

Betonin edistynyt tiivistystekniikka Kirjallisuusselvitys

Esa Nykänen

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5193-1 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid)

ISBN 951-38-5194-X (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1998

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, telekopio (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, telefax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, telefax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka, Kemistintie 3, PL 1805, 02044VTT
puh. vaihde (09) 4561, telekopio (09) 456 7004

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsmaterial och -produkter, träteknik, Kemistvägen 3, PB 1805, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, telefax (09) 456 7004

VTT Building Technology, Building Materials and Products, Wood Technology, Kemistintie 3, P.O.Box 1805,
FIN-02044 VTT, Finland, phone internat. + 358 9 4561, telefax + 358 9 456 7004

Toimitus Maini Manninen

LIBELLA PAINOPALVELU OY, ESPOO 1998

Nykänen, Esa. Betonin edistynyt tiivistystekniikka. Kirjallisuusselvitys [Advanced compaction technology of concrete. Literature study]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1889. 33 s.

UDK 691.32:693.5

Avainsanat concretes, compacting, compaction equipment, vibration

TIIVISTELMÄ

Tässä kirjallisuustutkimuksessa etsitään ideoita betonin tiivistystekniikkaan. Tätä varten tehtiin kirjallisuushaku useista eri tietokannoista, joissa käsitellään rakennustekniikan lisäksi mm. muovitekniikkaa ja pulverimetallitekniikkaa.

Julkaisuun päätyneistä lähteistä laajin on itse asiassa betonitekniikkaviite. Siinä on tutkittu koneenrakennuksessa käytetyn värähtelydynamiikan soveltamista betonin tiivistämiseen. Lähteessä analysoidaan tuoreen betonin dynaamisia ominaisuuksia sekä pyritään laskennallisesti ja kokeellisesti muottibetoni-systeemin resonanssivahvistukseen. Resonanssivahvistus saavutetaan sovittamalla muotti, betoni, täry ja vaimennus toisiinsa. Toisessa betonitekniikkalähteessä on tutkittu sauvatäryn aiheuttamaa seisovaa aaltoa ja sen aiheuttamaa kiihtyvyyttä muottivanerissa ja todettu suurimman kiihtyvyyden olevan eri syvyydellä kuin tärysauva.

Muissa lähteissä käsitellään esimerkiksi asfaltin kehittämistä kiertotiivistyslaitteen avulla ja maa-aineksen tiivistämistä maastokuorma-autolla.

Nykänen, Esa. Betonin edistynyt tiivistystekniikka. Kirjallisuusselvitys [Advanced compaction technology of concrete. Literature study]. Espoo 1998, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1889. 33 p.

UDK 691.32:693.5

Keywords concretes, compacting, compaction equipment, vibration

ABSTRACT

The aim of this literature study was to find ideas for the compaction technology of concrete. For this purpose a literature search was made from various different databases handling for instance plastic technology and powder metal technology in addition to building technology.

From the sources which ended in the publication the concrete technology reference is in fact the widest. This source studies the application of the dynamics of vibration used in mechanical engineering in the compaction of concrete. It analyzes the dynamic properties of fresh concrete and aims at the resonance amplification of the mould-concrete system both calculatively and experimentally. The resonance amplification is achieved by fitting together the mould, the concrete, the vibration and the damping. The other concrete technology source studied the frequency resonance caused by rod vibration and the acceleration caused by it in the plywood of the mould and it was found that the acceleration was the highest at a different depth than that of the vibration rod.

Other sources handle e.g. the development of asphalt by using gyratory compaction equipment and the compaction of earth by using a cross-country lorry.

ALKUSANAT

VTT Rakennustekniikassa on tehty usein kartoitusta ja teknologiasiirtoa poikkiteieteellisesti muilta aloilta. Nyt tehtiin teknologian etsimis- ja siirtoprojekti tiivistystekniikan alalta. Projektia ovat rahoittaneet VTT:n lisäksi TEKES, Lohja Oy Ab ja Partek Concrete Development Oy Ab. Tämä julkaisu on katsaus VTT Tietopalvelun tekemän haun avulla löytyneiden artikkeleiden betonitekniikkaa kiinnostavimmista asioista.

Kirjallisuusselvityksen tarkoituksena ei siis ole ainoastaan määrittää sitä, mitä betonitekniikassa on jo tehty, vaan löytää poikkiteieteellisesti mahdollisesti uusia, teknologialtaan soveltuvia tai sovellettavissa olevia ideoita muilta aloilta. Projektissa, johon tämä selvitys liittyy, tehtiin myös käytännön tiedusteluja muille aloille. Julkaisu on kuitenkin rajattu vain kirjallisuushaun löydöksiin, eikä sisällä mitään haun ulkopuolella olevaa yleisesti tiedossa olevaa asiaa. Julkaisun on tarkoitus tukea betonin tiivistystekniikan kehittämistä ja antaa ideoita betonitekniikkaan sovellettavaksi.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
SYMBOLILUETTELO.....	7
1 JOHDANTO	8
2 TIEDONHAUSSA KÄYTETYT LÄHTEET.....	9
3 TIIVISTYTEKNOLOGIOITA.....	10
3.1 Betonitekniikka.....	10
3.1.1 Tiivistämisen tehostaminen resonanssivahvistuksella.....	10
3.1.2 Korkealujuusbetonin valmistaminen paineen avulla	25
3.1.3 Tärypalkin käytöstä	26
3.1.4 Tärysauvan aiheuttamat kiihtyvyyden muotissa.....	26
3.2 Muovitekniikka.....	28
3.3 Asfaltitekniikka	29
3.4 Pulverimetallitekniikka.....	30
3.5 Maan ja hiekan tiivistystekniikka.....	31
3.5.1 Hiekan tiivistäminen maastoajoneuvoilla	31
3.5.2 Murskatun kiviaineksen tiivistäminen	31
3.5.3 Hienon hiekan tiivistäminen sauvatäryttimellä.....	32
LÄHDELUETTELO.....	33

SYMBOLILUETTELO

a	kiihtyvyys
ρ	tiheys
ω	kulmanopeus
ζ	vaimennus (kerroin)
c	viskoosivaimennus
C_c	kriittinen vaimennus
d	amplitudi
f	värähtelytaajuus
f_d	resonanssitaajuus (vaimennettu systeemi)
f_n	resonanssitaajuus (vaimentamaton systeemi)
F_o	voima
k	jousivakio
m_s	jousen massa
v	nopeus
x	amplitudi
X_{peak}	amplitudi (huippu)
X_{RMS}	amplitudi (root mean square)
m	massa

1 JOHDANTO

VTT:n Rakennustekniikassa on tehty usein erilaisia kartoituksia ja teknologia-siirtoa poikkitieteellisesti muilta aloilta. Nämä ovat usein liittyneet joko projektien aikana virinneisiin ideoihin tai sisältäneet tekniikkaa suoraan soveltavan osan. Tulos on toimintatavasta johtuen jäänyt usein julkaisematta. Tässä projektissa oli tarkoituksena betonitekniikan tiivistämiskäyttöön soveltuvien ideoiden kokeilun lisäksi tehdä kirjallisuushaku myös muualta kuin betoni- ja rakennustekniikan tietokannoista sekä kirjoittaa julkaisu.

Kirjallisuushaun aikana saatiin kokemusta poikkitieteellisen haun vaikeuksista. Onneksi haku kohdistettiin myös betonitekniikkaan.

Tuloksena tässä kirjallisuusselvityksessä on kussakin kappaleessa yhden lähteen materiaalia. Betonitekniikkalähde osoittautui mielenkiintoisimmaksi. Itse asiassa se käsitteli tutkimusta, jonka idea perustui poikkitieteelliseen lainaukseen. Betonitekniikan ulkopuolisista lähteistä on mukana muutamia sangen lyhyesti. Lähteiden tarkoituksena on valottaa esimerkiksi eri alojen tiivistämiseen käytettävän voiman suuruusluokkia tai tiivistämisen liittymistä koko tekniikkaan esimerkiksi suunnittelun ja laadunvalvonnan kautta.

Muiden alojen hauissa oli yleisesti ongelmana kunkin alan syvemmän tuntemisen puute. Pelkästään tiivistys- tai "compaction"-sanan korvaaminen alalla vallitsevaan sanaan ei takaa tiedon löytymistä eikä ymmärtämistä. Näin ollen mikäli löydetyistä lähteistä halutaan päästä oleellisesti pidemmälle, on ensisijaisen tärkeää aloittaa yhteistyö, jossa sekä betonitekniikan että antavan alan henkilöt ovat aktiivisia ja avoimia. On itsestään selvää, että saavutettavat hyödyt ovat tällöin molemminpuolisia.

2 TIEDONHAUSSA KÄYTETYT LÄHTEET

Haku tehtiin paitsi rakennusalan, myös mm. kemian ja elintarviketekniikan tietokannoista. Hakua teki kaksi eri informaattikkoa. Viitteitä löytyi runsaasti (mm. "compaction"-sanalla) ja lopulta otettiin mukaan noin 500 viitettä.

Haku tehtiin seuraavista tietokannoista: Wilson, NTIS, ICONDA, BYGGDOK, ESA, FSTA (Food Science and Technology Abstracts), STN International (/RAPRA ja KKK) sekä WPINDEX (patenttiviitteitä). Näiden Abstraktien perusteella tilattiin noin 50 artikkelia, joista kymmentä on lopulta käytetty tässä kirjallisuusselvityksessä.

