

ANTTI HEPOJOKI JA LAILA HOSIA

Rakenteiden Mekaniikka
7 (1974) 4, s. 179...196
Rakenteiden Mekaniikan
Seura, Helsinki

JOHDANTO

Maakaasuputken Imatran sivujohtoa rakennettaessa tuli esille Vuoksea alitettaessa erikoislaatuinen tekninen probleema, kun ras-
kaasti painotettu, noin 400 m mittainen teräsputki oli upotettava
25 m syvyyteen virtaavassa vedessä. Vastaavan tapaisia työsuorituksia oli tätä ennen tehty Suomessa noin 100 m mittaisilla elementeillä käyttäen apuna kannatinputkea, joka upotusvaiheessa täytettiin vedellä, ja systeemi upotettiin kokonaan. Saadut hyvät kokemukset saattoputkiupotusmenetelmän soveltuvuudesta ainakin lyhyitä putki-
systeemejä tai kevyitä rakenteita upotettaessa johtivat ajatukseen, että pitemmätkin putkielementit voitaisiin laskea pohjaan vastaavaa menetelmää käyttäen.

Saattoputkimenetelmän kehittäjän toimesta kirjoittajat ryhtyivät tutkimaan tätä menetelmää tarkemmin ja pyrkivät selvittämään teoreettisesti tekijät, jotka voisivat vaarantaa putken upotuksen. Teoreettisissa tarkasteluissa pyrittiin mahdollisimman yksinkertai-

silla approksimaatioilla saamaan käsitys eri tilanteiden aiheuttamista kaasuputken rasituksista ja pyrittiin kehittämään upotustekniikkaa siten, että päästäisiin mahdollisimman vähillä työvaiheilla. Alkuperäisen saattoputkimenetelmän lisäksi tutkittiin muitakin upotustapoja käyttäen kuitenkin hyväksi mahdollisimman paljon kokeiltua ideaa. Tämä siitäkkin syystä, että saattoputkena käytettyä normaalia imuruoppaajan teräsputkea oli valmiina käytettäväksi.

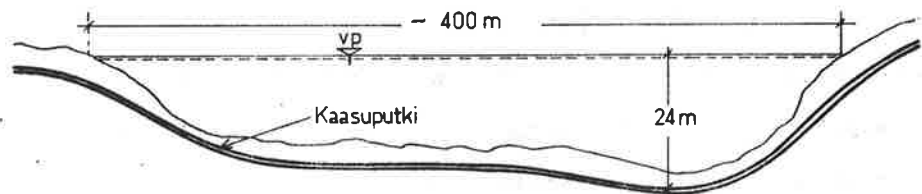
Eri upotusmenetelmiä tutkittaessa selvitettiin lähinnä voimien kehitystä ja putken saamia taivutusrasituksia. Uusia alkuperäisestä menetelmästä (menetelmä I) poikkeavia upottamistapoja kehitettäessä otettiin erityisesti huomioon työn suorituksen helppous sekä pyrittiin kustannusten minimointiin.

UPOTUSMENETELMÄ I

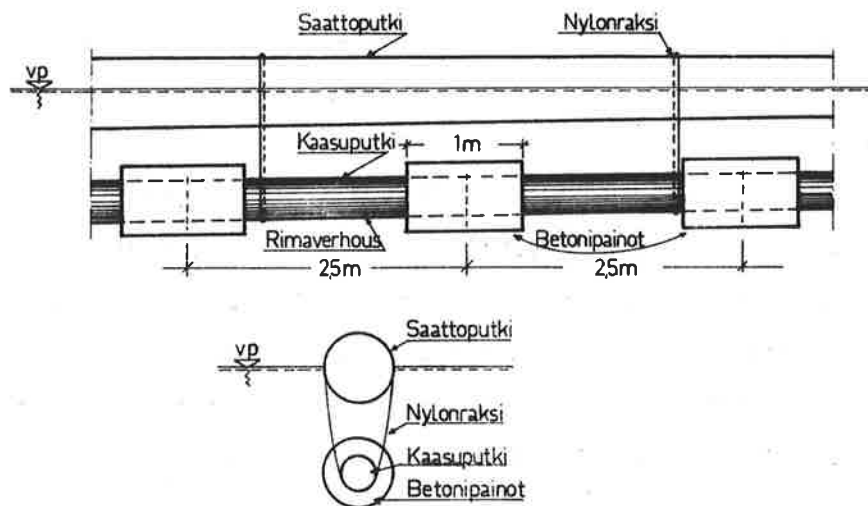
Tehtävään oli seuraavat alkutiedot:

- Kaasuputki valmistetaan pohjan muotoiseksi, ulkohalkaisija $D = 324$ mm, seinämän paksuus $t = 7,1$ mm, omapaino 563 N/m ja noste 824 N/m. Putken materiaali on X 52 ja sallittu min. käyritys on $r = 300$ m.
- Saattoputkella on vastaavasti $D = 570$ mm, $t = 3$ mm, omapaino ilmassa 420 N/m ja noste tyhjänä 2550 N/m.
- Kaasuputki painotetaan betonirenkailla, joiden pituus on 1 m, paino 4000 N/kpl, keskinäinen etäisyys $2,5$ m ja noste 1600 N/kpl.
- Kaasuputki ja painot yhdessä muodostavat systeemin, jonka paino vedessä on 700 N/m.

- Betonipainojen kiinnitys ei jäykistä putkea.
- Kaasuputki liitetään saattoputkeen nylonrakseilla ja koko systeemi uitetaan laskupaikalle täysin valmiina. Systeemin kantokyky kaasu- ja saattoputki tyhjänä on 1430 N/m. Kun saattoputki on täynnä vettä, systeemin paino vedessä on 1065 N/m.
- Putkea laskettaessa sitä voidaan jarruttaa ja vetää päästä sekä kiertää.



Kuva 1. Vuoksen poikkileikkaus kaasuputken upotuskohdalta ja putken asema kaivannossa



Kuva 2. Kaasuputki- ja saattoputkisysteemi upotusmenetelmässä I

Aluksi tutkittiin putken saamia rasituksia ja käyttäytymistä, kun saattoputkeen päästetään vettä. Tavoitteena oli saada putkisysteemi laskeutumaan tasaisesti ja vaarattomasti pohjaan.

Putkisysteemi on käyttäytymiseltään epälineaarinen rakenne, jonka tarkka analysointi on vaikeaa. Niillä osin, joilla saattoputki ei ole kokonaan uponnut, noste riippuu epälineaarisesti systeemin pystysiirtymästä. Saattoputkessa olevan veden sijainti ja siis sen kuormittava vaikutus riippuu putken asemasta, joka on taas riippuvainen systeemin kiertymästä putkessa olevan alkukäyrityksen johdosta sekä kuormituksen aiheuttamista putken siirtymistä. Epästationäärisessä tilassa vaikeutuu systeemin käsittely luonnollisesti vielä huomattavasti hitausvoimien ja putken laskeutumisesta syntyvien vastusvoimien vaikutuksen johdosta.

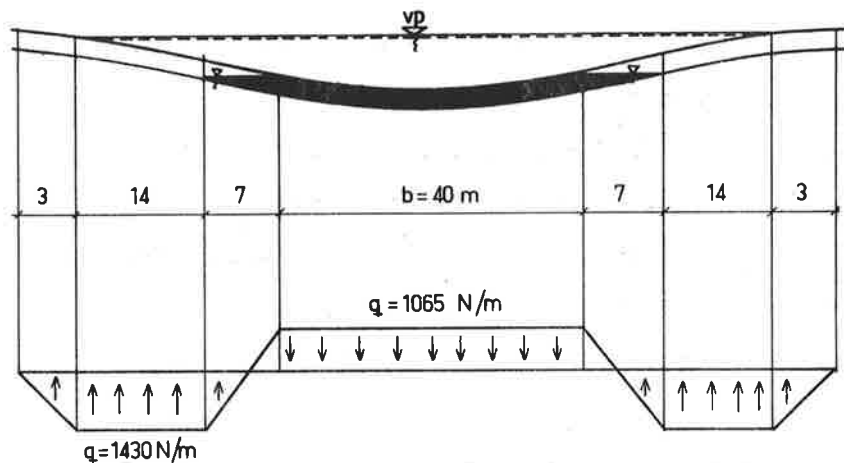
Seuraavassa on esitetty systeemille eräitä yksinkertaistettuja rajatapauksia, joiden avulla on pyritty saamaan kuva eri upotusmenetelmien käyttökelpoisuudesta.

