

LAPPEENRANNAN TEKNILINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

HÖYRYSTINPUTKIEN KUNNONVALVONTAROBOTIN KEHITYS: MEKAANINEN
RAKENNE

DEVELOPMENT OF A ROBOT FOR CONDITION MONITORING OF STEAM
BOILER TUBES: MECHANICAL STRUCTURE

Nick Cederström 21.3.2017

Työn ohjaaja Lauri Luostarinen

Työn tarkastaja Lauri Luostarinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Nick Cederström

Höyrystinputkien kunnonvalvontarobotin kehitys: Mekaaninen rakenne

Kandidaatintyö

2017

41 sivua, 16 kuvaa ja 8 taulukkoa

Ohjaaja: TkT Lauri Luostarinen

Tarkastaja: TkT Lauri Luostarinen

Hakusanat: Putkistorobotti, kunnonvalvonta, pintakalvomittari, höyrystinputki, magnetiitti

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia ja kehittää putkistorobotin käyttömahdollisuuksia voimalaitosten höyrystinputkien sisäpuolisen magnetiittikerroksen mittaamiseen. Työn taustalla oleva ongelma on magnetiittikerroksen mittaamisen hankaluus ja epätarkkuus, kun mittaus tehdään putken ulkopuolelta rakennetta rikkomattomalla menetelmällä.

Työssä selvitetään ja vertaillaan olemassa olevia magnetiitin mittausmenetelmiä, sekä kartoitetaan, onko vastaavaan käyttötarkoitukseen jo kehitetty putkistorobottia. Työssä tutkitaan yleismallisten, lähinnä viemäreiden kuvaamiseen tarkoitettujen putkistorobottien muuttamista voimalaitoksiin sopivaksi. Työssä ideoidaan myös kokonaan uuden laitteen kehittämistä, mikä on suunniteltu vain kyseiseen käyttötarkoitukseen voimalaitosten höyrystinputkistoihin.

Työssä saatiin kaksi vaihtoehtoista tapaa toteuttaa putkistorobotin mekaaninen rakenne. Menetelmissä voidaan käyttää pääosin samoja osia, mutta erona on tekniikka, jolla mittalaitteet sisältävää moduulia liikutetaan höyrystinputken sisällä. Työn rajauksesta johtuen laitteesta ei ole tehty vielä valmista prototyyppiä, eikä menetelmien toimivuutta ole päästy kokeilemaan käytännössä.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Nick Cederström

Development of a robot for condition monitoring of steam boiler tubes: mechanical structure

Bachelor's thesis

2017

41 pages, 16 pictures and 8 tables

Supervisor: D.Sc. (Tech.) Lauri Luostarinen

Examiner: D.Sc. (Tech.) Harri Eskelinen

Keywords: Pipe robot, condition monitoring, thickness gauge, boiler tube, magnetite

The purpose of this bachelor's thesis is research and develop usability of pipe robot for inspecting magnetite layer inside power plant boiling tubes. Background of this thesis is difficulties and inaccuracy when inside magnetite layer measurement is made from outside of the tube, using nondestructive testing.

In this work, existing measurement techniques for magnetite layer are studied and compared. Existence of suitable measurement devices is also studied. Possibilities to modify general sewer pipe inspection robots for power plant boiler tube inspection is studied. An entirely new measurement device is also developed that is optimized for inspection of power plant boiling tubes.

Two alternative ways to carry out the mechanical structure of the pipe robot were obtained in this work. Essentially same parts can be used in both options, but the difference between two methods is the technique how the module, which include measurement instruments is moved in boiler tube. Due to definition of the work there has not been made any functioning prototypes yet, due to this device is not tested in practice.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	7
1.1	Tutkimusongelma	7
1.2	Tavoitteet ja tutkimuskysymykset	7
1.3	Työn rajaus	8
2	KIRJALLISUUSKATSAUS	9
2.1	Magnetiittikerroksen mittaaminen nykyisin	9
2.2	Höyrystinputkiin tarkoitetut kokeelliset putkistorobotit	12
2.3	Kaupalliset putkistorobotit	17
2.4	Ohuissa putkissa itsenäisesti toimilaitteen avustamana liikkuvat laitteet	18
2.5	Johtopäätökset esitetyistä menetelmistä	20
3	SUUNNITTELU	22
3.1	Tehtävän asettelu	22
3.2	Toimintaympäristön mitat	23
3.3	Abstrahointi	24
3.4	Osakokoonpanoihin jako	25
3.5	Ideamatriisi	25
3.6	Huomioita ideamatriisista	26
4	TULOKSET	29
4.1	Sopivimpien muunnelmien valinta	29
4.2	Laskeutuja	29
4.3	Vaunu	31
4.4	Laskeutujan liikuttaminen	33
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	36
5.1	Vastaavaan käyttötarkoitukseen tarkoitetut laitteet	36
5.2	Eri toteutustapojen edut	36
5.3	Ongelmakohdat	37

5.4	Jatkotutkimuskohteet	38
5.5	Laitteella saavutettava hyöty	38
LÄHTEET		39

LYHENNELUETTELO

CCTV	Closed Circuit TeleVision, suljetun piirin televisio
EMAT	Electromagnetic Acoustic Transducer
LED	Light-Emitting Diode
LFET	Low Frequency Electromagnetic Technique
NDT	Nondestructive testing, rikkomaton aineenkoetus
RFET	Remote Field Electromagnetic Technique

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön aiheena on tutkia höyrykattilan höyrystinputkien kunnonvalvonnan robotisoimista. Työssä selvitetään olemassa olevia vaihtoehtoja sekä ideoidaan uusia ratkaisuja, joita on mahdollista soveltaa robotisoimisessa. Kandidaatintyö tehdään voimalaitosten kunnonvalvontaan erikoistuneen Varo Teollisuuspalvelut Oy:n määrittelemän tutkimusongelman perusteella.

1.1 Tutkimusongelma

Voimalaitosten höyrystinputkien sisäpuolisia kerrostumia mitataan nykyisin putkien ulkopuolelta NDT (Nondestructive testing) menetelmillä. Putket ovat toisissaan kiinni, joten mittauksia ei voida tehdä putken joka suunnasta ulkopuolelta. Ulkopuolelta mittaaminen vaatii myös käsikäyttöistä mittaamista. Mittaaminen on hankalaa koska putket ovat suurimmissa voimalaitoksissa 50 metriä korkeita ja mittauksia tehdään koko matkalta. Lisäksi mittaustarkkuus ulkopuolelta mitattuna on huonompi kuin sisäpuolelta.

1.2 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää putkistorobotin käyttömahdollisuuksia voimalaitoksen höyrystinputkien kunnonvalvonnassa. Kunnonvalvontaan kuuluu putkistojen sisäpinnan kuvaus videokameralla, sekä seinämään kerrostuneen magnetiitin mittaaminen. Työssä tutkitaan ja vertaillaan markkinoilta löytyviä putkistorobotteja, sekä tutkimuslaitosten kehittämiä putkistorobotteja. Työssä tutkitaan myös täysin uuden laitteen kehittämistä, jonka suunnittelun lähtökohtana ja reunaehtoina ovat voimalaitosten höyrystinputkistot. Työssä käsitellään ongelmakohtia ja haasteita, joita putkistorobotin käyttämisessä voimalaitosympäristössä ilmenee. Ongelmiin etsitään mahdollisia ratkaisuja ja arvioidaan niiden toteutettavuutta, sekä vaikutusta laitteen muuhun toimintaan. Tavoitteena on tarjota työn tilaajalle kattava katsaus vaihtoehdoista, joita on mahdollista hyödyntää putkistojen kuvauksessa ja kunnon mittaamisessa, sekä alustaa kehitettävän putkistorobotin tuotekehitystä.

Tutkimuskysymyksiä:

- Mikä aiheuttaa ongelmia voimalaitoksen höyrystinputkien kunnonvalvonnan robotisoimisessa?
- Mitä etuja eri tyyppisillä robotin toimintamenetelmillä on?
- Mitä hyötyä höyrystinputkien kunnonvalvonnan robotisoimisella saavutetaan?
- Onko voimalaitoksen höyrystinputkien sisäpuoliseen kunnonvalvontaan jo kehitetty laitetta?

1.3 Työn rajaus

Työn aiheen laajuuden vuoksi työ jakautuu kahteen eri kandidaatintyöhön. Tämä työ käsittelee putkistorobotin mekaanista toimintaa ja toimilaitteiden valintaa. Tässä työssä tehdään lisäksi kirjallisuuskatsaus jo kehitetyistä putkistoroboteista, joiden tekniikkaa on mahdollista hyödyntää työn tilaajan tarvitsemaan käyttöön. Toiseen kandidaatintyöhön kuuluu toimilaitteiden ohjauksen suunnittelu sekä tiedon käsittely (Pohjolainen 2017).

Työssä pyritään löytämään periaateratkaisu laitteesta, jolla voidaan tehdä mittauksia voimalaitoksen höyrystinputkien sisäpuolella. Laitteesta ei tehdä valmistuspiirustuksia, eikä prototyyppejä tämän työn puitteissa.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Höyrykattilan keittoputkistossa käytetään niukkaseosteisia teräsputkia. Teräksen korroosionkestoa pyritään parantamaan muodostamalla putkien sisäpinnoille tasainen magnetiittikerros (Fe_3O_4). Se muodostetaan voimalaitoksen ensimmäisen käyttöönoton yhteydessä kierrättämällä lämmitetyssä putkistossa lievästi emäksistä vettä. Pääasiassa magnetiitin, mutta myös raudan muiden ruostemuotojen, sekä vedessä olevien epäpuhtauksien kertyminen putken seinämään jatkuu, kun voimalaitosta käytetään. Magnetiitin kerrostuminen on erityisen voimakasta putkien tulipesän puoleisella pinnalla, jossa lämpötila on korkein. Magnetiitin lämmönjohtavuuskyky on vain viisi prosenttia verrattuna teräksen lämmönjohtavuuskykyyn, joten kerroksen kasvettua tarpeeksi paksuksi magnetiitti alkaa toimia eristeenä ja heikentää lämmön johtumista tulipesästä veteen ja näin heikentää koko voimalaitoksen hyötysuhdetta. Tarvittaessa putkisto voidaan hapottaa, jolloin koko magnetiittikerros lähtee putken pinnalta. Toimenpide on kallis eikä sitä tehdä kuin muutaman kerran voimalaitoksen elinkaaren aikana. (Huhtinen et al. 1994, s. 309.)

2.1 Magnetiittikerroksen mittaaminen nykyisin

Nousuputkiin kertyvän magnetiitin määrä riippuu vallitsevista olosuhteista jotka muuttuvat putkiston eri kohdissa, joten mittauksia täytyy tehdä koko tulipesän alueella. Suurimpien voimalaitosten höyrykattilan korkeus voi olla 50 metriä jolloin mittausten suorittamista varten joudutaan rakentamaan telineet höyrykattilan sisäpuolelle, jos mittaukset suoritetaan käsikäyttöisesti. Telineiden rakentaminen ahtaisiin olosuhteisiin on aikaa vievää, sekä vaatii paljon työtä, jolloin mittauskustannukset kasvavat. Rakennusvaiheessa putkistoihin on tehty yleensä vain pienet noin 60 mm halkaisijaltaan olevat huoltoaukot, eikä niitä ole suunniteltu käytettäväksi höyrystinputkien sisäpuolisten mittausten tekemiseen. (Lähde 2016.)

Nousuputkien kunnan mittaamiseen on olemassa useita erilaisia NDT menetelmiä. Tässä esitetään yleisimpiä menetelmiä, joita käytetään höyrystinputkien kunnanvalvontaan. Kaikilla esitetyillä menetelmillä ei pystytä mittaamaan magnetiittikerroksen paksuutta tarkasti tai ei ollenkaan, mutta ne on esitelty tässä työssä, koska niillä voidaan etsiä alueita, joissa magnetiittia mahdollisesti esiintyy tai niitä käytetään myöhemmin esitettävissä laitteissa, joita voisi muuttaa myös magnetiitin havaitsemiseen.