3 TIIVISTYSTEKNOLOGIOITA

Tiivistystekniikka on teknologiariippuvaisesti ymmärretty käsite. Kirjallisuushaussa löydettiin esim. "compaction"- sanalla mitä erilaisimpia sovelluksia, esim. jätteenkäsittelylaitteita ja elintarviketeollisuuden pakkauslaitteita. Kuitenkin yleisellä tasolla betonitekniikassa tiivistäminen tarkoittaa toimintaa, joka muottiin asettamisen tai muun vastaavan muodon saavuttamisen lisäksi liittyy ilman poistamiseen materiaalista. Tiivistämistä edeltävässä vaiheessa ilmaa ei sinänsä estetä menemästä betonin sisään. Tietyissä betoneissahan ilmaa lisätään keinotekoisesti.

Muista teknologioista voitaisiin siis hyödyntää edellä mainittuun liittyviä ominaisuuksia: muottiin asettautuminen, muodon saaminen ja ilman poisto.

Laajasta hausta huolimatta tämän kirjallisuushaun yksi tärkeimpiä löytöjä oli betonitekniikan puolelta: betonimateriaalin ja värähtelytekniikan yhteensovittaminen tiivistystekniikan parantamiseksi.

Seuraavissa luvuissa on esitetty vain yhden lähteen materiaalia lukua kohti. Tämän takia joka kappaleeseen ja taulukkoon ei ole erikseen viitettä mainittu. Viitteiden sisällön lisäksi kappaleisiin on lisätty ajatuksia tiedon edelleensoveltamisesta.

3.1 BETONITEKNIikka

3.1.1 Tiivistämisen tehostaminen resonanssivahvistuksella

Tässä luvussa käsitellään yhtä laajaa tutkimusta, jossa sovellettiin koneenrakennuksesta tuttua värähtelydynamiikkaa betonin tiivistämiseen.

Tutkimuksessa [1], jossa on käsitelty betonielementtien valmistusta, on selvitetty betonin täryttämällä tiivistämisen perusteita nimenomaan betonimateriaalin kannalta. Lähestymistapa lopullisissa laskelmissa on samanlainen kuin koneensuunnittelun värähtelylaskelmissa. Tutkimuksen käytännön osassa oli yhteensä 19 erilaista elementtiä 12:ssa eri tehtaassa. Elementtityypit olivat sekä tasomuotteja, patterimuotteja että pöydällä valmistettavia erikoistuotteita, kuten ontelolaattoja ja palkkeja.

Tutkimuksessa lähdetään siitä, että betonilla on materiaalina itse mahdollisuus vaikuttaa tärytyksen ja täten tiivistyksen onnistumiseen. Tässä tärkeimpänä nousevat esiin betonin dynaamiset ominaisuudet, kuten dynaaminen kimmomoduuli ja toisaalta vaimennus. Seuraavassa käydään läpi tärkeimmät kohdat tutkimuksessa läpikäydystä kokonaisuudesta. Kokonaisuus koostuu betonimateriaalin ominaisuuksien mittaamiseen ja näiden arvojen käyttämiseen malleissa, joilla voidaan lopulta optimoida betoni + muotti -yhdistelmän värähtely. Näitä lainalaisuuksia voitaneen hyödyntää myös muunlaisissa tiivistyksissä. Tutkimuksen kirjoituksen (1970-luvulla) jälkeen on tiedonkeruu- ja mittaustekniikka kehittynyt merkittävästi, ja esitetyt analyysit ovat toteutettavissa tarkemmin ja pienemmin rahallisin resurssein. Mikäli tuotantovaiheessa tarvitaan tärytyksen säätöä, on taajuusmuun-

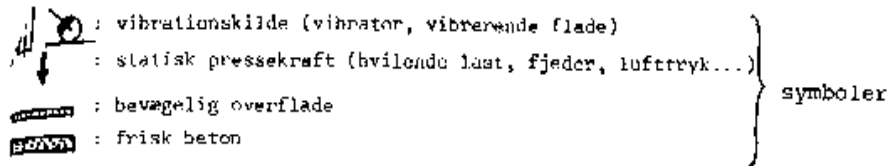
tajien hinnan laskeminen elektroniikan kehityksen myötä tehnyt niiden käytöstä yhä tavallisempaa, eikä hinta ole tuotantokäytön este.

Tiivistystyyppejä

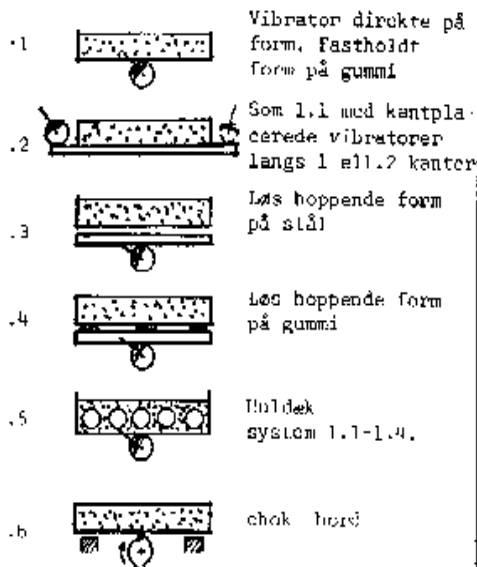
Tutkimuksessa /1/ on betonikappaleiden tiivistäminen täryttämällä jaettu kuuteen eri luokkaan:

1. Vaakasuora seinäelementti, avoin muotti, tärytys tapahtuu altapäin.
2. Vaakasuora seinäelementti, suljettu muotti.
3. Korkeat pystysuorat muotit, kuten patterimuotit.
4. Palkit, joilla on rajoitettu korkeus (muotin reuna).
5. Suuret, pitkät laatta-elementit.
6. Erikoistuotteet maakosteasta betonista, esim. ontelolaatta.

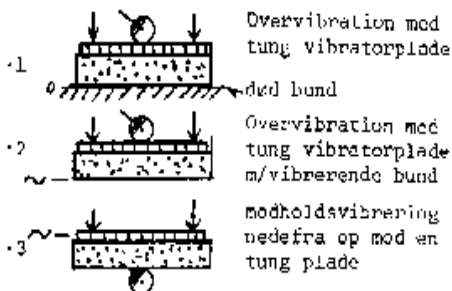
Näissä tapauksissa 1, 3, 4, ja 5 betonilla on passiivinen osa suhteessa muottitekniikan dynamiikkaan. Toisaalta tapauksissa 2 ja 6 betonin dynaamiset ominaisuudet vaikuttavat suuresti systeemin dynamiikkaan. Kuvassa 1 on esitetty eo. jaottelun mukaisesti kuvat ja edelleen erilaisia tärynsijoitteluvaihtoehtoja. Kuva muistuttaa tässä tapauksessa monista eri vaihtoehtoista, joita on olemassa muotin ja täryn yhdistelminä.



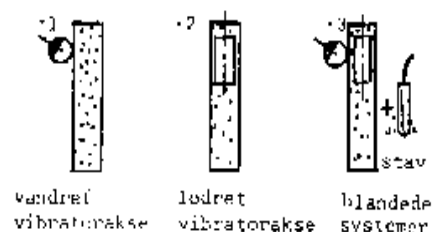
1. vandret, åben form - undervibration



2. vandret, lukket form



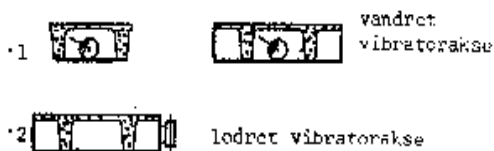
3. høje lodrette formsystemer



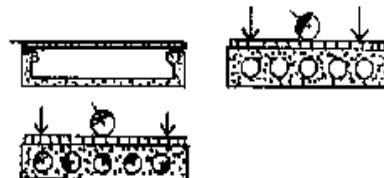
4. bjælker/søjler m/begrænset højde



5. store lange pladeclementer



6. Specialsystemer for jordfuglig beton (huldek, rør, o.a.)



BEMERK:

A. For systemerne 1., 3., 4., 5. gælder generelt, at betonen er et "passivt" element (død masse) i relation til formsystemets dynamik.

B. I systemerne 2. og 6. er betonens dynamiske egenskaber (fjederstivhed, dæmpning) derimod meget afgørende for systemets dynamik.

Dette kan også være tilfældet for systemerne 1., 3., 4., 5., når disse etablerer resonans (stående bølge) i selve betonlaget.

Kuva 1. Tiivistyssysteemejä /1/.

Seuraavassa on esitetty värähtelyteorian perusteita, yksiköitä ja laskukaavoja. Näitä peruskaavoja käytetään hyväksi pyrittäessä hallitsemaan betonia värähtelylaskelmissa.

