepsilon = \frac{y}{r} = ky \quad (3)$$

#### 5.4 VARIERANDE BELASTNING OCH CYKLER

Fogningsprocessen tar flera dagar att utföras och under denna tid utsätts kabeln på varierande belastning (eller töjningar). Dessa töjningar behöver nödvändigtvis inte uppnå sträckgränsen för att orsaka skada i kabeln, men vid upprepande inträffande kan det leda till brott. Sådana brott kallas utmattningsbrott [12][14].

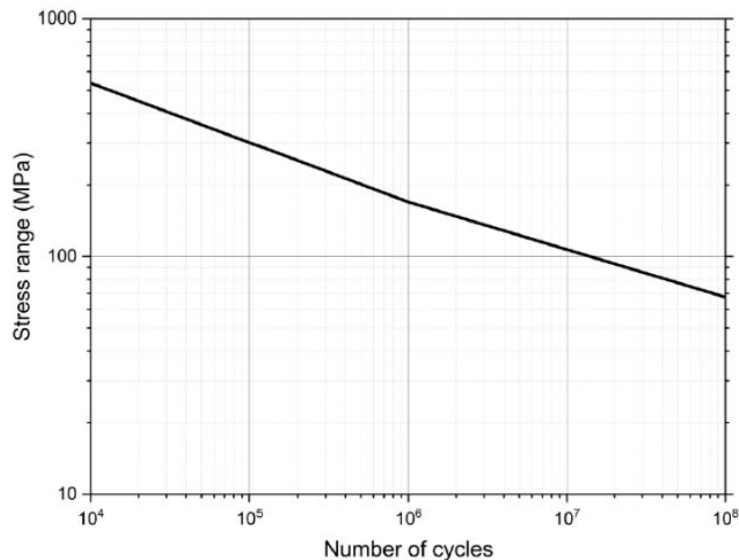




Figur 7 belastningscykler [8]

## 5.5 SN-KURVA

Utmattningsbrott kan analyseras med hjälp av SN-kurva. Figuren nedan är ett exempel på hur en SN-kurva kan se ut. Vidare i rapporten presenteras den SN-kurvan som har använts till detta arbete. Ur figuren kan det exempelvis avläsas att antalet cykler till brott varierar med spänningsamplituden. Ju högre spänningsamplitud, desto färre cykler till brott. Observera att axlarna är logaritmiska. Om materialet utsätts för en spänningsamplitud (spänningsvidd), på 100MPa och detta inträffar cirka  $10^7$  gånger, kan det leda till utmattningsbrott. S står för spänning eller töjningsvidd, och N är antal inträffande, med andra ord cykler, vid motsvarande spänningsvidden.

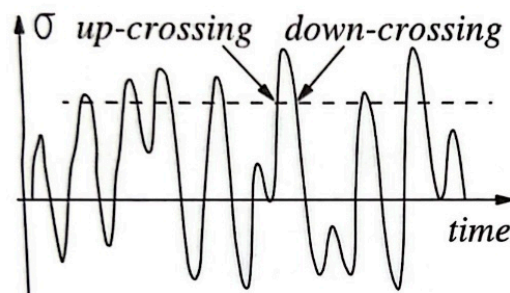


Figur 8 S-N kurva [9]

## 5.6 OREGELBUNDNA CYKLER

Det kan förekomma att spänningsvariationerna inte följer ett specifikt mönster, utan kan bete sig olika under tiden. Det kan vara korta amplituder under en viss tid, och därefter högre amplituder. Detta gör att det uppträder olika antal cykler med sin motsvarande spänningsvidd. Se figuren nedan!

För att kunna framställa antal cykler och spänningsvidder i en graf användes *Rainflow Counting Method* [8][12][15][16]. Funktionen identifierar antal cykler för motsvarande spänningsvidd (eller töjning) under en viss tid.



Figur 9 oregelbundna belastningscykler [8]

## 5.7 PALMGREN-MINERS LAG

Spänningsvariationerna kan vara olika under en tid, vilket i sin tur leder till olika antal cykler. Sammanställningen av utmattningsskador vid oregelbunden last och cykler som kan påverka ett material är oftast uträknat genom att använda *Palmgrens-Miner's rule*. Varje nivå av last som är tillsatt bidrar till materialets skada genom förhållandet mellan antal cykler slutförda  $n_i$  [12].

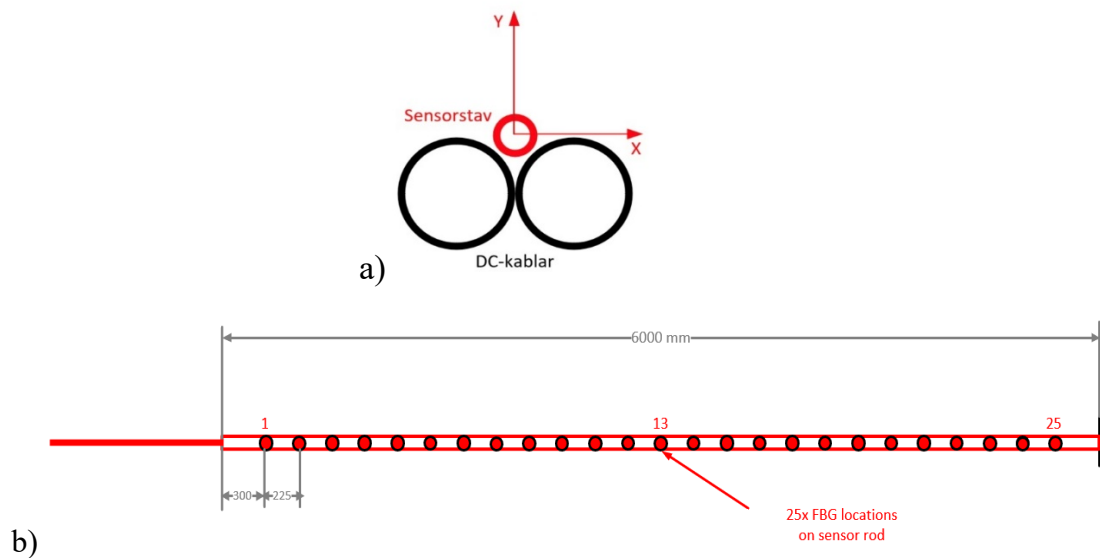
Den ackumulerade utmattningsskadan Enligt *Palmgrens-Miner's rule* (4)

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

där  $n_i$  är antal cykler vid en specifik last, och  $N_i$  är antalet cykler som krävs så att materialet brister för denna last, det vill säga utmattningsbrott. Brott sker när  $D$  är lika med 1.