Sähkömagneettiseen akustiikkaan (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT) perustuva menetelmä on nopea tapa mitata putkien seinämävahvuuksia putken ulkopuolelta. EMAT perustuu ultraäänen käyttämiseen, mutta eroaa tavallisesta ultraäänestä siten, ettei mittapään tarvitse olla kiinni mitattavassa pinnassa, koska ultraäänit luodaan pulssimaisilla magneettikentän muutoksilla itse tutkittavassa materiaalissa. Putken ja mittalaitteen väliin jäävä rako helpottaa laitteen automatisoitua käyttöä, sekä mahdollistaa putken jatkuvatoimisen mittaamisen liikuttamalla mittalaitetta putkea pitkin. Menetelmällä voidaan mitata vain seinämänpaksuutta, mutta sillä ei pystytä erottamaan sisäpuolisen magnetiitin osuutta. (Olympus 2017.)

Korkeataajuisella yli 20 MHz taajuisella ultraäänellä voidaan mitata magnetiittikerros putken ulkopuolelta. Ultraäänen mittapää täytyy olla kiinni mitattavassa putkessa ja pinnan täytyy olla puhdas. Menetelmää käytetään käsikäyttöisissä laitteissa (Olympus 2016). Käyttämällä pitkittäisaaltoja ja edistynyttä signaalinkäsittelyä voidaan menetelmällä mitata sisäpuolisia kerrostumia noin 20 μm tarkkuudella (Valmet 2015). Menetelmän robotisoidusta käytöstä voimalaitosten höyrystinputkien mittaamiseen ei löydy tutkimustietoa. Robotisoinnista hankaloittaa mittapään tarkka asettaminen putken pintaa vasten, sekä pinnan tarkka puhtaus vaatimus.

Matalataajuiseen sähkömagneettiseen vaihteluun (Low Frequency Electromagnetic Technique, LFET) perustuvaa menetelmää käytetään putken ulkopuolelta. Mittalaitteen ja tutkittavan pinnan ei tarvitse olla kosketuksessa. Tutkittavaan materiaaliin muodostetaan muuttuva magneettikenttä mittalaitteessa olevalla hevosenkengän muotoisella kelalla. Kelan välissä on anturi, joka mittaa magneettivuon arvoa. Magneettivuo pysyy vakiona, jos tutkittava materiaali on tasalaatuinen. Materiaalissa olevat poikkeamat muuttavat magneettivuon arvoa, joka havaitaan magneettivuota mittaavalla sensorilla. Menetelmällä voidaan havaita magnetiitti putken sisältä, jos sitä on kasautunut esimerkiksi mutkakohtaan. Mittaukseen vaikuttaa kaikki putkessa olevat seinämävahvuuteen liittyvät muutokset kuten syöpymät ja halkeamat, sekä sisä- ja ulkopuolella olevat kerrostumat. Tästä johtuen putken sisäseinämässä olevaa ohutta magnetiittikerrosta ei voida tällä menetelmällä havaita tarkasti. Menetelmää käytetään etupäässä tulistimissa olevien putkien mittaamiseen. (Gowatski et Miner 2011, s. 484–490.)

Remote Field Electromagnetic Technique (RFET) on menetelmä, jolla voidaan mitata putken seinämässä olevat ainevahvuuden poikkeamat sisältä käsin. Laitteessa on vähintään kaksi kela. Toiseen syötetään vaihtovirtaa, joka muodostaa suoran magneettikentän toiseen mittaavaan kelaan, sekä putken seinämiä pitkin kulkevan (Remote Field) magneettikentän, josta muodostuu pyörrevirtoja putken seinämiin. Pyörrevirroista johtuva magneettikentän muutos havaitaan myös mittaavalla kelalla. Putken seinämää pitkin kulkeva magneettikenttä muuttuu, jos putken seinämässä on säröjä, ruostetta tai syöpymiä. Magneettikentän muutos vaikuttaa pyörrevirtoihin, joka havaitaan mittaavalla kelalla. Tekniikalla pystytään mittaamaan jatkuvatoimisesti koko putki. Kehittyneissä versioissa mittaavia keloja voi olla useampi ja ne voivat olla kohtisuorassa putken sisäpintaa vasten, jolloin voidaan määrittää sektoreittain missä suunnassa mitattu poikkeama on. Kelojen välinen etäisyys toisistaan täytyy olla 2–3 kertaa putken sisähalkaisijan verran. Menetelmällä ei voi yksilöidä onko mitattu poikkeama putken sisä- vai ulkopuolella. (TesTex 2015.)

Magnetiittikerros voidaan mitata käyttämällä pintakalvomittaria. Pintakalvomittarilla ei voida mitata putken muita ominaisuuksia kuten syöpymiä tai halkeilemia. Pintakalvomittaria käytettäessä mittapää täytyy saada suoraan mitattavalle pinnalle. Ferromagneettisen materiaalin päällä olevan kerroksen mittaamiseen voidaan käyttää sähkömagneettiseen induktioon perustuvaa menetelmää. Mittapäässä on käämiä perätysten rautasydämen ympärillä. Keskimmäiseen käämiin syötetään vaihtovirtaa, joka aiheuttaa magneettikentän. Kahteen viereiseen käämiin indusoituu jännite, joka on molemmissa sama, jos mittapään lähellä ei ole ferromagneettista metallia. Magneettikentän muoto muuttuu, kun mittapää viedään ferromagneettisen metallin lähelle. Magneettikentän muutoksesta johtuen mittaaville käämeille indusoituu erisuuruinen jännite, riippuen mittapään ja perusmateriaalin välisestä etäisyydestä, joka on kerrostuman paksuus. Mittaaviin käämeihin indusoituvia jännitteitä vertaamalla voidaan laskea kerrostuman paksuus. (Elcometer 2016.) Taulukkoon yksi on listattu kaikkien esitettyjen mittaumenetelmien keskeiset ominaisuudet.

Taulukko 1. Mittausmenetelmät (Olympus 2017; Gowatski et Miner 2011, s. 484–490; Valmet 2015; TesTex 2015; Elcometer 2016).

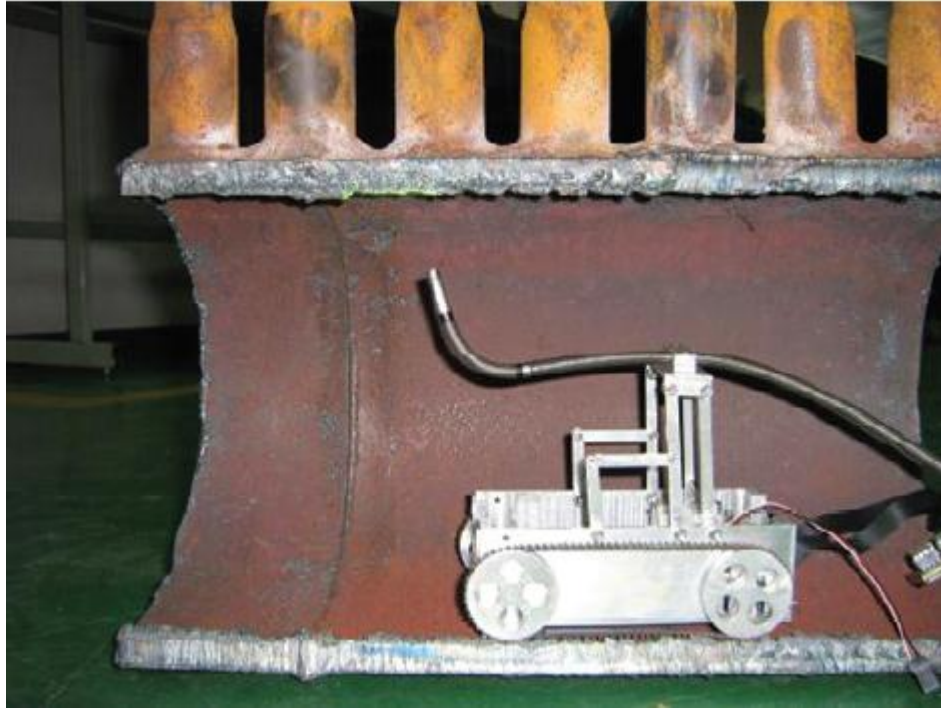
Menetelmä	Mittaus suoritetaan putken sisä/ulko-puolelta	Tarvitsee kontaktin putken pintaan	Kerrostuman mittaustarkkuus
EMAT	Ulko	Ei	*
LFET	Ulko	Ei	2400 μm **
ULTRAÄÄNI	Ulko tai sisä	Kyllä	$\pm 20 \mu\text{m}$
RFET	Sisä	Ei	***
PINTAKALVO-MITTARI	Sisä	Kyllä	$\pm 2,5 \mu\text{m}$
* Käytetään putken seinämän vahvuuden mittaamiseen. Menetelmää ei käytetä magnetiittikerroksen mittaamiseen.			
** Menetelmällä voidaan havaita vain huomattavan suuria kerrostumia. Alkaen noin 5 % putken sisähalkaisijasta. $48 \text{ mm} \times 0,05 = 2,4 \text{ mm}$.			
***Menetelmä ei ole tarkoitettu varsinaisesti magnetiittikerroksen mittaamiseen, mutta sillä voi epäsuorasti havaita magnetiittikerroksen putken seinämänvahvuuden muutoksena, jos magnetiittia on muodostunut paljon.			

2.2 Höyrystinputkiin tarkoitetut kokeelliset putkistorobotit.

Tässä luvussa käydään läpi julkaisuja, joissa on kehitetty laitteita, jotka on tarkoitettu voimalaitosten höyrystinputkien kunnonvalvontaan. Esitettävillä laitteilla mitataan pääsääntöisesti putkiston muita ominaisuuksia kuin magnetiittikerrosta, mutta samoilla laitteilla voi mitata vaihtelevalla tarkkuudella myös magnetiittikerrosta.

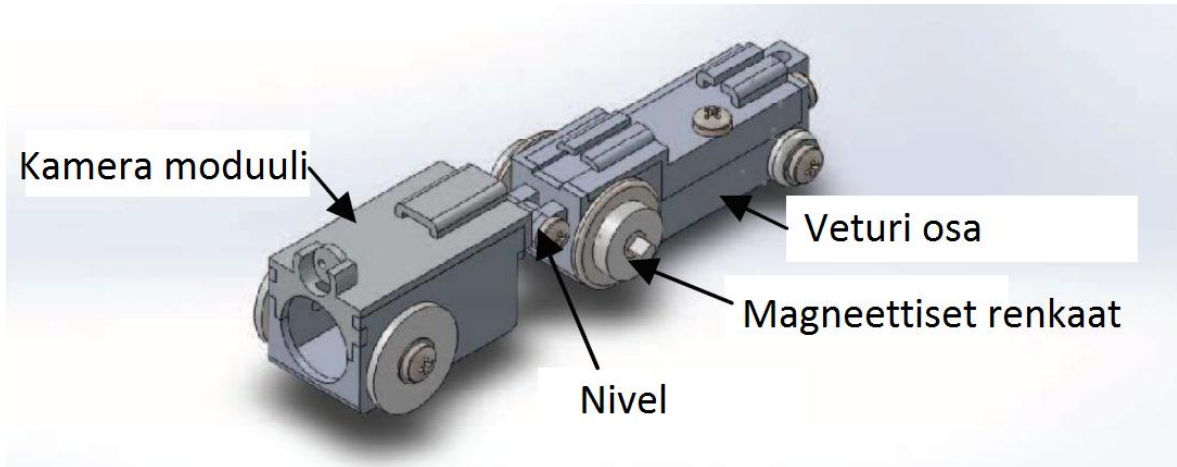
Malesialaisessa University Tenaga Nasionalissa on kehitetty kokeellinen robotti erityisesti voimalaitosten höyrystinputkien sisäpuoliseen kuvaukseen. Kuvassa 1 esitetyssä Robotissa on vain kamera, eikä siihen liity muita mittauslaitteita. Kameraa pystyy kääntämään eri kuvausasentoihin manuaalisesti laitteen ollessa putkiston ulkopuolella. Kamera on robotissa kiinteästi kiinni, eikä sitä pysty työntämään paksusta putkesta lähteviin ohuempiin putkiin. Kameran kiinteä asennus rajoittaa laitteen toiminnan yhtä paksuihin putkiin joihin robotti kokonaan mahtuu. Sillä ei pysty kuvaamaan koko putkistoa. Robotissa on kasaan menevä kameran varsi, jotta laite saadaan mahtumaan pienemmästä huoltoaukosta. Robotin leveys

on 60 mm ja korkeus 55 mm. Robotti mahtuu menemään halkaisijaltaan 89 mm huoltoaukosta. (Baharuddin et al. 2012, s. 1483–1489.)