Kaavoissa esiintyviä yksiköitä ja niiden määrittelyjä:

Värähtelytaajuus:

$$f = \frac{1}{60} * \frac{\text{kierrosluku}}{\text{min}} \quad , (1/\text{min}) \quad (1)$$

Kulmanopeus:

$$\omega = 2\pi f \text{ (sek}^{-1}\text{)} \quad , \quad f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2)$$

Jousivakio (jäykkyys):

$$k = \frac{\Delta\text{voima}}{\Delta\text{pituus}} \quad , (N / m) \quad (3)$$

Viskoosivaimennus:

$$c = \frac{\text{voima}}{\text{nopeus}} \quad , \left(\frac{N * s}{m}\right) \quad (4)$$

Kriittinen vaimennus:

$$c_c = \frac{\text{voima}}{\text{nopeus}} \quad , \left(\frac{N * s}{m}\right) \quad (5)$$

Vaimennus (kerroin):

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = 2\sqrt{k * m} \quad , \text{ laaduton_luku} \quad (6)$$

Amplitudi:

$$d, x \quad , (m) \quad (7)$$

Nopeus:

$$v, \dot{x}, (m / s); \dot{x} = x * \omega \quad (8)$$

Kiihtyvyys:

$$a, \ddot{x}, (m / s^2) ; \ddot{x} = -\frac{x}{\omega^2} \quad (9)$$

Voima (täryn keskihakuvoima tai lyöntivoima):

$$F_0, (N) \quad (10)$$

Voiman taajuus (täryn taajuus):

$$f = \frac{\omega}{2\pi}, (Hz) \quad (11)$$

Resonanssitaajuus, vaimentamaton systeemi, ei jousimassaa:

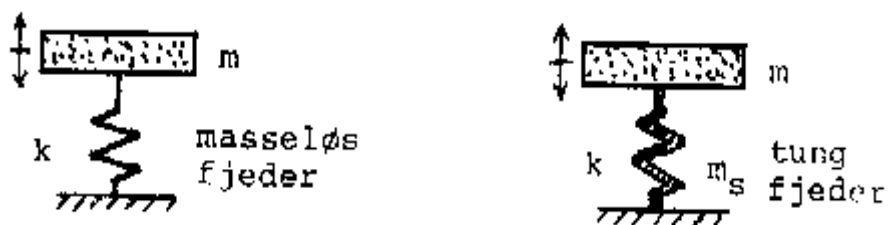
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (12)$$

Resonanssitaajuus, vaimentamaton systeemi, jousella massa (tässä jousi on betoni) :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m + \frac{1}{3}m_s}} \quad (13)$$

Tässä kaavassa (13) on laskettu jousen massaksi 1/3 muotissa olevan betonin massasta. Tähän arvioon on päädytty tutkimuksessa /1/ tehtyjen käytännön kokeiden perusteella. Tätä arviota käytetään kaikissa tämän kappaleen esimerkeissä.

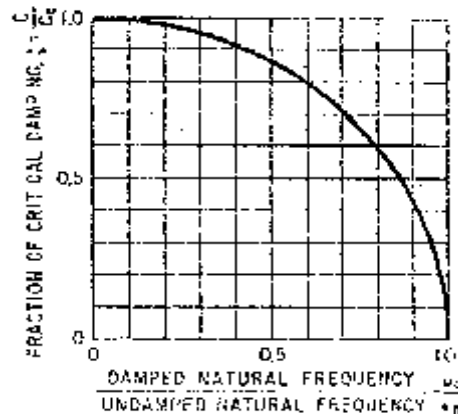
Kuvassa 2 on esitetty vaimentamattoman systeemin periaatekuva.



Kuva 2. Vaimentamattoman systeemin periaatekuva /1/. Vasemmalla on massaton jousi ja oikealla massallinen jousi.

Vaimennettu systeemi

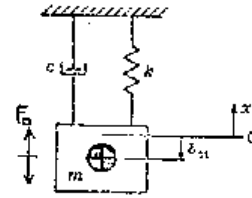
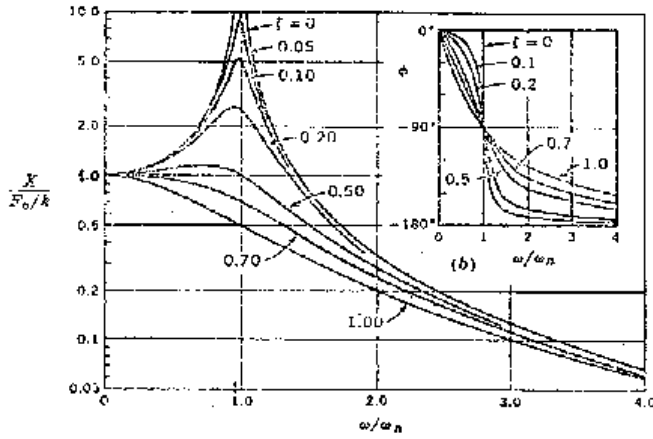
Resonanssitaajuus vaimennetulle systeemille f_d löydetään siten, että lasketaan ensin systeemille vaimentamaton resonanssitaajuus f_n . Kun tunnetaan vaimentamaton resonanssitaajuus ja vaimennus ζ , voidaan f_d määrittää kuvaajan (kuva 3) avulla. Vaimennus laskee resonanssitaajuutta, mutta muutos on pieni systeemeillä, joilla on pieni vaimennuskerroin ζ . Avoimilla tasomuoteilla, joissa on käytetty kumivaimentimia, on tutkimuksen [1] mukaan tyypillinen vaimennuskerroin, $\zeta = 0,02 - 0,05$. Kuvassa 3 esitetään käyrä, jolla saadaan arvioitua vaimennuskerroin, kun tiedetään vaimennettu- ja vaimentamaton resonanssitaajuus. Toisaalta käyrää voi käyttää käänteisesti, kuten jatkossa olevissa esimerkeissä: Tunnetaan vaimentamaton resonanssitaajuus ja arvataan vaimennus. Tämän perusteella saadaan selvitettyä vaimennettu resonanssitaajuus.



Kuva 3. Vaimennetun- ja vaimentamattoman systeemin resonanssitaajuuden suhteen yhteys vaimennuskertoimeen ζ .

Vastekerroin

Resonanssimittausten ja laskelmien jälkeen on mahdollista määrittää muottisysteemin vaste käyrästä avulla (kuvat 4 ja 5). Käyrästä tarvitsee lähtötiedoksi arvot f/f_n (täryelementin taajuus ja vaimentamaton resonanssitaajuus) sekä vaimennuskertoimen ζ , joiden perusteella saadaan käyrältä värähtelevän systeemin vaste $x/(F_0/k)$. Tämän vasteen perusteella voidaan sitten ratkaista kaavassa olevien tekijöiden (täryvoima, liike, vaimennus) eri kombinaatioita. Käyrästä pätee vain systeemeille, joilla on 1 vapausaste ja vaikuttava voima F_0 on täryelementti. Kuvan 4 käyrä pätee tapauksessa, jossa täryelementin voima on vakio. Kuvan 5 pätee tapauksessa, jossa täryelementti on säädettävä (säädettävä taajuus) ja tällöin elementin voima kasvaa suhteessa taajuuden neliöön. Seuraavissa esimerkeissä on systeemin ratkaisu tehty vakiotajuudella.

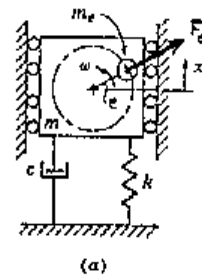
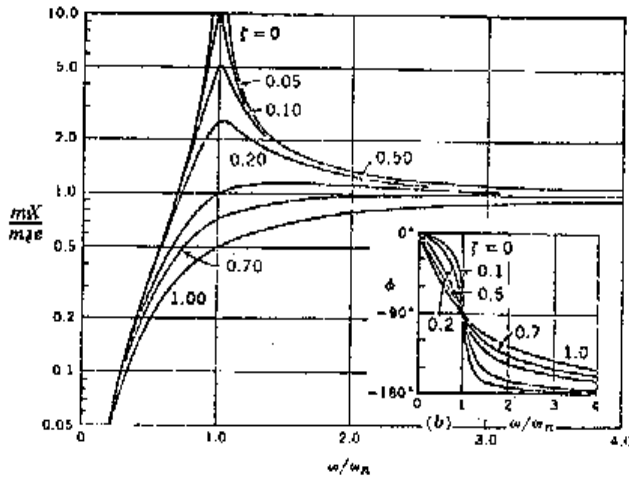


$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{m \cdot k}} = \frac{c}{c_c}$$

$$\frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n}$$

$\frac{\omega}{\omega_n}$ = $\frac{\text{vibratorfrekvens}}{\text{resonansfrekvens}}$

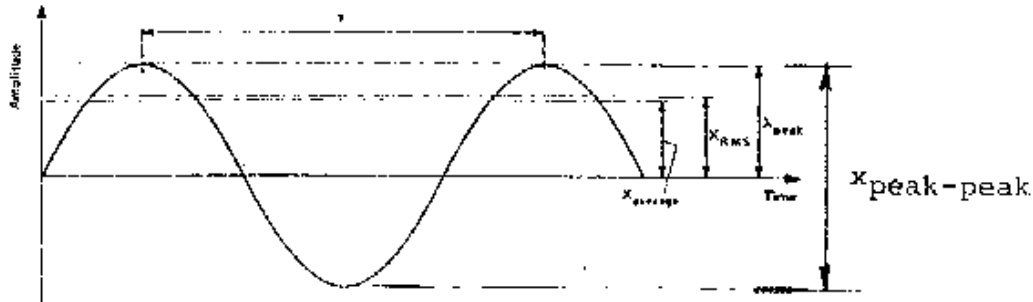
Kuva 4. Käyrä vastekertoimen ($x/(F_0/k)$) määrittämiseen systeemille, jossa tärä-elementin voima on vakio $/1/$.



Kuva 5. Käyrä vastekertoimen ($m \cdot X/m_0 e$) määrittämiseen systeemille, jossa tärä-elementin taajuus on säädettävä ja voima kasvaa suhteessa taajuuden neliöön $/1/$.

RMS-, peak- ja peak-peak arvot

Värähtelyn mittausarvot voidaan esittää seuraavissa muodoissa: x_{peak} , $x_{\text{peak-peak}}$ ($= 2 * x_{\text{peak}}$) ja x_{RMS} . Kuvassa 6 on esitetty harmonisen värähtelyn signaalista eri muodoissa.