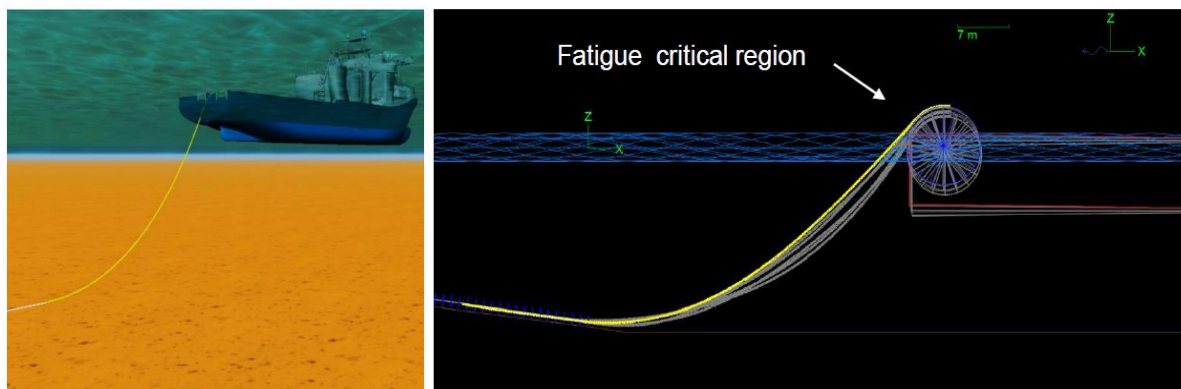
## 6. METOD

NKT har utvecklat och applicerat en sensor som uppskattar kabeln krökning. Sensorn består av 25 mottagare som bevakar och registrerar kabeln krökningar under en viss tid. I detta arbete bevakades kabeln under en timme.



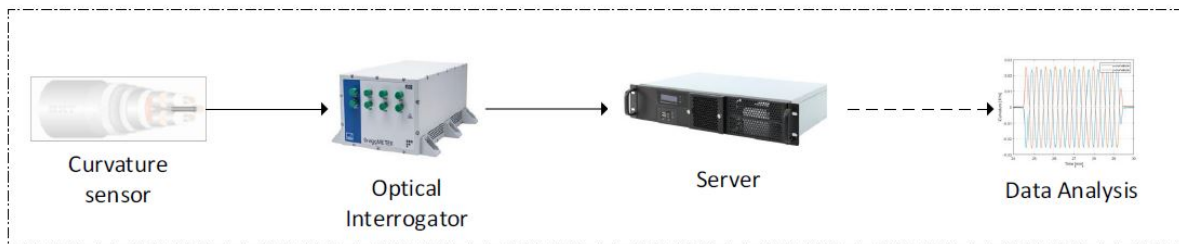
Figur 10: a) tvärsnitt på kabeln och sensorstav. b) placering av mottagarna längs kabeln

De 25st mottagare sitter på en sensorstav som i sin tur sitter inne i kabeln vid blymanteln. Staven är 6 meters lång. 25 mottagare är jämnt fördelade längs 6 meters stav och kabeln. Avståndet mellan varje mottagare är 0,225 meter. Figuren ovan visar en tvärsnittbild på hur staven sitter jämte kabeln samt hur mottagarna är utsprida längs staven. Mottagarna registrerar krökningarna i x och y-led. Vid vila är kabel rak, därmed ingen krökning.



Figur 11 en simulering av kabeln som hänger från fartyget [10]

Vid fogningsprocessen hänger kabeln från fartyget i flera dagar. En del av kabeln är under process ombord på fartyget. En del är i vattnet och den största delen ligger på havsbotten. Den delen som utsätts för mest krökningar är den som ligger på chuten, det matningshjul som håller kabeln vid relingen på fartyget. Precis vid kanten. Resten av kabeln hänger i luften och därefter i vattnet. Figuren ovan illustrerar hur kabeln böjs utanför fartyget. Eftersom syftet med arbetet är att analysera och beräkna den mest kritiska skadan, samt var i kabeln skadan sker, så installerades den 6 meters långa stavsensorn på så sätt att den placeras precis på kanten av fartyget, det vill säga "chuten". Det är där kabeln utsätts för höga böjningar, dels från fartyget och dels från vågorna som är starkast på vattenytan.



Figur 12 från signal till data

Stavsensorn bevakar och sänder ut signal till en Optical Interrogator.

Interrogator erhåller därefter signalerna och tolkar och producerar data. Dessa data sänds senare till en server där de sparas och kan analyseras. Dessa data är i själva verket krökningarna i x och i y-led.

Som tidigare nämnts är krökningen  $k = \frac{1}{r}$ . Sensorerna framställer krökningarna i varje punkt i staven i både x och y-led. Frekvensen är 50Hz. Det innebär att sensorerna sänder 50 signaler per sekund för krökningen i en viss punkt i kabeln. I och med att datainsamlingen varar i en timme, framställs 180 000 krökningsvärde, med tanke på att 50 signaler per sekund motsvarar 3000 per minut, vilket i sin tur motsvarar 180 000 signaler per timme.

Följden av sammanställningen av dessa krökningsdata är två separata tabeller som består av 25 kolumner och 180 000 rader. Kolumnerna representerar mottagarna i sensorstaven och de 180 000 raderna är krökningarna under en timmes datainsamling. En tabell för vardera x-led och y-led bildas. Tabell 1 visar ett exempel på hur dessa värden är organiserade.