Putken muotoa ja siinä esiintyviä rasituksia tutkittiin pitämällä putkea jatkuvasti kuormitettuna alkuaan suorana palkkina, jonka kuormitus muuttuu, kun saattoputkeen päästetään vettä. Putken oletettiin saavan jollakin kohdalla taipuman ja saattoputkessa olevan veden siirtyvän putken mutkaan, minkä jälkeen kuormitus pysyi vakiona. Täyttöveden lisäksi kuormituksina otettiin huomioon kaasuputken ja saattoputken omat painot, lisäpainot, virtausvastus ja noste.

Alustavana tarkasteluna käsiteltiin putkea vapaasti tuettuna

kaksitukisena palkkina, jonka tuet ovat vedellä kokonaan täytetyn jakson päiden kohdalla. Käyritysmää määritettäessä laskettiin yhteen kaasu- ja saattoputken taivutusjäykkyydet. Jo 40 m jännevälillä putken käyritysmän todettiin saavuttavan suurimman sallitun arvon, vaikkei putki saa vielä tukea pohjasta.

Seuraavaksi tarkasteltiin putkisysteemiä pitemmältä alueelta (kuva 3) ja laskettiin saattoputken tyhjän osan nosteen vaikutus taivutusmomenttiin. Putkea pidettiin nytkin vapaasti tuettuna kaksitukisena palkkina, jonka jänneväli saadaan lisäämällä vedellä täytetyn osan pituuteen veden alla olevan tyhjän putken osan pituus, kun noste vastaa suuruudeltaan putken ja täyttöveden painoa. Lisäksi huomioitiin veden pinnan asettuminen vaakasuoraan taipuneessa putkessa ja osittain täytetyn osan pituus arvioitiin alustavassa, nostetta huomioimattomassa tarkastelussa saadun putken kallistumisen ja taipuman avulla.



Kuva 3. Vedessä kelluvan putken kuormitus. Kokonaan vettä täynnä olevan osan pituus on 40 m. $M_{\max} = 0,45 \text{ MNm}$, $R_{\min} = 150 \text{ m}$.

Otaksumalla kokonaan vettä täynnä olevan putken osan b ja vastaavasti jännevälin pituudeksi erilaisia arvoja ja otaksumalla kuormituksen vaikuttavan kuvan 3 kaltaisesti saadaan taulukossa 1 näkyvät tulokset.

b (m)	M_{\max} (MNm)	R_{\min} (m)	Taipuma _{max} (m)
50	0,610	101	1,5
60	0,89	70	3
70	1,20	52	5,5
100	2,50	25	23

Taulukko 1. Taivutusmomentti, käyritymä ja taipuma putken täyttöpituuden b eri arvoilla.

Kun täyttöpituus b on 100 m saadaan taipumaksi 23 m, eli tällöin vasta putki koskettaa pohjaan.

Kaasuputki ja saattoputki 400 m pitkänä vapaasti tuettuna palkkina on varsin taipuisa rakenne, sillä jo $q = 10$ N/m jatkuva kuorma aiheuttaa siinä käyrityksasteen pienentymisen alle sallitun eli noin 300 m:iin. Havaittu virtausnopeus kyseisessä Vuoksen kohdassa on $v_{\max} = 19$ cm/s, josta aiheutuva vastusvoima $q = 30$ N/m. Saatu virtausvastusvoima kykenee jo yksinään murtamaan putkisysteemin, mikäli tukipisteet ovat pelkästään rannalla.