Example of a harmonic vibration signal with indication of the peak, the RMS and the average absolute value

Even though this quantity takes into account the time history of the vibration over one period (T) it has been found to be of limited practical interest. A much more useful descriptive quantity which also takes the time history into account, is the RMS (root mean square) value (Fig.2.2):

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

The major reason for the importance of the RMS-value as a descriptive quantity is its direct relationship to the energy content of the vibrations.

For a *pure harmonic motion* the relationship between the various values is:

$$x_{\text{RMS}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} x_{\text{Average}} = \frac{1}{\sqrt{2}} x_{\text{peak}} \approx 0,71 x_{\text{peak}}$$

Kuva 6. Harmonisen värähtelyn käyrän signaalista esitetyt arvot /1/.

Muottityyppien vaikutus tärytyksen valintaan

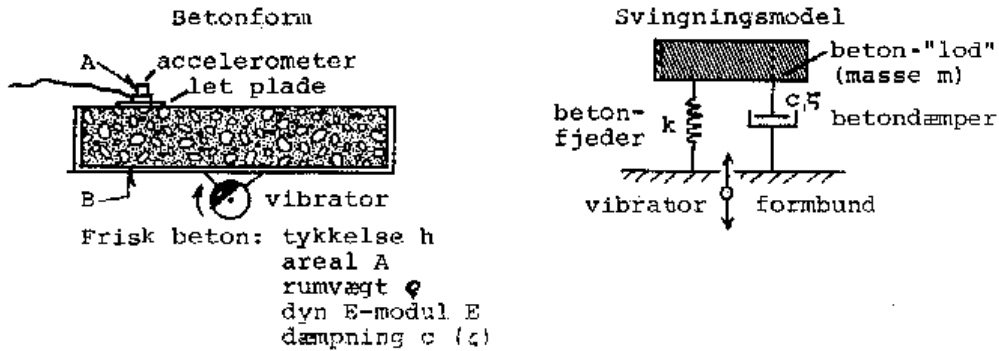
Tutkimuksessa todettiin /1/, että suurilla vaakasuorilla muoteilla, kuten pöytä- ja palkkimuoteilla, on perinteisesti täryelementit muotin alla. Tässä on tarkoituksena, että koko muotti tärisee samalla taajuudella synkronisesti. Tätä ideaa voi soveltaa pienemmille ja suuremmille kappaleille riippuen värähtelyteknisistä ominaisuuksista (muotin jäykkyys, muotin resonanssiominaisuudet, värähtelytaajuus yms.). Mikäli ominaisuudet ovat kohdallaan, onnistuu tärytys hyvin ja kuuluu jatkuva tasainen ääni. Mikäli tärytys ei onnistu, kuuluu vaihtelevia interferenssiääniä. Tietysti silloinkin tiivistys tapahtuu, mutta kestää kauemmin ja on olemassa riski, että valupinnalle tulee värähtelyalueita, joilla pinnan tiivistys on epäonnistunut. On myös olemassa riski joidenkin osien "ylitärytykseen".

Kun pystysuorilla muoteilla käytetään korkeataajuisempaa tärtytystä, (esim. patteri- tai pysty seinämuotti) ei yllä olevan synkronisen tärtytyksen toteamismenetelmä ole pätevä. Pystysuoran muotin värähtelytila voitaisiin periaatteessa analysoida diffuusissa äänikentässä, tällöin ratkaisun perusteet löytyvät ääniopin puolelta. Tässä /1/ tutkimuksessa ei perehdytty siihen.

Molemmat edellä olevat tärtytystyypit toimivat siten, että betonin oma hitaus (massa, inertia) luo lopulta tärjelementin voimasta tiivistävän vaikutuksen.

Dynaaminen malli tuorelle betonille

Tuore betonimassa voidaan mallintaa painoksi, joka on kiinnitetty vaimennettuun massattomaan jouseen. Kuvassa on esitetty mallin periaatekuva.



Kuva 7. Periaatekuva tuoreen betonin dynaamisesta mallista (oikea kuva) sekä sen määrittämiseen tarvittavista yksiköistä ja mitoista (vasen kuva)/1/. Kuvassa olevat termit on selitetty kaavassa 14 .. 16.

Jousivakio (jäykkyys)

$$k = \frac{E \cdot A}{h} \quad (14)$$

h=betonin paksuus

A=betonin pinta-ala

E=betonin dynaaminen kimmomoduuli

Vaimennus:

$$C, \text{ jonka sijasta voidaan käyttää } \zeta = \frac{C}{C_c} = \frac{C}{2\sqrt{k \cdot m}} \quad (15)$$

Massa:

$$m = \frac{1}{3} * A * h * \rho \quad (16)$$

Resonanssitaajuus:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (Hz)} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (kierr /min)} \quad (17)$$

Yllä oleva resonanssitaajuus pitää paikkansa vaimentamattomalle systeemille. Vaimennetulle systeemille resonanssitaajuus on aina pienempi (kuva 3) kuin vaimentamattomalle systeemille. Se voidaan siis laskea, mikäli vaimennus tiedetään, usein kuitenkin ei tiedetä. Huomattavaa kuitenkin on, että vaimennuksen merkitys resonanssitaajuuteen on melko rajoitettu. Esimerkiksi erittäin voimakas vaimennus ($\zeta = 0,5$) laskee resonanssitaajuuden vain 86 %:iin vaimentamattoman systeemin resonanssitaajuudesta. Siis täysin tuntemattoman vaimennuksen tapauksessa on suositeltavaa käyttää vaimentamattoman värähtelyn resonanssitaajuutta.

Kun systeemin parametrit ovat keskenään oikeat (täryn taajuus, betonin konsistenssi ja betonikerroksen paksuus), joutuu betonikerros ns. seisovaan aaltoon. Ilmiölle on tunnusomaista, että betonin pinta värähtelee voimakkaammin (noin 2 - 4 kertaa) kuin muotin pohja.

Dynaamisen kimmomoduulin määrittäminen resonanssikokeiden avulla

Seuraavassa esitetään esimerkki, jossa on määritetty tietylle betonilaadulle dynaaminen kimmomoduuli. Kokeessa käytetään normaalia tuoretta betonia, joka laitetaan avoimeen muottiin (kuva 7). Nyt voidaan sovittaa betonikerroksen paksuus (h) ja /tai täryelementin taajuus (f) kunnes saavutetaan betonikerroksen resonanssi ja edelleen etsitään tämän maksimi. Tämän jälkeen voidaan laskea dynaaminen kimmomoduuli kaavojen 14...17 avulla.

Huomattavaa on, että tämä metodi on yksinkertaistettu eikä ota huomioon betonikerroksen paksuuden vaikutusta vaimennukseen. Tästä aiheutuu pieni systemaattinen virhe dynaamiseen kimmomoduuliin. Arvot ovat kuitenkin riittävän tarkkoja teknisten laskelmien tekemiseen varsinkin, kun laskelmaa käytetään samankaltaisessa tiivistyssysteemissä ja lopulta hienosäätö lopullisella tuotteella tehdään koekallisesti.

Esimerkkilaskelma: dynaamisen kimmomoduulin määrittäminen

Betoni (tiheys $2\,350\text{ kg/m}^3$), jonka painuma on 6 cm ja V_{bs} on 4 s on resonanssissa, kun betonin paksuun on 270 mm ja täryelementin kierrosluku $2\,880\text{ kierr / min}$. Oletetaan systeemin olevan vaimentamaton.

Laskettava

- Mikä on testatun betonin dynaaminen kimmomoduuli ja
- vastaavan 200 mm paksun betonikerroksen jousivakio? Vaimennusta ei oteta tässä huomioon.

Ratkaisu:

Seuraavassa ratkaisussa on käytetty kaavoja 14...17

Käsitellään laskennallista alaa 1 m^2

- Betonin ala A : 1 m^2 . Moottorin taajuus $= 2\,880 / 60 = 48\text{ Hz}$.

Betonin ekvivalentti massa: $m = 1/3 * \rho * A * h = 1/3 * 2350 * 1 * 0,27 = 211,5\text{ kg}$

Edellä käytetty ekvivalentti massa on siis kokeissa /1/ todettu oikeaksi arvoksi betonille.

$$k = m * (2\pi f)^2 = 211,5 (2 * \pi * 48)^2 = 19,24 * 10^6\text{ N / m}$$

$$E = k * \frac{h}{A} = 19,24 * 10^6 * \frac{0,27}{1,0} = 5,2 * 10^6\text{ N / m}^2$$

$E \approx 5,0\text{ MPa}$ (tyypillinen suuruusluokka, esitetään taulukossa 1)

- 200 mm betonipeite $h = 0,20\text{ m}$

$E =$ edellä laskettu $5,0\text{ MPa}$

$$k = \frac{E * A}{h} = \frac{5,0 * 10^6}{0,20} = 25,0 * 10^6\text{ N / m}$$
 yhtä m^2 kohti

Eri betonilaatujen dynaamisia kimmomoduuleja

Tutkimuksessa on määritetty eri betonilaatujen dynaamisia ominaisuuksia. Dynaaminen kimmomoduuli on laskettu tässä mallin ja ominaisvärähtelyn avulla. Ominaisvärähtely on mitattu kiihtyvyyssanturilla. Mitatut tuoreen betonin dynaamiset kimmomoduulit olivat taulukon 1 mukaisia. Taulukosta voidaan havaita, että betonin dynaaminen kimmomoduuli vaihtelee betoneittain jopa kymmenkertaisesti olematta kuitenkaan notkeuden funktio. Tällä voitaneen perustella kokeellisen kimmomoduulin määrittämisen tarve vähänkin erikoisemmissä tapauksissa.