Krökningsdata  $k_x = [180000 \times 25]$

<i>Krökningar i x-led</i>	Sensor 1	Sensor 2	Sensor <i>n</i> ...	Sensor 25
<b>Krökning 1</b>	0,00167	0,00153	...	0,00381
<b>Krökning 2</b>	0,00169	0,00161	...	0,00364
<b>Krökning <i>m</i> ...</b>	...	...	...	...
<b>Krökning 180 000</b>	0,00286	0,00275	...	0,00486

Tabell 1 krökning för alla 25 punkter i x-led

Utmattningsskadan beräknas från dessa data i fyra steg:

1. Data presenteras i form av tidsföljder, det vill säga att krökningar presenteras i y-axeln med avseende på tiden i x-axeln, där det är möjligt att analysera och avläsa hur krökningarna är i förhållande till varandra. Det är också möjligt att jämföra krökningarna i olika punkter.
2. Därefter omvandlas krökningar till töjningar genom att multiplicera radien av blymanteln (0,0525m) med krökningar. Som tidigare nämnts är
 
$$\varepsilon = \frac{y}{r} = ky$$
 . Där  $y$  är radien på blymanteln.
3. Vidare analyseras töjningsvariationerna i ett histogram där det är möjligt att noggrant utreda olika töjningsvariationer under bevakningstiden, samt respektive antal cykler. MATLAB använder *Rainflow Counting Method* för att ställa fram histogrammet.
4. Slutligen appliceras *Palmgrens-Miner's rule* för att beräkna utmattningsskador, eftersom antal cykler är nu kända för alla 25 punkter i kabeln. SN-kurva given av NKT tillämpas i utmattningsberäkningar.

## 7 RESULTAT

---

I detta kapitel presenteras alla resultat i form av grafer och diagram. Detta följer med utförligt beskrivning och tolkning av varje figur samt hur dessa figurer hänger ihop. Figureernas ordning är enligt de stegen och utvecklingsförloppet som föreställdes i föregående kapitel. Som tidigare nämnts analyseras 25 mottagare på sensorstaven och eftersom det tar stort utrymme att bifoga alla figurer i resultatdelen, presenteras resultat på endast en mottagare vid vissa steg. Det är de mottagarna som är signifikanta. Det är dock viktigt att nämna och förtydliga att själva resultaten på alla 25 mottagare diskuteras i nästa kapitel. Graferna projicerades med hjälp av MATLAB

### Steg 1 till steg 2

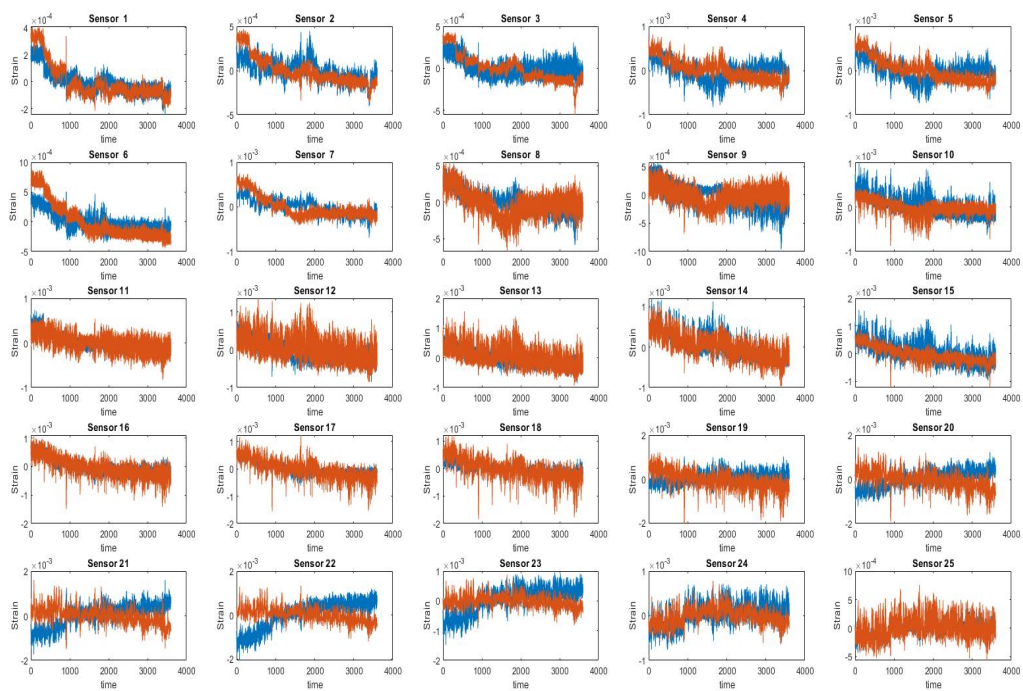
Data som har framställts av sensorstaven är som sagt krökningarna

$$k = \frac{1}{r} \quad (2)$$

För att få fram töjning multipliceras krökning med radien av blymanteln, det vill säga

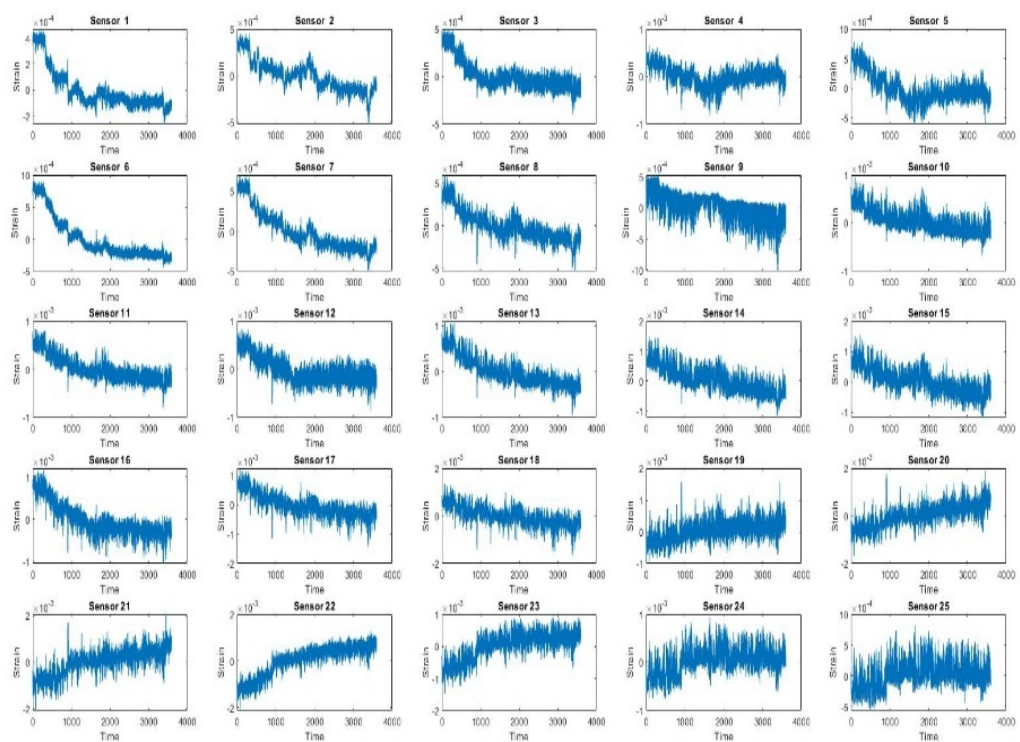
$$\varepsilon = \frac{y}{r} = ky \quad (3)$$

