



Parviz Yari

Maanalaisten öljy- ja kaasuputkien halkeamien analysointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

29.8.2022

Tekijä	Parviz Yari
otsikko	Maanalaisten öljy- ja kaasuputkien halkeamien analysointi
sivumäärä	45 sivua + 30 liitettä
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Jyrki Kullaa
<p>Öllyteollisuuden laajentuessa maalla ja merellä olevat laitteet ja öljyn ja kaasun siirtolinjat ovat altistuneet vakavasti ulkoisten voimien ja ympäristön korroosion aiheuttamille mekaanisille vaurioille. Halkeamien esiintyminen energiansiirtoteräsputkien rungossa voi olla vaarallista, jos halkeaman geometriset mitat ovat tiettyä kokoa suurempia.</p> <p>Hitsauksen aiheuttamat jäännösjännitykset hitsauslinjan ympärillä ovat aiheuttaneet kriittisiä halkeamia hitsauslinjan ympärillä oleville alueille. Halkeaman etenemisen jokaisessa vaiheessa käytetään yksittäisiä elementtejä Abaqus Modeling -ohjelmiston elementtime-netelmässä halkeaman kärjen yksittäisen jännitysalueen analysointiin. Pitkittäisten, säteittäisten, kehämäisten tai yhdistelmähalkeamien muodostuminen putkiin voi olla ongelmallista, kriittisemmässä tilassa olevat halkeamat ovat kasvaneet, mikä johtaa lopulta putkilinjan rikkoutumiseen.</p>	
Avainsanat	Elementtikomponentit, öljyn ja kaasun siirtolinjat, halkeaman etenemisreitti.

Author	Parviz Yari
Title	Crack analysis of underground oil and gas pipes
Number of pages	45 pages + 30 Annex
Degree	Bachelor of Engineering
Degree programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructor	Jyrki kullaa, Principal lecturer
<p>As the oil industry expands, onshore and offshore equipment and oil and gas transmission lines have been severely exposed to mechanical damage caused by external forces and environmental corrosion. The occurrence of cracks in the body of energy transfer steel pipes can be dangerous if the geometrical dimensions of the crack are larger than a certain amount.</p> <p>Residual stresses caused by welding around the welding line have caused critical cracks in the areas around the welding line. At each stage of crack propagation, individual elements are used in the element method of the Abaqus Modeling software to analyze the individual stress range of the crack tip. The formation of longitudinal, radial, circumferential, or composite cracks in the pipes can be problematic, the cracks in the more critical state have increased, eventually leading to pipeline rupture.</p>	
Keywords	Finite components, oil and gas transmission lines, crack propagation route.

Sisällys

1. Johdanto	1
2. Teräsputket, joita käytetään öljy- ja kaasulinjoissa	2
2.1 Öljy- ja kaasulinjoissa käytettyjen putkien tyyppiä.	2
2.2 Putkenvalmistusmenetelmät	3
2.3 Suorahitsausputkien haitat ja edut spiraaliputkiin	4
3. Metallien korroosion tyypit	5
3.1 Yleinen korroosio (Uniform Corrosion)	5
3.2 Galvaaninen korroosio (Galvanic Corrosion).	7
3.3 Rakokorroosio (Crevice Corrosion).	8
3.4 Pistekorroosio (Pitting Corrosion).	9
3.5 Rakeiden välinen korroosio (Intergranular Corrosion).	10
3.6 Mikrobiologinenkorroosio (Microbiological corrosion)	11
4. Putkilinjojen jännityskorroosio halkeilu	13
4.1 Jännityskorroosio (SCC)	14
4.2 Metallurgiset vaikutukset	16
4.3 Sähkökemialliset vaikutukset	16
5. Jännityskorroosiomekanismit	16

6. Halkeamien tyypit	18
6.1 Väsymyksestä johtuva halkeilu (Fatigue Cracking)	18
6.2 Mitä voidaan tehdä väsymiskorroosion vähentämiseksi?	19
6.3 Ympäristön Halkeilu (Environmental cracking)	19
6.4 Vedyn induktiohalkeama	20
6.5 Menetelmät jännityshalkeilun estämiseksi	23
7. Tutkimuksen toteutusmenetelmä	23
7.1.Murtumismekanismit	24
7.1.1 Sitkeä murtuma	24
7.1.2 Hauras murtuma	25
7.2 Griffithin teoria hauraalle murtumalle	25
8. Särön kasvu (Crack growth).	27
8.1 Pitkittäishitsattujen putkien ulkoseinien pituussuuntaisten halkeamien tutkiminen elementtimenetelmällä.	27
8.2 Prosessimallinnus Abaqus-ohjelmistolla.	29
8.3 Ulkoisen halkeaman sisältävän putken mallintaminen.	29
8.4 Putken rakenteen tiedot.	30

8.5. Interaction (XFEM) -menetelmä	32
8.6. Kuormitus ja reunaehdot	33
9. Verkotus.	34
9.1 Elementin muoto	35
9.2 Mallintamisen tulokset	36
9.3 Ulkoinen pitkittäinen halkeama (ulkohalkoja)	37
9.4 Yhteenveto	39
Lähteet	44
Liitteet	

1. Johdanto

Nykyään teräsputkilla on tärkeä rooli maakaasun siirtoteollisuudessa. Putkilinjat ovat tärkein tapa kuljettaa öljyä ja kaasua kaikkialla ympäri maailmaa.

Linjojen toiminnan turvallisuus on aina ollut siirtoyhtiöissä tärkeää, sillä johtojen vikaantuminen voi aiheuttaa paljon aineellisia, inhimillisiä ja sosiaalisia menetyksiä. Putkien verkosto altistaa putken eri osat erilaisille olosuhteille ja aiheuttaa siksi erilaisia vaurioita.

Ilman tieteellistä tutkimusta on erittäin vaikeaa ja jopa mahdotonta ennustaa seuraavan vian sijaintia. Tutkimukset ovat erittäin tarpeellisia ilmiöiden syyn selvittämiseksi, ja jos tätä ilmiötä ei esiintynyt muissa kaasun siirtojohtojen osissa, voidaan näiden vikojen esiintymiseen vaikuttava parametri saada erikseen.

Putken rungossa on aina kohtia, joissa (erilaisilla jännityksillä ja venymällä) korkeimmalla paineella sen sisällä virtaava neste aiheuttaa halkeamia eri suuntiin.

Kriittisissä olosuhteissa halkeamat kasvavat ja aiheuttavat lopulta putkilinjan vaurioitumisen. Pienin seuraus tästä putkilinjan viasta on vuoto ja sitä seuraava linjan repeämä, mikä aiheuttaa suuria kustannuksia ja riskejä. Tämän ansiosta koneinsinöörit voivat analysoida halkeaman ja raportoida siirtoprosessin jatkumisesta tai pysäyttää sen ja korjata viallisen osan. Tässä tutkimuksessa pyrimme löytämään ne kriittiset halkeamat.

Tässä opinnäytetyössä, simuloimalla ja analysoimalla halkeamia Abaqus-ohjelmistolla, tarkistamme jännitysintensiteetin arvot halkeaman kärjen eri kulmissa.

Sen lisäksi myös särön etenemiseen simulointi.

2. Teräsputket, joita käytetään öljy- ja kaasulinjoissa

Tärkeitä putkien korroosion tekijöitä ovat lämpötila, pH, kalsium, kloori, sulfaatti sekä putkien ja liitosten tyyppi. Käytetyt metallityypit ovat kupari, lyijy ja teräs. Teräsputket jaetaan myös kolmeen luokkaan: tavallinen teräs (Mild Steel), galvanoitu teräs (Galvanized Steel) ja ruostumaton teräs (Stainless Steel). Galvanoidut putket valmistetaan asettamalla terästä hauteeseen sulatteen päälle. Sinkki (Zn) asettuu teräksen pinnalle kylvyssä ja suojaa sen pintaa korroosiolta. Käyttämällä seosaineita, kuten kromia ja nikkeliä, ruostumattomat teräkset pystyvät muodostamaan pinnalle passiivisen kerroksen, joka estää nestettä joutumasta kosketuksiin metallipinnan kanssa. Näitä teräksiä käytetään paikoissa, joissa korroosionopeus on keskimääräinen ja korkea, ja ainoa rajoittava tekijä niiden käyttöä on niiden korkea hinta. Kloori on näiden terästen päävihollinen, ja paikoissa, joissa kloorin määrä on merkittävä, väärin valitulla ruostumattomalla teräksellä on paljon korkeampi korroosionopeus kuin tavallisella teräksellä.

2.1 Öljy- ja kaasu linjoissa käytettyjen putkien tyyppiä

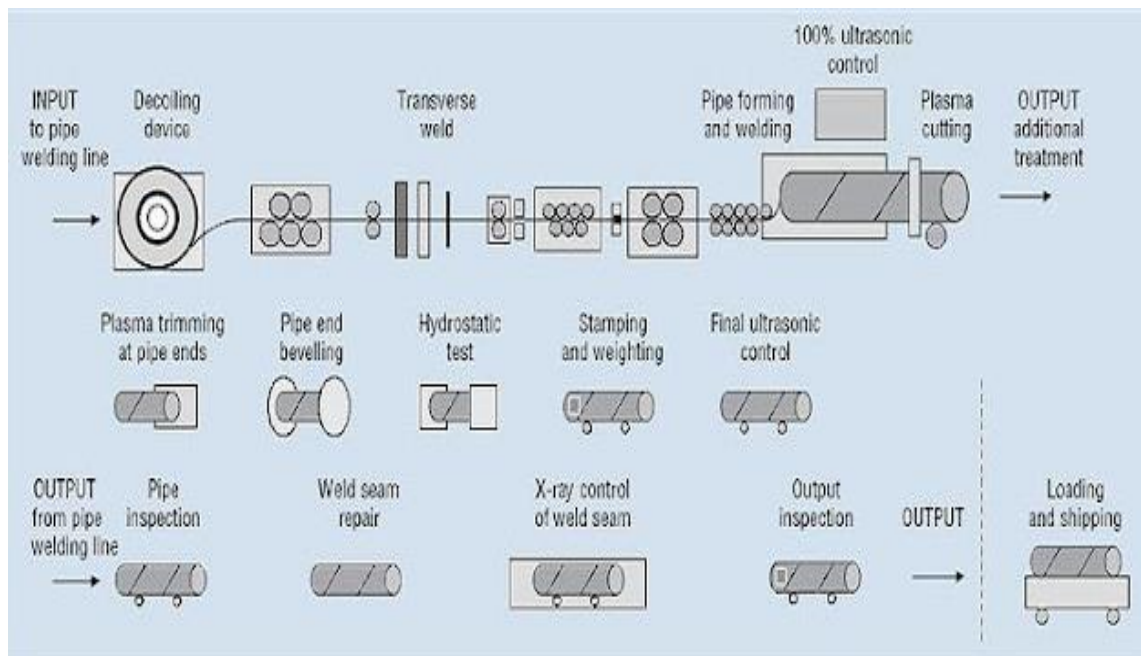
Energian putkistoja on kaksi (2) yleistä tyyppiä maaöljyputket ja kaasuputket.

Öljy- raakaöljyputkien verkko ovat raakaöljyn sekä puhdistettu tuotteiden linjalla. Lisäksi on erittäin haihtuvia nesteitä (HVL) ja hiilidioksidi linjat (CO₂). Suuremmat rajat ylittävät raakaöljyn siirtoputket tuovat raakaöljyn tuottamaan alueita jalostamoille.

Maakaasua kuljetetaan läpi siirtoputkien avulla, jotka koostuvat suurista halkaisijan teräsputkista. Teollisuuden standardit öljy- ja kaasuputket ovat yleensä: API 5 L Psl1 / Psl2 materiaalia Gr. A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80.[1.]

2.2 Putkien valmistusmenetelmät

Putkien terästen tärkeimmät mekaaniset ominaisuudet ovat vetolujuus, sitkeys ja korkea iskunkestävyys, hitsattavuus, korroosion ja halkeilun kestävyys, toisaalta ne ovat halvempia kuin seosteräkset. Halkaisijaltaan suurissa öljy- ja kaasulinjoissa käytettävät putket valmistetaan viidellä eri tavalla. Neljä menetelmästä on suoraa hitsausta ja viimeinen tapa on spiraalihitsaus. Valmistettaessa putkia U&O- ja C&O-menetelmillä, jotka ovat lähes samanlaisia, putkilevy on aluksi C- tai U-muotoinen. Ja seuraavassa vaiheessa putki saa alkuperäisen muotonsa ja se valmistetaan suoralla putken hitsauslinjalla. Rullamuovausmenetelmässä useiden telojen välinen levy saa tarvittavan kaarevuuden. [2.]



Kuva 1. Spiraaliputkien hitsausprosessi [2].



Kuva 2. Teräsputki [2].

2.3 Suorahitsausputkien haitat ja edut spiraaliputkiin verrattuna

1. Tämän tyyppisten halkaisijaltaan suurien putkien valmistuksessa on monia ongelmia.
2. Näillä putkilla on hitsausalueella hyvin erilaiset jännitykset kuin muilla alueilla.
3. Spiraaliputkissa on kaksi kierrehitsausta. Niitä on paljon helpompi valmistaa suurikokoisina kuin suoraan hitsattuja saumaputkia.
4. Spiraaliputkilla on enemmän joustavuutta asennuksen aikana ja myös paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin muilla paksuilla putkilla.
5. Suorahitsattujen putkien rakentamisessa koneeseen työnnetään metallilevyjä putken ulostulon suuntaan, mutta spiraaliputkia valmistettaessa nauha ja putken akselit muodostavat kulman keskenään, jota kutsutaan tulo- tai muotoilukulmaksi.

6. Suorien hitsaus putkien rakenteessa putken valmistus nopeus riippuu hitsausnopeudesta ja osien leveydestä, mutta kierreputkessa putken ulostulonopeus on sama kuin nauhan nopeus.

Öljy- ja kaasuputkien hitsaus on erityisen vaativaa. Kierreputkissa hitsaus on osajauhetyyppiä (SAW). Tämän tyyppisessä hitsauksessa käytön aikana vallitsevasta korkeasta lämmöstä ja lämmön tunkeutumisesta hitsauskohdan ympärillä oleville alueille toimenpiteen jälkeen syntyy merkittäviä jäännösjännityksiä hitsauskohdassa ja hitsausalueen ympärillä olevia lämpövaikutuksia (HAZ), Nämä jännitykset voivat edelleen aiheuttaa putken vaurioitumisen. Jäännösjännitysten vähentämiseksi ja putken testaamiseksi sekä vuotojen ja halkeamien välttämiseksi hitsatuilla alueilla putkelle tehdään hydrotesti. [3, s. 41.]

3. Metallien korroosion tyypit

3.1 Yleinen korroosio (Uniform Corrosion)

Yleinen korroosio eli tasainen korroosio on toinen kahdesta pääkorroosiotyypistä. Yleisessä korroosiossa metalli syöpyy samalla nopeudella koko pinnaltaan. Tämä johtuu anodisen ja katodisen alueen jatkuvasta paikan vaihtumisesta. Tasainen korroosio on paikallista korroosiota (toinen pääkorroosiotyyppi) harmittomampaa ja se on helpommin havaittavissa. Tyypillisesti yleistä korroosiota esiin-

tyy erilaisissa ilmasto-olosuhteissa suojaamattomilla metallipinnoilla. Myös teollisissa prosesseissa saattaa esiintyä yleistä korroosiota prosessiliuoksien kanssa kosketuksissa olevilla metallipinnoilla. [4, s.11.]



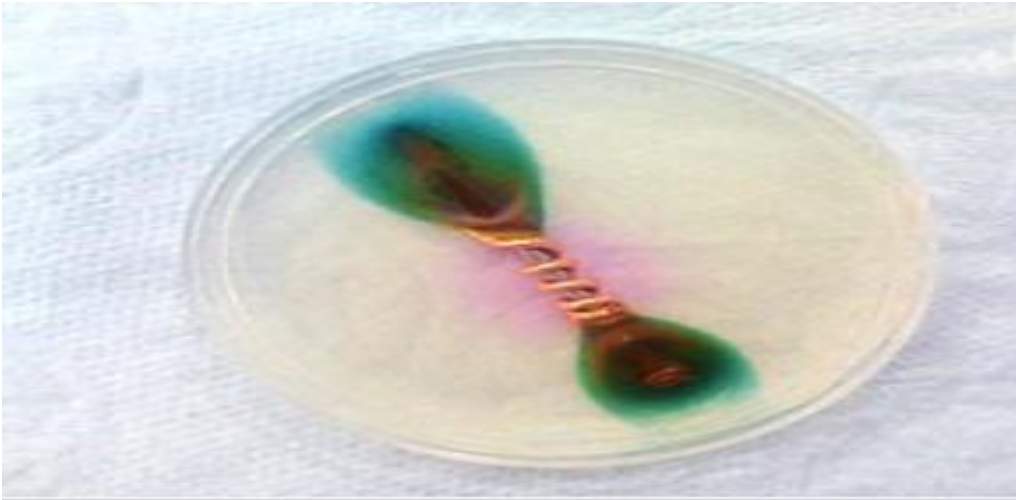
Kuva 3. Yleinen korroosiota [4].

Menetelmiä tasaisen korroosion estämiseksi ovat:

- Käytetään paksumpaa materiaalia materiaalin ohenemisen vuoksi.
- Maalien tai metallipinnoitteiden käyttö, kuten pinnoitus ja galvanointi.
- Katodinen ja anodinen suojaus.

3.2 Galvaaninen korroosio (Galvanic Corrosion)

Galvaanisen korroosion voidaan katsoa johtuvan kahden heterogeenisen aineen koskettamisesta syövyttävässä ympäristössä. Monissa tapauksissa galvaaninen korroosio aiheuttaa materiaalin nopeaa hajoamista ja heikentää korroosionkestävyyttä ja voi aiheuttaa laajoja vaurioita. [5.]



Kuva 4. Elektronivirta raudassa ja kuparissa [5].

Yleisiä menetelmiä galvaanisen korroosion minimoimiseksi tai estämiseksi ovat:

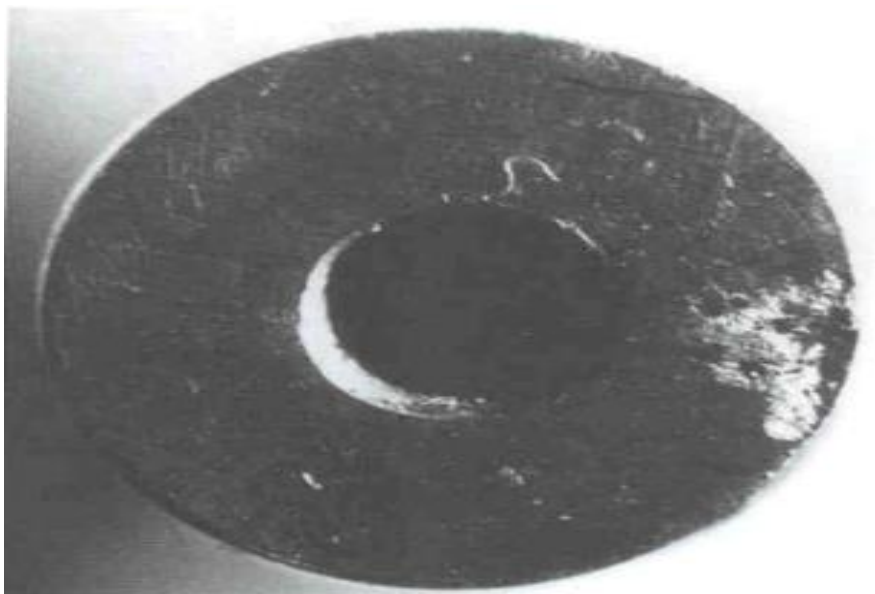
- Valitse saman tyyppisten materiaalien yhdistelmät tai parit
- Ympäristön korroosio
- Käytettävä suojapinnoitteita
- Ympäristön korroosion torjunta. [5.]



Kuva 5. Galvaaninen reaktio, joka johtuu ruostumattoman teräslevyn kosketuksesta tavalliseen hiiliteräkseen [5].

3.3 Rakokorroosio (Crevice Corrosion)

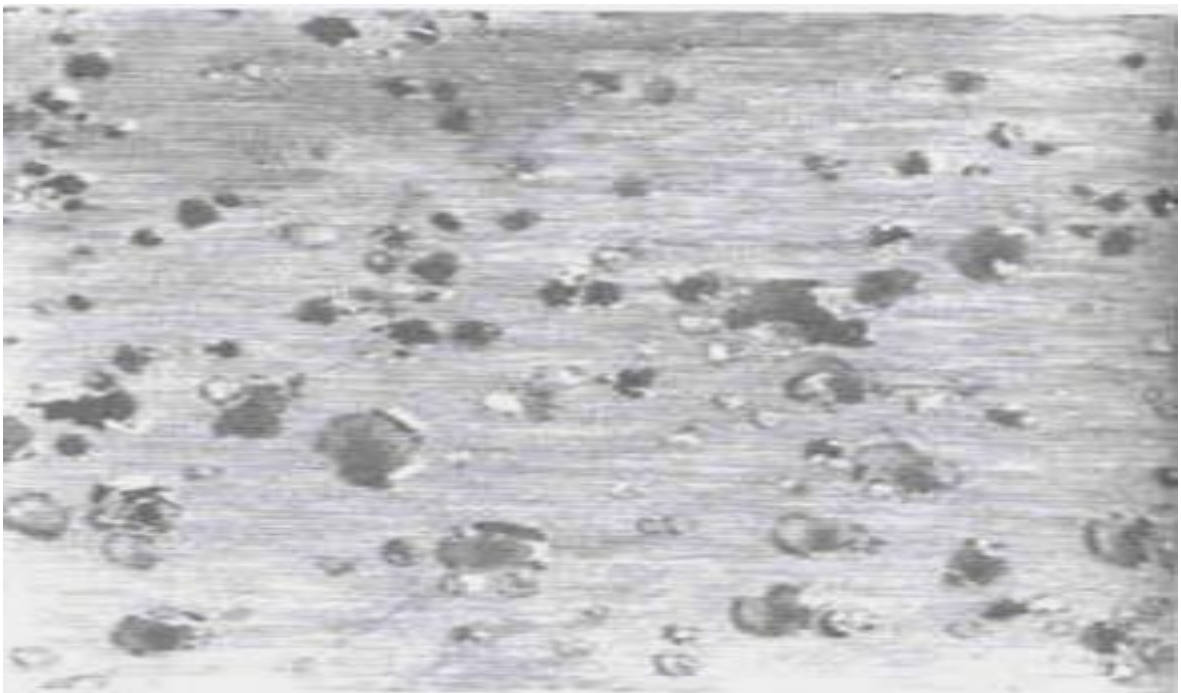
Halkeamakorroosio on sähkökemiallinen hapetus-pelkistysprosessi, joka tapahtuu seisovien ja loukkuun jääneiden nesteiden vuoksi pienillä alueilla, kuten kulmissa, syvennyksissä tai suojatulla pinnalla (tiiviste, hiekkakerrostuma, aluslevy tai puristin).



Rakokorroosiota estetään pitämällä pinnat puhtaina, välttämällä liitoksissa rakoja ja onkaloita sekä estämällä nesteen pääsy kapeaan ragoon esim. eristysaineella. Hyvää rakokorroosion vastustamista on niittiliitoksen korvaaminen liimaliitoksella. [6.]

3.4 Pistekorroosio (Pitting Corrosion)

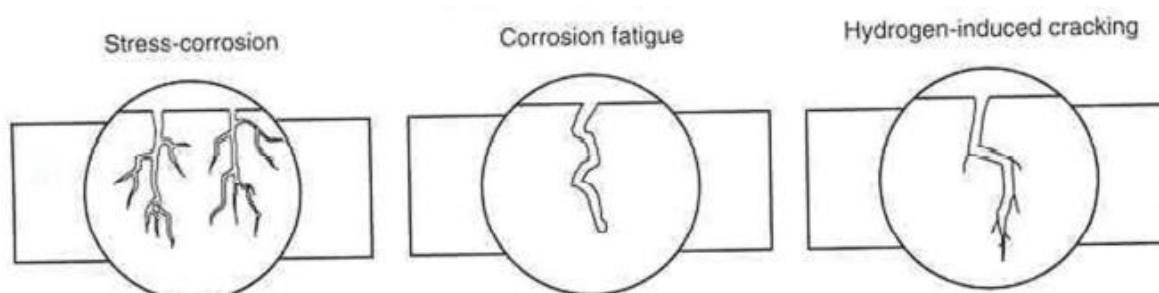
Pistekorroosion hyökkäykset ovat kapeiden ja syvien reikien muodossa. Nämä hyökkäykset kulkevat nopeasti läpi, muuten muu osa säilyy ehjänä. Korroosio voi kulkea kappaleen läpi muutamassa päivässä ilman varsinaista huomattavaa painonpudotusta. Pistekorroosio voi olla todella vakava mm. kuorinpinnoitetussa teräksessä ulkoavo- sekä avovesiympäristössä. Esimerkki tästä korroosiosta on esitetty kuvassa (7). [6.]