Esimerkkilaskelmien mukaan voidaan todeta, että saattoputken kanssa suoritettu noin 100 m:n pituisen putken upotus suhteellisen matalaan veteen onnistuu suuremmitta riskeittä ja erikoisjärjestelyittä.

UPOTUSMENETELMÄ II

Alkuperäisen ehdotuksen mukaisen systeemin osoittauduttua riskialttiiksi ryhdyttiin kehittämään turvallisempia upotusmenetelmiä.

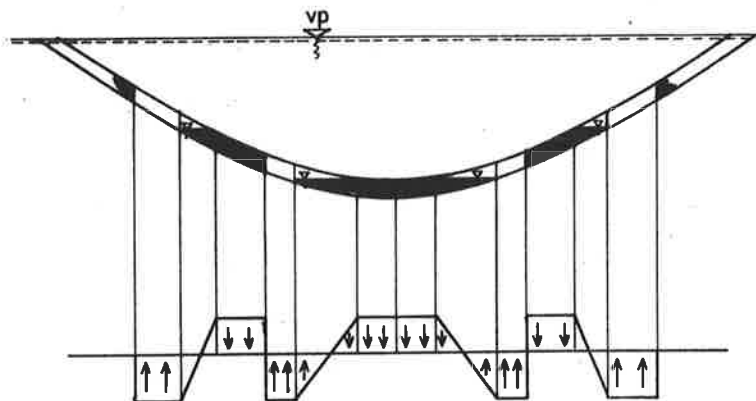
Saattoputken täytön aiheuttamaa kuormituksen kehitystä tarkasteltaessa voidaan todeta, että tilanne helpottuu, jos täyttövesi saadaan jakautumaan siten, ettei pääse syntymään pitkiä vastakkaisuuntaisia kuormitusjaksoja (täyttöveden paino ja tyhjän putken noste).

Kuormitusta voidaan tasoittaa jakamalla saattoputki osiin, joihin yksitellen päästetään vettä. Kuormitustilanne tulee kuvan 4 mukaiseksi, kun täyttömäärä on sellainen, että koko systeemin tiheys on lähes sama kuin veden tiheys.

Lokeroitua saattoputkea ja kaasuputkea tarkasteltiin ensiksi vapaasti tuettuna kaksitukisena palkkina, ja täytettävien lokeroiden ja palkin pituutta lisättiin asteittain. Veden osittain täyttämää osaa lokerossa ei otettu erikseen huomioon, vaan putki oletettiin kullakin kohdalla joko aivan täydeksi tai tyhjäksi. Lokerossa oli vettä niin paljon, että lokeron pituisen putkijakson tiheys oli sama kuin veden. Taulukosta 2 selviää taivutusmomentin maksimiarvo eri lokeromäärillä.

n	M_{\max} (MNm)	R_{\min} (m)
2	0,03	2250
4	0,06	1050
6	0,10	600
8	0,14	460
10	0,17	375
12	0,20	315
14	0,23	265

Taulukko 2. Taivutusmomentti putken taipuneen osan keskellä lokeropituudella $a = 10$ m vedellä täytettyjen lokeroiden määrän n vaihdellessa.



Kuva 4. Lokeroitun osittain vettä täynnä olevan saattoputken vaarallisin kuormitus.