Taulukko 1. Tuoreen betonin dynaamisia ominaisuuksia lähteen /1/ mukaan.

Betonityyppi	Työstettävyys-aika (sVB)	Tyypillinen paksuus (mm)	Dynaaminen kimmomoduuli (MN/m ²)	Taajuus (Hz)	Kiihtyvyys (m/s ²)
Normaali notkea betoni			5 (1)		
Raudoitettu elementti	5	100	4 - 14	48	50
Maakostea betoni, erikoiselementti	65	200	2,5 - 4,5	50	50
Maakostea betoni, ontelolaatta	> 200	220	20 - 35	48	> 150
Sementtilaasti		60 - 80	1,6	340	400

1) suurusluokka , teoreettisesti laskettu

Muotti ja täryelementin kiinnitys

Tutkimuksen /1/ mukaan täryn kiinnittymisellä muottiin on erittäin suuri merkitys. Tutkimuksessa päädyttiin seuraaviin pääsääntöihin:

1. Täryelementin pitää vaikuttaa kohtisuoraan muotin pintaa vasten.
2. Täryelementin keskipakovoiman tulee vaikuttaa siihen suuntaan, johon muotin jäykkyys on suurin.

Mikäli käytetään useampia täryttimiä, joilla on sama taajuus, on synkronisoinnin varmistamiseksi kiinnitettävä huomiota seuraaviin asioihin:

1. Pitää erottaa pyörivät ja yksisuuntaiset täryelementit toisistaan. Joidenkin mielestä yhteen suuntaan toimivat elementit ovat parhaita synkronisoitavaksi ja lukumäärän tulisi olla suurempi kuin kaksi. Tällaisella systeemillä voi täryttää suuria vaakasuoria muotteja. Pyörivillä täryelementeillä pyörimissuunta on erityisen tärkeä. Jos halutaan varmistaa synkronisointi, olisi käytettävä tasan kahta täryelementtiä, joiden pyörimissuunnat ovat vastakkaiset. Jos käytetään useampaa kuin 2 kpl täryjä on vaikutus "tuntematon". Joka tapauksessa elementtien pyörimisakselien on oltava yhdensuuntaiset.

2. Taajuus on tärkeä, sillä synkronisointiefekti suosii matalia taajuuksia, jolloin amplitudit ovat suuria. Hyvin synkronisoituva järjestelmä on siksi taajuudeltaan 25...100 Hz (1 500...6 000 kierr/min), kuitenkin siten, että lopullinen vaikutus on viime kädessä riippuvainen kiinnityksistä.
3. Täryelementtien asettelu ja kiinnitys suhteessa muottiin sekä suhteessa toisiinsa on tärkeää. Täysin irralliset tai joustavat kiinnitykset samoin kuin täryelementtien keskinäinen värähtely vaikuttavat oleellisesti synkronisointiin.
4. Muottisysteemin ominaisuudet kuten jäykkyys, painojakauma, joustot yms. ovat merkityksellisiä, mutta on vaikea antaa yksinkertaisia periaatteita muottisysteemin ominaisuuksille.

Resonanssivahvistuksen käyttäminen tärytyksessä

Mikäli halutaan saada aikaan mahdollisimman hyvä tärytys, on tietyssä tuotannossa mahdollista käyttää ns. resonanssivahvistusta. Tämä tarkoittaa sitä, että täry ja muotin resonanssi vahvistavat toisiaan. Koska resonanssin etsiminen ja ylläpitäminen on monimutkaista, asettaa resonanssivahvistettu tärytys tiettyjä edellytyksiä laitteistolle:

1. Standardituote eli sama betoni ja samat dimensiot.
2. Mahdollisuus muuttaa täryn resonanssia on hyödyllistä, mutta ei välttämätöntä. Se antaa enemmän säätömahdollisuuksia ja optimointi on helpompaa.
3. Resonanssitärytys on erikoisuus. Voi olla vaikeaa saavuttaa riittävän tehokasta täryntä normaaliilla tekniikalla. Esimerkkinä mainitaan:
 - a) Suuret painavat muotit, joiden täryttämiseen tehokkaasti tarvitaan useita täryelementtejä ja tästä seuraa edellä olevissa kappaleissa käsiteltyjä synkronointiongelmia.
 - b) Tuotanto, jossa käytetään maakostea betonia, joka taas tarvitsee erittäin tehokkaan tärytyksen aina.

Kun muottisysteemi ajetaan resonanssiin, saavutetaan voimakkaampi tärytys (amplitudi, kiihtyvyys) kuin perinteisellä täryelementtien käytöllä. Ilmiö riippuu useista muuttujista ja kaikkein eniten taajuussuhteesta f/f_n sekä vaimennuksesta. Seuraavassa esimerkkilaskelmassa analysoidaan tyypillinen systeemi, jossa avonainen pöytämuotti on kumivaimentimilla. Laskelmissa otetaan huomioon vaste, joka on määritetty kuvan 4 mukaisen käyrästä avulla. Muottisysteemin resonanssitaajuutta säädellään kumivaimentimia muuttamalla.

Esimerkkilaskelma: resonanssivahvistuksen käyttäminen tärytyksessä

Esimerkkilaskelmassa kehitettiin elementin tärytystä. Siinä lähtötilanteena oli:

- 2 700 kg painava elementti
(maakosteaa betonia)
- 2 500 kg painava muotti
- Muotti lepäsi neljällä neopreenikumivaimentimella
(Shore 70, mitat: 100 x 100 x 10 mm).
- Tärytykseen käytettiin 3 kpl 2 880 kierr/min (48 Hz) täryelementtejä.
(10 000 N / kpl).

Elementti ei täryttynyt kunnolla, ja ensin kokeiltiin vaimentimien määrän nostamista 6:een ja myöhemmin täryelementtien määrän nostamista 6:een, mutta tärytys ei parantunut merkittävästi.

Lähtötietojen perusteella voidaan valmistajien taulukoista tms. hakea SH 70 kumille dynaaminen kimmomoduuli 190 MN/m^2 10 mm paksulle vaimentimelle ja 83 MN/m^2 20 mm paksulle vaimentimelle joka on tässä esimerkissä toinen helposti saatava laatu. Päätetään valita systeemin vaimennukseksi $\zeta = 0,10$, joka on "varmalla puolella", sillä tyypillinen vaimennus tällaisille muoteille on $\zeta = 0,02 - 0,05$. Jotta maakosteaa betonia saisi tiivistymiseen tarvittavan kiihtyvyyden noin 35 m/s^2 , olisi 48 Hz taajuudella amplitudin oltava noin 0,4 mm.

Tämän jälkeen analysoitiin laskennallisesti jo kokeiltu muotti-tärykokonaisuus.

Tärytyksen analysointi perinteisellä tärytyksellä

3 kpl täryelementtiä $F_0 = 3 \times 10^4 \text{ N}$.

Kumivaimentimia (tässä määrä on siis nostettu 6:een), joiden koko 100 x 100 x 10 mm³/kpl, kumityyppi edellä käytetty SH 70

Vaimentimien yhteispinta-ala $A = 6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
 $k = E \times A/h = 190 \times 10^6 \times 6 \times 10^{-2} / 10 \times 10^{-3} = 11,4 \times 10^8 \text{ N/m}$

$$\text{Resonanssitaajuus } f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{(m_{\text{muotti}} + 1/3 m_{\text{betoni}})}} = 92,2 \text{ Hz}.$$

Tällöin $f/f_n = 48/92,2 = 0,52$.

Tällöin käyrästä saadaan jo edellä valitulla vaimennuksella $\zeta = 0,10$ (kuva 4) vastekertoimeksi $x/(F_0/k) = 1,5$.

Tästä ratkaistaan värähtelyamplitudi $x = 0,04 \text{ mm}$, kun tunnetaan $F_0 = 3 \times 10000 \text{ N}$ ja $k = 11,4 \times 10^8 \text{ N/m}$.

Tämä ei täytä 0,4 mm:n amplitudin vaatimusta. Mikäli tällä vaimennuksella haluttaisiin saavuttaa 0,4 mm:n amplitudi, olisi täryelementtejä oltava $3 \times 0,4/0,04 = 30$ kpl !

Siis perinteinen ratkaisu ei ole mielekäs, vaan on koetettava saada aikaan resonanssivahvistus.

Tärytyksen kokeilu resonanssivaimennuksella

Kuvan 4 käyrästä saadaan vaimennukselle $\zeta = 0,10$ seuraavia vastekertoimia: kun $f/f_n = 1,2$ niin vaste = 1,9 ja vastaavasti kun $f/f_n = 0,95$ niin vaste on 4,3. Tarkoitus on siis hakea vaimennus, jolla olemassa olevilla täryillä saataisiin resonanssivahvistus. Taulukossa 2 on esitetty Kuvan 4 käyrästä haettuja arvoja.

Taulukko 2. Kuvan 4 käyrästä valittuja arvoja.

	Käyrästä arvot kun vaimennus $\zeta = 0,10$	
f/f_n	1,2	0,95
x/ F₀/k	1,9	4,3

Tärytyksen kokeilu arvoilla $f/f_n = 1,2$ ja $x = 0,4$ mm.

Koska $f = 48$ Hz $\Rightarrow f_n = 48/1,2 = 40$ Hz.

Sijoitetaan f_n , m ja m_s (tässä betoni on jousi ja 1/3 massasta) kaavaan 13.