Kuva 1. Putkistorobotti jakotukissa (Baharuddin et al. 2012, s. 1489).

Samassa University Tenaga Nasionalissa on jatkettu höyrystinputkien sisäpuolisen kunnonvalvonnan tutkimista 2015 julkaistulla julkaisulla, joka käsittelee halkaisijaltaan tuuman paksuiseen putkeen mahtuvan robotin kehitystä. Kuvassa 2 esitetty robotti koostuu kahdesta osasta, jotka ovat toisissaan kiinni vapaalla nivelellä. Ensimmäisessä osassa on moottori sekä vetävät renkaat, joilla robottia liikutetaan. Robotti tukeutuu putken pintaa vasten magneettisilla renkailla ja sillä pystyy ajamaan pystysuoraan putkea pitkin ylöspäin. Toisessa moduulissa on kamera. Laitteessa ei ole muita mittalaitteita. Moduuleiden välinen nivelellinen liitos mahdollistaa laitteen liikkumisen myös mutkakohdista. Julkaisussa esitetään laitteen koekäyttöä lyhyissä n. metrin pituisissa testiputkissa, joissa laitteen todetaan toimivan hyvin. Julkaisun johtopäätöksissä kuitenkin todetaan perässä tulevan kaapelin jäykkyyden olevan ongelma, jota täytyy jatko kehittää. Laitteen huippunopeudeksi mitattiin 19 mm/s. (Shah et al. 2015, s. 4340–4344.)



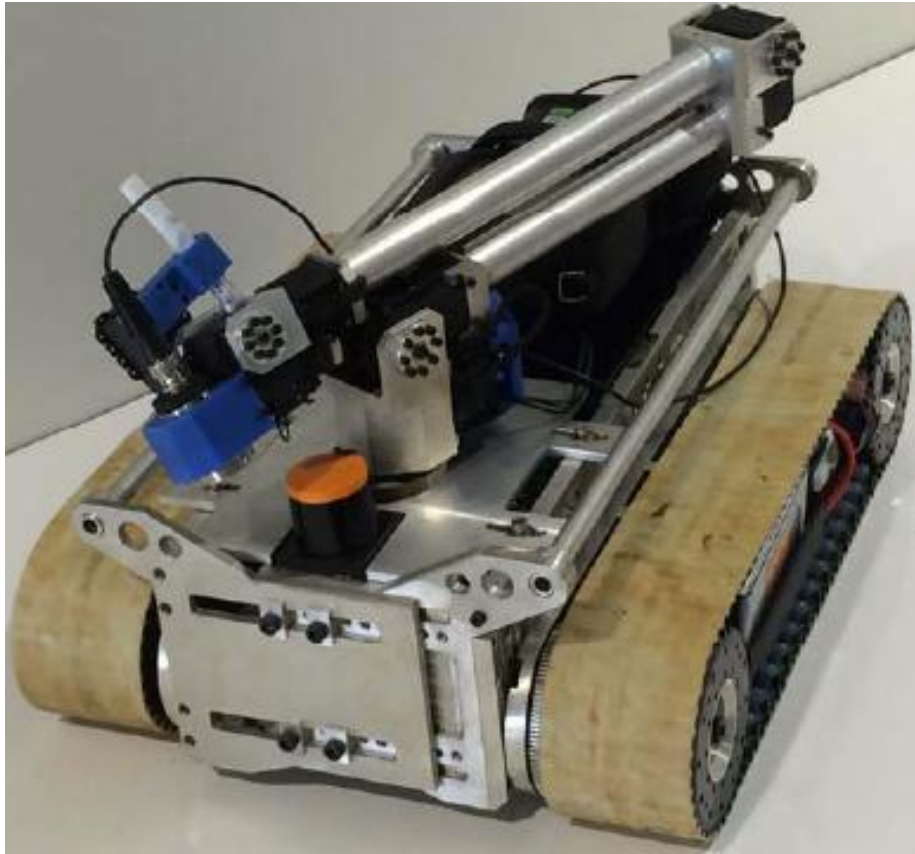
Kuva 2. Kaksiosainen putkistorobotti (Shah et al. 2015, s. 4342, muokattu).

Intian atomienergiaministeriön alaisessa Bhabha Atomic Research Centre tutkimuskeskuksessa on tutkittu voimalaitosten putkistojen kunnonvalvonnan robotisoimista ja tutkimuksesta on tehty julkaisu vuonna 2009. Tutkimuskeskuksessa on kehitetty kunnonvalvontaan tarkoitettu robotti, joka kulkee putkien ulkopuolella tukeutuen magneettisella voimalla putkeen kiinni ja kuvaamalla putkia EMAT menetelmällä. Kuvassa 3 esitetyllä robotilla on mahdollista kulkea vain ylös tai alaspäin. Robottia on testattu yhteistyössä Intian suurimman energia yhtiön NTPC Limitedin kanssa. Kyseisellä tekniikalla suoritettavat mittaukset rajoittuvat vain putken seinämän vahvuuden mittaamiseen kapealta sektorilta, eikä sisäpuolisia kerrostumia pystytä erottamaan. (Badodkar et al. 2009, s. 32–36.)



Kuva 3. Putkiston ulkopuolella liikkuva robotti testiolosuhteissa (Badodkar et al. 2009, s. 34).

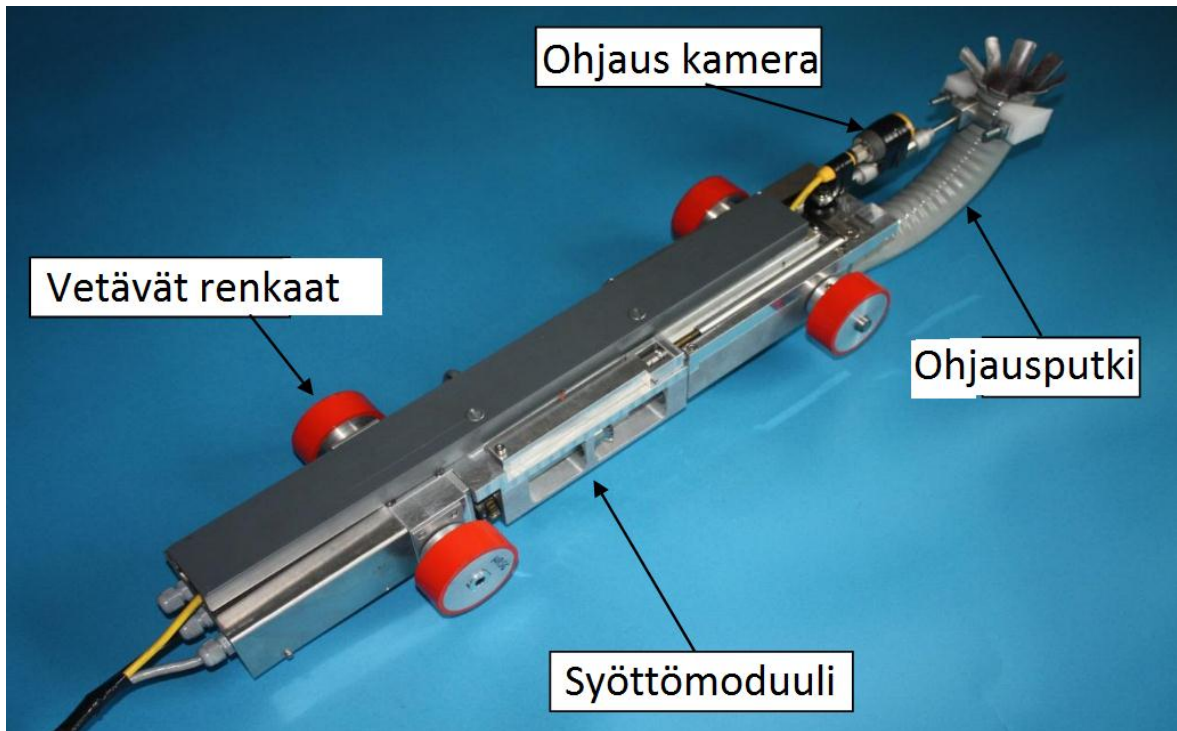
Intiassa tehdyn tutkimuksen pohjalta Chulachomklao Royal Military Academy ja King Mongkut University of Technology ovat Thaimaassa kehittäneet kuvassa 4 esitetyn robotin, jonka kehittämisestä on tehty julkaisu vuonna 2014. Robotti kulkee putkien ulkopuolella ja käyttää mittaamiseen EMAT tekniikkaa. Robottiin on lisätty ohjattava käsivarsi, jolla voidaan laajentaa mittalaitteen ulottuvuutta. Käsivarsi mahdollistaa putken kuvaamisen laajemmalla sektorilla putken pintaa. Robotti tukeutuu myös magneeteilla putken pintaa vasten, mutta teloja on kehitetty ja laite pystyy kulkemaan vinottain suhteessa putkiin. (Boonyaprapasorn et al. 2014, s. 1–6.)



Kuva 4. Kehittyneempi versio putkiston ulkopuolella kulkevasta mallista (Boonyaprapasorn et al. 2014, s. 4).

Yhdysvaltalainen TesTex valmistaa monenlaisia mittalaitteita putkistojen kunnonvalvontaan liittyen. Yritys on kehittänyt höyrystinputkien sisäpuoliseen kuvaukseen ja seinämien kunnon valvontaan tarkoitetun internal acces tool nimisen laitteen, joka on esitetty kuvassa 5. Laitteen koekäytöstä on julkaistu raportti vuoden 2015 syksyllä. Koko laite mahtuu vähintään 133 mm sisähalkaisijaltaan olevan putken sisään ja siinä on vetävät pyörät. Laitteen päässä olevan taipuisan ohjausputken läpi työnnetään mittapää ohuempaan tutkittavaan putkeen. Mittapäässä on kamera ja RFET menetelmällä toimiva mittalaite. Ohjausputken suuntaa voidaan säätää kauko-ohjatusti ajon aikana. Yrityksen julkaisemassa testissä mittapää työnnettiin 50 mm halkaisijaltaan olevaan putkeen. Mittapäättä työnnetään taipuisalla varrella. Vartta työntävät moottorit on sijoitettu vaunun keskikohtaan ja niillä saadaan noin 180 Newtonin työntövoima. Tällä työntövoimalla mittapää saatiin menemään koko 15,5 m pitkän pystysuoraan testiputken läpi, kun mittapäättä työnnettiin alhaalta ylöspäin. Laitetta koekäytettiin voimalaitoksessa jossa palotila, höyrystin ja tulistin ovat

vaakatasossa. Putkiston huoltoaukkoa jouduttiin suurentamaan, jotta laite saatiin mahtumaan putken sisälle. (TesTex 2015.)



Kuva 5. Internal acces tool (TesTex 2015, muokattu).

2.3 Kaupalliset putkistorobotit

Markkinoilta löytyy valmistajia, joiden valikoimassa on yleismallisia kuvauslaitteita eri paksuisiin putkistoihin. Tyypillisiä käyttökohteita putkistoroboteille ovat viemärit, vesijohdot, kaasuputket, kaukolämpöputket ja ilmastointiputket. Markkinoilta löytyy valmistajia, joiden tuotevalikoimassa on erilaisista moduuleista koostuvia monimutkaisia järjestelmiä, sekä pienempiä kuvauslaitteita ns. endoskooppeja, joissa on vain kamera työnnettävän varren päässä ja näyttö.