Figuren nedan visar alla 25 mottagare. Y-axel representerar töjning  $\varepsilon$  och x-axeln är tiden i sekunder (3600sekunder vilket motsvarar en timme). Den blå grafen presenterar töjningar i x-riktning med avseende på tiden (se figur 9), och den röda grafen visar töjningar i y-riktning.



Figur 13 töjning och tidsserie i x och y riktning

För att förenkla analysen och beräkningarna, framställdes absolutbeloppet av krökningarna i både x-riktning och y-riktning. På så sätt fås fram den totala töjningen. Figuren nedan visar den totala töjningen med avseende på tiden.



Figur 14 tøjning och tidsserie för alla 25 punkter

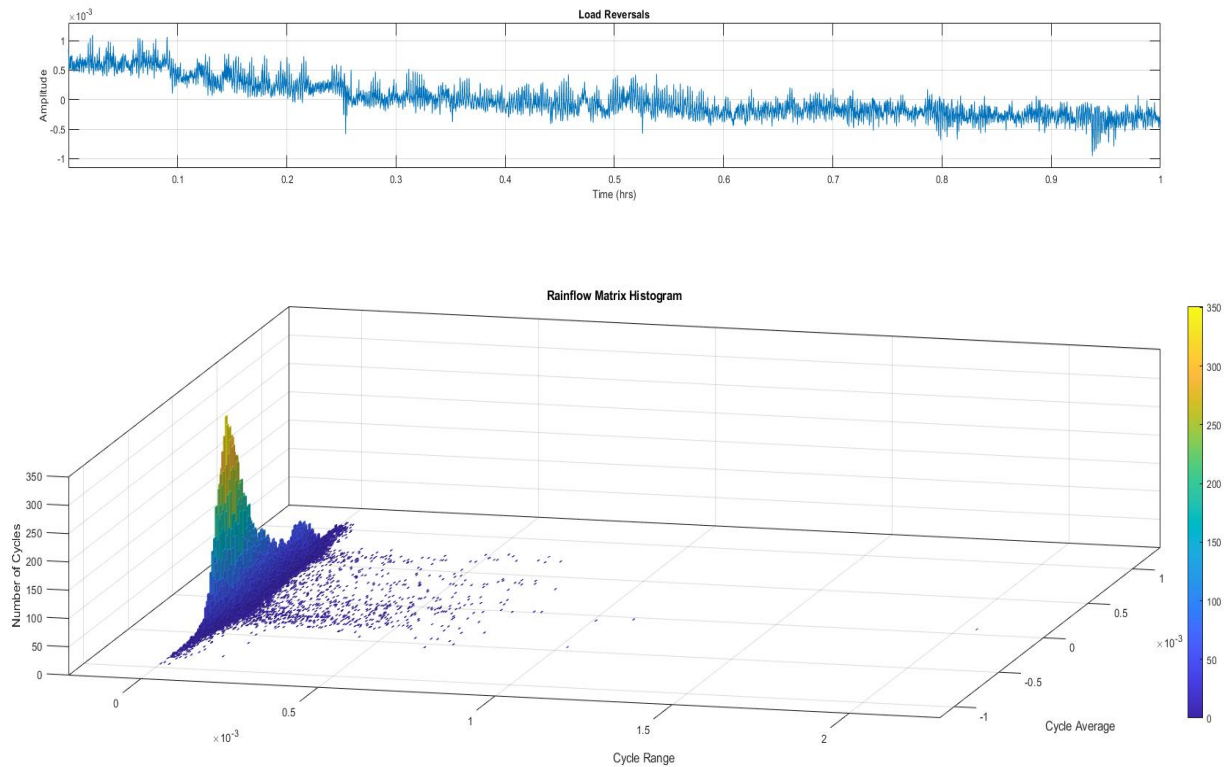


### Steg 3

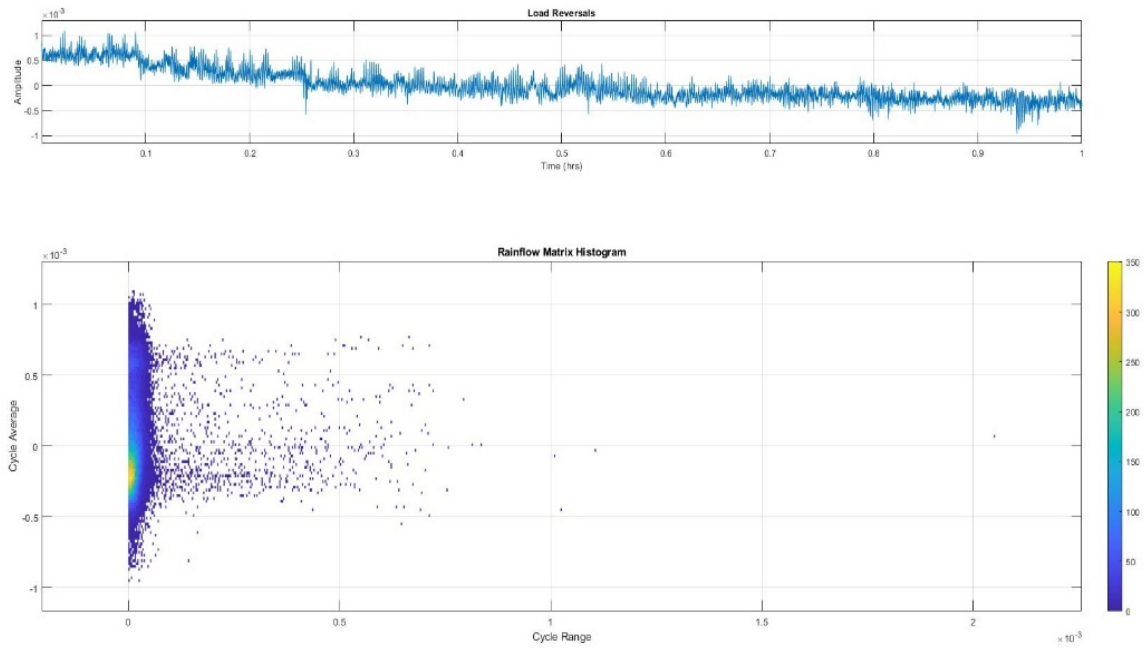
Figur 13 visar Rainflow diagrammet för sensor nummer 13. Figuren är ett 3D diagram där y-axeln illustrerar antal cykler med hänsyn till motsvarande töjningsvidd som visas i x-axeln.