Tästä saadaan ratkaistua $k = 2,15 \times 10^8$ N/m².

Koska vaste $x/ F_0/k = 1,9$, tästä saadaan ratkaistua sijoituksilla tarvittavaksi arvoksi $F_0 = 4,5 \times 10^4$ N.

Tämä tarkoittaisi 4...5 täryelementtiä/muotti.

Tärytyksen kokeilu arvoilla $f/f_n = 0,95$ ja $x = 0,4$ mm.

Vastaavasti ratkaistaan k ja sitten F_0

$k = 3,44 \times 10^8$ N/m ja $F_0 = 3,2 \times 10^4$ N.

Tämä tarkoittaa vastaavasti kolmen täryelementin likimain riittävän. Tämä on siis valittu vaimennus, koska käytössä on kolme täryelementtiä.

Kumivaimentimien mitoitus valitulle vaimennukselle

Koska nyt on teoriassa ratkaistu riittävä vaimennus (valuilla oletuksilla) resonanssivahvistuksen luomiseen, on ratkaistava miten tällainen vaimennus saadaan toteutettua.

Tarvitaan siis edellä laskettu vaimennus $k = 3,44 \times 10^8$ N/m = EA/h

Esimerkiksi neljällä kappaleella 20 mm:n paksulla vaimentimella edellä käytettyä kumimateriaalia kooltaan 140 x 140 mm vaimennus on seuraava :

$k = 83 \times 10^6 \times 4 \times 140^2 \times 10^{-6} / 20 \times 10^{-3} = 3,25 \times 10^8$ N/m.

Kokeilu

Laskelmilla aikaansaatu täryelementti-vaimennin-yhdistelmää kokeiltiin. Pienten säätöjen jälkeen (vaimentimien leikkaus pienemmäksi) päädyttiin 4 vaimentimeen joiden koko oli 110 x 110 mm ja paksuus valittu 20 mm näiden vaimentimien $k = 2.01 \times 10^8 \text{ N/m}$. Tästä voidaan laskea $f/f_n = 48/38,7 = 1,24$ ja määrittää käyrästä vääntöasteeksi 2,0. Mittauksissa saatiin määritettyä kiihtyvyydeksi 25 m/s^2 , joka vastaa amplitudia 0,39 mm.

Voitiin siis todeta, että mitoitus onnistui. Koska täryelementtejä oli kolme, tilanne olisi voinut olla periaatteessa hallitsematon.

3.1.2 Korkealujuusbetonin valmistaminen paineen avulla

Tutkimuksessa [2] pyrittiin valmistamaan nopeasti hyvää korkealujuusbetonia kohdistamalla betoniin suuri, noin 125 Mpa:n paine. Tutkimuksessa viitatuissa esikokeissa oli "sementti"-lieriöille, halkaisijaltaan 1 cm, saatu jopa 500 Mpa:n lujuuksia. "Sementtifieriöillä" siis tarkoitettiin lieriöitä ilman varsinaista runkoainetta. Tässä kuvatussa koesarjassa kuitenkin valmistettiin suuria, 30 cm:n kuutiota. Koesarjan tärkein tulos oli, että jopa näin suuria kappaleita oli valmistettavissa ko. menetelmällä.

Kokeissa käytetyt betonit olivat portlandsementtibetonia, jonka työstettävyyden on huono (0-slump). Betoni ei ollut mitenkään optimoitu korkealujuusbetoniksi, vaan "kuiva" olomuoto valittiin puristuksen takia. Sekoituksen jälkeen betoni siirrettiin erikoisteräsmuottiin, tärytettiin ja siirrettiin puristuskoneeseen. Koneessa voima nostettiin noin viiden minuutin aikana maksimiin (noin 11 MN), jossa se pidettiin noin yhden minuutin ajan ja tämän jälkeen laskettiin kuormitus pois mahdollisimman nopeasti.

Tutkimuksen yhteenvedossa todetaan seuraavaa :

1. Tuotetut kappaleet ovat sileitä, ilman halkeamia ja erittäin mittatarkkoja.
2. Vaikka betonin suhteitus ei ollut optimoitu, saavutettiin tällä menetelmällä 60 MPa:n 1 vuorokauden lujuus.
3. Betonit saavuttivat yli 90 % 90 vuorokauden lujuudesta joko yhdessä vuorokaudessa tai nopeammin.
4. Portlandsementin korvaaminen lentotuhkalla (30 %) ei vaikuttanut (laskenut) koekappaleiden lujuuksia.

Tutkimuksessa käytetyn betonin suhteitus oli 1 : 1,78 : 0,3

Jos jo tällaisella kokeella saavutettiin lujuuksia ja mittatarkkuutta, mikä olisikaan lopputulos, jos koko betoni suhteitettaisiin optimoimalla runkoaineen pakkautuminen kokonaisuudessaan. Tutkimuksessa käytetty betoni oli itse asiassa erittäin suuren geelimäärän sisältävää betonia, jossa suuri osa sementistä ei ole hydratoitunut. Tämä liian suuri sementtimäärä voitaisiin korvata hallitusti hienoaineella ja koko suhteitus tehdä kokeellisesti kestäväksi tuollaista tuotantotapaa ilman veden erottamista.

3.1.3 Tärypalkin käytöstä

Tärypalkin käyttöä työmaalla käytännönläheisesti käsittelevässä artikkelissa /3/ todetaan tärypalkin säästävän yleensä työvoimakustannuksia.

Käytössä on kuitenkin otettava huomioon rajoitukset pinnalta päin tiivistettäessä. Mikäli koetetaan tiivistää liian paksua (yli 20 cm) laattaa ilman lisätiivistystä (sisäistä), saattaa betoni tiivistyä huonosti pohjaosalta. Toisaalta, jos tärypalkin elementtien taajuutta nostetaan, saattaa se johtaa pinnalla erottumiseen pohjaosan kuitenkin tiivistymättä.

Artikkelissa painotetaan betonireseptin (tehonotkistimet) optimoimista. Artikkelissa viitattujen tutkimusten perusteella normaalirunkoaineiset ja kevytrunkoaineiset betonit käyttäytyvät pinnalta tiivistettäessä (ylitiivistys) eri tavalla.

Vaikka artikkeli on lehtityyliin käytännön ratkaisuja antava, on siitä tehtävissä muunkinlaisia johtopäätöksiä. Miksi erilainen runkoaine, erilainen tehonotkistus ja tärypalkin taajuus vaikuttavat tärytyksen onnistumiseen? Tärypalkin alla oleva betoni omaa tietyn dynaamisen kimmomoduulin kuten tässä julkaisussa (luku 3.1.1) on esitetty, vaikka sitä ei tässä artikkelissa ole tutkittukaan. Samat lainalaisuudet saattavat löytyä tärypalkkitiivistyksen ja betonireseptin välillä kuin muotilla tehtävässä resonanssivahvistuksessa. Mikäli näin olisi, pitäisi olla myös laskennallisesti mahdollista hallita betonilaadun, täryn ja tärytyspaksuuden välistä suhdetta.

3.1.4 Tärysauvan aiheuttamat kiihtyvyyden muotissa

Tutkimuksessa /4/ selvitettiin muotin kiihtyvyyttä ja painetta, kun käytettiin tiivistykseen muunneltavataajuuksista tärysauvaa. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, onko vanerimuotin suurin kuormitus staattinen paine vai värähtelyn aiheuttama dynaaminen paine.

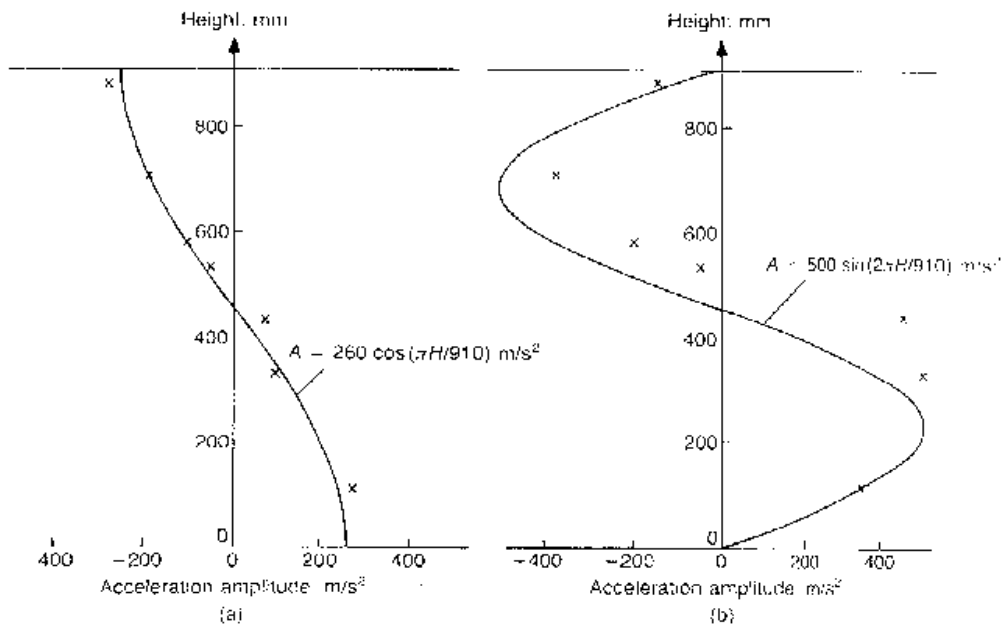
Tutkimuksessa tehtiin 950 mm korkea (pohja 200 x 450 mm) muotti, johon asennettiin paine- ja kiihtyvyyssanturit. Muotin levyt olivat 17 mm:n vaneria. Muotin levyt oli tuettu perinteisesti puutavaralla. Paine ja kiihtyvyyssanturit asennettiin koesarjassa eri korkeuksille 450 mm x 950 mm vanerin keskilinjaan siten, että saatiin lukemia muotin eri korkeuksilta.