IBAK, Rauch ja CUES valmistaa putkistorobotteja, joita käytetään pääasiassa viemäreiden kuvaamiseen. Kaikilla kolmella valmistajalla on valikoimassa taulukossa kaksi esitetyt Lateral launch toimintaperiaatteella toimivat lähes samanlaiset putkistorobotit. Lateral launch tarkoittaa mahdollisuutta työntää robotissa oleva kamerapää pääputkesta lähteviin ohuempiin sivulinjoihin taipuisan työntövarren avulla. Robotin traktoriosassa on työntölaite, jolla työntövarra työnnetään. Traktoriosassa on kauko-ohjattava ohjauslaite, jolla

kamerapää ohjataan tutkittavaan putkeen. Ominaisuutta käytetään pääviemäristä lähtevien sivulinjojen kuvaamiseen. Kuvassa 6 on esitetty IBAK:in valmistama putkistorobotti jossa on lateral launch nimellä oleva ominaisuus. (IBAK 2016.)



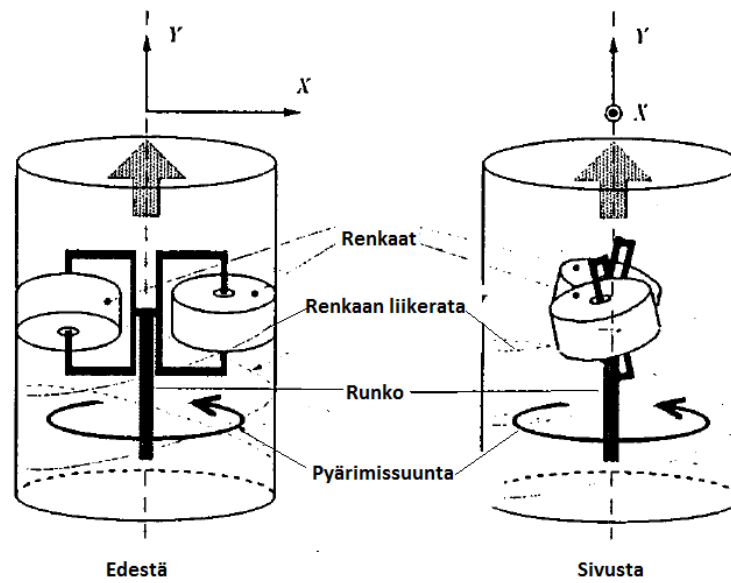
Kuva 6. IBAK LISY (IBAK 2016).

Taulukko 2. Kaupallisten putkistorobottien teknisiä tietoja (CUES 2011; IBAK 2016; Rauch 2016).

MERKKI	MALLI	PÄÄPUTKEN HALKAISIJA	KAMERAPÄÄN HALKAISIJA	TYÖNTÖVARREN PITUUS
IBAK	LISY	150 mm	50 mm	50 m
RAUCH	M 135	150 mm	61 mm	50 m
CUES	LAMP II	150 mm	50 mm	27 m

2.4 Ohuissa putkissa itsenäisesti toimilaitteen avustamana liikkuvat laitteet

Tokio Institute of Technology on tutkinut laitetta, jolla pystytään liikuttamaan putkistorobottia pienissä, jopa 25 mm halkaisijaltaan olevissa putkissa. Laitteessa on kaksi rengasta toisiinsa nähden pienessä kulmassa kuvan 7 osoittamalla tavalla. Kun akselia pyöritetään alkaa laite liikkua kierteisesti putken sisällä. Laitetta on testattu pyörittämällä sitä taipuisan varren välityksellä, jossa voimaa tuottava moottori on putkiston ulkopuolella. Tehdyssä tutkimuksessa laite eteni 20 m putken sisälle. (Hayashi et al. 1997, s. 125–128.)



Kuva 7. Ruuvimaisesti liikkuva putkistotunkeutuja (Hayashi et al. 1997, s. 125. muokattu).

Saksalainen Endo-control valmistaa kuvassa 8 esitettyjä putkistorobotteja joissa on jokaiselle rengasparille omat moottorit. Jousi tukee rengasparia putken pintaa vasten. Robotti pystyy kulkemaan pystysuoraan putkea ylöspäin ja mahtuu mutkista, joiden taivutussäde on 1,5-kertainen putken sisähalkaisijaan nähden. Robotteja on useita kokoja erilaisille putken halkaisijoille välillä 50–500 mm. (Endo-control 2008.)



Kuva 8. Crab-robot (Endo-control 2008).

2.5 Johtopäätökset esitetyistä menetelmistä.

Putkistojen ulkopuolella liikkuvien robottien hyvänä puolena voidaan pitää mahdollisuutta käyttää samaa laitetta erilaisissa laitoksissa, joissa putkien halkaisijat ja geometriat ovat erilaiset. Ulkopuolella liikkuvien robottien huonona puolena on rajoittunut kyky mitata putken joka suunnasta, sekä mittausmenetelmästä johtuva rajoite mitata putken sisäpuolisia kerrostumia. Toistaiseksi ainoa tarpeeksi tarkka tapa mitata sisäpuolista kerrostumaa putken ulkopuolelta on käyttää korkeataajuisia ultraääntä. Ultraäänen ongelma on tarkka asettaminen putken pintaa vasten, sekä tarkat vaatimukset pinnan puhtaudesta. Tästä syystä sitä on hankala liittää edellä esitetyn kaltaisiin putkiston ulkopuolella liikkuviin robotteihin. Vaikka ultraäänellä toimiva mittaus pystyttäisiin robotisoimaan, jäisi sen tarkkuus silti pintakalvomittarin tarkkuudesta.

Kaupallisesti saatavien viemäreihin tarkoitettujen putkistorobottien huonona puolena on niiden suuri koko. Esitetyt putkistorobotit vaativat vähintään 150 mm huoltoaukon, josta robotti laitetaan jakotukin sisälle. Tämä rajoittaa niiden käyttämistä halkaisijaltaan 60 mm olevasta huoltoaukosta. Taipuisalla varrella on mahdollista työntää myös pystysuoraan ylöspäin. Tämä mahdollistaa putken mittaamisen joko ylhäältä tai rajoitetusti myös alhaalta käsin. Jos putkessa on usean mutkan kohta josta ei ole mahdollista päästä läpi, niin voidaan saman putken mittausta jatkaa toisesta suunnasta.

Kaupallisissa järjestelmissä ei yleisesti käytetä itsenäisesti toimilaitteella liikkuvia robotteja, kun putken halkaisija on noin 50 mm. Syitä voivat olla laitteen hankala asettaminen tutkittavaan putkeen, kun pääputkesta lähtee sivuttaisinjoja sekä robotin sotkeutuminen perässä tuleviin kaapeleihin, kun se palaa tutkittavasta putkesta. Näistä syistä johtuen niillä ei saavuteta merkittävää etua verrattuna työntövarrella ohjattuihin putkiston kuvauslaitteisiin.

Esitetyistä laitteista Testexin valmistama putkistorobotti, sekä Malesiassa kehitetty kaksiosainen putkistorobotti ovat käyttötarkoitukseltaan ja toiminnaltaan lähimpänä tässä työssä tavoiteltavaa laitetta. Testexin valmistama internal acces tool on kuitenkin tarkoitettu ensisijaisesti putken seinämävahvuuden ja seinämässä olevien säröjen määrittämiseen RFET menetelmällä, eikä se sovellu sellaisenaan tässä työssä haettuun magnetiittikerroksen tarkkaan mittaamiseen. Internal acces tool on myös liian suuri, eikä mahdu halkaisijaltaan

60 mm huoltoaukosta. Malesiassa kehitetty kaksiosainen putkistorobotti on vielä prototyyppi asteella, eikä sen toimivuudesta todellisissa käyttöolosuhteissa ole tietoa. Tämän hetkisten tietojen perusteella laitteessa on kaksi ongelmaa, jotka vaativat kehittämistä. Laitteen nopeus on ainoastaan 19 mm/s ja sen perässä tuleva kaapeli aiheuttaa jäykkyysoongelmia.

3 SUUNNITTELU

Saatavilla olevien putkistorobottien käyttäminen sellaisenaan tai niiden muuttaminen helposti Varo oy:n tarvitsemaan käyttöön todettiin hankalaksi. Vaihtoehdoksi jää tutkia mahdollisuutta kehittää kokonaan uusi laite, joka on optimoitu juuri kyseiseen käyttötarkoitukseen.

3.1 Tehtävän asettelu

Laitteen kehityksen lähtökohtana on suunnitella tuote alustavasti yrityksen omaan käyttöön. Laitteen suunnittelun prioriteettina on tehdä laitteesta mahdollisimman yksinkertainen toteuttaa. Laitteen pienestä suunnitellusta tuotantomäärästä johtuen pyritään välttämään menetelmiä tai mekanismeista joiden suunnittelu tai testaaminen veisi paljon aikaa ja resursseja. Eri toteutusvaihtoehtojen valintakriteerinä käytetään poissulkevaa menetelmää, jossa eri vaihtoehtoja vertaillaan suhteessa toisiinsa. Laitteelta vaadituista ominaisuuksista laadittiin taulukossa kolme esitetty vaatimuslista.

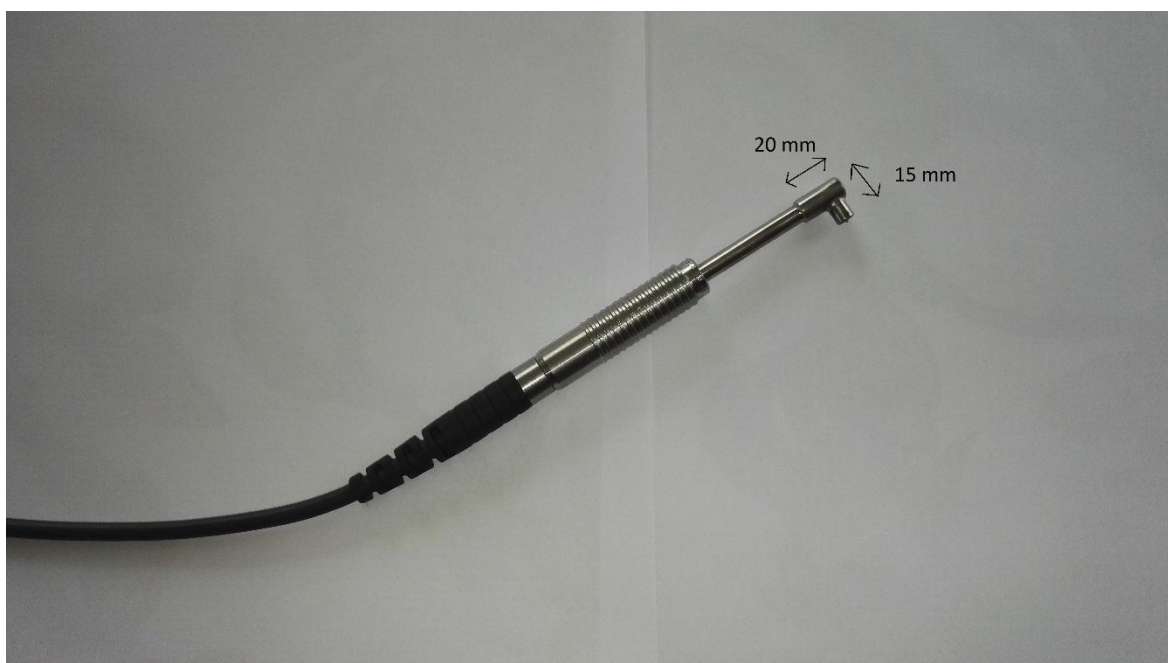
Taulukko 3. Vaatimuslista.

Varo Oy		Vaatimuslista
Muutos	Vaatimus / toive	
15.02.2016	V	Laitteen on mahduttava halkaisijaltaan 60 mm huoltoaukosta.
	V	Vaunun on liikuttava 17 m matka jakotukin toiseen päähän
	V	Laskeutujan on yletyttävä 50 m syvyyteen.
	V	Laskeutujan asento ja sijainti on pystyttävä mittaamaan.
	V	Laskeutujassa on oltava tila kameralle ja pintakalvomittarille.
	T	Operointi yhden henkilön toimesta
	T	Mahdollisuus tehdä magnetiittikerroksen mittauksia automaattisesti.