Kuva 7. Pistekorroosio Ruostumattoman teräksen korroosio

Pistekorrosio pahenee liuksissa, jotka sisältävät kloridi-, bromidi- tai hypokloriitti-ioneja. Sulfidien ja H_2S :n läsnäolo on myös haitallista tämän tyyppiselle korroosiolle. Ruostumattomat teräkset meriympäristöissä ovat erittäin herkkiä tämän tyyppiselle korroosiolle. Esimerkiksi päällystämättömässä ruostumattomassa teräsputkessa pistekorrosiota tapahtuu, kun passiivinen oksidikerros vaurioituu ja korrosio voi päästä terveille alueille. Jos korroosiota ei poisteta pinnasta, metalli jatkaa syöymistä ja pieniä onteloita muodostuu. Nämä ainekset jäävät loukkuun onteloiden pohjalle ja korroosionopeus kasvaa onteloiden kasvaessa. [6.]

Ontelot voivat esiintyä monissa muodoissa:

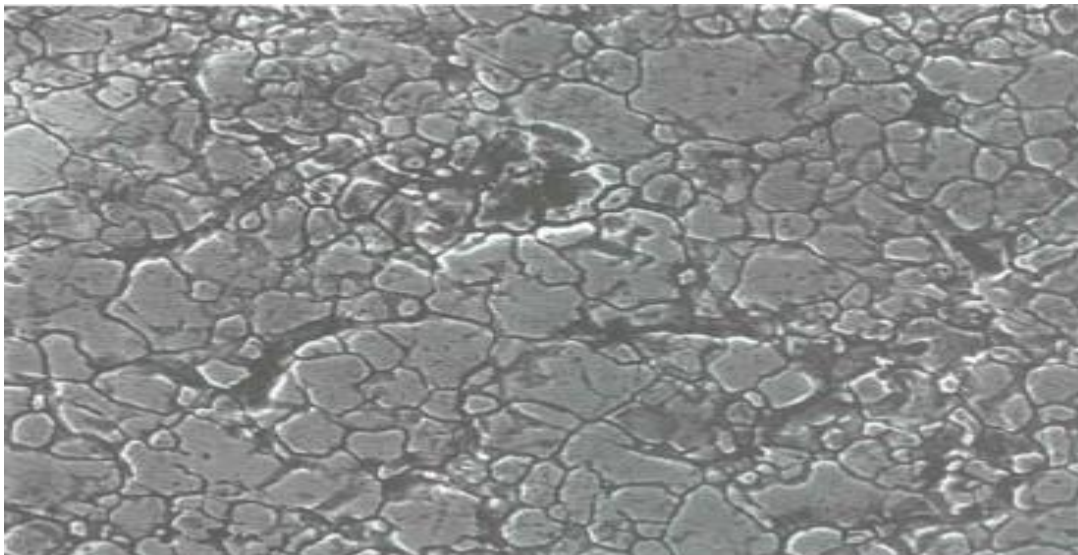


Kuva 8. Korroosiotyypit.

3.5 Rakeiden välinen korrosio (Intergranular Corrosion)

Rakeiden välinen korrosio on syövyttävä hyökkäys, jonka kehitys on ensisijaisesti raerajaa pitkin ja voi aiheuttaa äkillisen laitevian, erityisesti jos kyseessä on vetojännitystä. Tietyissä olosuhteissa raerajat kestävät paikallista korroosiota, kun taas muu materiaali pysyy ehjänä. Tämä metalliseos menettää yhdenmukaisuuden ja sen mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. Tämän tyyppiset korroosion syyt ovat epäpuhtaudet raerajalla tai seosaineiden paikallinen rikastuminen tai ehtyminen. Monet seokset voivat vaurioitua rakeiden välisessä korroosiossa. Mutta yleisin esimerkki on ruostumattomien terästen rakeiden välinen korrosio, joka johtuu kromikarbidin puutteesta raerajaonteloissa lämpöherkistyksen tai

lämpö kierron aikana. Raerajakorroosiota voivat aiheuttaa raerajoille suotautuvat epäpuhtaudet ja tietyn seosaineen rikastuminen raerajoille tai köyhtyminen matriisista raerajojen läheisyydessä raeraja erkaumien vuoksi. Esimerkiksi jos alumiini sisältää epäpuhtautena rautaa, jonka liukoisuus matriisiin on pieni, se suotautuu raerajoille ja aiheuttaa raerajakorroosiota. [6.]

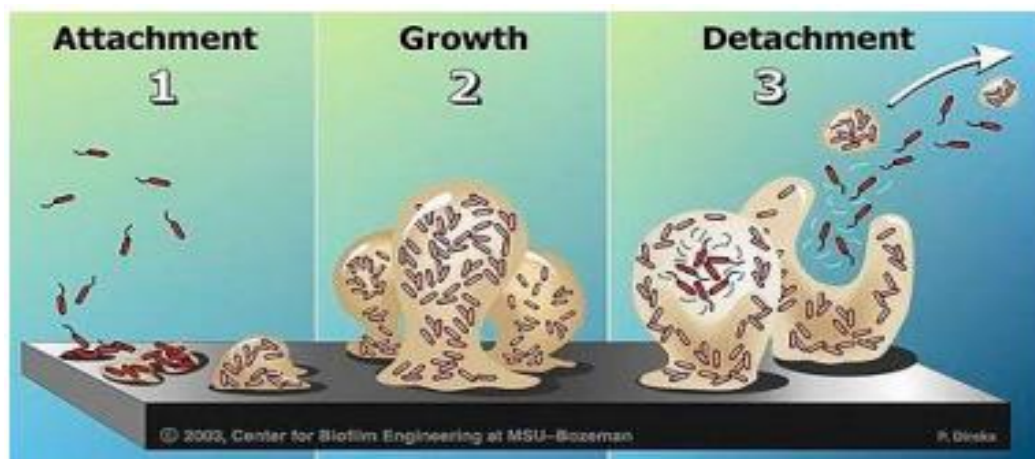


Kuva 9. Rakeiden välinen korroosio.

3.6 Mikrobiologinen korroosio (Microbiological corrosion)

Mikrobiologinen korroosio eli MIC (microbiologically influenced corrosion) tarkoittaa mikrobien aiheuttamaa syöpymistä. Putken pintaan voi kiinnittyä bakteereja, levää, sieniä ja muita pieneliöitä, jotka voivat vaikuttaa korroosioon muuttamalla metallin ja liuoksen rajapinnalla vallitsevia elektrokemiallisia olosuhteita. Eliöt kasvavat putkipinnoilla tyypillisesti biofilminä, joka koostuu mikrobeista ja niiden erittämistä polysakkarideista. Mikrobit voivat tuottaa orgaanisia ja epäorgaanisia

happoja sekä solun ulkopuolisia, korroosiota edistäviä aineenvaihdunnan tuotteita sekä konsentroida biofilmin alle korroosion kannalta tärkeitä klorideja ja happi-, vety- ja metalli-ioneja. [7.]



Kuva 10. Mikrobiologinen korroosio [7].

Teollisuus, joihin mikrobikorroosio vaikuttaa

- Kemiankäsittelyteollisuus: ruostumattomasta teräksestä valmistetut säiliöt, putkistot ja laippaliittimet, erityisesti hitsatuilla alueilla vedenpainetustuksen jälkeen.
- Ydinteollisuus: hiiliteräksestä valmistetut putket ja säiliöt; Jäähdytysputket kupari-nikkeli-seoksesta, ruostumattomasta teräksestä, messingistä ja alumiinipronssista erityisesti rakennusvaiheessa, vedenpainetustuksessa ja seisokeissa.
- Ranta- ja meri -öljy- ja kaasuteollisuudessa: Öljyn ja kaasun siirtojärjestelmät, erityisesti suolaisissa ympäristöissä, jotka sisältävät sulfaattia vähentäviä bakteereja - sulfidin tuotanto.

- Poraus- ja putkityöteollisuus (maaperässä): muta ja savi, joissa on korkea vesi ja lähes neutraali happamuus ja orgaanisen aineksen hajoaminen.
- Valtateiden kunnossapito teollisuus: Putket teiden ja siltojen alle.
- Merenkulkuala: laivojen ja veneiden vakava tuhoutuminen. [7.]

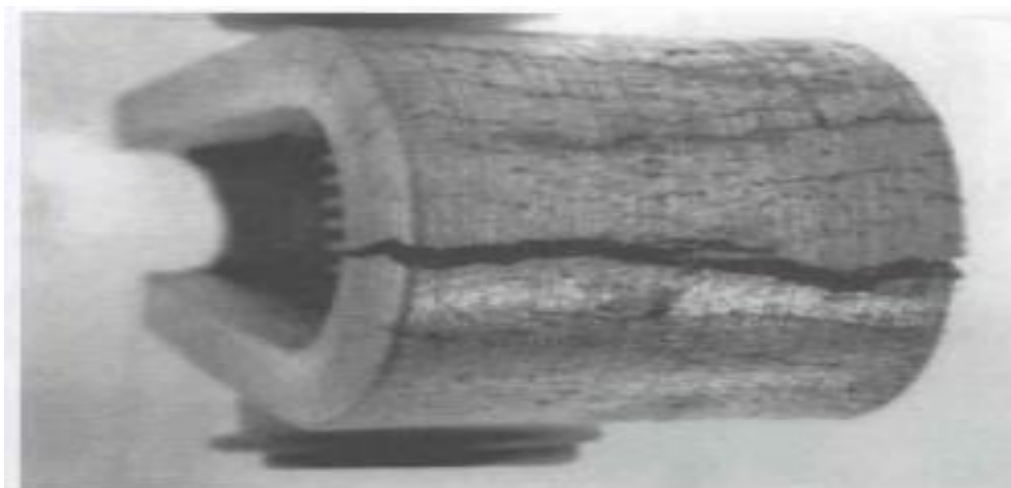
Menetelmiä mikrobiologinenkorroosion ehkäisemiseksi

- Jatkuva mekaaninen puhdistus.
- Biosidinen kemiallinen reaktio bakteeripopulaation hallitsemiseksi.
- Säilytystilan tyhjennys ja kuivaus kokonaan.

4. Putkilinjojen jännityskorroosio halkeilu

Stress corrosion cracking (SCC) - korroosion aiheuttama halkeilu, jota esiintyy metalliseoksissa, joissa on suuri vetojännitys. Halkeamat alkavat pinnasta ja menevät sisäänpäin. On huomattava, että jännitys voi johtua kylmätyöstöisestä, muovauksesta tai ulkoisesta kuormituksesta. Jännityskorroosio-halkeilua esiintyy tietyillä seoksilla seuraavissa kynnysolosuhteissa:

- a) Erityinen syövyttävän ympäristön liuoksen koostumus
- b) Pienin vetojännitys
- c) Lämpötila
- d) Metallin koostumus
- e) Metallinrakenne



Kuva 11. Jännityskorroosio särö.

Jännityskorroosion aiheuttama murtopinta muistuttaa hauraan murtuman murtopintaa, vaikkakin sen aiheuttaja itse asiassa on paikallinen korroosio. Kappaleen efektiivisen poikkipinnan pienentyessä kuormitus lisääntyy, jolloin murtuminen saa mekaanisen luonteen. Murtuminen voi edetä joko raerajoja pitkin tai rakeiden lävitse. Jännityksen lisääntyminen vähentää murtumiseen johtavaa aikaa. Jännityksen on ylitettävä tietty rajajännitys, ennen kuin jännityskorroosiota esiintyy. Joissakin tapauksissa jännityskorroosiota saattaa aiheuttaa jopa vain 10 % materiaalin myötörajasta oleva jännitys. [8, s.569.]

4.1 Jännityskorroosio (SCC)

Jännityskorroosiossa metalliin muodostuu murtumia korroosion ja pinnassa vaikuttavan vetojännityksen vaikutuksesta. Jännityskorroosiomurtumaan johtava korroosioympäristö on spesifinen kullakin materiaalilla. Vetojännitystila puolestaan voi olla seurausta ulkoisesta kuormituksesta ja/tai sisäisistä jännityksistä. Ulkoinen kuormitus voi aiheutua seuraavista syistä:

1-staattisesta kuormasta 2-termisistä mittamuutoksista 3-ruuviliitoksen kiristysvoimasta 4- staattisesta paineesta 5- pyörimisliikkeen hitausvoimista värähtelyistä.

Sisäisiä jännityksiä aiheuttavat esimerkiksi:

1- kylmämuokkaus 2- lastuaminen 3- leikkaus 4- lävistäminen 5- hitsaus.

1920-luvulla kattiloissa käytettyjen hiiliputkien halkeilusta ja räjähtämisestä tuli vaarallinen ja vakava ongelma. Pitkään on uskottu, että jännityksestä johtuvan halkeilun esiintyminen edellyttää kolmen tekijän samanaikaista läsnäoloa, jotka ovat:

- Syövyttävä ympäristö.
- Tämän tyyppiselle halkeilulle herkän metallin tai seoksen läsnäolo.
- Vetojännitys metallissa tai seoksessa.

Esimerkiksi kuumat vesipitoiset kloridiliuokset voivat aiheuttaa halkeamia ruostumattomiin teräksiin huomattavalla nopeudella. Niillä ei kuitenkaan ole tällaista vaikutusta hiiliteräksiin, alumiiniin ja muihin ei-rautametalliseoksiin.

Voidaan siis sanoa, että jokainen syövyttävä ympäristö ei pysty vaikuttamaan kaikkiin metalliseoksiin ja aiheuttamaan niissä jännityshalkeilua. Pikemminkin mikä tahansa syövyttävä ympäristö rajoittuu rajoitettuun määrään metalleja ja seoksia, ja se voi aiheuttaa jännityshalkeamia.

Kaikkien insinöörien on tunnettava erilaiset metalliseosjärjestelmät / syövyttävät ympäristöt, jotka pystyvät tuottamaan jännityksen aiheuttamaa halkeilua lejeeringin jännityksen läsnä ollessa, ja välttää näitä järjestelmiä seosten suunnittelussa ja valinnassa. [8, s.435.]

4.2 Metallurgiset vaikutukset

Yleensä puhtaat metallit kestävät jännitys halkeilua paremmin kuin metalliseokset.

Esimerkiksi puhdas kupari on haljennut vähän rasitusta testeissä, nämä olosuhteet ovat paljon ankarammat kuin kenttäolosuhteet. Lähes kaikki seokset ovat herkkiä tietyillä ympäristöllä. Tämänlaisissa herkkyyksillä, kun voima kasvaa niin kasvaa myös herkkyys.

Jännityksen aiheuttamaa halkeilua tapahtuu joko rakeisesti tai rakeiden välisesti, mutta halkeamien kasvu seuraa aina tiettyä mikroskooppista kuviota, joka on linjassa vetovoiman kanssa. [8, s.619.]

.

4.3 Sähkökemialliset vaikutukset

Sähkökemiallisella potentiaalilla on merkittävä rooli jännityksen aiheuttamassa halkeilussa.

5. Jännityskorroosiomekanismit

Materiaalin alttius jännityskorroosiolle on riippuvainen sen mikrorakenteesta, dislokaattiorakenteesta ja faasien termodynaamisesta stabiilisuudesta.

Murtumien ilmenemiseen kuluva aika vaihtelee voimakkaasti materiaalista ja olosuhteista riippuen. Lämpötilan nousu ja aine konsentraatioiden väkevoitymisen nopeuttavat yleensä jännityskorroosio murtumien syntymistä ja etenemistä materiaalissa.

Jännityskorroosio voi edetä materiaalissa pääsääntöisesti kolmella eri mekanismilla. Raerajoilla etenevässä galvaanisessa jännityskorroosiossa korroosiolla on jännitystä suurempi vaikutus.

Jännityskorroosio voi edetä myös aktiivisen liukutason läheisyydessä, jolloin se heikentää kohtaa, kunnes siinä tapahtuu muodonmuutos. Muodonmuutoksen jälkeen syvemmällä oleva materiaali altistuu jännityskorroosiolle, ja sama mekanismi toistuu jälleen. Suojaavan oksidikalvon omaavissa materiaaleissa jännityskorroosion eteneminen voi aiheutua siitä, että jännitys rikkoo suojakalvon ja alla oleva materiaali altistuu korroosiolle. [8, s.809.]

Menetelmät käsitellä jännityskorroosiota

Yleensä on tarpeen käsitellä jännityksen aiheuttamaa halkeilua, kunnes tämän tyyppisen korroosion tuotannon kolme perustekijää, joilla on tärkeä rooli, on eliminoitu. Nämä kolme tekijää ovat, syövyttävä ympäristö, jännitysherkät halkeilevat seokset ja metalliin tai metalliseoksiin kohdistuvat vetojännitykset ulkoisten jännitysten tai materiaalin jäännösjännitysten muodossa. Joissakin kriittisissä tilanteissa ulkoiset rasitukset voidaan poistaa uudelleen suunnittelulla. (Mutta ei sisäisiä jäännösjännityksiä).

Toinen tapa materiaalinvalinta korroosioneston kannalta.

Korroosio voidaan rakenteissa ottaa huomioon useilla eri tavoilla, esimerkiksi

- lisäämällä ainesvahvuutta.
- valitsemalla käyttöympäristöön sitä varmasti kestävä jalomateriaali.
- suojaamalla rakennemetalli pinnoitteilla tai vedenalaisissa rakenteissa sähköisillä suojaustoimenpiteillä katodisesti. [8, s.833.]

6. Halkeamien tyypit

6.1 Väsymisestä johtuva halkeilu (Fatigue Cracking)

Halkeamia voi muodostua ajallisesti muuttuvaa kuormituksen alaisena ajoittain tapahtuvan plastisen muodonmuutoksen seurauksena. Koska jännitys keskittyy epäpuhtauksiin tai mekaanisiin uriin, paikalliset jännitykset voivat olla suurempia kuin myötörajat. Tämän seurauksena paikallista plastista muodonmuutosta tapahtuu hyvin pienessä mittakaavassa. Väsymys on ajasta riippuvainen vika, ja se voi ilmetä ilman näkyvää varoitusta. Uskotaan, että yli 95 % mekaanisista vioista johtuu väsymisestä. Väsymisvauriossa on tyypillisesti kolme erillistä vaihekomponenttia: halkeaman alkaminen, halkeaman kasvu ja lopullinen murtuma. Seuraava kuva esittää väsymiskorroosiota. [9.]



Kuva 12. (Fatigue Cracking) [9].

6.2 Mitä voidaan tehdä väsymiskorroosion vähentämiseksi?

1. Käytä kestävämpiä materiaaleja.
2. Korroosiotestaus.
3. Käytä puristusjännitystä.
4. Levitä osiin sopivat suojapinnoitteet. [9.]

6.3 Ympäristön halkeilu (Environmental cracking)

Ympäristö säröillä tarkoitetaan korroosiohalkeilua, joka johtuu olosuhteiden yhdistelmästä, joka voi nimenomaan johtaa johonkin seuraavista korroosio-vaurioista.

- Stress Corrosion Cracking (SCC)
- Korroosioväsymys
- Vetyhaurastumista

Jännityksiä, jotka aiheuttavat ympäristön halkeilua, syntyvät jäännöskylmätyöstä, hitsauksesta, hionnasta, lämpökäsittelystä tai niitä voidaan kohdistaa ulkoisesti huollon aikana, ja ollakseen tehokkaita niiden on oltava vetolujuus (toisin kuin puristus).

6.4 Vetyinduktiohalkeama

Vedyn aiheuttama krakkaus (HIC) on märkä-H₂S-krakkauksen muoto, joka syntyy yleensä metallien korkeasta vetyttöisyydestä. Mekanismi sisältää atomin vetäytymistä, joka julkaisee metallirakenteeseen. HIC:n aiheuttama halkeilu muodostuu pinnan suunnasta vanteen jännityksen suunnassa. Vedyn aiheuttama halkeilu on yleisempää happamissa palveluympäristöissä märän H₂S:n läsnäolon vuoksi. Jotkut muut elementit voivat edistää vetyhalkeilua.

Jotkut näistä alkuaineista ovat mm. arseeni, antimoni, seleeni ja syanidit.

H₂S: sää pidetään kuitenkin eniten vedyn aiheuttama halkeilu vaurioiden aiheuttajat öljy- ja kaasuteollisuudessa. HIC aiheuttaa rakkulavaurioita monille metalleille ja seoksille.



Vedyn aiheuttama halkeilu on yleisempää rautaseoksissa, sillä sen BCC-rakenteessa on rajoitettu liukumiskyky. HIC aiheuttaa yleensä vaurioita teräksille, joiden Rockwell C-kovuus on 22 tai enemmän suhteellisen alhaisissa lämpötiloissa. HIC voi esiintyä myös erilaisissa kohotettujen lämpötilojen prosesseissa, kuten esimerkiksi galvanointi, peittäminen, fosfointi, katodisuojaus, kaarihitsaus.

Märässä H₂S-ympäristössä HIC-mekanismi alkaa atomivedyn muodostumisesta, joka julkaisee kaikkialle metalliin tai metalliseokseen, joka kerääntyy metallirakenteen onteloihin tai epäpuhtauksiin. Kun nämä vetyatomit yhdistyvät muodostaen vetymolekyylin, se tuottaa korkean paineen ontelossa. Näin ollen H₂S pakottaa nämä vetyatomit metallirakenteisiin, mikä puolestaan vähentää metallin sitkeyttä ja vetolujuutta. [10.]



Kuva 13. (HIC:n aiheuttama räjähdys) [10].

SCC-räjähdys Argentiinassa osoittaa 24 tuuman, 7,3 mm:n paksuisen putkilinjan, joka on rakennettu API L5 X52 -luokan DSAW-hitsauksella. Työpaine räjähdys hetkellä on pienempi kuin suunniteltu sallittu paine ja murtopituus 38 metriä on raportoitu.

SCC:n historiaa on nähty maanalaisissa putkistoissa. SCC-halkeamat ovat yleensä pitkittäisiä ja kohtisuorassa putkilinjan ympäristöjännitykseen nähden. Usein jännityksen pääkomponentti on seurausta sisäisestä paineesta.



Kuva 14. SCC korkeapaineisessa ja halkaisijaltaan suuressa kaasunsiirtoputkessa [11, s.3].

SCC:n esiintyminen edellyttää kolmea ehtoa samanaikaisesti.

1. Vetojännitykset ovat suurempia kuin kynnysjännitykset, ja niihin liittyy usein dynaamisia komponentteja tai jännitysjaksoja.
2. Aine, joka on altis SCC:lle.
3. Syövyttävä ympäristö. [11.]

6.5. Menetelmät jännityshalkeilun estämiseksi

1. Ei käytetä jännityshalkeilua aiheuttavia kemikaaleja,
2. Testata kovuutta ja jännitystä.
3. Puristusjännitysten soveltaminen.
4. Käyttämällä tunnettuja materiaaleja, jotka eivät halkeile tietyissä ympäristöissä.
5. Työlämpötilan säätö, tai käytetyn lejeerinki sähkökemiallinen potentiaali. [11.]

7. Tutkimuksen toteutusmenetelmä

Nykyään jännityskorroosio halkeama tunnetaan öljy- ja kaasuputkien vikojen tärkeimpänä syynä. Pitkittäiset, kehämäiset, säteittäiset halkeamat tai näiden yhdistelmät näissä putkissa voivat olla ongelmallisia. Tässä raportissa tutkittiin maanalaisia öljyn ja kaasun siirtoputkia (API X65 tyyppi), joita käytetään laajasti energian siirtolinjoissa. Tässä tutkimuksessa Abaqus-ohjelmistoa käytettiin teräsputken pitkittäishalkeaman tutkimiseen.

Tutkittava putki on valmistettu (API X65) -teräksestä, jonka ulkohalkaisija on 0.025 m ja seinämän paksuus 0.003 m. ulkopinnassa on pituussuuntainen halkeama.

