

Tilstandsovervåkning av undervannsrørlinjer

Camilla Moe

Undervannsteknologi

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Olav Egeland, IPK

Medveileder: Ragnar Gjengedal, Høgskolen i Bergen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er en del av masterprogrammet Undervannsteknologi, Drift og Vedlikehold ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU). 1. år av mastergraden ble gjennomført i Trondheim ved Institutt for produksjon og kvalitetsteknikk (IPK) og 2.år ble gjennomført ved Høgskolen i Bergen.

I en tidlig fase av prosessen ble flere bedrifter kontaktet angående temaet tilstandsovervåkning av undervannsproduksjonsutstyr. Bedriftene fattet stor interesse for temaet, og med dette i bakhånd kom jeg i samråd med mine veiledere frem til en passende oppgavetekst og formål med oppgaven. Ved veiledning ble fiberoptiske sensorer trukket frem som en nyere og interessant teknologi for tilstandsovervåkning.

Margareth Øvrum, konserndirektør for Teknologi, prosjekter og boring i Statoil uttalte under Offshore Northern Seas (ONS) Innovation Award i 2011 at hun *neker* å gå av med pensjon før en komplett undervannsfabrikk er realisert. Drift av en undervannsfabrikk, der produksjonsenheter og rørlinjer er plassert på havbunnen, krever utstyr, vedlikeholdsplanlegging og sensorsystemer tilrettelagt for dette miljøet.

Denne masteroppgaven gir innsikt i teknologier til bruk for tilstandsovervåkning for hydrokarbonførende undervannsrørlinjer. Eksisterende og modne teknologier diskuteres, samt en kommersiell og praktisk vurdering av disse opp imot behovet for tilstandsovervåkning under vann.

Jeg vil rette en takk til min veileder ved NTNU, Olav Egeland, som har bidratt til å muliggjøre dette samarbeidet mellom NTNU og HIB. Videre vil jeg takke Ragnar Gjengedal ved Høgskolen i Bergen, for grundig og engasjerende veiledning gjennom hele dette året. En stor takk rettes også til Knut Øvsthus (HIB) for engasjement og faglig veiledning innenfor fiberoptikk og oppgaveskriving. Jeg vil også takke Ørjan Fyllingen (HIB) for hans innspill til oppgaven.

Sammendrag

Et undervannsproduksjonssystem består av en subsea-brønn, brønnhode, produksjonstre, manifolder, strømningsrør, kontrollenheter og eventuelt prosesseringsutstyr. Et økende antall undervannsinstallasjoner og et fremtidig ønske om komplette undervannsfabrikker er avhengig av et pålitelig og velfungerende sensorsystem. Kontinuerlig og direkte informasjon om strukturenes tekniske tilstand kan bidra til en mer kostnadseffektiv produksjon i tillegg til å redusere risikoen for lekkasje.

Et utvalg av teknologier til tilstandsovervåking av rørlinjer, både modne og nye, presenteres sammen med måleprinsipper, fordeler og ulemper. Ultrasonisk tykkelsesmåling er en relativt moden teknologi for overvåking av materialtap i rørlinjer, og er også utviklet for undervannsrørlinjer. Ved å måle tiden som en lydbølge bruker gjennom materialet, kan avstand og dermed tykkelse av veggen kalkuleres.

Fiberoptiske sensorer har tilsynelatende et stort potensiale for overvåking av undervannsrørlinjer, og kan detektere endringer i strekk, trykk og temperatur. Ved å sende lys gjennom en optisk fiber vil lokale endringer i strekk og temperatur i fiberen påvirke bølgelengden til det tilbakespredte lyset. Disse endringene kan registres og benyttes til måling av strekk-, trykk- eller temperaturverdier. Denne rapporten gir en teknologioversikt og vurdering i forhold bruk av fiberoptiske systemer innen tilstandsovervåking. I tillegg diskuteres utfordringer og nødvendige tilretteleggelser av denne type sensorsystemer. To typer fiberoptiske sensorer diskuteres: Fiber Bragg gitter-sensorer og Brillouin-sensorer. Fiberoptisk teknologi for overvåking av undervannsrørlinjer er komplisert, og faktorer som beskyttelse av fiberen, temperaturkompensering og vedlikehold er av stor betydning.

To kommersielt tilgjengelige teknologier, Sensorlinks Ultramonit og Omnisens DiTeSt, vurderes for overvåking av henholdsvis materialtap og sprekkdannelser og strekk i rørlinjer. Ultramonit Subsea er laget for overvåking av innvendig materialtap. Løsningen er installert på flere rørlinjer i Nordsjøen, og har en fordel ved at den benytter en klemmemontering som muliggjør ettermontering. Omnisens DiTeSt er basert på prinsippet stimulert Brillouinspredning. Teknologien har blitt benyttet til overvåking av landbaserte rørlinjer og fleksible stigerør.

Summary

An underwater production system consists of a subsea well, a subsea wellhead, a production X-mas tree, manifolds, flow lines, control units and any subsea process equipment that may be present. The increase in number of underwater installations and a future goal of complete underwater factories requires reliable sensor systems. Continuous and direct information regarding the structures technical state can contribute to more cost efficient production. The information can also contribute to a reduction in risk regarding hydrocarbon leaks.

A selection of technologies for condition monitoring of flow lines, both mature technologies and newer ones, are presented. Measurement principles, advantages and disadvantages are also included. Ultrasonic thickness measurement is an established condition monitoring technology for monitoring material loss, and solutions for both onshore and subsea uses are available. By measuring the time it takes for the sound pulse to penetrate the pipe material and return to the transducer, the thickness of the pipe wall can be determined.

Optic fiber sensors have a seemingly large potential when it comes to condition monitoring of subsea flow lines. The sensors can detect changes in strain, pressure and temperature. By emitting light through an optic fiber, local changes in these parameters will affect the wavelength of the backscattered light. These changes can be detected and used for measurements of strain and temperature. This report gives a technological overview and evaluation for the use of optic fiber sensors for condition monitoring purposes. Challenges and adjustments for this type of sensor system are also included. Two different types of optic fiber sensors are discussed; Fiber Grating sensors and Brillouin based sensors. The use of fiber optic technology for condition monitoring of subsea structures is a complicated field, and factors such as mechanical protection of the fiber, temperature compensation and maintenance are of high importance.

Two commercially available technologies are evaluated for condition monitoring of material loss and crack propagation; Ultramonit Subsea and Omnisens DiTeSt. Ultramonit Subsea is designed for monitoring internal material loss in a subsea flow line. This technology is already installed on several North Sea pipelines, and has the advantage that it can be installed after the pipe has been laid. Omnisens DiTeSt is based on Stimulated Brillouin Scattering (SBS). This optic fiber technology has been used for monitoring strain and temperature in onshore pipelines and flexible risers.

Forkortelser

AE	Akustisk Emisjon
BODTA	Brillouin Optical Time Domain Analysis
CBM	Condition Based Maintenance
DNV	Det Norske Veritas
FBG	Fiber Bragg Gitter
FMECA	Failure mode effects and criticality analysis
FOS	Fiberoptiske sensorer
GFRP	Glass Fibre Reinforced Polymer
GW	Guided Waves
HMS	Helse, miljø og sikkerhet
IOR	Increased oil recovery
NDT	Non Destructive Testing
NPF	Norsk petroleumsforening
NPF	Norsk petroleumsforening
ROV	Remotely Operated Vehicle
SBS	Stimulert Brillouinspredning
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SHM	Structural Health Monitoring
SMC	Strain Measurement Cable

Engelske ord og uttrykk vil bli benyttet der det egner seg best.

Terminologi

Akustisk impedans	Materialegenskap definert som produktet av lyd hastighet og materialets tetthet
Amplitude	Avstanden fra en bølges største utslag (topp/bunnpunkt) til likevektstilstanden (midten)
Asset integrity	En eiendel/enhets evne til å utføre sin krevde funksjon på en effektiv måte, der HMS ivaretas og det samtidig sørges for at mennesker, systemer, prosesser og ressurser som leverer integritet er på plass.
Degradering	Tap av integritet i form av svikt i utstyret som opprinnelig var egnet til sitt formål, og har vært i bruk på en riktig måte
Delay Line	Et materiale, vanligvis et polymer, plassert foran en transduser for å skape en tidsforsinkelse mellom eksitasjonspuls og ekkoet fra front-overflaten til emnet
Dielektrisk	Er ideelt sett isolerende enheter/materialer uten transport av elektroner, elektronhull eller ioner
Diffraksjon	I fysikken beskrives fenomenet som den tilsynelatende bøyning av bølger (lys, lyd) rundt små hindringer, og spredningen av bølger gjennom små åpninger
Dopplereffekt	Den tilsynelatende endringen i frekvens eller bølgelengde av en bølge som registreres av en observatør som beveger seg relativt til bølgens kilde
Eksitasjonspuls	En kort elektrisk puls påført et piezoelektrisk element i en ultrasonisk transduser, forårsaker generasjon av vibrasjon - og lydbølger
Erosjon	Destruksjon av et materiale ved abrasiv slitasje grunnet en væske eller gass, tilstedeværelse av solide partikler øker skaden
Fluks	Et mål for strøm av noe gjennom en flate
Foton	Energikvant av elektromagnetisk stråling, også kalt lyspartikkel
Hydrater	Uønskede formasjoner som oppstår i rør linjer når hydrokarboner (metan, propan) danner is-lignende krystaller

	sammen med vann. Høyt trykk og lave temperaturer må være tilstede for at hydratdannelse skal oppstå
Korrelasjonskoeffisient	Er i statistikk og sannsynlighetsregning et mål på styrken og retningen på den lineære avhengigheten mellom to variabler
Korrosjon	Gradvis degradering av materialer, vanligvis metaller, ved kjemiske reaksjoner med omgivelsene
Korrosjonsinhibitor	Kjemisk forbindelse som tilsettes en væske eller gass for å redusere korrosjonshastigheten av et materiale, vanligvis et metall eller en legering
Lavlegert stål	Lavlegert stål inneholder mer mangan eller silisium enn det som går med til deoksidasjonsprosessen. Utenom jern inneholder stålet 2-4 prosent andre legeringselementer.
Multiplexer	Metode der flere analoge meldingssignaler eller digitale datastrømmer er kombinert i ett signal over et delt medium
Nullpunktsforskyvning	Korreksjonsfaktor som representerer forskjellen mellom et målt tidsintervall og selve lydets transittid i et emne, typisk bytte-forsinkelser, kabelforsinkelser og koblingstykkelse
Produksjonstre	En sammenstilling av ventiler, spoler og beslag til bruk ved en oljebrønn, gassbrønn, vanninjeksjonsbrønn og andre typiske brønner.
Rørbend	En seksjon av en rørlinje som viker fra en rett linje. En bøyd seksjon av rør
Siging	Langsom deformasjon av et fast materiale (metall, plast, o.l) ved en vedvarende belastning som kan ligge betydelig under flyte- og bruddgrensen ved samme temperatur. Kalles også <i>kryp/creep</i> .
Stigerør	Et rør som fører brønnvæsker mellom brønn og en produksjonshet (plattform eller produksjonsskip). Kalles gjerne også for <i>riser</i> .
T-bend/stykke	Rørseksjon som benyttes for å kombinere eller dele opp en strømning. T-formet
Transduser	Enhet som konverterer elektrisk energi til mekanisk tøyning, eller omvendt

Trykktank	Trykktanker er lukkede strukturer i form av sylindere, koner, ellipser, toroider og/eller en kombinasjon av disse som inneholder væske eller gass under trykk
Tynnvegget rør	Trykktanker (rør) med tykkelse mindre enn $1/10$ av tankens radius
Tykkvegget rør	Når røret har et r/t (radius/tykkelse) – forhold mindre enn 10, vil ikke ligningene for det tynnveggede røret kunne anvendes lenger
Umbilical	Kabel som går fra havbunnen og opp til overflateanlegg. Transporterer energi (hydraulisk, elektrisk), kjemikalier og kontroll til subsea olje - og gassbrønner, undersjøiske manifolder og andre subseasystem

Innhold

FORORD	I
SAMMENDRAG	III
SUMMARY	V
FORKORTELSER	VI
TERMINOLOGI	VII
1 INNLEDNING	1
1.1 BAKGRUNN.....	1
1.2 PROBLEMSTILLING.....	2
1.3 AVGRENSING AV OPPGAVEN.....	2
1.4 METODE	3
1.5 OPPGAVENS SPRÅK	3
1.6 OPPGAVENS STRUKTUR	3
2 TEORI	5
2.1 BEHOV FOR TILSTANDSOVERVÅKNING	5
2.2 INSPEKSJON VS. OVERVÅKNING	6
2.3 LEKKASJE.....	6
2.4 TILSTANDBASERT VEDLIKEHOLD	7
2.4.1 <i>Materialtap</i>	9
2.5 MEKANISMER FOR SVEKKELSE.....	10
2.5.1 <i>Spenninger i rørvegger</i>	10
2.5.2 <i>Sprekkdannelse</i>	12
2.6 ULTRALYD	13
2.6.1 <i>Piezoelektrisitet</i>	14
2.7 FIBEROPTIKK	15
2.7.1 <i>Bragg gitter</i>	16
2.7.2 <i>Brillouinspredning</i>	18
3 SØKEMETODIKK	21
3.1 LITTERATURSØK.....	21
4 RESULTATER	27
4.1 METODER FOR TILSTANDSOVERVÅKNING	28
4.2 AKTUELLE METODER FOR MÅLING AV MATERIALTAP	31
4.2.1 <i>Ultrasonisk tykkelsesmåling (UT)</i>	31

4.3	AKTUELLE METODER FOR OVERVÅKNING AV SPREKKDANNELSE	34
4.3.1	<i>Akustisk emisjon (AE)</i>	34
4.3.2	<i>Fiberoptiske sensorer (FOS)</i>	37
4.4	EVALUERING AV KOMMERSIELLE TEKNOLOGIER FOR OVERVÅKNING AV MATERIALTAP OG SPREKKDANNELSE PÅ UNDERVANNSRØRLINJER	48
4.4.1	<i>Sensorlinks Ultramonit</i>	48
4.4.2	<i>Omnisens DiTeSt</i>	51
4.4.3	<i>Vurdering av fiberoptiske sensorer</i>	56
4.5	EVALUERING AV MÅLENØYAKTIGHET VED OVERVÅKNING AV UNDERVANNSRØRLINJER	57
4.5.1	<i>Nøyaktighet ved ultrasonisk tykkelsesmåling</i>	57
4.5.2	<i>Nøyaktighet ved FOS</i>	59
5	DISKUSJON	61
5.1	LITTERATURSTUDIE OG FUNN.....	61
5.1.1	<i>Kilder og troverdighet</i>	62
5.2	FIBEROPTISKE SENSORER	62
5.2.1	<i>Innpakning og installasjon av fiber</i>	62
5.2.2	<i>Temperaturkompensering og termisk ekspansjon</i>	63
5.2.3	<i>Vedlikehold</i>	65
5.2.4	<i>Anvendelser og kompetanse</i>	65
5.2.5	<i>Ultramonit og DiTeSt</i>	68
6	KONKLUSJON	69
6.1	FORSLAG TIL VIDERE ARBEID	71
6.1.1	<i>Fiberoptiske sensorer</i>	71
6.1.2	<i>Undervannsskjøter</i>	71
7	LITTERATURLISTE	73
8	VEDLEGG	I
8.1	DEFINISJON MASTEROPPGAVE.....	I
8.1.1	<i>Begrensninger og endringer Masteroppgave</i>	III
8.2	CASE; TERMISK EKSPANSJON	IV

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Begrepet *subsea* relateres til produksjon og utvikling av olje- og gassfelt ved undervannslokasjoner. Et undervannsproduksjonssystem består av en subsea-brønn, brønnhode, produksjonstre, manifolder, strømningsrør, kontrollenheter og eventuelt prosesseringsutstyr (Bai & Bai, 2010). Prosesseringsutstyr inkluderer undervannsseparator for separasjon av brønnstrømmen, eventuelt en kompressor for trykkstøtte. Alle disse enhetene samlet er til sammen en undervannsfabrikk. Systemer varierer i forhold til kompleksitet, og linkes til en fast plattform, FPSO (Floating Production, Storage and Offloading) eller et landbasert anlegg.

Utvikling av subsea-felt motiveres ut i fra flere faktorer, og blant de viktigste er ønsket om økt utvinning fra olje- og gassfeltene. Prosessering, i form av separering av brønnstrømmen på havbunnen tilfører trykkstøtte til hydrokarbonreservoarene. Denne trykkøkningen vil stimulere til en økt utvinningsgrad fra olje- og gassfeltene.

Fjerne lokasjoner, store vanddybder og tøffe miljøer med kjemiske og mekaniske belastninger setter større krav til utstyr, vedlikehold og sikkerhet. En struktur eller komponent må designes slik at den på en sikker måte er i stand til å tåle alle eksterne og interne belastninger, inkludert sin egen vekt og alle dynamiske krefter. Dette er en definisjon på strukturell integritet, og ivaretagelse av denne integriteten er et hovedfokus innen drift og vedlikehold.

Et overvåkningssystem som kan tilby pålitelig, kontinuerlig og direkte informasjon fra sensorer er en forutsetning for evaluering av undervannsinstallasjonenes tekniske tilstand og gjenværende levetid. Et system av denne art vil tillate en proaktiv tilnærming ved å levere kontinuerlig informasjon, og vil i tillegg bidra til å forhindre olje- og gasslekkasjer med påfølgende miljø- og økonomirelaterte konsekvenser.

I et hydrokarbonførende rørsystem på havbunnen vil stålstrukturene utsettes for vann, CO₂, H₂S, O₂ og sand, kombinert med høyt trykk og høye temperaturer. Dette kan føre til korrosjon, erosjon, slitasje og sprekker i stålstrukturene. I enkelte kritiske soner av rørsystemet vil degradering kunne inntreffe hurtigere og mer omfattende enn andre, disse områdene inkluderer rørbend, T-bend, flenser og ventiler.

1.2 Problemstilling

Ved etablering og definering av oppgaven ble følgende mål satt:

- Evaluere tilgjengelige teknologier for tilstandsovervåkning av undervannsproduksjonssystem. Med tilstandsovervåkning menes overvåkning av parameterne trykk, materialtap, sprekker, plastisk deformasjon og siging. Trykk omfatter både det ytre hydrostatiske trykket som forekommer på en gitt vanddybde, og det indre trykket forårsaket av strømmende hydrokarboner.
- Fiberoptiske sensorer har vist seg å være en teknologi som synes å ha et stort potensiale innenfor tilstandsovervåkning. Et mål for oppgaven vil være å gi en statusbeskrivelse og et overblikk over anvendelse av fiberoptiske sensorer til tilstandsovervåkning av undervannsproduksjonssystem.
- Evaluere kommersielt tilgjengelige teknologier, med fokus på erfaring, anvendelse og pålitelighet ved den aktuelle applikasjonen.

1.3 Avgrensing av oppgaven

Begrepet undervannsproduksjonssystem omfatter en rekke enheter og komponenter med forskjellige oppgaver og belastninger. Fokuset for denne oppgaven vil være rørledningene som frakter hydrokarbonene.

Tilstanden for et rørsystem omfatter både strømningsrelaterte påvirkninger, strukturelle påvirkninger og ytre påvirkninger. En rekke ulike teknologier for tilstandsovervåkning vil være nødvendig ved drift av en undervannsfabrikk i forhold til strukturell integritet og strømningskontroll. I denne oppgaven vil fokuset for applikasjon være tilstandsovervåkning av innvendig strukturell integritet ved undervannsrørledning. Rørledningen antas å frakte en brønnstrøm bestående av hydrokarboner, vann, CO₂, H₂S, O₂ og sandpartikler.

Innenfor temaet fiberoptiske sensorer vil fokuset ligge i fenomenet som anvendes i de fiberoptiske sensorene, og ikke gå dypt innen de fysiske prinsippene. Måleprinsipp og applikasjon av fiberoptiske sensorer vil inngå i beskrivelsen.

Endringer fra original oppgavetekst er beskrevet i avsnittet *Begrensninger og endringer Masteroppgave*.

1.4 Metode

For å løse oppgavens problemstilling er det gjennomført et litteraturstudium i kapittel 3. Litteraturstudiet har bestått av å danne en oversikt over bakgrunn, teknologi og måleprinsipper for ulike overvåkningsteknologier. Eventuelle begrensninger, utfordringer og tilpasninger har også vært relevant for problemstillingen.

For informasjon om erfaring og applikasjon av fiberoptiske sensorer ved tilstandsovervåkning av rørledninger ble kommersielle leverandører kontaktet.

1.5 Oppgavens språk

Petroleum og fiberoptikk er områder som i stor grad anvender engelsk terminologi. Selv om oppgaven er skrevet på norsk er likevel enkelte av de mest vanlige engelske uttrykkene beholdt. Dette er gjort da oversettelser av veletablert terminologi kan virke mer forvirrende enn forklarende for leseren.

1.6 Oppgavens struktur

Oppgaven er delt opp i to hoveddeler, en teoretisk del og en praktisk del. Kapittel 2 utgjør den teoretiske delen og kapittel 3,4 og 5 utgjør den praktiske delen.

Kapittel 2 tar for seg teoretisk bakgrunn ved de aktuelle degraderingsmekanismene, i tillegg til en teoretisk innledning for de utnyttede fenomenene for de valgte overvåkningsteknologiene. Denne teoretiske delen av oppgaven er en bakgrunn for å løse den første delen av problemstillingen.

Kapittel 3 tar for seg litteraturstudiet og tabeller for søk i ulike databaser og nettportaler. En tabell med søkeord, antall treff og funn er presentert og anordnet etter tema.

Kapittel 4 setter de ulike teoriene for målemetoder inn i applikasjoner ved utnyttelse av de diskuterte fenomenene. Måleprinsippene ved ultrasonisk tykkelsesmåling i tillegg til fiberoptiske sensorer presenteres i form av prinsipp, erfaringer og eventuelle utfordringer ved installasjon og drift.

Kapittel 5 inneholder diskusjon. Resultater, utfordringer og usikkerheter diskuteres.

Kapittel 6 inneholder konklusjon og forslag til videre arbeid.

2 Teori

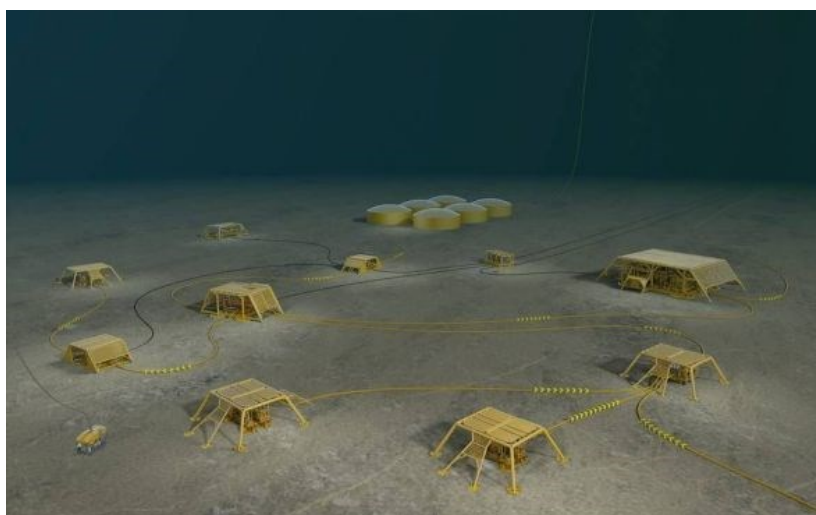
Med tilstandsovervåkning menes kontinuerlig evaluering av et system, og utstyret gjennom hele levetiden (Tavner et al., 2008). Wilson (2002) definerer formålet med tilstandsovervåkning på følgende måte: «Meningen med overvåkning av tilstandsindikatorer er å detektere tegn på degradering, og å tilby et mål på grad og hastighet for degraderingen».