Diagrammet visar även genomsnittet av töjningsvidder i z-axeln.

Det är att de flesta cykler inträffar där töjningsvidd är nära noll, det vill säga relativt låga amplituder. Och ju längre ut till höger, desto större töjningsvidd vilket innebär högre amplituder. Dock är det lägre antal cykler.

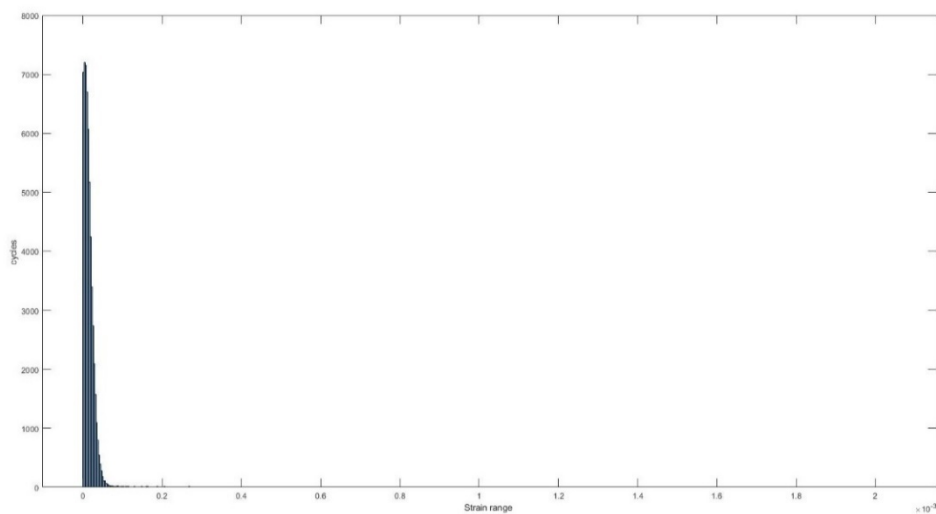


Figur 15 Rainflow diagram för mottagare nummer 13



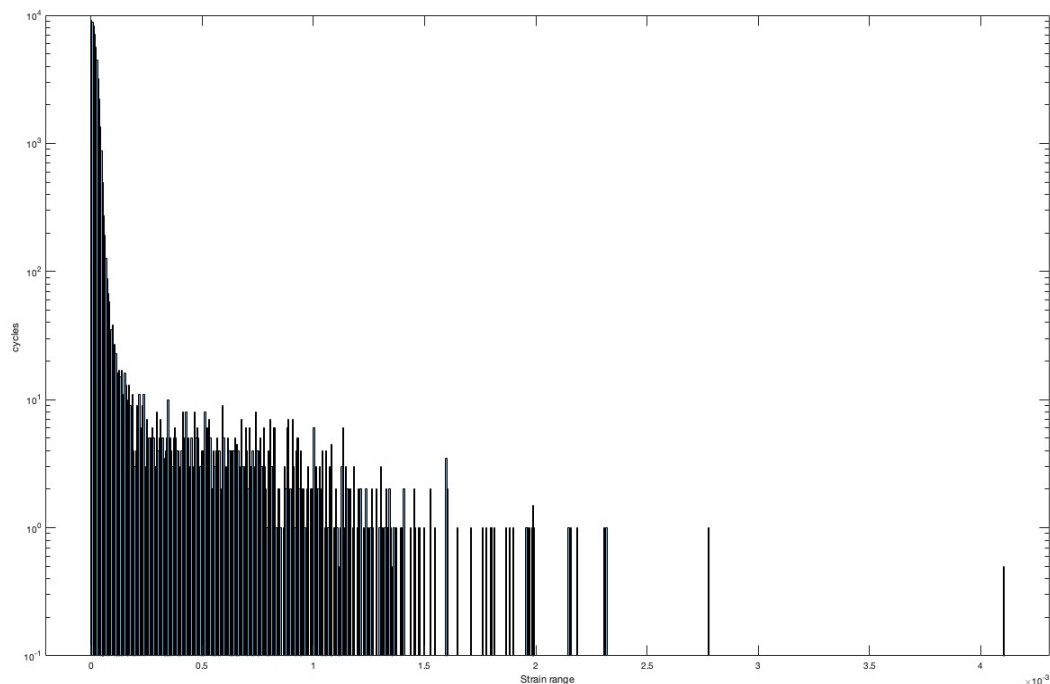
Figur 16 Rainflow diagram för mottagare nummer 13 från ovan

Figur 17 är ett histogram där totalt antal cykler och motsvarande töjningsvidd är illustrerade (sensor 13). Såsom nämnts de flesta cykler inträffar där töjningsvidden är nära noll och minskar i antal då töjningsvidden ökar. Vikten av dessa observationer diskuteras i nästa kapitel.



Figur 17 antal cykler och töjningsvidd för mottagare nummer 13

Eftersom det är nästan omöjligt att observera antal cykler vid högre töjningsvidder i sådan skala som figur 17, har en figur med logaritmisk skala lagts till nedan.