Betoni oli normaalibetonia (Runkoaine: Sementti: Vesi = 6 : 1 : 0,6) johon lisättiin sokeria, koska ei haluttu jäykistymisen sekoittavan koetuloksia. Betonin valun jälkeen tärysauva laskettiin muotin keskiakselille siten, että se oli noin muotin puolisyvydessä (500 mm) betonipinnan alla.

Mittausten perusteella sekä aikaisempien tutkimusten valossa tehtiin seuraavia huomioita:

1. Jo edeltävissä tutkimuksissa oli todettu, että suurin staattinen paine muottiin kohdistuu itse muottiin kaatamisen jälkeen tiivistysvaiheessa.
2. Tässä tutkimuksessa paineanturin oma paino vaikutti painelukemiin tiivistettäessä niin oleellisesti, että painatulokset todettiin hyödyttömiksi ja että jatkossa olisi käytettävä erittäin pienimassaista paineanturia.

3. Kiihtyvyyssmittauksilla päädyttiin samankaltaiseen tulokseen kuin alkuoletus eli dynaamisen paineen huiput ja niitä vastaavat muodonmuutokset ovat samaa suuruusluokkaa kuin muotille suunniteltu suurin staattinen paine ja sitä vastaavat muodonmuutokset.
4. Muotin sisään syntyvän seisovan aallon todettiin olevan tärysauvan taajuuden mukaan muuttuva. Käytettäessä tärysauvassa 94 Hz:n taajuutta mitattiin muottilevyn keskilinjalta maksimissaan noin 250 m/s^2 kiihtyvyyksiä, kun taas 114 Hz:n taajuudella mitattiin jopa 500 m/s^2 .
5. Merkille pantavaa mitatuista kiihtyvyyksistä oli se, että kiihtyvyydet muottipinnalla olivat tärysauvan syvyydellä pienimmillään eli siinä oli seisovan aallon "nollakohta" ja suurimmat kiihtyvyydet esimerkiksi pinnan ja pohjan tasolla (94 Hz:n taajuudella).



Kuva 8. Mitatut kiihtyvyyssprofiilit muottivanerin keskilinjalla a) 94 Hz tärysauvalla ja b) 114 Hz:n tärysauvalla. Kuvassa on lisäksi esitetty matemaattiset kaavat muottilevyyyn muodostuvan kiihtyvyyden laskemiseen [4].

Mittaustuloksista voitaneen varmuudella todeta, että tärysauvan toiminta on monimuotoisempaa ja siten sen vaikutus on laajempi kuin yleisesti otaksutaan. Tärysauvalla ei siis perinteisen ajattelun mukaan tarvitse päästä tiivistämään joka paikkaa (olettaen että sauvan läheisyys on tiivistystä), vaan tiivistymistä tapahtuu itse asiassa siellä, missä sauva ei ole. Olisi vain selvítettävä, kuinka laaja ilmiö tutkimuksessa havaittu seisova aalto on, ja voisiko sen muodostumista hallita.

3.2 MUOVITEKNIikka

Monipuolinen tiivistys ja brikettien valmistuskone on esitelty lyhyesti artikkelissa /5/. Koneen perustarkoitus on tiivistää ja valmistaa briketeiksi hienojakoisia, esimerkiksi sivutuotemateriaaleja. Tämä laite on suunniteltu lähinnä muovityyppisten aineiden käsittelyyn. Raakamateriaali tuodaan joko ruuvilla tai painovoimaisesti rullien (tela) väliin.

Alemmassa rullassa on valmistettavan briketin muotoisia taskuja, joiden muotoiseksi lopullinen tuote syntyy. Työpaine saadaan aikaan hydraulisesti siirrettävällä ylempällä rullalla. Muuttujia tuotannossa ovat lähinnä syöttöpaine ja muovausaine. Lisäksi voidaan käyttää muun muassa lämpöä tai ulkopuolista sideainetta halutun tuotteen aikaansaamiseen.

Vaikka tämä tiivistystapa on tarkoitettu lähinnä muovityyppisten materiaalien käsittelyyn, saattaisi siinä olla ideoita myös betonituotteiden valmistukseen. Tämänkaltaisella tekniikalla voisi tehdä vakiotuotetta, joka saa sekä muodon että tiivistyksen samalla laitteella. Kahdella hydraulisesti kontrolloidulla rullalla saataisiin aikaan tuotteen muoto ja syötöllä (ruuvi tai jokin muu) säädettäisiin prosessin paine. Tällöin saavutettaisiin tilanne, jossa tiivistystä ja ilmanpoistoa perinteisessä mielessä ei edes tarvittaisi, vaan massan painetta nostettaisiin prosessin edetessä.

3.3 ASFALTTITEKNIikka

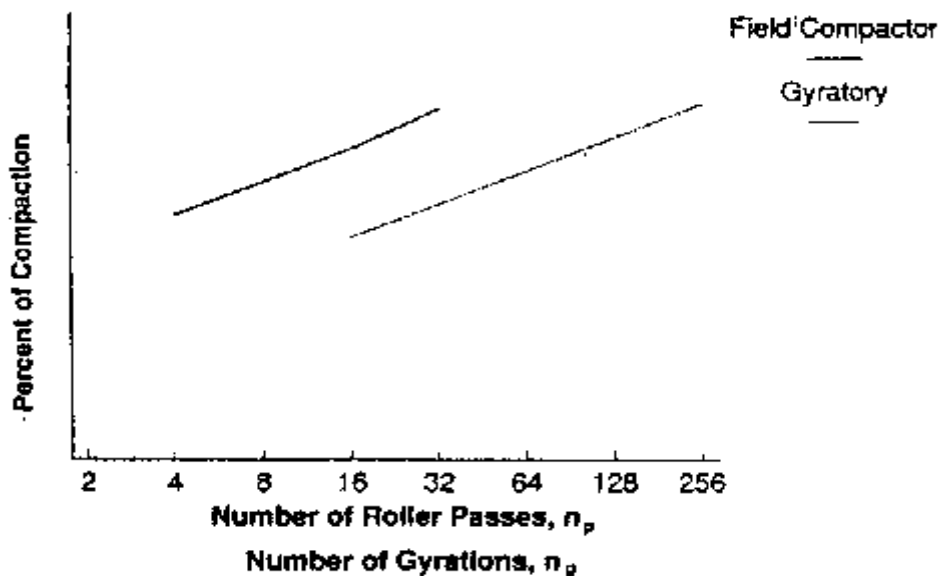
Amerikkalaisessa asfaltin suhteitus- ja työmaavalvontasysteemissä /6/ on testausmenetelmänä "Gyratory Compactor". Tämä laite tiivistää sekä puristusvoimalla (0,6 MPa) että epäkeskisyyden (1 aste) ja pyörivän liikkeen aiheuttamalla leikkauksvoimalla. Laitteen pyörimisnopeus on kuusi kierrosta minuutissa. Lopullinen kappalekoko on halkaisijaltaan 160 mm oleva lieriö, jonka korkeus on noin 150 mm. Testissä käytettävä lämpötila on 160 °C. Testin aikana mitataan seuraavat asiat:

1. Koekappaleen korkeuden muutos, josta lasketaan huokoisuus %, kierrosten lukumäärän funktiona.
2. Sivuttaisvoima, joka tarvitaan epäkeskisyyden pysymiseen 1 asteessa.
3. Testi lopetetaan automaattisesti 200 kierroksen kohdalla.

Alun perin tämä proseduuri on kehitetty Ranskassa (LCPC), jossa käyttötarkoitus oli bitumisten aineiden tiivistymisominaisuuksien tutkimus. Tässä tutkimuksessa menetelmästä kuitenkin käytettiin nimeä SHRP Gyratory Compactor.

Gyratory compactoria käytetään massan kehityksessä, mutta lopullinen käyttö tässä julkaisussa on kuitenkin massan suunnittelu liikennemäärän funktiona suun käyttöäälle. Kuvassa 9 on esitetty testilaitteen kierrosten (gyrations) ja tiivistysjyrän yliajokertojen (roller passes) suhde tiivistysprosenttiin. Kuvasta voitaneen helposti päätellä, että kahdella näin samanlaisella käyrällä on helposti löydettävissä matemaattinen yhteys eli laboratoriossa voidaan ennakoida tarkkaan käytännön tiivistystyö.

Laite on periaatteessa vastaava kuin suomalainen, betoniteknikassa käytetty IC-tester. IC-testeriä käytetään tällä hetkellä maakostean betonin tiivistymisen koelliseen optimointiin.



Kuva 9. Asfaltin tiivistyminen koelaitteen kierrosten ja jyrän yliajokierrosten funktiona /6/.

3.4 PULVERIMETALLITEKNIikka

Pulverimetallilla on useita erilaisia tiivistämistapoja. Tässä kirjallisuushaussa saatiin abstrakteja useista eri tekniikoista. Abstrakteja selatessa on nopeasti todettavissa, että kyseisten tekniikoiden tuotantomäärät (pienet kappaleet, pienet tuotantovolyymit) ja tarvittavat resurssit (erikoiset koneet) ovat eri suuruusluokkaa kuin betonitekniikassa on lähitulevaisuudessa oletettavissa. Lisäksi tekniikkaan liittyy usein korkeita, noin 1 000 °C:n lämpötiloja.