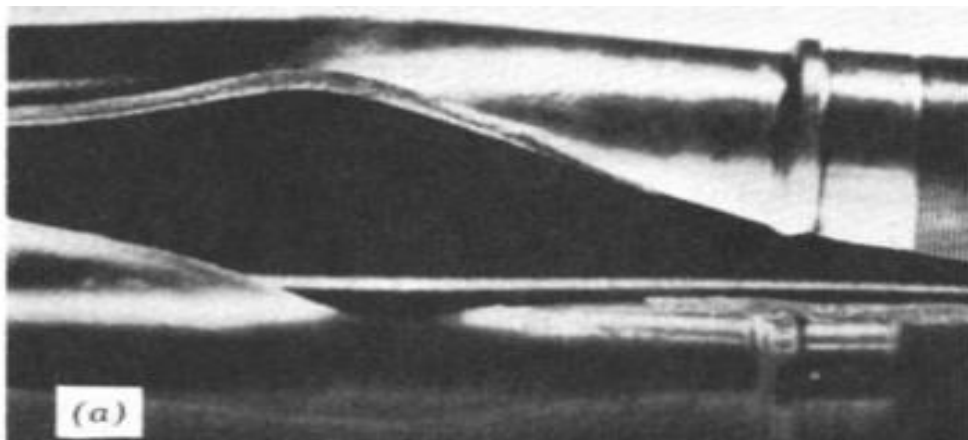
Tutkimuksessa halkeaman syvyys on 0.002 m ja sen pituus on 0.02 m. Sisäinen paine on 2 MPa ja murtolujuus 490 MPa.

Tämän tyyppinen muodonmuutos on myös peruuttamaton. Vika tapahtuu sen jälkeen, kun materiaali saavuttaa elastisen vaiheen lopun ja sitten muovifaasin. Tässä vaiheessa voimia kerääntyy, kunnes ne riittävät aiheuttamaan murtuman. Jos voimaa käytetään riittävästi, kaikki materiaalit hajoavat lopulta.

7.1. Murtumismekanismit

7.1.1 Sitkeä murtuma

Tämä murtumatyyppi on yleisintä niukkahiihisillä, seostetuilla teräksillä. Teräsmateriaalin pehmeys ja hyvä myötäävyys ovat ratkaisevia tekijöitä sitkeän murtuman syntymiseen. Kova ja hauras teräs myötää hyvin huonosti, jolloin sitkeän murtuman syntyminen tällaiselle materiaalille on hyvin epätodennäköistä. [12, s.4.]



Kuva 15. Sitkeä murtuma [12, s.4].

7.1.2 Hauras murtuma

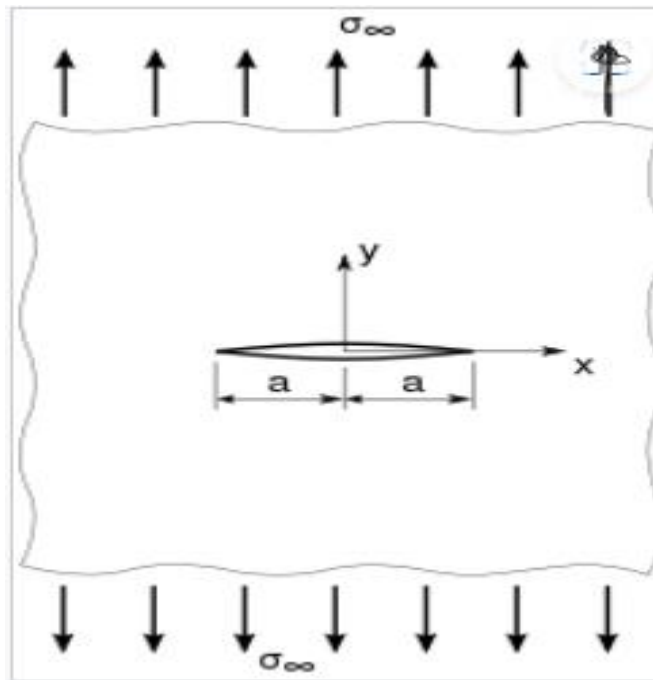
Haurasmurtuman erottaa sitkeästä murtumasta jo pelkällä ulkoisella, silmämääräisellä tarkastelulla. Sen murtopinta on tasaisempi ja poikkileikkauksen pinta-ala ei juurikaan muutu. Haurasmurtuman aiheuttaja voi olla sama kuin sitkeälläkin, mutta erottavia tekijöitä on silti suuri määrä. Erona sitkeään murtumaan haurasmurtumassa jännitykset eivät pääse uudelleenjakaantumaan. Särörintaman edetessä jopa ääntä nopeammin aiheuttaen kovan pamahduksen. [12, s.4.]



Kuva16. Hauras murtuma [12, s.4].

7.2 Griffithin teoria hauraalle murtumalle

Halkeaman leviämisen aikana on "elastista jännitys energiaa", joka on elastisen muodonmuutoksen aikana materiaaliin varastoitunut energiamäärä. Lisäksi halkeaman etenemisprosessin aikana halkeamien pinnoille syntyy uusia vapaita pintoja, mikä lisää järjestelmän pintaenergiaa. Griffith esitti kriteerin soikean halkeaman leviämiselle. [13.]



Kuva 17. Reunahalkeama (flaw) materiaalissa [13].

Hän osoitti, että kriittinen jännitys σ_c halkeamien etenemiselle hauraassa materiaalissa ilmaistaan seuraavasti.

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

Missä E on kimmomoduuli ja γ_s on ominaispintaenergia ja a on puolet sisäisen halkeaman pituudesta. [14, s.317.]

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad K_c^2 = K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{E'}{2\mu} K_{III}^2$$

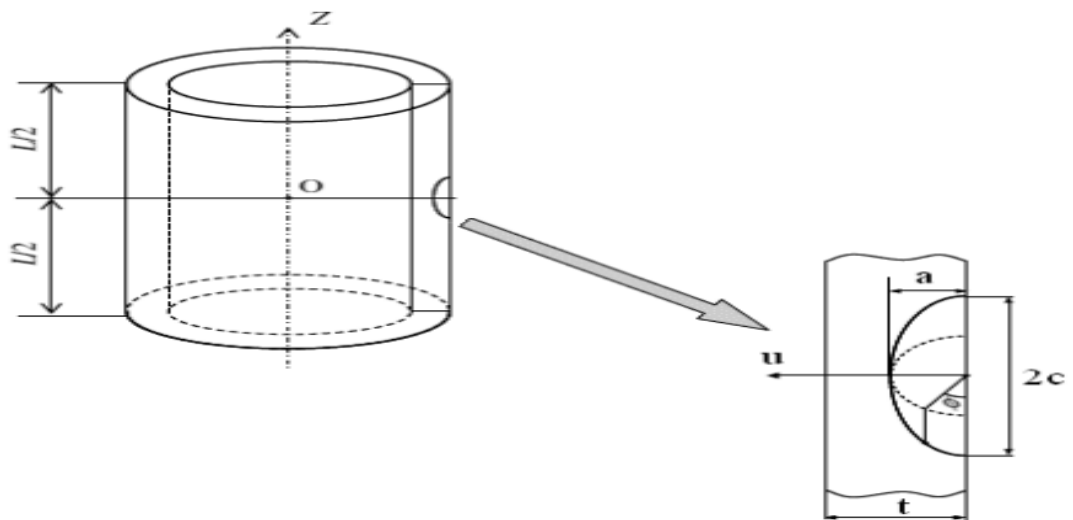
8. Särön kasvu (Crack growth)

Prosessin tunteminen ja hydraulinesteen paineen käytännön kaavioiden ja teorian tarkistaminen on ensimmäinen askel halkeamien kasvun simuloinnissa. Tämän perusteella neste kokee paineen laskun jokaisessa halkeaman etenemisvaiheessa, koska halkeamapintojen avautumisen seurauksena syntyy uusi tila. Nesteen paineen aleneminen ja sen viskositeetti aiheuttavat sen, että välittömästi kasvun jälkeen otsa ja osa uusista halkeamien pinnoista ovat nesteettömiä, siksi halkeamien kasvun todellinen mekanismi hydraulisessa murtumisprosessissa tulisi heijastua oikein ohjelmistossa luodussa simulaatiossa, tässä tilanteessa voidaan soveltaa XFEM menetelmää. Halkeamien pinnoille ei synny nesteen etenemisestä aiheutuvaa rasiutusta. Halkeamien kasvu viime vuosina kehitettyä XFEM elementtimenetelmää on käytetty tehokkaana työkaluna vaurio ongelmien analysoinnissa. Klassiseen elementtimenetelmään verrattuna XFEM tarjoaa merkittäviä etuja murtumismekaniikka ongelmien, erityisesti halkeamien kasvuongelman, mallintamisessa. Klassisessa elementtimenetelmässä halkeaman mallintamiseksi on välttämätöntä, että halkeaman reittiosuu aina elementtikomponenttien sivuihin, kun taas XFEM:ssä tätä ehtoa ei vaadita. [15.]

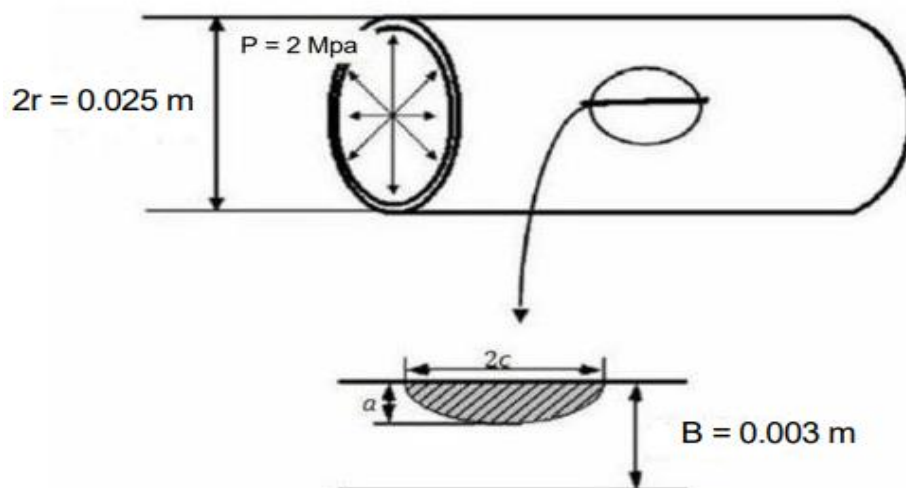
8.1 Pitkittäishitsattujen putkien ulkoseinien pituussuuntaisten halkeamien tutkiminen elementtimenetelmällä

Pintahalkeamia voidaan pitää puolielliptisinä tutkimuksen, jonka Lin ja Smith tekivät vuonna 1889 mukaan. Havaittiin, että minkä tahansa muotoiset halkeamat muuttuvat puolisoikeiksi pienen kasvun jälkeen. Alla olevassa kuvassa on kaaviomainen kuva puoli elliptisestä pitkittäispinnan halkeamasta putken ulkoseinässä. Putken seinämän puolielliptisten halkeamien geometrian määrittämiseksi on tarpeen tietää putken seinämän paksuus (t), putken säde (R), halkeaman pituus (c) ja särön syvyys (a). Säröilevän putken mallintamiseen tarvitaan mainittujen parametrien lisäksi vaipan kimmokerroin (E) ja vaipan Poissonin luku (ν).

Kriittisimmän halkeaman havaitsemiseksi putkien pitkittäishitsauksessa, jos halkeaman pituus on kiinteä, mallinnetaan putken ulkopinnalle pitkittäinen halkeama, jonka sivusuhte (a/c) (0,5:1) on Abaqusin avulla. Mallitettu putki on valmistettu teräksestä, jonka kimmokerroin on 209 GPa, Poissonin luku 0.3, halkaisija 0.025 m, paksuus 0.003 m ja pituus 0.1 m. Mallitettujen halkeamien kiinteä pituus on 0.02 m, syvyys on 0.002 m. Kaikissa tapauksissa putken halkeamiin kohdistuu 2 MPa sisäinen paine.



Kuva 18. Pituussuuntainen puolielliptinen halkeama putken ulkoseinässä



Kuva 19. Kuinka laskea lähtemisen vaikutus

8.2 Prosessimallinnus Abaqus-ohjelmistolla

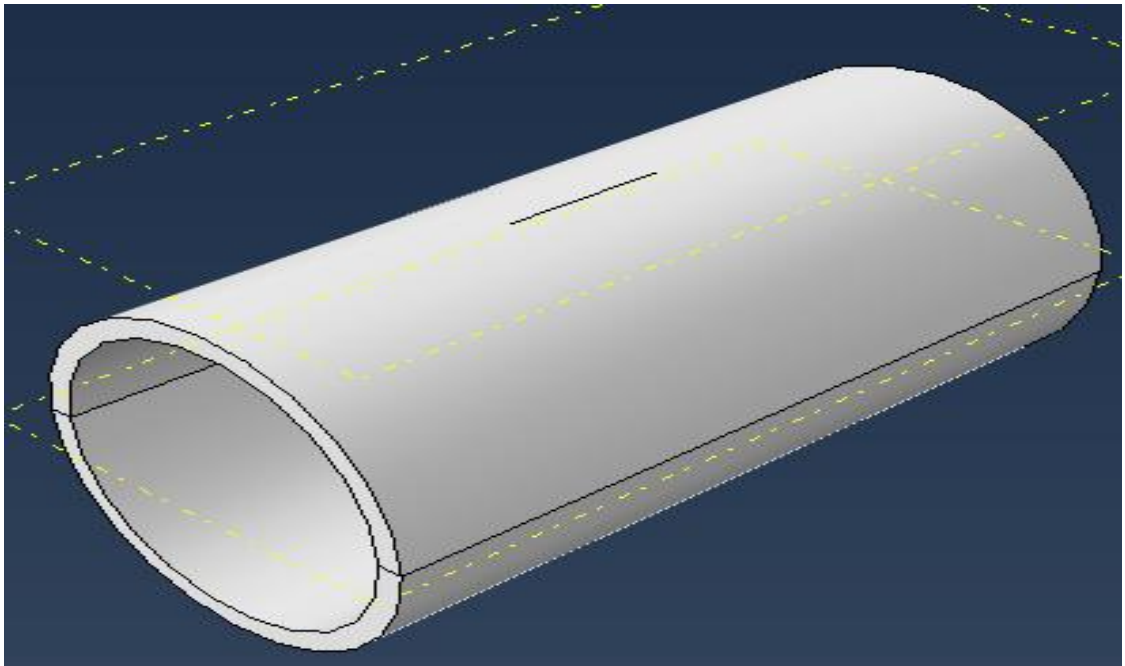
Elementtianalyysiohjelmistojen käyttö tiede- ja teollisuuskeskuksissa on nykyään väistämätöntä ja tavallista. Tällaisten ohjelmistojen käyttö tutkimus- ja kehityskustannusten vähentämisessä ei vaadi perusteluja ja taloudellisia asiakirjoja.

Tässä tutkimuksessa on käytetty Abaqusin elementtiohjelmistoa.

1. Tutkitut halkeama on pituussuuntaisia halkeama.
2. Malliteltujen putkien mitat (halkaisija, paksuus) ovat vakiona.
3. Kuormitusolosuhteet on sama (2 MPa).
4. Putkien materiaali on APIX 65-terästä.
5. Mallissa on tutkittu ja analysoitu kiinteä halkeama 0.02 m ja syvyys 0.002 m.

8.3. Ulkoisen halkeaman sisältävän putken mallintaminen

Kuvan (20) mukaan putki, jonka vakioimitat ulkohalkaisija on 0.025 m ja paksuus 0.003 m ulkohalkeamalla, on suunniteltu ja mallinnettu kolmiulotteisesti.



Kuva 20. Ulkotalkeaman putken suunnittelu ja mallintaminen

8.4. Putken rakenteen tiedot

Tässä osiossa esitellään materiaalin ominaisuudet. Arvot voidaan luokitella kolmeen yleiseen luokkaan: elastisuusparametrit, plastiset parametrit ja kutistumisparametrit, joiden plastiset parametrit on jaettu kahteen yhtä suureen ja kinemaattiseen osaan. Yksi tärkeimmistä tekijöistä, joka vaikuttaa mekaanisten ongelmien analysointiin elementtiohjelmiston avulla, on elementtimenetelmä tai rakenteen elementtiverkko.

Teräksen mekaaniset ominaisuudet (APIIX65)			
Vetolujuus (MPa)	Murtoraja (MPa)	Myötöraja (MPa)	Kimmomoduuli (GPa)
400-550	611	490	209

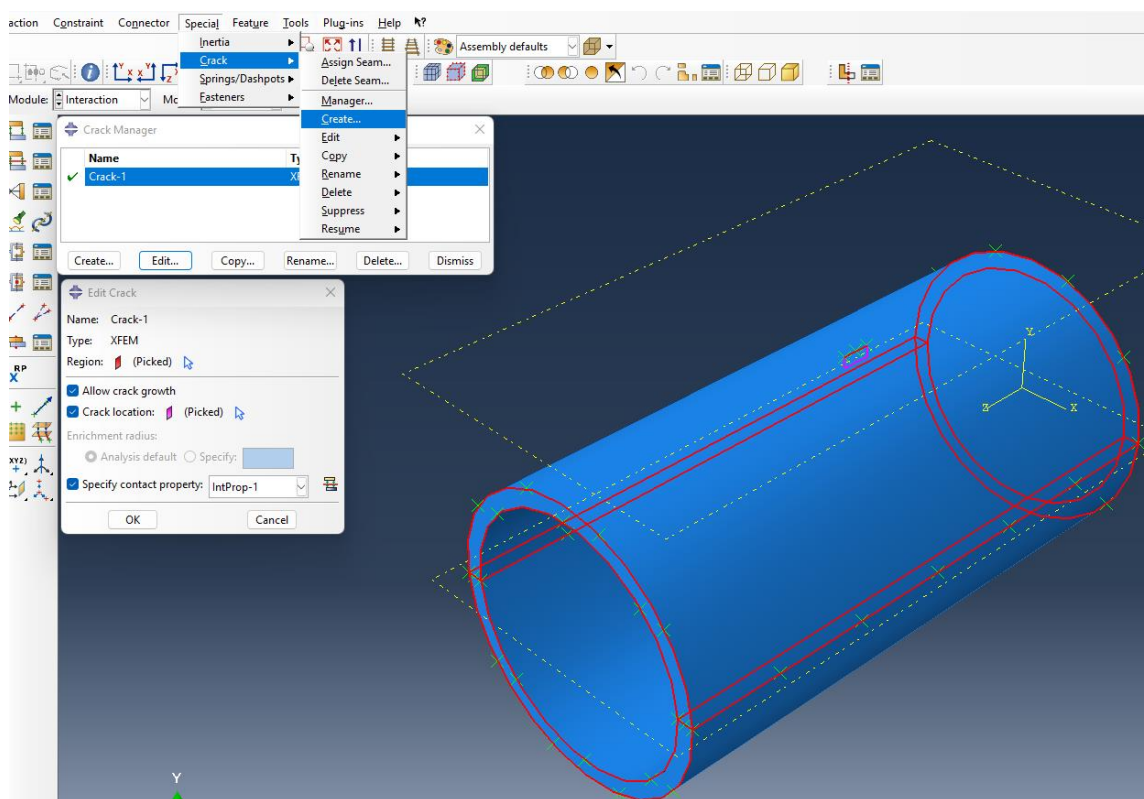
Kuva 21. Teräksen ominaisuudet

Teräsputken muoviset ominaisuudet (APIX65)					
Numbes	Yield stress (Mpa)	Muovinenrasitus	Numbers	Yield stress(Mpa)	Muovinen rasitus
1	505	0	7	681	0.10
2	549	0.01	8	693	0.12
3	599	0.03	9	703	0.14
4	631	0.05	10	712	0.16
5	652	0.06	11	719	0.18

Kuva 22. Putken plastic-ominaisuudet

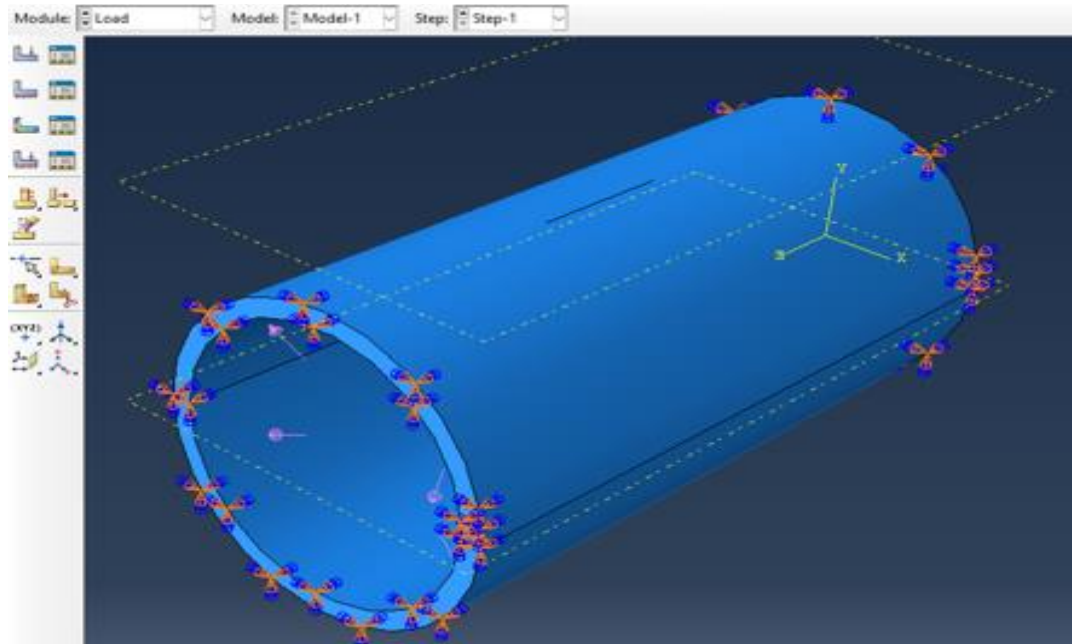
8.5. Interaction (XFEM) menetelmä

Tässä menetelmässä, joka tunnetaan nimellä XFEM tai (Extended Finite Element Method), monet vanhojen menetelmien ongelmat ja rajoitukset on ratkaistu käyttämällä tässä rikastettuja elementtejä. Tapa kasvattaa 3D-halkeama ohutseinäisessä putkessa on XFEM-menetelmä, joka mallintaa halkeaman erikseen ja sijoittaa sen kokoonpanoon kuva (24).



Kuva 24. Crack-XFEM

8.6. Kuormitus ja reunaehdot



Kuva 25. Kuormitettu putki

Putken pak-suus(m)	Materiaalin myötöraja (MPa)	Halkeaman syvyys(m)	Halkeaman pituus(m)	Putken halkeaman tyyppi
0.003	490	0.002	0.02	Ulkoinen

Kuva 26. Tutkitut parametrit.

Tässä mallissa kuormitus kohdistuu laajasti putkeen. Putken sisäpaineeseen liittyvä kuormitus vaikuttaa eniten putkien halkeamiseen. Kiinnitä putken molemmat pää jäykästi kiinni (BC-1). Nimeä, reunaehto aktivoidaan analyysi askeleella (Step: Initial). Valitse Symmetry/Antisymmetry/Encastre.

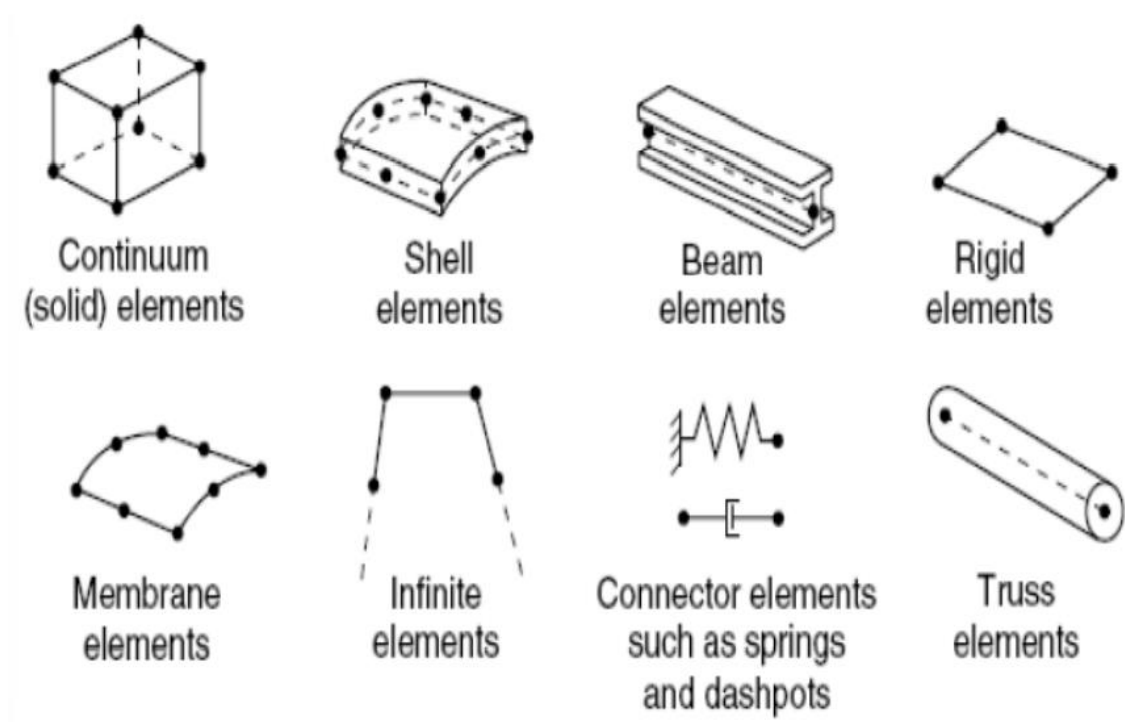
9. Verkotus

Elementtimenetelmään perustuvan prosessin analysoinnissa käytetyn elementin tyyppin oikea valinta on erityisen tärkeää. Abaqus-ohjelmistossa on mahdollista, käyttää erityyppisiä elementtejä tyyppin mukaan sovellukset on valittava.