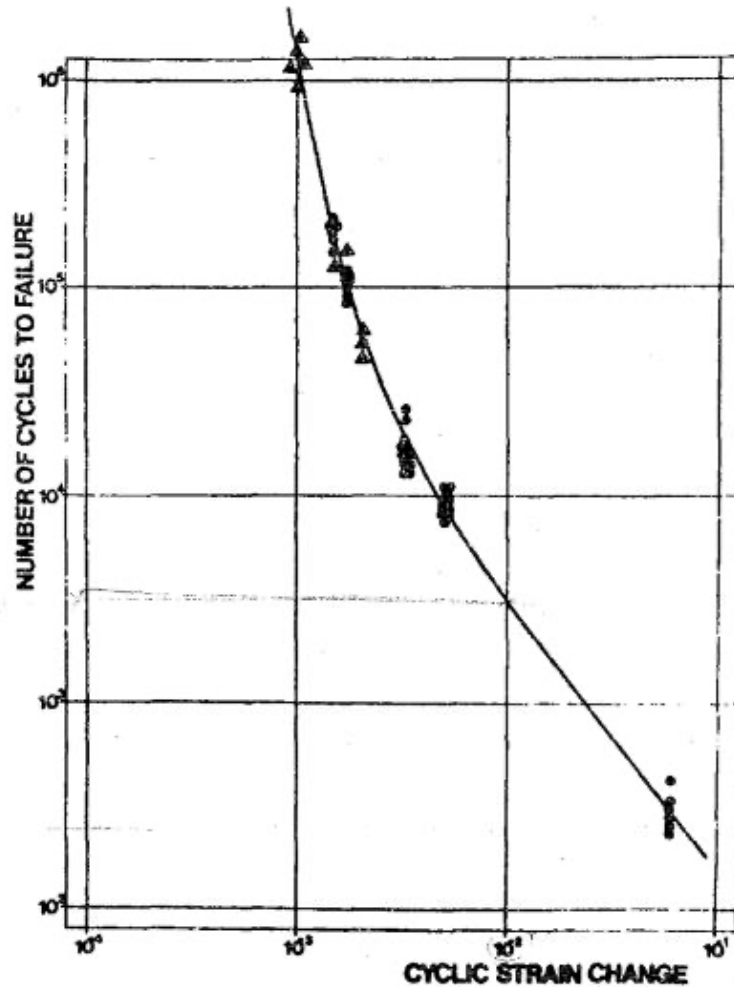
Figur 18 antal cykler och töjningsvidd för mottagare nummer 13 (log-skala)

#### Steg 4

Antal cykler och töjningsvidd för alla punkter framställs i form av tabeller. Tabellen nedan innehåller den minsta töjningsvidden respektive dess antal cykler fram till störst töjningsvidd och antal cykler. Tabellen redovisar resultat på sensor nummer 13. Liknande tabell framställdes för övriga 24 sensorer.

<b>Cycles</b>	<b>Strain Range</b>
7039	$3 \cdot 10^{-6}$
7195	$6 \cdot 10^{-6}$
7153	$9 \cdot 10^{-6}$
6705	$1,2 \cdot 10^{-5}$
⋮	⋮
2	$2 \cdot 10^{-3}$

Tabell 2 antal cykler och töjningsvidd för mottagare nummer 13



Figur 19 S-N kurva för blymantel [11]

Med hjälp av Palmgren-Miner's rule, SN-kurvan för blymanteln och framställt resultat för antal cykler och töjningsvidder, beräknas den ackumulerade utmattningsskadan.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

$n_i$  är antal cykler för varje töjningsvidd och det kan nu hämtas från tabell 2.

$N_i$  är antal cykler som materialet kan klara av vid respektive töjningsvidd, innan det brister.

Det kan nu avläsas från figur 19.

Dessa värden kan integreras i en och samma ekvation nu och den totala utmattningsskadan vid varje punkt identifieras. Nedan är ett exempel på beräkningsgången.

$$D = \frac{35}{10^6} + \frac{29}{0,95 * 10^6} + \frac{17}{0,90 * 10^6} \dots + \frac{6}{0,70 * 10^6} = 0,00008042$$

Där värdena i täljaren är tagen från exempelvis tabell 2 samt figur 17 och 18. Och nämnaren är tagen från SN-kurvan för blymanteln. Notera att varje sensor, det vill säga varje punkt i kabeln utsätts för olika krökningsvariationer vilket leder till olika antal cykler respektive töjning. Med det sagt, framställs liknande tabell som tabell 2, med respektive värden. Beräkningsgången är samma för att 25 punkter och resultatet av beräkningen presenteras i tabellen nedan.

Det är den ackumulerade utmattningsskador för på alla punkter från 1 till 25.

<b><math>D_1</math></b>	0	<b><math>D_{14}</math></b>	0,000065
<b><math>D_2</math></b>	0	<b><math>D_{15}</math></b>	0,000071
<b><math>D_3</math></b>	0	<b><math>D_{16}</math></b>	0,000057
<b><math>D_4</math></b>	0,000003	<b><math>D_{17}</math></b>	0,000063
<b><math>D_5</math></b>	0,000005	<b><math>D_{18}</math></b>	0,000085
<b><math>D_6</math></b>	0,000005	<b><math>D_{19}</math></b>	0,000089
<b><math>D_7</math></b>	0,000005	<b><math>D_{20}</math></b>	0,000136
<b><math>D_8</math></b>	0,000005	<b><math>D_{21}</math></b>	0,000145
<b><math>D_9</math></b>	0,000020	<b><math>D_{22}</math></b>	0,000064
<b><math>D_{10}</math></b>	0,000040	<b><math>D_{23}</math></b>	0,000055
<b><math>D_{11}</math></b>	0,000030	<b><math>D_{24}</math></b>	0,000028
<b><math>D_{12}</math></b>	0,000040	<b><math>D_{25}</math></b>	0,000015
<b><math>D_{13}</math></b>	0,000080		

*Tabell 3 ackumulerade utmattningsskador*

## 8 DISKUSSION OCH SLUTSATS

---

Utifrån det resultatet som har framställts i tabell 3, kan vi konstatera att denna kabel inte har utsatts för någon kritisk skada. Det kan dessutom anses som ett förväntat resultat eftersom ingen skada rapporterades på fartyget efter mätningen och kabeln fungerade felfritt därefter. Detta behöver dock vidare valideras med separata studier genom förstörande provning och undersökning av kabeln relativ belastning. Det innebär att delskada, det vill säga den ackumulerade utmattningsskadan är mindre än 1. Som tidigare nämnts, utmattningsbrott sker när den ackumulerade utmattningsskadan  $D$  är lika med 1.