Arvioitaessa putken kaltevuutta ja vedenpinnan asemaa lokeron sisällä korvattiin otaksuttu kuorma jatkuvalla tasaisella kuormalla, joka aiheuttaa saman momentin putkijakson keskelle ja tarkasteltiin tämän tasaisen kuorman aiheuttamaa putken taipumaa ja kaltevuutta. Kun tunnetaan putken kaltevuus, tiedetään myös vedenpinnan asento putkessa ja kuormitusotaksumia voidaan tarkentaa. Suorittamalla laskelmat kerran uudestaan saatiin korjatut momenttien arvot, jotka olivat tapauksessa $a = 10$ m noin 75 % taulukon 2 arvoista. Vastaväläisiä laskelmia suoritettiin eri lokeropituuksilla. Tapauksessa $a = 30$ m ja $n = 4$ kpl korjattu momentti oli lähes sama kuin likimääräisemmällä otaksumilla saatu momentti.

lokeroväli a (m)	lokeromäärä n	M_{\max} (MNm)	M_{\max} (MNm) (tarkempi)	R_{\min}	Taipuma (m)
10	14	0,23	0,18	265	9
10	16	0,28	0,21		
20	2	0,12		540	
20	4	0,26		240	
20	6	0,38			
20	8	0,48			
30	2	0,18			
30	4	0,58	0,55		

Taulukko 3. Taivutusmomentti eri lokeropituuksilla ja lokermäärällä.

Kun putkisysteemin tiheys on sama kuin veden, putki ei pääse nousemaan vedenpinnan yläpuolelle. Vertaamalla likimäärin tätä tilannetta jäykkään kiinnitykseen, saadaan tapauksessa $a = 30$ m ja

A. Hepojoki ja L. Hosia: Vuoksen alitus ...

$n = 4$ kpl momentiksi $M_{\text{kesk}} = 0,18$ MNm ja päissä $M = - 0,20$ MNm, mitkä jäävät alle sallittujen arvojen.

Jos putken pituudeksi otetaan 400 m ja oletetaan 4 keskimäisen lokeron kallistuneen saadaan $M_{\text{kesk}} = 0,57$ MNm, mikä vastaa tasaisesta kuormasta $q = 2,8$ kp/m syntyvää momenttia. Tätä kuormaa vastaa taipuma 160 m. Koska jo taipuman ollessa 24 m putki koskettaa pohjaan, ei näin vaarallista tilannetta pääse syntymään.

Putken laskeutumisesta vedessä seuraa vastusvoima q , joka aiheuttaa putken keskelle putkea oikaisevan momentin. Putken oietessa putkessa oleva vesi jakaantuu tasaisemmin, mikä edelleen pienentää putken käyristystä keskelle. Arvioitaessa oikaisevan momentin suuruusluokkaa laskettiin vastusvoima eri laskeutumisenopeuden arvoilla käyttäen tarkempaa, teoreettista kaavaa sekä likimääräistä kaavaa, joista jälkimmäinen johti aivan liian optimistisiin tuloksiin.

Vastusvoima q (N/m) saadaan kaavasta

$$q = C_D \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A,$$

jossa

C_D = Reynoldsin luvusta $Re = \frac{vD}{\nu}$ riippuva vakio

D = putken halkaisija

ν = kinemaattinen viskositeetti

ρ = nesteen tiheys

A = liikettä vastaan kohtisuora poikkileikkausala

v = laskeutumisenopeus.

Vastusvoiman likimääräinen kaava on

$$q = 800 \cdot A \cdot v^2 \text{ (N/m)}, \quad A = (\text{m}^2/\text{m}), \quad v = (\text{m/s}).$$

Laskettaessa taivutusmomentti keskellä, kun $l = 120 \text{ m}$ ja 400 m , otaksuttiin kuormitus kolmiomaiseksi, jolloin

$$M_{\text{kesk}} = \frac{q_{\text{max}} \cdot l^2}{12}.$$

v (m/s)	Re	C_D	l = 120 m				l = 400 m	
			q_{max} (N/m)	M_{kesk} (k)	likim. kaava		M_{kesk} (kNm)	likim. kaava
					q_{max}	M_{kesk} (kNm)		
0,05	$3 \cdot 10^4$	1	0,7	1	1	1	10	10
0,1	$6 \cdot 10^4$	1	3	4	5	6	40	70
0,15	$9 \cdot 10^4$	1	7	8	10	10	90	130
0,2	$1,2 \cdot 10^5$	1	2	14	20	10	160	270
0,3	$1,8 \cdot 10^5$	0,3	8	10	40	50	110	550
0,4	$2,4 \cdot 10^5$	0,3	14	17	80	100	150	850
0,5	$3 \cdot 10^5$	0,3	22	26	120	140	290	1580
0,6	$3,6 \cdot 10^5$	0,3	32	38	170	200	430	2980

Taulukko 4. Vastusvoima putken upotessa.