Yleensä elementtien käyttäytyminen määritetään viiden ominaisuuden perusteella seuraavasti.

1. Elementin tyyppi (Family element)
2. Elementin vapaus asteet (degrees of freedom)
3. Käytettävissä olevien solmujen määrä (Number of Nodes)
4. Elementti yhtälöiden muodostaminen (Formulation)
5. Integrointimenetelmä (Integration).

Alla olevassa kuvassa näkyy jotain yleisesti käytettyjä elementtejä.



Kuva 27. Elementtejä

9.1. Elementin muoto

Jos valittu alue on kolmiulotteinen, elementtien muoto on seuraava.

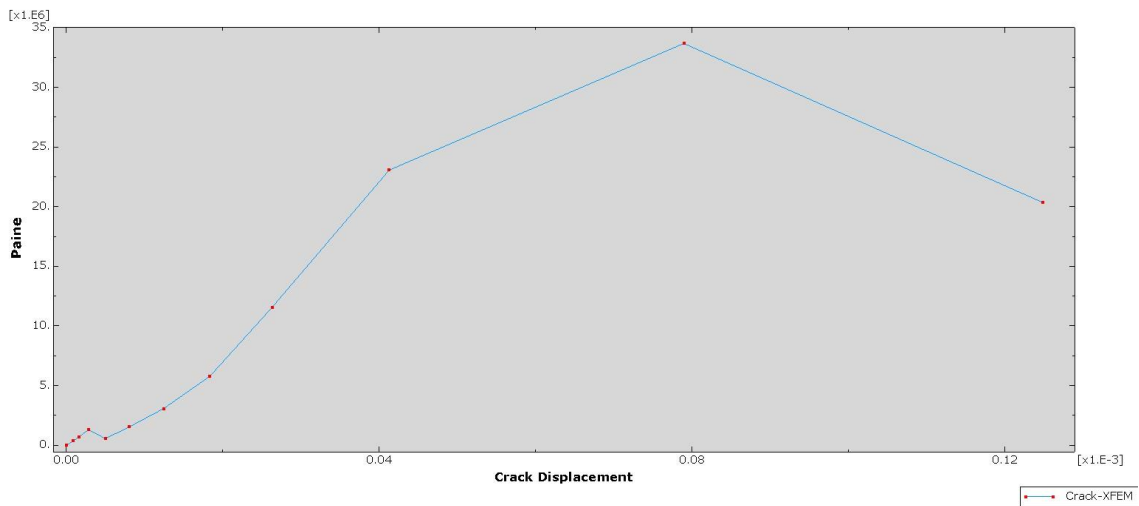
- Quad: nelisivuinen elementti
- Quad-dominated: Pääasiassa kolmiota elementti tarvittaessa
- Tri: Kolmion muotoinen elementti.

- Kolmiulott: Kuusikulmainen elementti, jota käytetään tämän tyyppisten elementtien rullissa.

9.2 Mallintamisen tulokset

Mallintamisen tuloksia käytetään muun muassa ilmiöiden simulointiin, tutkimukseen ja käyttäytymisen ennustamiseen eri tilanteissa.

Syynä tutkimukseen on se, että tällä alalla on nihkeästi lähteitä ja referenssejä. Käytännön kokeet ovat todella hidas prosessi ja ovat aikaavieviä sekä kustannukset ovat korkeat, joten askel askeleelta tulokset liittyvät yhdentyypisiin hypoteeseihin, mukaan lukien pitkittäissuuntaiset ulkotalkeamat, joiden syvyys on 0.002 m. Tietenkin on huomioitava, että voiman (sisäinen paine) käytön jälkeen voidaan tarkastella jännityksen alaisia alueita. Alla oleva kuva esittää halkeaman paine- ja siirtymäkaaviota XFEM-menetelmässä.

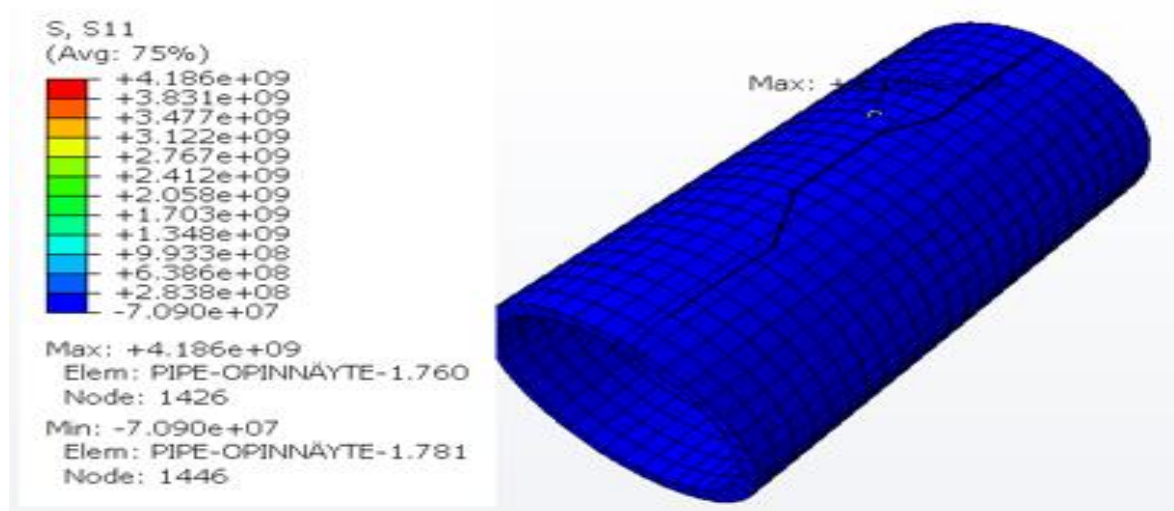


Kuva 28. Paine, särön siirtyminen (XFEM-menetelmässä).

9.3 Ulkoinen pitkittäinen halkeama (ulkohalkoja)

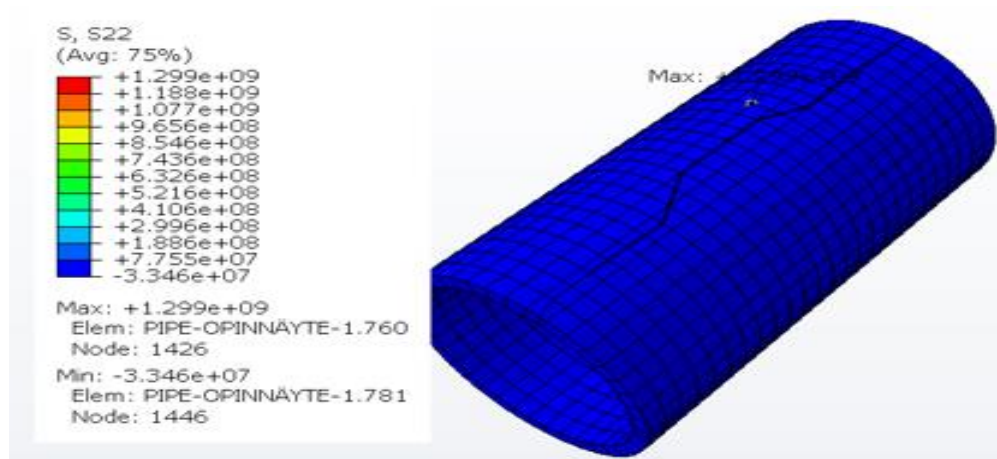
Tutkittava osa on ulkoinen pituussuuntainen halkeama. Seinä kannattaa tutkia, koska pitkittäishalkeamilla on suuri merkitys putken tuhoutumisessa, ja mitä pidempi halkeama, sitä vähemmän aikaa kuluu räjähtämiseen tai vuotamiseen.

Seuraavissa kuvissa on esitetty prosessin aikana syntyvän jännityksen määrä ulkoisten halkeamien kanssa, joiden pituus on 0.02 m ja syvyys 0.002 m.

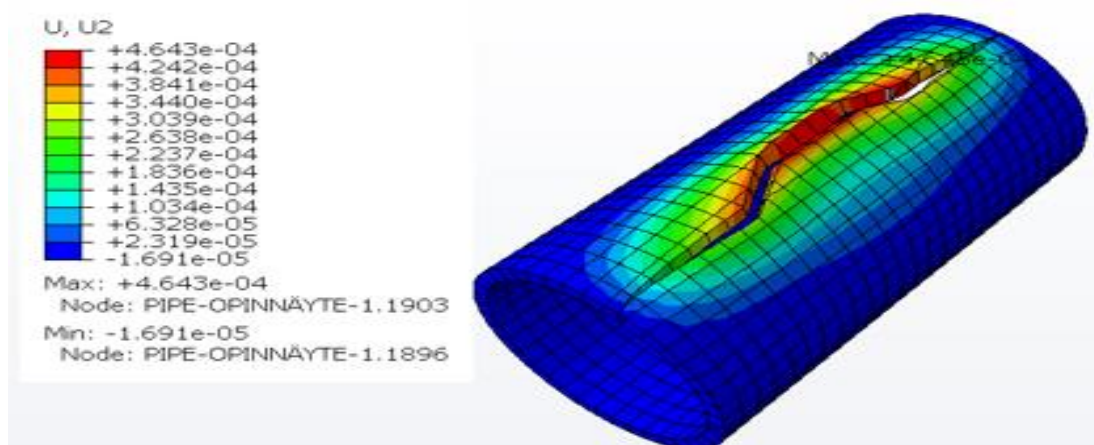
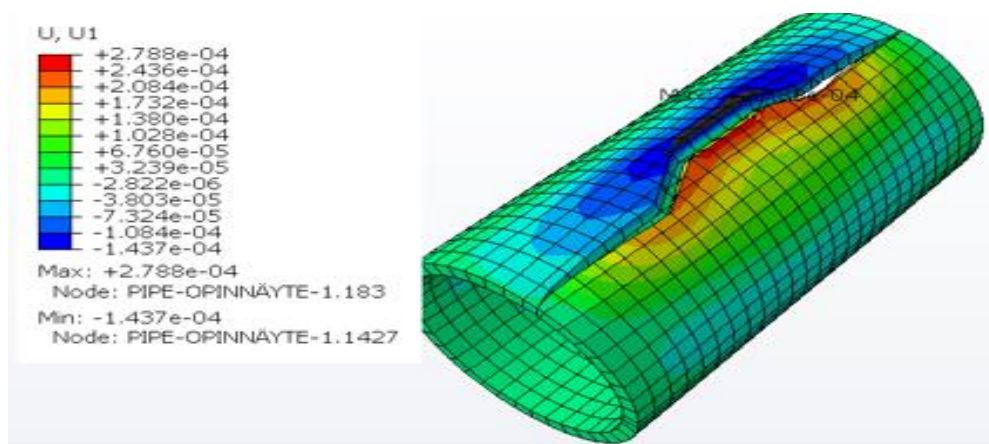


Kuva 30. S,11 ulkoinen halkeama on 0.02 m pitkä ja 0.002 m syvä

Näiden muotojen mukaan on selvää, että jännityksen määrä punaisella alueella on erittäin suuri ja ajan myötä sen määrä vähenee plastisella alueella. Korkean jännityksen lisäksi sen venymäarvo on myös erittäin korkea. Koska tämä elementti on venytetty paljon.



Kuva 31. (S,22) ulkoinen halkeama on 0.02 m pitkä ja 0.002 m syvä



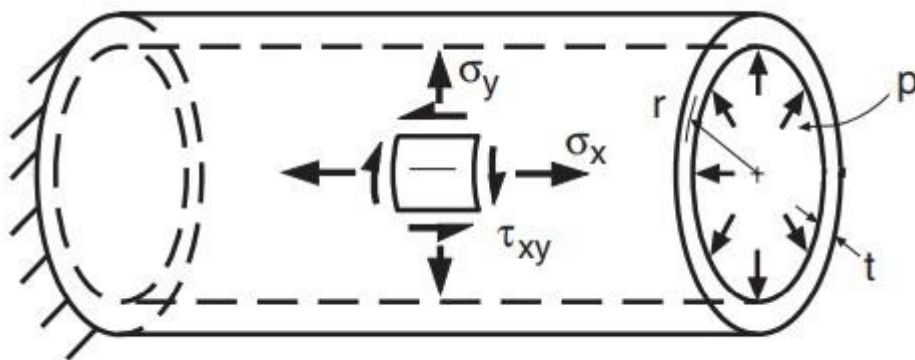
Kuva 32. Displacement (U1, U2) ulkoinen halkeama on 0.02 m pitkä ja 0.002 m syvä.

Ohessa ovat siirtymät x- ja y-suunnassa, siirtymien yksikkösuuruus on kuvassa metreinä.

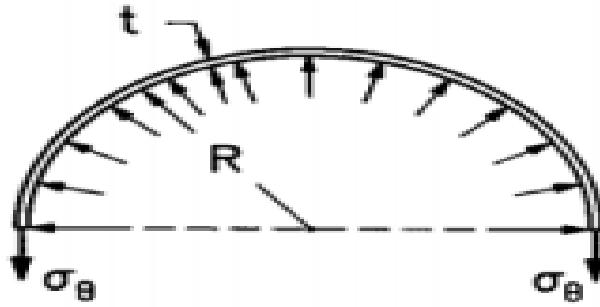
9.4 Yhteenveto

Koska mainittu teräs sisältää alumiinisilikaattiyhdisteitä ja joidenkin epäpuhtauksien läsnäoloa reikien läheisyydessä ei ole kunnolla kontrolloitu, voidaan päätellä, että näillä yhdisteillä on katodien rooli ja ne ovat aiheuttaneet reikien muodostumista ja korroosion voimistumista niissä.

Jännitysten vaikutuksen alaisena olevien putkien tyypillä ja seuraavilla ympäristöolosuhteilla on tärkeä rooli tuhoutumisnopeuden lisäämisessä, joitain halkeamia samoissa olosuhteissa analysoitiin Abaqus-ohjelmistolla. Siksi sen määrittämiseksi, ovatko sisäiset tai ulkoiset pitkittäishalkeamat kriittisempiä, on tarpeen määrittää ekvivalentti jännitysintensiiteettitekijä, joka ottaa huomioon kaikkien kolmen jännitysintensiiteetti kertoimet vaikutuksen.



Kuva 33. pituussuuntainen jännitys



Kuva 34. Leveys-stressi

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

Jännitys- ja siirtymäkentät särön kärjen edessä tilassa [16, II.I.].

Elementtiratkaisusta ja teoriasta saatujen jännitysten vertailu

$$(2\pi R) t \sigma_z = \pi R^2 p \quad \Rightarrow \quad \sigma_z = \frac{pR}{2t} \quad \sigma_{(S,11)} = \frac{2 \times 0,025}{2 \times 0,003} = 8.33$$

$$2t\sigma_\theta = 2Rp \quad \Rightarrow \quad \sigma_\theta = \frac{pR}{t} \quad \sigma_{(S,22)} = \frac{2 \times 0,025}{0,003} = 16.66$$

Jännityskaava.

Stress (MPa)	Theory	FEM
$\sigma_{(S,11)}$	8.33	3.6
$\sigma_{(S,22)}$	16.66	2.22

Nämä vastaukset liittyvät jännitysintensiiteetikertoimen muotoon.

Elementtiratkaisusta ja teoriasta saatujen jännitysintensiiteetikertoimien vertailu.

$$\mathbf{k}_I = \frac{PR}{2t} \sqrt{\Pi a} \qquad \mathbf{k}_{II} = \frac{PR}{2t} \sqrt{\Pi a} (1 + \sin^2 \beta)$$

$$\mathbf{k}_I = \frac{2 \cdot (0.025)}{2 \cdot (0.003)} \sqrt{\Pi \cdot (0.02)} = 2.088856896$$

$$\mathbf{k}_{II} = \frac{2 \cdot (0.025)}{2 \cdot (0.003)} \sqrt{\Pi \cdot (0.02)} (1 + \sin^2(90)) = 4.177713791$$

Kaava. Stressin intensiteetikijä.

SIF(MPa \sqrt{mm})	Theory	FEM (Analyysia SIF)
KI	2.088021353	2.08595E+09
KII	4.176042706	4.14323E+09

SIF (Jännitysintensiiteetti Kertoimet)

Yleisesti voidaan siis sanoa, että pitkittäisillä hitsausaumoilla hitsatuissa putkissa olevat pituussuuntaiset halkeamat ovat kriittisimpiä halkeamia.

Öljyn ja kaasun siirtoputkien käyttöikään vaikuttavat tekijät ovat:

Tekijä	Määritelmä	Kohde
Sisäinen	Putken sisällä oleva neste vaikuttaa sen materiaaleihin	Hiertymä korrosio
Ulkoinen	Ympäristötekijät vaikuttavat siihen	Mekaaninen-vaikutus(isku) mätäneminen

Öljyn ja kaasun siirtoputkien parantamiseksi on otettava huomioon seuraavat seikat sekä tulosten tarkastus vaiheessa.

1. Korroosion vähentämiseksi ja putken käyttöiän pidentämiseksi hitsatut osat voidaan eristää.
2. Kierremenetelmällä valmistettujen putkien käyttö.
3. Muuta putken tyyppiä sen läpi kulkevien materiaalien (kaasu, neste) mukaan, joilla on korkea korroosion- ja paineenkesto, jotta muiden materiaalien kustannukset ja vauriot vähenevät.
4. Maaperää on mahdollista testata ennen putken asennusta ympäristökuorituksen ja vajoamisen estämiseksi.

5. Mitä syvempi halkeama, sitä lyhyempi halkeama räjähdysaika, ja painovoima ja ympäristötekijöiden paine (maaperä, kivi jne.) ovat myös tehokkaita.
6. Putken paksuutta pienentämällä putken käyttöikä lyhenee ja eroosion nopeus kasvaa.

Lähteet:

- 1.API 5L X52 Pipe Specifications. Verkkoaineisto. OCTAL. <<https://www.octal-steel.com/resources/api-5l-x52-psl2-pipe>>. Luettu 9.1.2023.
2. STEEL PIPE. Verkkoaineisto. steelpipe.com. <<http://nfatmala.blogspot.com/2016/02/linepipe-manufacture.html>>. Luettu 9.1.2023.
- 3.AWS D1.1: Verkkoaineisto. Structural welding Code-Steel. <<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/003/aws.d1.1.2000.pdf>>. Luettu 9.1.2023.
4. Dawson, T. (1993) "EN380 Engineering Aspects of Materials Class Notes", United States Naval Academy>. Luettu 9.1.2023.
- 5.Galvanic corrosion. Verkkoaineisto. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Galvanic_corrosion>. Luettu 9.1.2023.
- 6.Mid-America Aerotech. Verkkoaineisto. www.maaero.com. <A Complete Guide to the Types of Corrosion in Aircraft | Mid-America Aerotech (maaero.com)>. Luettu 9.1.2023.
7. Neptune. Verkkoaineisto. Water Services Inc. <<https://neptunewater-inc.com/new-page-19>>. Luettu 9.1.2023.
- 8.Mechanical Behavior of Materials. Verkkoaineisto. Kirjoittajat: [Krishan Chawla](#),[Marc A. Meyers](#). <<https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=2271706>>. Luettu 9.1.2023.
- 9.Fractography. Verkkoaineisto. Wikipedia. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Fractography>>. Luettu 9.1.2023.
10. Hydrogen embrittlement. Verkkoaineisto. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_embrittlement>. Luettu 9.1.2023.

11. Pipelines Corrosion. Verkkoaineisto. <https://www.phmsa.dot.gov> <<https://primis.phmsa.dot.gov/docs/sccReport/CHAPTER%204%20-%20UNDERSTANDING%20STRESS%20CORROSION%20CRACKING%20IN%20PIPELINES.PDF>>. Luettu 9.1.2023.

[12. Esitys aiheesta: Luku8: Mekaaninen vaurioituminen. Verkkoaineisto.](https://slideplayer.fi/slide/12233676/) <<https://slideplayer.fi/slide/12233676/>>. Luettu 9.1.2023.

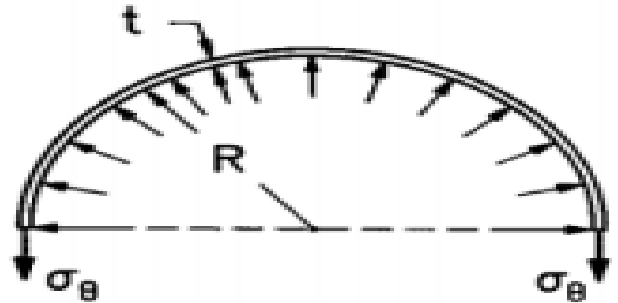
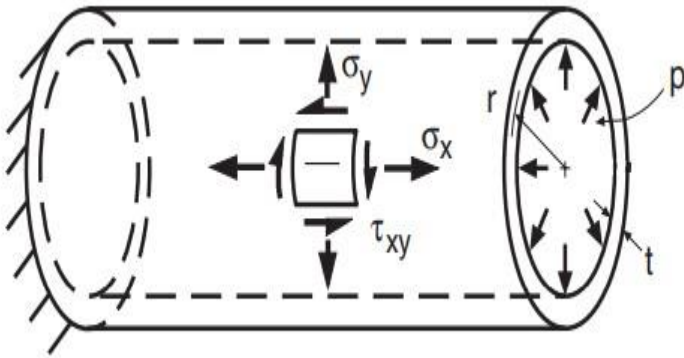
13. Fracture mechanics. Verkkoaineisto. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Fracture_mechanics>. Luettu 9.1.2023.

14. Richard W. Hertzberg. Verkkoaineisto. amazon. <<http://fdjpkc.fudan.edu.cn/upload/article/files/db/5a/2b1841a14111afb908c2ca177918/d6f27325-5a22-4523-876f-9caa6348023f.pdf>>. Luettu 9.1.2023.

15. simuleon FEA Blog. Verkkoaineisto. SIMULEON. <[Modelling crack propagation using XFEM \(simuleon.com\)](http://simuleon.com)>. Luettu 9.1.2023.