Enligt resultatet i tabell 3, har kabeln utsatts för högst skada i sensor nummer 21. Delskadan i den punkten är 0,000145 vilket är relativt lågt. Däremot är det viktigt att nämna att det är resultat efter en timmes bevakning av fogningsprocessen som tar upp till 7 dagar att genomföra. Med antagandet att omständigheterna är densamma under dessa 7 dagar, alltså om väderförhållandena, rörelserna och andra faktorer som påverkar böjningarna längs kabeln är densamma som under bevakningen, kan vi beräkna skadan för 7 dagar på följande sätt

$$0,000145 \times 24 \times 7 = 0,02436$$

Där 24 är antal timmar i en dag och 7 är antal dagar.

0,02436 är nu skadan under hela fogningsprocessen under förutsättning att böjningsrörelserna är densamma vilket inte är sannolikt.

*Safety factor* kan nu tillämpas på följande sätt

$$\frac{1}{0,02436} = 41,05$$

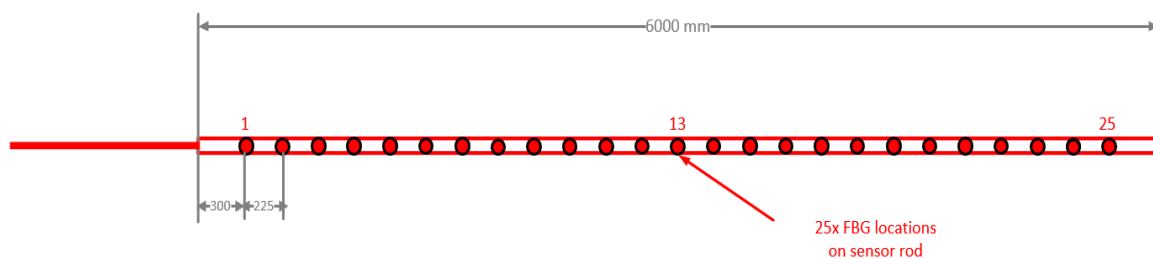
Det betyder att kabeln kan utsättas för liknande skada under ungefär 41 veckor innan någon kritisk skada inträffar. Med andra ord är säkerhetsfaktor 41,05.

Säkerhetsfaktorn för övriga sensorer kan också beräknas men de kommer att vara mindre än 41,05 eftersom mindre skada har skett i andra punkter i kabeln och störst skada har skett där sensor nummer 21 är placerad och vi är intresserade av den största utmatningsskadan som sker under fogningsprocessen.

Krökningsdata från NKTs sensor samt metoden för att gå från data till resultat, är ett rimligt och praktiskt tillvägagångssätt. Det gör att böjningarna i olika punkter längs kabeln kan analyseras. På detta sätt är det också möjligt att framställa Rainflow diagram utifrån angiven data och analysera töjningar samt antal inträffande. Däremot kan noggrannheten påverkas.

### 8.1 Uppskattade noggrannhet

Det finns olika faktorer som kan påverka noggrannheten hos data, som i sin tur kan påverka det slutgiltiga resultatet. Utmattningspunkten kan vara placerad mellan två sensorer. Enligt figur 9 finns det 22,5cm avstånd mellan varje sensor i kabel. Med det sagt, finns det 22,5cm avstånd mellan sensor 20 och 21, och störst skada sker runt det området. Den största skadan kan ha skett någonstans mellan de punkterna. Eller även mellan punkterna 21 och 22.



Enligt tabell 3 är skadan i punkt 20 ( $D_{20} = 0,000136$ ) och i punkt 21 ( $D_{21} = 0,000145$ ).

Det är möjligt att den största skadan sker mellan punkt 20 och 21, till exempel ( $D_{20-21} = 0,000148$ ). Det kan vara så att siffran stiger och avtar igen mellan dessa punkter. Det resulterar i felmarginaler och kan påverka noggrannheten och det måste beaktas. Däremot är säkerhetsfaktorn ganska hög vilket gör ingenjörskbedömningen enklare.

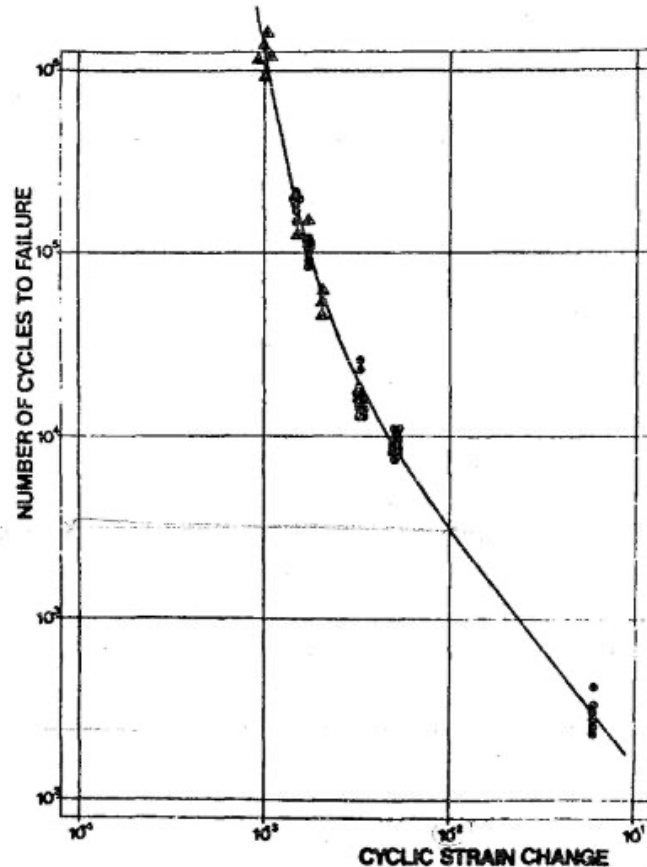
För att ta fram resultatet på skadan användes Palmgren-Miner ekvation som är väldigt lämplig och praktisk vid beräkning av ackumulerade utmattningsskador. Ekvationen ger däremot ett approximativt värde. Den SN-kurvan som tillhandahölls från NKT visar endast töjningsvidden på ett intervall mellan  $10^{-3} < \epsilon < 10^{-1}$ . Enligt figurerna 14 och 16 inträffar i stort sett majoriteten av cykler på ett intervall bortom  $10^{-3}$ . Ur ett tekniskt perspektiv och tekniskt beslutsfattande kan vi komma till slutsatsen att mindre töjningsvidder inte bidrar mycket till skadan när det gäller beräkning av utmattningsskador. Däremot är de inte helt obetydliga. De mindre töjningsvidder (mindre än  $10^{-3}$ ) som inte finns på SN-kurvan kan mer eller mindre ha påverkan på den ackumulerade skadan. Trots det försummas de i beräkningarna. Det är där kunskapskanten går eftersom vi inte vet hur materialet beter sig bortom intervallet. Det är möjligt att kurvan lutar sig mot *utmattningsgräns*, det vill säga,