Taulukko 3. Jatkuu. Vaatimuslista.

	V	Tukeva rakenne ei, irtoavia osia.
	T	Laitteen on pystyttävä ohittamaan putkistossa olevia 45° taivutuksia.

Laitteen on tarkoitus käyttää magneettikerroksen mittaamiseen Elcometter:in valmistamaa pintakalvomittaria. Pintakalvomittarin mittapäätä on tarkoitus purkaa, josta säilytetään kuvassa 9 mitoilla esitetty osa, joka kiinnitetään kehitettävään laitteeseen.

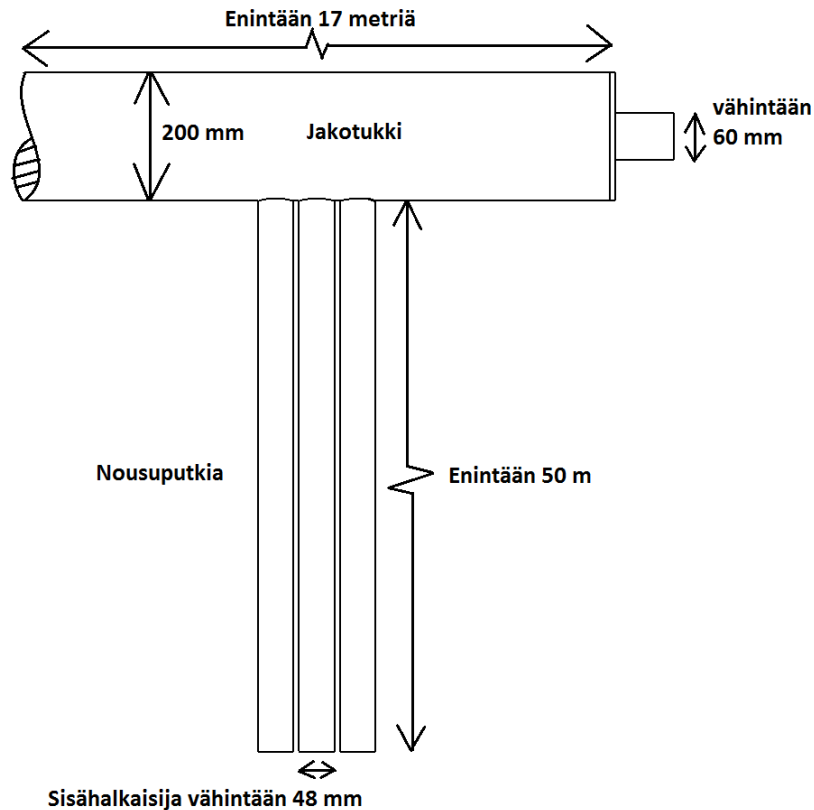


Kuva 9. Elcometter:in pintakalvomittari.

3.2 Toimintaympäristön mitat

Höyrykattilan keskeiset komponentit, joissa laitteen tulisi toimia, ovat kuvassa 10 esitetty jakotukki ja höyrystimen nousuputket. Nousuputket ovat höyrykattilan tulipesän laidoilla olevia putkia, jotka on hitsattu toisiinsa kiinni putkien ulkopinnoissa olevista evistä. Nousuputket ovat vaihtelevan pituisia riippuen voimalaitoksen koosta, mutta pisimmillään ne ovat 50 m pitkiä. Nousuputkien sisähalkaisija on pienimmissä voimalaitoksissa 48 mm. Nousuputket ovat pystyasennossa ja ne ovat yhdistetty ylhäältä ja alhaalta jakotukkeihin. Nousuputket ovat suurimmalta osaltaan suoria, mutta poltinten ja ilmansyöttöreikien kohdalla on mutkia. Jakotukit ovat suurimmissa voimalaitoksissa pisimmillään 17 m pitkiä

ja sisähalkaisijaltaan noin 200 mm. Jakotukit ovat vaaka-asennossa ja koko matkaltaan suorina. Jakotukin päässä on huoltoaukko, jonka halkaisija on pienimmillään 60 mm. (Lähde 2016.)



Kuva 10. Putkiston mitat.

3.3 Abstrahointi

Vaatimuslistan ja tunnettujen reunaehtojen pohjalta tehdään analyysi, jossa arvioidaan mikä tai mitkä toiminnot ovat keskeisiä ja välttämättömiä jotta laite voi toteuttaa vaatimuslistassa määritetyt vaatimukset. Abstrahoinnilla pyritään yksinkertaistamaan ongelmaa ja etsimään vain välttämättömiä toimintoja, minkä takia vaatimuslistassa esitetyt toiveet rajataan väliaikaisesti ajattelun ulkopuolelle. (Pahl et Beitz 1986, s. 74.)

Koko laitteen funktio on saada mittalaitteet sisältävä osa menemään tutkittavan putken sisälle niin tarkasti, että pystytään tietämään mistä suunnasta mittaus tehdään, sekä kuinka syvällä mittalaite on tutkittavassa putkessa. Laitteen kokonaistoiminto voidaan tiivistää yhdeksi lauseeksi. Kuljettaa kamera ja mittalaite täsmällisesti putkiston sisälle.

3.4 Osakokoonpanoihin jako

Systemaattista tuotteen kehitystä helpottaa ongelman jakaminen useampaan osaan. Abstrahoimalla muotoiltiin ongelmasta yksinkertainen määritelmä, josta ei kuitenkaan selviä miten se voidaan teknisesti toteuttaa. Abstrahoinnin tulos vastaa laitteen kokonaistoimintoa, joka voidaan jakaa useampaan osatoimintoon. Jokaiselle osatoiminnolle määritetään oma tehtävä. Osatoimintoihin jako pyritään tekemään siten, että jokainen toiminto on itsenäinen, jolloin niitä voidaan yhdistää keskenään. (Pahl et Beitz 1986, s. 81–84.)

Laitteen toiminnan kannalta välttämättömiä osia, joilla on useampia tai vaikeammin yksiselitteisesti määriteltäviä toimintoja ovat, vaunu joka liikkuu jakotukissa ja laskeutuja, joka laskeutuu tutkittavaan putkeen. Laitteelta vaadittuja yksiselitteisiä toimintoja ovat laitteen liikuttaminen jakotukin sisällä oikeaan kohtaan nousuputken päälle ja laskeutujan nostaminen ja laskeminen nousuputken sisällä josta käytetään termiä köyden syöttö.

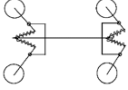
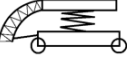
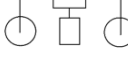





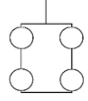

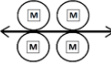

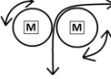
3.5 Ideamatriisi

Osatoimintojen toteuttamiselle on yleensä useita vaihtoehtoja. Erilaisten vaihtoehtojen määrän kasvaessa tarpeeksi suureksi muuttuu niiden esittäminen ja arviointi kaoottiseksi tavanomaisilla esitystavoilla, joten niiden esittämiseksi on kehitetty taulukointitapa, jossa jokaiselle osatoiminnolle tai osakokoonpanolle on yksi rivi ja jokaiselle vaihtoehdoiselle toteutustavalla yksi sarake.

Eri toteutustapojen etsimiseksi on olemassa useita vaihtoehtoja, mutta ne jakautuvat vanhan käytössä olevan tekniikan soveltamiseen, uuden kehittelyyn tai näiden yhdistämiseen. Käytössä olevan tekniikan hyödyntämisen hyväksi puoliksi voidaan katsoa, että se on jo toimivaksi todettu. Kaikkiin ongelmiin ei aina ole olemassa valmista ratkaisua, joten niiden ratkaisemiseksi täytyy kehittää jotain uutta.

Osatoimintojen toteuttamiseksi etsittiin erilaisia ratkaisuja intuitiivisesti aivoriihi menetelmällä sekä soveltamalla vastaavissa ongelmissa yleisesti käytettyjä ratkaisutapoja. Alla olevaan taulukkoon neljä on listattu jokaiselle osatoiminnolle vaihtoehtoisia ratkaisutapoja.

Taulukko 4. Ideamatriisi.

		1	2	3	4	5
VAUNU	1					
VAUNUN LIIKUTTAMINEN	2	<i>Moottorit renkaissa</i>	<i>Teleskooppi</i>	<i>Kuumakarkaistu nauha kelalla</i>		
LASKEUTUJA	3					
LASKEUTUJAN LIIKUTTAMINEN	4					

3.6 Huomioita ideamatriisista

Ideamatriisissä ensimmäisen rivin sarakkeessa yksi on esitetty jousitoiminen mekanismi, jonka saa supistettua pieneen tilaan, kun se laitetaan huoltoaukosta sisään. Laitteen jalat leviävät ja tukeutuvat putken laitoihin, kun se on päässyt paksumpaan putkeen. Toisessa sarakkeessa on esitetty vaunumalli, jossa laskeutujaa työnnetään tutkittavaan putkeen. Vaunu menee tutkittavan putken kohdalle ja taivuttaa joustavan ohjausputken kohti alla olevaa putkea. Laskeutuja ujutetaan ohjausputkea pitkin tutkittavaan putkeen työntämällä sitä taipuisalla varrella. Kolmannessa sarakkeessa on vaihtoehto, joka tukeutuu pelkästään putken pohjaa vasten. Neljännessä sarakkeessa on telaketjuilla tai renkailla varustettu kapea vaunu, joka tukeutuu jakotukin pohjaan magneetin avulla. Tämä ratkaisu vaatii moottorin liikkuakseen jakotukissa.

Vaunun liikuttamiseen jakotukissa on kaksi päävaihtoehtoa. Laittamalla vaunuun toimilaite, joka liikuttaa vaunua tai liikuttamalla sitä ulkopuolisella varrella. Varren jolla vaunua työnnetään ja vedetään, on oltava tarpeeksi pienikokoinen, jotta sitä voidaan käyttää ahtaammassakin olosuhteissa. Vaihtoehtoisesti on esitetty teleskooppia, jossa on useampi sisäkkäinen putki ja käytettäessä putket vedetään yhdeksi pitkäksi tangoksi. Vaihtoehtoisesti putkien ei tarvitse olla sisäkkäisiä vaan ne voisivat olla irralliset, jolloin liitettäisiin toisiinsa kiinni silloin, kun tarvittavan työntövarren pituus kasvaa. Yksi vaihtoehto on käyttää

jousiteräksestä tehtyä lattaa, jota voidaan säilyttää kelalla. Kun latta otetaan kelalta, se pyrkii suoristumaan, jolloin sillä pystyy työntämään.

Laskeutujan muoto vaikuttaa siihen kuinka helposti se jumiutuu putken suuhun tai putkessa oleviin taivutuksiin. Molemmista päistä suippeneva muoto helpottaa tätä ongelmaa laskeutujan liikkua ylös tai alaspäin. Laskeutujaan sijoitettavalla pintakalvomittarilla täytyy pystyä tekemään mittauksia putken joka sektorista. Tästä syystä koko laskeutujan tai osan siitä täytyy pystyä pyörimään moottoroidusti. Laskeutujan fyysisen koon rajoitteena on nousuputkien paksuus ja laskeutujan sisälle sijoitettavan elektroniikan koko. Koko täytyy optimoida näiden rajoitteiden puitteissa. Laskeutuja voi sisältää toimilaitteen, joka avustaa putkessa liikkumista, se voi liikkua pelkästään painovoiman avulla tai sitä voi liikuttaa köyden ja työntövarren avulla.

Kolmannen rivin sarakkeessa yksi on esitetty vaihtoehto, jossa laskeutuja on jaettu keskeltä kahtia. Moottoroidusti pyörivään alaosaan voidaan sijoittaa mittalaite ja kamera. Paikallaan pysyvään yläosaan voidaan sijoittaa muut komponentit. Sarakkeessa kaksi köyden ja laskeutujan välisessä liitoskohdassa on toimilaite, jolla koko laskeutujaa voidaan pyörittää. Sarakkeessa kolme laskeutuja on kiinnitetty nivelellisesti köyden ja laskeutujan välisestä liitoksesta. Laskeutujan leveimmässä kohdassa on pyörivä vyö, johon pintakalvomittari on kiinnitetty. Neljännessä sarakkeessa on kaksi osainen laskeutuja, joista alemmaa voidaan pyörittää moottoroidusti. Kaksiosaisuuden idea on lisätä komponenteille jäävää tilaa. Sarakkeessa viisi on laskeutuja, jossa on liikkumista avustava toimilaite. Kappaleessa 2.4 esitettyjä menetelmiä voidaan soveltaa laskeutujan liikuttamiseen ohuessa putkessa. Vaihtoehtona on kehittää myös uusi menetelmä jossa voisi olla esimerkiksi vetävät renkaat tai vaihtoehtoisesti telat jotka liikuttavat laskeutujaa. Renkaan tai telan ja putken pinnan välinen tukivoima voidaan muodostaa magneeteilla tai jousilla.

Neljännellä rivillä on esitetty vaihtoehtoja, joilla laskeutujaa liikutetaan tutkittavassa putkessa. Ensimmäisessä sarakkeessa on esitetty ratkaisu, jossa taipuisaa työntövartta työnnetään notkean letkun sisällä ja työntävät moottorit voidaan sijoittaa kokonaan putkiston ulkopuolelle. Sarakkeessa kaksi on vaihtoehto, jonka toiminta periaate on sama kuin kaupallisissa viemäriin tarkoitetuissa roboteissa, mutta erona pienempi fyysinen koko. Työntövartta liikutetaan vaunussa olevalla laitteella, jossa on moottori tai moottoreita ja

rullat joiden välistä työntövarsi menee. Sarakkeissa kolme ja neljä on esitetty variaatiot, joissa on pyörivät rullat, joiden välistä menee notkea kaapeli, johon laskeutuja kiinnitetään. Sarakkeiden kolme ja neljä erona on moottoreiden sijainti suhteessa rulliin. Sarakkeessa kolme moottori on kohtisuorassa suhteessa rullien pyörimissuuntaan. Tällöin moottorin halkaisija on ainoa tekijä joka rajoittaa huoltoaukosta mahtumista. Moottorista saatu pyörimisliike käännetään rullille hammaspyörästä avulla. Sarakkeessa neljä rullat on kiinnitetty suoraan moottoreihin.

4 TULOKSET

Ideamatriisissa esitettyjen vaihtoehtojen pohjalta valitaan toteutustapa jokaiselle osatoiminnolle. Aluksi vaihtoehtoista hylätään pois vaihtoehdot, jotka ovat osoittautuneet tarkemmassa selvityksessä kokonaan käyttökelvottomiksi.

4.1 Sopivimpien muunnelmien valinta

Osa alustavista ideoista osoittautui vaikeaksi ja epäkäytännöllisiksi toteuttaa sen jälkeen, kun putkiston tarkemmat mitat selvisivät. Vaihtoehdot joissa putkiston sisälle viedään useita moottoreita, joilla laskeutujaa liikutetaan vaativat paljon tilaa ja saman funktion toteuttamiseksi voidaan käyttää yhtä moottoria ja kulmavaihdetta. Myös vaunuvaihtoehdot joissa on moottorit jakotukissa liikkumista varten, on hylätty ahtauden vuoksi.

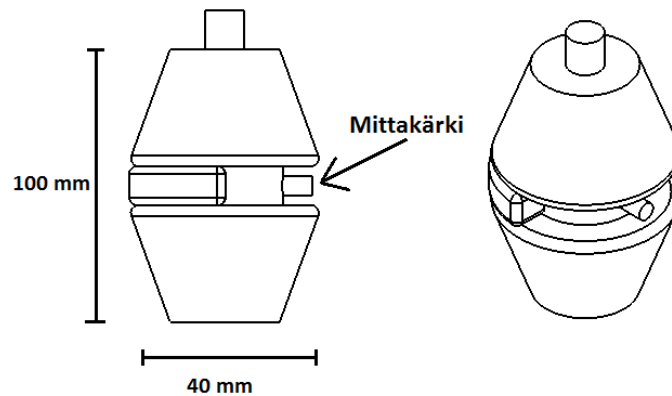
Kun vaihtoehtoista on rajattu selvästi sopimattomat ehdotukset pois, jäljelle jää vielä useita vaihtoehtoja. Vaihtoehtoja rajataan käyttämällä kolmea pääkriteeriä. Ratkaisujen tulee olla keskenään yhteensopivia, täyttää vaatimuslistan vaatimukset ja olla toteutettavissa kohtuullisin kustannuksin.

Eri osista pyritään tekemään modulaariset, jotta pystyttäisiin parantamaan niiden yhdistämistä toisiinsa, sekä mahdollisesti muihin järjestelmiin. Erityisesti laskeutuja täytyy suunnitella siten, että se voidaan liittää mahdollisimman helposti muihin variaatioihin, mikäli suunnitelmat muuttuvat, koska se on selvästi irrallisin osa ja vaikuttaa muun kokoonpanoon toimintaan vain vähän, jos se on alusta saakka suunniteltu kompaktiksi.

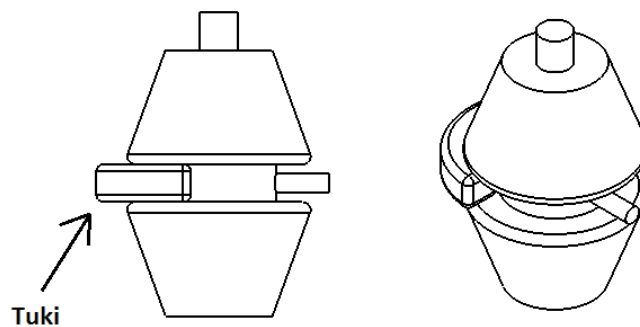
4.2 Laskeutuja

Itsenäisesti toimilaitteella liikkuva laskeutuja on monimutkaisempi rakentaa ja saavutettava hyöty jäisi minimaaliseksi verrattuna työnnettävään tai vapaasti laskettavaan malliin. Perässä tuleva kaapeli kiristyisi joka tapauksessa mutkakohdissa putken laittaa vasten ja estäisi etenemisen. Toinen ongelma on sotkeutuminen perässä tulevaan kaapeliin, kun laskeutuja nousee ylöspäin.

Jäljelle jääneistä vaihtoehdoista kehityskelpoisimmaksi laskeutujaksi osoittautui yksiosainen malli, joka suippenee molemmista päistä. Kuvissa 11 ja 12 esitetyssä molemmista päistä suippenevan mallin hyvänä puolena on hyvä kyky kulkea esteistä kuten mutkakohdista ja rajakohdasta jakotukin ja nousuputken välillä. Suipon muodon huonona puolena on laskeutujan pienentynyt tilavuus. Mittakärjen asennon säätö on suunniteltu laskeutujan keskikohtaan. Muu laskeutuja pysyy paikallaan ja mittakärkeä voi pyörittää 360 astetta. Hyvänä puolena verrattuna koko laskeutujan pyörittämiseen on, että pyörittämiseen tarvittava voima on aina yhtä suuri, koska liikkuvat osat eivät ole kosketuksessa putken pintaan asennon säädön aikana, vaikka muu laskeutuja olisi tukeutuneena putkea vasten esimerkiksi mutkakohdassa. Laskeutujan ja työntövarren liitoksen täytyy olla niveellinen, joka mahdollistaa laskeutujan pysymisen pystysuorassa maanvetovoiman vaikutuksesta.



Kuva 11. Laskeutuja liikkumistilassa.



Kuva 12. Laskeutuja mittaustilassa.

Laskeutujaan tulee vähintään kaksi liikkuvaa toimilaitetta. Mittakärkeä pyörittävä moottori, joka mahdollistaa mittausten tekemisen putken kaikilta sektoreilta, sekä toimilaite joka tukee mittakärjen putken pintaan, kun mittaus tehdään. Pyörivä liike voidaan toteuttaa pienellä askelmoottorilla, johon laitetaan vaihteisto kasvattamaan momenttia. Askelmoottorin ohjaamiseen käytettävä ajuri sijoitetaan myös laskeutujan sisälle. Mittakärjen tukeminen putken seinämää vasten voidaan toteuttaa servomoottorilla, jonka pyörivä liike on muutettu lineaariseksi. Laskeutujan alapäähän tulee kamera ja LED valo. Kamerana voidaan käyttää aluksi analogista tiedonsiirtoa käyttävää suljetun piirin CCTV-kameraa (Closed Circuit TV). Laskeutujan sisälle voidaan laittaa mikrokontrolleri, joka ohjaa toimilaitteita ja välittää tietoa ohjausyksikköön. Vaihtoehtoisesti koko laitteen ohjaus voidaan tehdä ohjausyksiköstä käsin jolloin mikrokontrolleria ei tarvitse sijoittaa laskeutujaan. Mikrokontrollerina voidaan käyttää esimerkiksi pienikokoista Arduino pohjaista mikrokontrolleria. Taulukossa viisi on listattuna laskeutujaan tarvittavat komponentit.

Taulukko 5. Laskeutujaan tulevat elektroniset komponentit.

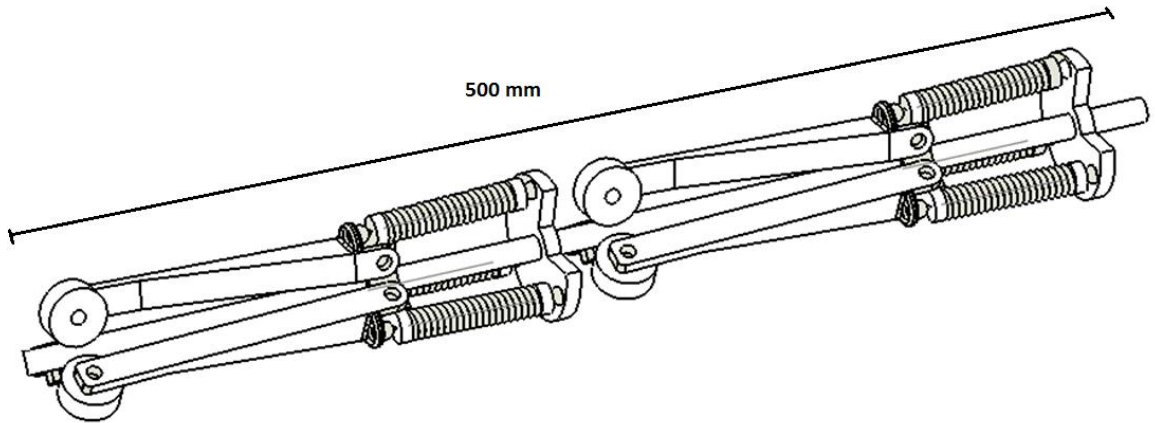
Komponentti	Tyyppi/malli
Mittakärki	Elcometer 456 mini probe
Kamera	CCTV
Valo	LED
Mikrokontrolleri	ARDUINO MINI
Asennonsäätömoottori	Askelmoottori
Tuentamoottori	Servomoottori
Askelmoottoreiden ohjaus	Ajuri esim. A4988

4.3 Vaunu

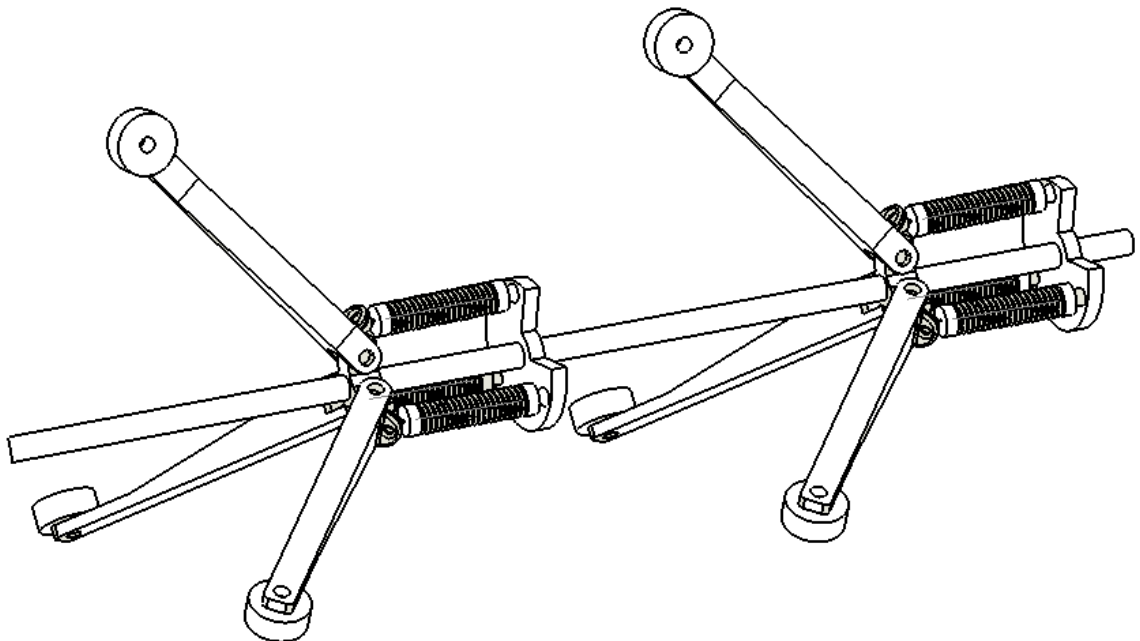
Vaunujen osalta huoltoaukon ahtaus rajoittaa valintaa eniten. Vaihtoehdot joissa on vaunun liikkumisen mahdollistavat moottorit, on jätetty tuotekehityksen tässä vaiheessa pois, koska vaunua on mahdollista liikuttaa jakotukissa myös käsikäyttöisesti putkiston ulkopuolelta työntövarren avulla. Vaunuun on mahdollista laittaa itsenäisen liikkumisen mahdollistavat moottorit myöhemmin, mikäli käsikäyttöisessä työntämisessä ilmenee ongelmia.

Vaunuosassa on kuvassa 13 näkyvät jalakset jotka saa supistettua runkona toimivaa putkea vasten siksi aikaa, kun se laitetaan huoltoaukosta jakotukin sisälle. Kun vaunu on jakotukin

sisällä, jalakset aukeavat jousien voimalla kuvan 14 esittämällä tavalla ja jalasten päissä olevat renkaat tukeutuvat jakotukin seinämiin.



Kuva 13. Jalakset supistettuina.



Kuva 14. Jalakset avattuina.

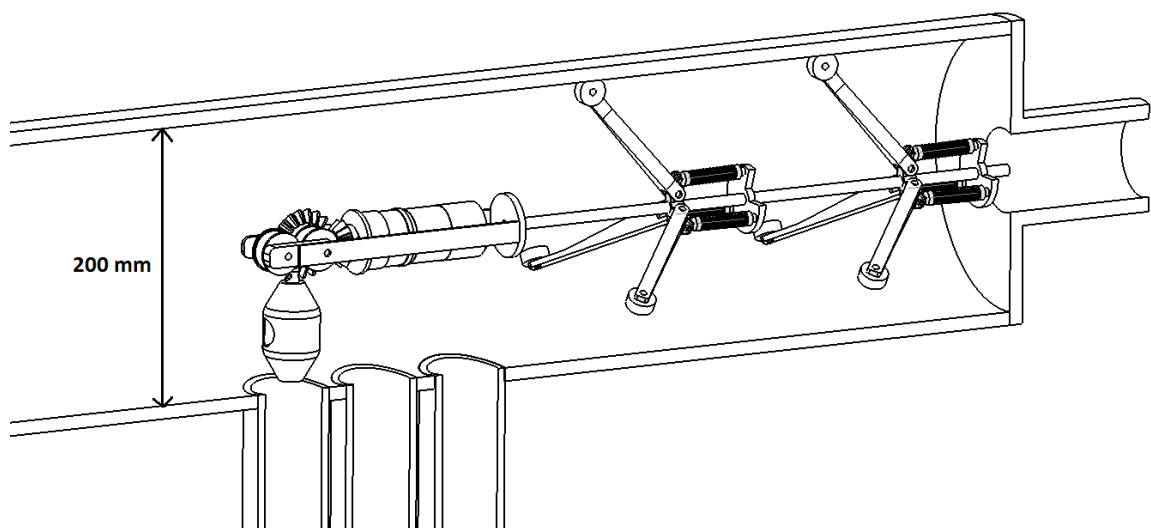
Vaunuun on mahdollista kiinnittää erilaisia modulaarisia mekanismeja riippuen siitä millä tekniikalla laskeutujaa liikutetaan. Vaunussa olevien jalasten pituutta muuttamalla tai jättämällä kokonaan yhdet jalakset pois voidaan säätää korkeutta, jossa vaunun keskikohta on suhteessa jakotukkiin.

Vaunua liikutetaan jakotukissa työntämällä sitä putkiston ulkopuolelta ohuesta jousiteräksestä tehdyllä latalla, jota voidaan säilyttää rullalla. Latta voi olla taivutettu koveraksi, vastaavalla tavalla kuin rullamitta, jolloin sillä voidaan työntää pidempi matka ennen kuin se nurjahtaa. Vaunun renkaat on laakeroitu, joten se liikkuu jakotukissa kevyesti eikä sen työntäminen vaadi paljoa työntövoimaa. Latan osittainen nurjahtaminen ei välttämättä estä työntämistä.

4.4 Laskeutujan liikuttaminen

Vaihtoehto jossa vaunuun on kiinnitetty työntölaite, joka työntää laskeutujaa taipuisalla varrella tutkittavaan putkeen on myös alustavasti hylätty, koska myytävät työntölaitteet ovat liian suuria mahtumaan huoltoaukosta. Uuden työntölaitteen kehittäminen vaatisi paljon suunnittelua, koska laitteessa joutuu käyttämään erittäin pieniä komponentteja, jotta se mahtuu huoltoaukosta. Ahtaudesta johtuen työntölaitteeseen tulevien komponenttien teho jää matalaksi jolloin jouduttaisiin suunnittelemaan monimutkainen vaihteisto riittävän voiman saavuttamiseksi.

Laskeutujan liikuttamiseen jää kaksi erilaista menetelmää. Ensimmäinen on kuvassa 15 esitetty vapaasti notkean kaapelin varassa laskettava malli, jossa on moottori vaunussa. Moottori on mahdollista sijoittaa vaunun kärkeen, jolloin ulottuvuus viimeisiin putkiin on parempi tai vaihtoehtoisesti jalkojen keskelle jolloin laite pysyy paremmin tasapainossa.



Kuva 15. Vaihtoehto 1. Nostolaite sijoitettuna vaunun kärkeen.

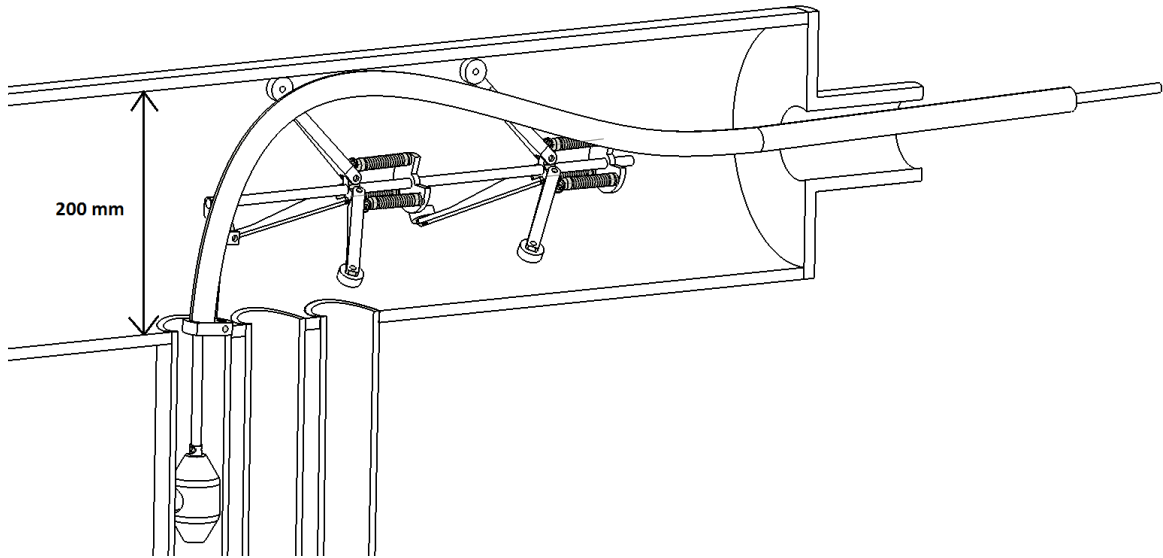
Laskeutujaa nostavan moottorin täytyy olla tarpeeksi tehokas, jotta se jaksaa nostaa laskeutujan oman painon lisäksi myös kaapelin painon. Laskeutujaa kannattelevan kaapelin tulee olla mahdollisimman notkeaa, ettei se hankaa putken laitoihin ja hankaloita putkessa laskeutumista. Kaapeli voi olla kelalla säilyttämisen jälkeen kihartunut. Kaapeli suoristuu mitattavassa putkessa sitä paremmin mitä enemmän laskeutujassa on painoa, joka suoristaa perässä tulevaa kaapelia, joten laskeutujan suunnittelussa paino ei ole rajoitteena. Laskeutujaa nostavassa moottorissa on oltava hammaspyörästä, jonka välityssuhde määräytyy lopullisen laskeutujan ja kaapelin painon perusteella.

Nostolaitteessa on moottori, johon on yhdistetty hammaspyörästä joka kääntää pyörimisliikkeen 90° kulmaan. Nostolaitteen päässä on kaksi rullaa, joiden välistä köysi kulkee. Rullat tukeutuvat toisiaan vasten jousimekanismilla, jotta välissä kulkeva köysi ei pääse luistamaan. Suurempi hammaspyörä ja toinen rulla ovat yhdistettyinä toisiinsa, jolloin moottoria käytettäessä rulla pyörii ja liikuttaa köyttä. Vaihtoehdon yksi toimilaitteet on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Vaunuun tulevat toimilaitteet vaihtoehdossa 1.

Komponentti	Malli
Nostomoottori	Askelmoottori

Toinen vaihtoehto laskeutujan liikuttamiseen on käyttää työntövartta, joka menee letkun sisällä. Menetelmän hyvä puoli on, ettei työntävää moottoria tarvitse sijoittaa putkiston sisäpuolelle, jolloin moottorin fyysisellä koolla ei ole ahtaudesta johtuvia rajoitteita. Laitetta voi koe käyttää myös ilman moottoria työntämällä työntövartta käsikäyttöisesti. Tässä kuvassa 16 esitetystä menetelmästä vaunuun täytyy asentaa vain yksi toimilaite, jolla ohjataan työntövarsi kohti tutkittavaa putkea. Prototyyppi vaiheessa tämä toiminto voidaan korvata käsikäyttöisellä mekanismilla, jolla säädetään laskeutuja kiinteästi oikeaan asentoon kohti tutkittavia putkia jakotukin suulla. Taulukossa 7 on esitetty vaunuun eli putkiston sisäpuolelle tulevat toimilaitteet.



Kuva 16. Vaihtoehto 2. Työntövarsi letkun sisällä.

Taulukko 7. Vaunuun tulevat toimilaitteet vaihtoehdossa 2.

Komponentti	Malli
Kulmansäätö	Askelmoottori tai käsikäyttöinen

Menetelmä vaatii toimiakseen taipuisan työntövarren jonka sisälle tai rinnalle on laitettu kaapelit, joilla voidaan toteuttaa tiedonsiirto laskeutujan ja ohjausyksikön välillä. Putkiston ulkopuolelle voidaan laittaa lisäksi myös enkooderi, joka mittaa kuinka syvällä laskeutuja liikkuu tutkittavassa putkessa. Taulukossa 8 on esitetty putkiston ulkopuolelle tulevat komponentit vaihtoehdossa kaksi.

Taulukko 8. Putkiston ulkopuolelle tulevat toimilaitteet vaihtoehdossa 2.

Komponentti	Malli
Nosto/työntö moottori	Askel tai servomoottori
Syvyyden mittaus	Enkooderi

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tuotekehityksen tässä vaiheessa voidaan todeta, että laite on mahdollista rakentaa ja sen käyttämisessä ainakaan suorissa putkissa ei näyttäisi olevan ylitsepäsemättömiä esteitä. Laitteesta on mahdollista tehdä suhteellisen yksinkertainen valmistaa. Laskeutujan ja muiden mekanismien valmistamisessa voidaan prototyyppi vaiheessa käyttää 3d-tulostusta.

5.1 Vastaavaan käyttötarkoitukseen tarkoitetut laitteet

Työssä tutkittiin, onko vastaavaan käyttötarkoitukseen, magnetiittikerroksen tarkkaan mittaukseen jo kehitetty laitetta, mutta yhtään täysin vastaavaa valmista laitetta ei löytynyt. Asiaan liittyen on kuitenkin tehty useita julkaisuja viime vuosina. Lähes vastaavia laitteita kehitetään ainakin kahdessa eri paikassa.

Yhdysvalloissa Testex niminen yritys kehittää putkistorobottia jolla on tarkoitus mitata höyrystinputkien seinämissä olevia säröjä ja seinämäpaksuuden muutoksia, mutta laite ei ole tarkoitettu varsinaisesti magnetiittikerroksen tarkkaan mittaukseen. Laite on myös liian suuri eikä se mahdu jakotukin sisälle tekemättä huoltoaukkoon muutoksia.

Malesialaisessa University Tenaga Nasionalissa on kehitetty putkistorobotti, joka tukeutuu magneeteilla putken pintaa vasten ja liikkuu itsenäisesti moottorin ja renkaiden avulla. Laite on tarkoitettu höyrystinputkien kunnonvalvontaan, mutta laitteessa on vain kamera ja putken kunto määritetään silmämääräisesti. Laite on suunniteltu menemään myös mutkakohdista, mutta julkaisun johtopäätöksissä todetaan perässä tulevan kaapelin jäykkyyden hankaloittavan liikkumista. Laitteen kehitys on alkuvaiheessa eikä siinä ole vielä järjestelmää jolla putkistorobotti viedään jakotukissa tutkittavaan putkeen.

5.2 Eri toteutustapojen edut

Työssä saatiin kaksi toimintatavaltaan erilaista vaihtoehtoa, joissa molemmissa voidaan käyttää osittain samoja osia. Menetelmien erona on putkeen laskettavan mittalaitteen ja kameran sisältävän laskeutujan liikuttamistapa.

Ensimmäisessä vaihtoehdossa laskeutuja laskeutuu putkeen pelkästään painovoiman avulla ja nousee ylös putken yläpäässä olevan moottorin vetämänä. Menetelmä vaatii toimiakseen mahdollisimman notkean kaapelin. Jos kaapeli on tarpeeksi notkea kitka kaapelin ja putken välillä pysyy pienenä, koska kaapeli alkaa suoristua omasta painosta, kun laskeutujaa syötetään syvemmälle putkeen. Menetelmän huonona puolena on nostomoottorin välttämätön sijoittaminen suoraan tutkittavan putken yläpuolelle eli kiinni vaunuun, tästä syystä moottorin ja siihen kiinnitetyn vaihteiston kokoa rajoittaa huoltoaukon ahtaus.

Toisessa vaihtoehdossa laskeutujaa liikutetaan putkistossa taipuisan työntövarren avulla. Työntövarren etuna on, ettei sitä liikuttavan moottorin tarvitse olla putkiston sisäpuolella. Tämä yksinkertaistaa laitteen kehitystä ja mahdollistaa suuremman moottorin käyttämisen putkiston ulkopuolella. Menetelmän huonona puolena on työntövarren ja putken välille syntyvä kitka, joka lisääntyy, mikäli työntövarsi ei ole tarpeeksi elastista eikä suoristu putken suoralla osuudella.

5.3 Ongelmakohtat

Jakotukin huoltoaukon ahtaus aiheuttaa laitteen suunnittelulle suuria rajoitteita. Valmiiden viemärikuvaukseen tarkoitettujen putkistorobottien tai vastaavan tekniikan hyödyntäminen olisi mahdollista, jos huoltoaukko olisi suurempi tai jos sitä olisi mahdollista suurentaa jälkikäteen. Valmiiseen putkistorobottiin itse suunniteltavia osia olisivat vain laskeutujassa olevat osat ja pintakalvomittarista johtuvan lisääntyneen tiedonsiirron mahdollistavan johtimia sisältävän työntövarren kehitys. Huoltoaukon ahtaus antaa toisaalta kilpailuetua kehitettäville laitteelle, koska sillä pystyy tekemään mittauksia tekemättä muutoksia itse putkistoon.

Jos samassa putkessa on useita mutkia alkaa laskeutujan perässä tuleva kaapeli tai työntövarsi kiristyä putkea vasten ja kitkasta johtuen vaikuttaa laskeutujan liikkumiseen, vaikka siinä olisi liikkumista avustava toimilaitte. Köyden notkeus ja pinnan kitkaominaisuudet vaikuttavat muodostuvaan kitkaan. Jos laskeutujaan kytketty johto tai työntövarsi on liian jäykkä ja putkessa on useita peräkkäisiä mutkia voi laskeutujalla olla mahdotonta päästä kaikkien mutkien ohitse. Polttimien ja ilmansyöttöaukkojen kohdilla olevat mutkakohtat ovat pääsääntöisesti putkien alapäässä, joten laitteella pystytään tekemään mittauksia suhteellisen kattavasti, vaikka mutkakohtia ei pystyttäisi ohittamaan.

5.4 Jatkotutkimuskohteet

Työn rajauksesta johtuen tässä työssä tutkittiin olemassa olevia vaihtoehtoja ja ideoitiin erilaisia uusia menetelmiä, joiden toimintaa arvioitiin vain konsepti tasolla. Käytännön kokeita ei tehty, joten koko laite vaatii vielä testaamista. Testaamisessa voi ilmetä odottamattomia ongelmia, joita voidaan kehittää vasta seuraaviin versioihin. Jatkokehityksen ensimmäinen vaihe on valmistaa laskeutujasta prototyyppi, jolloin voidaan testata mittalaitteen toiminta käytännössä.

5.5 Laitteella saavutettava hyöty

Pintakalvomittarin tarkkuus verrattuna muihin magnetiittikerroksen mittaus menetelmiin on hyvä. Tarkempia mittaustuloksia voidaan hyödyntää voimalaitoksen käytön, korjausten ja muutosten suunnittelussa. Laitteen toimiessa suunnitellusti sillä voidaan tehdä mittauksia nopeasti, koska mittaukset voidaan aloittaa heti kun putkistosta on poistettu vesi ja se on jäähtynyt. Verrattuna jos mittauksien tekemistä varten joudutaan rakentamaan telineet ja puhdistamaan jokainen mittauskohda ultraäänimittausta varten.

LÄHTEET

Badodkar, D.N., Singh, N.K., Dadal, N.S. & Singh, M. 2009. EMAT integrated with vertical climbing robot for boiler tube inspection. Proc. National Seminar & exhibition on Non-Destructive Evaluation. s. 32–36.

Baharuddin, M.Z., Saad, J.M., Anuar, A., Ismail, I.N., Basri, N.M.H., Roslin, N.H., Mohideen, S.S.K., Jalal, M.F.A., & Sahari, K.S.M. 2012. Robot for Boiler Header Inspection “LS-01”. Procedia Engineering 41. s. 1483–1489

Boonyaprapasorn, A., Maneewarn, T., & Thung-Od, K. 2014. A prototype of inspection robot for water wall tubes in boiler. Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2014 3rd International Conference. s. 1–6.

CUES. 2011. LAMP II. [Cues:in www-sivuilla]. Päivitetty 4/2016. [Viitattu 25.1.2017]. Saatavissa: <http://www.cuesinc.com/LAMPPII.html>

Elcometer. 2016. Electromagnetic Induction Coating Thickness Gauges. 2016. [Elcometer:in www-sivuilla]. Päivitetty 4/2016. [Viitattu 27.4.2016]. Saatavissa: <http://www.elcometer.com/en/coating-thickness-gauge.html>

Endo-control. 2008. Crab-robot. [Endo-control:n www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 5/2008. [Viitattu 12.4.2016]. Saatavissa: http://www.endocontrol.de/wa_files/crab.pdf

Gowatski, S., Miner, G. 2011. TesTex. The use of the low frequency electromagnetic technique to detect and quantify the amount of magnetite deposits. [TesTexin www-sivut]. Viimeksi päivitetty 2011. [Viitattu 28.4.2016]. Saatavissa: http://testex-ndt.com/files/downloads/PPChem_article.pdf

Hayashi, I., Iwatsuki, N., Morikawa, K. & Ogata, M. 1997. An in-pipe operation microrobot based on the principle of screw-development of a prototype for running in long and bent

pipes. *Micromechatronics and Human Science*, 1997. Proceedings of the 1997 International Symposium on IEEE. s. 125–129.

Huhtinen, M., Kettunen A., Nurminen P. & Pakkanen H. 1994. *Höyrykattilatekniikka*. 5. Painos. Helsinki: Oy Edita Ab. 379 s.

IBAK. 2016. Lateral launch system. [IBAKin [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 4/2016. [Viitattu 11.4.2016]. Saatavissa: <http://www.rapidview.com/lisy.html>

Lähde, J. 2016. Putkiston mitat [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Nick Cederström. Lähetetty 19.3.2016 klo 12:42 (GMT +02:00).

Olympus. 2016. Measuring Internal Oxide Scale in Boiler Tubes. [Olympuksen [www-sivut](http://www.sivut)]. Päivitetty 4/2016. [Viitattu 28.4.2016]. Saatavissa: <http://www.olympusims.com/en/applications/measuring-oxide-scale-boiler-tubes/>

Olympus. 2017. Measurement of wall thickness of steam boiler tubes with EMAT transducers. [Olympuksen [www-sivut](http://www.sivut)]. Päivitetty 1/2017. [Viitattu 17.1.2017]. Saatavissa: <http://www.olympus-ims.com/en/applications/thickness-boiler-tubes-emat-transducers>

Pahl, G. & Beitz, W. 1986. *Koneensuunnitteluoppi*. 2. Painos. Helsinki: Suomen Metalli-, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto. 608 s.

Rauch. 2017. Laterallaunch. [Rauch USA:n [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. Päivitetty 2017. [Viitattu 25.1.2017]. Saatavissa: <https://rauschusa.com/products/laterallaunch>

Shah, M.A.A., Sahari, K.S.M., Jalal, M.F.A. & Anuar, A. 2015. Development of 1-Inch Boiler Tube Inspection Robot. IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. s. 4340–4344.

TesTex. 2015. Internal acces tool. [TesTexin www-sivut]. Viimeksi päivitetty 2015. [Viitattu 15.4.2016]. Saatavissa: <http://testex-ndt.com/wp-content/uploads/2015/06/HRSG-Internal-Access-Tool-Update.pdf>

TesTex. 2011. RFET Products. [TesTexin www-sivut]. Viimeksi päivitetty 2011. [Viitattu 18.1.2017]. Saatavissa: <http://testex-ndt.com/products/rfet-products/>

Valmet. 2015. Boiler Tube Scale Deposit Measurement. [Valmetin www-sivut]. Viimeksi päivitetty 2015 [Viitattu 6.3.2017]. Saatavissa: <http://www.valmetpowerservicena.com/PDF/Boiler%20Tube%20Scale%20Deposit%20Measurement%20Program%20OVERVIEW-A.pdf>