16. Fracture Mechanics. Verkkoaineisto. <<https://www.fracturemechanics.org>>. Luettu 9.1.2023.

Ohje XFEM-analyysista:



Kuva (1–1) pituussuuntainen jännitys

kuva (1–2) leveys stressi

$$E = 209 \text{ Gpa}$$

$$\nu = 0,3$$

$$L = 0.1 \text{ m}$$

$$R = 0.025 \text{ m}$$

$$t = 0.003 \text{ m}$$

$$P = 2 \text{ Mpa}$$

Ratkaiseminen Abaqus-ohjelmalla

Ennakkoarviointi

1. Arvioi suurimmat normaalijännitykset.
2. Arvioi siirtymätilan muoto.
3. Suunnittele alustava FEM-malli.
4. Jännitykset intensiteetti kertoimet (**XFEM**)

Esikäsittely

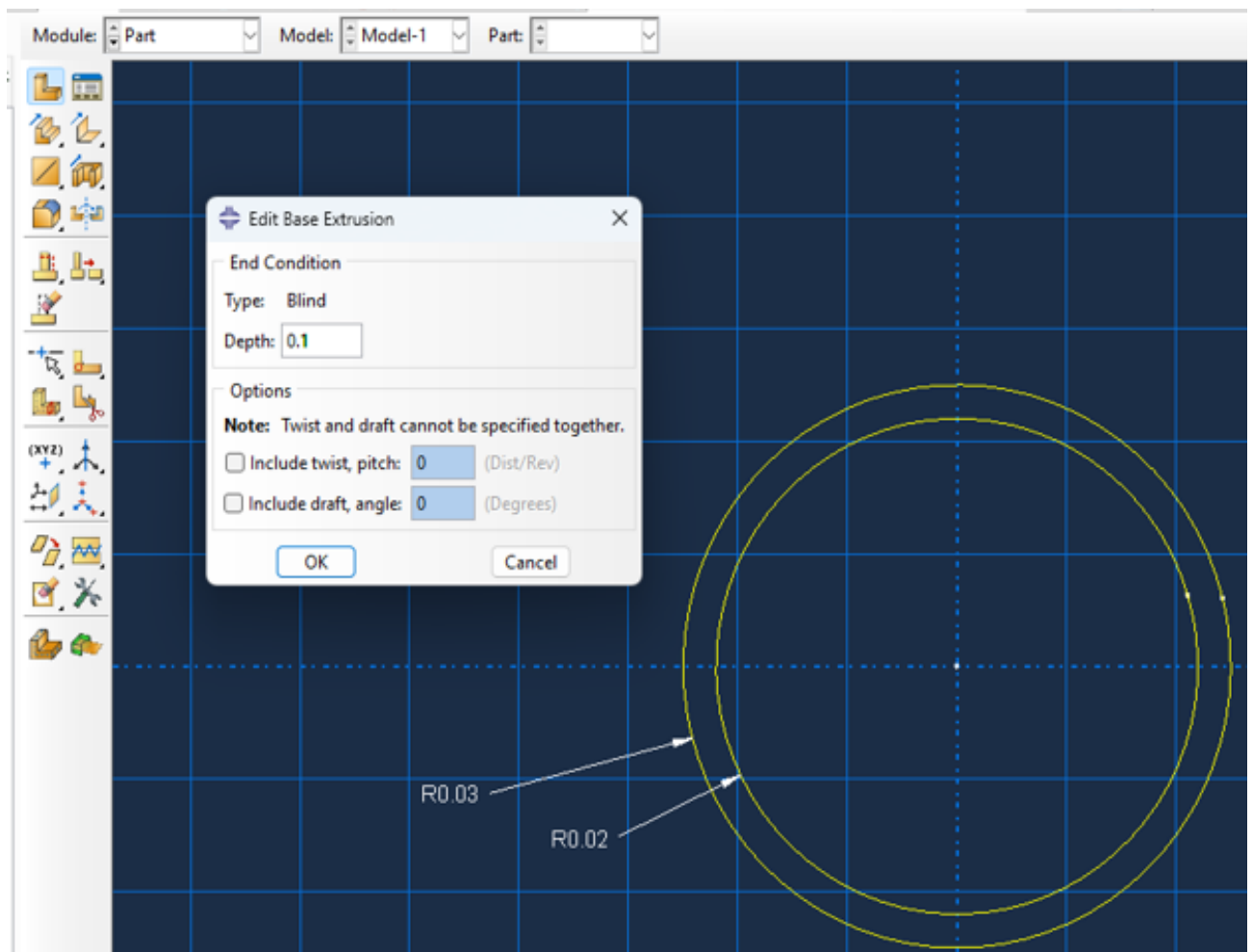
Käynnistys

5. Käynnistä esikäsittelijä Abaqus CAE ja luo uusi malli (Create Model Database With Standard/Explicit Model).

6. Tutustu ohjelman käyttöliittymään.
7. Valitse käytettävä yksikköjärjestelmä. Tämä määrää, missä yksiköissä koordinaatit ja voimat annetaan. Käytä SI-yksiköitä. Abaqus ei tiedä, mitä yksikköjärjestelmää käytät; sinun on itse huolehdittava siitä!

Geometriamalli


1. Luo uusi osa (Create Part). Tämän komennon voi käynnistää ainakin neljällä eri tavalla.
2. Avautuvaan ikkunaan (Create Part) anna osalle nimi ja arvio poikkileikkauksen maksimidimensiosta (Approximate size) 0.5 (m).
3. Create part- 3D- Deformable – Solid- Extrusion – Approximate (0.5 m) ja Continue.
4. Piirrä kaksi ympyrää, joiden säteet ovat 0.025 m ja 0.022 m ja paina valmis. Done.

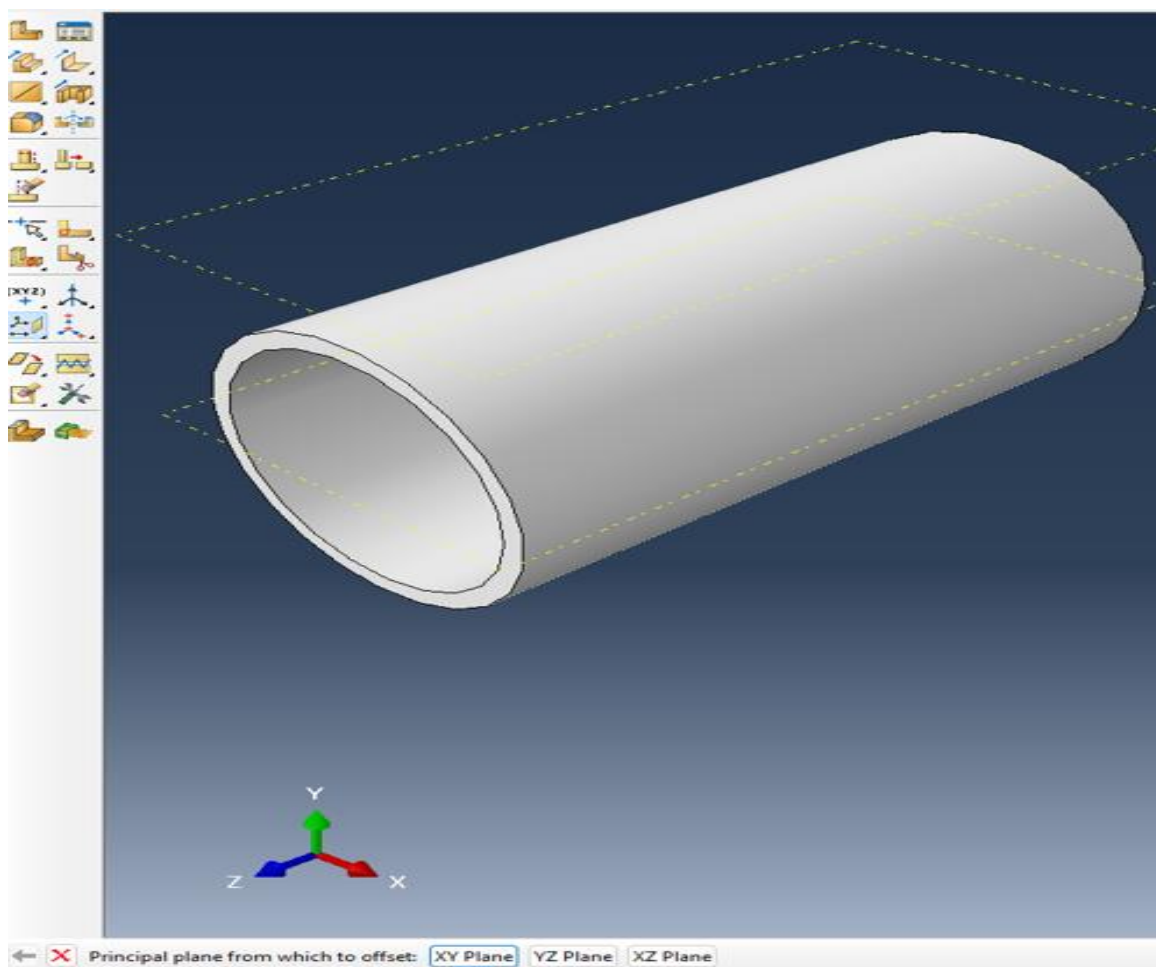



Ja sitten valitaan, (Depth= 0. 1 m) - ok.

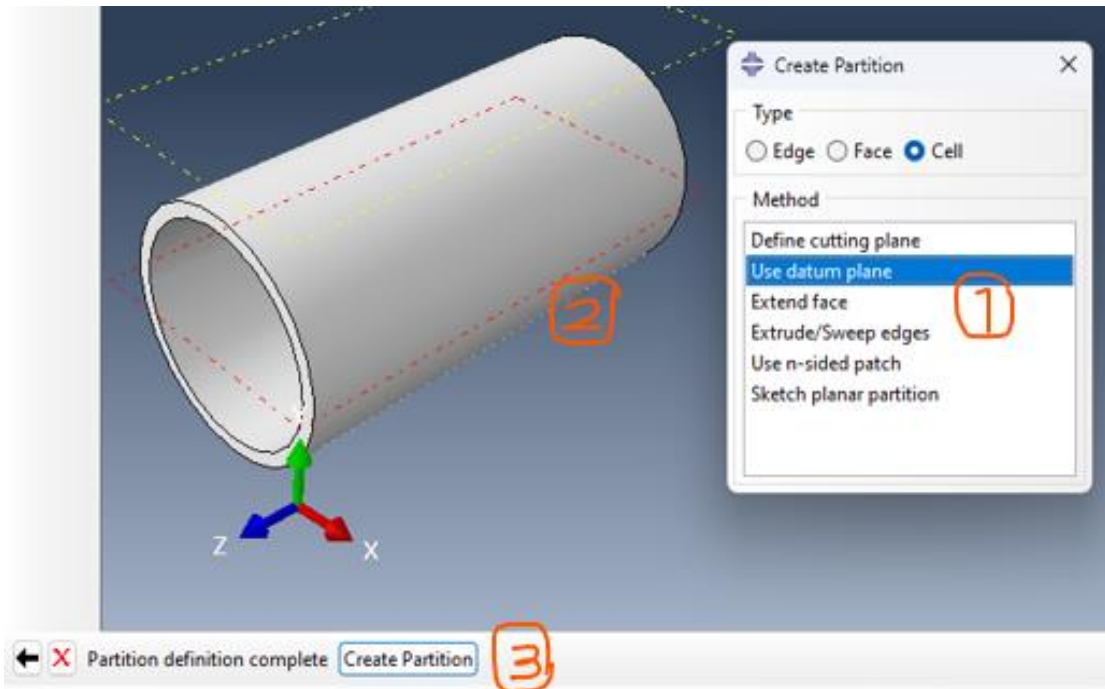
Piirrämme kaksi plane, joista ensimmäisen tulee olla putken keskellä ja toisen etäisyys ensimmäisestä on 0,035 m. Sitten valitaan Create shell Extrude) tarvitsen (select a plane for the shell extrusion) ja sitten tarvitsemme (an edge or axis that will appear) vaihe että menemme Sketch alue ja tehdään (alku särö).




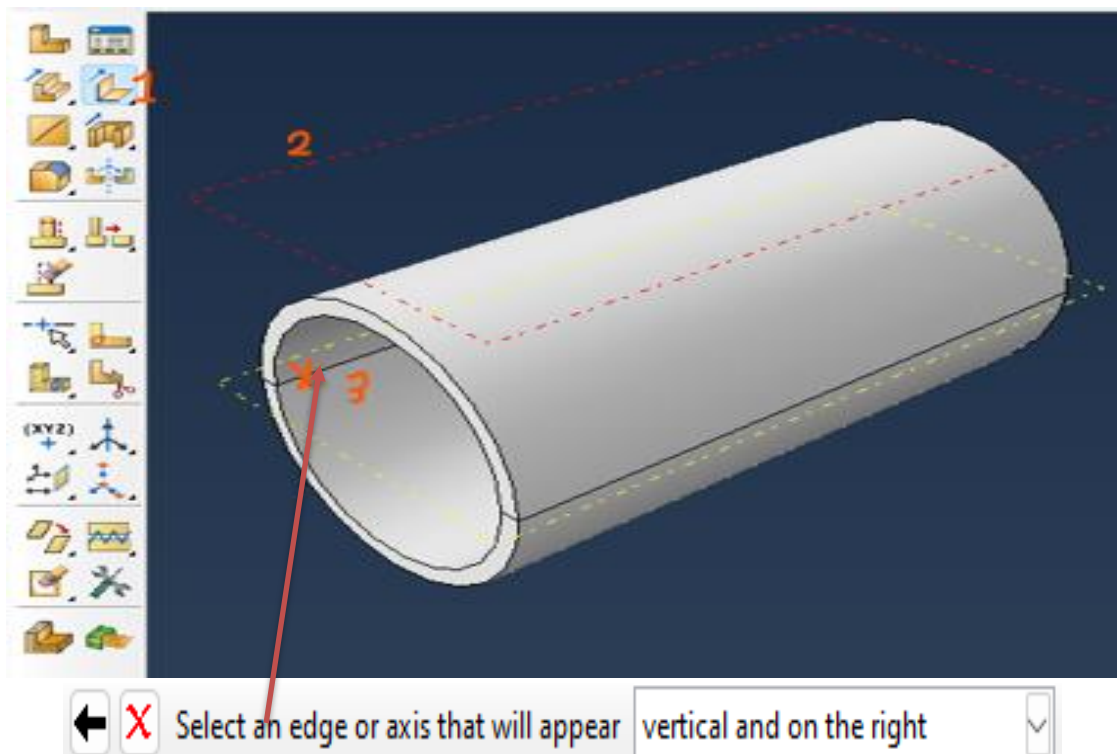
Valitse  Creat Datum Plane – XZ Plane -ja Offset (0,0) ja Enter, ja sitten taas valitse ZX Plane ja offset on (0.035 m) – Enter.




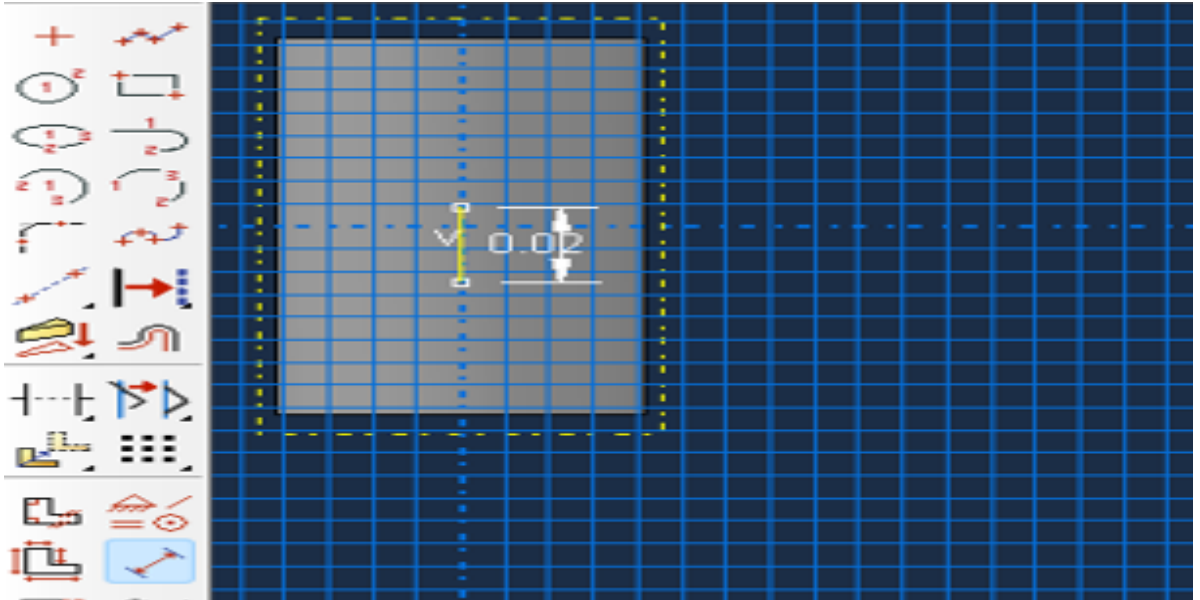
Valitse  Create Partition- Cell – Use datum plane-Create Partition-Done.



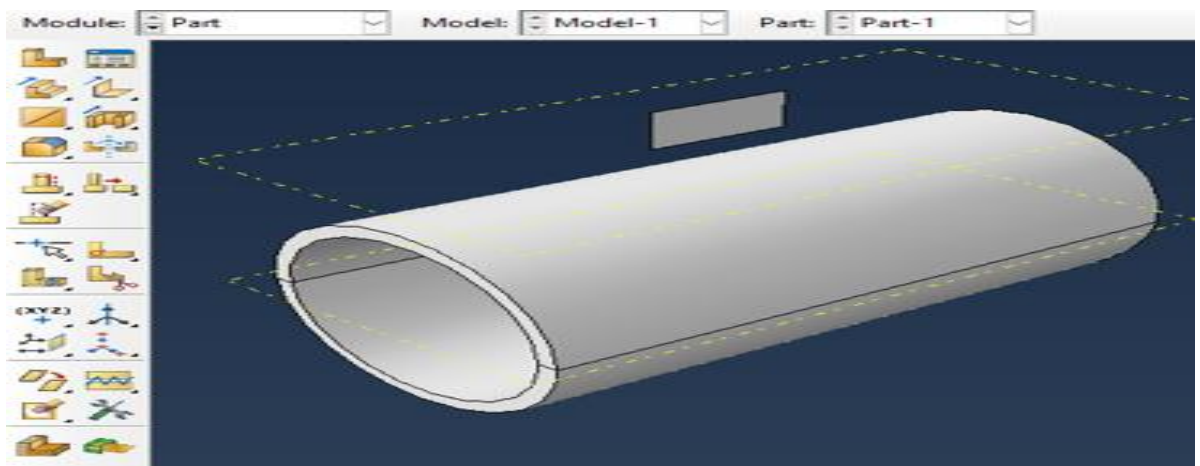
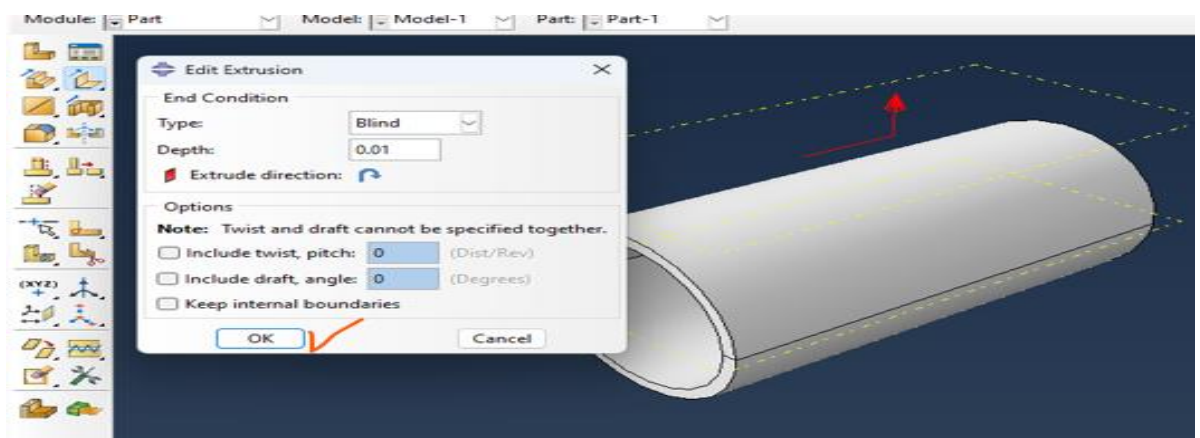
Valitse  (Create Shell: Extrude) - Datum planr-2- select an edge or axis.




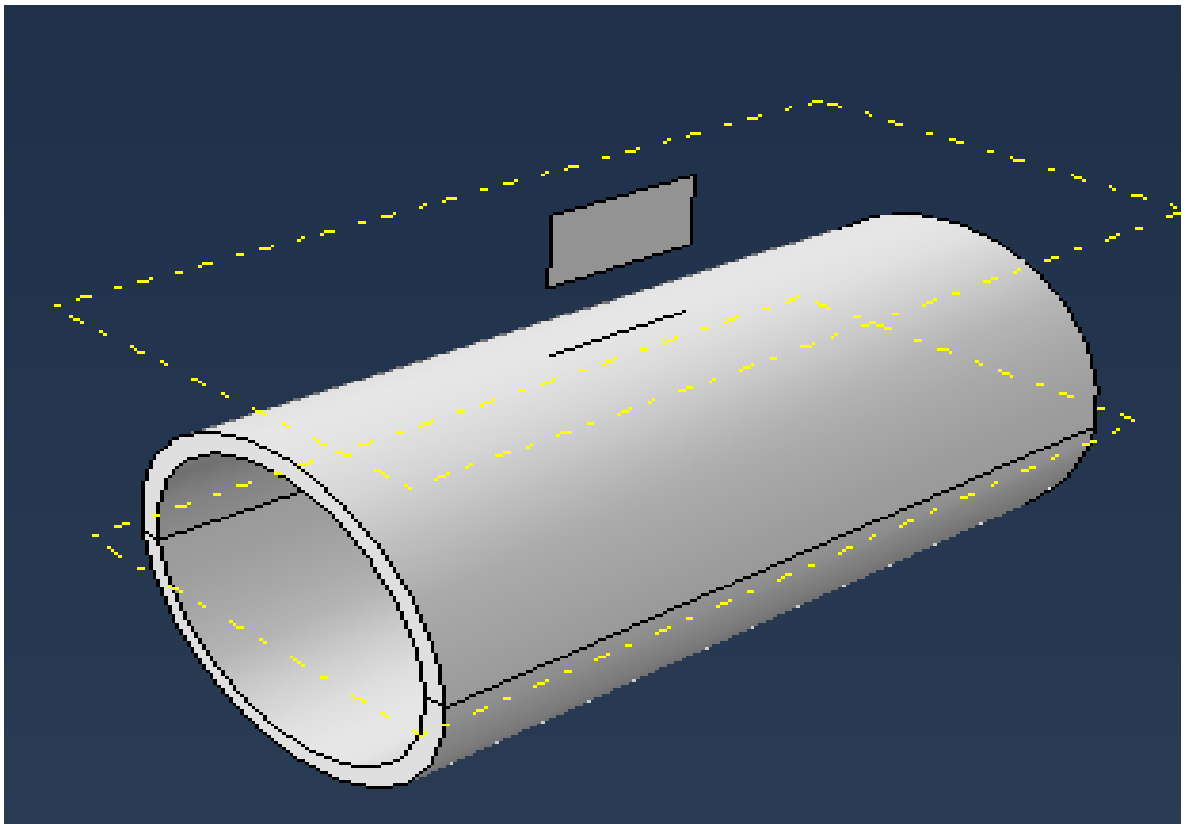
Valitse  Create Line: ja piirtää pystyviiva, että pituus on (0.02 m)- Done.





paine OK ja seuraava kuva tulee.

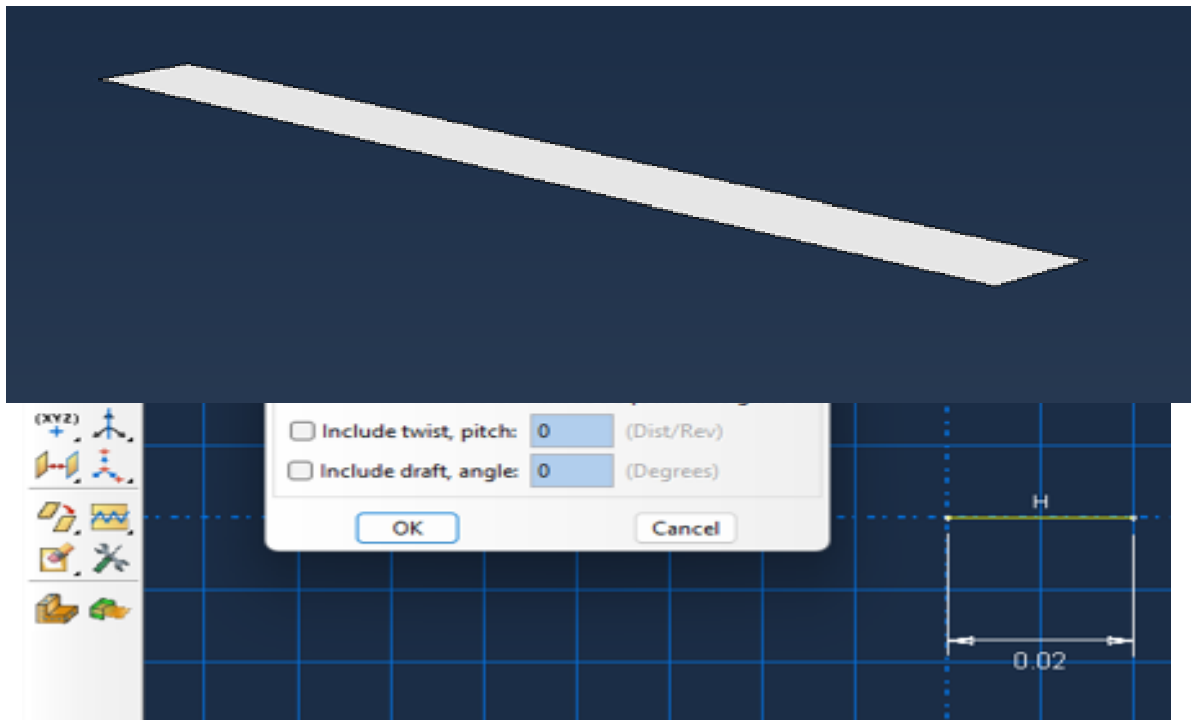


Valitse  Partition Face project Edges- select Face putki- Done- ja valitaan suorakaiteen alareuna- Done- Create Partition-Done



Valitse  Remove Face ja tämän part to removed-  ja Done.