töjningsvidder mindre än  $10^{-3}$  inte bidrar till utmattning. Dessutom kan framställning av sådan SN-kurva vara tidskrävande eftersom det kräver flertal test för att samla in korrekt data till att göra en tillämplig och mer noggrann bedömning.

En annan faktor som kan orsaka bristande noggrannhet i resultat är att kurvan är kontinuerlig i sitt intervall. Varenda punkt på kurvan motsvarar ett värde i y och x axeln. Det är alltså inte enkelt och uppenbart att hitta exakta x och y värdena genom att läsa av kurvan. Därför är det rimligt att bestämma approximativa värden vid beräkning av utmattningsskador. Det betyder att  $N_i$  är approximativt vid beräkningarna. Dessutom är det viktigt att påpeka att vid beräkning av utmattningsskadan, antogs varenda  $N_i$  och  $n_i$  konservativa. Vid insättning av varje  $N_i$  i ekvationen, ska  $N_i$  bestämmas approximativt från ett intervall. Konservativt antagande kräver försiktighet i beräkningen och det leder till att värsta tänkbara scenario, med andra ord, det värdet som ger störst skada ska väljas. Följden av konservativt antagande i detta fall är att resultatet på utmattningsskadan kan skilja sig från sanna värdet. Detta ger däremot utrymme för felmarginaler i beräkningen. Eftersom det är approximativ beräkning, är det viktigt att ha utrymme för felmarginaler.

Vid tillämpning av Palmgren-Miners ekvation antogs dessutom  $n_i$  som cykler block, därav numeriska beräkningar. Figur 17 är ett bra exempel på hur dessa block ser ut. Exempelvis i intervallet  $1 \cdot 10^{-3}$  till  $1,1 \cdot 10^{-3}$  sker 35 cykler. Ju smalare dessa block är, desto noggrannare blir svaret.





Slutligen vill vi dra slutsatsen att det är många faktorer som spelar roll och kan påverka resultatet och dess noggrannhet. Felmarginaler kan förekomma men det är tekniskt beslutfattande och ingenjörskbedömning som är den viktiga pelaren i detta arbete. NKT hade i avsikt att tillämpa en säkerhetsfaktor av 10 och alla säkerhetsfaktorer högre än 10 är godtagbara för deras mål, vilket är en trygg fogningsprocess utan skada på kabeln.

Även om den totala skadan var exempelvis tre gånger större än den befintliga skadan, hade säkerhetsfaktorn hamnat över 10. ( $\frac{41,05}{3} = 13,7 > 10$ ).

## 9 REKOMMENDATION FÖR VIDARE STUDIER

---

- Studera böjningar i kabeln under andra omständigheter, exempelvis under extrema väderförhållanden, och jämföra med resultatet i detta arbete.
- Studera hur materialet beter sig vid mindre töjningsvidder,  $\Delta\varepsilon < 10^{-3}$
- Kabeln består av många komponenter. Studera övriga komponenter och eventuella skador vid liknande situation.
- Framställa 3D-simulering av kabeln med hjälp av CAD och finita element; illustrera och studera kabelns rörelse och deformation, samt spänning och utmattning etcetera.

## 10 KÄLLFÖRTECKNING

---

- [1]. Bergin, E och Jiankang, C: *Recommendations for mechanical testing of submarine cables*. 2015.
- [2]. Worzyk, Thomas: *Submarine power cables; Design, installation, repair, environmental aspects*. 1.Uppl. Berlin, 2009.
- [3]. <https://www.nkt.se> (hämtad 2023-01-18)
- [4]. Viespoli, Luigi Mario: *Mechanical characterization of lead alloys for subsea high voltage power cable applications*. Diss., Norwegian University of Science and Technology, 2020.
- [5]. Gere, James M och Goodno, Barry J: *Mechanics of materials*. 7. Uppl. USA, Stamford, 2009.
- [6]. Ashby, Michael, Shercliff, Hugh och Cebon, David: *Materials; Engineering, science, processing and design*. 4.Uppl. Oxford, 2019.
- [7]. <https://www.continuummechanics.org/beambending.html> (hämtad 2023-01-18)
- [8]. Dahlberg, Tore och Ekberg, Anders: *Failure Fracture Fatigue; An Introduction*. Lund, 2002.
- [9]. <https://rules.dnv.com/docs/pdf/dnvpmp/codes/docs/2010-04/RP-C203.pdf> (hämtad 2023-01-19)
- [10]. Froyd, Lars, Qvist, Jacob och Tofte, Mona: *Lifetime extension of floating wind turbines – a case study*. EERA DeepWind, 2021.
- [11]. Anelli, P, Donazzi, F och Lawson, G: *The fatigue life of lead alloy E as a sheathing material for submarine power cables*. Milan, 1986.
- [12]. Dahlberg, Tore: *Teknisk hållfasthetslära*. 3.Uppl. Lund, 2018.
- [13]. Dowling, Norman E: *Mechanical behavior of materials; Engineering methods for deformation, fracture and fatigue*. 5.Uppl. New Jersey, 2019.
- [14]. Mägi, Mart, Melkersson Kjell och Evertsson, Magnus: *Maskinelement*. Lund, 2020
- [15]. Buch, A: *Fatigue strength calculation*. Switzerland, 1988.
- [16]. Attaway, Stormy: *MATLAB; A practical introduction to programming and problem solving*. 5.Uppl. Amsterdam, 2018.