Pulverimetalli ja tulenkestävien materiaalien tiivistämisestä täryttämällä hausta tehtiin NTIS-julkaisu /7/. Tarvittaessa viitteet löytyvät uudelleen. Julkaisussa on yksissä kansissa 188 abstraktia.

Seuraavassa pari esimerkkiä, joista saa käsityksen pulverimetallien tiivistystekniikan suureista:

1. Puristustiivistystä liikuttamalla muottia (kiertäen) edestakaisin 8 - 200 mikrometriä taajuudella 3 - 300 Hz samalla kun puristusaine on 400 - 600 MPa.
2. Kuumapuristustiivistyksen aikana on kokeiltu matalataajuisten tärin 150 Hz ja korkeataajuisten tärin 20 000 Hz vaikutuksia lopputuotteeseen. Muotin läpimita on tässä tapauksessa 15 mm.

Vaikka juuri tällä hetkellä ei tunnu mielekkäältä lähteä hakemaan tiivistystekniikan ratkaisuja pulverimetallitekniikassa käytetyistä sovelluksista, on tekniikka lähempänä betonitekniikkaa kuin luulisi. Betonitekniikan erikoissovellukset (tällä hetkellä erikoislujat betonit) kehittyvät jatkuvasti, niissä on erittäin hienojakoisia partikkeleita ja on vain ajan kysymys, milloin tuottamiseen tarvitaan aivan uutta tekniikkaa, esimerkiksi korkeampia taajuuksia.

3.5 MAAN JA HIEKAN TIIVISTYSTEKNIikka

3.5.1 Hiekan tiivistäminen maastoajoneuvoilla

Hiekan tiivistäminen maastoajoneuvoilla /8/ oli aiheena tutkimuksessa, jossa tarkoitus oli matkia normaalin jyrän vaikutusta. Jotta ajoneuvoilla saatiin tarvittava syklinen tiivistysvaikutus, käytettiin auton hinaamista toisella autolla, jolloin tiivistäviä kuormia oli neljä peräkkäin.

Useiden kokeilujen jälkeen hyvä syklinen tiivistys saavutettiin, kun ensimmäinen ajoneuvo ajoi neliveto päällä ja veti toista ajoneuvoa kuten painoa. Lisäksi vedettävä ajoneuvo jarrutti tietyn suuruisella voimalla.

Tällaisella yhdistelmällä saavutettiin hiekan tiivistyksessä 30 cm:n syvyydellä tiivistysaste 92 % optimista ja 50 cm:n syvyydellä 95 % optimista. Tiivistysaste määritettiin 2, 3 ja 4 kerran yliajon jälkeen. Rajoittavana muuttujana todettiin 5 %:n pyörien luisto, jota suuremmalla luistolla tiivistymisvaikutus alkaa muuttua käänteiseksi.

Tämän tutkimuksen opetus lienee sen ratkaisun avoin perusrakenne. Normaalisti maa tiivistetään jyrällä lähinnä siten, että syklinen vaikutus tulee yhdestä täryttävästä viivakuormasta. Tässä taas viivakuormia oli useita ja syklisyys saavutettiin useiden kuormien keskinäisellä ajoituksella.

Periaatteessa tiivistämistapahtuman täryvaikutus voitaisiin betoniteknikassakin erottaa tai toisaalta toteuttaa usealla eri kuormituksella, jotka liikkuvat tiivistyskohteen suhteen. Betonituote tai sen tiivistyslaite voisi liikkua suurella (sopivalla) nopeudella siten, että tiivistyskohteeseen saavutettaisiin haluttu syklinen vaikutus. Tärytystä ei tällöin tarvittaisi ja melu vähenisi oleellisesti.

3.5.2 Murskatun kiviaineksen tiivistäminen

Murskatun kiviaineksen tiivistyvyyden kirjallisuustutkimuksessa /9/ pyrittiin selvittämään muuttujia, jotka vaikuttavat murskeen tiivistymiseen. Tutkittuja muuttujia olivat: kosteus, rakeisuuskäyrä, raemuoto, partikkelien lujuus, hienoaineksen plastisuus ja tiivistysmenetelmä. Tutkimuksessa päädyttiin seuraaviin päätelmiin:

1. Kosteus on erittäin tärkeä muuttuja haettaessa suurinta mahdollista tiheyttä tiivistettäessä. Toisaalta partikkelien uudelleen järjestäytyminen aiheuttaa läpäisevyyden pienenemisen. Kosteus myös pienentää mm. leikkauslujuutta ja kasvattaa pysyvää muodonmuutosta (tiivistetyssä kerroksessa).
2. Hyvin suhteitettu rakeisuuskäyrä mahdollistaa korkean tiheyden, leikkauslujuuden maksimin ja pienimmän pysyvän muodonmuutoksen. Optimaalinen hienoainemäärä tiivistyksen kannalta on se, jolla saavutetaan suurin tiheys. Kuitenkin tämä hienoainemäärä on suurempi kuin se, jolla saavutettaisiin leikkauslujuuden. Maksimi. Myös läpäisevyys pienenee ja pysyvä muodonmuutos kasvaa hienoainemäärän lisääntyessä.
3. Mitä suurempi on maksimiraekoko, sitä suurempi on leikkauslujuus. Kuitenkin yli 38 mm:n maksimiraekoko vaikeuttaa tiivistettävyyttä.

4. Karkeat ja kulmikkaat partikkelin muodot ovat vaikeampia tiivistää ja johtavat pienempään tiheyteen (tiivistetyssä kerroksessa), mutta toisaalta nämä materiaalit johtavat mm. korkeampaan leikkauslujuuteen.

Vaikka kyseessä on maanrakennukseen liittyvä tiivistäminen, on edellä olevissa päätelmissä useita kohtia, jotka ovat yleispäteviä myös betonitekniikassa. Myös optimoitaessa rakeisuuskäyrää betonin runkoaineeksi on huomattava, että tiheyden ja leikkauslujuuden maksimin optimit ovat periaatteessa erilaiset.

3.5.3 Hienon hiekan tiivistäminen sauvatäryttimellä

Hienon hiekan tiivistäminen kapean putkikaivannon pohjalle /10/ suoritettiin betonisauvatäryttimellä. Tutkimuksessa todettiin, että kapeissa kaivannoissa, joissa normaali tärytys (pinnalta) ei ole mahdollista ja pienet käsikäyttöiset täryt tulevat kalliiksi, tarvitaan muita menetelmiä.

Tutkimuksessa kaivanto täytettiin ja tiivistettiin tärysauvalla (200 Hz) käyttäen koheesiotonta hiekkaa ("Dune sand"). Hiekan alkuperäinen kosteuspuiteisuus oli 0,4...1,8 % ja se kasteltiin täytön jälkeen ennen tiivistystä. Hiekan raekoko oli noin 0,06...1 mm. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että tiivistettäessä 30 cm:n välein noin 35 sekunnin ajan voidaan jopa 1 m syvässä kaivannossa päästä 95 %:n tiivistysasteeseen.

Tässä lähteessä on ajatuksia betonitekniikkaan lähinnä käänteisesti. Betonitekniikasta tuttu sauvatärytin on otettu hallitusti käyttöön kohteessa, jossa yleensä on käytetty massiivista pinnalta tehtävää tärytystä kerroksittain. Tässä on lisäksi päästy korkeaan tiivistysasteeseen, jonka pitäisi nostaa sauvatäryttimen tehon arvostusta myös betonitekniikan puolella. Usein uusia ratkaisuja haettaessa halutaan ihan uusi laite, vaikka vanhassakin saattaisi olla potentiaalia.

LÄHDELUETTELO

1. Nielsen, J. K. & Halcken, O. V. Betonkomprimerings teknologi, Del 1, En analyse af betonelementproduktionens metodik og udviklingsmuligheder, Del 2, Betonkomprimering ved resonansvibrering Støjproblemer. Betonelement-Foreningen, 1977. 152 s.
2. Ledbetter, W. B., Relis, M. & Denson, R. Feasibility of Producing Large-Sized, High-Strength Motor & Concrete Cubes, Texas A and M Univ., College Station, Dept. of Civil Engineering, AFESC/ESL-TR-85-55, 1986, 38 s.
3. Suprenant, B. A. Concrete Construction, Addison, IL, U.S.A. Concrete Construction vol. 35, no 8, 1990, s. 698 - 702.
4. Murray, M. H. & Millar, G. Dynamic response of formwork to concrete vibration, Proc. Institution of Civil Engineers, Part 2, vol 91, Sept 1991, s. 603 - 607.
5. FS. Rapra Abstracts, Briquetting / Compacting Unit, Plastics Technology, vol 30, no 6, June 1984, s. 86.
6. Cominsky, R., Leahy, R. B. & Harrigan, E. T. Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning. University of Texas at Austin, 1994, 121 s.
7. Vibratory Compacting of Powder Metal and Refractory Materials, (Jan 79 - Present), PB96-857537. U.S. Department of commerce , National Technical Information Service, Springfield, VA, 1995, 69 s.
8. Shaaban, S. Compaction of Sand Using Ordinary Off-Road Vehicles, Military Technical College, 1984, s. 725 - 735.
9. Van der Merwe, C. J. The Compaction of Crushed Stone: A Literature Survey, National Inst. for Transport and Road Research Pretoria, 1984, 49 s.
10. Mirza, S. I. Compaction of dune sand backfill by concrete shaft vibrators, Canadian Geotechnical Journal, 1992, vol. 29, no 2, s. 315 - 321.