Pienillä nopeuksilla vastusvoiman vaikutus on vähäinen, eikä sitä ole syytä ottaa huomioon putken kaarevuutta vähentävänä tekijänä.

Laskelmissa käsitelty systeemi poikkeaa toiminnaltaan sikäli todellisesta, että alkutaipuma on aiheutettu ulkoisella voimalla ja "tuella" on sallittu sekä vaakasiirtymä että kiertymä. Todellisuudessa koko systeemin tiheyden ollessa lähes sama kuin veden tiheys momentin nollakohta siirtyy momentin kasvaessa ja levossa oleva osa aiheuttaa negatiivisen tukimomentin, jonka takia putken taivutusmomentti pienenee laskelmissa käsitellystä tilanteesta.

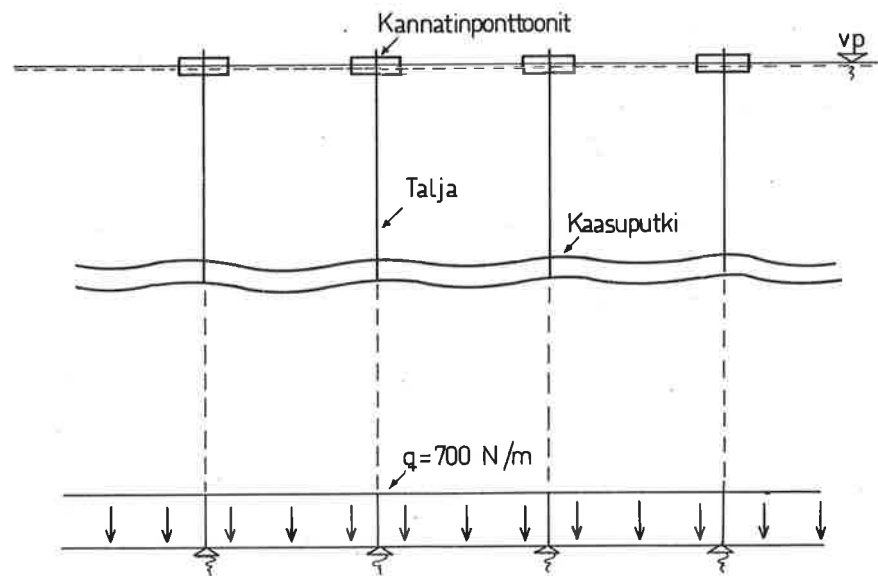
Painotetun putkisysteemin ja veden tiheyksien ollessa likimäärin yhtäsuuret voidaan valmiiksi pohjan muotoinen putki ohjata helposti pienillä ulkoisilla voimilla valmiiseen kaivantoon sekä suorittaa tämän asennon vaatima kiertäminen. Virran aiheuttamaa vastusvoimaa voidaan käyttää kiertämiseen vaadittavan vääntömomentin pienentämiseen siten, että valmis putki asetetaan kupera puoli vastavirtaan päin ja upottaminen aloitetaan käyrästä osasta ja annetaan putken painua virran mukana kaivantoon.

Mikäli putkea joudutaan siirtämään, kiertämään tai vetämään pohjassa uuteen asentoon, tämä tapahtuu varsin pienin ulkoisin voimin, eikä se aiheuta putkeen suuria rasituksia.

Kokonaisuudessaan upotusmenetelmä II ei ole riskialtis, kun lokeroväli on pieni (esim. 30 m) ja kun systeemi painotetaan täyttövedellä varovaisesti likimain veden ominaispainoiseksi.