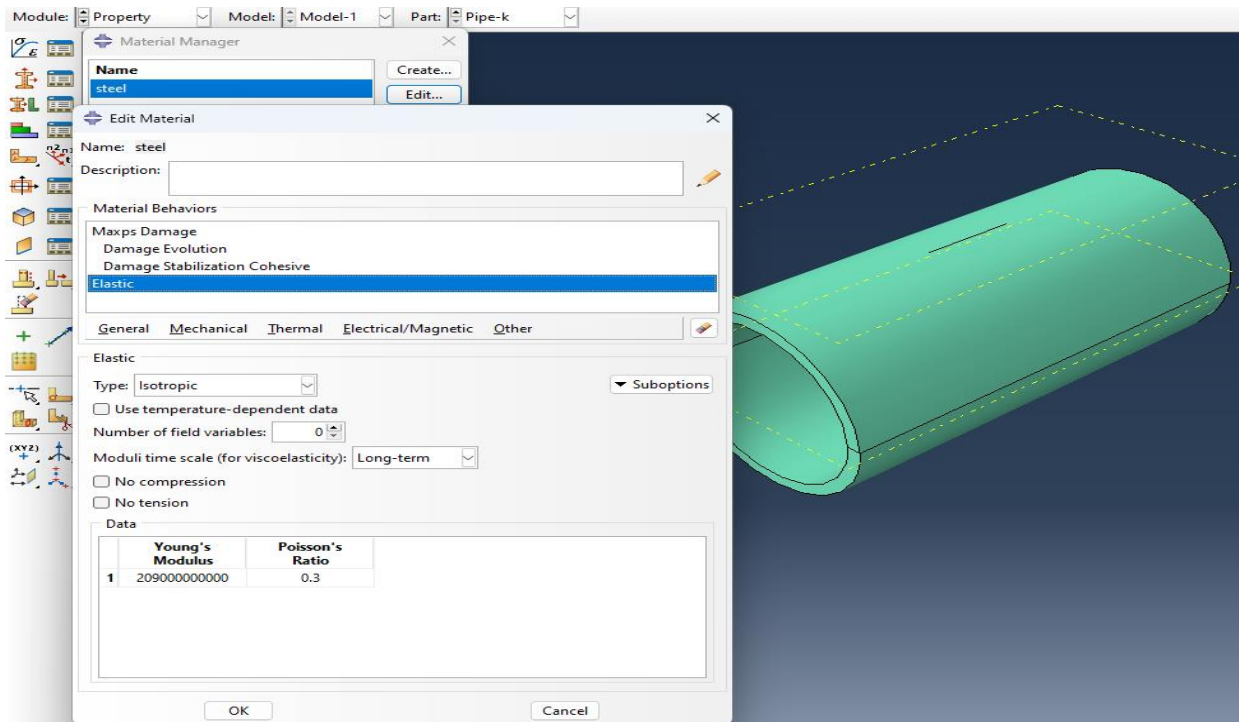
Piirrimme toinen part, että (Name Crack): Creat part- 3D – Deformable- shell- Extrusion- Approximate (0.5m)- Continue - ja Extrusion depth on 0.002 m.



5. Tallenna (File → Save).

Materiaalivakiot

6. Luo materiaali (Create Material), jolle määrität nimen ja tarvittavat materiaalivakiot: kimmokertoimen ja Poissonin luvun (Mechanical → Elastic).
 - a) Mechanical- Damage for Traction separation laws-Maxps Damage (490 Mpa).
 - b) suboptions- Damage evolution.
 - c) Suboptions- Damage Stabilization Cohesive.



Suboption Editor

Damage Evolution

Type: Energy

Softening: Linear

Degradation: Maximum

Mixed mode behavior: Power Law

Mode mix ratio: Energy

Power 1

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Normal Mode Fracture Energy	Shear Mode Fracture Energy First Direction	Shear Mode Fracture Energy Second Direction
1	42200	42200	42200

Edit Material

Name: Steel

Description:

Material Behaviors

- Maxps Damage
- Damage Evolution
- Damage Stabilization Cohesive**
- Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Maxps Damage

Tolerance: 0.05

Position: Centroid

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Max Principal Stress
1	490000000

Suboption Editor

Damage Stabilization Cohesive

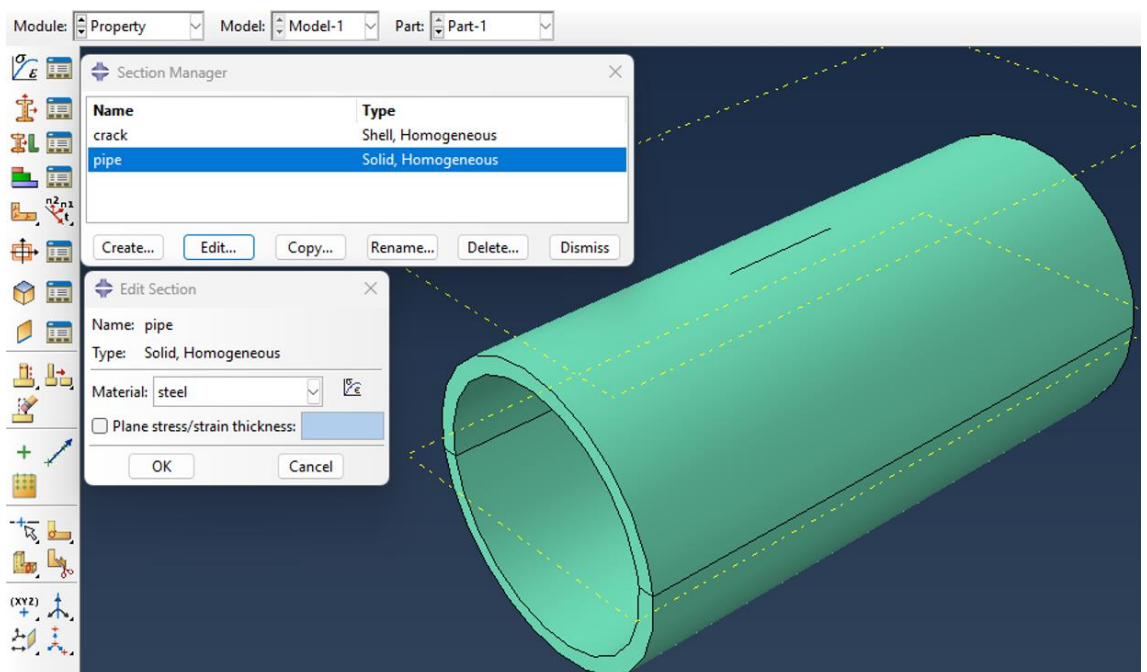
Viscosity coefficient: 0.05

OK Cancel

OK Cancel

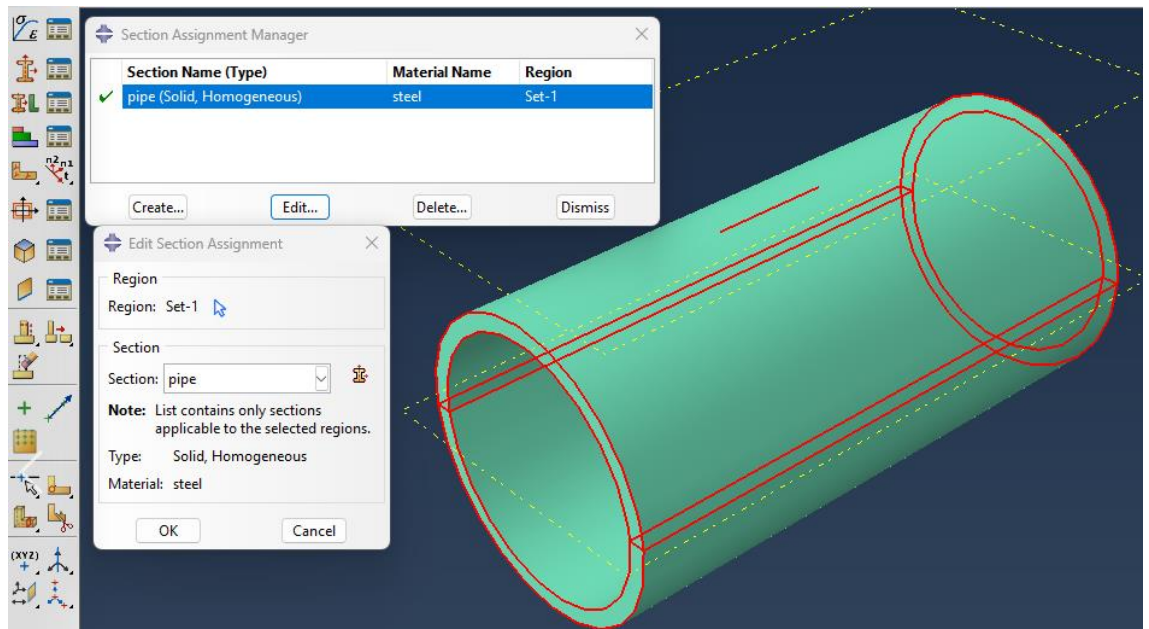
Fysikaaliset vakiot

7. Määritä osan materiaali ja mahdolliset muut fysikaaliset ominaisuudet (Create Section). Anna ominaisuudelle nimi. Koska osa on kolmiulotteinen, fysikaalisia vakioita ei ole (Continue). Valitse osan materiaali.
 - a) Create section- Name- Solid- Homogeneous- Continue.
 - b) Create section-Name- Shell- Homogeneous-Continue-Shell thickness (Value= 0.001m).
 - c) Assign Section. select koko putki-Done.
Mutta part Crack ei ole pakko section.






Ominaisuuksien liittäminen malliin

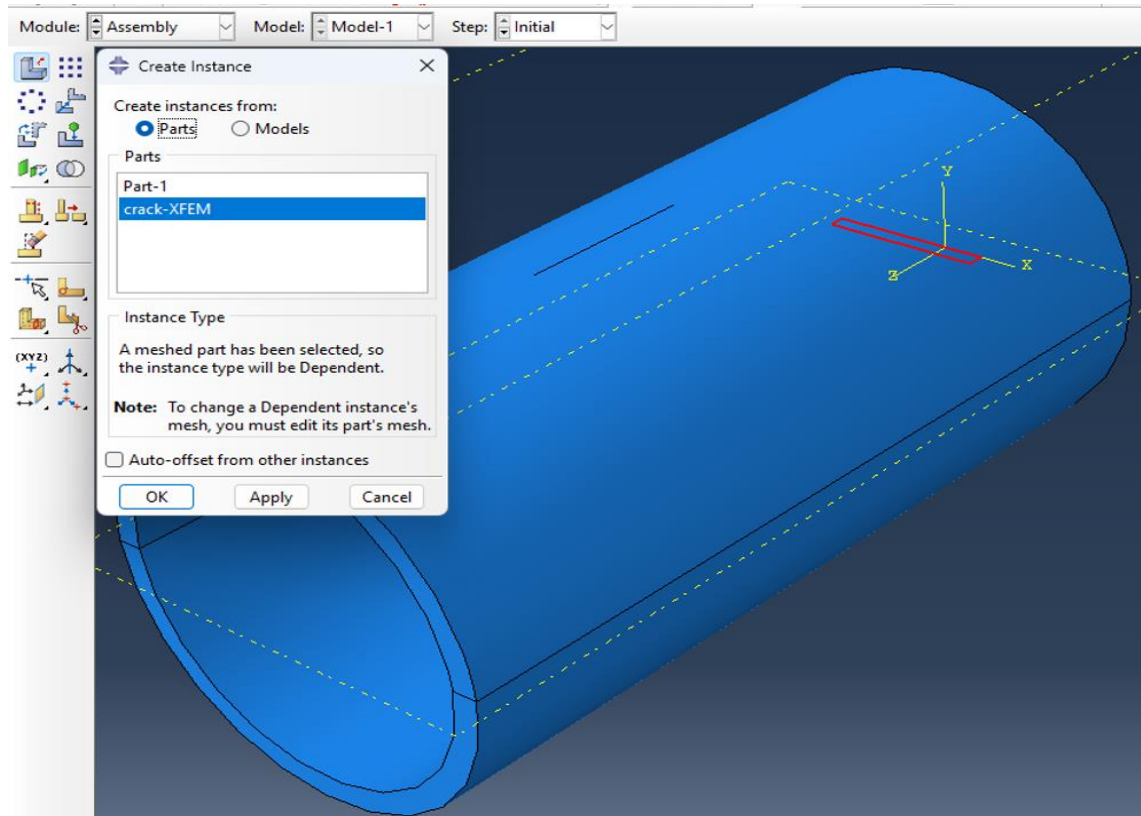
Tämän on jo kohdassa 7 c liitä osaan materiaali ja mahdolliset muut fysikaaliset ominaisuudet (Section Assignment). Valitse kappale hiirellä klikkaamalla (Done). Hyväksy luomasi ominaisuus (OK).



Kokoonpano

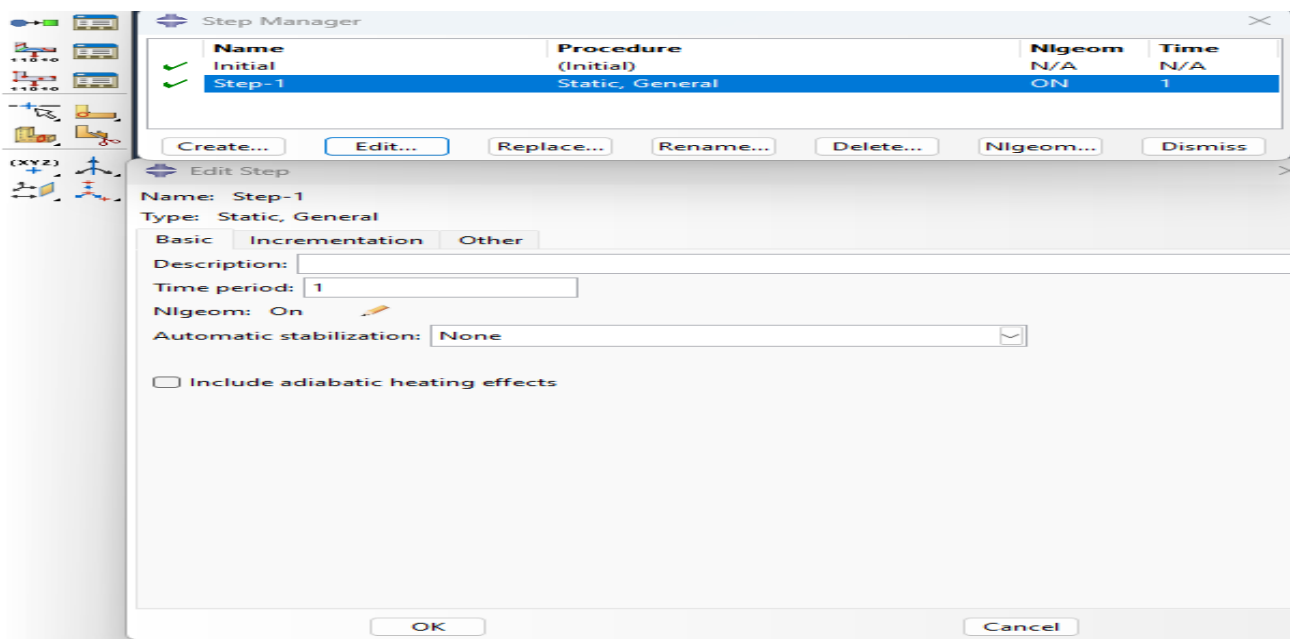
8. Malli voi sisältää monta osaa, mutta vain yhden kokoonpanon. Tässä tehtävässä putken ja särön luodaan kopio (instance). (Assembly → Instances). Hyväksy osa (OK).

- a) Valitse  Create Instance-Shift- (crak, pipe) part-ok, sitten  Rotate instance ja  Translate instance kautta voi laittaa crack oma paikalla.



Analyysityypin määrittäminen

9. Luo analyysiaskel, jossa Field Output. Anna askelelle nimi. Valitse analyysityypiksi Static, General (Continue → OK).



Edit Step

Name: Step-1

Type: Static, General

Basic Incrementation Other

Type: Automatic Fixed

Maximum number of increments: 100

	Initial	Minimum	Maximum
Increment size:	0.01	0.0001	1

Valitse Field Output Manger-Edit-Failure-state.

The screenshot shows the Abaqus interface with the Field Output Requests Manager and the Edit Field Output Request dialog box open over a 3D model of a blue cylindrical part. The dialog box is configured for Step-1, Static, General procedure, with the domain set to 'Whole model' and frequency 'Every n increments' with n=1. The 'Output Variables' section is expanded to show 'Failure/Fracture' and 'State/Field/User/Time' categories, with several variables checked. Red arrows point from these checked variables to callout boxes on the right.

Field Output Requests Manager:

Name	Step-1	
✓ F-Output-1	Created	

Step procedure: Static, General
 Variables: LE, PE, PEEQ, PEMAG, PHILSM, PSILSM, S, STATUS, STATUSXFEM, U
 Status: Created in this step

Edit Field Output Request:

Name: F-Output-1
 Step: Step-1
 Procedure: Static, General
 Domain: Whole model Exterior only
 Frequency: Every n increments n: 1
 Timing: Output at exact times

Output Variables:
 Select from list below Preselected defaults All Edit variables

LE, PE, PEEQ, PEMAG, PHILSM, PSILSM, S, STATUS, STATUSXFEM, U

- Energy
- Failure/Fracture
- Thermal
- Electrical/Magnetic
- Porous media/Fluids
- Volume/Thickness/Coordinates
- Error indicators
- State/Field/User/Time

Note: Some error indicators are not available when Domain is Whole Model or Int

Output for rebar
 Output at shell, beam, and layered section points:
 Use defaults Specify:
 Include local coordinate directions when available


OK Cancel

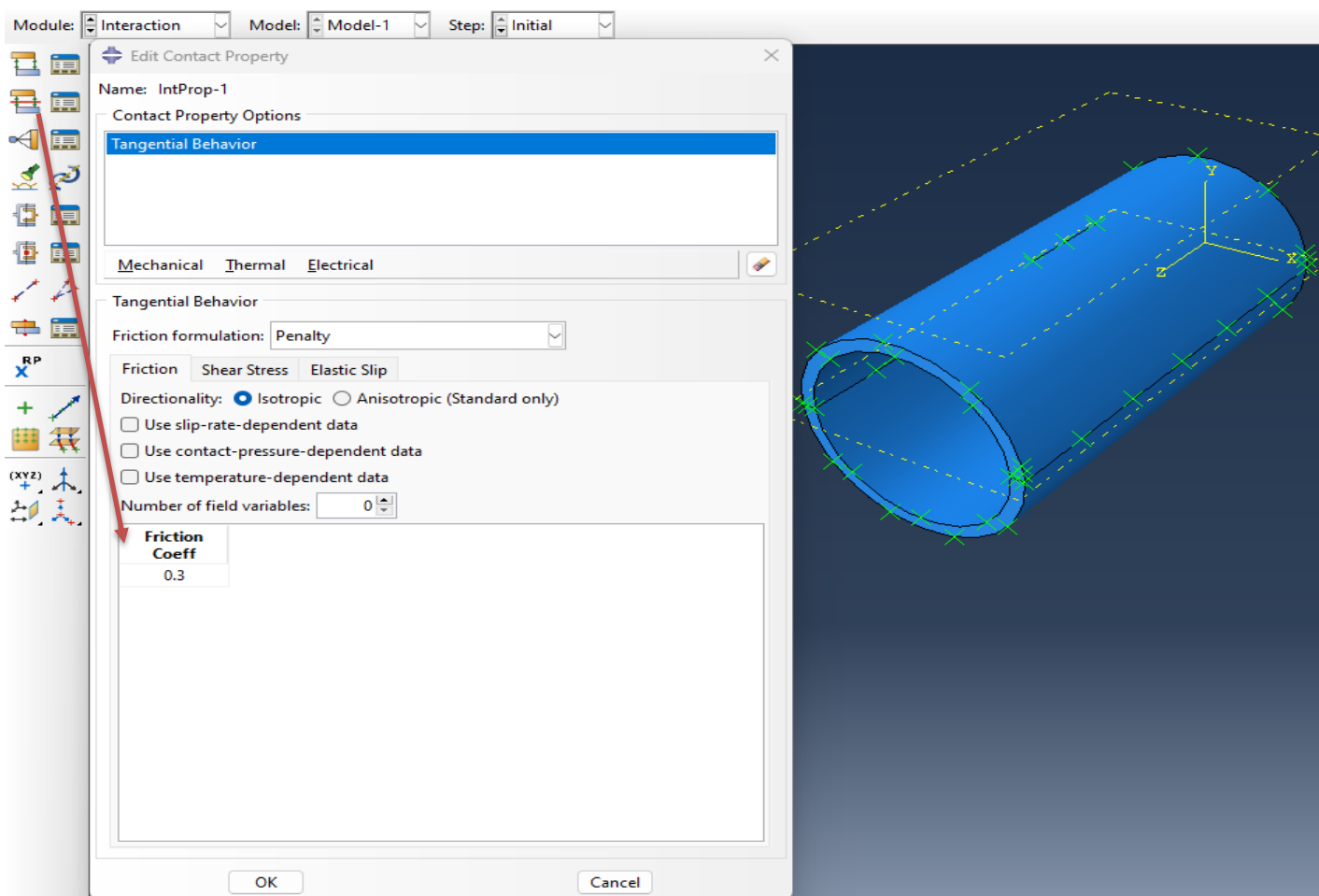
Callout Boxes:

- PHILSM, Level set value phi
- PSILSM, Level set value psi
- STATUS, Status (some failure and plasticity models; VUMAT)
- STATUSXFEM, Status of x fem element


Interaction (XFEM) menetelmät

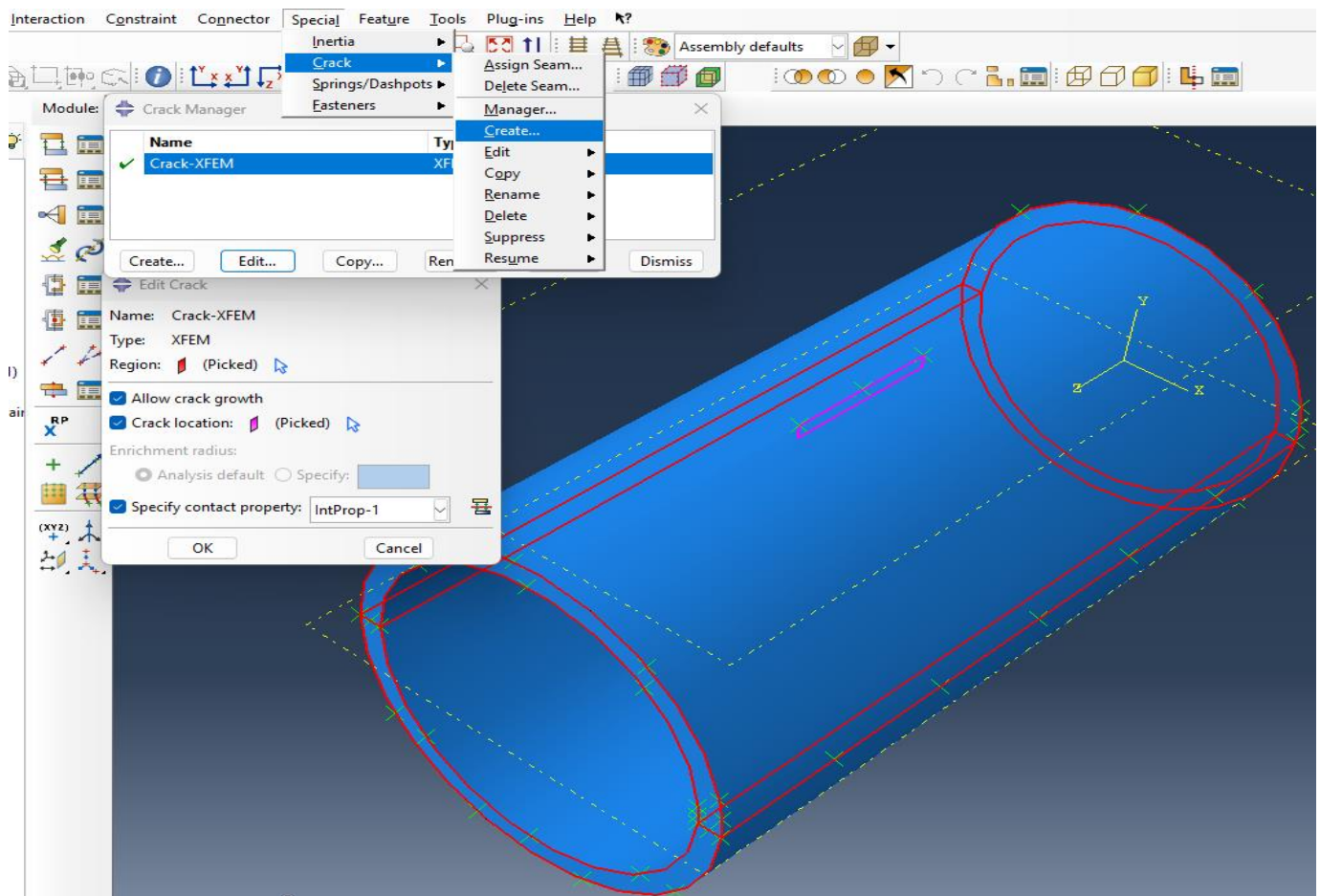
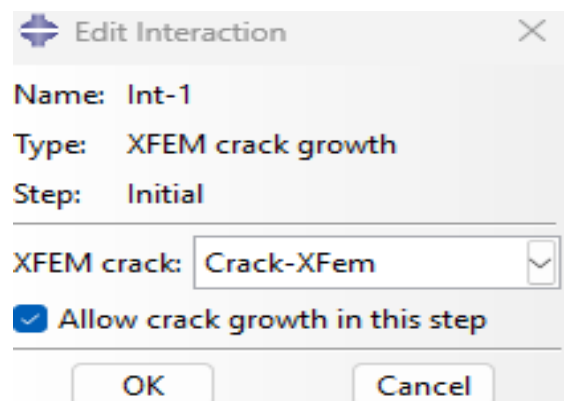
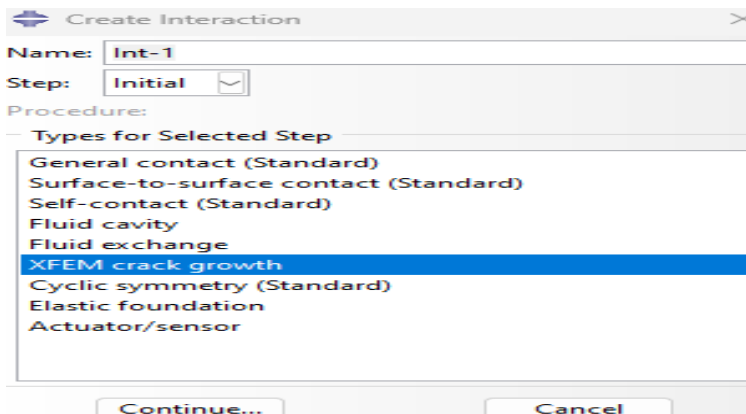
Särön kasvun (XFEM) arviointi öljy- ja kaasuputkissa.