2.1 Behov for tilstandsovervåkning

Statoil har satt seg som mål å utvinne mer olje fra sine oljefelt på norsk sokkel enn noe annet oljeselskap. Typisk utvinningsgrad på norsk sokkel i dag er 47 %, og det er ønskelig at denne utvinningsgraden heves ved hjelp av ny teknologi og strategi for olje- og gassutvinning. IOR-strategien inkluderer økning av trykk i petroleumsreservoar, slik at lønnsom produksjon kan ivaretas og forlenges.

Tilstrekkelig trykk i olje/gass-reservoaret er drivkraften som frakter petroleum til produksjonsanlegg på havbunn eller plattform.

Produksjonsutstyr for olje og gass plassert på havbunnen er i mange tilfeller hensiktsmessig for å øke effektiv



Figur 2-1: Slik vil undervannsfabrikken se ut, ifølge Statoil. (Kilde: www.statoil.com)

produksjon og utvinningsgrad fra et felt. Plassbesparelse på plattform er en annen fordel med å flytte produksjonsutstyret under vann. Ved å prosessere brønnvæsken på havbunnen, unnlates bruk av verdifull energi på å frakte samtlige komponenter av brønnvæsken til havoverflaten. Som et alternativ kan produsert vann fra undervannsseparator injiseres tilbake til reservoaret som trykkstøtte.

Komponenter som fortøyningstau, undervannskabler, umbilicals, stigerør og strømningslinjer har tekniske begrensninger satt av tretthetsakkumulering, og disse begrensningene kan ved installasjon, ferdigstilling eller operasjon overgå forventede verdier (López-Higuera et al.,

2011). Reduksjon av levetid og økt risiko ved operasjoner kan være resultat av en slik situasjon. Intervensjon ved dype vann vil være omstendelig og kostbart, og kan resultere i omfattende nedetid.

Undervannsinstallasjoner utsettes for korrosjon, erosjon og ytre påvirkninger, og periodiske ROV-inspeksjoner benyttes for vurdering av strukturens integritet. Denne metoden har sine svakheter, da den er kostbar, relativt upålitelig og ikke er i stand til å avdekke skader ved samtlige lokasjoner.

2.2 Inspeksjon vs. overvåkning

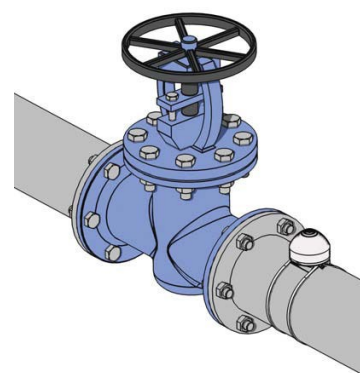
I denne oppgaven benyttes følgende definisjon på innvendig inspeksjon av rørlinjer; å kjøre en intelligent «pig» gjennom rørlinjen for å undersøke intern og ekstern tilstand. Inspeksjon ved bruk av «pig» kalles også In-Line Inspection (ILS).

Overvåkning utføres med langt høyere frekvens enn inspeksjon, og den gir en mer global informasjon. Tradisjonelle overvåkningsteknikker er påtrengende, ofte i form av prober eller uthentede prøver. Utviklingen i teknologier for inspeksjon og overvåkning, spesielt direkte teknikker som tillater semi-kontinuerlig, ikke påtrengende overvåkning, har ført til et noe uklart skille mellom inspeksjon og overvåkning (Palmer & King, 2004).

2.3 Lekkasje

Produksjonssystemer for hydrokarboner er omfattende, komplekse installasjoner, og det forekommer at uønskede lekkasjer av varierende størrelse oppstår. Det eksisterer i dag et høyt nivå av både operatørens og myndigheters bevissthet ovenfor miljøpåvirkningen forårsaket av olje og gass-produksjon, og en reduksjon i utslipp er et mål.

I DNVs *Recommended Practice DNV-RP-F302* kategoriseres lekkasje ved undervannsinstallasjoner i følgende fire grupper; stor, mellomstor, liten og veldig liten. De store lekkasjene skjer der en stor sprekk, splitt, ruptur eller store tap av fluider inntreffer. Mellomstore lekkasjer brukes som definisjon for hendelser der lekkasjen er signifikant, men ikke stor. En liten lekkasje vil være gjeldende for situasjoner der lekkasjen er begrenset, men korrigerende



Figur 2-2: Lekkasjer oppstår ofte ved forbindelser som flenser, i tillegg til ventiler. (Kilde: DNV 2010)

tiltak iverksettes. De veldig små lekkasjene er betegnelsen for lekkasjer av liten størrelse der korrigerende tiltak ikke ble iverksatt i etterkant (Veritas, 2010).

Rapporten presenterer informasjon basert på statistikk om hvor i systemene lekkasjene oppstår. Statistikken viser at de største hydrokarbonlekkasjene oppstår ved uregelmessig operasjon, i forbindelse med vedlikehold, nedstengning og oppstart. Strukturelle komponenter som rapporteres å være spesielt utsatt for lekkasje inkluderer strukturelle forbindelser, flenser, forseglinger, ventiler og sveiser. Disse områdene regnes som kritiske punkter i forhold til overvåkning av lekkasje.

I rapporten *Analysis of investigated offshore hydrocarbon releases*¹ presenteres lekkasjestatistikk fra Storbritannias offshore-sektor for 2002. I følge denne rapporten var det rørlinjer som stod for den største andelen av totalt antall lekkasjer, med 62 %. Av disse lekkasjene utgjør følgende punkter:

- 70 % av alle utslipp oppstod grunnet sprekker, splitter eller hull i strukturene
- 23 % av utslipp kom fra «kroppen» til rør, trykkammer eller ventil. Disse utslippene er resultat av degradering av strukturens materialer.
- Flenser utgjorde 15 % av alle lekkasjer, hvorav 60 % av disse ble forårsaket av feilstilling, og 15 % grunnet degradering av materialet.
- 19 % av utslipp var fra forseglinger eller ventilspindler.

Denne rapporten viser hvor viktig det er å overvåke rørlinjene i et hydrokarbonførende system.

2.4 Tilstandsbasert vedlikehold

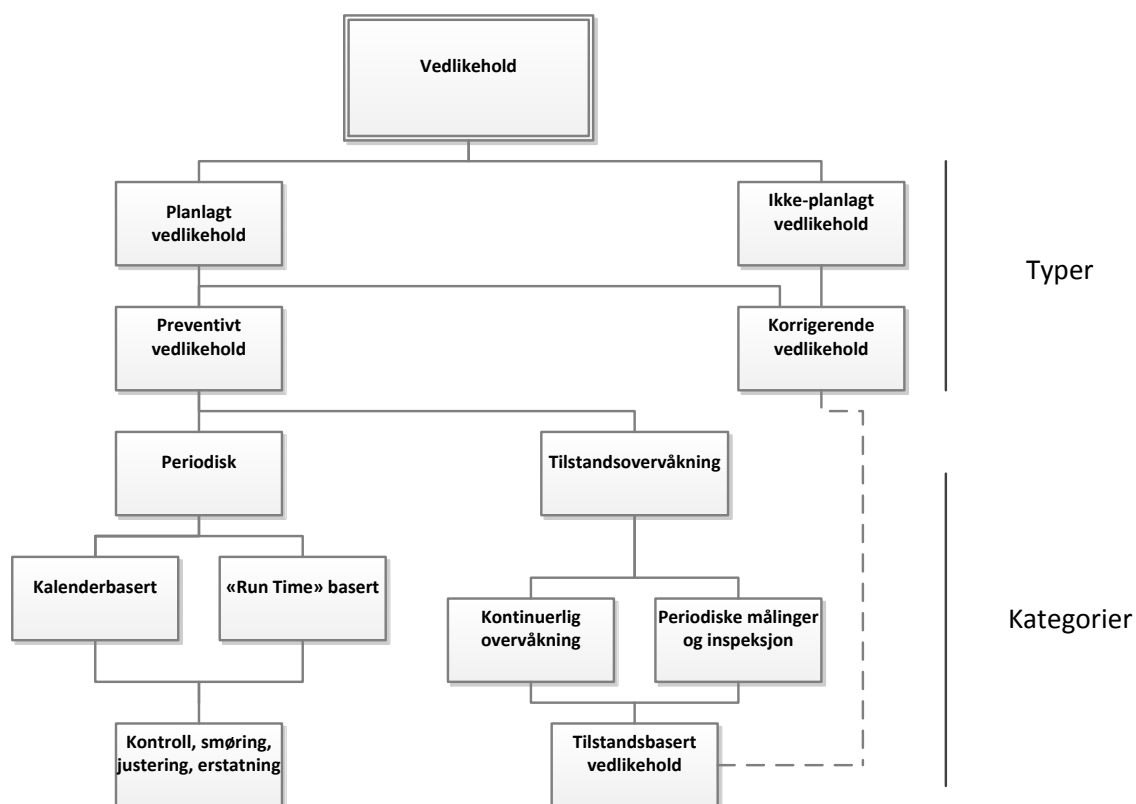
Hensikten med tilstandsovervåkning er supplement av nøyaktig, kvantitativ, direkte informasjon om utstyrets tilstand til enhver tid. Tilstandsovervåkning vil optimalisere utstyrets ytelse da feil kan detekteres og gjenkjennes tidlig. På denne måten kan tiltak iverksettes for å effektivt forhindre uønskede hendelser og feil på utstyret. Denne strategien tillater at vedlikehold kan planlegges til de mest hensiktsmessige tidspunkt. Et eksempel på dette er utføring av vedlikehold i arktiske strøk, der vedlikehold i vinterhalvåret kan være vanskelig, og det vil være ønskelig at vedlikeholdsoperasjoner legges til den varmere årstiden.

Hovedintensjoner ved tilstandsovervåkning inkluderer følgende (Valland, A, 2010):

¹ URL: <http://www.hse.gov.uk/offshore/statistics/hsr2002/section4.htm>, Online 22/2/13.

- Direkte informasjon om systemets/utstyrets tilstand
- Dokumentere historiske tilstandsprosesser
- Diagnose og gjenværende levetid for komponenten
- Optimalisert produksjon
- Optimalisert vedlikeholdsplanlegging

Ved tidlig deteksjon av svikt kan vedlikehold planlegges, og tilstandsovervåkning er en viktig del av forebyggende og forutsett vedlikehold. Dette er grunnlaget for Tilstandsbasert vedlikehold (CBM). Tilstandsovervåkning kan ikke direkte forutsi svikt eller feil, det er kun et hjelpemiddel for å estimere gjenstående tid til en svikt. Avvik fra referanseverdier i operasjonelle forhold, som temperatur - eller vibrasjonsforandringer, vil oppstå i forkant av svikt. Disse grensene vil stamme fra kvantitative eller kvalitative metoder, eventuelt ren erfaring. Hvor ofte disse målingene gjennomføres for systemet, avhenger av flere faktorer; kritikalitet (HMS, økonomi), vanlige feil og konsekvenser ved det aktuelle systemet, hvorvidt en passende metode for den aktuelle feilen eksisterer, tilstandens progressivitet og kontrollfrekvens (Wilson, 2002).



Figur 2-3: Oversikt over vedlikehold, planlagt og ikke-planlagt. Basert på Wilson (2002).

Utvikling av teknologier for drift av undervannsfabrikkene på havbunnen kompliseres ved dypere vann, høyere trykk og høyere temperaturer. I tillegg til mer komplekse systemer, øker også fokuset på *asset integrity* til å møte både bedriftens mål og regulatoriske kontroller.

2.4.1 Materialtap

Karbonstål og andre lavlegerte stållegeringer fortsetter å dominere som materialvalg for strukturer for olje- og gassproduksjon grunnet kostnadseffektivitet, tilgjengelighet og god fabrikasjonsevne. Suksess ved bruk av denne type stål forutsetter at systemet har eiendelsintegritetssystemer med hensikt for å redusere (Esaklul & Ballard, 2007):

- Korrosjon
- Erosjon
- Avleiringer i rør
- Sprekker, både miljø-indusert og mekanisk indusert

Hydrokarbonene i en brønnstrøm inneholder normalt stoffer som CO₂, H₂S, O₂ og vann. Disse komponentene, kombinert med ekstreme trykk- og temperaturl tilstander, kan resultere i omfattende korrosjon av rørmaterialet. Erosjon er slitasje av et materiale i et strømningsystem, grunnet sand, partikler, sammenstøt eller kavitasjoner. Skarpe bend og andre endringer i geometri kan fremskynde erosjon i et rørsystem. Kombinasjonen erosjon og korrosjon kan føre til en såkalt synergieffekt, erosjonskorrosjon. Denne effekten resulterer i større materialtap enn de to effektene individuelt ville forårsaket. Karbonstål og kobbernikkellegeringer er materialer spesielt utsatt for erosjonskorrosjon. Andre typer korrosjon er beskrevet i forprosjektet *Subsea Tilstandsovervåkning* (Moe, 2012).

Korrosjonsovervåkning innebærer innsamling av korrosjonsratene for materialene som systemet er bygget opp av, og videre overvåkning av degradering og strukturell integritet. Et komplett korrosjonsovervåkningsprogram vil omfatte målinger av korrosivitet ved flere lokasjoner i systemet ved bruk av forskjellige metoder. Feilmoder som skal detekteres eller forhindres ved bruk av korrosjonsovervåkning inkluderer (Wilson, 2002):

- Økning i fluidets korrosivitet grunnet strukturelle eller mekaniske feil i systemet
- Feil ved dosering av korrosjonsinhibitor
- Materialtap som fører til utilstrekkelig styrke, forvrengning eller ubalanse (f.eks. redusert veggtykkelse ved et rørbend)
- Defektvekst, som sprekker eller groper

- Produksjonsfeil (f.eks. sveisefeil)

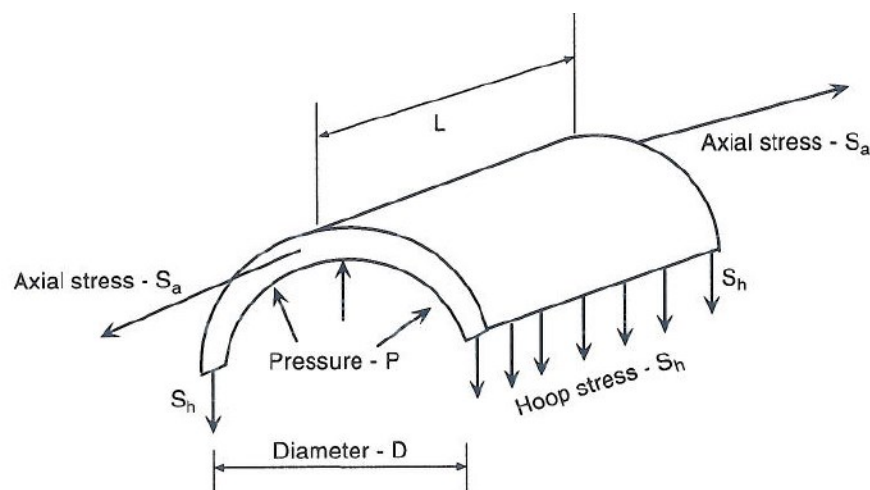
2.5 Mekanismer for svekkelse

For en rørlinje neddykket i sjøvann finnes det flere kategorier for potensielle trusler i forhold til strukturell integritet (Kishawy & Gabbar, 2010):

- Material- og konstruksjonsdefekter, som langsgående sømmer og sveiser
- Mekanisk skade fra konstruksjon, vedlikehold og intervensjon
- Ukorrekt operasjon
- Korrosjon, kryp og sprekkdannelser
- Enhetsfeil og svikt
- Naturkrefter som jordskjelv, strøm, vind, kraftig sjø og varme/kalde temperaturer
- Skjøter/rørkoblinger utsatt for høy og varierende belastning

2.5.1 Spenninger i rørvegger

Trykktanker er lukkede strukturer i form av sylindere, koner, ellipser, toroider og/eller en kombinasjon av disse som inneholder væske eller gass under trykk (Grote & Antonsson, 2009). Når tankens tykkelse er mindre enn 1/10 av tankens radius, er tanken definert som en tynnvegget trykktank. Når røret har et r/t (radius/tykkelse)-forhold mindre enn 10, vil ikke ligningene for tynnveggede rør kunne anvendes lenger.



Figur 2-4: Illustrasjon av spenninger i rør grunnet internt trykk. (Kilde: Menon 2005)

Høytrykksrør er rør der det indre trykket er så høyt at hovedfokus vil være å ivareta sikkerheten for rørsystemet ved å forhindre eksplosjon eller lekkasje. De fleste lange hydrokarbonførende rørlinjer tilhører denne kategorien av rør (Kishawy & Gabbar, 2010).

Når et sirkulært rør utsettes for internt trykk, vil rørmaterialet ha to spenningskomponenter ved rette vikler mot hverandre. De største spenningene, kjent som membranspenninger, er assosierte spenninger fra inneholdt trykk. Membranspenningene antas å være uniforme langs vegg og virker tangentielt til overflaten. Den andre type spenning er den langsgående spenningen, også kjent som aksiale spenninger. Disse spenningene virker parallelt med rørets akse. Formlene for de to spenningene ved tynnveggede rør uttrykkes på følgende måte;

Membranspenning, S_h :

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{d} \quad (\text{Formel 2-1})$$

Aksial spenning, S_a :

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{2 \cdot d} \quad (\text{Formel 2-2})$$

hvor P er trykk, r er radius og d er tykkelse.

En slik trykktank, i form av transportrør for olje og gass under vann, vil utsettes for indre trykk grunnet strømmende hydrokarboner. I tillegg til indre trykk vil også ytre trykk i form av hydrostatisk krefter påføres strukturen. De forgående formler gjelder kun for tynnveggede rør. I tilfeller med hydrokarbontransport ved store vanddybder vil eksternt trykk øke, og krav til veggtykkelse øker (Menon, 2005).

Tynnveggede rør under eksternt trykk svikter ved spenninger langt under flytegrensen grunnet ustabiliteten til skallet. I tillegg til de fysiske egenskapene til materialet ved opererende temperatur, er de påvirkende hovedfaktorene for ustabiliteten og kollapstrykket P_C , geometriske. Dette gjelder skallets lengde L, veggtykkelse t og utvendig diameter D_0 .

I forhold til tilstandsovervåking av rør er det interessant å fokusere på veggtykkelse t. En reduksjon i veggtykkelse indikerer tap av materiale forårsaket av korrosjon, erosjon, eller en kombinasjon av disse. Materialtap vil dermed påvirke kollapsgrensen for røret og dette illustrerer videre behovet for tilstandsovervåking ved slike strukturer.

2.5.2 Sprekkdannelse

Varme, strømninger, vannkvalitet, oksygeninnhold og ujevnheter i stålet er eksempler på forhold som kan initiere og stimulere til utvikling av sprekker i stålstrukturer (Roberts & Talebzadeh, 2003). Sprekker i utvikling vil kunne føre til lekkasje og uønskede situasjoner, og deteksjon av disse er essensielt for å forhindre svikt i strukturer.

Små trykktanker designes med en viss tillatelse av flyt, *yield* ved trykk lavt nok til at ingen eventuelle sprekker utvikles videre (Ashby, 2011). Dette prinsippet kalles *yield before break* og er en metode for *fail-safe design*. Geometrien endres før skade inntreffer. Vibrasjonen som oppstår grunnet denne ettergivende forvrengningen kan lett detekteres, og trykket kan slippes ut på en trygg måte.

Følgende formel er et uttrykk for spenninger i rørveggene for en tynnvegget trykktank;

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{2 \cdot d} \quad (\text{Formel 2-3})$$

Ved design av trykktanker/rør er veggtykkelsen valgt slik at spenningene ved fungerende trykk P er mindre enn flytespenningen for veggen σ_f . Dersom trykktanken inneholder ingen sprekker eller feil med diameter større enn $2 \cdot a_c$, vil spenninger som resulterer i videre utvikling av sprekken uttrykkes som;

$$\sigma = \frac{CK_{1c}}{\sqrt{\pi \cdot a_c}} \quad (\text{Formel 2-4})$$

hvor K_{1c} representerer bruddseighet og C er en konstant nær uendelig.

Sikkerhet kan ivaretas ved å sørge for at opererende spenninger er mindre enn σ , som videre gir det største mulige trykket uttrykt ved (Ashby, 2011):

$$P \leq \frac{2t}{R} \frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi \cdot a_c}} \quad (\text{Formel 2-5})$$

2.6 Ultralyd

Dette avsnittet gir en kort oversikt av ultralyd. Teorien er hentet fra (Hauptmann et al., 1998) (Halmøy, 2007) og (Ensminger, 1988).

Ultralyd er vibrasjonsbølger i faste materialer, flytende materialer og i gasser ved frekvensområder over grensene for menneskets hørsel. Disse lydbølgene dekker et frekvensområde fra 20 kHz til omtrent 1 GHz. Applikasjoner for ultrasoniske teknologier benyttes blant annet i prosessindustrien og i medisinske metoder.

Trykkbølger oppstår når partikler til medium er satt ut av sin likevektsstilling av en påtvunget handling. Det oppstår en vekselvis kompresjon og ekspansjon av mediet langs en retning av bevegelse.

Forplantning av en plan elastisk bølge kan beskrives ved det sonisk vekslende trykket $p(x,t)$;

$$p = p_0 \exp[j\omega(t - \frac{x}{v})] \exp(-\delta x) \quad (\text{Formel 2-6})$$

Der v er lydets hastighet, δ er demping av lyd, t er tid og x er posisjon. Begge disse parameterne bestemmer bølgens utbredelse og avhenger i stor grad av egenskapene til mediet som bølgen propagerer gjennom. Dette benyttes for mange sensor-applikasjoner. Molekylær interaksjon, faseoverganger, molekylær omorganisering og andre effekter er ansvarlige for atferden til v og δ .

Det er viktig å erkjenne betydningen av trykket, p , i denne ligningen.

$$p = P - P_0 \quad (\text{Formel 2-7})$$

La P_0 være det konstante likevektstrykket i et fluid, og P et uttrykk for det momentane trykket for et tilfeldig øyeblikk. p kalles overtrykk eller akustisk trykk, og det er denne mengden som er relevant i den akustiske bølgeligningen. p kan ha både positiv og negativ verdi.

Propagering av ultralyd i et medium kan være i form av langsgående-, transversale-, eller overflatebølger (Connor, 1987). I langsgående bølger beveger partiklene i mediet seg fram og tilbake i samme retning som bølgen forplanter seg, og bølgene kan benyttes for identifisering

av metallens overflate, innvendige groper og defekter i veggen. Langsgående bølger kan forplante seg i både gass, fast stoff og væske. I transversale bølger beveger partiklene seg på tvers av bølgens forplantningsretning, og bølgene kan derfor benyttes for lokalisering av sprekker vinkelrett på en overflate. Skjærkreftene i materialet virker som «fjærkrefter» i svingningen. Transversale bølger eksisterer kun i faste stoff. Overflatebølger finnes på grenseflaten mellom to stoffer.

For å generere ultrasoniske bølger kreves en transduser. En transduser er en enhet som konverterer elektrisk energi til mekanisk tøying, eller omvendt.

2.6.1 Piezoelektrisitet

Ultralyd kan genereres på flere måter, og den mest vanlige er ved bruk av et piezoelektrisk element (Halmøy, 2007). Et par keramiske materialer viser denne spesielle egenskapen, også kalt trykkelektrisitet. Når krystallen blir utsatt for press vil det oppstå en elektrisk polarisering, det vil si en oppsamling av elektrisk ladning i den ene delen av krystallen. Den resulterende elektriske spenningen varierer proporsjonalt med trykkintensiteten. Piezoelektrisitet beskriver relasjonene mellom mekanisk belastning på et fast stoff og dens resulterende elektriske oppførsel grunnet endringer i den elektriske polariseringen. Det vanligste, naturlige piezoelektriske materialet er en skive kvarts (SiO_2) skåret ut i en bestemt retning av en enkelt krystall. I praktiske applikasjoner benyttes vanligvis Silica (SiO_2). Kriterier for bruk av disse materialene som sensormateriale er materialenes tilhørende elektriske, mekaniske og akustiske egenskaper.

Silica er bygd opp av Si-atomer omgitt av fire oksygenatomer i tetraeder-form. Ladningen i gruppen er skeivt fordelt (polarisert). Når skiven blir presset sammen, utvikles en netto positiv ladning på den ene siden, og en negativ ladning på den andre siden. Mellom overflateladningene vil det da oppstå en elektrisk spenning, en piezoelektrisk effekt. I praksis vil silica bli belagt med et tynt metall-lag på hver side, og i tillegg være koblet til en spenningskilde. Silica-skiven vil vibrere som et stempel, og sende langsgående lydbølger ned i underlaget den hviler på.

Når lydbølger fra underlaget treffer kvartsen, vil den vibrere og avgi en liten spenning som forsterkes og deretter registreres. Det piezoelektriske elementet (kan være den samme krystallen som sender ut lydbølgene) mottar denne reflekterte vibrasjonsenergien og konverterer de tilbake til et elektrisk signal. Avstand fra den ultrasoniske kilden og reflektert

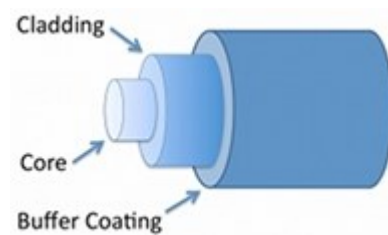
objekt bestemmes ut i fra påløpt tid mellom sendt og mottatt signal. (Callister & Rethwisch, 2007)

Piezoelektriske transdusere kan designes for å operere i faste stoff, væsker, vev og gasser. Spesialdesignede transdusere med spesifikke materialvalg har også utvikles for å tilfredsstille behovet for transdusere som kan overleve ekstreme miljøer, aggressive kjemikalier og temperaturer.

2.7 Fiberoptikk

En optisk fiber er en fleksibel, gjennomsiktig tråd laget av glass (SiO_2) med tykkelse på ca. 0,12 mm. Fiberen fungerer som en bølgeleder, eller et «lysrør», som overfører lys mellom de to endene av fiberen. En optisk fiber gir signaloverføringer med lave tap over et enormt frekvensområde på 25THz, avhengig av type fiber. Den høye overføringsevnen, samt høy båndbredde er grunnen til at optiske fiberkommunikasjonssystemer er brukt i flere industrier og applikasjoner i dag.

Optiske fibre består vanligvis av to lag; fiberkjerne og kledning. Fibrene er dielektriske enheter som samler og guider lys. De fleste optiske fibre benyttet for måle-applikasjoner har glasskjerne og glasskledninger. Et beskyttende belegg over kledningen (*Figur 2-5*) er normalt utformet i plast for å gi fiberen tilstrekkelig mekanisk styrke og beskyttelse mot fuktighet (Li et al., 2004).



Figur 2-5: Fiberen består av to lag, kjerne og kledning. I tillegg belegges fiberen for beskyttelse. (www.tmworl.com)

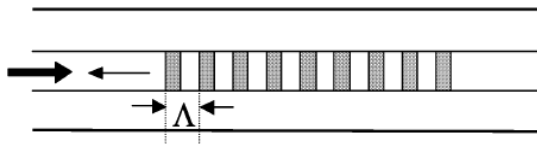
Det finnes prinsipielt tre forskjellige typer fiber til bruk i kommunikasjonsformål, og forskjellen mellom de ligger i hvordan den lysledende kjernen er oppbygget. Singelmodus-fiber har kjerne med diameter rundt 0,01 mm. Den har minst demping av de tre typene og en stor overføringskapasitet (~THz), noe som gjør den svært godt egnet i et sensorsystem.

Optisk fiber benyttes for ulike sensorapplikasjoner. I noen anvendelser er selve sensoren den optiske fiberen, i andre tilfeller benyttes fiber til å koble en ikke-fiberoptisk sensor til et målesystem. Førstnevnte, bruk av fiber som både sensor og kommunikasjon er det aktuelle tilfellet i denne oppgaven.

2.7.1 Bragg gitter

Dette avsnittet gir en kort oversikt over fiber Bragg gitter. Teorien er hentet fra (Lee, 2003), (Ramaswami et al., 2009) og (Majumder et al., 2008).

Et gitter er enhver regelmessig plassert samling av hovedsakelig identiske, parallelle, langstrakte elementer. Gitter skrives i fiber ved å utnytte fotosensitiviteten til enkelte typer av optiske fiber. I praksis opptrer enhver periodisk forstyrrelse i det propagerende mediet som et gitter. Et fiber Bragg gitter kan benyttes som et innebygd optisk filter for å blokkere visse bølgelengder, eller som en bølgelengdebestemt reflektor. Gitteret genererer et bølgelengde-



Figur 2-6: Den reflekterte bølgelengden inneholder informasjon om lokal temperatur og strekk. (Lee, 2003)

bestemt dielektrisk speil, og reflekterer bølgelengder av lys som opplever et skift i respons til variasjoner i temperatur og/eller strekk.

Fiber gitter klassifiseres som kort-periode eller lang-periode gitter. Kort-periode gitter kalles Bragg gitter (FBG) og har perioder sammenlignbare med

bølgelengden, typisk rundt $0,5 \mu\text{m}$.

Endringen i strekk er definert som hvor mye et materiale har blitt strukket eller komprimert ved sammenligning av materialets originale lengde, L .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{Formel 2-8})$$

Bragg bølgelengden, λ_B , uttrykkes ved

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (\text{Formel 2-9})$$

Der Λ er perioden til gitteret og n_{eff} er den effektive brytningsindeksen til bølgelederen eller fiberen. I praksis minker refleksjonseffektiviteten da bølgelengden til den propagerende bølgen dempes av Bragg bølgelengden. Dersom flere bølgelengder sendes mot et fiber Bragg gitter, vil Bragg bølgelengden reflekteres, og alle andre bølgelengder filtreres videre.

Bragg bølgelengden uttrykt ved (*Formel 2-9* endres med en forandring i gitterperiode eller effektiv brytningsindeks. Førstnevnte er tilfelle for strekk og sistnevnte for temperaturvariasjon.

Når strekk induseres i en FBG, er den relative endringen i Bragg bølgelengden uttrykt ved

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon \quad (\text{Formel 2-10})$$

Der ε representerer langsgående strekk på FBG og ρ_e er den effektive fotoelastiske konstanten til fiberkjernens materiale. Den relative endringen i Bragg bølgelengden grunnet temperaturendringer uttrykkes ved

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T \quad (\text{Formel 2-11})$$

Der ΔT er endringen i temperatur ved FBG lokasjon, α er den termiske ekspansjonskoeffisienten og ξ er den termo-optiske koeffisienten. Det effektive Bragg bølgelengdeskiftet grunnet strekk og temperatur, satt sammen av (*Formel 2-10* og (*Formel 2-11*), er uttrykt ved

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - \rho_e)\varepsilon \quad (\text{Formel 2-12})$$

Belastningsresponsen oppstår grunnet både den fysiske forlengelsen av sensoren (og medfølgende periode-endring) og endring i fiberindeksen grunnet fotoelastisk effekt. Den termiske responsen vil oppstå grunnet den iboende termiske ekspansjonen til fiber materialet og temperaturavhengigheten til brytningsindeksen.

For rene strekkmålinger må temperatureffekten på endringen av Bragg bølgelengden kompenseres for, mer om dette fremkommer i delkapittelet Temperaturkompensering.

2.7.2 Brillouinspredning

Innledende teori om Brillouinbaserte sensorsystemer er hentet fra (Ravet et al., 2009 ; Ukil et al., 2012) og (Nikles et al., 2004).

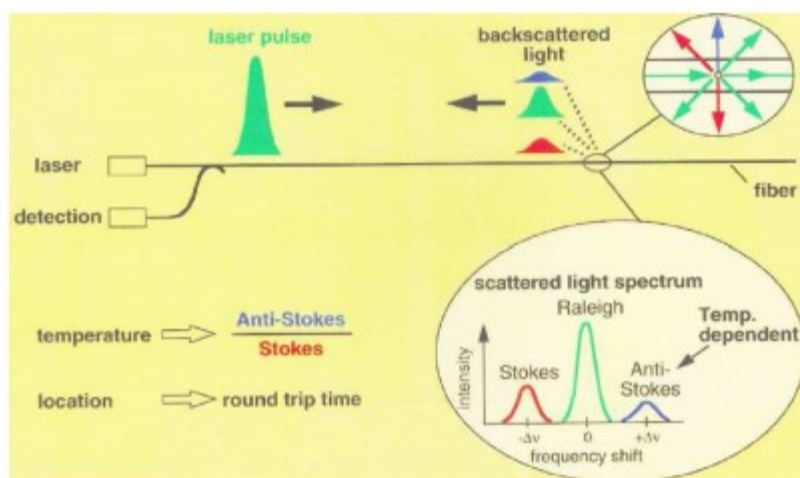
En distribuert sensor, konvensjonelt definert, er en enhet med basis i lineære målinger som er følsom for måleparametere ved et hvilket som helst punkt. Fiberoptiske distribuerte sensorer består av en eneste optisk fiber med iboende følsomhet langs hele lengden. Teknologien ble tatt i bruk over 20 år tilbake, og de hovedsakelige måleprinsippene baseres på deteksjon av tilbakespredning av lys ved bruk av (1) Rayleigh-, (2) Raman- og (3) Brillouin- prinsippene.

Tabell 2-1: Egenskaper ved Rayleigh-, Raman- og Brillouinspredning

Scattering	Rayleigh	Raman	Brillouin
Temp.sensitivity (%/°C)	0,54	0,8	0,01
Temp. range (°C)	5 to 110	0 to 70	-30 to 60
Accuracy (°C)	1	10	1
Spatial resolution (m)	1	3	3-5
Fiber length range (m)	170	1000	51000
Measurement time (s)	2,5	40	4
Strain (μm)	-	-	100

Brillouin-baserte systemer kan måle både strekk og temperatur, Ramanspredning er kun sensitiv ovenfor temperatur. Rayleighspredningen har samme bølgelengde som laser-kilden, og kan kun måle temperatur. Brillouinspredning vil videre regnes som den aktuelle

spredningen i sammenheng med overvåkning av strukturell integritet.



Figur 2-7: Rayleigh-, Raman- og Brillouinspredning. (Ukil et al., 2012)

Et optisk signal generert av en laser blir sendt inn i den optiske fiberen. Signalet interagerer med akustiske bølger i fiberen, og en spredning av lysbølger oppstår. En tilnærming til Brillouinspredningens effekt som sensor er å tolke det spredte lyset som et dynamisk gitter generert av de akustiske bølgene. En akustisk bølge er en trykkbølge som introduserer en modulasjon i brytningsindeksen grunnet den elasto-optiske effekten. Det spredte lyset opplever et dopplerskift fordi gitteret propagerer ved den akustiske hastigheten i fiberen.

Brillouin frekvensskiftet, f_b uttrykkes ved

$$f_b = \frac{2nv_a}{\lambda_L} \quad (\text{Formel 2-13})$$

Der n er fiberens brytningsindeks, v_a er den langsgående akustiske hastigheten for fibermaterialet og λ_L er bølgelengden til det optiske pumpesignalet.

Brillouin frekvensskiftet varierer lineært med temperatur og strekk, og er gitt ved

$$\Delta f_b = C_{v\varepsilon} \cdot \varepsilon_z + C_{vT} \cdot \Delta T \quad (\text{Formel 2-14})$$

hvor ε beskriver endring i strekk, ΔT beskriver endring i temperatur og $C_{v\varepsilon}$ og C_{vT} representerer strekk- og temperaturkoeffisientene. Metoden kan benyttes for målinger av både distribuert temperatur og strekk. De to koeffisientene vil senere bli benyttet for å separere de to effektene.

Stimulert Brillouinspredning (SBS) kan oppnås ved bruk av to optiske lysbølger. Motivasjonen for å benytte SBS er at denne metoden gir et sterkere optisk signal. I tillegg til det originale optiske pumpesignalet vil også en kontinuerlig lysbølge, kalt probesignal, sendes inn i fiberen. De to optiske signalene propagerer mot hverandre. Stimuleringen av Brillouinspredningen oppstår når resonansetilstandene er tilstede, dvs. når frekvensforskjellen for pumpe- og probesignal korresponderer til Brillouin frekvensskiftet. Resonansetilstandene avhenger direkte av temperatur og strekk, og bestemmelse av resonansfrekvensen gir et direkte mål på disse parameterne. Frekvensforskjellen mellom de to signalene kan scannes for nøyaktig og global kartlegging av Brillouin frekvensskiftet langs hele fiberen.

3 Søkemetodikk

Kartlegging og dokumentering av innhentet informasjon er en essensiell del av et litteraturstudium, og informasjon vedrørende kilder og søk i databaser fremkommer i dette kapitlet.

3.1 Litteratursøk

Den første fasen i litteraturstudiet ble utført ved søk i Google og Google Scholar for å finne generelle artikler om tilstandsovervåkning, i tillegg til nyheter og kommersielle teknologier.

Marintek-rapporten *Steel pipelines – state of the art for internal condition monitoring and inspection technologies* ble anbefalt og tilsendt av Roy Johnsen (NTNU) via e-mail.

Boken *Optical Networks* ble benyttet for grunnleggende teori om fiberoptikk.

Litteratursøk Tilstandsovervåkning; Materialtap

Dato	Søkeord	Søkefelt	Begrensninger	Database/kilde	Søkere sultat	Funnet	Valgkriterie	Forfatter	Publisert
24/4/13	ultrasonic thickness gauging accuracy	-	-	NDT net	39	Theory and Applications of Precision Ultrasonic Thickness Gaging	Presisjonsmåling	Fowler, K.A	1997
4/12/12	erosion corrosion AND monitoring AND subsea	Title	År: 2000-2013	Engineering Village	3	Challenges in the design of corrosion and erosion monitoring for deepwater subsea equipment - Stretching the limits of technology		Esaklul, K. A. and A. L. Ballard	2007
24/1/13	monitoring wall thickness AND pipeline AND subsea	Subject/Title/Abstract	År: 2000-2013	Engineering Village	6	-Wall thickness monitoring of new and existing subsea pipelines using ultrasound -ULTRAMONIT, a new concept for monitoring using ultrasonics	Informasjon og utprøving av ultralyd subsea	Baltzersen	2007
							-	Baltzersen	2004

Litteratursøk Tilstandsovervåkning; Fiberoptiske sensorer, strekkmåling

Dato	Søkeord	Søkefelt	Begrensninger	Database/kilde	Søkresultat	Funnet	Valgkriterier	Forfatter	Publisert
4/4/13	Optical fiber sensors AND review	Subject/Title/Abs tract	År: 2003-2013	Science Direct	65	-Review of the present status of optical fiber sensors -Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering	Beskrivende tittel	-Lee -Li	2003 2004
9/4/13	fiber optic sensors + subsea	-	-	Google		- Subsea Integrity Monitoring Using Fibre Optic Strain Sensors	Anvendelse	Damon Roberts	2007
3/5/13	Fabien Ravet	-	-	ResearchGate		Distributed Brillouin Sensor Application to Structural Failure Detection	Brillouin	Ravet, F	2011
15/5/13	OFS AND applications AND structural	Metadata Only	År: 2002-2013	IEEEExplore	8	Fibre Optic Sensors in Structural Health Monitoring	Oversikt, begrensninger og utsikter	López-Higuera	2011

Litteratursøk Tilstandsovervåkning; Subsea-skjøter, flenser

Dato	Søkeord	Søkefelt	Begrensninger	Database/kilde	Søkere sultat	Funnet	Valgkriterie	Forfatter	Publisert
17/1/1 3	Monitoring AND flange AND pressure	Metadata only	År: 2000-2013	IEEEExplore	2	-	-	-	-
17/1/1 3	Monitoring AND flange AND sensor	Metadata only	År: 2000-2013	IEEEExplore	13	-	-	-	-
23/1/1 3	Condition monitoring AND flange	Subject/Title/ Abstract	År: 2003-2013	ScienceDirect	3	-	-	-	-
23/1/1 3	Condition monitoring AND pipe joint	Subject/Title/ Abstract	År: 2003-2013	ScienceDirect	3	-	-	-	-

Litteratursøk Tilstandsovervåkning; Sprekkdannelse

Dato	Søkeord	Søkefelt	Begrensninger	Database	Søkresultat	Funnet	Valgkriterier	Forfatter	Publisert
1/2/13	pipeline AND integrity	Title	N/A	Science Direct	19	Review of pipeline integrity management practices	Informasjon om rør og sprekkdannelse	Kishawy and Gabbar	2000
24/1/13	monitoring AND subsea AND flange	Subject/Title/Abstract	År: 2000-2013	Engineering Village	3	Some applications of acoustic emission in particle science and technology	-	Mylvaganam, S	2003
4/2/13	acoustic AND emission AND pipeline	Metadatas only	N/A	IEEEExplore	23	Acoustic emission sound source localization for crack in the pipeline	Forklarer prinsipper for akustisk emisjon	Sun & Li	2010
3/2/13	pipe AND magnetoacoustic	Metadatas only	N/A	IEEEExplore	3	State-of-the-art Review of Technologies for Pipe Structural health monitoring	Oversikt	Liu, Z. and Y. Kleiner	2012

4 Resultater

I dette kapittelet presenteres en oversikt over tilgjengelige metoder egnet for tilstandsovervåkning av rørlinjer under vann. Oversikten inkluderer både modne og nyere teknologier og etterfølges av en evaluering av to valgte kommersielt tilgjengelige teknologier.

Teknologi	Subsea-modenhet	Installasjon	Måleparameter	Begrensninger
Korrosjonskupong	Moden	Påtrengende	Korrosivitet	Gir kun gjennomsnittlig korrosjon etter fjerning av kupong.
Elektrisk motstand	Moden	Påtrengende	Veggykkelse	Treg respons. Kan være temperatursensitiv.
Ultrasonisk tykkelsesmåling	Prototyper installert	Ikke påtrengende	Veggykkelse, sprekker og pitting. Sveiser, ukomplette skjøter.	Tidskrevende dersom alle punkter skal dekkes. Må bruke ROV for målinger. Små sveiser, tynne vegger og storkornede materialer kan være vanskelig å undersøke. Eventuelle belegg på rør må fjernes.
Fiberoptiske sensorer	Installert på stigerør, onshore rørlinjer	Ikke påtrengende	Strekk, Sprekkdannelse, overvåke slitasje, spenningsnivå.	Fiber av glass er fragilt og sprøtt, og forskjell i varmelengelse av fiber/stål vil være stor. Oppløsning må forbedres.
Ultrasonic guided wave	Prototype installert.	Ikke påtrengende	Uniform og lokalisert korrosjon. Sprekklokasjon	Signalpropagering kan være vanskelig for strukturer med varierende tverrsnitt. Sensorene er ikke veldig robust designet.
Akustisk emisjon	Skrevet om	Ikke påtrengende	Sprekker, sprekkvekst, sprekk-lokasjon, variasjon i mikrostruktur, plastisk deformasjon	Emnet må være i bruk/under spenning for å måles. Duktile materialer gir lav amplitude-emisjoner. Forstyrrelser må filtreres ut av inspeksjonssystemet.
Eddy current	Moden	Ikke påtrengende	Sprekk, defekt, sveise-defekt, porøsitet, veggykkelse. Skade under belegg.	Begrenset til elektrisk konduktive materialer. Lav penetrering i materialet. Geometri kan avgrense. Referansesetandarder kreves, noen kan være komplekse.
Elektrisk felt	Moden	Ikke påtrengende	Veggykkelse, uniform korrosjon	Skiller ikke mellom innvendige og utvendige defekter eller materialtap.

(Connor, 1987) (Valland. A, 2010)

4.1 Metoder for tilstandsovervåkning

Nyere utviklinger i elektro-, datasystem- og kommunikasjonsteknologi har muliggjort flere konsepter innenfor måling, inspeksjon og overvåkning. Hydrokarbonførende undervannsrørledninger i operasjon utsettes for korrosive og erosive påvirkninger. Tilstandene vil variere over tid, og en form for overvåkning eller kontroll er essensielt for å opprettholde et sikkert operasjonsnivå. Dette gjelder også for tretthetsakkumulering, sprekkdannelser i materialet og videreutvikling av oppståtte defekter.

Bruk av sensorer for kontinuerlig overvåkning er relevant for konseptet SHM (Structural Health Monitoring), som defineres som en prosess for å gjennomføre en skadeidentifikasjonsstrategi for varierte infrastrukturer. Ordet «helse» refererer til strukturens evne til å utføre sin tiltenkte funksjon i lys av den unngåelige aldring og skade-akkumuleringen som et resultat av de operasjonelle miljøene. SHM involverer observasjon av en struktur eller et mekanisk system over tid, med periodiske målinger, utvinning av skade-sensitive egenskaper fra disse målingene, og statistisk analyse av disse funksjonene for å bestemme den nåværende tilstanden til systemet (Liu & Kleiner, 2012).

Sensorsystem ved et undervannsanlegg kan plasseres på flere lokasjoner i produksjonstreet, manifolder og strømningslinjer. Ulike transduserer og sensorer som benyttes ved undervannsproduksjonssystemer inkluderer (Bai & Bai, 2010):

- Trykk-transduser
- Temperatur-transduser
- Kombinert trykk – og temperatur-transduser
- Ventilposisjons-transduser
- Trykk- og temperatur-transduser plassert i brønn
- Sand-detektor
- Erosjonsdetektor
- Pig-detektor

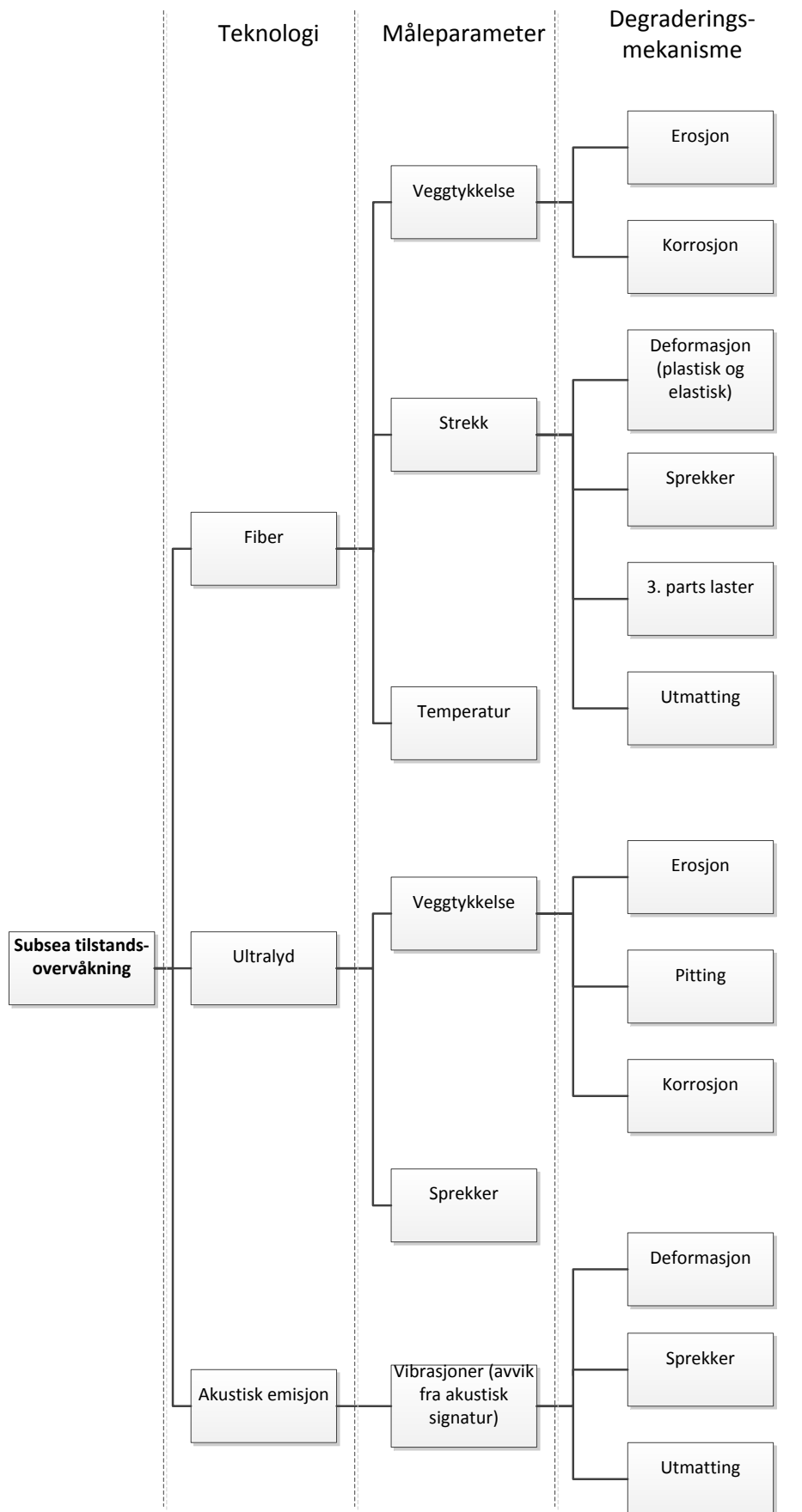
Wilson (2002) kategoriserer metoder for tilstandsovervåkning i 3 klasser; inspeksjon, tilstandssjekk eller trendbaserte aktiviteter. Inspeksjon er en kvalitativ sjekk ved bruk av menneskelige sanser (berøring, syn, lukt og hørsel) utført direkte eller ved hjelp av enkle verktøy eller måleinstrumenter. En inspeksjon av denne art utført under vann vil kreve tilgang til ROV eller permanent installerte kameraer. Tilstandssjekk er kvantitative målinger laget for

sammenligning med forutbestemte kontrollgrenser. Trendovervåkning er målinger foretatt og plottet inn med hensikt å kunne detektere avvik fra normen, og for å vurdere frekvensen av forverring for prognoseformål. Denne klassen av tilstandsovervåkning har hatt stor innvirkning på anvendelsen av tilstandsbasert vedlikehold. Wilson (2002) deler metoder for tilstandsovervåkning inn i følgende kategorier:

- Menneskelige sanser
- Optisk overvåkning
- Termisk overvåkning
- Vibrasjonsovervåkning
- Smøreovervåkning
- Korrosjonsovervåkning
- Motorstrømovervåkning
- Ytelsesovervåkning

I tabellen på neste side presenteres relevante overvåkningsmetoder til bruk under vann, både for måling av materialtap og sprekker. En grundigere oversikt over tilgjengelige kommersielle teknologier for tilstandsovervåkning av undervannsrør- og installasjoner er presentert i forprosjektet *Subsea Tilstandsovervåkning*. (Moe, 2012)

Figur 4-1 illustrerer tema og inndeling for temaer i kapittel 4. De tre teknologiene for fokus er henholdsvis akustisk emisjon, ultrasonisk tykkelsesmåling og fiberoptiske sensorer. Fiberoptiske sensorer er viet mest oppmerksomhet da dette er en nyere teknologi.



Figur 4-1: Oversikt over målemetoder presentert i kapittel 4.

4.2 Aktuelle metoder for måling av materialtap

Vurdert ut i fra behov, måleparametere og miljø vurderes følgende metoder som aktuelle til bruk for overvåkning av materialtap ved rørlinjer i et undervannsproduksjonssystem.

4.2.1 Ultrasonisk tykkelsesmåling (UT)

Ultrasonisk tykkelsesmåling er en NDT-metode som måler lokal tykkelse for en rørvegg ved å sende lydbølger gjennom strukturen. Bølgen genereres i dette tilfellet av et piezoelektrisk element. Sensorklemmene kan anordnes i samlinger aksialt eller rundt omkretsen av røret for å detektere lokal korrosjon i metallet.

Måleprinsipp

Ultral lyd kan genereres på flere måter, og den mest vanlige er ved bruk av piezoelektrisitet. Piezoelektrisitet, også kalt trykkelektrisitet, er den elektriske ladningen som akkumuleres i enkelte solide materialer som krystaller, enkelte keramer, ben og enkelte proteiner, som respons til en påført mekanisk spenning. En annen metode for generering av ultralyd er ved en Elektromagnetisk akustisk transduser (EMAT).

Ultrasoniske vibrasjoner har to grunnleggende kjennetegn;

1. De blir reflektert av diskontinuiteter som forekommer i mediet som de reiser i.
2. De har en tendens til å reise i rette linjer grunnet den korte bølgelengden.

Metoder for utføring av ultrasoniske målinger for tykkelse kan klassifiseres ifølge transduser-type. Metodene kan også klassifiseres i henhold til hvilke ekkoer som benyttes for å bestemme den ultrasoniske pulsens propageringstid gjennom emnet. Ved klassifisering i henhold til transdusertype finnes 3 enkle klasser for tykkelsesmåling (Fowler, 1996):

Tabell 4-1: Transdusertype og målenøyaktighet

Transdusertype	Beskrivelse	Rekkevidde for målinger (stål)	Nøyaktighet
(1) Direkte kontakt	Målinger utføres mellom en eksitasjonspuls og det første bakvegg-ekkoet fra emnet, ved direkte kontakt-transdusere. Er foretrukket metoden med mindre forholdene for (2) og (3) finner sted.	0,3mm til 2.5m	$\pm 0,01$ mm
(2) <i>Delay Line</i>	Målinger utføres mellom interfase-ekko (nærmeste overflate på emnet) og det første bakvegg-ekkoet. Transdusertypen benyttes ofte ved målinger ved skarpe, konkave eller konvekse radier, trange lokasjoner, for direkte overvåkning av bevegende materialer og for høytemperaturmålinger.	0,5mm til 10cm	± 0.002 mm
(3) <i>Immersion</i>	Målinger utføres mellom to påfølgende bakvegg-ekkoer. Transdusertypen kan kun benyttes når to rene bakvegg-ekkoer er tilstede, noe som begrenser bruk til materialer av relativt lav demping og høy akustisk impedanse. Dette inkluderer materialer som glass og keramer. Tilbyr høyeste nøyaktighet og minste mulige måletykkelse.	0,1mm til 4cm	$\pm 0,002$ mm

De mest benyttede ultrasoniske NDT-metodene kan klassifiseres i tre kategorier (Ensminger, 1988): (1) Pulsmetoder, (2) Resonansemetoder og (3) Akustisk emisjon. Pulsmetodene, nærmere bestemt pulsekko-metoden, er den dominerende metoden til bruk i dag og vil være videre fokus for ultrasonisk tykkelsesmåling i denne oppgaven. Akustisk emisjon vil beskrives i kapittel 4.3.1, som en passiv målemetode for kontinuerlig overvåkning av sprekkdannelse og defekter på undervannsrørledninger.

Bølger av ulike typer benyttes for de ultrasoniske metodene, inkludert langsgående -, transversale -, Rayleigh- og Lamb-bølger. Rayleigh bølger er akustiske bølger som propagerer i nærheten av overflaten i solide materialer. Rayleigh bølger inkluderer både langsgående og transversale bevegelser og reduseres eksponentialt i amplitude med økende avstand fra

overflaten. Lamb bølger er elastiske bølger hvis partikkelbevegelse ligger i planet som følger retningen til bølgens propagering.

Ultrasoniske pulser kan penetrere store dybder, opptil flere meter kan penetreres i lavkarbonstål og aluminium. Pulsmetodene kan videre deles inn i tre kategorier; (1) Pulsekko, (2) Pitch-fangst og (3) Overføring.

Pulsekko-metoden

Pulsekko-metoden er den dominerende ultralydmetoden benyttet for overvåkning og inspeksjon av stålstrukturer, inkludert rørlinjer.

En transduser i form av et piezoelektrisk element genererer en kort lydimpuls som forplanter seg som en bølgefront innover i materialet. Der bølgefronten treffer en grenseflate mellom to ulike medier, vil deler av effekten i bølgen bli reflektert. Det reflekterte signalet blir fanget opp av en detektor. I mange tilfeller er detektoren transduseren, og lydsignalet blir vist på en tidsakse på et oscilloskop. Et oscilloskop er et instrument som viser et tidsvarierende signal. Tiden fra pulsen sendes til signalet returnerer, et ekko, er proporsjonal med avstanden til reflektoren. Dette ekkoet er relativt svakt fordi reflektoren er liten i størrelse og i tillegg uregelmessig i form. Lyden vil derfor reflekteres i mange retninger, og bare litt av signalet når tilbake til detektoren. Fra bakveggen kommer tilsvarende et kraftigere ekko. Lydfrekvensen er av typisk størrelsesorden 10^6 Hz og hastigheten for den vanligste bølgetypen i stål er ca. 5900-6000 m/s (Connor, 1987).

Ved å multiplisere denne tiden med lyd hastigheten i materialet får vi følgende uttrykk for tykkelsen, d :

$$d = \frac{v \cdot t_g}{2} \quad (\text{Formel 4-1})$$

t_{tot} er tiden fra lydimpulsen generert av transduseren propagerer gjennom veggtykkelsen, reflekteret fra baksiden, og returnere til transduseren. t_g finnes ved å trekke fra forsinkelser i elektronikk og mekaniske koblinger, og er den reelle tiden. v er P-bølgehastigheten i materialet, ca. 5900-6000 m/s for karbonstål. I de fleste applikasjoner utgjør denne tiden bare noen få mikrosekunder eller mindre, og den målte tiden divideres på 2 for å redegjøre for hvor lang tid lyden bruker en vei. Det antas at det benyttes direkte-kontakt transdusere i dette tilfellet (Valland. A, 2010).

De akustiske tilstandene ved en struktur kan virke inn på nøyaktigheten ved ultrasoniske tykkelsesmålingene. «Gode» akustiske tilstander innebærer plane overflater, homogene materialer og store dimensjoner sammenlignet med den akustiske bølgelengden (Baltzersen et al., 2004).

4.3 Aktuelle metoder for overvåking av sprekkdannelse

Teknologiene akustisk emisjon og fiberoptiske sensorer vurderes som aktuelle for overvåking av sprekkdannelse og sprekkvekst ved undervannsrørledning.

4.3.1 Akustisk emisjon (AE)

Akustisk emisjon er en såkalt passiv akustisk målemetode, og for denne metoden benyttes kun mottakende transdusere som er ment for å detektere korte utbrudd av elastisk bølgeenergi som avgis ved sprekkdannelser, sprekkvekst eller annen svikt. Teori for denne målemetoden er hovedsakelig hentet fra (Sun & Li, 2010) og (Mylvaganam, 2003).

Akustisk emisjonstesting består av deteksjon av akustiske signaler produsert ved belastning eller termiske spenninger i materialer. AE-signaler produseres ved en rekke hendelser, inkludert plastisk deformasjon, smelting, friksjon, solidifisering, solid-fase transformasjon og sprekkdannelser. Disse signalene er tilstedeværende i et vidt frekvensspekter sammen med støy fra omgivelsene. Transduseren plasseres strategisk på røret, og aktiveres av innkommende akustiske signaler. Utstyr som kreves for denne målemetoden inkluderer sensorer, elektroniske instrumenter og optaksenheter (Connor, 1987).

Ifølge Roberts & Talebzadeh (2003) har akustisk emisjonsovervåking i løpet av de siste 20 årene utvikles til en effektiv NDT for deteksjon, lokasjon og overvåking av utmattingsprekker i en rekke metallstrukturer, blant annet stålbroer, rørledninger og trykkammer. Akustisk emisjons-testing er en av de viktigste NDT-metodene som brukes ved trykktesting, diagnostikk, statusovervåking og lekkasjedeteksjon.

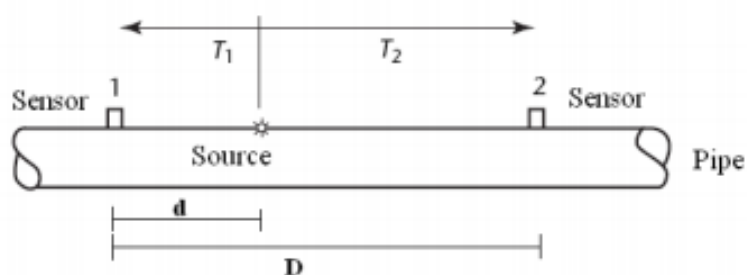
Generering av støy og vibrasjoner i en rørledning involverer en rekke hendelser; forstyrrelse av strømninger, generering av indre hydrodynamiske eller akustiske trykkvariasjoner (eller begge deler), spenninger utløst av vibrasjoner i rørveggen grunnet det varierende indre trykket, og til slutt generering av utvendig støy grunnet vibrasjoner i rørveggen. Når strømningen i rørledningen forstyrres grunnet diskontinuiteter som bend, en ventil, et kryss, en åpning eller en annen form for hindring, vil det statistisk uniforme fluktuerende indre trykket, samt resulterende støy og vibrasjonsrespons endres.

Måleprinsipp

Støy og vibrasjonssignaler fra utstyr kan inneholde vital informasjon om utstyrets tilstand. Prinsippet bak akustisk overvåkning av utstyr baseres ifølge Lurton (2002) på at utstyr i sin opprinnelige tilstand har karakteristisk støy- og vibrasjonsfrekvens. En maskin eller en type utstyr svikter ikke uten å gi fra seg varsel i form av økning i vibrasjon eller endringer i støymønsteret.

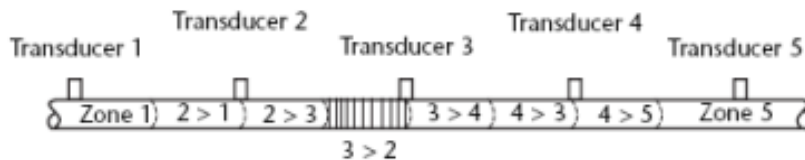
Når en liten sprekk eller etssegrop oppstår i et stålrør under trykk, genereres spenningsbølger med signifikant informasjon fra den akustiske kilden. De følsomme AE-sensorene kan detektere signaler på et tidlig stadium ved initiering av tretthetsbrudd, for eksempel ved forvridninger og skliende formasjoner. Signifikant informasjon som kan innhentes inkluderer sprekkdimensjoner og lokasjon for den aktuelle defekten. Spenningsbølgene utarter langs rørets lengde og fanges opp av akustiske emisjons-transdusere, og blir deretter analysert og prosessert av datamaskiner for å bestemme defektens lokasjon. I tillegg kan type, stadium og kritikalitet for defekten bestemmes (Huang et al., 1998).

En rørlinje er illustrert på *Figur 4-2*. To transdusere, 1 og 2 er montert langs rørlengden. Det antas at en (akustisk) hendelse inntreffer ved et punkt langs røret. Resulterende spenningsbølger propagerer i begge retninger ved identisk og konstant hastighet. Dersom hendelsen oppfattes av transduser 1 før den treffer transduser 2, kan det konkluderes at hendelsen inntraff mellom transduser 1 og transduser 2, nærmest transduser 1. Dersom kilden er usikker, kan flere jevnt fordelte transdusere benyttes for å lokalisere kilden/defekten. Dette kalles sonelokalisering.



Figur 4-2: Treff-sekvens for signalene eller påløpt tid av signal fra hendelse til sensor benyttes for å estimere avstand til sprekk. (Sun & Li, 2010)

Ved rørlinjen i *Figur 4-3* anvendes sonelokasjon, og det kan tenkes at følgende situasjon finner sted; Transduser 3 registrerer et akustisk signal, deretter detekterer transduser 2 signalet. Den akustiske kilden ligger mellom transduser 2 og 3. Defektområdet er definert, og en lineær lydlokalisering metode kan benyttes for å lokalisere defekten. Ved denne tilnærmelsen benyttes treff-sekvens for å bestemme lokasjon, og for en mer presis defektlokasjon kan tidsforskjellen mellom treffene analyseres.



Figur 4-3: Sonelokalisering. (Sun & Li, 2010)

Tidsforskjellen mellom treffene er lik tiden det tar å krysse avstanden mellom paret, uttrykt ved:

$$\nabla t = \frac{D}{v} \quad (\text{Formel 4-2})$$

Der D er avstand (m) mellom transduserne, v er den konstante bølgehastigheten (m/s) og Δt er forskjell i (s) ankomsttid for signalene, gitt ved:

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (\text{Formel 4-3})$$

Der t_1 og t_2 er tiden da lydsignalene ankommer transduserne. Generell formel for kildens lokasjon er gitt ved:

$$x = \frac{1}{2}(D - \Delta t \cdot v) \quad (\text{Formel 4-4})$$

Der x måles fra transduseren som ble truffet først.

Transdusere for AE-testing benytter ofte piezoelektriske sensorer som elektromekanisk konversjonsenhet. Elementet består vanligvis av et keram, og er koblet til overflaten av røret slik at den dynamiske bevegelsen bres inn til det piezoelektriske elementet. De mekaniske vibrasjonene oversettes videre til elektriske signaler.

Flere karakteristikk for aktuelle sensorer må vurderes, blant annet frekvensrespons, sensitivitet, koblinger til prosessen, temperatur og størrelse. Temperaturen reguleres av «Curie»-temperaturen til den piezoelektriske krystallen. Curie-temperaturen kan ses på som «smeltetemperaturen» til de piezoelektriske egenskapene, da materialet ikke tåler polarisering ved temperaturer som overstiger Curie-temperaturen. Denne temperaturen bør ifølge www.piezotechnologies.com² ikke overstige halvparten av Curie-temperaturen til det piezoelektriske elementet.

4.3.2 Fiberoptiske sensorer (FOS)

Under et medlemsmøte i NPF den 19. september 2012 holdt Bjørn Kåre Viken, tidligere direktør på Mongstad, nå Statoils nye landsjef i Algerie, et innlegg om undervannskompresjon og veien frem mot en komplett undervannsfabrikk i 2020. På spørsmål om hvordan Statoil planlegger å overvåke undervannsfabrikkene hadde Viken følgende svar; «Det finnes jo så mye lovende innenfor fiberoptikk!».

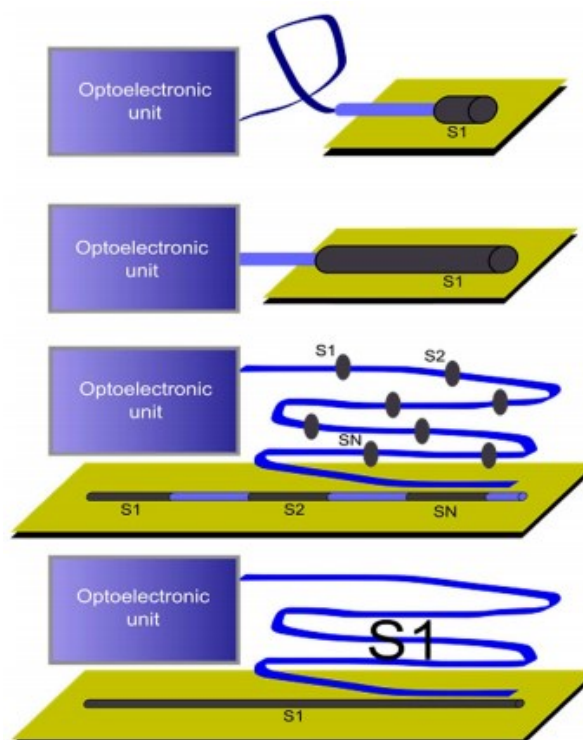
Opprinnelig ble fiberoptiske sensorer utviklet for å erstatte konvensjonelle elektromekaniske sensorsystemer i industrien. Fordeler for fiberoptiske sensorer inkluderer blant annet immunitet mot elektromagnetisk interferens, lett vekt, liten størrelse og høy følsomhet.

FOS kan klassifiseres i 4 grupper som illustreres ved *Figur 4-4* (López-Higuera et al., 2011):

- 1) *Punktsensor*. Målinger utføres ved et diskret punkt, tilgjengelig fra flere kanaler. Hver sensor måler ved et enkelt punkt på strukturen.
- 2) *Integrert sensor*. Målinger er integrert fra alle verdier av objektvariabler, som bidrar til en resulterende verdi.
- 3) *Kvasidistribuerte sensorer* har kapasitet til å måle verdier for variabelens tilstand ved diskrete punkt langs en optisk kanal.

² URL: <http://www.piezotechnologies.com/Resources/White-Papers/Usage-Temperatures-of-Piezoceramic-Materials.aspx> Online 2/6/13

- 4) *Distribuerte sensorer* kan måle verdier for variabelens tilstand langs hele fiberens lengde. Hvert eneste punkt langs den optiske fiberen er følsomt.

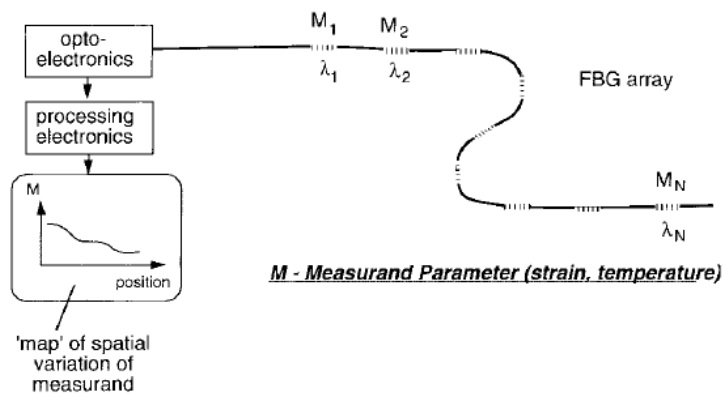


Figur 4-4: Punktsensor, integrert sensor, kvasidistribuerte sensorer og distribuerte sensorer. (López-Higuera et al., 2011)

FOS kan måle strukturell forskyvning/deformasjon, strekk, trykk, vibrasjon, akustisk emisjon og temperatur ved rørlinjer (Kersey et al., 1997). Til tross for disse fordelene har de fiberoptiske sensorene enda ikke opplevd stor kommersiell suksess, og teknologien var lenge laboratorie-basert og ved prototype-stadiet. Fiberoptiske sensorer tilbyr nye og ønskede egenskaper, som kvasidistribuert og distribuert sansing. Disse sensorene har noe fordeler fremfor de konvensjonelle sensorene som er tilgjengelig på markedet i dag. FBG-sensorer og Brillouin-sensorer er eksempel på slike sensorer.

FBG-sensorer

FBG-sensorer kan integreres i, eller festes til en struktur. En tilleggsegenskap ved disse systemene er at fibrene fungerer som både sensorelementer og signaloverførere. I følge Li et al. (2004) har sensorene god vann- og korrosjonsmotstand samt en potensiell rimelig pris per kanal.



Figur 4-5: FBG-sensorer er kvasidistribuerte, dette innebærer diskrete sansende punkt langs fiberen. (Kersey et al., 1997)

Måleprinsipp

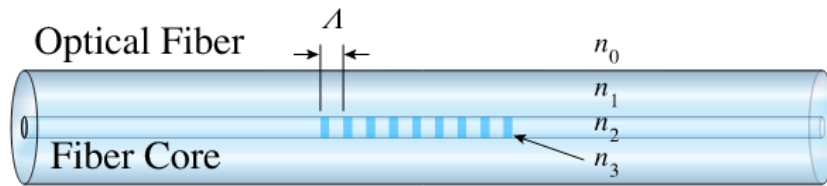
Ved utnyttelse av et optisk gitter i en fiber sendes en lysbølge inn i den optiske fiberen, og gittersegmentet reflekterer bestemte bølgelengder av lyset og lar alle andre bølgelengder passere.

Et Bragg gitter innskrevet i en fiber omgjør dette spesifikke området til en punktsensor der hvilken som helst effekt som forårsaker en forandring i lengden av fibergitteret, detekteres. Når fibrene beveger/trekker seg grunnet belastning, vil høyden av striper i gitteret øke, og den reflekterte bølgelengden vil dermed også øke.

Bragg bølgelengden uttrykkes ved (som vist i kapittel 2.7.1):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (\text{Formel 4-5})$$

Lokale temperatur- eller strekkforandringer påvirker brytningsindeksen, n_{eff} , og gitterperioden, Λ , som fører til en endring i bølgelengden (Li et al., 2004).



Figur 4-6: Lokal temperaturendring påvirker brytningsindeksen n , og lokal strekk påvirker gitterets periode, Λ . (Li et al., 2004)

Endringer i bølgelengde av det returnerte Bragg-signalet inneholder informasjon om endringer i strekk og/eller temperatur. En stor fordel ved fiberoptiske sensorer er muligheten for plassering av flere optiske sensorer langs samme fiber, dette omtales som multiplexing. Ved multiplexing av sensorer på denne måten kan over 100 sensorer overvåkes via ett instrument med kun en kobling mellom den langstrakte fiberen og selve instrumentet (Ramaswami et al., 2009).

Leserenheten, det lyttende instrumentet, trekker ut målt informasjon for parameterne fra lyssignalene som kommer fra sensorene. Parameterne er vanligvis kodet i form av en Bragg bølgelengde-endring, og leserenheten leser denne bølgelengde-endringen $\Delta\lambda$ og gir målestørrelser ut ifra mottatt informasjon.

Lee (2003) deler leserenheter for FBG-sensorer inn to kategorier; TDM (time division multiplexing) og WDM (wavelength division multiplexing). TDM skiller mellom de ulike sensorene langs fiberen ved å ta hensyn til tiden det kreves for en lysbølge å returnere til deteksjonssystemet. Den mest benyttede type leserenhet er WDM. Disse systemene skiller de ulike sensorene ved hjelp av bølgelengde. Flere sensorer (sentrum av sensoren) kan ha nominelle bølgelengder separert med et par nanometer, og hver sensor spores simultant da sensorens senters bølgelengde endres grunnet endringer som strekk, temperatur og trykk.

Lokal skade på en struktur vil vanligvis opptre i form av sprekker, slitasje, forskyvninger eller lokal oppløsning av materialet. Belastning er en alternativ parameter som kan benyttes for å beskrive deformasjon, studere sprekkeåpninger og detektere forskyvninger og lokal oppløsning i materialet. Høykvalitets belastnings-sensorer har lenge vært etterspurt, og et fokus for utvikling innen overvåkingsteknologi. Ved store og komplekse utbygginger der lang levetid

er et krav for sensorer og overvåkningsutstyr, vil holdbare og pålitelige sensorer være grunnlaget for et suksessfullt SHM-system.

Ved applikasjon av FBG som sensor må temperatur- og strekkeffektene adskilles, mer om dette fremkommer i delkapittelet .

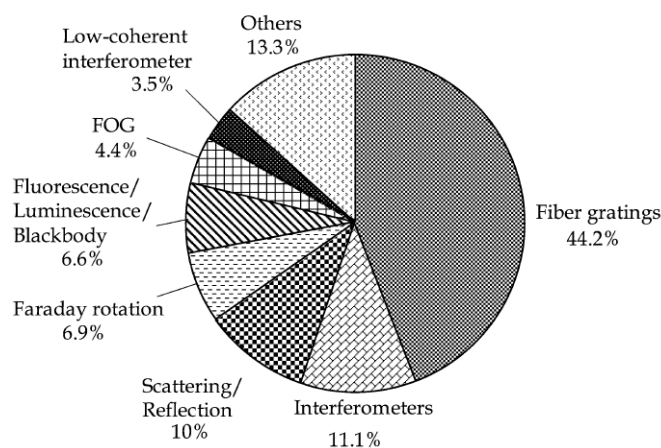
Applikasjon av fiberoptiske sensorer på rørlinje.

FBG-sensorer er installert for overvåking av strukturell integritet i broer, dammer, miner, komposittlaminater, fly, generatorer, skip og olje/gass-brønner. Andre felt der FBG-sensorer brukes inkluderer geoteknisk kartlegging og overvåkning av belastning i jernbanesystemer (Lee, 2003).

Det norske forsvaret benyttet FBG-sensorer ved overvåkning av belastninger på et skipsskrog, nærmere bestemt KNM Skjold i forkant av avfyringstester. 12 FBG-sensorer ble installert for å overvåke belastningene ved rotasjon av masten, samt belastningen på et våpenfundament under og i etterkant av avfyring (FARSUND Ø, 2000).

Figur 4-7 viser distribusjonen av emner for artikler presentert ved «15th Optical Fiber Sensors Conference» i mai 2002. Fiber gitter-sensorer er det mest diskuterte temaet innenfor fiberoptiske sensorer, med en andel på 44,2 % (Lee, 2003).

Statistikken gir en god oversikt over trendene for forskning innenfor området fiberoptiske sensorer i 2002, og dette er en bekreftelse og indikasjon på FBG-sensorers potensiale og utsikter fremover. Annen statistikk fra konferansen viser til antall artikler sortert etter måleparameter, og strekk og temperatur er de mest diskuterte måleparameterne innenfor området fiberoptiske sensorer.



Figur 4-7: Statistikken fra OFS-15 viser hvilke områder som er i fokus innenfor området fiberoptiske sensorer. (Lee, 2003)

Brillouin-spredning

Brillouin-baserte sensorer opererer med singelmodus optiske fibre, og grunnet lave optiske tap ved denne typen fiber kan målinger over flere titalls kilometer utføres. Dette gjør Brillouinbaserte sensorsystem svært aktuelle og attraktive for overvåkning av rørlinjer. En distribuert fiberoptisk sensor er en enhet med basis i lineære målinger som er følsom for måleparametere ved et hvilket som helst punkt langs fiberen.

Brillouin-baserte målemetoder har hittil ifølge Inaudi & Glisic (2010) blitt benyttet for å detektere lokal bevegelse i grunnen, rørlinje-strekk, naturkatastrofer (geologisk), permafrost og tredjeparts-forstyrrelser. Brillouin-prinsippet tillater kontinuerlig overvåkning av både strekk, trykk og temperatur.

Måleprinsipp

Distribuert informasjon for Brillouinbaserte sensorer oppnås ved anvendelse av stimulert Brillouinspredning (SBS) (Ravet et al., 2009). Et pumpet optisk lasersignal sendes inn i fiberen. I tillegg til dette optiske pumpesignalet sendes også en kontinuerlig lysbølge, kalt probesignalet (CW), inn i fiberen i motsatt retning. Interaksjonen mellom disse signalene fører til en kobling, og når sitt maksimum når frekvensforskjellen mellom de to lysbølgene er lik den akustiske modusfrekvensen for fiberen, også kjent som resonansfrekvensen. Denne resonansetilstanden er strekk- og temperaturavhengig, og bestemmelse av resonansfrekvensen gir et mål på disse parameterne.



Figur 4-8: Probesignal og pumpesignal propagerer mot hverandre.
(Ravet et al., 2009)

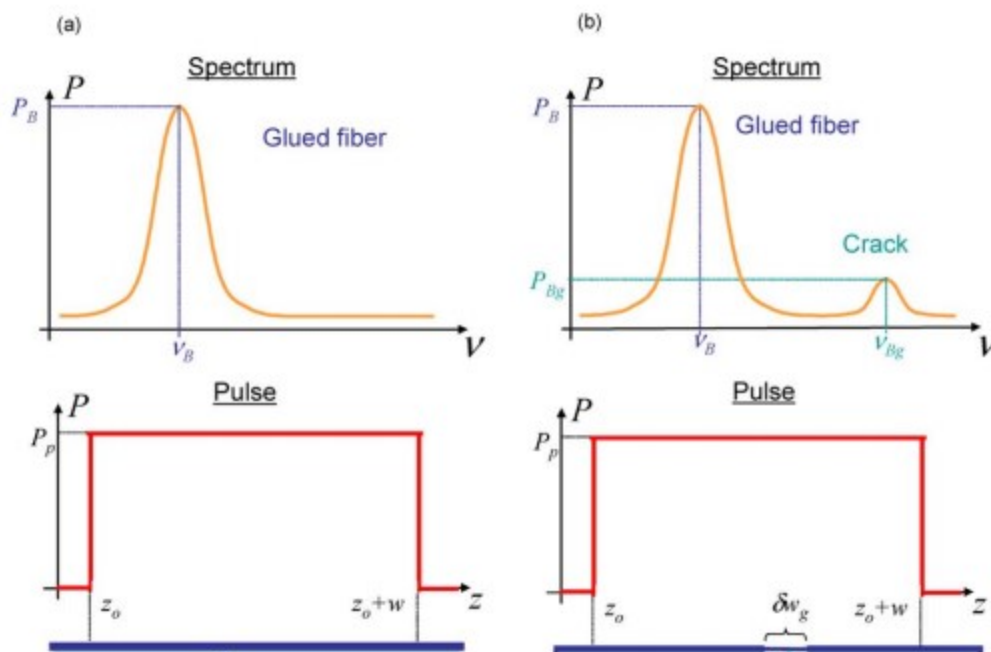
Interaksjonen for probesignal med pumpesignal registreres som en funksjon av tid, og denne tidsinformasjonen kan konverteres til avstand. Ved hjelp av temperaturkompensering vil også rene strekkmålinger kunne leses ut.

Ravet (2011) nevner følgende fordeler for Brillouin-baserte måleteknikker fremfor andre distribuerte sensorteknikker (Raman, Rayleigh):

- Teknikken benytter singel modus-fiber med lave tap som muliggjør målinger over titalls kilometer, samt kompatibilitet med andre telekommunikasjonsenheter.
- Teknikken er frekvensbasert, i motsetning til Raman-spredning som er intensitetsbasert. Brillouin-baserte teknikker er iboende mer nøyaktige og stabile på lang sikt, da frekvensbaserte teknikker har en høyere følsomhet for skift. Nøyaktige, stabile sensorer er essensielt, spesielt ved installasjon på utilgjengelige lokasjoner langs rørlinjen.
- Brillouin-spredningen kan stimuleres optisk, noe som fører til høyere intensitet ved spredningsmekanismen samt økt signal/støy-forhold.
- Stimuleringsmekanismen involverer to motsatt propagerende lysbølger som kan kontrolleres individuelt, dette medfører en verdifull måte å justere måleparameterne med hensyn på bruksområde i forhold til oppløsning, avstand og måletid.

Sprekkdeteksjon

Ved sprekkdeteksjon kan flere problemer identifiseres; for det første har slike defekter svært liten vidde, δw_c , normalt sett $\delta w_c < 1$ mm. Dette medfører at en liten mengde strekk induseres og kan føre til at fibersensoren går i stykker (Ravet et al., 2009). Dersom fibersensoren skulle overleve, vil toppen, *peak*, som oppstår, vist på *Figur 4-9*, begravnes i støyen av målingen da spektrumet av toppkrefter er omtrent proporsjonal med lengden av hendelsene. En effektiv måte å detektere en sprekk medfører overførsel av belastningen til en lenger seksjon av sensoren, definert som den delaminerte lengden, δw_g , slik at risiko for skade på sensor minker samtidig som høyden av toppen er høy nok til å kunne detekteres.



Figur 4-9: (a) Fiberoptisk sensor er festet på overflaten av substrat. Et pumpesignal ved topp-kraft, P_p og romlig oppløsning w propagerer langs sensoren og kommuniserer med CW-proben. Interaksjonen resulterer i Brillouin-spektrumet karakteristisk for en ustrukket fiber. (b) Sprekk oppstår og delaminerer sensorene over en lengde på δw_g , sprekkenes størrelse ved overflaten er $\delta w_c < \delta w_g$. Ved sprekkenes lokasjon, vil pumpe-probe interaksjon føre til målinger av et nytt spektrum som opplever en ekstra topp, som er signaturen til feilformasjonen.

En liten belastning medfører risiko for at sprekkinformasjonen kan «gjemme seg» i hovedtoppen, noe som videre vanskeliggjør deteksjon av den aktuelle defekten. Det finnes også en øvre grense for den delaminerte lengden, δw_g . Denne lengden bør være så kort som mulig slik at deformasjonsovervåking og sprekke-deteksjons-evner ellers i strukturen ikke trues. I tillegg eksisterer behovet for en estimering av en optimal delamineringslengde, δw_g .

Applikasjon av fiberoptiske sensorer på rørlinje

Optiske fibre har evnen til å detektere et vidt spekter av fysiske, kjemiske og mekaniske parametere. De relevante parametere for overvåking av rørlinjer inkluderer strekk, vibrasjon, akustisk emisjon, trykk og temperatur. Fiberoptiske sensorer benyttes også til lekkasjeovervåking ved rørlinjer.

Innenfor olje- og gass sektoren har FBG-sensorer til nå blitt mest benyttet til overvåking av olje- og gass reservoar. Ifølge López-Higuera (2011) har målinger utført med disse sensorene

vist høy grad av nøyaktighet og stabil drift. Overvåkning av brønner baseres på bruk av to FBG-sensorer; en for å konvertere trykk til strekk, og en annen, løs og ustrukket, for kompensering og temperaturmåling.

Distribuerte FOS basert på Brillouinspredning benyttes ifølge López-Higuera (2011) i størst grad for overvåkning av forlengede strukturer, som rørledninger; lekkasje, sviktdeteksjon, oljeproduksjon, verifikasjon av operasjonelle parametere og overvåkning av brønner. Brillouin-sensorsystemer er installert på fleksible stigerør og oppvarmede rør (*heat trace cables*). Ved disse applikasjonene er sensorene integrert inn ved fabrikkasjonsprosessen og installert i armeringer og isolasjon.

Et optisk sensorsystem utviklet for å overvåke knekking, *buckling*, i rørledninger planlegges installert utenfor kysten av Vest-Afrika³. Systemet skal kontinuerlig overvåke formen på regionene utsatt for *buckling* langs rørledninger og videre beregne akkumulert utmattelse og gjenstående levetid.

Tilstandsovervåkning av strømningssystemer ved FOS byr på utfordringer relatert til integrasjon, da fibre monteres direkte på røret. En forutsetning for suksessfull integrasjon vil være et tett samarbeid mellom kunde og strukturprodusent. Utfordringer ved installasjon av FOS på en undervannsrørledning inkluderer nøyaktighet, temperaturkompensering, innpakning og vedlikehold.

Temperaturkompensering

Kryss-sensitivitet for parameterne strekk og temperatur vil inntreffe for de fleste opererende FOS. Både strekk og temperatur fremkaller reflekterte bølgelengde-endringer, derfor må bidragene til de to separeres for å oppnå nøyaktige målinger for hver parameter (Ravet, 2011).

For rene belastningsmålinger, som er aktuelt i dette tilfellet, må effekten av temperaturendringer på den reflekterte bølgelengden kompenseres for. Uten temperaturkompensering kan en typisk 0,5 °C økning i temperatur føre til feil i bølgelengdemålingene på opp til 5 %.

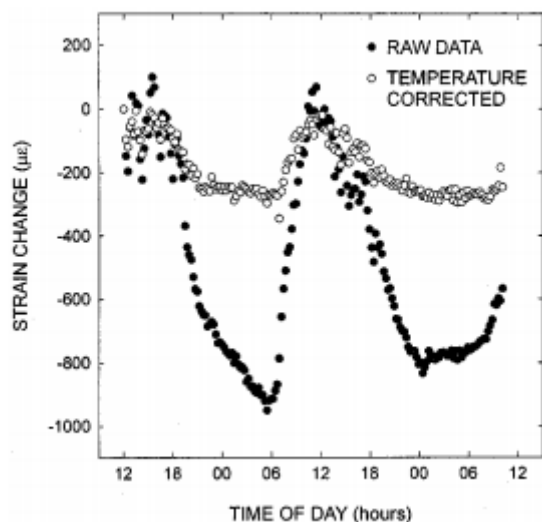
Flere teknikker er utviklet for å oppnå denne temperaturkompenseringen for FOS. Adskillelse av temperatur- og strekkeffektene kan gjennomføres ved å installere flere optiske fibre langs et rør. I en løs «tube» som ikke er festet til strukturen er fiberen garantert å forbli ustrukket,

³ URL: <http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-67/issue-7/subsea/using-optical-fibers-for-integrity-monitoring-of-subsea-structures.html>. Online 14/2/13.

og er derfor kun følsom ovenfor temperatur. For strekkmålingene benyttes den parallelle stramme kabelen montert på strukturen, slik at fiberen kan utsettes for strekk. Eventuelle mekaniske endringer i strukturen vil da kun påvirke denne kabelen, og den temperaturfølede fiberen forblir spenningsfri. Temperaturbidraget kan trekkes fra målingene fra strekk-kablene, og strekk-parameteren er isolert. Denne tilnærmingen har ført til utviklingen av kabler spesielt utviklet for å måle strekk eller temperatur.

Ifølge Kersey (1997) tilbyr denne teknikken noe kompensering, men et system med evne til å utføre strekk- og temperaturmålinger fra en og samme fiber uten denne strekk-isolerte fiberen vil være ønskelig for fremtidige løsninger. Mer om disse strekk-målende kablene fremkommer i delkapittelet

Omnisens DiTeSt.



Figur 4-10: Figuren illustrerer måling av strekkforandring ved en stålbro utsatt for sollys, med og uten temperaturkompensering. (Bao et al., 2001)

Figur 4-10 viser strekkendringer ved en stålbro utsatt for sollys, med og uten temperaturkompensering. For å oppnå korrekte strekkverdier må temperaturens effekt på fiberen kompenseres for. Det antas i dette tilfellet at fiber og stål opplever samme temperatur. (Bao et al., 2001)

Ved en undervannsrørledning med FOS montert på utsiden av røret vil temperaturforholdene være annerledes for stål og fiber. Dette vil videre kunne komplisere temperaturkompenseringen.

Forskjellen i termisk ekspansjonskoeffisient for fiber og vertstruktur, stål i dette tilfellet, må også tas hensyn til. Denne forskjellen vil skape termisk strekk som ikke kan kompenseres for, ikke engang når fiber og stål har identiske temperaturtilstander. Mer om dette fremkommer i delkapittelet *Temperaturkompensering og termisk ekspansjon*.

Beskyttelse av fiberen

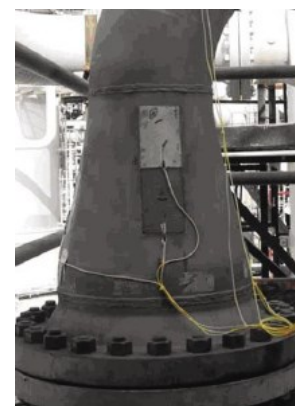
Glass er et sprøtt materiale mottakelig for spenningskorrosjon som kan føre til videre degradering av styrke, og mekanisk svikt under påført spenning. Mekanisk og termisk slitasje, i tillegg til kjemiske angrep vil også kunne senke sensorens levetid. Små overflate-defekter dannet under fiber-produksjon kan begynne å vokse grunnet påførte og resterende iboende spenninger. Denne effekten forsterkes ved tilstedeværelse av vann, samt endringer i temperatur. Generell overlevelsesgrad for FBG-sensorer under installasjon er ca. 90 %

(Nellen et al., 2003). Som mekanisk beskyttelse blir glassfiberen vanligvis belagt med et lag av syntetisk materiale. Dette belegget kan bestå av polyamid og vil forhindre infiltrering av vann og hydrogen. Pakningen vil også beskytte mot ytre påvirkninger og skader, samtidig som god mekanisk kontakt og signaloverføring ifølge Inaudi & Glisic (2010) opprettholdes i størst mulig grad. For å feste den optiske fiberen til røret benyttes en epoksy-basert lim.

Korrosjonsovervåkning ved bruk av FOS

Et fåtall kilder og leverandører foreslår bruk av FOS til overvåkning av reduksjon i veggtykkelse. Det kanadiske firmaet FOX-TEK har utviklet og utført eksperimenter for overvåkning av veggtykkelse med FOS montert på hydrokarbonførende rørlinjer. Sensorene er interferometriske og måler ifølge leverandøren ikke strekk, men gjennomsnittlige forskyvninger inntil 40 mm. Interferometriske fiberoptiske sensorer omfatter fire typer sensorer; Fabry-Perot, Mach-Zehnder, Michelson og Sagnac. Prinsippene for disse sensorene vil ikke omtales videre, men et tilsynelatende potensiale for korrosjonsovervåkning eksisterer.

FOS kan ifølge Al-Taie (2007) overvåke veggtykkelse forårsaket av fysisk strømningsrelatert korrosjon og erosjon. Forskyvninger i form av den karakteristiske, lokaliserte hevelsen rørvæggen opplever ved korrosjon, signaliserer en reduksjon i veggtykkelse. En artikkel publisert i den månedlige NACE-utgivelsen *Materials Performance (MP)* i september 2006 omtaler disse sensorene. En lignende artikkel i *The Oil and Gas Journal* beskriver forsøket utført av FOX-TEK i samarbeid med The Saudi Arabian Oil Co. Forsøket ble utført på en rørsesjon kalt *reducer*, en del av røret der diameteren varierer langs lengden av seksjonen. UT-målinger for sammenligning av resultater ble utført under hele perioden på 6 måneder. Sensorer følsomme for temperatur ble installert parallelt for å kompensere for termisk induert strekk.



Figur 4-11: Rørsesjonen har varierende diameter og kan oppleve strømningsindusert materialtap. (Al-Taie, 2007)

Sensor	Clock position	Initial UT	Final UT in.	FOS reading
WT-1	12	0.775	0.760	0.760
WT-2	3	0.750	0.739	0.728
WT-3	6	0.760	0.766	0.753
WT-4	9	0.767	0.756	0.758

Figur 4-12: Resultater ved måling av veggtykkelse med UT og FOS. Clock position indikerer plassering på røret (Al-Taie, 2007)

Under forsøkene ble det observert varierende nøyaktighet ved FOS sammenlignet med UT. Resultatene i *Figur 4-12* illustrerer at det endelige resultatet ved bruk av FOS viste stor korrelasjon til målinger utført ved UT.

4.4 Evaluering av kommersielle teknologier for overvåkning av materialtap og sprekkdannelse på undervannsrørlinjer

I dette kapittelet vil to kommersielt tilgjengelige teknologier evalueres, en teknologi basert på ultralyd og en teknologi basert på fiberoptikk. Det kan nevnes at det meste av innhentet informasjon om disse teknologiene er hentet fra leverandører og er reklamebasert.

4.4.1 Sensorlinks Ultramonit

Ultramonit™ er et ultrasonisk instrument utviklet av Sensorlink for å overvåke reduksjon i veggtykkelse langs en rørlinje. Informasjon om Ultramonit er hovedsakelig hentet fra (Baltzersen et al., 2007) og (Baltzersen, 2009). Dette relativt nye systemet baseres på den veletablerte ultrasoniske pulsekko-metoden, også kalt *A-scan*.

Ultramonit Subsea er implementert som en enhet som klemmes på rørlinjen. Instrumentet består av transdusere og signal-multiplexer som installeres permanent på rørlinjen. Klemmestrukturen innebærer at installasjonen er ikke-invasiv, og instrumentet utgjør ingen trussel mot rørets integritet. Selve instrumentet består av tre hovedkomponenter: en overvåkningsklemme, en interfaseklemme og en dataloggerklemme.

Overvåkningsklemmen holder kassetter og støtter elektronikken, interfaseklemmen benyttes til å feste målingsutstyret til rørledningen og dataloggerklemmen inneholder batteripakker, kommunikasjonsutstyr og datalagring. Hydrauliske rør benyttes for trykkompensering og elektrisk tilkobling mellom de tre klemmeseksjonene og den induktive kobleren.

Datamaskinen og den ultrasoniske instrumenteringen er lokalisert i et atmosfærisk «subsea housing» båret av en ROV. En spesielt designet induktiv kobling med ROV-håndtering benyttes for tilkobling mellom de to enhetene. Hver klemmeseksjon består av to deler; hoveddelen og en plate med transdusere og elektronikk festet til. Elektronikken er designet med komponenter som tåler høyt trykk, og etter montering fylles hele volumet opp med en to-komponent silikon gummi (SilGel).

Klemmen overvåker innvendig materialtap i form av korrosjon og/eller erosjon i et rør, og flere eksemplarer er installert per dags dato. Instrumentet kan benyttes både topside og subsea, og klemmen kan ettermonteres på eksisterende rørlinjer. Klemmen kan i tillegg flyttes fra en rørlinje til en annen. Klemmestrukturen består av to hengslede ventiler, og strukturen sikrer oppdrift slik at instrumentet oppnår nøytral vekt i vann. De modulære komponentene med instrumenter er designet på en slik måte at de tåler sjøvann og høyt trykk, og klemmens eneste formål er å gi mekanisk beskyttelse og korrekt posisjonering for instrumentering.

Kobleren mellom den permanent installerte klemmen og den ultrasoniske instrumenteringen båret av ROV kombinerer 3 funksjoner:

1. Elektrisk kraft til signal-multiplexeren og sensorer i klemmen
2. To-veis digital kommunikasjon
3. Analog overføring/mottakelse av ultralyd



Figur 4-13: Ultramonit klargjort til installasjon på rørlinje. (www.sensorlink.com)

Vurdering Sensorlink

Ifølge Sensorlinks egne nettsider⁴ har installasjonen følgende fordeler:

- Ikke-påtrengende installasjon
- Enkel installasjon på nye og eksisterende rørledninger
- Ettermontering når som helst i løpet av rørledningens levetid
- On-line overvåkning og fjerndrift
- Systemet gir hurtig tilbakemelding angående effekt av korrosjonsinhibitor, videre vil dette føre til kostnadsbesparelser
- Fleksible avlesningsintervaller tilbys, bestemmes av operatør

Videre presenter Balterzen (2009) følgende begrensninger ved bruk av Ultramonit:

- Begrenset erfaring i feltet, med uventede problemer med kommunikasjon i oppstartsfasen
- Eventuelle belegg må fjernes i forkant av installasjon på stålrøret.

I tillegg kan det nevnes at når Ultramonit er permanent installert må informasjonen fra klemmene hentes ut ved bruk av ROV. Ultramonit vil dermed ikke gi kontinuerlig overvåkning.

Følgende prosjektmilepæler for Ultramonit oppnådd hittil (Baltzersen, 2009):

- Installasjon av 12" Ultramonit prototype onshore-klemme for Statoil (Kårstø 2003)
- Utvikling og testing av 28" Ultramonit prototype subsea-klemme for Statoil (Snøhvit 2005)
- Utvikling og testing av 10" Ultramonit prototype ROV-installert subsea-klemme for Statoil (2006)
- Installasjon av 34" Ultramonit subseasystem i Nordsjøen for ConocoPhillips (september 2008)
- Installasjon av 14" Ultramonit subseasystem for Statoil (februar 2008)

⁴ URL: <http://sensorlink.no/corrosion-erosion/ultramonit/> Online 3/2/2013

4.4.2 Omnisens DiTeSt

DiTeSt er et fiberoptisk sensorsystem utviklet av Omnisens. I tillegg til overvåkningssystemet vil spesialtilpassede kabler og løsninger for beskyttelse diskuteres i denne delen.

Omnisens DiTeSt overvåkningssystem er basert på en deteksjonsmetode ved bruk av den ikke-lineære optiske effekten stimulert Brillouinspredning (SBS). Denne spredningsprosessen er en iboende egenskap for det propagerende lyssignalet i glassmaterialet som fiberen er laget av. Fenomenet beskrevet i delkapittelet

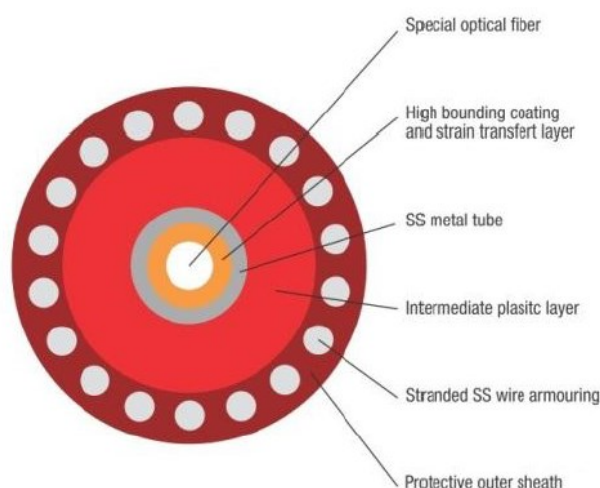
Brillouinspredning viser en kjent og reproducerbar respons til eksterne måleparametere som trykk, temperatur og strekk (Inaudi & Glisic, 2010).

Det sveitsiske firmaet Omnisens skriver på sine nettsider⁵ at sensorsystemet er egnet for overvåkning slitasje og opererende tilstander ved strømningslinjer, stigerør, rørlinjer, ankerliner og andre undervannsinstallasjoner. DiTeSt-systemet er ifølge leverandøren mest benyttet for deteksjon av lokal bevegelse i grunnen, rørlinje-strekk, naturkatastrofer (geologisk), permafrost og tredjeparts-forstyrrelser.

Systemene basert på Brillouin-spredning refereres ofte til Brillouin Optisk Tid Domene Analyse (BOTDA) i litteraturen, og DiTeSt-systemet baseres på BOTDA. Sensorsystemet kan typisk oppnå målinger på ca. $10 \cdot 10^{-12}$ ϵ (m/m) strekk-oppløsning og 0,5 °C temperatur-oppløsning over avstander opp til 30km, med romlig oppløsning på 2 m. Med større romlig presisjon minker nøyaktigheten. Nødvendig tid for å levere en komplett profil varierer fra et par sekunder til 10 minutter, avhengig av avstand og krav til målinger. Kombinert informasjon vedrørende rørets temperatur og strukturelle tilstand overføres til et kontrollsystem kalt SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).

Tradisjonelle fiberoptiske kabler kreves god beskyttelse fra utvendige mekaniske påvirkninger. Fiberen må skjermes fra utvendig fuktighet, trykk, knusing og langsgående strekk som påføres kabelen. Denne type beskyttelse har vist seg å forlenge levetiden for de optiske fibre benyttet for kommunikasjon og overvåkning av systemer med temperaturer fra -20 °C til 60 °C. For bruk ved temperaturer under -20 °C eller over 60 °C kreves en spesiell kabeldesign.

Ved overvåkning av strekk grunnet geologisk aktivitet utnyttes denne type kabler, spesielt ved overvåkning av lokale deformasjoner i grunnen ved store strukturer som rørlinjer. I disse



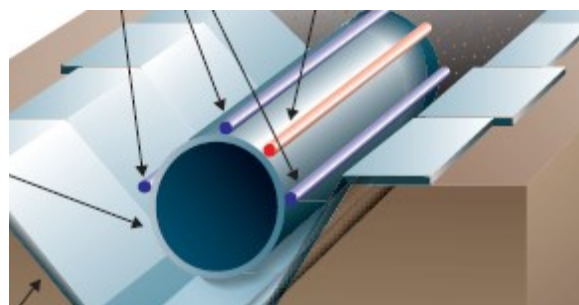
Figur 4-14: SMC struktur. (Carlos Borda, 2012)

⁵ URL: <http://www.omnisens.com/ditest/3411-pipelines-pim.php> Online: 3/4/13

tilfellene er det viktig at den strukturelle strekken overføres til den optiske fiberen. Strekk og temperatur måles samtidig, og strekk- og temperaturfølsomme kabler installeres parallelt orientert på røret. Strekkmålede kabler (SMC) er robuste (belagte) fiberoptiske kabler spesifikt designet for strekkovervåkning. I motsetning til telekommunikasjon-fiberoptiske kabler tillater designet ved SCM at kabelstrekk overføres fra kabelen til den optiske fiberen, og strekk kan videre overvåkes av DiTeSt-leserenheten (Carlos Borda, 2012).

Ved installasjon av sensoren kan SMC-kabelen integreres i belegget på det aktuelle røret, dette ble utført av det sveitsiske firmaet Omnisens på en landbasert rørlinje i Sibir (Sakhalin-Vladivostock). Den sibirske rørlinjen frakter gass over 1822 km og gjennomgår harde miljøer langs rørets totale lengde. Ravet (2013) understreker igjen for dette tilfellet at løsningen må kalibreres nøyaktig. For denne rørlinjen sikres robust feste av den strekkmålede kabelen ved bruk av en spesiell lim.

Figur 4-15 viser hvordan strekk- og temperaturkablene er montert på dette røret. De blå kablene er strekk-kabler (SMC) og den røde kabelen måler temperatur. Temperaturkabelen er ikke festet direkte på røret, og ligger løst. Dette medfører at kabelen kun måler temperatureffekter, og temperaturinformasjon fra denne kabelen benyttes for temperaturkompensering ved uthenting av rene strekkmålinger.



Figur 4-15: Blå strekkmålede kabler og rød temperaturmålede kabel montert på rørlinjen. (Ravet, 2013)

Det utvendige belegget på røret er i dette tilfellet laget av polyetylene, og en polyetylene smeltelim benyttes for å feste kablene på røret. I tillegg festes en polymer teip over strekksensoren, som vist på *Figur 4-16*, for ekstra vedheft.

Den sibirske rørlinjen skiller seg vesentlig fra en undervannsrørlinje og dens miljø og belastninger, men representerer likevel en aktuell metode for installasjon av FOS langs en rørlinje.



Figur 4-16: Kablene holdes på plass av epoksy i tillegg til en polymer teip (grønn farge) (Carlos Borda, 2012).

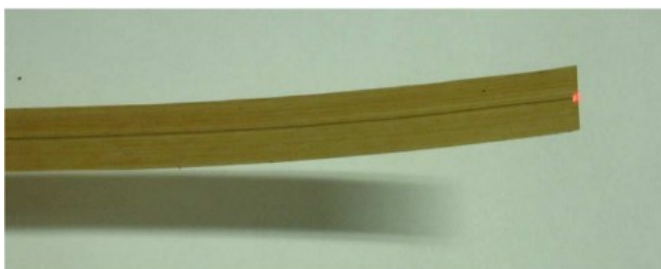
En fordel med den teknologiske løsningen for Omnisens DiTeSt-system er ifølge leverandøren at den er kompatibel med andre fiberoptiske komponenter, som fiberoptiske roterende ledd og *wet-mate* koblinger. *Wet-mate* koblinger tillater sammenkobling av to elektriske kraftkabler under vann. Ifølge Omnisens påvirkes ytelsen ikke av optiske tap og muliggjør en pålitelig overvåkning over lang tid. Strukturer med FOS leverer informasjon vedrørende unormale endringer i operasjon, forekomst og lokasjon ved skader, lekkasjer av hydrokarboner og kraftig strekk. Systemet generer alarmer og statusrapporter ved endringer i strukturell integritet. Tilgjengelighet av direkte, lokal strekkinformasjon ved enhver lokasjon langs røret, fra installasjonsdato, tillater databeregninger av faktiske tretthetsakkumuleringer (Carlos Borda, 2012).

SMARTape

Optimal strekk-overføring opptrer ifølge Ravet et al. (2009) når fiberen er innebygd i en termoplastisk teip, på samme måte som forsterkede fiber integreres i komposittmaterialer. Strekkmålinger ved en struktur krever godt vedheft mellom sensor og substratoverflate. Utviklingen av SMARTape er basert på dette behovet, utviklet av Omnisens SA. Fabien Ravet, ansatt i ledelsen i firmaet, omtaler teknologien i flere publiserte artikler.

For å produsere en slik teip benyttes en glassfiberforsterket termoplast med polyphenylene sulfid, sammensatt i en matrise. Materialet viser ifølge produsenten gode egenskaper og mostand mot mekanisk og kjemisk belastning. Produksjon av denne teipen involverer oppvarming til høy temperatur for å smelte matrisen av komposittmaterialet, og denne temperaturen må være lav nok til at fiberen ikke tar skade ved montering. Vedheft mellom fiberoptisk belegg og matrisen er sikret ved polyamid-belagte optiske fibre.

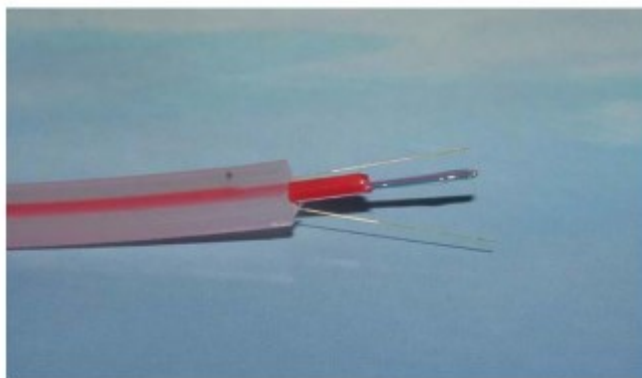
Tykkelsen av tapen kan være så liten som 0,2 mm, og denne dimensjonen er kritisk da den eksterne diameteren av en polyamid-belagt optisk fiber er ca. 0,145 mm. Dette medfører at mindre enn 0,03 mm av teipmaterialet gjenstår på topp og bunn av den optiske fiberen, med en risiko for at fiberen komme ut av teipen.



Figur 4-17: SMARTape beskytter og fester den optiske fiberen til strukturen. (Inaudi & Glisic, 2010)

Optiske tap, induisert av mikrobøyning og svinn i matrisen, genereres i de optiske fibre under produksjon av SMARTape. Disse tapene ligger på mellom 25 og 30 dB/km, og de begrenser maksimal lengde for sensorene til 200-250 m. (Teoretisk mulig grense er ca. 25 km). Funksjonalitet av sensorene ved slike tap garanteres ved svært høyt kraftbudsjett for leserenheten. Sammenligning av resultat oppnådd ved SMARTape og tradisjonelle mikrometer viser en lineærhetsfeil på 0,03 % og en korrelasjonskoeffisient $R = 0,99992$.

Valg av lim som benyttes ved installasjon av SMARTape er essensielt for langvarig vedheft, god overføring av strekk fra struktur til sensor, samt muliggjøring av delaminering dersom en sprekk oppstår. Tester har blitt gjennomført, blant annet av skjærstyrke og avskalling ved forskjellige temperaturer.



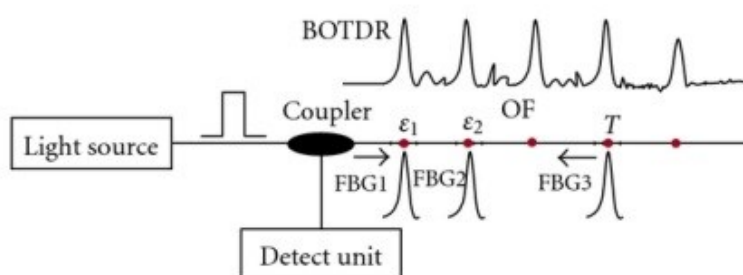
Figur 4-18: Kombinert strekk – og temperatur sensor, SMARTprofile. (Inaudi & Glisic, 2010)

SMARTprofile sensordesign på *Figur 4-18* kombinerer strekk - og temperatursensorer i en samlet pakning. Sensoren består

av to sammenbundne og to singelmodi fibre innpakket i en polyetylen termoplastisk profil. De sammenbundne fibrene benyttes for strekkmåling, og de frie fibrene benyttes for temperaturmålinger og til kompensering av temperatureffekt på de sammenbundne fibrene. To typer av hver fiber øker redundansen for systemet. Innpakningen gir ifølge leverandøren god mekanisk, kjemisk og temperaturbestandig beskyttelse. Sensoren installeres ved smelting, liming eller klemming, og enheten er seg ifølge Inaudi & Glisic (2010) designet for bruk subsea ved strukturer utsatt for olje og gass- strømninger, samt for geotekniske formål.

Kombinasjonen FBG og Brillouin: BODTA/R-FBG

Verken enkle FBG-sensorer eller enkle Brillouin-sensorer alene tilfredsstiller kravene til simultan fullskala detaljert strukturell overvåkning (Zhou et al., 2012). Det eksisterer et ønske om etablering av en balanse mellom lokaliserte høypresisjons-målinger, og storskala distribuerte målinger med lavere nøyaktighet.



Figur 4-19: Kombinasjonen FBG og Brillouin kan ifølge Zhou (2012) resultere i distribuerte målinger i tillegg til detaljert informasjon.

Zhou (2012) introduserer et integrert system der distribuert Brillouin-sensorer kombineres med lokale FBG-sensorer på en singel modus optisk fiber. Denne løsningen vil ifølge Zhou sikre distribuerte målinger i tillegg til lokaliserte detaljer vedrørende skader og defekter. Den integrerte FBG/Brillouin-sensoren er innpakket i forsterket glassfiber kompositt (GFRP). Signalinterferens mellom FBG og Brillouin er ikke fullstendig undersøkt ifølge Zhou's artikkel. Figur 4-19 illustrerer operasjonelle prinsipp for det optiske sensorsystemet. I dette systemet deler FBG og Brillouin den samme singelmodus optiske fiberen, som fungerer både som følede og overførende enhet. For FBG-systemet benyttes FBG-sensorene i den optiske fiberen som lokale målepunkter, samtidig benyttes den optiske fiberen i seg selv som en distribuert sensor for BOTDA-systemet.

4.4.3 Vurdering av fiberoptiske sensorer

I de fleste felt vil FOS konkurrere med modne teknologier som elektroniske og ultrasoniske måleteknologier. For å appellere til brukere som allerede er vant til andre modnere teknologier, må fordelene med FBG tydeliggjøres (Li et al., 2004):

- *Lang levetid.* Sensorene er utformet i holdbart materiale som viser god korrosjonsmotstand, tåler høye strekkbelastninger (opp til 5 % forlengelse) samt viser god holdbarhet i ekstreme miljøer.
- *Høy temperatur-utholdenhet.* Sensorene kan måle temperaturer fra -200 °C til 800 °C. Dette er godt innenfor rekkevidden angående aktuelle temperaturer ved et hydrokarbonførende system.
- *Fleksibilitet.* Sensorene kan påføres komplekse overflater og utilgjengelige områder, som for eksempel rundt omkretsen av et rundt objekt, langs skarpe hjørner eller langs sveiser. Dette er en svært heldig faktor med tanke på overvåkning av kritiske punkter langs rørlinjer.
- *Liten i størrelse og vekt*
- *Høy sensitivitet*
- *Immunitet mot elektromagnetiske forstyrrelser (EMI).* Sensorene kan operere i elektrisk forstyrrende miljøer, som i nærheten av pumper og motorer, og kan overføre målt informasjon over lange avstander uten EMI-forurensing.
- *Elektrisk isolasjon.* Sensorene er ikke-ledende og passer for forankring med minimal påvirkning for strukturens integritet.

- *Kvasi-distribuerte eller distribuerte sanseferdigheter*, også kalt multiplexing. Sensorene kan utføre målinger ved flere lokasjoner og kan multiplexes ved bruk av tids - eller bølglengdemetoder. Muliggjøring av flere målepunkt over lange strekninger vil gi operatør en helhetlig oversikt av rørlinjen.
- *Økonomi*. Sensorene er allerede konkurransedyktige mot konvensjonelle sensorer og prisene vil fremdeles reduseres med den raske utviklingen innenfor fiberoptisk kommunikasjon.

4.5 Evaluering av målenøyaktighet ved overvåkning av undervannsrørledninger

Nøyaktighet er et mål på statistisk feil i målingene som kan oppnås som et resultat av ufullkommenheter i instrumentet. Nøyaktighet er en kombinasjon av flere begreper som representerer usikkerhet i målings- og kalibreringsprosesser. Da det meste av informasjon vedrørende ytelse ved bestemte løsninger og instrumenter ofte gjengis av leverandør, kan et mål på faktisk nøyaktighet variere.

4.5.1 Nøyaktighet ved ultrasonisk tykkelsesmåling

Følgende faktorer kan påvirke nøyaktighet og ytelse av målinger ved ultrasonisk tykkelsesmåling (Fowler, 1996):

- *Kalibrering*: Nøyaktigheten av alle ultrasoniske målinger er et resultat av nøyaktighet og presisjon ved kalibrering av instrumentet. Lydhastighet avhenger av mediet. Nullpunktsforskyvning relateres vanligvis til type transduser, transduserens kabel-lengde og modus for målingene som utføres.
- *Koblingsteknikk*: Ved modus 1 - målinger (direkte kontakt-transdusere) vil koblingens tykkelse være en del av målingene, og kompenseres ved en del av nullpunktsforskyvningen. For maksimal nøyaktighet må koblingsteknikken ifølge Fowler (1996) være konsistent for hele systemet. Høy nøyaktighet kan oppnås ved bruk av koblinger med relativt lav viskositet, dette gir tilstrekkelig kobling for å oppnå rimelig avlesning og påfører samtidig transduseren et uniformt trykk. Vipping av transduseren vil forstyrre ekko og føre til unøyaktige målinger.
- *Overflateruhet for materialet*: Den høyeste grad av målenøyaktighet vil oppnås når både front - og bakside av materialet er glatte og parallelle. Ved grove overflater vil minimum måletykkelse øke grunnet lyd-gjenklang i den økede koblingstykkelsen, og variasjoner i koblingstykkelse kan også føre til potensiell unøyaktighet.

- *Krumning av materialet*: Justering av transduser i forhold til materialet er en viktig faktor for pålitelige målinger. Ved målinger på kurvede overflater bør transduser plasseres på senterlinjen av den kurvede delen, normalt på overflaten. Ved reduksjon i krumning bør transduser-størrelse også reduseres, i tillegg vil justering av transduseren i dette tilfellet være en mer kritisk faktor. For svært små radier vil en neddykket tilnærming være nødvendig.
- *Konisk/eksentrisitet*: Dersom kontaktoverflaten og baksidens overflate er koniske eller eksentriske i forhold til hverandre, vil det returnerte ekkoet vil forvrenges grunnet variasjon i lydbanen på tvers av bredden av bjelken. Nøyaktighet av målingene vil reduseres, og i ekstreme tilfeller vil ikke målinger kunne gjennomføres. Dette vanskeliggjør overvåking av komplekse overflater ved undervannsstrukturer.
- *Akustiske egenskaper i materialet*: Fowler (1996) beskriver 3 tilstander som kan begrense målenøyaktighet og spekter ved ultrasoniske tykkelsesmålinger; Lydspredning, lyddemping eller absorpsjon - og hastighetsvariasjoner. Disse egenskapene varierer for de ulike materialene.
- *Faseforveksling eller faseforvrengning*: Fasen eller polariteten for et returnerende ekko bestemmes av den relative akustiske impedansen (tetthet · hastighet) for grensematerialene. De fleste kommersielle måleinstrumenter antar den vanligste situasjonen; der testmaterialet er støttet av luft eller væske, som begge har lavere akustisk impedanse enn metaller, keramer og plast. For å ivareta nøyaktighet i disse tilfellene er det nødvendig å kompensere for denne timingen.

Nøyaktighet ved tykkelsesmålinger for de ulike transdusertypene er presentert i *Tabell 4-2*. Transdusertypene viser målenøyaktighet i skalaen $\pm 0,002$ mm til $\pm 0,01$ mm. I enkelte applikasjoner kan nøyaktighet opp imot $\pm 0,001$ mm oppnås. Faktorer som overflatetilstand og koblingsgeometri kan derimot påvirke målenøyaktigheten, og leverandørers oppgitte målenøyaktighet (laboratorie-basert) må ofte nedjusteres ved implementering i felt-situasjoner (Baltzersen et al., 2004).

Tabell 4-2: Målenøyaktighet ved ultrasonisk tykkelsesmåling (Kersey et al., 1997).

Transdusertype	Nøyaktighet
(1) Direkte kontakt	$\pm 0,01$ mm
(2) «Delay Line»	$\pm 0,002$ mm
(3) Nedsunket	$\pm 0,002$ mm

Ultramonit Subsea gir ifølge Sensorlinks nettsider⁶ målinger med en relativ nøyaktighet på < 0,1 mm.

4.5.2 Nøyaktighet ved FOS

Kalibrering er en sammenligning mellom målinger: en kjent størrelsesorden eller korrekthet innstilt ved en enhet, og en annen måling utført på en lignende måte (så lik som mulig) på en annen enhet. Enheten med den kjente eller tilordnede korrektheten kalles standard. Begrepet nøyaktighet er et kvalitativt ord som i realiteten bør assosieres med begrepene usikkerhet og usikkerhet ved kalibrering. Målingens usikkerhet avhenger av kalibreringspresisjonen, kvaliteten av kalibreringsoppsettet og prosedyren.

DiTeSt-systemet (*Figur 4-20*) kan typisk oppnå målinger på ca. $10 \cdot 10^{-12} \text{ } \varepsilon$ (m/m) strekk-oppløsning og 0,5 °C temperatur-oppløsning over avstander opp til 30km, med romlig oppløsning på 2 m. Med større oppløsning reduseres nøyaktigheten.

Measurement range	30 km (standard) 150 km (extended)
No. of channels	2 (standard) max. 60 (with channel switch)
Spatial resolution	1 m over 5 km
Temperature resolution	2 m over 25 km
Temperature range (depends on type of sensing cable)	0.1 °C
Strain resolution	-270 °C to +500 °C
Strain range (typical)	2 $\mu\varepsilon$ (0.002 mm/m)
Acquisition time (typical)	-1.25 to +1.25%
	2 min

Figur 4-20: Ytelse ved Omnisens DiTeSt-system. (Inaudi & Glisic, 2010)

Alle målinger kan utsettes for en viss mengde feil, og det er nødvendig med et estimat av sikkerheten av målinger for evaluering av det aktuelle systemets prestasjon. (Bao et al., 2001) beskriver et forsøk der Brillouin-sensorer monteres på en stålbjelke. Repetering av 10 målinger av Brillouin skift er benyttet for å undersøke gjennomsnittlig nøyaktighet. Avvik for hver verdi fra gjennomsnittet ble bestemt ut i fra disse målingene, og det største registrerte avviket var 10,8 m/m ved konstant belastning. Gjennomsnittlig avvik var 4,6 m/m.

Fabien Ravet i Omnisens ble kontaktet med spørsmål angående nøyaktighet for Brillouin-sensorsystem. På spørsmål angående nøyaktighet og hvorvidt belegget, pakningen og limen

⁶ URL: <http://sensorlink.no/corrosion-erosion/ultramonit/> Online: 3/2/13

virker inn på denne har Ravet følgende svar (Ravet, 2013): Målenøyaktighet avhenger av instrumentets ytelse og kvaliteten på limen/herdingen. Begge er nøkkelementer. I forhold til applikasjon ved subsea rørledninger (kontra FOS montert for å overvåke seismisk aktivitet subsea, eller jordskred på land) kan romlige oppløsninger så små som 50 cm, og prøvetakingsoppløsning på 10 cm benyttes.

En lim vil ha flere spesifikke egenskaper, disse inkluderer termiske egenskaper og angitt elastisitet. Limen må være i stand til å overføre den mekaniske tøyningen fra stålet videre til fiberen på en tilfredsstillende måte. Den termiske ledningsevnen er avgjørende. De fysiske egenskapene til limen vil sammen med instrumentets ytelse være avgjørende for nøyaktighet ved FOS.

5 Diskusjon

Diskusjonen er delt opp i følgende deler:

- Litteraturstudie og funn
 - Kilder og troverdighet
- Fiberoptiske sensorer
 - Innpakning og installasjon av fiber
 - Temperaturkompensering og termisk ekspansjon
 - Vedlikehold
 - Anvendelser og kompetanse

5.1 Litteraturstudie og funn

Innledende og generelle søk i Google og vitenskapelige databaser som Science Direct, IEEE og Engineering Village resulterte i et stort antall artikler, der de fleste treff var artikler som omhandlet modne overvåkningsteknikker basert på elektroniske og ultrasoniske målere. Ved generelle søk for subsea tilstandsovervåkning er en andel av treffene relatert til overvåkning av strømninger i rør og aktuelle problemer som temperaturvariasjon og hydratdannelse. Disse treffene kan utelukkes ved å inkludere SHM eller *structural integrity* i søket, eller ved å spesifisere målemetoder. Mer spesifikke og begrensede søk i forhold til måleprinsipp samt spesifisert type degradering (materialtap, sprekker) gav en rekke treff og artikler som oppsummerer en flere metoder for ulike formål og applikasjoner.

Kontaktrykket mellom flens og flensepakning ved skjøtet på en undervannsrørledning er en varierende og belastende parameter. Området er spesielt utsatt i forhold til lekkasje av hydrokarboner. Varierende påført trykk mellom flens og flensepakning over lenger tid kan føre til slitasjebrudd i pakningen. Forseglingen er da brutt, og hydrokarboner kan lekke ut fra koblingen. Ut ifra litteratursøkene er det ikke observert at dette er et område for fokus blant leverandører eller aktører. I en artikkel nevnes det i innledningen at akustisk emisjon kan benyttes for passiv overvåkning av flens, men det er ingen videre utbrodering av dette. En overvåkningsklemme eller sensor festes gjerne i nærheten av en flens, men overvåkingen er ikke for trykket i selve flensen og pakningen.

Fiberoptiske sensorer er et område der det er publisert en rekke artikler, men disse kommer ikke frem ved søk på subsea tilstandsovervåkning.

5.1.1 Kilder og troverdighet

Enkelte av kildene benyttet for både ultrasonisk og fiberoptisk tilstandsovervåkning er anskaffet i forbindelse med kommersielle leverandører, og kan derfor anses som delvis reklamebasert informasjon. Teknologiene er relativt nye og informasjon utenfor kommersielle artikler og beskrivelser er begrenset.

5.2 Fiberoptiske sensorer

Fiberoptiske sensorer anvendt for tilstandsovervåkning av undervannsrørledninger er et relativt nytt felt med tilsynelatende stort potensiale. FBG-sensorer og Brillouin-sensorer er basert på forskjellige fenomener, men utfordringer, tilpasninger og begrensninger er generelt gjeldende for FOS.

5.2.1 Innpakning og installasjon av fiber

For å beskytte den fiberoptiske sensoren fra omgivelsene vil det være nødvendig å pakke fiberen inn i et materiale. Ytre påvirkninger kan forårsake skader, og glassfiberen blir vanligvis belagt med et lag av syntetisk materiale for å forhindre dette. Det syntetiske belegget kan bestå av polyamid og vil forhindre infiltrering av vann og hydrogen. Økning i utbygginger av undervannsinstallasjoner har ført til en økning av behov for holdbare og korrosjonsresistente sensorsystem.

Med henvisning fra Kjell Bløtekjær (tidligere professor ved NTNU, nå pensjonert) ble Jon Thomas Kringlebotn i det Trondheimsbaserte firmaet Optoplan AS kontaktet for spørsmål vedrørende utfordringer og status for fiberoptiske sensorer til bruk i tilstandsovervåkning langs rørledninger. Kringlebotn nevner både FBG-sensorer og distribuerte sensorer basert på Brillouinspredning som velegnede sensorer til bruk ved overvåkning av undervannsrørledninger. Han bekrefter at mekanisk grensesnitt er en stor utfordring ved installasjon av fiberoptiske sensorer. Fiberen er utformet i et skjørt materiale og beskyttelse av denne er essensielt for sensorens levetid. Termisk ledningsevne og evnen til mekanisk overførsel av strekk må sikres. Kringlebotn har selv erfaring med bruk av FBG-sensorer integrert i armeringene ved fleksible stigerør, i tillegg nevner han situasjoner der fiberoptiske sensorer legges i langsgående spor i selve røret. På denne måten er fiberen skjermet for ytre påvirkninger. Kringlebotn nevner fiber innkapslet i stålrør, en kjent løsning for beskyttelse av fiberoptiske sensorer. For å sikre vedheft mellom pakning og selve rørledningen nevnes epoksy som en standard løsning til lim (Kringlebotn, 2013).

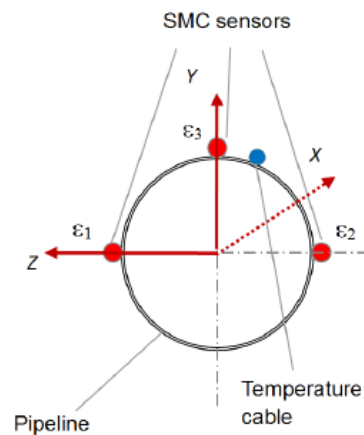
Ved korrespondanse med Fabien Ravet i det sveitsiske firmaet Omnisens bekreftes det at disse områdene er reelle og viktige utfordringer ved applikasjon av fiberoptiske sensorer. Han utbroderer at sensorene er komplekse strukturer dannet av flere lag. Sensitiviteten må ivaretas samtidig som sensorens integritet forblir intakt. Ravet nevner også at Omnisens har utviklet strekkmålede kabler der fiberen er innpakket i flere lag av polymer og stål. Han spesifiserer at den faktiske responsen til sensoren må kalibreres nøyaktig før installasjon. Ved umbilicals og fleksible stigerør vil den følsomme kabelen integreres i strukturen under fabrikasjon, og for en rørlinje vil kabelen installeres under konstruksjon/legging av rørlinjen (Ravet, 2013).

5.2.2 Temperaturkompensering og termisk ekspansjon

Både strekk og temperatur fremkaller reflekterte bølgelengde-endringer i FOS, derfor må bidragene til de to separeres for å oppnå nøyaktige målinger for hver parameter. For å hente ut rene strekkmålinger for rørlinjen må temperatureffektene kompenseres for, og som nevnt i delkapittelet *Temperaturkompensering* kan dette utføres ved implementering av flere optiske fibre parallelt langs røret som vist på *Figur 5-1*. Temperaturkabelen, som ikke er festet til strukturen, supplerer temperaturkompensering for uthenting av direkte strekkmålinger ved de tre SMC-sensorene.

Denne kompenseringen vil minimere fiberens kryss-sensitivitet for strekk og temperatur, men det er også en annen temperatur-relatert situasjon som kan oppstå med implementering av fiberoptiske sensorer. Stål har en mye høyere termisk ekspansjonskoeffisient enn silica, og ved høye temperaturer vil stålet utvide seg mer enn silica-fiberen. Dette er termiske effekter som ingen kompensering kan filtrere ut, og det kan tenkes at dette vil skape problemer dersom temperaturene blir svært høye.

Den reflekterte bølgelengden vil endres dersom fibermaterialet opplever en termisk ekspansjon. Ifølge Kersey (1997), i tilfeller med Silica fibre, vil termisk respons domineres av brytningsindeksens endring, og ikke av termisk ekspansjon. Det anslås at 95 % av termisk respons i bølgelengde-endringen i en FOS skyldes endring i brytningsindeks.



Figur 5-1: Den løse temperaturkabelen kompensere for temperatureffekten på de tre SMC-sensorene. (Carlos Borda, 2012)

Når et objekt varmes opp eller kjøles ned, vil objektets lengde endres proporsjonalt med endringer i temperatur. Lineær termisk ekspansjon for et objekt kan uttrykkes ved

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_0) \quad (\text{Formel 5-1})$$

Der ΔL beskriver lengdeforlengelsen, L_0 representerer opprinnelig lengde, α er lineær ekspansjonskoeffisient for det aktuelle materialet og T_0 og T_1 representerer henholdsvis initial og endelig temperatur.

Silica (SiO_2), som samtlige keramer, er et sprøtt og temperatursensitivt materiale, spesielt i forhold til sprekke dannelse grunnet termisk ekspansjon. Materialet har en av de lavere verdier av termisk ekspansjonskoeffisient. Keramer blir vanligvis benyttet i sammenheng med andre materialer, og ekspansjonen må tilpasses det aktuelle vert-materialet for å unngå sprekker, krakelering og skjelving.

Tabell 5-1: Lineær termisk ekspansjonskoeffisient for ulike materialer. (Engineering Toolbox⁷)

Materiale	Lineær Termisk ekspansjonskoeffisient (10^{-6})/°C
Karbonstål	11,7
Silica (SiO_2)	0,55

Termisk ekspansjon (basert på (Formel 5-1) er beregnet for 4 ulike tiltenkte situasjoner på en 300 meter lang rørline. Termisk ekspansjonskoeffisient for stål og silica er angitt i Tabell 5-1. Utrekningene presenteres i vedlegg under Case; Termisk ekspansjon.

I case 1 antas det at rørvegg og fiber holder samme temperatur. Røret opplever en endring i driftstemperatur fra 60 til 70 °C. Ekspansjon i stålet er lik 18 mm og ekspansjon i fiberen er 0,825 mm. Dette utgjør en differanse i ekspansjon lik 17 m.

I case 2 gjelder de samme antagelsene som i case 1, men røret (og fiberen) opplever en større endring i driftstemperatur da situasjonen finner sted ved oppstart av produksjon. Det antas at temperaturen ved driftsstopp er 7 °C, og endelig temperatur er igjen 70 °C. Ekspansjon i stålet er lik 221 mm og ekspansjon i fiberen er 1 mm. Dette utgjør en enda større differanse i ekspansjon, lik 211 mm.

⁷ URL: http://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html Online: 3/6/13

I case 3 antas en dårligere isolert fiber som opplever en temperatur svært forskjellig fra stålet. Sjøvann holder en temperatur på omtrent 7 °C. Det antas at den optiske fiberen har samme temperatur som sjøvannet. Temperaturen øker bare 1 °C for silica-materialet i løpet av denne måleperioden. Stålet holder fremdeles initial temperatur 60 °C og endelig temperatur 70 °C. Ekspansjon i stålet er lik 35 mm og ekspansjon i fiberen er 0,165 mm. Dette utgjør en differanse i ekspansjon lik 35 mm.

I case 4 gjelder de samme antagelsene som i case 3, men røret (og fiberen) opplever en større endring i driftstemperatur da situasjonen inntreffer ved oppstart av produksjon. Silica-fiberen holder 7 °C ved oppstart og stiger til 8 °C. Stålet har samme initial temperatur ved 7 °C og stiger til 70 °C. Ekspansjon i stålet er lik 221 mm og ekspansjon i fiberen er 0,165 mm. Dette utgjør en differanse i ekspansjon lik 211 mm.

5.2.3 Vedlikehold

En optisk fiber montert på et stålrør vil kreve svært lite vedlikehold dersom fiberen forblir uskadet. Dersom skade på den fiberoptiske sensoren oppstår under drift av undervannsrørslinjen kan en eventuell vedlikeholdsoperasjon bli svært vanskelig. Installasjon av FOS finner sted ved konstruksjon av røret eller i forkant av nedlegging av røret. Sensoren vil integreres i rørets ytterste beskyttende belegg, og det vil være problematisk å installere en ny sensor. Av disse årsaker forsterkes behovet for god mekanisk og kjemisk beskyttelse for den fiberoptiske sensoren. Dersom mulig bør to eller flere fibre installeres for å oppnå redundans.

En tett relasjon mellom kunde og konstruksjonsfirma vil være essensielt i forhold til operasjon og vedlikehold av systemet. Installasjon av FOS i samarbeid med konstruksjonsfirma muliggjør rådgivning og god kommunikasjonsflyt i sammenheng med videre operasjon og vedlikehold av sensorene.

5.2.4 Anvendelser og kompetanse

I litteraturen funnet i litteratursøket i kapittel 3.1, samt på nettsidene til kommersielle leverandører presenteres eksempler på applikasjoner av FOS for strømningsrelatert overvåkning av hydrokarbonførende rør med hensyn på hydrater og temperaturvariasjon. FOS relateres også til overvåkning av geologisk aktivitet langs undervannsrørslinjer og overvåkning av belastning ved broer. Trykk- og temperaturovervåkning i reservoar og overvåkning av strukturell integritet i stigerør og umbilicals er andre bruksområder for FOS. Bruk av FOS til overvåkning av materialtap i rør er også beskrevet i enkelte kilder, hvorav en metode baseres

på deteksjon av forskyvninger som oppstår ved korrosjon/erosjon. En annen metode baseres på å belegge en innvendig plassert fiber og deretter detektere korrosjon når belegget korroderer. Etsing av dette belegget fører i dette tilfellet til en redusert refleksjon som indikerer korrosjon.

Fabien Ravet har publisert en rekke artikler om temaet FOS, og ved korrespondanse forteller han at firmaet for tiden jobber med utmattingsovervåkning av undervannsrørledninger.

For lekkasjedeteksjon i rør anvendes overvåkning av temperaturprofiler over lange avstander ved bruk av FOS. Utslipp av flytende hydrokarboner vil ha høyere temperaturer enn vann, og gass-utslipp vil holde en lavere temperatur. Ved strukturell overvåkning av fleksible stigerør integreres de fiberoptiske sensorene i armeringene. Strekkarmeringen går som en spiral og består av to lag med armering der de spinner hver sin vei. Den optiske fiberen plasseres langs disse armeringene og vil da ha en spiralformet orientering. Ved temperaturovervåkning av isolerte rør vil sensorene plasseres i isolasjonslaget mellom innsiden og utsiden av røret. Alle disse nevnte applikasjonene utnytter at strukturen har flere lag, og den fiberoptiske sensoren beskyttes fra direkte ytre og indre påvirkninger.

På spørsmål om installasjon av FOS på undervannsrørledninger, og hvordan selve implementeringen vil gjennomføres i forhold til nevnte eksempler i delkapittelet

Omnisens DiTeSt, har Ravet (2013) følgende svar; Det er usikkert hvorvidt samme type implementering som i eksempelet med den sibirske rørlinjen, kan anvendes ved subsea rørlinjer. Dette må evalueres og mer arbeid kreves for å vurdere hvordan installasjonen kan gjennomføres. Ravet foreslår derimot en lignende implementering, og installasjon av minst tre strekkfølende kabler (SMC) i tillegg til en temperaturkabel for temperaturkompensering.

Implementering og operasjon av FOS til undervannsproduksjonsanlegg krever et høyt kompetansenivå. Teknologien er ny, og vil være ukjent for mange i sammenheng med overvåkning. Dersom løsningen skal gjøres tilgjengelig og kommersialiseres i en større grad, vil en tett relasjon mellom kunde og konstruksjonsfirma være nødvendig. Dette vil også vise seg å være essensielt i forhold til drift og oppfølging av det fiberoptiske sensorsystemet.

5.2.5 Ultramonit og DiTeSt

I *Tabell 5-2* og *Tabell 5-3* presenteres fordeler og ulemper ved de to kommersielle teknologiene presentert i oppgaven: Ultramonit Subsea og DiTeSt.

Tabell 5-2: Ultramonit Subsea

Ultramonit Subsea	
Fordeler	Ulemper
Kan benyttes ved nye og eksisterende rør	ROV er nødvendig for uthenting av målt informasjon
Designet for subsea-applikasjoner	Fremdeles i utviklingsfasen
Lang levetid	Eventuelt belegg må fjernes før installasjon
Kan benyttes ved T-stykke og bend	Målenøyaktighet ikke spesifisert for subsea-bruk
Kan monteres på både nye og eksisterende rørsesjoner	
Ukomplisert installasjon	
Umiddelbar respons på inhibitor-effektivitet	

Tabell 5-3: DiTeSt

DiTeSt	
Fordeler	Ulemper
Lang levetid dersom godt beskyttet	Skjørt sensormateriale; glass
Fleksibilitet i forhold til komplekse overflater	Kryss-sensitivitet for strekk og temperatur kan oppstå
Liten i størrelse og vekt	Vanskelig installasjon, vedlikehold og utskifting av sensor
Immunitet mot elektromagnetisk støy	Mekanisk beskyttelse av sensor er nødvendig
Elektrisk isolasjon, ikke-ledende sensorer	Stål har svært mye høyere varmeutvidelseskoeffisient enn Silica (SiO ₂)
Distribuerte sanseferdigheter/multiplexing	Ustabil lyskilde (grunnet ytre påvirkninger) påvirker nøyaktighet. Hyppig kalibrering er nødvendig
Lav pris	Ikke utprøvd til dette spesifikke formålet
Høy sensitivitet	

6 Konklusjon

Nyere teknologier for tilstandsovervåkning er evaluert til bruk ved subsea olje- og gassanlegg. Evalueringen ble rettet inn mot overvåkning av innvendig materialtap og sprekkdannelser i hydrokarbonførende rørledninger. Fiberoptiske sensorer er viet spesiell oppmerksomhet fordi dette er en nyere teknologi under utvikling. Teknologien synes å ha et stort potensiale innenfor tilstandsovervåkning av undervannsrørledninger. Videre er to kommersielt tilgjengelige teknologier innenfor de valgte måleteknologiene evaluert: Ultramonit Subsea og DiTeSt. Erfaringer ved disse teknologiene og eventuelle tilpasninger for implementering ved en undervannsrørledning er diskutert.

Ultramonit Subsea er en instrumentert klemme basert på den ultrasoniske pulsekko-metoden, og klemmen plasseres på røret for målinger av materialtap. Oppgitt målenøyaktighet fra leverandører må vurderes kritisk, og et avvik fra disse tallene grunnet en rekke faktorer kan oppstå. Ultramonit Subsea gir ifølge leverandøren målinger med en relativ nøyaktighet på < 0,1 mm.

Omnisens sensorsystem DiTeSt utnytter prinsippet stimulert Brillouinspredning og sensoren måler temperatur og strekk. Den optiske fiberen er en distribuert sensor og muliggjør måling av temperatur og strekk langs fiberen. Denne type sensor vil være mer aktuell for rørledninger enn FBG-sensorer, fordi FBG-sensorer er punktsensorer. Nøyaktighet ved fiberoptiske sensorer avhenger av korrekt kalibrering, sensorsystemets ytelse og egenskapene til den benyttede limen. DiTeSt-systemet kan typisk oppnå målinger på ca. $10 \cdot 10^{-12} \text{ } \epsilon$ (m/m) strekk-oppløsning og 0,5 °C temperatur-oppløsning over avstander opp til 30 km, med romlig oppløsning på 2 m.

Optiske fibre har evnen til å detektere en rekke parametere, der de mest relevante i forhold til overvåkning av rørledninger inkluderer strekk, vibrasjon, akustisk emisjon, trykk og temperatur. Ut ifra observerte anvendelser og teoretisk grunnlag presenteres en oversikt over FOS og potensiale i ulike applikasjoner i Tabell 6-1.

Tabell 6-1: Potensiale for FOS

Godt potensiale	Noe potensiale, behov for utvikling
Strekk	Sprekker
Deformasjon	Veggtykkelse (erosjon og korrosjon)
3.parts last	Stresskorrosjon
Lekkasje	Veggtykkelse (innvendige belagte FOS som varsler dersom belegg korroderes bort)
Temperatur	

Utsiktene for utvidet bruk av fiberoptiske sensorer til overvåkningsformål er tilsynelatende svært gode. Teknologien tillater kontinuerlig, direkte, EMI-immun, korrosjonsresistant og potensielt rimelig overvåkning av strukturer og rørlinjer over store avstander. Sensorsystemet er allerede tatt i bruk for overvåkning av strukturell integritet i stigerør og landbaserte rørlinjer. Mekanisk beskyttelse, vedheft, temperaturkompensering og nøyaktighet er viktige faktorer og disse må vektlegges i starten av prosjektprosessen ved legging av rørlinjene. En eventuell termisk ekspansjon i stålrøret kan være problematisk når den optiske fiberen ikke ekspanderer i lik grad ved økning i temperatur.

6.1 Forslag til videre arbeid

Forslag til videre arbeid baseres på funnene i litteraturundersøkelsen i kapittel 3.1.

6.1.1 Fiberoptiske sensorer

Det finnes flere og store muligheter innenfor fiberoptiske sensorsystem, og videre arbeid med utvikling og testing av distribuerte og kvasidistribuerte sensorer til bruk ved undervannsinstallasjoner vil trolig være et stort satsingspunkt i fremtiden. Både FBG og Brillouin-baserte sensorer benyttes til overvåkning i dag, og med utvikling innen mekanisk beskyttelse, sensorintegrasjon, sensorinstallasjon og signaloverføring vil påliteligheten for denne type sensorer øke. Høyere romlig oppløsning for sensorene er også et område med potensiale for forbedring, slik at de aller minste defekter og skader (strek og temperatur) kan detekteres. Videre arbeid innenfor tilretteleggelser og bruk av fiberoptiske sensorer kan med fordel undersøkes videre.

6.1.2 Undervannsskjøter

Søk for overvåkning av kontaktrykket mellom flens og flensepakning gav lite relevante funn, og videre arbeid innenfor dette området vil være av interesse.

Fabien Ravet i Omnisens bekrefter ved korrespondanse at dette er et interessant tema i sammenheng med fiberoptiske sensorer, og mener at integrasjon av fibersensoren ved konstruksjon/installasjon av rørledningene vil være nødvendig for dette formålet.

Overvåkning av boltene på flensen kan også være en mulig tilnærming til dette området. Akustisk emisjon kan egnes til formålet, men bakgrunnsstøy og lite detaljer vedrørende den detekterte defekten representerer hindringer ved denne metoden.

7 Litteraturliste

Al-Taie, M., Cherpillod (2007) Mideast site tests fiber-optic corrosion monitoring system. *Oil and Gas*, (January),

Ashby, M. F. (2011) Materials selection in mechanical design. *MRS BULLETIN*, s. 995.

Bai, Y. & Bai, Q. (2010) *Subsea engineering handbook*, Gulf Professional Publishing.

Baltzersen, y., Waag, T. I., Johnsen, R., Ahlen, C. H. & Tveit, E. (2007) Wall Thickness Monitoring of new and existing subsea pipelines using ultrasound. *CORROSION 2007*,

Baltzersen, Ø. (2009) Presentasjon: Ultramonit, ny ultralydteknologi ultralydteknologi formåling og overvåking av rørvegg. I: *Offshore prosessanlegg og rørledninger -materialtekniske utfordringer*. Bergen.

Baltzersen, Ø., Solstad, A., Daaland, A. & Holberg, J. K. (2004) Ultramonit: A New Concept for Monitoring Using Ultrasonics. I, ASME.

Bao, X., DeMerchant, M., Brown, A. & Bremner, T. (2001) Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed Brillouin scattering sensor. *Journal of Lightwave Technology*, 19 (11), s. 1698.

Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. (2007) *Materials science and engineering: an introduction*.

Carlos Borda, M. N., Etienne Rochat, Alexander Grechanov, Alexander Naumov, Valeriy Velikodnev (2012) CONTINUOUS REAL-TIME PIPELINE DEFORMATION, 3D POSITIONING AND GROUND MOVEMENT MONITORING ALONG THE SAKHALIN-KHABAROVSKVLADIVOSTOK PIPELINE. I: *International Pipeline Conference IPC 2012*. Calgary, Alberta, Canada.

Connor, L. P. (1987) *Welding Handbook. Vol. I: Welding Technology. American Welding Society, 1987, s. 638.*

Ensminger, D. (1988) *Ultrasonics: Fundamentals, Technology, Application. Marcel Dekker, UK,*

Esaklul, K. A. & Ballard, A. L. (2007) *Challenges in the Design of Corrosion and Erosion Monitoring for Deepwater Subsea Equipment-Stretching the Limits of Technology. CORROSION 2007,*

FARSUND Ø, S. G., PRAN Karianne, WANG Gunnar (2000) *SENSOR INSTALLATION ON KNM SKJOLD PRIOR TO FIRING TESTS APRIL 2000.*
<http://www.ffi.no/no/Rapporter/00-03665.pdf>

Fowler, K. (1996) *Theory and application of precision ultrasonic thickness gauging. Insight, 38 (8), s. 582-7.*

Grote, K. H. & Antonsson, E. K. (2009) *Springer handbook of mechanical engineering, Springer.*

Halmøy, E. (2007) *Sveiseteknikk.*

Hauptmann, P., Lucklum, R., Püttmer, A. & Henning, B. (1998) *Ultrasonic sensors for process monitoring and chemical analysis: state-of-the-art and trends. Sensors and Actuators A: Physical, 67 (1), s. 32-48.*

Huang, M., Jiang, L., Liaw, P. K., Brooks, C. R., Seeley, R. & Klarstrom, D. L. (1998) *Using acoustic emission in fatigue and fracture materials research. JOM, 50 (11), s. 1-14.*

Inaudi, D. & Glisic, B. (2010) *Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing. Journal of pressure vessel technology, 132 (1), s. 011701.*

Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K., Askins, C., Putnam, M. & Friebele, E. J. (1997) *Fiber grating sensors. Lightwave Technology, Journal of, 15 (8), s. 1442-1463.*

Kishawy, H. A. & Gabbar, H. A. (2010) Review of pipeline integrity management practices. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 87 (7), s. 373-380.

Kringlebotn, J. T. (2013) Personlig korrespondanse. I.

Lee, B. (2003) Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, 9 (2), s. 57-79.

Li, H.-N., Li, D.-S. & Song, G.-B. (2004) Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering structures*, 26 (11), s. 1647-1657.

Liu, Z. & Kleiner, Y. (2012) State-of-the-Art Review of Technologies for Pipe Structural Health Monitoring. *Sensors Journal, IEEE*, 12 (6), s. 1987-1992.

López-Higuera, J. M., Rodriguez Cobo, L., Quintela Incera, A. & Cobo, A. (2011) Fiber optic sensors in structural health monitoring. *Lightwave Technology, Journal of*, 29 (4), s. 587-608.

Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K. & Bhattacharya, D. K. (2008) Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147 (1), s. 150-164.

Menon, E. S. (2005) *Gas pipeline hydraulics*, CRC.

Moe, C. (2012) Forprosjekt Undervannsteknologi; Subsea Tilstandsovervåkning. I, HIB.

Mylvaganam, S. (2003) Some applications of acoustic emission in particle science and technology. *Particulate science and technology*, 21 (3), s. 293-301.

Nellen, P. M., Mauron, P., Frank, A., Sennhauser, U., Bohnert, K., Pequignot, P., Bodor, P. & Brändle, H. (2003) Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 103 (3), s. 364-376.

Nikles, M., Vogel, B. H., Briffod, F., Grosswig, S., Sauser, F., Luebbecke, S., Bals, A. & Pfeiffer, T. (2004) Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring. I: *Smart Structures and Materials*. International Society for Optics and Photonics.

Palmer, A. C. & King, R. A. (2004) *Subsea pipeline engineering*, PennWell Books.

Ramaswami, R., Sivarajan, K. & Sasaki, G. (2009) *Optical networks: a practical perspective*, Morgan Kaufmann.

Ravet, F. (2011) Distributed Brillouin Sensor Application to Structural Failure Detection. *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, Springer, s. 93-136.

Ravet, F. (2013) Personlig korrespondanse. I.

Ravet, F., Briffod, F., Glisic, B., Niklès, M. & Inaudi, D. (2009) Submillimeter crack detection with Brillouin-based fiber-optic sensors. *Sensors Journal, IEEE*, 9 (11), s. 1391-1396.

Roberts, T. & Talebzadeh, M. (2003) Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. *Journal of Constructional Steel Research*, 59 (6), s. 695-712.

Sun, L. & Li, Y. (2010) Acoustic emission sound source localization for crack in the pipeline. I: *Control and Decision Conference (CCDC), 2010 Chinese*. IEEE.

Tavner, P., Ran, L., Penman, J. & Sedding, H. (2008) *Condition monitoring of rotating electrical machines*, The Institution of Engineering and Technology.

Ukil, A., Braendle, H. & Krippner, P. (2012) Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications. *Sensors Journal, IEEE*, 12 (5), s. 885-892.

Valland, A, J. R., Sævik. Ø, Knudsen. O. Ø (2010) Marintek Report: Steel pipelines – state of the art for internal condition monitoring and inspection technologies. I.

Veritas, D. N. (2010) SELECTION AND USE OF SUBSEA LEAK DETECTION SYSTEMS. *RECOMMENDED PRACTICE DNV-RP-F302*.

Wilson, A. (2002) *Asset maintenance management: a guide to developing strategy & improving performance*, Industrial Press Inc.

Zhou, Z., He, J. & Ou, J. (2012) Integrated Optical Fiber Sensing System by Combing Large-Scale Distributed BOTDA/R and Localized FBGs. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012,

8 Vedlegg

8.1 Definisjon Masteroppgave

Student Camilla Moe

Bakgrunn

Ved plassering av olje/gass - installasjoner og produksjonsutstyr på havbunnen kan produksjonen av olje og gass effektiviseres. Levetid for olje/gass-felt (IOR-strategien) kan øke, og utvinningsgraden blir betraktelig høyere. Plassbesparelse på flyter/plattform er en annen fordel, og produksjonsanlegg der flyter/plattform ikke er en mulighet vil være avhengig av undervannsproduksjon.

Undervannsinstallasjoner og integriteten til utstyret krever tilstandsovervåkning. Lokalisering av produksjonsutstyr på havbunnen forutsetter (kontinuerlig) overvåkning slik at svikt oppdages tidlig og større lekkasjer derfor unngås. Kritiske elementer ved et undervannsanlegg inkluderer skjøter (flenser), bend, T-bend samt kritiske komponenter som ventiler.

Parametere som må overvåkes inkluderer følgende;

- Sprekker og sprekkdannelse
- Reduksjon i godstykkelse
- Plastisk deformasjon og signing
- Kontakttrykk

Formål

Formålet med oppgaven er å vurdere metoder for overvåkning av undervannsinstallasjoner, da spesielt skjøter, T-bend og ventiler. Det er vesentlig å få fram forskjellen mellom lekkasjedeteksjon (etter at lekkasjen har oppstått) og tilstandsovervåkning. Sistnevnte går ut på å se etter tegn på at en lekkasje kan oppstå eller vil oppstå i nære fremtid.

Metode

Metode for oppgaven vil være litteratursøk i vitenskapelige databaser.

Intervjuer med fagpersoner i bedrifter som har kommersielle produkter innen tilstandsovervåkning. Her er det viktig å se på måleprinsippene som brukes, samt hva bedriftene tror vil bli utviklingen videre.

Statistikk på årsaker til lekkasjer må søkes innhentet fra litteratur eller bransjeforeninger, alternativt bedrifter eller petroleumstilsyn.

Veiledere og innleveringsfrist

Veileder ved NTNU er Olav Egeland. Veiledere ved HIB er Ragnar Gjengedal, Ørjan Fyllingen og Knut Øvsthus.

Innleveringsfrist for oppgaven fastsettes i henhold til NTNU sitt regelverk.

8.1.1 Begrensninger og endringer Masteroppgave

I forhold til original oppgavetekst ble et par endringer gjennomført underveis. Under veiledninger i startfasen ble potensialet ved fiberoptiske sensorer understreket, og emnet fikk en vesentlig større rolle i oppgaven. Fiberoptiske sensorer synes å ha et stort potensiale innenfor tilstandsovervåkning og det ble besluttet å gjennomgå to typer fiberoptiske sensorer. FBG-sensorer og Brillouin-sensorer kan måle strekk og temperatur. Strekkmålinger vil være interessant relatert til sprekker, plastisk deformasjon og utmatting. Temperaturmålinger kan blant annet benyttes ved lekkasjedeteksjon i tillegg til temperaturkompensering for å hente ut rene strekkmålinger ved rørlinjer eller andre strukturer.

Tilstandsovervåkning av flensforbindelsen, der varierende kontakttrykk kan føre til slitasjebrydd i flensepakning, var i startfasen ment å være et fokus for oppgaven. Dette ble gått bort ifra da lite relevant litteratur eller metode ble funnet ved litteratursøkene. Ventiler, bend og T-stykke er også tatt bort i fra oppgaven.

Av parameterne trykk, materialtap, sprekker, plastisk deformasjon og siging ble det i denne oppgaven fokusert hovedsakelig på materialtap og sprekker.

De oppdaterte problemstillingene er som følger;

- Evaluere tilgjengelige teknologier for tilstandsovervåkning av undervannsproduksjonssystem. Med tilstandsovervåkning menes overvåkning av parameterne trykk, materialtap, sprekker, plastisk deformasjon og siging. Trykk omfatter både det ytre hydrostatiske trykket som forekommer på en gitt vanddybde, og det indre trykket forårsaket av strømmende hydrokarboner.
- Fiberoptiske sensorer har vist seg å være en teknologi som synes å ha et stort potensiale innenfor tilstandsovervåkning. Et mål for oppgaven vil være å gi en statusbeskrivelse og et overblikk over anvendelse av fiberoptiske sensorer til tilstandsovervåkning av undervannsproduksjonssystem.
- Evaluere kommersielt tilgjengelige teknologier, med fokus på erfaring, anvendelse og pålitelighet ved den aktuelle applikasjonen.

8.2 Case; Termisk ekspansjon

Alle L er oppgitt i meter, T er oppgitt i °C og α i m/m °C.

S = silica og C = Karbonstål

1: Vi antar i det første caset at temperaturen til fiber sensoren er lik stålet og røret opplever en endring i driftstemperatur. Dette fører til forskjellig ekspansjon for fiber og stål, se utregninger under. Merk at en gjennomsnittstemperatur for stålet er brukt og at stålet ikke vil holde en temperatur lik brønnstrømmen, disse faktorer har ikke blitt vektlagt i disse eksempler.

$$\begin{aligned}
 L &:= 300 \\
 T_0 &:= 65 \\
 T_1 &:= 70 \\
 \alpha_c &:= 11.7 \cdot 10^{-6} \\
 \\
 \alpha_s &:= 0.55 \cdot 10^{-6} \\
 \\
 dL_c &:= L \cdot \alpha_c \cdot (T_1 - T_0) = 0.018 \\
 \\
 dL_s &:= L \cdot \alpha_s \cdot (T_1 - T_0) = 8.25 \cdot 10^{-4} \\
 \\
 dL_{cs} &:= dL_c - dL_s = 0.017
 \end{aligned}$$

2: Hvis vi antar de samme antagelsene som i case 1, men røret (og sensor) opplever en større temperaturforskjell grunnet oppstart av produksjon vil dette føre til større forskjeller i termisk ekspansjon, se utregninger under.

$$\begin{aligned}
 L &:= 300 \\
 T_0 &:= 7 \\
 T_1 &:= 70 \\
 \alpha_c &:= 11.7 \cdot 10^{-6} \\
 \\
 \alpha_s &:= 0.55 \cdot 10^{-6} \\
 \\
 dL_c &:= L \cdot \alpha_c \cdot (T_1 - T_0) = 0.221 \\
 \\
 dL_s &:= L \cdot \alpha_s \cdot (T_1 - T_0) = 0.01 \\
 \\
 dL_{cs} &:= dL_c - dL_s = 0.211
 \end{aligned}$$

3: Hvis vi antar en dårlig isolert fiber sensor som opplever en temperatur som er forskjellig fra rørtemperaturen vil forskjell i termisk ekspansjon øke, se beregninger under. Her er det antatt en endring i operasjonstemperatur.

$$\begin{aligned}
 L &:= 300 \\
 T_{0s} &:= 7 & T_{0c} &:= 60 \\
 T_{1s} &:= 8 & T_{1c} &:= 70 \\
 \alpha_c &:= 11.7 \cdot 10^{-6} \\
 \\
 \alpha_s &:= 0.55 \cdot 10^{-6} \\
 \\
 dL_c &:= L \cdot \alpha_c \cdot (T_{1c} - T_{0c}) = 0.035 \\
 \\
 dL_s &:= L \cdot \alpha_s \cdot (T_{1s} - T_{0s}) = 1.65 \cdot 10^{-4} \\
 \\
 dL_{cs} &:= dL_c - dL_s = 0.035
 \end{aligned}$$

4: Hvis vi antar en dårlig isolert fiber sensor som opplever en temperatur som er forskjellig fra rørtemperaturen vil forskjell i termisk ekspansjon øke, se beregninger under. Her er det antatt produksjonsoppstart.

$$L := 300$$

$$T_{0s} := 7$$

$$T_{0c} := 7$$

$$T_{1s} := 8$$

$$T_{1c} := 70$$

$$\alpha_c := 11.7 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_s := 0.55 \cdot 10^{-6}$$

$$dL_c := L \cdot \alpha_c \cdot (T_{1c} - T_{0c}) = 0.221$$

$$dL_s := L \cdot \alpha_s \cdot (T_{1s} - T_{0s}) = 1.65 \cdot 10^{-4}$$

$$dL_{cs} := dL_c - dL_s = 0.221$$