UPOTUSMENETELMÄ III

Ryhdyttäessä tutkimaan menetelmää, jolla kaasuputken upottaminen voitaisiin suorittaa koko ajan "stationäärisessä" tilassa, päädyttiin systeemiin, jossa upottaminen suoritetaan köysillä tai taljoilla kantoputkelta käsin. Tällöin putkea voidaan käsitellä kimmoisilla tuilla olevana jatkuvana palkkina (kuva 5).



Kuva 5. Kaasuputken upotus taljoilla. Putki voidaan otaksua kimmoisilla tuilla olevaksi jatkuvaksi palkiksi

Suoritetuilla laskelmilla todettiin, että kaasuputki kestää noin 30 m:n köysivälin. Tällöin ei vielä muodostu 300 m pienempiä käyristymiä. Laskelmissa on yksinkertaisuuden vuoksi oletettu tukien olevan $2 \times 2 \text{ m}^2$ suuruisia lauttoja. Virtausvastus tässä systeemissä ei vaikuta häiritsevästi, koska putkisysteemi on tuettu riittävän monesta pisteestä. Köysillä laskeminen voidaan laskennallisesti käsitellä alusta loppuun saakka ja tilanne on täten kontrolloitavissa koko upotuksen ajan. Esiintyvät taljavoimat 30 m:n tukivälillä ovat noin 21 kN/talja.

UPOTUSMENETELMÄ IV

Vuoksen leveyden ollessa upotuskohdalla noin 400 m, yhtenäisen putki on niin pitkä ja helposti vaurioituva, että yhtenä teknisenä ratkaisuna voidaan ajatella putken upottamista pienemmissä osissa ja hitsaamista yhtenäiseksi vasta pohjassa. Menetelmä I yhteydessä todettiin jo, ettei ole suuriakaan teknisiä ongelmia upottaa esim. 100 m:n mittainen putki saattoputkimenetelmää käyttäen. Hitsaaminen veden alla on mahdollista, mutta saumakohtien tarkistus on hankalampi toimitus. Samoin jo laskettujen putkenosien päiden saaminen riittävän tarkasti kohdakkain vaatii runsaasti hankalia siirroksia pohjassa, mikä raskaasti painotetun putken kyseessäollessa on paljon työtä vaativaa.

TOTEUTUS

Maakaasuputken sivuhaara ja varaputki upotettiin upotusmenetelmä III mukaisella tekniikalla. Kaasuputki rakennettiin valmiiksi pohjan muotoiseksi ja sijoitettiin teollisuusradan päälle rantaan poikittain Vuokseen nähden (kuva 6). Putki eristettiin muovinauhalla, suojattiin lautaverhouksella ja painotettiin valmiiksi. 20 m:n välein olevat kannatinponttoonit tehtiin 10 m:n pituisista imuruoppaajan putkenosista ja laskutaljat asennettiin putkien väliin. Putkea liikuteltiin kaivinkoneiden avulla maalla ja vintturikoneistolla ponttooneilla (kuva 7).