- a) Valitse  Create Interaction Property-(Name)-Contact-Continue-Mechanical-Tangential Behavior-Friction formulation-penalty-Friction Coeff (0.3) OK.



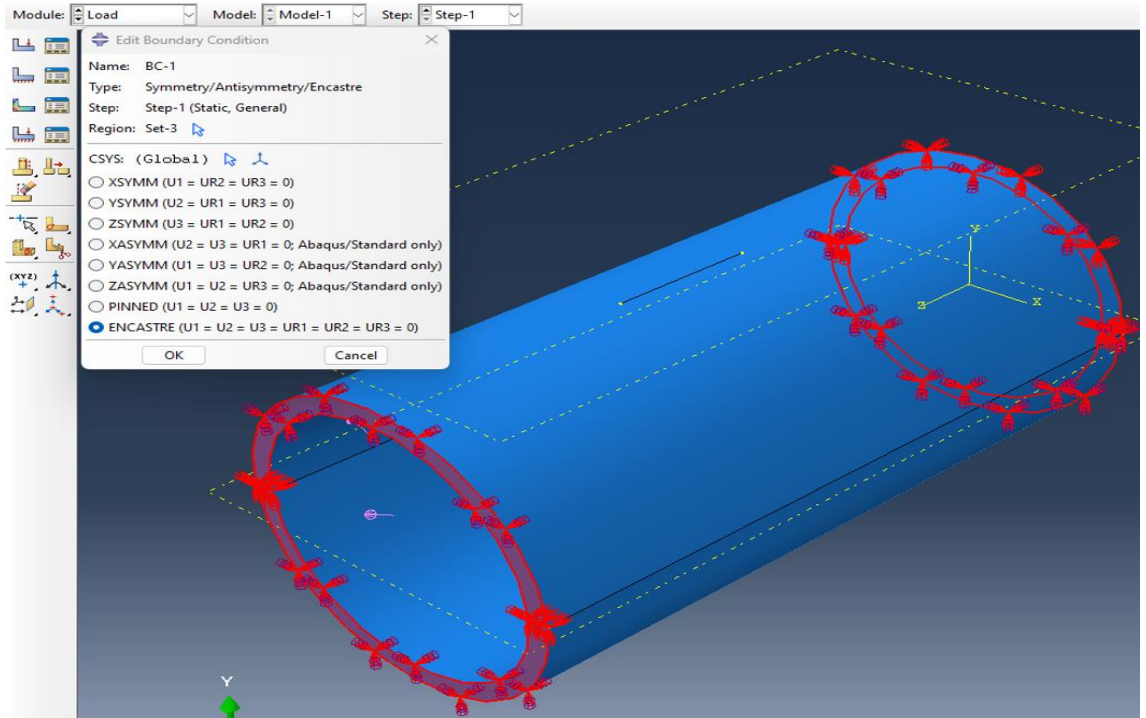
b) Valitse Interaction-Special-Crack-Create (Name crack) XFEM-Continue. Sitten paina hiiri putken päällä -Crack location-valitse taas crack ja ok.

c) Valitse  Create Interaction-(Name)-Step-Initial-XFEM crack grow-continue.



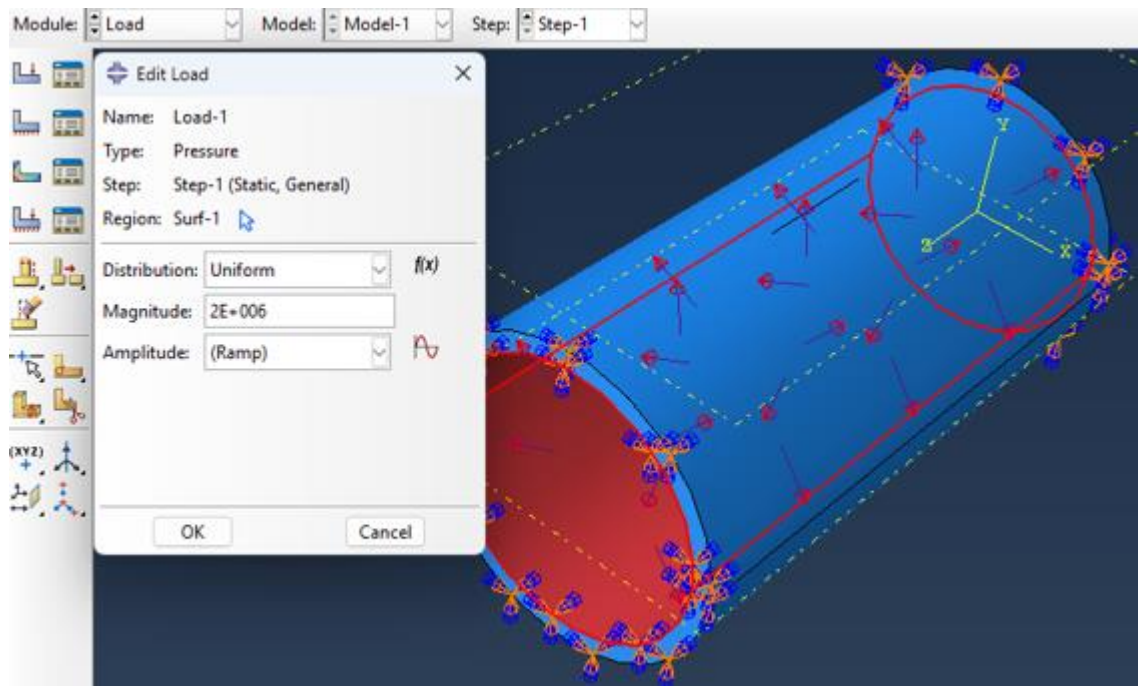
Reunaehdot

11. Kiinnitä putken molemmat pää jäykästi kiinni (BCs). Nimeä. Reunaehto aktivoituu analyysiaskeleella (Step: Initial). Valitse Symmetry/Antisymmetry/Encastre.



Kuormitus

12. Aseta kuormitusvoima putken sisäpäin (Loads). Nimeä. Voima annetaan analyysiaskeleella (Step). Valitse kuorman tyyppi (Pressure). Valitse hiirellä pinta, johon paine vaikuttaa (Done).



Elementtiverkon luominen

13. Voit tutkia ja valita käytettävän verkotustavan (Mesh → Controls).
 14. Valitse elementtityyppi (Mesh → Element type). Valitse Incompatible modes. Elementtityyppi on C3D8R.
 15. Valitse elementtiverkon tiheys (Seed → Part). Määritä elementin koko, 0.004.
 16. Luo elementtiverkko (Assign Mesh Controls-) Element shape- Hex-Sweep-Medial axis -ja Minimize the mesh transition-ok.
- Part Crack ei ole pakko verkotta.

Mesh Controls

Element Shape
 Hex Hex-dominated Tet Wedge

Technique
 As is
 Free
 Structured
 Sweep
 Bottom-up
 Multiple

Algorithm
 Medial axis
 Minimize the mesh transition
 Advancing front
 Use mapped meshing where appropriate

Buttons: Redefine Sweep Path... Assign Stack Direction...

Buttons: OK Defaults Cancel

Global Seeds

Sizing Controls
Approximate global size: 0.004

Curvature control
Maximum deviation factor (0.0 < h/L < 1.0): 0.1
(Approximate number of elements per circle: 8)

Minimum size control
 By fraction of global size (0.0 < min < 1.0) 0.1
 By absolute value (0.0 < min < global size) 0.0004

Buttons: OK Apply Defaults Cancel



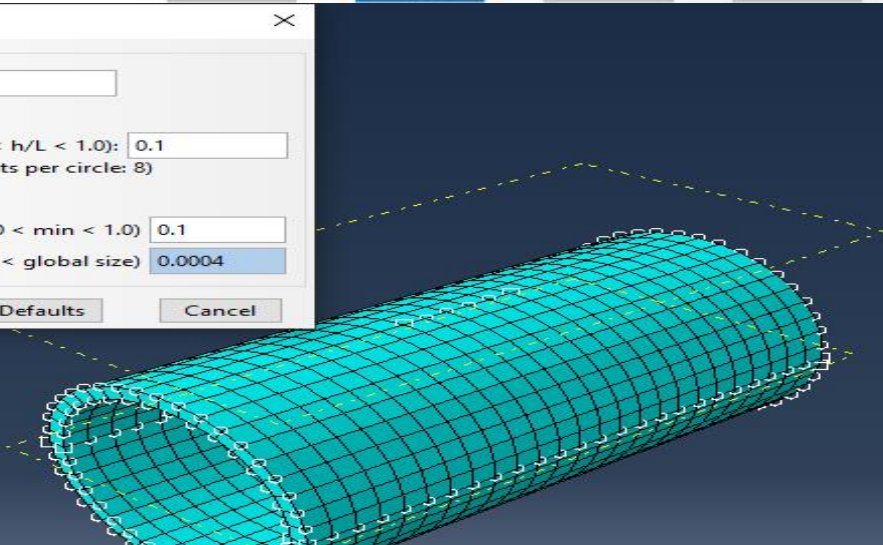
Global Seeds

Sizing Controls
Approximate global size: 0.004

Curvature control
Maximum deviation factor (0.0 < h/L < 1.0): 0.1
(Approximate number of elements per circle: 8)

Minimum size control
 By fraction of global size (0.0 < min < 1.0) 0.1
 By absolute value (0.0 < min < global size) 0.0004

Buttons: OK Apply Defaults Cancel



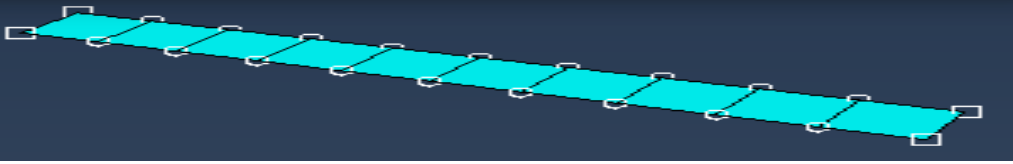
Global Seeds

Sizing Controls
Approximate global size: 0.002

Curvature control
Maximum deviation factor (0.0 < h/L < 1.0): 0.1
(Approximate number of elements per circle: 8)

Minimum size control
 By fraction of global size (0.0 < min < 1.0) 0.1
 By absolute value (0.0 < min < global size) 0.0002

Buttons: OK Apply Defaults Cancel



Element Type

Element Library: Standard Explicit

Geometric Order: Linear Quadratic

Family: 3D Stress

Hex Wedge Tet

Hybrid formulation Reduced integration Incompatible modes

Improved surface stress visualization

Element Controls

Hourglass stiffness: Use default Specify []

Viscosity: Use default Specify []

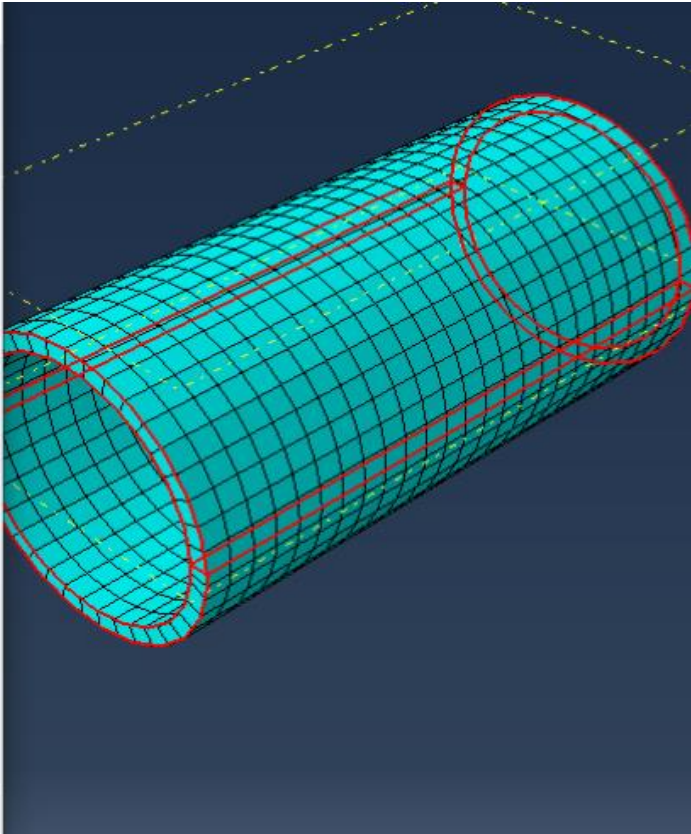
Kinematic split: Average strain Orthogonal Centroid

Second-order accuracy: Yes No

C3D8R: An 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control.

Note: To select an element shape for meshing, select "Mesh->Controls" from the main menu bar.

OK Defaults Cancel



Mesh Controls

Element Shape: Quad Quad-dominated Tri

Technique: As is Free Structured Sweep Multiple

Algorithm: Medial axis Advancing front

Minimize the mesh transition Use mapped meshing where appropriate

OK Defaults Cancel

Element Type

Element Library: Standard Explicit

Geometric Order: Linear Quadratic

Family: Heat Transfer Membrane Surface Shell

Quad Tri

Reduced integration

Element Controls

Membrane strains: Finite Small

Membrane hourglass stiffness: Use default Specify []

Bending hourglass stiffness: Use default Specify []

Drilling hourglass scaling factor: Use default Specify []

Viscosity: Use default Specify []

S4R: A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains.

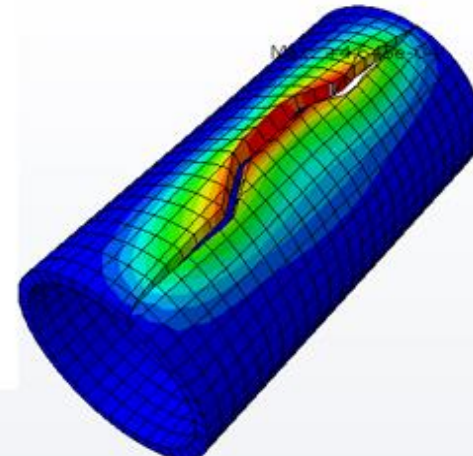
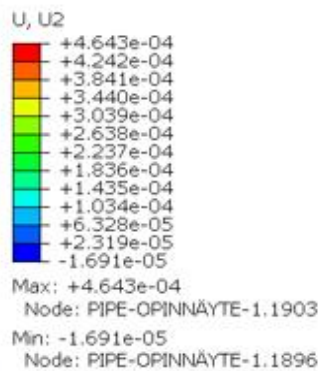
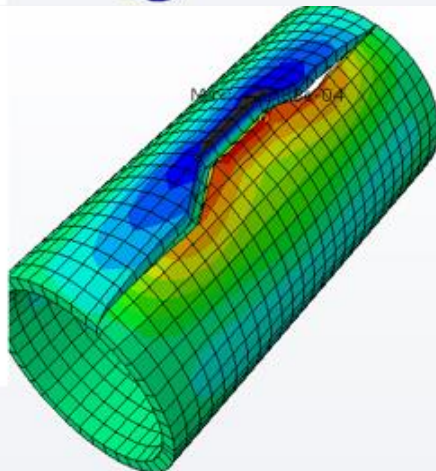
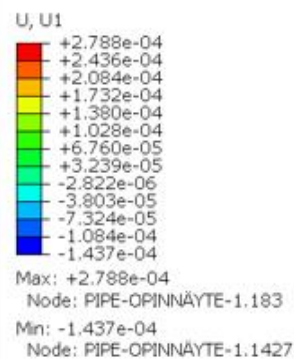
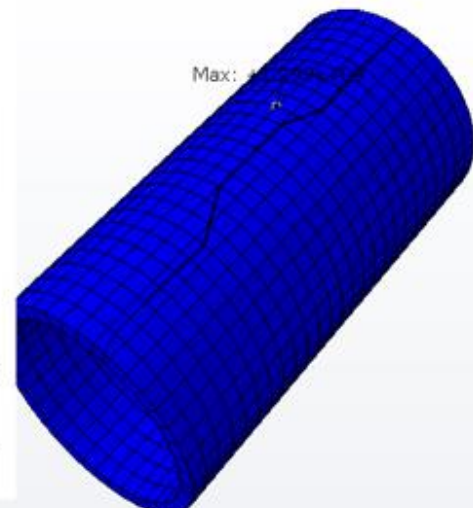
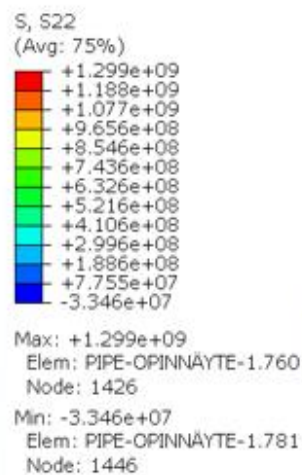
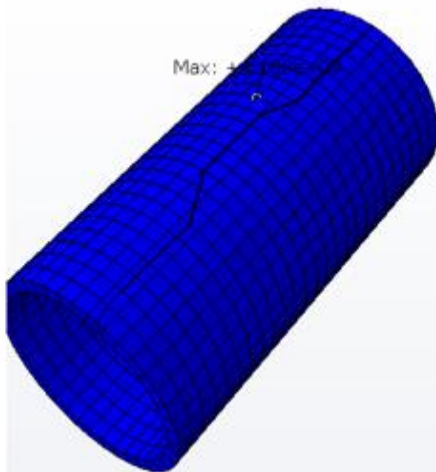
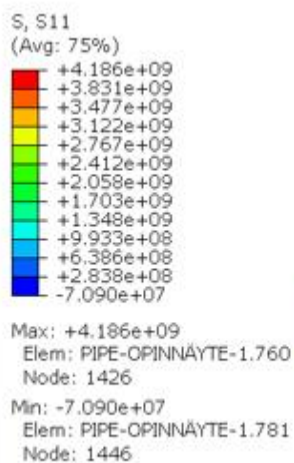
Note: To select an element shape for meshing, select "Mesh->Controls" from the main menu bar.

OK Defaults Cancel

Ratkaisu

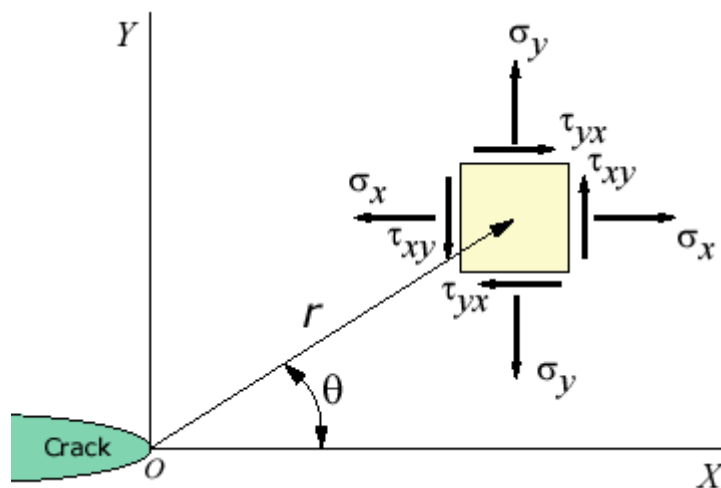
17. Määritä työvaiheet (Jobs). Anna työlle nimi.
18. Lähetä työ ratkaisijalle (Valitse työ ja hiiren oikealla näppäimellä valitse Submit).
19. Tarkastele työn etenemistä (Valitse työ ja hiiren oikealla näppäimellä valitse Monitor).
20. Tarkista virheilmoitukset ja varoitukset (Errors, Warnings).

Visualization tulokset



Ohje, jännitysintensiteettikertoimet KI, KII, KIII särön kärjessä.

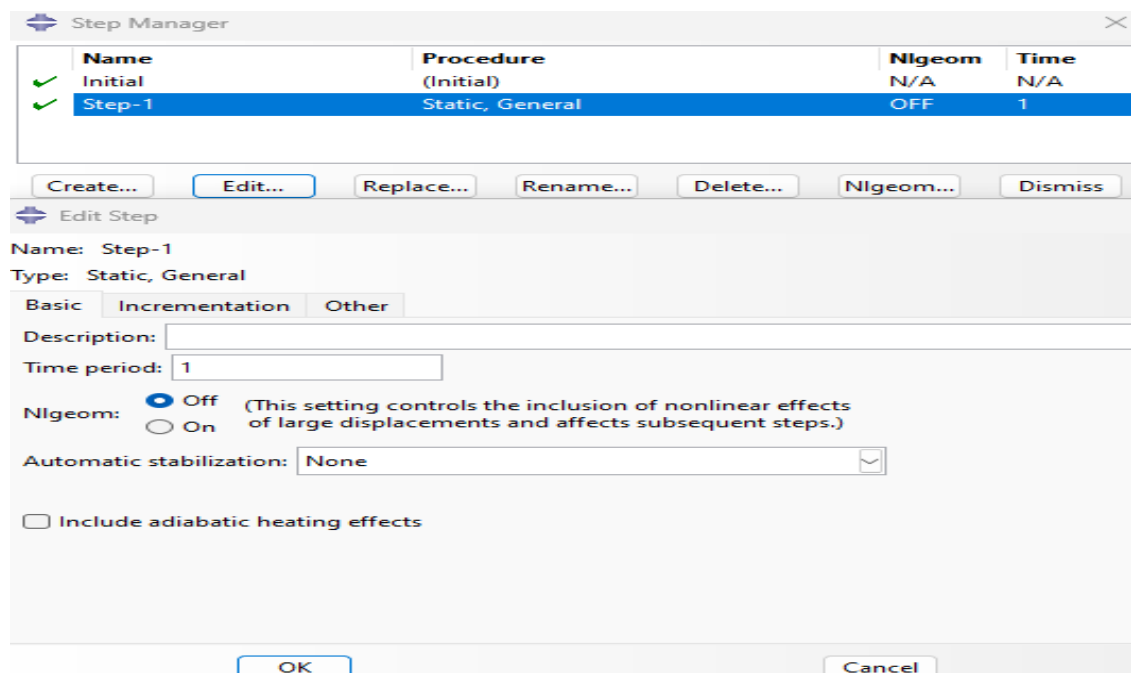
Jännitysintensiteettitekijää K käytetään murtumismekaniikassa jännitystilän (jännityksen intensiteetin) ennustamiseen etäkuormituksen tai jäännösjännityksen aiheuttaman särön tai särön kärjen lähellä. Jännitysintensiteettikerroin on teoreettinen rakenne, jota yleensä sovelletaan lineaariseen ja homogeeniseen elastiseen materiaaliin ja jota käytetään hauraiden materiaalien rikkoutumiskriteerinä. Tätä konseptia voidaan soveltaa myös materiaaleihin, joilla on pieni myötö särön kärjessä.

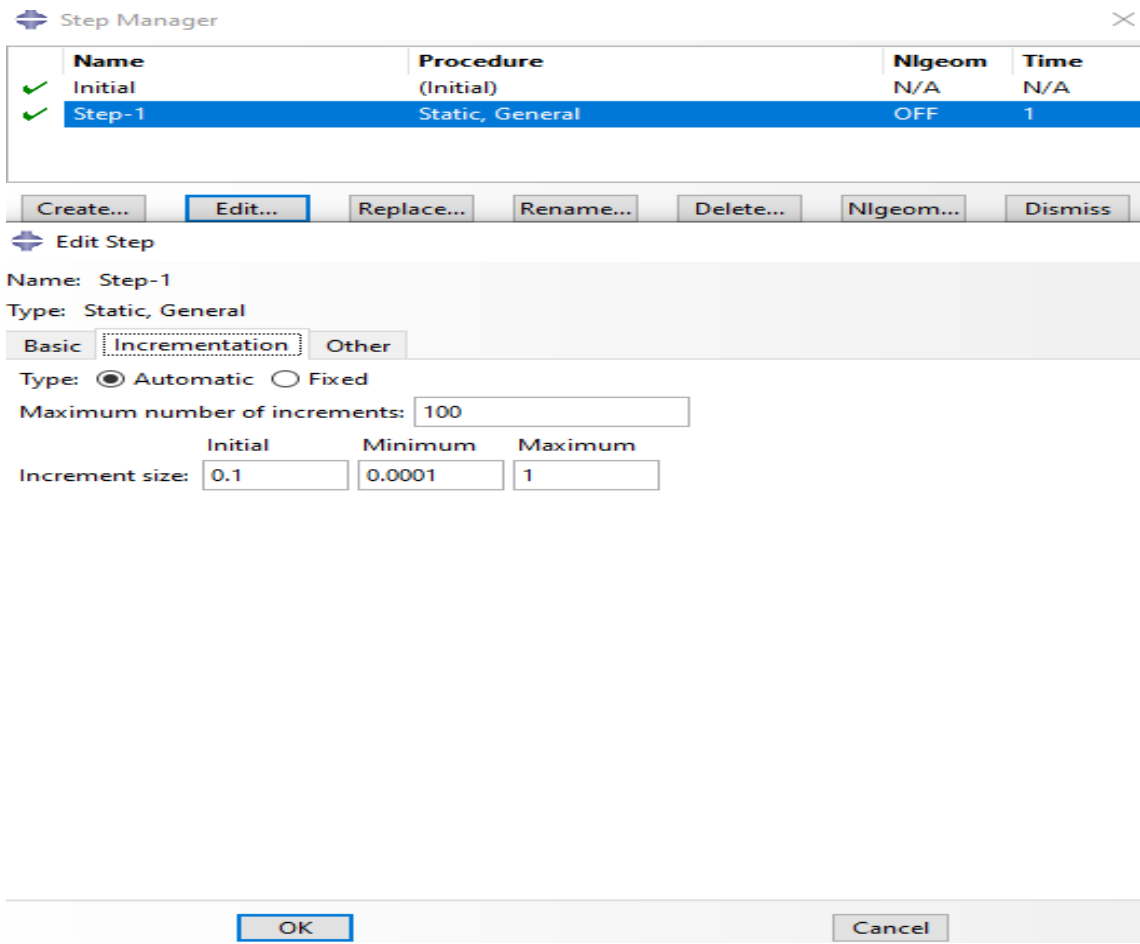


Särön kärjen stressi koordinaatit. [8, s.323]

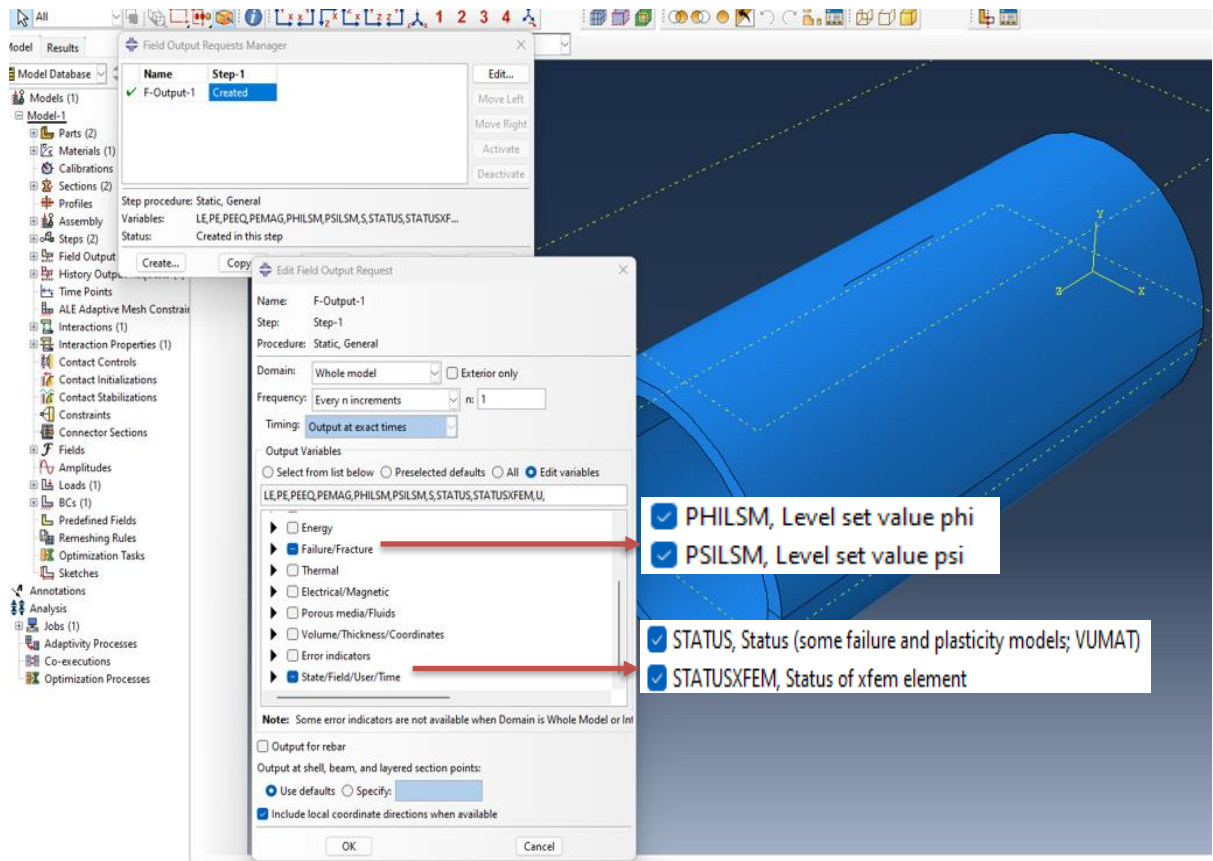
Analyysityypin määrittäminen

1.Step Manager-Basic- Incrementation, jossa Field Output ja History Output (Steps). Anna askelelle nimi. Valitse analyysityypiksi Static, General (Continue → OK).

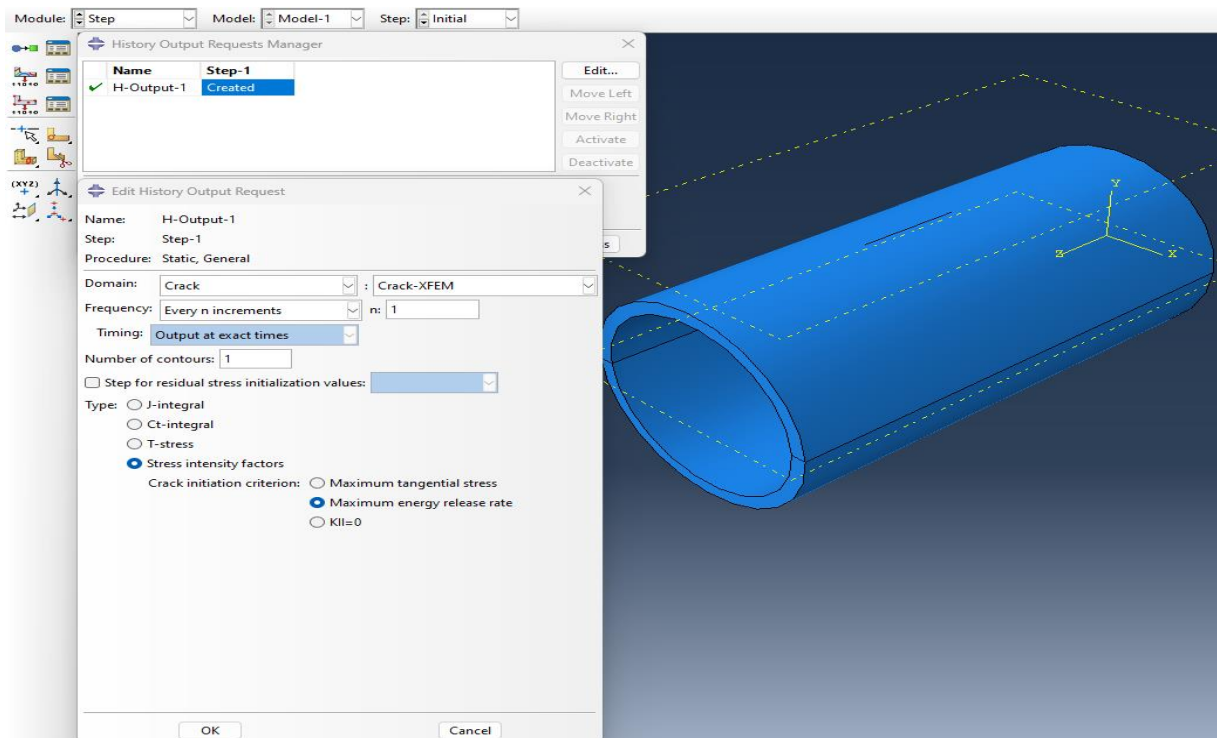




Valitse F-Output Manger-Edit-failure-State.

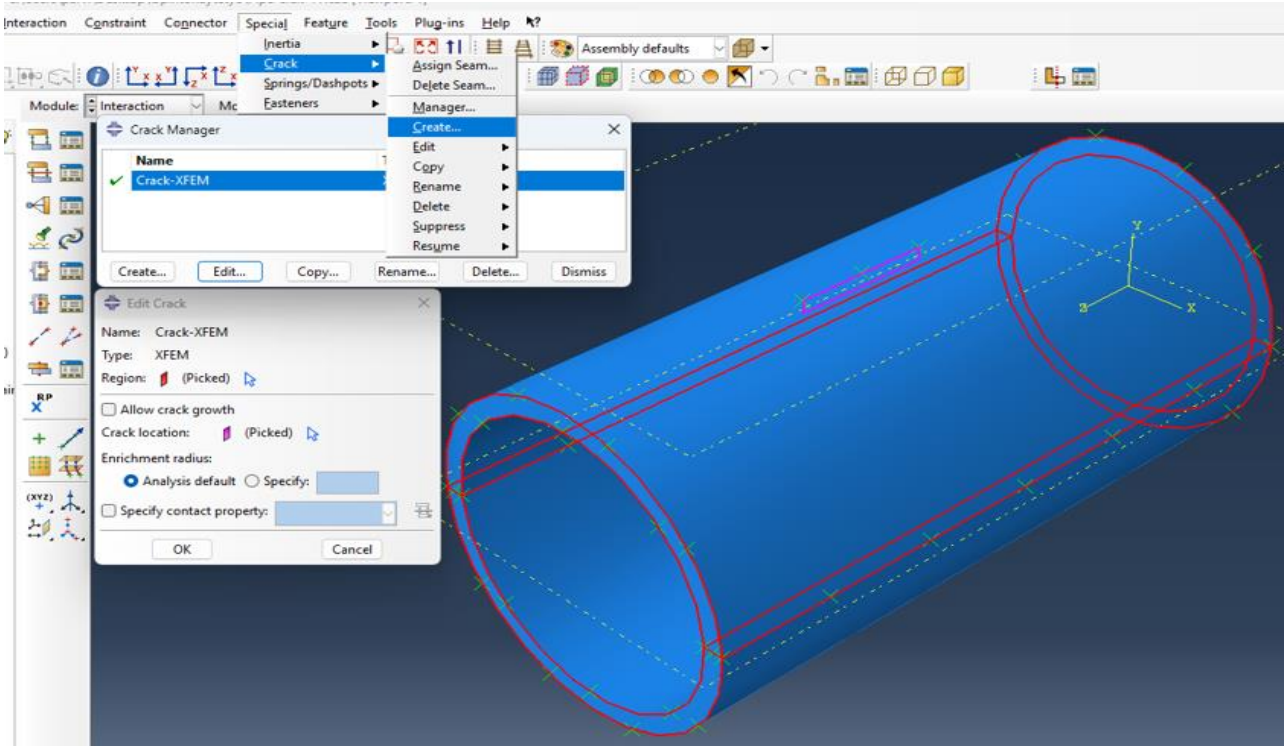
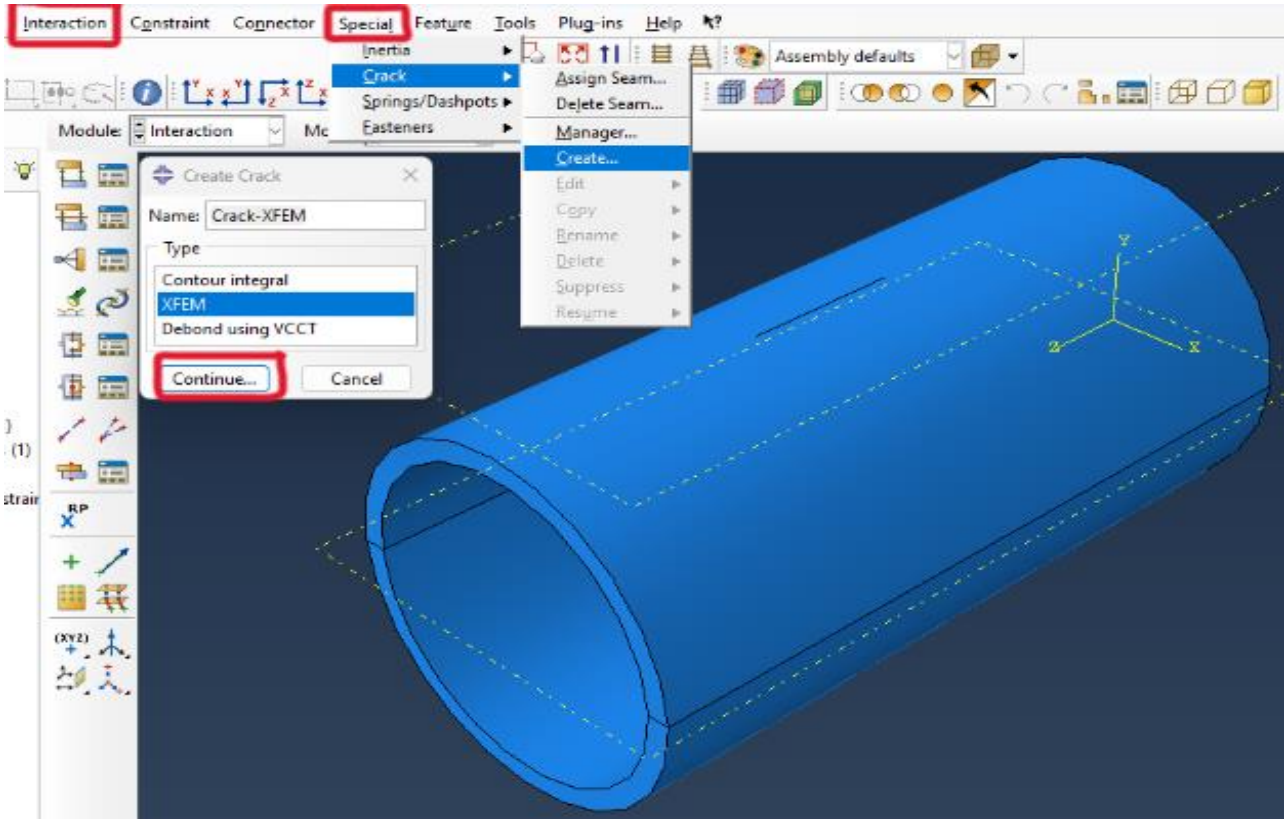


Valitse step-History Output-Edit-Domain-Crack-Number of (contours=1)- Type-stress intensity factor-Maximum energy release rate-OK.



Interaction ohje (XFEM), laskea (KI, KII.KII)

1. Murtumismekaniikassa jännitysintensiiteettikerrointa (K) käytetään ennustamaan jännitystilaa ("jännitysintensiiteetti") kaukokuorman tai jäännös-jänni-tyksen aiheuttaman halkeaman tai loven kärjen lähellä.
 - a) Valitse -Special-Crack-Create (Name crack) Type XFEM-Continue-ja sitten paina putkin päällä -crack -ok



Ratkaisu

1. Määritä työvaiheet (Jobs). Anna työlle nimi.
2. Lähetä työ ratkaisijalle (Valitse työ ja hiiren oikealla näppäimellä valitse Submit).
3. Tarkastele työn etenemistä (Valitse työ ja hiiren oikealla näppäimellä valitse Monitor, Date File).
4. Tarkista virheilmoitukset ja varoitukset (Errors, Warnings).

Jännitysintensiteetti Kertoimet laskenta vaiheet ovat seuraavat.

Tuloksen jälkeen vaiheet, valitaan (Create XY Data) - ODB history output - Continue - sitten paina key Shift ja valitaan kaikki KI - Save As - Name-
srss(XY,XY,...))- Ok.

Tämän jälkeen valitaan (XY Data Manager) - plot- Edit.

Ja (KII) sama tapauksessa.

$$\sigma_x = \frac{PR}{2t} = \frac{(2 \cdot 10^6) \text{ Pa} \times 0,025 \text{ m}}{2 \times 0,003 \text{ m}} = 8/33 \text{ Pa}$$

$$\mathbf{k}_{II} = \frac{PR}{2t} \sqrt{\Pi a} (1 + \sin^2 \beta) = 4.176042706$$

$$\mathbf{k}_I = \frac{PR}{2t} \sqrt{\Pi a} = 2.088021353$$

Edit XY Data

Name: KI

	X	Y
1	0.1	2.08595E+08
2	0.2	4.1719E+08
3	0.35	7.30082E+08
4	0.575	1.19942E+09
5	0.9125	1.90343E+09
6	1	2.08595E+09
7		
8		
9		
10		

Quantity Types

X: Time Y: Stress intensi

OK Cancel

Edit XY Data

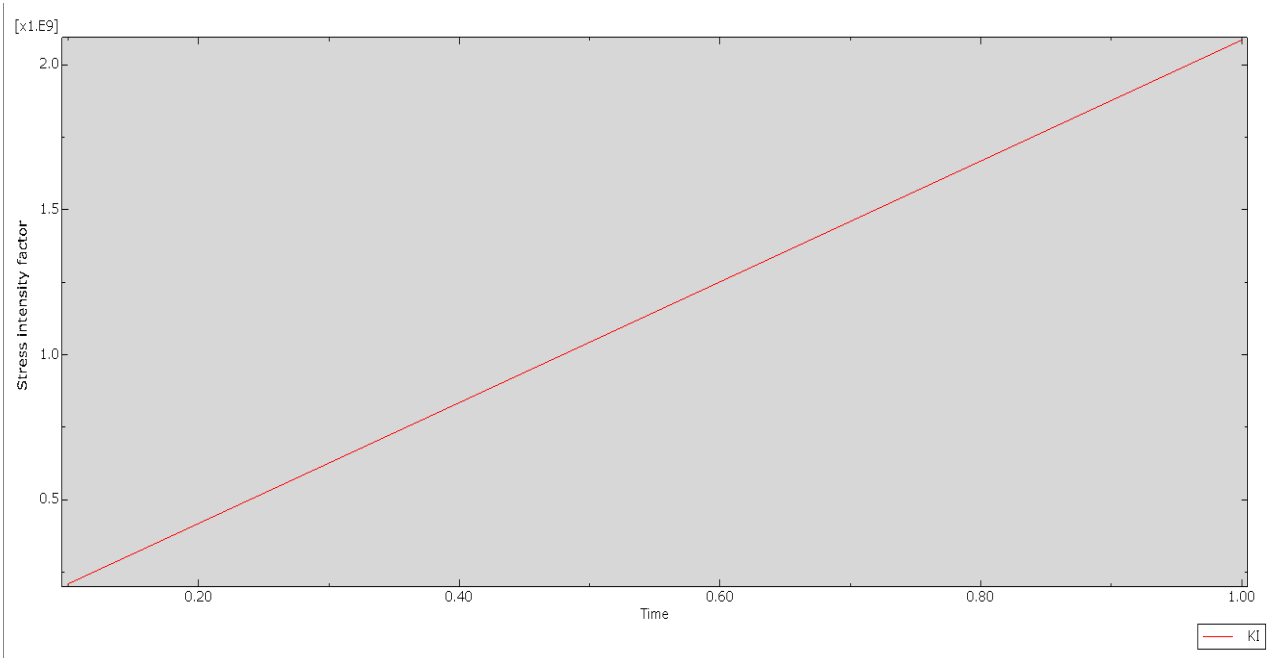
Name: KI

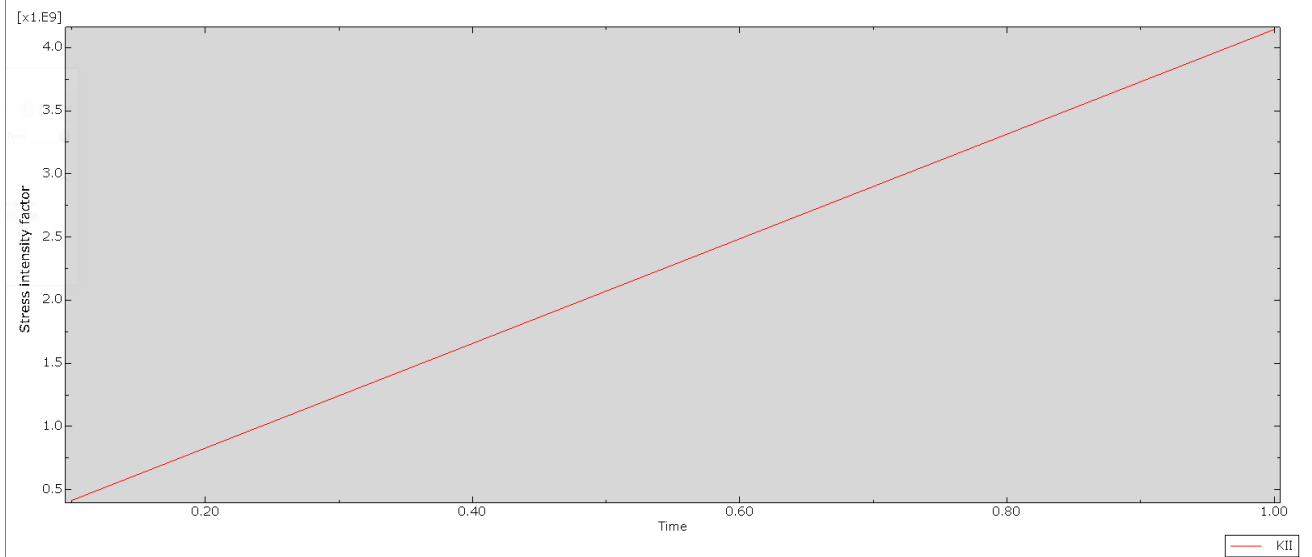
	X	Y
1	0.1	4.14323E+08
2	0.2	8.28646E+08
3	0.35	1.45013E+09
4	0.575	2.38236E+09
5	0.9125	3.7807E+09
6	1	4.14323E+09
7		
8		
9		
10		

Quantity Types

X: Time Y: Stress intensi

OK Cancel





Visualization tulokset

Näissä tapauksissa särö ei kasva vaan pysyy vakiona, Kuormituksena sama sisäinen paine.