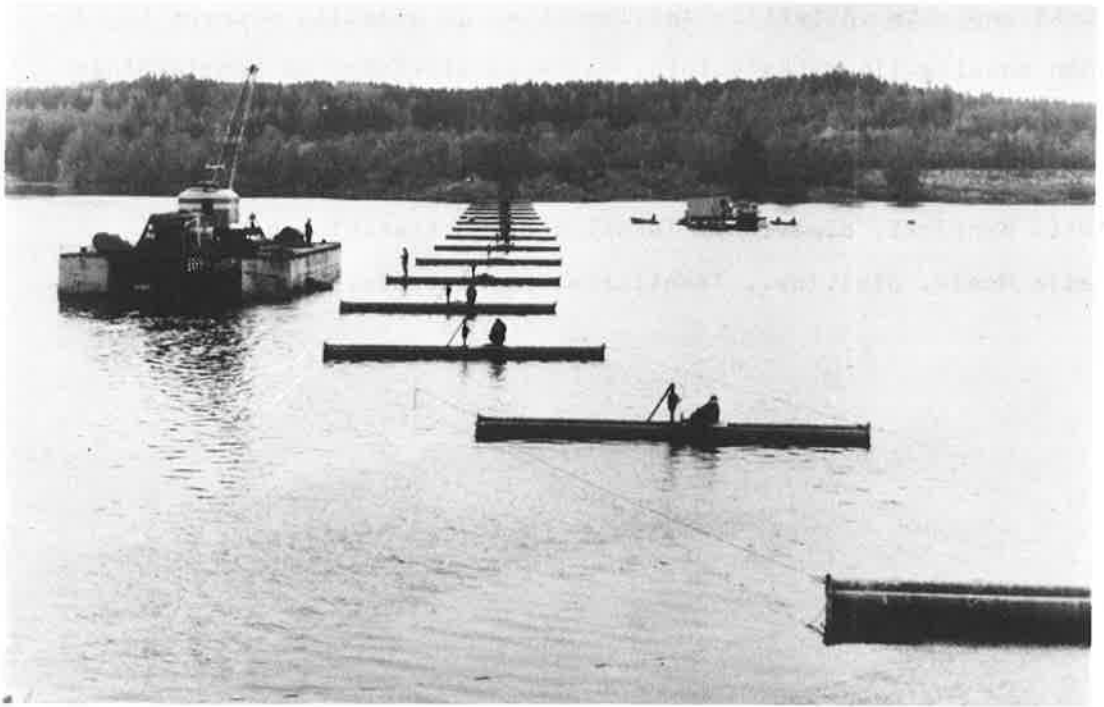


Kuva 6. Pohjan muotoiseksi tehty kaasuputki odottamassa eristystä ja painotusta



Kuva 7. Valmiiksi rakennettua ja painotettua kaasuputkea kiinnitetään ponttooneihin Vuoksen rannassa

Putken laskeminen Vuoksen pohjaan ruopattuun paikoin 4 m syvään kaivantoon tapahtui tarkkojen laskuohjeiden mukaan kullakin taljalla yhtäaikaisesti. Putken asema tarkastettiin mitta-asteikolta jokaisen laskuperiodin välillä. Kaasuputken ollessa valmiiksi pohjan muotoiseksi rakennettu täytyi putken kiertyminen hoitaa laskemalla syvimmän kohdan taljoilla nopeammin (kuva 8). Putki painui täsmälleen oletusten ja laskelmien mukaisesti. Kaasuputki ohjautui oikeassa asennossa kaivantoon ja kiertyminen oli täsmälleen 90° , joten putkeen ei jäänyt vääntöjännityksiä. Kaasuputken asema Vuoksen pohjassa tarkastettiin ennen taljojen irrottamista sukeltajien avulla. Lisäksi putkelle tehtiin normaalit paineenkoetuskokeet.



Kuva 8. Kaasuputki kokonaan kannatinponttoonien varassa. Taljoilla laskeminen voi alkaa.

Saatujen kokemusten mukaan todettiin raskaasti painotetun putken laskemisen tapahtuvan täysin luotettavasti kuvatulla menetelmällä, jota ei tiettävästi ole käytetty muualla. Menetelmää käytettiin hyvällä menestyksellä mainittujen kahden Vuoksen pohjaan upotetun kaasuputken laskemisessa ja myöhemmin mm. Summa-joen alituksessa.

LOPPUSANAT

Upotusmenetelmän kehittelyn jokaisessa vaiheessa oli artikkelin tekijöillä mahdollisuus neuvotella dipl.ins. Palojärven kanssa

minkä ansiosta vältettiin epäolennainen ja päästiin suoraan käytännön soveltuviin ratkaisuihin. Valokuva-aineiston on Lemminkäinen Oy ystävällisesti toimittanut käytettäväksi.

Antti Hepojoki, dipl.ins., Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi

Laila Hosia, dipl.ins., Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi