VERTROUWELIJK TOT EN MET 01/06/2020 - NIET KOPIEREN, VERDELEN OF PUBLIEK BEKEND MAKEN

Het gebruik van niet-destructieve testmethoden om het effect van cementering en sulfaataanval op kaoliniet klei te karakteriseren

Bert D'Hondt

Promotoren: prof. Adam Bezuijen, dr. Ramiro Verastegui Flores Begeleider: dr. ir. Gemmina Di Emidio

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in Civil Engineering

Vakgroep Civiele Techniek Voorzitter: prof. dr. ir. Peter Troch Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur Academiejaar 2013-2014



VERTROUWELIJK TOT EN MET 01/06/2020 - NIET KOPIEREN, VERDELEN OF PUBLIEK BEKEND MAKEN

Het gebruik van niet-destructieve testmethoden om het effect van cementering en sulfaataanval op kaoliniet klei te karakteriseren

Bert D'Hondt

Promotoren: prof. Adam Bezuijen, dr. Ramiro Verastegui Flores Begeleider: dr. ir. Gemmina Di Emidio

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in Civil Engineering

Vakgroep Civiele Techniek Voorzitter: prof. dr. ir. Peter Troch Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur Academiejaar 2013-2014



VERTROUWELIJK TOT EN MET 01/06/2020

BELANGRIJK

Deze masterproef bevat vertrouwelijke informatie en/of vertrouwelijke onderzoeksresultaten die toebehoren aan de Universiteit Gent of aan derden. Deze masterproef of enig onderdeel ervan mag op geen enkele wijze publiek gemaakt worden zonder de uitdrukkelijke schriftelijke voorafgaande toestemming vanwege de Universiteit Gent. Zo mag de masterproef onder geen voorwaarde door derden worden ingekeken of aan derden worden meegedeeld. Het nemen van kopieën of het op eender welke wijze dupliceren van de masterproef is verboden. Het niet respecteren van de vertrouwelijke aard van de masterproef kan onherstelbare schade veroorzaken aan de Universiteit Gent.

Voorwoord

Dit eindwerk kadert binnen de opleiding Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde. Als student burgerlijk ingenieur kom je tijdens je academische opleiding in contact met diverse en erg variërende onderwerpen. Het is dan ook niet evident om snel een keuze te maken betreffende het onderwerp van je thesis. Ik koos dit onderwerp omdat het facetten van dynamica en grondmechanisch onderzoek met elkaar combineert. Beide waren opleidingsonderdelen die met veel passie gegeven werden door de bevoegde professoren en die ik met veel interesse gevolgd heb.

Graag had ik volgende personen oprecht bedankt:

In de eerste plaats mijn promotoren dr. ir. Daniel Ramiro Verastegui Flores en dr. ir. Gemmina Di Emidio. Steeds stonden zij klaar om mijn vragen te beantwoorden en mijn opmerkingen te aanhoren. Verder werd ook geen moeite bespaard om mij de nodige documenten, contactgegevens, licenties of apparatuur te bezorgen.

Het technisch personeel van het labo geotechniek, dat zonder probleem defecten aan apparatuur herstelt en steeds aanwezig is om thesisstudenten toegang te verschaffen tot het labo.

Ir. Joachim Vanwalleghem, die zich vrijmaakte om de nodige testen uit te voeren met de LDV en steeds paraat was om de nodige uitleg, documenten en bestanden te verlenen.

De heer Rik Van Der Vaerent en mevrouw Isabelle Glorieux van de firma Holcim wegens het gratis leveren van diverse cementsoorten en bijhorende documentatie.

Ir. Kristine Vandenboer voor de hulp bij de Abaqus installatie.

Tot slot mijn ouders, die gedurende vele jaren niet alleen mijn studies bekostigd hebben maar er ook steeds waren voor mij.

Toelating tot bruikleen

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

Copyright notice

The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.

Het gebruik van niet-destructieve testmethoden om het effect van cementering en sulfaataanval op kaoliniet klei te karakteriseren

D'Hondt Bert

Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, Vakgroep Civiele Techniek Academiejaar 2013-2014

Overzicht

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master in de ingenieurswetenschappen: bouwkunde

Promotoren: prof. Adam Bezuijen, dr. Ramiro Verastegui Flores Begeleider: dr. ir. Gemmina Di Emidio Voorzitter: prof. dr. ir. Peter Troch

Samenvatting

In deze studie worden verschillende niet-destructieve testmethoden toegepast om de stijfheidsevolutie van cilindervormige klei-cement proefstukken te karakteriseren die al dan niet in contact gebracht worden met Na₂SO₄ concentraties. Centraal staat een variant van de impulse excitation of vibration test of kortweg impact test. Deze test is genormeerd sinds 1991 maar werd nog nauwelijks toegepast in grondmechanisch onderzoek. Bij de impact test wordt een impact belasting in een bepaalde richting uitgeoefend op het proefstuk. Het trillingsgedrag van dit proefstuk wordt opgemeten en verwerkt tot stijfheidskarakteristieken. De bekomen resultaten, zijnde E_0 en G_0 -moduli, worden vergeleken met een meer ingeburgerde techniek die gebruik maakt van bender elements en een meetmethode met een laser Doppler vibrometer. Eveneens wordt aan de hand van numeriek onderzoek in eerste instantie de correctheid van gehanteerde formules gecontroleerd en vervolgens de invloed van een variatie aan proefstukafmetingen bekeken. Er wordt geconcludeerd dat de impact test desondanks zijn eenvoud erg gelijkaardige resultaten oplevert in vergelijking met de andere toegepaste niet-destructieve testen. Weliswaar vertonen de proefstukken getest met behulp van een benchtop bender elements test hogere stijfheden, maar dit is te wijten aan de niet-verstoorde structuur van deze proefstukken. De correcte bepaling van de G₀-modulus met behulp van de impact test is wel sterk afhankelijk van de verhouding diameter over lengte van de proefstukken. Uit het geleverde numeriek onderzoek blijkt de Go-modulus exact berekend te worden bij een verhouding gelijk aan 0.54. Bij hogere, respectievelijk lagere verhoudingen wordt de G_0 -modulus overschat, respectievelijk onderschat. Uitgaande het numeriek onderzoek en gecontroleerd aan de hand van het experimentele onderzoek wordt een conversiefactor in functie van de verhouding diameter over lengte voorgesteld. Tot slot wordt een voordelig effect van vroege ettringiet vorming en een nadelig effect van vertraagde ettringiet vorming vastgesteld op de stijfheidskarakteristieken van de proefstukken. Deze effecten zijn sterk afhankelijk van de toegepaste cementsoort.

Trefwoorden: cement-kaoliniet, niet-destructieve testmethoden, maximale stijfheidsmoduli, sulfaataantasting

The Use of Nondestructive Test Methods to Characterize the Effect of Cement Treatment and Sulfate Attack on Kaolin Clay

Bert D'Hondt

Supervisor(s): A. Bezuijen, R.D. Verastegui Flores and G. Di Emidio

Abstract The reliability of the impact test in obtaining stiffness characteristics (E_0 and G_0) of cement treated kaolin cylinders is evaluated by comparing them with more commonly used nondestructive methods and modal analysis in finite element software. Additionally, the effect of early and delayed ettringite formation due to sodium sulfate attack is monitored. The impact test proofs to be a good and simple alternative in comparison with other tested methods. This on condition that the diameter over length ratio of the cylinders is equal to 0.54. A modification formula is proposed for other cases. Finally, the disadvantageous effects of sulfate attack are only observed in case of delayed ettringite formation with continuous availability of sulfate ions.

Keywords cement treated kaolin, nondestructive test methods, small-strain stiffness moduli, sodium sulfate attack

I. INTRODUCTION

A long established problem in civil engineering are soft, compressible soils. These type of soils are not suitable to function as a bearing layer under a foundation but also slope instabilities can occur. One possible solution to enhance the strength and stiffness of these soils is the deep mixing method. This method can be classified as a permanent soil improvement technique with the addition of cementing agents mixed in place. However, the durability of the improvement is questionable in presence of sulfates in the soil or groundwater. These sulfates tend to disturb the hydration reactions of the cement, which lead to a decreasing strength and stiffness. Although the deep mixing technique exists already for several decades, the research treating the interaction of binder with soil is still limited.

More and more, a shift from destructive test methods such as unconfined compression testing towards nondestructive testing is observed. Such nondestructive tests are less subjected to scatter due to a minimum need for test samples and focus globally on measuring the small-strain moduli G_0 and E_0 instead of the compressive strength. Frequently applied nondestructive tests for geotechnical research make use of bender elements [1][2][3] or the forced resonance method [4][5].

In this paper, a nondestructive technique was used as an alternative method to measure the stiffness characteristics of cement-treated clay cylinders. The technique makes use of an impact load and shows large similarities with the impulse excitation of vibration test, described in ASTM E 1876. Both

effects of cementation and sulfate attack are measured with this impact test during a test period of more than three months. These results are compared with other nondestructive tests, such as the bender elements test [6] and laser Doppler vibrometer (LDV) test [7]. Finally, the reliability of the impact test regarding varying cylinder dimensions is verified by means of modal analysis with finite element software.

II. BRIEF REVIEW OF APPLIED THEORY

The common practice in determining the stiffness characteristics when using nondestructive methods is to create stress waves in the tested samples. By using time domain or frequency domain methods, the velocity of shear or compressive stress waves is obtained. This velocity is used to calculate the small-strain shear modulus G_0 or small-strain Young's modulus E_0 [8].

$$G_0 = \rho C_s^2$$

$$E_0 = \rho C_l^2$$
(1)

With:

ρ=bulk density of the sample;

C_s=shear wave velocity;

C_l=compressive wave velocity.

A possible way to determine G_0 is by using bender elements. A bender element consists of a pair of piezoceramic plates bonded to a metal shim and to outer electrodes. Piezoceramics are materials that generate an electrical output when subjected to mechanical deformation or that bend when electrically excited. A pair of bender elements, located at opposite ends of a sample, is used for G_0 determination. One of the elements acts as a shear wave transmitter, and the other acts as the receiver. By measuring the travel time (t) of the shear wave through the sample, the shear wave velocity can be determined as

$$C_s = L/t \tag{2}$$

where L is the tip-to-tip distance between the benders. This is a so called time domain method. The impact test and LDV test are frequency domain methods. By analyzing the vibration of samples, the fundamental longitudinal natural frequency ($f_{1,lon}$) and the fundamental natural frequency in torsion ($f_{1,tor}$) can be obtained. The first one can be measured when a bar shaped sample is excited with a force along its axis, the second one when the sample is excited with a torque. Subsequently, the wave velocities can be calculated as [8]:

B. D'Hondt is with the Civil Engineering Department, Ghent University (UGent), Gent, Belgium. E-mail: bert.dhondt@ugent.com .

$$C_{s} = 2Lf_{1,tor}$$

$$C_{l} = 2Lf_{1,lon}$$
(3)

III. MATERIALS

A commercially processed Kaolin clay (Rotoclay HB[®], Goonvean, St. Austell, United Kingdom) was used in this investigation. The clay was available as a dry powder. The kaolin clay was mixed with blast-furnace slag cement (CEMIII/B 42.5 N LH/SR LA) that consists of 66% to 80% of blast-furnace slag.

Deionised water, produced using a water purification system, was used to prepare the samples.

To study the impact of sulfate attack on the stiffness of the kaolin-cement mix, three batches of specimens were prepared: one without sulfates as a reference, and others with Na_2SO_4 at concentrations of 15g/kg (g of sodium sulfate per kg of kaolin) and 30g/kg.

IV. METHODS AND PROCEDURES

A. Sample preparation

All prepared batches consist of 10% cement and 115% water (by weight relatively to the used amount of kaolin).

The kaolin and binder were mixed dry in a dough mixer for 1 minute. Next, the water was poured in the mixing bowl and the slurry was mixed for another 10 minutes. The mixing was paused one or two times to remove soil attached to the walls of the mixing bowl. For batches with sulfate concentrations, the water was in advance mixed homogeneously with the right amount of sulfates. The mix at this point showed a liquid consistency, and it was ready to be poured directly in the benchtop bender elements testing setup or to be used in the casting of cylindrical samples for impact and LDV testing.

These specimens were cast in stainless-steel cylindrical molds using a vibratory table to remove air bubbles. Thirteen molds have a diameter of 5cm and length of 10cm, two molds have a diameter of 3.8cm and length of 8.6cm and two molds have a diameter of 7cm and length of 13cm. The bottom and top ends of the molds were sealed with kitchen foil to prevent moisture loss. Next, the samples were allowed to cure inside the molds for 7 days in an air-conditioned room at 18°C. After that period, the specimens were trimmed with a spatula to flatten the top and bottom and were carefully extruded out of the molds. They were again stored in the air-conditioned room, submerged in a layer of deionised water and wrapped in foil. In total, three cylinders with a diameter of 5cm were fabricated with 15g/kg Na₂SO₄ and 14 specimen were fabricated without sulfates. Thereof, 10 cylinders with a diameter of 5cm, 2 cylinders with a diameter of 3.8cm and 2 cylinders with a diameter of 7cm.

Three benchtop bender elements testing setups were filled without vibrating in such way that the bender elements were fully submerged by slurry. Next, a top layer of deionised water and a foil were applied. One sample without sulfates, one with 15g/kg and one with $30g/kg Na_2SO_4$ were prepared.

To compare the effects of early ettringite formation (EEF) and delayed ettringite formation (DEF) [9], two cylindrical samples with diameter 5cm were submerged in a $25g/l Na_2SO_4$ solution after a curing period of approximately three months.

B. Impact test

Figure 1 shows the impact test setup for cement treated kaolin cylindrical specimens. An accelerometer is placed at one end surface to pick up the vibration of the specimen. A manual elastic impact is applied at the other end. To ensure free vibrations, the specimens are laid horizontally on a sponge pad. In order to produce a shear wave, both the direction of the impact as the orientation of the accelerometer are perpendicular to the axis of the cylinder. When this is reversed towards a parallel configuration, a compressive stress wave is generated and measured. The accelerometer is placed on a fixed height and the sponge pad and cylinder are placed on a jack that enables testing samples with varying dimensions.

The time domain accelerometer signal is recorded by a dynamic signal analyzer and transformed into the frequency domain by means of the fast Fourier transformation [10]. The corresponding first natural frequency is located at the peak in the frequency spectrum.

Due to the transverse excitation and vibration measurement (bending motion), the measured frequency is a transversal frequency instead of a frequency in torsion. Initially, it is assumed that both frequencies are equal to each other.



Figure 1Impact test setup (generating compressive wave).

C. Benchtop bender elements test

The bender elements used here are of the type T220-A4-203x (Piezo Systems, Inc.) with a length of 12mm, a width of about 6mm and a thickness of 0.5mm. The apparatus consists of two polymethyl plates (500x13x15mm³) that hold a U-shaped rubber mold with an open space for housing a cemented sample. The bender element transmitter and receiver are fixed to the Plexiglass plates. All parts are held together by four sets of screws and nuts resting on rubber disks in an attempt to avoid wave propagation through the apparatus itself.

The input shear wave was generated by one cycle of a sinusoidal electrical pulse. The sinusoidal pulse was generated with a Matlab script, originally as a sound signal. The sound signal was captured out of the sound card of the computer that produced a small voltage. This pulse was amplified and both input and output signals were recorded in a dynamic signal analyzer. The travel time of the shear wave was evaluated both by identifying the first direct arrival of the output signal as by the cross-correlation technique [11].



Figure 2 Benchtop bender elements test setup: (a) side view; (b) plan view.

D. Laser Doppler vibrometer test

In this test setup a 60W rms loudspeaker was used as exciter (type: SP-W65-SONO Woofer). The cylindrical specimen was suspended with nylon chords with a diameter of 0.3mm in front of the loudspeaker. Ideally the chords do not interfere with the specimen's movement when they are suspending the cylinder at its nodes of vibration. To simplify the test setup, the wires were suspending the cylinder at approximately one fourth from the ends, and this for all modes of vibration. The response of the specimen was measured with a LDV (Polytec OFV-5000) with corresponding velocity decoder VD-06 and OFV-534 sensor head.

After approximately one and three months of curing, four different cylinders (two samples with diameter 5cm, one with diameter 3.8cm and one with diameter 7cm) were tested with the LDV.

E. Numerical analysis

Numerical analysis was performed through Abaqus 6.12 Finite Element (FE) software. The cylindrical specimens were modeled with C3H6 elements with a global size of 3mm and were given different dimensions, mass densities and stiffness characteristics (Young's modulus and Poisson's ratio). With use of a linear perturbation step, all natural frequencies of the specimens (with corresponding modes) can be calculated.

V. RESULTS AND DISCUSSION

A. Impact test

The stiffness evolution of the reference samples (cylinders with diameter 5cm and no sulfates) follows a logarithmic trend (Figure 3). This is in correspondence with [6]. From calculated G_0 and E_0 values, the Poisson's coefficient can be obtained. This value stays between 0.2 and 0.3 during the whole curing period, which are realistic values for clay soils [12].



Figure 3 Evolution stiffness reference samples

The effect of EEF and DEF is visualized in Figure 4 and Figure 5. Clearly, EEF leads to a higher stiffness at early stages. This probably because the expansion due to ettringite formation can occur without inducing stresses. Moreover, the extra gypsum due to the reactions between sulfate and cement counteracts the negative effects of the C_3A -mineral [13].Since Na₂SO₄ does not affect the formation of CSH, the long term stiffness is not affected [14].



Figure 4 Comparison reference specimens-specimens with EEF



Figure 5 Effect DEF on reference specimens

Also the influence of the cylinder dimensions on calculated G_0 and E_0 moduli can be investigated. This is visualized in Figure 6 and Figure 7. At first sight, both moduli are relatively independent of the cylinder dimensions. However, the variation in G_0 moduli between the different sample dimensions is approximately 10%. This is only 0.1% for the E_0 moduli. Since stiffness characteristics should be independent from sample dimensions, an error occurs in the calculation of the G_0 moduli. This is further investigated in the next section.



Figure 6 Influence dimensions on E₀-modulus



Figure 7 Influence dimensions on G₀-modulus

B. Modal analysis in Abaqus

Different cylinders with, on the one hand, fixed length and varying diameter and, on the other hand, fixed diameter and varying length are analyzed. Based on fixed input parameters such as density and stiffness characteristics, the first natural frequencies in torsion, compression and bending are obtained. With aid of formulas (1) and (3), the E_0 and G_0 moduli can be recalculated. The result of this procedure is visualized in Figure 8 and Figure 9.



Figure 8 Calculated stiffness characteristics based on numerical obtained frequencies in function of varying cylinder diameter



Figure 9 Calculated stiffness characteristics based on numerical obtained frequencies in function of varying cylinder length

It is clear that the input of the first natural frequency in torsion leads to a G_0 modulus independent of the cylinder dimensions. This is also the case for the calculation of the E_0 modulus based on the first natural frequency in compression, on condition that the radio diameter over length stays smaller than approximate 0.70.

When, on the other hand, the first natural transversal frequency is used in (3) to calculate the G_0 modulus, no constant is obtained. Only when the ratio diameter over length is equal to 0.54 a correct shear modulus is calculated. In this case is the first natural frequency in torsion equal to the first natural transverse frequency.

For diameter over length ratios beneath 0.70, a linear relationship between D/L and G_{tra}/G_{tor} can be estimated. This linear relationship can be used to transform the derived G_0 moduli form the impact test towards the correct values.



Figure 10 Linear relationship between D/L and G₀ moduli

As a good estimation, equation (4) can be applied on the impact test results in Figure 7.

$$G_0 = \frac{0.54}{D/L} G_{tra} \tag{4}$$

With:

G_{tra}: calculated shear modulus with impact test.

The result of this transformation is pictured in Figure 11 . A far better equivalence (variation <1%) is obtained.



Figure 11 Modified G₀ moduli

The analysis has been done for varying densities and stiffness characteristics. It was found that those parameters do not have influence on (4).

C. Comparison impact test vs. benchtop bender elements test

Comparison of the three benchtop test setups with different sulfate concentrations leads to a similar conclusion as with the impact test: the EEF has no detrimental effect on the shear modulus at early stages.

In general, the calculated G_0 -moduli based on the impact test are lower than those calculated with the benchtop bender elements test, both for the batches without and with 15g/kg Na₂SO₄. Due to extrusion of specimens during the sample preparation, the specimens undergo disturbance which is not present in the benchtop test setup samples. Nevertheless, the stiffness evolution trend is similar for both testing methods.



Figure 12 Comparison impact test vs. benchtop test (no sulfates)



Figure 13 Comparison impact test vs. benchtop test (15g/kg sulfates)

D. Comparison impact test vs. laser Doppler vibrometer test

There is a very good similarity between the measured frequencies in both test setups. Globally, a deviation of respectively 1% and 2% is obtained for respectively the transversal and longitudinal frequencies. The frequencies measured by the LDV test are in most cases (negligibly) smaller than those measured with the impact test. Probably, this is because the higher freedom of vibration in case of the LDV test. As an example, the comparison of measured first natural transverse frequencies after a curing period of one month is visualized in Figure 14.



Figure 14 Comparison f,tra impact vs. LDV test after curing period of one month

VI. CONCLUSIONS

The impact test provides a reliable and simple alternative in comparison with other more commonly used nondestructive tests.

The correctness of the interpretation method for G_0 out of the impact test is strongly affected by the D/L ratio of thy cylindrical specimens. To predict correct values, the D/L ratio should be equal to 0.54. If not, a correction has to be introduced. A correction formula was proposed (4), based on numerical modal analysis of cylindrical specimens with different dimensions and material properties.

Regarding sulfate attack it can be concluded that DEF (and not EEF) has a disadvantageous effect on the stiffness of cement treated kaolin.

REFERENCES

- [1] Chee-Ming Chan. (2010). Bender Element Test in Soil Specimens: Identifying the Shear Wave Arrival Time, *EJGE*, vol. 15, pp. 1263-1276.
- [2] Di Emidio, G. & Verastegui Flores, R.D. (2012). Impact of sulfates on the mechanical and hydraulic behavior of a cement-clay mix. Universiteit Gent, Geotechnisch labo..
- [3] Di Emidio, G. & Verastegui Flores, R.D. (2013). Hydraulic conductivity and small-strain stiffness of a cement-bentonite sample exposed to suphates. *Proceedings of the 18th International Conference* on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.
- [4] Khan, Z. et al. (2010). Frequency dependent dynamic properties from resonant column and cyclic triaxial tests. *Journal of The Franklin Institute*, nr. 348, pp. 1363-1376.

- [5] Delfosse-Ribay, E. et al. (2004). Shear modulus and damping ratio of grouted sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nr. 24, pp. 461-471.
- [6] Verastegui Flores, R.D. et al. (2010). Small-Strain Shear Modulus and Strength Increase of Cement-Treated Clay. *Geotechnical Testing Journal*, 33, nr.1.
- [7] Vanwalleghem, J. et al. (2014). External damping losses in measuring the vibration damping properties in lightly damped specimens using transient time-domain methods. *Journal of Sound and Vibration*, nr. 333, pp. 1596-1611.
- [8] Richart, F.E. (1970). Vibrations of Soils and Foundations. (1ste druk). New Jersey: Prentice Hall.
- [9] Collepardi, M. (2004). A State-of-the-Art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26, nr. 6, pp. 755. Geraadpleegd op 20 oktober 2013 via www.sciencedirect.com
- [10] Bracewell, R. (1978). *The Fourier Transform and its Applications*, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., 444 p.
- [11] Chee-Ming Chan. (2010). Bender Element Test in Soil Specimens: Identifying the Shear Wave Arrival Time, *EJGE*, vol. 15, pp. 1263-1276.
- [12] Budhu, M. (2011). Soil Mechanics and Foundations. (3de druk). Arizona: John Wiley & Sons, Inc.
- [13] Boel, V. (2009). Bouwmaterialen [syllabus]. Hogeschool Gent, Departement Toegepaste Ingenieurswetenschappen.
- [14] Prasad, J. et al. (2006). Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar. *Asian Journal of Civil Engineering*, 7, nr. 3, pp. 259-268. Geraadpleegd op 28 oktober 2013 via http://www.bhrc.ac.ir

Inhoudsopgave

1.	Inle	eidin	g	1
2.	Lite	eratu	urstudie	2
2	.1.	Stij	fheidsmoduli grond	2
2	.2.	Res	ponsie elastisch systeem op een dynamische belasting	5
	2.2	.1.	Bewegingsvergelijking elastisch systeem	5
	2.2	.2.	Systeem met één vrijheidsgraad	5
	2.2	.3.	Systeem met meerdere vrijheidsgraden	7
2	.3.	Gol	fvoortplanting in staafvormig element	8
	2.3	.1.	Golfsnelheden	8
	2.3	.2.	Fundamentele frequentie	10
2	.4.	Fre	e-free resonant column test	13
2	.5.	Ber	hchtop bender element test	15
2	.6.	Imp	pulse excitation of vibration test	22
2	.7.	Las	er Doppler vibrometer	26
	2.7	.1.	Doppler effect	26
	2.7	.2.	Optische interferentie	28
2	.8.	Fou	riertransformatie	30
	2.8	.1.	Reële discrete Fouriertransformatie	30
	2.8	.2.	Complexe discrete Fouriertransformatie	32
	2.8	.3.	De fast Fourier transformation	33
2	.9.	Sul	faataanval	36
	2.9	.1.	Hydratatie cement	36
	2.9	.2.	Mechanisme sulfaataanval	37
	2.9	.3.	Invloed type cement	41
3.	Ma	teria	len	43
3	.1.	Cer	nent	43
	3.1	.1.	Hoogovencement	43
	3.1	.2.	Georoc producten	46
3	.2.	Kao	oliniet	46
3	.3.	Nat	riumsulfaat	48
4.	Me	thod	en	50

4.1.	Vo	orbereiding tubes	50
4.2.	Bej	paling materiaalhoeveelheden	50
4.3.	Ve	rvaardiging cilindrische proefstukken	52
4.4.	Na	behandeling proefstukken	56
4.5.	Ber	nchtop bender element testopstelling	56
4.5	5.1.	Algemeen	56
4.5	5.2.	Gegevensverwerking	59
4.6.	Im	pact test opstelling	62
4.6	5.1.	Algemeen	62
4.6	5.2.	Versnellingsmeter	63
4.6	5.3.	Gegevensverwerking	64
4.7.	Las	ser Doppler vibrometer test	68
4.7	7.1.	Algemeen	68
4.7	7.2.	Gegevensverwerking	69
4.8.	Nu	meriek onderzoek in Abaqus	70
5. Re	sulta	ten	73
5.1.	Im	pact test	73
5.1	l.1.	Referentiemonsters	73
5.1	1.2.	Invloed monsterafmetingen	75
5.1	1.3.	Invloed cement type	77
5.1	l.4.	Invloed natriumsulfaat	79
5.2.	Ve	rgelijking impact test met modale analyse in Abaqus	83
5.2	2.1.	Invloed mesh-fijnheid	83
5.2	2.2.	Vergelijking theoretische en experimentele waarden	87
5.2	2.3.	Extrapolatie afmetingen	90
5.3.	Ve	rgelijking impact test met benchtop test	98
5.4.	Ve	rgelijking impact test met LDV test	102
6. Co	onclu	sies	104
6.1.	Ve	rgelijking toegepaste niet-destructieve testen	104
6.2.	Eff	ect sulfaataanval, cementsoort en dimensies proefstukken op stijfheid	105
7. Re	ferer	ntielijst	106
Figuren	lijst		109

1. Inleiding

Het gebruik van cement is reeds lang ingeburgerd in de traditionele bouwkunde. Meer recentelijk wordt cement echter ook gemengd met grond, zoals bijvoorbeeld met de *deep mixing method*. Dit om de grond een grotere draagkracht te geven. Zo kan niet-geschikte grond toch bebouwd worden, kunnen aan gronden een grotere weerstand tegen aardbevingen gegeven worden, kunnen taluds onder steilere hellingen afgegraven worden, enzovoort.

Om de druksterkte van de met cement behandelde grond na te gaan is de meest ingeburgerde techniek de *unconfined compression test* (UCT). Deze heeft echter de nadelige eigenschap dat het gaat om een destructieve test. Om de sterktevariatie van de grondmonsters in de tijd na te gaan zijn er bijgevolg veel monsters nodig. Omdat het onmogelijk is om monsters met identieke eigenschappen te vervaardigen, zit er bijgevolg een niet verwaarloosbare onnauwkeurigheid op de resultaten.

Een oplossing hiervoor is het gebruik van niet-destructieve testen. Zo kan eenzelfde monster op verschillende tijdstippen getest worden en wordt een meer waarheidsgetrouw beeld van de sterkteevolutie bekomen. Deze testen zijn algemeen gericht op het bepalen van de stijfheid in plaats van de druksterkte van de grond.

In de laatste tien jaar werd vaak gebruik gemaakt van de *bender elements test* of *resonant column test* als niet-destructieve testen. In deze thesis wordt een testopstelling gebruikt die eerder verwantschap vertoont met impact testen toegepast in de betontechnologie of op keramische materialen. Hierbij wordt een impact gegeven op een proefstuk. Het trillingsgedrag van dit monster ten gevolge van deze dynamische belasting maakt het mogelijk zowel glijdingsmodulus als elasticiteitsmodulus bij kleine vervormingen te bepalen.

De bekomen resultaten uit de impact test zullen zowel vergeleken worden met resultaten uit *bender elements* testopstellingen als met numeriek onderzoek in het eindige elementen programma Abaqus. Ook zal een beperkt aantal proefstukken getest worden met een Doppler difractometer. Er wordt onderzocht of de toegepaste impact test een waardig alternatief is voor de gangbare niet-destructieve testen.

Een secundaire doelstelling is het effect van sulfaten, cementtypes en proefstukafmetingen op de resultaten gegenereerd door de impact test in kaart te brengen.

2. Literatuurstudie

2.1. Stijfheidsmoduli grond

Wanneer een elementair grondvolume beschouwd wordt, kunnen hier verschillende spanningen op aangrijpen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de normaalspanningen σ en de schuifspanningen τ . Met deze spanningen komen respectievelijk rekken ε (*normal strain*) en glijdingen γ (*shear strain*) overeen.

In formulevorm worden deze spanningen en vervormingen als volgt weergegeven.

$$\sigma_{z} = \frac{P_{z}}{x. y}, \sigma_{x} = \frac{P_{x}}{y. z}, \sigma_{y} = \frac{P_{y}}{x. z}$$
$$\varepsilon_{z} = \frac{\Delta z}{z}, \varepsilon_{x} = \frac{\Delta x}{x}, \varepsilon_{y} = \frac{\Delta y}{y}$$
$$\tau = \frac{F}{x. y}$$
$$\gamma_{zx} = tan^{-1}\frac{\Delta x}{z}$$



Figuur 1: Weergave normaalspanningen, rekken (Budhu, 2011)



Figuur 2: Weergave schuifspanning, glijding (Budhu, 2011)

Wanneer een cilindervormig grondmonster door een stijgende uniaxiale last belast wordt, kan de toename van de normaalspanningen in functie van de rek uitgezet worden. Een resultaat hiervan is terug te vinden in onderstaande figuur.



Figuur 3: Rek-spanningsdiagram grond (Budhu, 2011)

Voor een linear elastisch materiaal (curve OA) kan de elaticiteitsmodulus E snel berekend worden uit de wet van Hooke. In het voorbeeld van een uniaxiaal belaste cilinder wordt dit:

$$E = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z}$$

Grond is echter een niet-lineair elastoplastisch materiaal. Grond gedraagt zich elastisch bij kleine vervormingen en daarna elastoplastisch. Dit komt overeen met curve OB in bovenstaande figuur. Een gevolg van het niet-lineaire gedrag van grond is dat de elasticiteitsmodulus E geen constante is. Zo wordt er een onderscheid gemaakt tussen de elasticiteitsmodulus bij kleine rekken (E_0 of E_{max}), de tangent elasticiteitsmodulus E_t en de secans elasticiteitsmodulus E_s .

Het gedrag van grond op schuifkrachten vertoont een analoog niet-lineair elastoplastisch karakter. Ook hier kunnen bijgevolg verschillende glijdingsmodulussen G gedefinieerd worden. Een glijdingsmodulus wordt gedefinieerd als de verhouding van schuifspanning over glijding.



Figuur 4: Glijdings-schuifspanningsdiagram grond (Budhu, 2011)

Een verband tussen de elasticiteitsmodulus en glijdingsmodulus kan gevonden worden met behulp van de wet van Hooke.

$$G = \frac{E}{2.\left(1+\nu\right)}$$

Hierin is v de coëfficiënt van Poisson, die de verhouding weergeeft tussen radiale en axiale rek bij de uniaxiale belasting van grond. Deze coëfficiënt is niet makkelijk te bepalen. Voor kleigronden kan deze gesitueerd worden tussen de 0.2 en 0.4 (Budhu, 2011). Theoretisch is deze waarde begrensd door -1 en 0.5, alhoewel quasi alle materialen een positieve coëfficiënt bezitten.

Bovenstaand verband tussen E en G is enkel geldig voor lineair elastische materialen. In het geval van een niet-lineair materiaal moet gespecificeerd worden bij welke vervorming de moduli geldend zijn.

De gangbare niet destructieve testen op grondmonsters exciteren de proefstukken op minimale wijze. Hierdoor ligt de respons steeds in het lineaire domein en zijn de stijfheidsmoduli deze bij kleine vervormingen.

2.2. Responsie elastisch systeem op een dynamische belasting

2.2.1. Bewegingsvergelijking elastisch systeem

De bewegingsvergelijking van een elastisch systeem kan, mits de nodige onderstellingen¹, geschreven worden als (M. Loccufier, 2013):

$$M.\ddot{q} + C.\dot{q} + K.q = f(t)$$

In deze bewegingsvergelijking komen de verplaatsingen van discrete punten van het systeem en hun tijdsafgeleiden voor. Verder staat M voor de massamatrix van het systeem, C voor de dempingsmatrix en K voor de stijfheidsmatrix. Het rechterlid geeft weer welke dynamische belasting op het systeem inwerkt. De bewegingsvergelijking stelt dat de responsie van een systeem afhankelijk is van de massa van het systeem, de inwendige demping, de stijfheid van het systeem en de vorm van de belasting.

Een discreet systeem met m vrijheidsgraden heeft bijgevolg m gekoppelde bewegingsvergelijkingen. In het sterk vereenvoudigde geval van een systeem met één vrijheidsgraad, is er slechts één differentiaalvergelijking op te lossen.

2.2.2. Systeem met één vrijheidsgraad

Het meest eenvoudige systeem wordt gekarakteriseerd door een massa m opgehangen aan een wrijvingsloze veer met stijfheid k en verwaarloosbare massa.



Figuur 5: Massa-veersysteem (Abaqus documentatie)

Met de notaties in bovenstaande figuur kan de bewegingsvergelijking van dit systeem als volgt neergeschreven worden:

$$m.\ddot{u} + k.u = p(t)$$

Wanneer de massa uit evenwicht gebracht wordt en vervolgens losgelaten, dan ontstaat een vrije trilling. De massa oscilleert met zijn natuurlijke frequentie ω_n . Deze frequentie kan eenvoudig bepaald

¹ Als belangrijkste onderstelling moet gelden dat het gaat om kleine bewegingen rond een evenwichtstoestand. In het geval van alle later te bespreken niet-destructieve testen is hieraan voldaan.

worden door bovenstaand differentiaalvergelijking te homogeniseren en op te lossen met behulp van de karakteristieke veelterm. Volgend resultaat wordt bekomen:

$$u(t) = A\cos\sqrt{\frac{k}{m}}t + B\sin\sqrt{\frac{k}{m}}t = \sqrt{A^2 + B^2}\sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t + \arctan\frac{A}{B}\right)$$

De coëfficiënten A en B worden bepaald uit de beginpositie en beginsnelheid van de massa, namelijk A=u₀ en B= $\frac{\dot{u}_0}{\sqrt{\frac{k}{m}}}$. Er kan geconcludeerd worden dat de vrije trilling van het systeem gekarakteriseerd

wordt door zijn natuurlijke frequentie $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

Vervolgens wordt het geval beschouwd van een elastisch systeem met één vrijheidsgraad dat geëxciteerd wordt door een rechthoekige schokbelasting. De demping van het systeem wordt hierbij opnieuw verwaarloosd.



Figuur 6: Verloop schokbelasting (M. Loccufier, 2013)

Door gebruik te maken van de bewegingsvergelijking en Laplacetransformatie kan de uitwijking van het systeem geschreven worden als (M. Loccufier, 2013):

$$q(t) = \frac{F_p}{k} \cdot (1 - \cos(\omega_n \cdot t)), t \le t_d$$
$$q(t) = \frac{2 \cdot F_p}{k} \sin\left(\pi \cdot \frac{t_d}{T_n}\right) \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T_n} - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_d}{T_n}\right), t > t_d$$

Volgens Corino (2001) is de schokbelasting ten gevolge van een impact door bijvoorbeeld een stalen bal meer te vergelijken met een halve sinus golf. Voor dergelijke stootbelasting worden bovenstaande formules iets gewijzigd. De essentie blijft echter gelden, namelijk dat de responsie opnieuw bestaat uit een sinusfunctie met periode T_n , of dus frequentie ω_n . De maximale uitwijking die bereikt wordt is afhankelijk van de verhouding belastingstijd tot eigenperiode systeem. Deze maximale uitwijking is in het kader van deze thesis echter minder van belang. In onderstaande figuur is bijvoorbeeld zichtbaar dat de maximale uitwijking het grootst is tijdens de gedwongen excitatie voor een verhouding van belastingstijd tot eigenperiode van 1.25.



Figuur 7: Voorbeeld responsie systeem (M. Loccufier, 2013)

2.2.3. Systeem met meerdere vrijheidsgraden

Een continue elastisch materiaal heeft in principe oneindig veel vrijheidsgraden. Door modelreductie toe te passen kan dit herleid worden tot een eindig aantal vrijheidsgraden m. Er kan aangetoond worden dat een systeem met m vrijheidsgraden kan trillen met m eigenfrequenties ω_i , $i = 1 \dots m$. Nu wordt de responsie in algemene vorm weergegeven door (M. Loccufier, 2013):

$$q(t) = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \dots \\ q_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_i(1) \\ e_i(2) \\ \dots \\ e_i(m) \end{bmatrix} \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_i)$$

Een systeem met m vrijheidsgraden kan dus trillen in m verschillende eigenmodes met corresponderende eigenfrequenties. Afhankelijk van het type belasting en de beginvoorwaarden van het systeem trilt het systeem meer in bepaalde eigenmodes en minder in andere. De eigenfrequenties kunnen berekend worden uit:

$$\det(K - M\omega^2) = 0$$

Wanneer de belasting een periodiek verloop kent (met frequentie ω) dan treedt er vooral responsie op in de eigenmode met eigenfrequentie die dicht bij de excitatiefrequentie ligt. Dit wordt de resonantiefrequentie ω_r genoemd. Theoretisch kan afgeleid worden dat (M. Loccufier, 2013):

$$\omega_r = \omega_n . \sqrt{1 - 2 . \zeta^2}$$

Bij een systeem met verwaarloosbare demping ($\zeta \approx 0$) treedt bijgevolg resonantie op bij de eigenfrequenties van het systeem.

2.3. Golfvoortplanting in staafvormig element

Wanneer een proefstuk met bepaalde afmetingen geëxciteerd wordt door een impact- of periodische belasting, dan worden trillingsmodes opgewekt in het materiaal. Dit werd in bovenstaande paragraaf besproken. Deze trillingsmodes kunnen beschouwd worden als golven die zich voortplanten met een zekere snelheid doorheen het monster. F.E. Richart et al. (1970) legde een verband tussen de voortplantingssnelheid van deze golven en de materiaalkarakteristieken E_0 , G_0 en ρ . Merk op dat het hier gaat om stijfheidsmoduli bij kleine vervormingen. De afgeleide theorie is geldend wanneer de golflengte van de opgewekte trilling vele malen groter is dan de dwarsafmetingen van het medium. Bijgevolg is de theorie enkel geldend voor de golfvoortplanting in staafvormige elementen.

2.3.1. Golfsnelheden

Wanneer een normaalkracht uitgeoefend wordt op een cilindrisch monster, dan ontstaan er in iedere doorsnede normaalspanningen. Als deze normaalspanningen constant verdeeld verondersteld worden over de doorsnede en deze doorsnede vlak blijft tijdens zijn beweging, dan kan uit horizontaal evenwicht volgende formule afgeleid worden:



Figuur 8: Horizontaal evenwicht cilindermoot (Richart F.E., 1970)

Deze berekent de netto-normaalkracht uitgeoefend op een lengte Δx van de cilinder. Door toepassing van de tweede wet van Newton wordt vervolgens volgende differentiaalvergelijking bekomen.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \Delta x A = \Delta x A \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Wanneer het gaat om een elastisch medium, dan is de wet van Hooke toepasselijk en kan bovenstaande vergelijking herschreven worden in afgeleiden van de verplaatsing alleen.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E_0}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Deze heeft de algemene vorm van de ééndimensionele golfvergelijking. Deze stelt dat de tweede partiële afgeleide van de verplaatsing naar de tijd gelijk is aan de tweede partiële afgeleide van de verplaatsing naar x vermenigvuldigd met de golfsnelheid in het kwadraat. Bijgevolg geldt dat de golfsnelheid van een drukgolf gekoppeld is aan de materiaalkarakteristieken E_0 en ρ .

$$C_L = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}}$$

Een analoge afleiding kan gebeuren wanneer het monster niet onderworpen is aan een normaalkracht maar aan een torsiemoment T. Uit evenwichtsbetrekking en de tweede wet van Newton volgt:



Figuur 9: Torsie in cilindervormige staaf (Richart F.E., 1970)

$$T + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x - T = \rho I_p \Delta x \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2}$$

Hierin is I_p (m⁴) het polaire traagheidsmoment van de doorsnede en ϑ de torsiehoek (rad). Het torsiemoment wordt gegeven door onderstaande vergelijking. Substitutie in bovenstaande evenwichtsbetrekking levert de gewenste ééndimensionale golfvergelijking.

$$T = G_0 I_p \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$$
$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = \frac{G_0}{\rho} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}$$

Deze golfvergelijking heeft een analoge vorm als bij uitoefening van een normaalkracht. De snelheid van de torsiegolf wordt bijgevolg gegeven door:

$$C_S = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}}$$

Deze golfsnelheden zijn geldig voor de vibratie in cilindrische monsters met eindige afmetingen. In een homogeen, isotroop, elastisch, half-oneindig medium gelden andere formules. Volgens B.Banks et al. (1962) is het belangrijk dat de diameter van het proefstuk voldoende kleiner is dan de golflengte van de opgewekte trilling. Zo niet ligt de golfsnelheid van de drukgolf hoger. Dit wordt weergegeven door onderstaande formule. In half-oneindige media wordt niet langer gesproken van longitudinale en transversale golven maar respectievelijk van P-golven en S-golven. De P-golf of *primary wave* heeft een grotere snelheid dan de longitudinale golf en is in functie van de coëfficiënt van Poisson. Dit omdat er geen laterale verplaatsingen van materie mogelijk zijn in het oneindig medium.

$$C_P = \sqrt{\frac{E_0(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

S-golven of *secondary waves* planten zich voort met dezelfde snelheid als de hierboven besproken torsiegolf.

2.3.2. Fundamentele frequentie

Vervolgens wordt er gezocht naar een theoretisch verband tussen de golfsnelheid en de laagste eigenfrequentie (F.E. Richart et al., 1970). Hiervoor moet de verplaatsing van een deeltje van de staaf beschreven worden in functie van tijd en ruimte

Wanneer een normaalkracht uitgeoefend wordt op een staafvormig element, dan wordt het systeem gekarakteriseerd door onderstaande differentiaalvergelijking.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C_L^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Om deze differentiaalvergelijking op te lossen moeten twee randvoorwaarden en twee beginvoorwaarden toegevoegd worden. Wanneer de staaf aan zijn uiteinden (x=0 en x=1) vrij kan bewegen en verder gekarakteriseerd wordt door een beginsnelheid 0 en beginverplaatsing f(x), dan worden de voorwaarden gegeven door:

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} = 0$$
$$u(x,0) = f(x)$$

10

$$\frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = 0$$

De oplossing wordt gevonden door scheiding der variabelen. Hierbij wordt verondersteld dat de functie u(x,t) het product is van een functie X(x) en een functie T(t). Dit leidt tot:

$$\frac{X''}{X} = \frac{1}{C_L^2} \frac{T''}{T} = \sigma$$
$$T'(0) = X'(0) = X'(l) = 0$$

Hierin is
$$\sigma$$
 de scheidingscoëfficiënt. Wanneer deze waarde positief is, wordt een triviale nuloplossing bekomen. Wanneer $\sigma=0$, dan is u(x,t) een constante. Bij een negatieve waarde van de scheidingscoëfficiënt ($\sigma=-\lambda^2$), kan een niet-triviale oplossing naar X(x) gevonden worden. Na toevoeging van de randvoorwaarden wordt onderstaande vergelijking bekomen:

$$0 = -C.\lambda \sin(\lambda l)$$

Hierin is de constante C enkel verschillend van nul wanneer λ een geheel veelvoud n is van π/l . Bijgevolg wordt bekomen dat:

$$X(x) = C\cos\frac{n\pi x}{l}$$

Met de gekende waarde van de scheidingscoëfficiënt kan de differentiaalvergelijking naar T(t) opgelost worden. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van de beginvoorwaarde T'(0)=0. Onderstaande functie wordt bekomen.

$$T(t) = C\cos\frac{n\pi C_L t}{l}$$

Uit het superpositieprincipe kan onderstaande betrekking opgesteld worden.

$$u(x,t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} c_n \cos \frac{n\pi x}{l} \sin \frac{n\pi C_L t}{l}$$

Tenslotte kan de laatste beginvoorwaarde, u(x,0)=f(x), ingevuld worden. Wanneer het proefstuk in initieel in rust is, dan volgt uit substitutie dat $c_0=0$.

Bij een gekende functie f(x) kan bijgevolg de verplaatsing van een staafdeeltje in tijd en ruimte volledig beschreven worden.

De beweging of trilling van de staaf op een bepaald moment kan bijgevolg geschreven worden als de superpositie van eigenmodes, gekarakteriseerd door eigenfrequenties. De eerste drie eigenmodes zijn weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 10: Laagste drie eigenmodes cilinder (Richart F.E., 1970)

Als de staaf voornamelijk geëxciteerd wordt in zijn n^{de} eigenmode, dan trilt een deeltje op een bepaalde positie met onderstaande periode T.

$$T = \frac{2\pi l}{n\pi C_L} = \frac{2l}{nC_L}$$

Als aangenomen wordt dat de staaf trilt in zijn eerste eigenmode, dan geldt onderstaand verband tussen de eerste eigenfrequentie en voortplantingssnelheid spanningsgolf.

$$f_{1,lon} = \frac{C_L}{2l}$$

Het doel van de bepaalde niet-destructieve testen is de laagste eigenfrequentie van het monster te bepalen. Vervolgens kan met de eerder afgeleide formules de stijfheidskarakteristieken bekomen worden.

$$E_0 = \rho (2f_{1,lon}l)^2$$

Op volledig analoge wijze kan G_0 berekend worden. Dan moet er uiteraard een torsiemoment uitgeoefend worden op het grondmonster. Uiteraard slaat $f_{1,tor}$ dan op de eerste eigenfrequentie in torsie.

$$G_0 = \rho (2f_{1,tor}l)^2$$

In onderstaande paragrafen worden vervolgens enkele vaak gebruikte testen kort toegelicht.

2.4. Free-free resonant column test

Deze testopstelling, vaak afgekort door FFRC, werd voor het eerst toegepast door Powers in 1938. De hedendaagse methode is beschreven in ASTM C 215. De benaming volgt uit het feit dat het proefstuk aan beide uiteinden vrij kan trillen. De ASTM norm is opgesteld specifiek voor het testen van betonnen proefstukken, maar de test kan ook voor andere materialen toegepast worden. Er wordt ook naar de proefopstelling verwezen als de *forced resonance method*. De methode wordt courant toegepast bij geotechnisch onderzoek (E. Delfosse-Ribay et al., 2004),(Z. Khan et al., 2010).

Bij deze niet-destructieve test wordt een cilindrisch of balkvormig proefstuk gedwongen te trillen met behulp van een elektro-mechanische aandrijfinstallatie met variabele frequentie. De respons van het proefstuk wordt opgemeten met een piëzo-elektrische of magnetische *pickup*. Dit apparaat stelt in staat om een verplaatsing, snelheid of versnelling om te zetten naar een voltage. Door de aandrijffrequentie te laten variëren, kan de resonantiefrequentie bepaald worden. Deze stemt goed overeen met de eerste eigenfrequentie van het systeem. Een schema van de testopstelling is in onderstaande figuur terug te vinden.



Figuur 11: Schema forced resonance method (ASTM C 215)

Door posities van ondersteuningen, excitatie en *pickup* te wijzigen, wordt het proefstuk gedwongen te trillen in een longitudinale, torsie of transversale mode. De opgemeten eerste eigenfrequentie hoort bij

die respectievelijke mode. Een overzicht van deze posities wordt gevisualiseerd in onderstaande figuur. De figuur is zowel toepasselijk voor de *forced resonance method* als de *impulse excitation method*. Over deze test volgt later meer.



Figuur 12: Posities steunpunten, driver en pickup (ASTM C 215)

Belangrijk is dat het proefstuk vrij kan trillen. Voor elke verschillende trillingsmode moeten dus de posities van de knopen, of *nodes*, bepaald worden. Dat zijn de punten die zich niet verplaatsen bij een bepaalde mode. Ter plaatse van deze knopen worden dan de steunpunten geplaatst. Bij de transversale mode is dit op 0.224l van de uiteinden, bij de torsie en longitudinale mode is dit op halve lengte.

Verder wordt de aandrijving en *pickup* geplaatst ter locatie van de *antinodes*. Dit zijn de punten met maximale uitwijking. Voor de transversale mode is dit in het midden of op de uiteinden van het proefstuk. Voor de longitudinale mode zijn dit de uiteinden. Uiteraard is de belasting en opmeting bij de transversale mode loodrecht op de langsas van de proefstukken en bij de longitudinale mode parallel. Het is in de praktijk moeilijk om de torsie mode te realiseren zonder storende effecten van de transversale mode. Daarom wordt de *pickup* geplaatst op 0.224L van het uiteinde. Dit is een knoop van de transversale mode en dus worden storende effecten vermeden. Verder wordt de excitatie gegeven op de onderste helft van het proefstuk en geschiedt de opmeting bovenaan (of omgekeerd).

Bij de *free-free* opstelling kunnen de bepaalde eigenfrequenties gebruikt worden om de stijfheidskarakteristieken van het proefstuk te bepalen. Zo kan de E_0 -modulus en G_0 -modulus bepaald worden uit de formules beschreven door Richart (1970). De formules weergegeven in ASTM C 215 voor cilindrische proefstukken zijn in overeenstemming met deze theorie. Ze zijn hieronder

weergegeven en kunnen herleid worden naar de formules beschreven door Richart (1970). Voor balkvormige proefstukken gelden andere formules, die ook beschreven staan in ASTM C 215.

$$E_{0} = \frac{16}{\pi} \frac{l}{D^{2}} m f_{1,lon}^{2}$$
$$G_{0} = \frac{16}{\pi} \frac{l}{D^{2}} m f_{1,lor}^{2}$$

In bovenstaande formules staat m voor de massa van de proefstukken, l voor de lengte en D voor de diameter.

Tenslotte kan de E₀-modulus ook berekend worden uitgaande van de transversale eigenfrequentie f_{1,tra}.

$$E_0 = 1.6067 \frac{l^3}{D^4} m f_{1,tra}^2 T_{1,tra}$$

Met T een correctiecoëfficiënt die rekening houdt met de eindige D/L-verhouding en in functie is van de coëfficiënt van Poisson. Voor L/D-verhoudingen kleiner dan 20 wordt T gegeven door:

$$T = 1 + 4.939(1 + 0.0752v + 0.8109v^2)(\frac{D}{l})^2 - 0.4883(\frac{D}{l})^4$$
$$-\frac{4.691(1 + 0.2023v + 2.173v^2)(\frac{D}{l})^4}{1.000 + 4.754(1 + 0.1408v + 1.536v^2)(\frac{D}{l})^2}$$

Aangezien de coëfficiënt van Poisson niet a priori gekend is moet een iteratief proces gevolgd worden. Er wordt een beginaanname gemaakt voor v en vervolgens worden de E₀-modulus en G₀-modulus berekend. Als beiden gekend zijn kan een nieuwe waarde voor de coëfficiënt van Poisson berekend worden. De iteratie kan stopgezet worden als de afwijking op v bij twee opeenvolgende iteraties kleiner dan 2% is geworden.

Wegens de grotere bewerkelijkheid lijkt het logischer de E_0 -modulus te berekenen uitgaande van de longitudinale en niet de transversale eigenfrequentie.

2.5. Benchtop bender element test

Deze niet-destructieve test werd voor het eerst in 1978 (Shirley & Hampton) toegepast op proefstukken bestaande uit kaoliniet.

Net zoals bij de *resonant column test* is het doel van de test de voortplantingssnelheid van respectievelijk een longitudinale of transversale golf te bepalen. Vervolgens kunnen met dezelfde theoretische verbanden (F.E. Richart et al., 1970) respectievelijk E_0 en G_0 bepaald worden.

Het grondmonster wordt hierbij geplaatst tussen twee *bender elements* of buigelementen. Deze bestaan uit piëzo-elektrische materialen. Materialen die dit effect vertonen, produceren een oppervlaktelading q als ze worden gedeformeerd ten gevolge van een mechanische kracht. De lading is over een groot bereik evenredig met die kracht. Doorgaans is de sensor uitgevoerd als een condensator, zodat volgens q=C.V het uitgangssignaal ook als spanning beschikbaar is (J. Baeten, 2002).

Naast het hierboven besproken direct piëzo-elektrisch effect, geldt ook het omgekeerd proces. Wanneer een elektrische spanning aangelegd wordt over het materiaal, dan ontstaat er een mechanische vervorming van het element evenredig met deze spanning. Dit wordt het invers piëzoelektrisch effect genoemd.

Er bestaan zowel natuurlijk piëzo-elektrische materialen als kunstmatige. Tot de eerste categorie behoort bijvoorbeeld kwarts. De bekendste materialen behorende tot de tweede categorie zijn keramische materialen, zoals bariumtitanaat (BaTiO₃). Deze worden piëzo-elektrisch gemaakt door ze bij een temperatuur lager dan de Curie-temperatuur gedurende een zekere tijd bloot te stellen aan een sterk elektrisch veld in een bepaalde richting. Na afkoeling blijft het materiaal gepolariseerd in de richting van het aangelegde elektrische veld en ontstaat er ook een verlenging in deze richting. Dit wordt verklaard in onderstaande paragraaf.

Een keramisch materiaal bestaat uit een kristalstructuur zoals weergegeven in onderstaande figuur. Bij een temperatuur boven de Curie-temperatuur (links) bevindt het positief geladen metaal-ion zich centraal in een kubusvormige kristalstructuur. Bij lagere temperaturen rekt de vorm zich uit en verplaatst het metaal-ion zich uit het horizontale symmetrievlak. Bijgevolg ontstaat er een dipool.



Figuur 13: Kristalstructuur keramisch materiaal (I.K. Henderson, 2011)

Deze dipolen zijn willekeurig georiënteerd en bijgevolg is het materiaal globaal gezien niet gepolariseerd. Dit verandert wanneer een gelijkspanning wordt aangelegd over het materiaal. Alle dipolen richten zich min of meer volgens de richting van het aangebrachte elektrische veld. Doordat de dipolen die meer gericht zijn volgens dit elektrisch veld langer zijn dan degene die zich minder georiënteerd hebben, ontstaat een verlenging van het materiaal in de richting van het elektrisch veld. Bij het wegvallen van het elektrisch veld blijven de meeste van deze dipolen in dezelfde positie (I.K. Henderson).



Figuur 14: Polariseren van keramisch materiaal (I.K. Henderson, 2011)

Het direct piëzo-elektrisch effect bij keramische materialen kan als volgt geïnterpreteerd worden. Wanneer een druk in de richting van de verlenging uitgeoefend wordt, ontstaat er een wijziging van de kristalstructuur. Gevolg hiervan is dat er een ladingsverschil (of voltage) wordt gegenereerd die eenzelfde teken heeft als de polarisatie van het materiaal. Wanneer een trek in de richting van de verlenging wordt uitgeoefend, wordt een ladingsverschil gegenereerd die tegengesteld is aan de polarisatie van het materiaal. Het achtereenvolgens verlengen en verkorten van de piëzo-elektrische sensor zorgt bijgevolg voor een ladingsverschil die wijzigt van teken (I.K. Henderson, 2011).

Het invers piëzo-elektrisch effect kan als volgt geïnterpreteerd worden. Wanneer een ladingsverschil wordt aangebracht die eenzelfde teken heeft als de polarisatie van het materiaal, dan verkort de sensor in de richting van de polarisatie. In het omgekeerde geval verlengt de sensor. Het aanbrengen van een voltage met wisselend teken zorgt dus voor het cyclisch verlengen en verkorten van de piëzo-elektrische sensor (I.K. Henderson, 2011).



Figuur 15: Weergave direct en invers piëzo-elektrisch effect (M. Breuning, 1990)

Er worden meestal keramische piëzo-elektrische materialen toegepast als buigelementen. Dit omdat de gevoeligheid groter is i.v.m. natuurlijke piëzo-elektrische materialen. Deze sensoren zijn in tegenstelling tot de natuurlijke wel niet stabiel.



Figuur 16: Verval van piëzo-elektriciteit (J. Baeten, 2002)

De *benchtop bender element test* maakt zowel gebruik van het direct als invers piëzo-elektrisch effect. Het proefstuk wordt hierbij geplaatst tussen twee buigelementen. Deze buigelementen bestaan uit twee piëzo-elektrische plaatjes met een tegengestelde polarisatie. Bij het aanbrengen van een spanning wordt het ene plaatje samengedrukt en het andere uitgerekt. Het geheel buigt dus, wat de benaming verklaart.



Figuur 17: Werking buigelement (D. Snoeck, 2008)

In onderstaande figuur is een standaard schematische voorstelling van de *bender* test ingewerkt in een triaxiaal cel weergegeven. De *function generator* wordt gebruikt om een voltage aan te brengen op de *transmitter*. Deze puls heeft standaard een sinusvormig verloop en bijgevolg begint het buigelement cyclisch te verbuigen. Het buigelement wordt stevig in contact gebracht met het proefstuk en bijgevolg wordt een transversale spanningsgolf in het monster opgewekt. Deze propageert door het monster en aan het andere uiteinde wordt de *reciever* geëxciteerd. Deze vervorming zorgt op zijn beurt voor de opwekking van een elektrisch signaal. (J.F. Camacho-Tauta et al., 2012)



Figuur 18: Schema bender element test (J.F. Camacho-Tauta et al., 2012)

De tijd tussen zenden en ontvangen kan bijvoorbeeld opgemeten worden met een elektronische timer. Deze slaat aan wanneer de puls gegenereerd wordt en slaat af wanneer de *receiving transducer* een voltage produceert. De snelheid van de golf wordt vervolgens eenvoudig bepaald als de verhouding van lengte monster op opgemeten tijd.

Bij een buigingselement worden vooral schuifspanningsgolven opgewekt. Dit omdat het element onder een sinusvormig wijzigende spanning zich beweegt in een richting loodrecht op de as van het proefstuk. Er worden ook longitudinale golven opgewekt maar deze zijn eerder georiënteerd loodrecht op de as van het grondmonster en ondergaan bijgevolg zeer veel reflecties. Daarom zou kunnen verondersteld worden dat de longitudinale golven later de *reciever* bereiken. Hieruit kan besloten worden dat buigingselementen gebruikt worden om de snelheid van schuifspanningsgolven te bepalen.

Wanneer de twee piëzo-elektrische plaatjes een gelijke polarisatie hebben, dan liggen de zaken anders. Deze zogenaamde *extender elements* ondergaan een verlenging of verkorting maar geen buiging. Bijgevolg kan de beweging nu volgens de as van het proefstuk geschieden en worden bijna uitsluitend longitudinale golven opgewekt. Zo kan de snelheid van deze golven bepaald worden.

Op bovenstaande redenering dient enige nuance aangebracht te worden. Doordat longitudinale golven zich sneller voortplanten dan schuifspanningsgolven, is er bij de buigelementen toch een zekere interferentie van beiden mogelijk. Dit wordt in de literatuur het *near field effect* genoemd (J. Kumar & B.N. Madhusudhan, 2010).

Vaak beschikt de testopstelling niet over een automatische timer. Dan moet het faseverschil tussen inkomend en ontvangen signaal visueel vastgesteld worden met behulp van een oscilloscoop. Bij schuifspanningsgolven kan dit voor moeilijkheden zorgen door het *near field effect*. J. Kumar en B.N. Madhusudhan (2010) onderzochten dit bij zandgronden. Op onderstaande figuur is links een ingangen uitgangsignaal te zien bij de toepassing van *bender elements*. Hier is de golf dus een schuifspanningsgolf. Rechts worden *extender elements* toegepast en wordt bijgevolg een longitudinale golf waargenomen. Deze laatste heeft een duidelijk aanvangspunt en dus vormt het niet echt een probleem om de aankomsttijd te schatten. Dit is niet het geval bij de transversale spanningsgolf. Voor de eerste echte piek zijn duidelijk verstoringen waar te nemen ten gevolge van het *near field effect*.



Figuur 19: Illustratie near field effect (J. Kumar & B.N. Madhusudhan, 2010)

Dit *near field effect* zou moeten afnemen naarmate de frequentie van het ingangsignaal toeneemt. In de literatuur is vaak een eis naar minimale $\frac{L}{\lambda}$ -waarde te vinden. Hierin is L de lengte van het grondmonster en λ de golflengte. Aan te raden waardes gaande van 1 tot 9 zijn terug te vinden in de literatuur (J. Kumar & B.N. Madhusudhan, 2010),(A. Ibrahim et al., 2011),(J.F. Camacho-Tauta et al.,

2012). Ook een kleinere verhouding tussen diameter proefstuk over lengte proefstuk zou het *near field effect* verkleinen (A. Ibrahim et al., 2011).

Er zijn verschillende mogelijkheden om de tijdverschuiving van beide signalen visueel vast te stellen. In bovenstaande grafieken worden de *peak to peak* en *first time of arrival* weergegeven.

De tijdsmeting kan ook vervangen worden door andere technieken. Een voorbeeld hiervan is de kruiscorrelatie. De kruiscorrelatie geeft aan in welke mate de golfvorm van twee signalen met onderling een eventuele verschuiving in de tijd op elkaar lijken en kan gebruikt worden om deze tijdsverschuiving te bepalen. Als er sprake is van een vertraagd signaal, zal de kruiscorrelatie bij het onderhavige tijdsverschil een maximum vertonen.

In formulevorm wordt dit (Chan, 2010):

$$CC_{yx}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{T} x(t)y(t+\tau)dt$$

Hierin is x(t) het ontvangen signaal en y(t) het uitgezonden signaal. T is het tijdsdomein waarbinnen beide signalen geregistreerd worden. Bovenstaande integraal kan ook uitgewerkt worden met behulp van Fouriertransformaties. Het *cross power spectrum* ($G_{yx}(f)$) wordt gedefinieerd als het product van de Fouriergetransformeerde van x(t) met het complex toegevoegde van de Fouriergetransformeerde van y(t). Vervolgens kan de kruiscorrelatie bekomen worden door de inverse Fouriertransformatie van het *cross power spectrum* te nemen. Waar deze functie een maximum vertoont, daar is in abscis de tijdverschuiving van beide signalen terug te vinden.

Chan (2010) concludeert in zijn werk dat zowel tijdsdomein analyses als frequentiedomein analyses vergelijkbare resultaten opleveren en er geen prefereerbare methode is. Hij heeft bijgevolg de voorkeur aan de tijdsdomein metingen wegens hun eenvoud.

Tenslotte kan de initiële glijdingsmodulus van het materiaal bepaald worden aan de hand van volgende formules (F.E. Richart et al., 1970):

$$E_0 = \rho \frac{l^2}{t_1^2}$$
$$G_0 = \rho \frac{l^2}{t_s^2}$$

2.6. Impulse excitation of vibration test

Deze testopstelling werd in 1986 voorgesteld door J.H. Gaidis en M. Rosenburg als alternatief op de *forced resonance method*. Er wordt niet langer een sinusoïdale excitatie uitgeoefend op de proefstukken, maar een impactbelasting. In 1991 werd de test genormeerd in ASTM E 1876 en later werd deze ook toegevoegd aan ASTM C 215 voor het specifiek gebruik bij betonnen proefstukken. Waar de *forced resonance method* en *benchtop bender element test* reeds goed zijn ingeburgerd in het grondmechanisch onderzoek, is dit niet het geval met de *impulse excitation of vibration test*.

Met behulp van een kleine hamer of door middel van een valgewicht wordt een impact belasting uitgeoefend op een proefstuk. Ten gevolge van deze impact trilt het proefstuk in zijn natuurlijke frequenties. Deze trilling wordt in het tijdsdomein geregistreerd. Dit gebeurt door een *transducer*. Er wordt het onderscheid gemaakt tussen contactloze (microfoon) en contact *transducers* (versnellingsmeter). De frequentiecomponenten van de trilling kunnen afgeleid worden met behulp van een oscilloscoop en de *fast Fourier transformation*. Op die manier wordt de trilling van het tijdsdomein omgezet naar het frequentiedomein. Meer informatie over Fouriertransformaties is terug te vinden in een aparte sectie van deze thesis. Tenslotte biedt ASTM E 1876 analytische formules ter bepaling van de E₀ en G₀-modulus. Deze formules brengen naast de eigenfrequenties ook de massa en geometrie van de proefstukken in rekening.



ELECTRICAL SYSTEM

Figuur 20: Schematisering Impulse excitation of vibration test (ASTM E 1876)

De test heeft voordelen in vergelijking met de *forced resonance method*. Qua apparatuur is de test eenvoudiger. Zo moet geen elektro-mechanische aandrijfinstallatie met variabele frequentie voorzien worden maar volstaat een eenvoudige hamer. Hierbij worden afmetingen en gewicht van de hamer bepaald door de grootte en het gewicht van de proefstukken. De impact moet immers zwaar genoeg zijn om een meetbare trilling te genereren in de proefstukken maar mag de proefstukken niet beschadigen. Verder ligt de meetsnelheid ook hoger in vergelijking met de *forced resonance method* en kan een grotere variëteit aan proefstukafmetingen getest worden. J.H. Gaudis en M. Rosenburg (1986) vergeleken beide testmethodes op een aantal proefstukken en concludeerden dat beide testen qua resultaat erg gelijke eigenfrequenties opleveren. Dit is weergegeven in onderstaande figuur.

Prism Size, mm	ASTM C 215 Method Frequency (Hz)	Spectrum Analyzer Frequency (Hz)	
76.2 × 102 × 406	1762	1760	
76.2 × 102 × 406	1725	1720	
76.2 × 102 × 406	728	620	
76.2 × 102 × 406	1936	1860	
76.2 × 102 × 406	1912	1920	
76.2 × 102 × 406	1243	980	
25.4 × 25.4 × 279	1148	1160	
25.4 × 25.4 × 279	1077	1060	
25.4 × 25.4 × 279	977	980	
25.4 × 25.4 × 279(γ)	501	400	

γ damaged by freezing and thawing cycling.

Figuur 21: Vergelijking forced resonance method met impulse excitation of vibration test (J.H. Gaudis & M. Rosenurg, 1986)

Het toepassingsgebied van de *impulse excitation of vibration* test is echter beperkt. Zo zijn er enkel analytische formules beschikbaar in de norm voor cilindrische, balkvormige of schijfvormige elementen. De proefstukken moeten elastisch, homogeen en isotroop zijn. Verder vermeld ASTM E 1876 een maximum verhouding dwarsafmeting over lengte van 0.2. Dit kan wel versoepeld worden in andere ASTM codes. Zo wordt voor betonnen proefstukken (ASTM C 215) een maximum van 0.5 vooropgesteld.

De bedoeling van de test is de eigenfrequentie in compressie, buiging en torsie te bepalen. Hiertoe moet het proefstuk in staat zijn in de overeenkomstige eigenmode te trillen. Hiertoe moeten de posities van ondersteuningen en versnellingsmeter goed doordacht worden. Deze maken immers contact met het proefstuk en belemmeren dus de vrije trilling.

Iedere eigenmode wordt gekarakteriseerd door *nodes* en *antinodes*. Deze eerste zijn alle punten die tijdens de trilling geen beweging ondergaan. De *antinodes* zijn dan weer de punten die tijdens de trilling maximale uitwijkingen ondergaan. De ondersteuningen worden steeds voorzien ter plaatse van de *nodes*. Op die manier belemmeren zij de vrije trilling niet. Voor de versnellingsmeter kan dergelijke methodiek niet toegepast worden want ter plaatse van een *node* kan geen trilling geregistreerd worden. Ter plaatse van de *antinode* zou de geregistreerde uitwijking het duidelijkst zijn maar dit impliceert dan weer een belemmering van deze uitwijking. Daarom wordt geopteerd om de versnellingsmeter zo dicht mogelijk tegen de *node* te plaatsen, zodat nog net een duidelijke uitwijking geregistreerd wordt. Als alternatief kan ook een microfoon toegepast worden. Om tenslotte een goede trilling te genereren in het proefstuk dient de impact te geschieden ter plaatse van een *antinode*.

Bij de buigingsmode bevinden de *nodal lines* zich op 0.2241 van de uiteinden. Hierin is 1 de lengte van het proefstuk. De *antinodes* bevinden zich ter hoogte van de uiteinden en op halve overspanning. Met het bovenstaande in acht genomen, wordt een configuratie zoals in onderstaande figuur bekomen. Ter volledigheid wordt vermeld dat X1 zich ook op het uiteinde tegenover M1 kan bevinden.


Figuur 22: Configuratie buigingsmode (ASTM E 1876)

Bij de compressie- of longitudinale mode bevindt de *nodal line* zich op halve lengte. Bijgevolg bevindt zich daar de ondersteuning. De *antinodes* bevinden zich ter plaatse van de uiteinden. Wegens geen ander alternatief wordt de versnellingsmeter daar geplaatst.



Figuur 23: Configuratie longitudinale mode (ASTM E 1876)

Tot slot wordt in onderstaande figuur de configuratie bij de torsiemode gegeven. Opdat zeker geen buigingsmode zou opgemeten worden, wordt de versnellingsmeter geplaatst op 0.2241 van het uiteinde. Verder zijn posities van impact en versnellingsmeter gelegen in diagonale kwadranten.



Figuur 24: Configuratie torsiemode (ASTM E 1876)

Alhoewel de analytische bepaling van de G_0 -modulus eenvoudiger en nauwkeuriger is voor cilinders dan voor balken, is het opmeten van de eigenfrequentie in torsie niet evident. ASTM C 215 stelt voor om de versnellingsmeter te bevestigen aan een opgelijmd opzetstuk en beveelt een tangentiële impact aan.



Figuur 25: Opmeting eigenfrequentie in torsie bij cilinders (ASTM C 215)

De G_0 -modulus wordt bepaald uitgaande van de eigenfrequentie in torsie. De E_0 -modulus kan berekend worden uitgaande de transversale of longitudinale eigenfrequentie. De analytische formules zijn quasi identiek aan deze vermeld in ASTM C 215. Enkel bij de berekening van de E_0 -modulus uitgaande van de longitudinale eigenfrequentie is er een kleine aanpassing. Een overzicht van formules toepasselijk voor cilindervormige proefstukken wordt gegeven in onderstaande tabel.

	ASTM C 215	ASTM E 1876
G ₀	$\frac{16}{\pi} \frac{l}{D^2} m f_{1,tor}^2$	$\frac{16}{\pi} \frac{l}{D^2} m f_{1,tor}^2$
E _{0_f,lon}	$\frac{16}{\pi} \frac{l}{D^2} m f_{1,lon}^2$	$\frac{16}{\pi} \frac{l}{D^2 K} m f_{1,lon}^2$
$E_{0_{f,tra}}$	$1.6067 \frac{l^3}{D^4} m f_{1,tra}^2 T$	$1.6067 \frac{l^3}{D^4} m f_{1,tra}^2 T$

Figuur 26: Vergelijking analytische formules ASTM C 215 en ASTM E 1876

Hierin is K een correctiefactor in functie van de verhouding diameter over lengte en de coëfficiënt van Poisson.

$$K = 1 - \left(\frac{\pi v D}{\sqrt{8}l}\right)^2$$

Voor een cilinder met coëfficiënt van Poisson gelijk aan 0.2 en een verhouding diameter over lengte gelijk aan 0.5 is K=0.988.

2.7. Laser Doppler vibrometer

2.7.1. Doppler effect

Beschouw een bron die een golfvorm uitzendt. Dit kan bijvoorbeeld een geluidsgolf of lichtgolf zijn. De frequentie van de golf wordt gegeven door de verhouding van golfsnelheid over golflengte, of in formulevorm:

$$f_0 = \frac{a}{2}$$

Het is evident dat deze golfvorm met eenzelfde frequentie een stilstaande ontvanger bereikt.

Beschouw vervolgens nog steeds een stilstaande ontvanger maar een bewegende bron met snelheid v_s in de richting van de ontvanger. Ten gevolge van deze snelheid verkleint de waargenomen golflengte ter plaatse van de ontvanger. Dit komt overeen met een toename van de geregistreerde frequentie door de ontvanger (W.R. Hendee & E.R. Ritenour, 2002).

$$\lambda = \frac{c - v_s}{f_0}$$
$$f = \frac{c}{\lambda} = f_0 \frac{c}{c - v_s}$$

Door het minteken in bovenstaande formule te wijzigen in een plusteken, wordt een daling van de ontvangen frequentie bij het vergroten van de afstand tussen bron en ontvanger bekomen. Beide gevallen worden geïllustreerd in onderstaande figuur.



Figuur 27: Doppler effect bij bewegende bron (W.R. Hendee & E.R. Ritenour, 2002)

Identieke formules kunnen afgeleid worden voor een stilstaande bron en bewegende ontvanger. Dan is v_s uiteraard de snelheid van de ontvanger.

De frequentieverschuiving ten gevolge van het Doppler effect kan vervolgens geschreven worden als:

$$\Delta f = f - f_0 = \pm f_0 \frac{v_s}{c \mp v_s} \approx \pm f_0 \frac{v_s}{c} = \pm \frac{v_s}{\lambda}$$

De benadering geldt voor c>>v_s. Het teken is afhankelijk van bewegingszin bron/ontvanger.

Beschouw tenslotte een vaste zender en ontvanger op eenzelfde locatie. De uitgezonden golf wordt gereflecteerd op een bewegend voorwerp. Als de bewegingszin van het voorwerp evenwijdig is met de uitgezonden golf, dan dient bovenstaande frequentieverschuiving verdubbeld te worden. Wordt het meer algemene geval beschouwd waar de invalshoek tussen uitgezonden golf en bewegingsrichting object ϑ is, dan geldt:

$$\Delta f \approx \pm 2f_0 \frac{v_s}{c} \cos\theta$$

2.7.2. Optische interferentie

De werking van een laser Doppler vibrometer (LDV) steunt op het principe van optische interferentie.

De LDV bestaat uit een helium-neon laser. Zoals gekend produceert deze een straal monochromatisch licht. Door gebruik te maken van een *beam splitter* wordt deze straal opgesplitst in twee stralen met gelijke energie-inhoud ($I_1=I_2=I$). Er wordt gesproken over de *reference beam* en de *object beam*. Deze laatste wordt gericht op het bewegend object en teruggekaatst. Via twee andere *beam splitters* wordt de gereflecteerde *object beam* herenigd met de *reference beam*.



Figuur 28: Configuratie LDV (Polytec user manual)

De beweging van het object kan nu op twee verschillende manieren bepaald worden. Een eerste maakt gebruik van de intensiteit van de ontvangen laserstralen. De samengestelde straal die opgevangen wordt door de detector heeft een intensiteit gegeven door onderstaande formule.

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \frac{2\pi (r_1 - r_2)}{\lambda}$$

Hierin is λ de golflengte van de uitgezonden straling en r de afgelegde weg die beide laserstralen afleggen. Indien r₂ hoort bij de *reference beam*, dan is deze een constante. r₁ is echter afhankelijk van de beweging van het voorwerp en dus in functie van de tijd. In het geval van de LDV, hebben beide lasers een gelijke intensiteit I. Dit leidt tot:

$$I_{tot} = 2I(1 + \cos\frac{2\pi(r_1 - r_2)}{\lambda})$$

De detector registreert de variaties in intensiteit en hieruit kan de verplaatsing van het object in functie van de tijd bepaald worden. Zo wordt dus uitgaande van een faseverschuiving de beweging van het object in functie van de tijd bepaald.

Een tweede mogelijkheid is maakt geberuik van het Doppler effect. De gereflecteerde *object beam* heeft immers een frequentieverschuiving ondergaan in vergelijking met de *reference beam*. De superpositie van twee golven met lichtelijk verschoven frequenties genereert een signaal vergelijkbaar

met onderstaande figuur. De *beat frequency* van dit signaal is gelijk aan de absolute waarde van de frequentieverschuiving van beide golven.



Figuur 29: Superpositie twee golven met frequentieverschuiving (http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/sound/beat.html)

Deze *beat frequency* is, volgens de theorie van Doppler, evenredig met de snelheid van het object. Omdat steeds de absolute waarde van de frequentieverschuiving geregistreerd wordt door de detector, is het niet mogelijk om de zin van de snelheidsvector te bepalen. Dit kan wel mits toevoeging van een *Bragg Cell*. Deze geeft een frequentieverschuiving van 40 MHz aan de *reference beam*. Wanneer het voorwerp in rust is wordt dus een frequentieverschuiving van 40 MHz bekomen. Deze wordt kleiner wanneer het voorwerp naar de LDV toe beweegt en groter indien omgekeerd.

De twee mogelijke meetmethoden zijn hieronder schematisch weergegeven.



Figuur 30: Meetmogelijkheden LDV (Polytec user manual)

2.8. Fouriertransformatie

In onderstaande paragrafen wordt getracht een inzicht te geven in de Fouriertransformatie (S. Smith, 1998). Deze techniek stelt in staat om een tijdsignaal om te zetten naar het frequentiedomein. Een zeer krachtig instrument om de eerste fundamentele eigenfrequentie van een systeem te bepalen. Zo kunnen stijfheidkarakteristieken bepaald worden zonder dat een tijdsmeting moet geschieden. De techniek wordt onder andere toegepast bij de *impulse excitation of vibration* test en bij het gebruik van de LDV.

De grondlegger voor deze techniek is Jean Baptiste Joseph Fourier.

2.8.1. Reële discrete Fouriertransformatie

Een algemene definitie voor een transformatie is het omzetten van een set data naar een andere set data. Dit is te beschouwen als een uitbreiding van het gekende functievoorschrift. De reële discrete Fouriertransformatie (RDFT) zet een discrete tijdsignaal, bestaande uit reële waarden, om naar twee reële signalen in het frequentiedomein.

Fourier publiceerde in 1807 een paper waarin hij aanhaalt dat iedere set data kan ontbonden worden in een lineaire combinatie van sinusoïden (sinus- en cosinusfuncties). Lagrange weerlegde dat dit maar benaderend is voor continue functies die hoeken vertonen. Voor discrete functies is de theorie echter steeds exact.

De RDFT transformeert een ingangsignaal bestaande uit N waarden of *samples* naar twee uitgangsignalen, elk bestaande uit N/2+1 waarden. De eerste groep bevat de (verschaalde) amplitudes van de cosinusfuncties, de tweede groep deze van de sinusfuncties. Deze worden ook wel de reële en imaginaire waarden genoemd maar het betreft hier louter reële getallen. In formulevorm wordt dit:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N/2} ReX^*[k] \cos \frac{2\pi kn}{N} + \sum_{k=0}^{N/2} ImX^*[k] \sin \frac{2\pi kn}{N}$$

Hierin is zijn $ReX^*[k]$ en $ImX^*[k]$ de amplitudes van de basisfuncties waarin het signaal opdeelbaar is. Deze zijn niet volledig gelijk aan het resultaat van de RDFT. Volgende verschaling dient te gebeuren.

$$ReX^{*}[k] = \frac{2}{N}ReX[k]$$
$$ImX^{*}[k] = -\frac{2}{N}ImX[k]$$

Voor de uiterste waarden van de reële amplitudes (k=0 en k=N/2) dient dit nog gedeeld te worden door 2. Bovenstaande formules leveren het tijdsignaal op wanneer het frequentiedomein gekend is. Dit is de inverse RDFT.

Merk op dat het frequentiedomein uitgezet wordt in functie van de parameter k. Er zijn ook andere mogelijkheden. Zo kan het frequentiedomein ook uitgezet worden in functie van f of ω . Deze eerste is de fractie van de *sampling rate* (=k/N), gaande van 0 tot 0.5, rekening houdend met het feit dat discrete signalen enkel frequenties bevatten tussen 0 en 0.5 van de *sampling rate*. De tweede mogelijkheid maakt gebruik van de natuurlijke frequentie $\omega=2\pi f$. Een laatste methode is de horizontale as te verdelen in termen van de toegepaste frequentie van het ingangsignaal. Indien voor het ingangsignaal bijvoorbeeld een frequentie van 10 kHz toegepast wordt, dan wordt de horizontale as gelijk opgedeeld tussen 0 en 5 kHz.

De voorwaartse RDFT kan op verschillende manieren berekend worden. De eenvoudigste, maar bewerkelijkste, is het oplossen van een stelsel vergelijking op basis van bovenstaande formules. Er kunnen N vergelijkingen opgesteld worden waarbij het linkerlid, zijnde het tijdsignaal, gekend is. Deze N vergelijkingen bevatten N+2 onbekenden. Twee hiervan kunnen echter steeds geschrapt worden. Het gaat om ImX[0] en ImX[N/2]. Deze worden immers vermenigvuldigd met respectievelijk sin(0) en sin(π n) en leveren dus geen bijdrage aan het tijdsignaal. Het stelsel bevat bijgevolg evenveel onbekenden als vergelijkingen en is oplosbaar.

Een tweede methode die de standaardmethode is voor kortere (minder dan 32 *samples*) tijdsignalen is de correlatiemethode. Deze methode steunt op een algoritme die twee signalen met elkaar vergelijkt. De uitkomst is een getal dat een maat is voor de gelijkenis tussen de twee signalen. Dit getal wordt bekomen door de overeenkomstige waarden van beide signalen te vermenigvuldigen en dit voor alle waarden op te tellen. De amplitudes van de basisfuncties zijn gewenst. Hiertoe wordt het tijdsignaal gecorreleerd met elk van de basisfuncties. Levert dit als resultaat nul op, dan is de basisfunctie niet aanwezig in het tijdsignaal. Levert dit een getal op verschillend van nul, dan is dit de verschaalde amplitude van de basisfunctie. Of in formulevorm:

$$ReX[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cos \frac{2\pi kn}{N}$$
$$ImX[k] = -\sum_{n=0}^{N-1} x[n] \sin \frac{2\pi kn}{N}$$

Een derde methode ter berekening van de voorwaartse DFT is de *fast Fourier transform* (FFT). Hier wordt een aparte paragraaf aan besteed.

In onderstaande figuur is het principe van de RDFT weergegeven.



Figuur 31: Principe RDFT (S. Smith, 1998)

2.8.2. Complexe discrete Fouriertransformatie

De reële DFT bevat een aantal onvolmaaktheden. Het gaat hier voornamelijk om het niet in rekening brengen van negatieve frequenties en de aparte verschaling voor ReX[0] en ReX[N/2]. Deze vervallen bij de complexe discrete Fouriertransformatie (CDFT). Deze transformatie biedt verder ook een opstap voor de Laplacetransformatie en Z-transformatie.

Als belangrijkste nadeel dient vermeld te worden dat de CDFT gecompliceerder en minder overzichtelijk is. Er wordt hier dan ook niet diep op ingegaan.

De CDFT transformeert een set van N complexe getallen naar een andere set van N complexe getallen. Een complex getal bestaat uit een reëel en imaginair deel. Bijgevolg zijn er eigenlijk twee ingangsignalen die omgezet worden naar twee uitgangsignalen. Een werkelijk tijdsignaal bestaat uiteraard enkel uit reële waarden. De vector met de imaginaire waarden bestaat dan enkel uit nullen. Dit is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 32: Principe CDFT (S. Smith, 1998)

In de meeste toepassingen worden enkel de eerste N/2+1 waarden van het frequentiedomein gebruikt. Deze bevatten de positieve frequenties.

De inverse en voorwaartse CDFT wordt weergegeven in onderstaande formules.

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{\frac{i2\pi kn}{N}}$$
$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{i2\pi kn}{N}}$$

2.8.3. De fast Fourier transformation

Deze methode is een derde oplossingstechniek om de voorwaartse Fouriertransformatie te berekenen. Ze levert dezelfde resultaten als het oplossen van het stelsel vergelijkingen of de correlatiemethode, maar is veel efficiënter en kan de berekeningstijd tot honderd maal verkleinen bij grotere datasets.

De *fast Fourier transformation* (FFT) maakt gebruik van de CDFT. Er dient dus onthouden te worden dat zowel ingangsignaal als uitgangsignaal bestaan uit complexe getallen. In onderstaande wordt het principe van de FFT geïllustreerd. De achterliggende betekenis is gebaseerd op de complexe getallenleer. Hier wordt niet verder op ingegaan.

Een eerste stap is het ingangsignaal, bestaande uit een complexe vector met N waarden, op te splitsen in N complexe vectoren elk bestaande uit één waarde. Dit proces heet *time domain decomposition*. Het opsplitsen van deze vectoren gebeurt in verschillende fasen. Een voorbeeld is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 33: Voorbeeld time domain decomposition (S. Smith, 1998)

In dit voorbeeld wordt, in verschillende stappen, een complex tijdsignaal bestaande uit 16 waarden opgesplitst in 16 complexe tijdsignalen. Als bovenstaande figuur bestudeerd wordt, kan opgemerkt worden dat er telkens een opsplitsing gebeurt tussen de waarden op even en oneven posities in de vector. Dit heet een *interlace decomposition* en heeft een markant kenmerk. Wanneer namelijk naar de binaire notatie van de vectorpositie gekeken wordt, dan wordt ieder element na decompositie geplaatst op een positie die overeenkomt met de inverse binaire waarde van de oorspronkelijke positie. Onderstaande figuur verduidelijkt dit.

Sample numbers in normal order		Sample number after bit reversa	
Decimal	Binary	Decimal	Binary
0	0000	0	0000
1	0001	8	1000
2	0010	4	0100
3	0011	12	1100
4	0100	2	0010
5	0101	10	1010
6	0110	6	0100
7	0111	14	1110
8	1000	1	0001
9	1001	9	1001
10	1010	5	0101
11	1011	13	1101
12	1100	3	0011
13	1101	11	1011
14	1110	7	0111
15	1111	15	1111

Figuur 34: Visualisatie binaire positie (S. Smith, 1998)

Deze eigenschap heeft tot gevolg dat de decompositie zeer makkelijk programmeerbaar is. De positie van een element in een vector wordt automatisch opgeslagen als binaire code. Met behulp van een *bit reversal sorting algoritm* kan meteen de herordening geschieden.

Merk op dat deze decompositie steeds geschiedt in $\log_2 N$ stappen. Dit eist dat het oorspronkelijke tijdsignaal bestaat uit een gehele macht van twee.

Vervolgens wordt van ieder element de Fouriergetransformeerde genomen. Dit is een zeer simpele stap aangezien de Fouriertransformatie van een complexe vector bestaande uit één element gelijk is aan dit element. Deze stap vergt dus geen rekeninspanning.

De laatste stap bestaat uit de N complexe vectoren in het frequentiedomein samen te voegen tot één enkele vector. Een snelle oplossing m.b.v. een *bit reversal sorting algoritm* is hier niet mogelijk. Er moet stap voor stap teruggerekend worden. Hiertoe wordt gekeken welke stappen nodig zijn om de vectoren in het tijdsdomein terug samen te voegen en met welke acties in het frequentiedomein dit overeenkomt.

Onderstaande figuur geeft het voorbeeld van een tussenstap waarbij twee complexe vectoren bestaande uit vier elementen moeten samengevoegd worden tot één vector met acht elementen. Eerst wordt gekeken welke acties genomen moeten worden in het tijdsdomein. Beide vectoren moeten verdubbeld worden door middel van het toevoegen van nullen. Vervolgens worden beide vectoren opgeteld. Om tot de oorspronkelijke vector in het tijdsdomein te komen moet in de ene vector de nullen op de even en in de andere vector op de oneven posities voorkomen.



Figuur 35: Compositie vector in frequentiedomein (S. Smith, 1998)

Het toevoegen van nulelementen in het tijdsdomein komt overeen met een duplicatie van de elementen in het frequentiedomein. Verder wordt de ene vector in het tijdsdomein één element in de tijd verschoven, zodat de toegevoegde nullen op de oneven posities voorkomen. Een verschuiving in het tijdsdomein komt overeen met het vermenigvuldigen met een sinusoïde in het frequentiedomein. Dit wordt verduidelijkt in onderstaande afleiding.

$$F(x[n-1]) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n-1]e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} x[u]e^{-\frac{i2\pi k(u+1)}{N}} = e^{-\frac{i2\pi k}{N}} X[k]$$

Tenslotte kunnen beide vectoren in het frequentiedomein opgeteld worden. Bovenstaande procedure wordt log_2N keer herhaald en zo wordt de gezochte complexe vector in het frequentiedomein bekomen.

2.9. Sulfaataanval

Enkele van de te testen proefstukken zullen voorzien worden van concentraties aan sulfaten. Deze reageren met het cement en dit heeft een invloed op de stijfheid van de proefstukken. In onderstaande paragrafen wordt bondig het effect van sulfaten besproken.

2.9.1. Hydratatie cement

Het veel toegepaste portlandcement (CEMI) bestaat hoofdzakelijk (95%) uit de portlandklinker . Deze klinker bestaat op zijn beurt weer hoofdzakelijk uit calciumsilicaten (C_2S en C_3S), calciumaluminaat (C_3A) en calciumaluminoferriet (C_4AF). Een volledige opsomming van alle oxides en componenten van portlandcement is terug te vinden in onderstaande figuur (V. Boel, 2009).

oxide	afkorting oxide	component	afkorting component
CaO	С	3Ca0.SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2Ca0.SiO ₂	C_2S
Al ₂ 0 ₃	Α	3Ca0.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4Ca0.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4Ca0.3Al2O3.SO3	$C_4A_3\overline{S}$
SO_3	S	3Ca0.2SiO ₂ .3H ₂ O	$C_3S_2H_3^{(*)}$
H ₂ O	Н	CaSO ₄ .2H ₂ O	CSH2

(*) enkel bij volledige hydratatie

Figuur 36: Oxides en componenten van portlandcement (V. Boel, 2009)

Wanneer het cement reageert met water dan ontstaan hydratatieproducten. De calciumsilicaten worden zo omgevormd naar caciumsilicaathydraten (CSH) en calciumhydroxide (CH). Beiden echter in een andere verhouding (V. Boel, 2009).

$$C_2S => 82\% CSH, 18\% CH$$

 $C_3S => 61\% CSH, 39\% CH$

De uiteindelijke sterkte van een mortel of beton wordt voornamelijk geleverd door CSH. Hiermee rekening houdend is het vooral gunstig wanneer er hoge concentraties C_2S aanwezig zijn in de klinker. De hydratatie van C_3S geschiedt op zijn beurt dan weer veel sneller waardoor deze component vooral

bijdraagt aan de beginsterkte van de mortel of het beton. Tevens dient vermeld te worden dat voornamelijk CH verantwoordelijk is voor het alkalische karakter van de mortel (V. Boel, 2009).

Het calciumaluminaat heeft geen bijdrage aan begin- of eindsterkte van de mortel. De hydratatie ervan gaat gepaard met een grote warmteontwikkeling en zelfs een lagere uiteindelijke sterkte. Door echter een kleine hoeveelheid gips aan het portlandcement toe te voegen kunnen deze negatieve effecten weggewerkt worden. Er wordt op deze wijze ettringiet gevormd. Deze volledig onschadelijke reactie² wordt ook wel *early ettringite formation* (EEF) genoemd en mag zeker niet verward worden met de schadelijke *delayed ettringite formation* (DEF). Deze tweede vorm houdt verband met sulfaataanval (M. Collepardi, 2004).

Naast portlancement wordt vaak ook hoogovencement toegepast (CEMIII). Hoogovencement bevat een kleinere hoeveelheid portlandklinker (20-34%) aangevuld met gegranuleerde hoogovenslak (66-88%). Deze hoogovenslak bestaat uit dezelfde verbindingen als de portlandklinker, zij het in andere hoeveelheden. De hoeveelheid calciumsilicaten ligt lager, de hoeveelheid calciumaluminaat en MgO hoger.

2.9.2. Mechanisme sulfaataanval

De belangrijkste gevolgen van sulfaataanval zijn een verlies aan sterkte door omzetting van de hydratatieproducten en expansie van de cementmortel. Volgens M. Santhanam et al. (2003) is de expansie en sterkteafname groter bij hogere temperaturen en hogere concentraties aan sulfaten. Ook kunnen bepaalde toevoegingen een erg nadelige invloed hebben. Zo bijvoorbeeld de combinatie van metakaolin en magnesiumsulfaat.

Algemeen wordt er een onderscheid gemaakt tussen uitwendige en inwendige sulfaataanval. Bij uitwendige sulfaataanval moet aan drie voorwaarden voldaan zijn. De mortel moet in contact staan met een omgeving waar sulfaten in aanwezig zijn. Dit kan bijvoorbeeld verontreinigd grondwater of verontreinigde grond zijn. Er moet verder een aanwezigheid van water zijn, zo niet kunnen de sulfaten niet getransporteerd worden in de mortel. Ten laatste moet de mortel uiteraard doorlaatbaar zijn. Een minder voorkomende vorm is inwendige sulfaataanval. Hier is de bron van sulfaten niet afkomstig van de omgeving maar komt deze voor in het cement of de aggregaten. (M. Collepardi, 2004)

M. Santhanam et al. (2003) stelt dat het mechanisme van externe sulfaataanval sterk kan verschillen naargelang het type sulfaat. Een vergelijking tussen magnesiumsulfaat en natriumsulfaat werd gedaan.

Het mechanisme horende bij een aanval met natriumsulfaat is weergegeven in onderstaande figuur.

² Het onschadelijk karakter ontstaat doordat de bijhorende expansie nog vrij kan geschieden in het plastische beton.



Figuur 37: Mechanisme natriumsulfaataanval (M. Santhanam, 2003)

Wanneer het natriumsulfaat in contact komt met de mortel dan ontstaan er twee belangrijke chemische reacties. Een eerste zet de hydratatieproducten CH en CSH om naar gips. Een tweede vormt de stof ettringiet. Hier gaat het dus om DEF. Beide chemische reacties zijn hieronder weergegeven (M. Collepardi, 2004).



Er is wel enige discussie mogelijk over bovenstaande reacties. Zo stelt onder andere J. Prasad et al. (2006) dat gips enkel en alleen gevormd wordt uit CH (en niet uit CSH).

Aangezien zowel CSH als CH instaan voor de sterktevorming, gaat de vorming van gips gepaard met een sterkteafname. Ettringiet wordt gevormd uit het ontstane gips en andere hydratatieproducten die voornamelijk aluminium bevatten. De belangrijkste eigenschap van ettringiet is een grote expansie. Over de precieze oorzaak van deze expansie bestaat discussie. Twee vaak terug te vinden theorieën zijn het zwellen ten gevolge van waterabsorptie of het uitkristalliseren van ettringiet (O.S. Baghabra Al-Amoudi, 2002).

Wat bovenstaande reactie niet weergeeft, maar wat wel vermeld wordt door Baghabra Al-Amoudi (2002), is dat tegelijk met gips er ook natriumhydroxide gevormd wordt. Dit verhoogt de pH-waarde tot ongeveer 13.5. Enkel bij dergelijke hoge pH-waarden kan ettringiet gevormd worden.

De buitenste laag van de mortel is in contact met het natriumsulfaat en water. Hierdoor wordt eerst ettringiet gevormd in de toplaag van de mortel. De expansie van deze toplaag wordt tegengewerkt door de onderliggende mortel. Bijgevolg ontstaan er drukspanningen in de toplaag en trekspanningen in de onderlaag. Mortel is niet goed bestendig tegen trek en bijgevolg vormen zich inwendige scheuren.

Door desintegratie van de toplaag kan het sulfaat insijpelen naar de inwendig gescheurde regio. Hier ontstaan dezelfde chemische reacties. Het gips wordt voornamelijk afgezet in de scheuren, ettringiet vormt zich in de cementpasta zelf (M. Santhanam et al., 2003). Opnieuw ontstaan tengevolge van de afbraakproducten scheuren in de dieper gelegen regio. In dit stadium zijn er dus drie duidelijke zones in de mortel te onderscheiden. Een toplaag die volledig gedesintegreerd is, een tussenlaag waar afbraakproducten zich afzetten in holtes en pasta en tenslotte een gescheurde maar chemisch ongewijzigde regio.

Er kan geconcludeerd worden dat voornamelijk de ettringiet vorming en bijhorende expansie tot schade leidt. De meeste literatuur vermeldt geen wijziging van CSH. De mortel wordt bijgevolg niet 'chemisch' verzwakt maar uit elkaar gedrukt.

Wanneer een mortel blootgesteld wordt aan magnesiumsulfaat, dan wordt een volledig ander mechanisme gevolgd.



Figuur 38: Mechanisme Magnesiumsulfaataanval (M. Santhanam, 2003)

Vrijwel onmiddellijk wordt er een dubbele laag reactieproducten aan het oppervlak van de mortel gevormd (M. Santhanam, 2003). Deze ontstaan uit het CH. Het gaat om een laag gips en een laag bruciet (magnesiumhydroxide). In vergelijking met natriumhydroxide zorgt bruciet voor een lagere pH-waarde van ongeveer 10.5. Deze lage pH-waarde zorgt volgens Baghabra Al-Amoudi (2002) ervoor dat geen ettringiet gevormd wordt. Dit wordt bevestigd door M. Collepardi (2004). Tegelijk wilt CSH kalk afstaan om de pH-waarde weer te stabiliseren. Dit proces wordt decalcificatie genoemd. De afgestane kalk reageert echter weer met het sulfaat en er wordt meer gips en bruciet gevormd.

Dit proces is globaal weergegeven in onderstaande reactie (M. Collepardi, 2004).



Ten slotte reageert het gevormde bruciet met een ander reactieproduct, namelijk silica gel, tot de vorming van MSH.

Er kan geconcludeerd worden dat de aantasting van de mortel het gevolg is van de omzetting van CSH tot uiteindelijk MSH. Daar CSH instaat voor de sterkte van de mortel en MSH quasi geen sterkte bezit is het logisch dat dit decalcificatieproces erg schadelijk is.

Overige literatuur (M.M. Amin et al., 2007), (J. Prasad et al., 2006), (M. Santhanam, 2003) vermelden wel expliciet de vorming van ettringiet bij aanval met magnesiumsulfaten. Dit lijkt ook logisch

aangezien ettringiet zich vormt uit gips en hydratatieproducten die aluminium bevatten. Beiden zijn ook aanwezig in dit geval. Toch werd proefondervindelijk (Baghabra Al-Amoudi, 2002) vastgesteld dat de expansie van cementmortels veel geringer is bij magnesiumsulfaten in vergelijking met natriumsulfaten. Dit moet toch wijzen op een lagere ettringietproductie.



Ter volledigheid wordt ook de aanmaak van *thaumasite* vermeld. *Thaumasite* wordt gevormd uit CSH en CH. Ook hier heeft dit dus een sterkteafname tot gevolg. Naast de aanwezigheid van een sulfaat moet er echter ook een carbonaat aanwezig zijn. Waar de vorming van ettringiet beperkt is door de hoeveelheid aluminium in het cement, kan *thaumasite* blijvend gevormd worden tot er quasi geen sterkte meer aanwezig is in de mortel. (B. Winter, 2005). *Thaumasite* wordt gevormd ongeacht het type sulfaat.

2.9.3. Invloed type cement

Het type cement bepaalt in sterke mate de aantasting door sulfaten. Voornamelijk cementsoorten met een hoge concentratie aan C_3A zijn gevoelig aan sulfaataanval. Wanneer deze hoeveelheid verlaagt wordt stijgen meestal de hoeveelheden aan calciumsilicaten in het cement.

De tendens om cementsoorten te produceren die een snelle sterkteontwikkeling hebben, resulteert in hoge concentraties aan C_3S . De hydratatie van C_3S naar CH zorgt immers voor de eerste sterkte van de mortel. Een hoge hoeveelheid CH heeft echter nadelen voor de duurzaamheid van het beton. Eerder werd gezien dat de meeste sulfaten CH omzetten naar gips. Dit gips kan op zijn beurt weer de aanmaak van ettringiet bevorderen. Hoge concentraties aan CH verhogen ook drastisch de pH-waarde van de mortel. Dit op zijn beurt zorgt voor een grotere expansie van het ettringiet (Rasheeduzzafar et al., 1990).



Figuur 39: Effect C3A en C3S/C2S op sulfaatbestendigheid (Rasheeduzzafar et al., 1990)

Bovenstaande grafiek bevestigd het vermoeden dat M. Collepardi (2004) fout zit met de theorie dat gips gevormd wordt uit zowel CH als CSH. CH moet op zijn minst verantwoordelijk zijn voor het gros aan gipsontwikkeling.

Om een snelle sterkteontwikkeling te kunnen combineren met een grote duurzaamheid is al veel onderzoek verricht naar het toevoegen van puzzolanen aan het cement. Deze puzzolane materialen (bijvoorbeeld vliegas, *silica fume*, hoogovenslak) vormen het CH om tot CSH. Dit heeft verschillende voordelen (Baghabra Al-Amoudi, O.S., 2002).

- Het gevormde CSH leidt tot een hogere densiteit van de mortel. Hierdoor wordt de mortel minder penetreerbaar voor sulfaten in oplossing.
- Indien minder CH aanwezig is wordt ook minder gips en ettringiet gevormd. De pH-waarde van de mortel zal ook lager liggen.
- Puzzolane materialen bevatten geen C₃A.

Het toevoegen van deze puzzolanen levert bijgevolg een betere weerstand op tegen de meeste sulfaten. Een uitzondering hierop is magnesiumsulfaat. Reeds eerder werd gezien dat bij dit sulfaat CSH omgezet wordt naar MSH, wat geen sterkte heeft. Daarenboven wordt de beschermende bruciet-laag niet gevormd wanneer minder CH voorkomt in het cement.

3. Materialen

- 3.1. Cement
 - 3.1.1. Hoogovencement

Er wordt gebruik gemaakt van CEM III/B 42.5 N-LH/SR LA. Dit cement werd verschaft door de firma Holcim en geproduceerd te Obourg.

Een onderverdeling van de meest gebruikte cementsoorten in België volgens NBN-EN 197-1 is terug te vinden in onderstaande figuur.



DE GEWONE BELGISCHE CEMENTSOORTEN :

Figuur 40: Cementsoorten (Febelcem)

Het meest gebruikte cementtype in België is CEMI, ook wel portlandcement genoemd. Dit omdat het hoofdbestanddeel de portlandklinker is (>95 %). Deze klinker ziet eruit als een knol en wordt vervaardigd in een draaioven van meer dan 100 m lang bij een temperatuur van 1450 °C. Vervolgens wordt de knol verpulverd en gemengd met kleine hoeveelheden calciumsulfaat (CaSO₄). Wanneer geen calciumsulfaat wordt toegevoegd, ligt de hydratatiesnelheid van het cement te hoog.

De klinker bestaat uit materialen die gevormd worden door reacties bij hoge temperatuur van voornamelijk calciumoxide (CaO), siliciumdioxide (SiO₂), aluminiumoxide (Al₂O₃) en ijzeroxide (Fe₂O₃).

Een CEM III is een hoogovencement. Alhoewel er nog een belangrijke hoeveelheid klinker aanwezig is, is de belangrijkste component nu gegranuleerde hoogovenslak. De verhouding waarin klinker en slak voorkomen is afhankelijk van het type hoogovencement. Bij een CEM III/B ligt het gehalte slak tussen de 66 en 80%.

Deze slak is een afvalproduct van de ijzerproductie. Het ijzererts dat vervat zit in een ganggesteente wordt gesmolten in een hoogoven. Tijdens dit proces wordt een smeltmiddel toegevoegd om de temperatuur van het smeltproces te kunnen verlagen. Zo wordt er economischer geproduceerd. Het smeltmiddel bestaat uit kalk en dolomiet (CaMg(CO₃)₂), het ganggesteente bevat SiO₂ en Al₂O₃. Het mengsel van deze componenten heeft een lagere dichtheid dan het gesmolten ijzer en komt bijgevolg boven drijven. Met behulp van een aftappingssysteem kan dit vervolgens gescheiden worden van het ijzer. Bij het verlaten van de hoogoven wordt de slak snel afgekoeld met behulp van water. Hierdoor ontstaat een glasachtige structuur.

Uit bovenstaande paragraaf, en zoals eerder al vermeld, blijkt dat gegranuleerde hoogovenslak hoofdzakelijk uit dezelfde oxiden bestaat als de portlandklinker. Deze komen echter in andere verhoudingen voor. In onderstaande tabel is de chemische samenstelling van het gebruikte cement van Holcim terug te vinden. Deze zijn gemiddelde waarden en louter indicatief.

	RESULTATEN (%)	EISEN (%) NORM(EN)
CaO	47,1	-
SiO ₂	28,9	-
Al ₂ O ₃	9,1	-
Fe ₂ O ₃	1,8	-
MgO	6,0	-
Na ₂ O	0,35	-
K ₂ O	0,61	-
Na ₂ O-éq	0,75	≤ 1,30
SO₃	3,1	≤ 4,0
Cl⁻	0,06	≤ 0,10
Gloeiverlies	0,1	≤ 5,0
Onoplosbare rest	0,4	≤ 5,0

Figuur 41: Chemische samenstelling CEM III/B 42.5 N LH/SR LA

De reactie van slak met water verloopt zeer moeizaam. Er wordt een dichte laag van hydratatieproducten gevormd rond de slak die de verdere hydratatie bemoeilijkt. Daarom is het belangrijk dat er voldoende activerende stoffen zoals klinker en/of calciumsulfaat aanwezig zijn in het cement.

In volgende paragrafen wordt de cementcodering van het gebruikte cement verder toegelicht.

De normsterkte van een cement is de drukweerstand bepaald volgens de norm NBN EN 196-1 gemeten na 28 dagen. Er bestaan drie verschillende sterkteklassen: 32.5, 42.5 en 52.5. Daarnaast

vermeldt de norm ook de vereiste beginsterktes gemeten na twee of zeven dagen. De codering N slaat op een gewone druksterkte op korte termijn, R staat voor een hogere beginsterkte. In onderstaande tabel zijn alle vereisten per type weergegeven.

	Drukweerstand MPa				Begin van de binding	Stabiliteit (uitzetting)
Starktaklassa	Begin	sterkte	Normsterkte		-	
Sterkteklasse	2 dagen	7 dagen	28 d	lagen	min	mm
32,5 N	-	≥ 16,0				
32,5 R	≥ 10,0	-	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	
42,5 N	≥ 10,0	-				
42,5 R	≥ 20,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	≤ 10
52,5 N	≥ 20,0	-				
52,5 R	≥ 30,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	

Figuur 42: Sterkteklassen cement (Boel, 2009)

Voor bepaalde toepassingen is de sterkteklasse R nog ontoereikend. Denk hierbij aan de prefab industrie waar snel moet kunnen ontkist worden. Hiervoor bestaan de HES cementsoorten. HES staat voor *High Early Strength*. De eisen betreffende HES cement worden geformuleerd in NBN B12-110. Zo bereikt een cement 52.5 R HES reeds na 1 dag een druksterkte van 20 MPa.

De aanduiding SR staat voor *Sulphate Resistance*. Vaak wordt ook de term *High Sulphate Resistance* (HSR) toegepast. Dit duidt op een cementsoort die goed bestand is tegen sulfaataanval. De norm NBN B15-001 schrijft het gebruik van sulfaatbestendig cement voor bij sulfaatgehaltes hoger dan 500 mg/kg in water of 3000 mg/kg in grond. Een hoogovencement CEM III/B is steeds sulfaatbestendig. Portlandcement is dit enkel wanneer het gehalte Al₂O₃ lager ligt dan 5%.

De aanduiding LA geeft weer dat het cement een laag alkali gehalte heeft. Hierdoor is de mortel of het beton minder gevoelig aan de alkali-silica reactie (ASR). Deze reactie vindt plaats wanneer aan drie voorwaarden voldaan is. De gebruikte granulaten bevatten reactief silicium, er zijn niet-gebonden alkaliën aanwezig in de mortel en er is de aanwezigheid van water. ASR kan leiden tot betonschade en is het eenvoudigst te vermijden door het alkali gehalte van de mortel te verlagen. Vandaar de mogelijkheid om te kiezen voor een LA cement.

Een LH cement bezit een lage hydratatiewarmte. Bij de hydratatie van cement ontstaat onvermijdelijk warmte. Hierdoor ontstaat een uitzetting van de nog vloeibare specie. Tijdens de verharding koelt de mortel opnieuw af en dit gaat gepaard met een thermische krimp. Bij massieve betonnen constructies is er een grote warmteontwikkeling en bijgevolg ook een grote krimp. Vaak is de wapening van deze constructies onvoldoende om scheurvorming tengevolge van deze krimp tegen te gaan. Door een LH cement te gebruiken verlaagt de warmteontwikkeling en treden deze problemen minder snel op.

3.1.2. Georoc producten

Naast het eerder traditionele hoogovencement worden ook Georoc producten van de firma Holcim als binder gebruikt. Uit het eerder brede assortiment worden de binders ROC SI en ROC SOL toegepast.

ROC SI is een hydraulisch bindmiddel toegepast in de wegenbouw voor de in situ behandeling van siliciumhoudende gronden. Het product kan zowel gebruikt worden als grondverbeteringstechniek (verbetering van de onmiddellijke berijdbaarheid) en als grondstabilisatie. Het bindmiddel bevat vooral klinker, een specifieke chemische samenstelling wordt niet vrijgegeven door Holcim. De dosering ligt tussen de 2 en 7% (gewichts% op droge stof).

ROC SOL heeft een wat breder toepassingsgebied in vergelijking met ROC SI. Het hydraulisch bindmiddel kan gebruikt worden als grondverbetering voor de aanzet van de weg, grondstabilisatie voor onderfunderingen en funderingen en grondverbetering voor sleufaanvullingen en ophogingen. Afhankelijk van de toepassing varieert de dosering tussen 1 en 7%. Ook hier is het bindmiddel vooral geschikt voor de behandeling van kleihoudende materialen.

Desondanks de hierboven vermelde praktische doseringen, zal een gelijke dosering van alle types bindmiddelen gekozen worden. Dit om de testresultaten goed met elkaar te kunnen vergelijken.

3.2. Kaoliniet

Er wordt voor gekozen om geen gebruik te maken van een in de natuur voorkomende kleigrond. In plaats daarvan wordt er gebruik gemaakt van kaoliniet. Het gaat om kaoliniet van de firma Goonvean, geleverd in zakken van 25 kg.

Kaoliniet is samen met illiet en montmorilloniet het vaakst voorkomende mineraal in kleigronden. Het bestaat uit een plaatjesstructuur van silicium-aluminiumoxides die verbonden zijn met waterstofverbindingen.



Figuur 43: Structuur kaoliniet (M. Budhu, 2011)

Dit kleimineraal heeft het grote voordeel dat het erg homogeen is. Een werkelijke kleigrond kan organische of andere insluitsels bevatten. Deze kunnen de cementatie en stijfheidsontwikkeling sterk beïnvloeden.

Het fysisch en mechanisch gedrag van een grondsoort is sterk afhankelijk van zijn watergehalte. Afhankelijk van het watergehalte kan grond voorkomen in vloeibare, plastische, semi-vaste of vaste vorm. De plasticiteitsindex (PI) geeft weer wat de toevoeging aan watergehalte moet bedragen om van een semi-vaste naar vloeibare vorm over te gaan. Dit geeft met andere woorden de grootte van het gebied (in watergehalte) weer waarbij de grond zich plastisch gedraagt.



Figuur 44: Weergave grondtoestanden in functie van watergehalte (M. Budhu, 2011)

$$PI = LL - PL$$

De plasticiteitsindex van een kleigrond is sterk afhankelijk van de aanwezige kleimineralen en kan bijgevolg sterk variëren, gaande van 15 tot 100 %. De plasticiteitsindex van kaoliniet daarentegen is nauwkeuriger bepaald (10-25 %).

Het gebruik van kaoliniet is ook sterk ingeburgerd in eerder onderzoek. Hierdoor kunnen de verkregen resultaten vergeleken worden met dit eerder onderzoek en kan gefocust worden op het effect van de proefmethode, type cement, sulfaten, enz.

3.3. Natriumsulfaat

Enkele cement-kaoliniet monsters zullen onderworpen worden aan sulfaataanval. Er wordt gebruik gemaakt van natriumsulfaat van het merk Prolabo. In onderstaande tabel is onder andere de chemische samenstelling terug te vinden.

AnalaR NORMAPUR analytical reagent				
Zuiverheid	100%			
pH (25°C,5%)	5.2->8			
Zware metalen (zoals lood)	Max. 5 ppm			
Onoplosbaarheid in water	Max. 100 ppm			
Gloeiverlies (800°C)	0.5%			
Cl	Max. 10 ppm			
PO4	Max. 10 ppm			
N	Max. 5 ppm			
As	Max. 1 ppm			
Ca	Max. 50 ppm			
Fe	Max. 5 ppm			
K	Max. 20 ppm			
Mg	Max. 10 ppm			

Figuur 45: Gegevens gebruikt natriumsulfaat

Voor de sulfaatconcentraties in grondwater en (luchtdroge) grond is in NEN-EN 206-1 een indeling naar de mate van agressiviteit vastgelegd.

Agressiviteit	Milieuklasse volgens NEN-EN 206-1	Sulfaatconcentratie grondwater SO4 ²⁻ mg/l	Sulfaatconcentratie grond SO4 ²⁻ mg/kg
licht	XA1	200 - 600	2000 - 3000²
matig	XA 2	600 - 3000	3000² - 12000
sterk	XA 3	3000 - 6000 ³	12000 - 24000 ³

Figuur 46: Indeling agressiviteit grondwater/bodem o.b.v. sulfaatconcentratie (NEN-EN 206-1)

Volgens de Belgische norm NBN B12-108 moet er verplicht een SR cement toegepast worden wanneer de concentratie aan sulfaten >500 mg/l in water of >3000 mg/kg in grond.

Sulfaatconcentraties die in werkelijke bodems voorkomen kunnen sterk variëren. A.J. Puppala (2005) vermeldt een aantal *case studies* waar schade aan constructies is opgetreden ten gevolge van ettringietvorming in gestabiliseerde bodems. De concentraties aan aanwezige sulfaten variëren hier van 320 tot 43500 mg/kg. Het is dus duidelijk dat niet alleen de concentratie aan sulfaten essentieel is voor eventuele schade maar ook omgevingsomstandigheden, chemische samenstelling grond, enzovoort.

Reference (Year)	Location	Soil type	Lime (L)/cement (C) percent level	Sulfate content (mg/kg)	Heave appearance after construction
Mitchell (1986)	Las Vegas, Nev.	Silty clay	4% (L)	Up to 15,000	2 years
Hunter (1988)	Stewart Avenue, Las Vegas, Nev.	Silty clay	4.5% (L)	43,500	6 months
Perrin (1992)	Lloyd Park, Joe Pool Lake, Dallas, Tex.	OC Clays	5% (L)	2,000-9,000	Immediately
Perrin (1992)	Auxiliary Runway, Laughlin AFB, Spofford, Tex.	Clays	6–9% (L)	14,000-25,000	2 months
Perrin (1992)	Cedar Hill State Park, Joe Pool Lake, Dallas, Tex.	Highly plastic residual clays	6% (L)	21,200	2 months
McCallister and Tidwell (1994)	Denver International Airport, Denver, Colo.	Expansive clays	NA (L)	2,775	NA
Kota et al. (1996)	SH-118, Alpine and SH-161, Dallas, Tex.	Clayey subgrades	4% (C) 6-7% (L)	>12,000	6 to 18 months
Burkartet al. (1999)	Localities in Dallas– Fort Worth Region, Tex.	Clays	6%–9% (L)	233-18,000	Varies
Puppala (1999)	Dallas–Fort Worth International Airport, Irving, Tex.	Clay	5% (L)	320-13,000	3 months
Gaspard, personal communication, 2000	Near Shreveport, La.	Aggregates	NA	NA	NA
Rollingsee and Rollings (2003)	Holloman Air Force Base, N.M.	Crushed concrete	NA	NA	Several years

Note: NA=Not available.

Figuur 47: Overzicht case studies schade t.g.v. ettringiet vorming (A.J. Puppala, 2005)

Ook uit eerder labo-onderzoek (M.M. Amin et al. (2008), Rasheeduzzafar et al. (1994), E.E. Hekal et al. (1999), S.U. Al-Dulaijan et al. (2003), S. Omar & Baghabra Al-Amoudi (2002)) blijken de toegepaste sulfaatconcentraties ook sterk te variëren, gaande van 10 tot 10000 mg/l. Er dient opgemerkt te worden dat hier meestal mortelspecimen getest werden en de sulfaten niet gemengd worden in de specie maar de monsters achteraf ondergedompeld worden in een sulfaatoplossing.

4. Methoden

4.1. Voorbereiding tubes

Om de grondmonsters te vervaardigen wordt gebruik gemaakt van stalen tubes met een diameter van 5 cm en een hoogte van 10 cm. Er zijn 24 dergelijke tubes beschikbaar. Naast deze standaard afmeting zullen ook twee tubes met diameter 3.8 cm en twee met diameter 7 cm gebruikt worden. Deze hebben respectievelijk hoogtes van 8.5 en 13 cm.

Een week voor de eigenlijke vervaardiging van de monsters worden deze tubes gereinigd met water om te voorkomen dat er verontreinigingen zouden aanwezig zijn aan de binnenzijde. Deze verontreinigingen kunnen het hydratatieproces beïnvloeden. Er wordt gebruik gemaakt van gedeïoniseerd water. Kraantjeswater bevat calcium- en andere ionen die ongewenste effecten kunnen teweeg brengen. Vervolgens wordt de binnenzijde ingesmeerd met siliconenvet. Dit vet heeft eenzelfde functie als bekistingsolie, namelijk het ontkisten vlotter doen verlopen. Er wordt gebruik gemaakt van witte vaseline van het merk VWR BDH Prolabo.

Om tijdens het vullen van deze tubes materiaalverlies te voorkomen, wordt het ene uiteinde afgesloten met twee lagen plastic folie en een elastiek.



Figuur 48: Voorbereiding cilinders

4.2. Bepaling materiaalhoeveelheden

Als referentiebinder wordt gebruik gemaakt van CEM III/B 42.5 N-LH/SR LA. De concentratie van deze binder is 10% van het kaolinietgewicht. Er wordt gedeïoniseerd water toegevoegd zodat een watergehalte bekomen wordt van 115%. Dit is tweemaal de vloeigrens van het kaoliniet. Het is van groot belang dat de monsters een vergelijkbaar watergehalte bezitten. In onderstaande grafiek is het effect van het watergehalte op de stijfheidsmodulus van klei weergegeven (S. Nazarian et al., 2005)



Figuur 49: Effect watergehalte op stijfheidsmodulus klei (S. Nazarian, 2005)

Dit mengsel moet gebruikt worden ter vervaardiging van 10 monsters met diameter 5 cm, 2 monsters met diameter 3.8 cm en 2 monsters met diameter 7 cm. Bijkomend wordt ook een *benchtop bender elements* testopstelling gevuld. Deze heeft een diameter van 7 cm en een lengte van 10 cm. Dit komt neer op een benodigd volume van 3.54 liter.

$$V_{kaolin} + V_{cement} + V_{water} = 3540 \ cm^{3}$$

$$<=> \frac{M_{kaolin}}{0.00265 \ kg/cm^{3}} + \frac{M_{cement}}{0.00297 \ kg/cm^{3}} + \frac{M_{water}}{0.00100 \ kg/cm^{3}} = 3540 \ cm^{3}$$

$$<=> \frac{M_{kaolin}}{0.00265 \ kg/cm^{3}} + \frac{0.1M_{kaolin}}{0.00297 \ kg/cm^{3}} + \frac{1.15M_{kaolin}}{0.00100 \ kg/cm^{3}} = 3540 \ cm^{3}$$

$$M_{kaolin} = 2.27 \ kg$$

$$M_{cement} = 0.23 \ kg$$

$$M_{water} = 2.61 \ kg$$

Omdat rekening moet gehouden worden met een zeker verlies zijn bovenstaande waarden minimumhoeveelheden.

In deze bovenstaande afleiding werd verondersteld dat het kaoliniet een verwaarloosbaar natuurlijk watergehalte bezit. Dit werd gecontroleerd door het natuurlijk watergehalte van een apart monster te meten.

Het natuurlijk watergehalte van het kaoliniet wordt bepaald volgens ASTM D 2216. Een monster wordt gewogen en vervolgens in een oven van 110±5 °C geplaatst. Wanneer het gewicht van het monster niet meer afneemt en bijgevolg al het water verdampt is, kan het drooggewicht bepaald worden. Voor de meeste grondsoorten is dit na ongeveer 24h (M. Budhu, 2011). Het vochtgehalte wordt vervolgens bepaald als de verhouding tussen vochtmassa en drooggewicht.

$$w(\%) = \frac{M_t - M_d}{M_d} 100$$

Hierin is M_t het natte gewicht en M_d het drooggewicht van het kaoliniet.

Er werd een grondmonster van 129.19 gram genomen. Na droging werd een gewicht van 128.47 gram bekomen. Het vochtgehalte bedraagt bijgevolg 0.56%. Dit is inderdaad verwaarloosbaar klein.

Vervolgens dient opnieuw een mengsel vervaardigd te worden met 10% CEM III/B 42.5 N-LH/SR LA en een watergehalte van 115%. Nu wordt echter geen zuiver water toegepast maar water met een concentratie van 15000 mg natriumsulfaat per kg kaoliniet. Deze waarde is gekozen naar een gemiddelde waarde van in gestabiliseerde bodems vastgestelde concentraties (A.J. Puppala, 2005).

Er worden drie proefstukken met diameter 5 cm vervaardigd en een *benchtop bender test* opstelling. Dit komt overeen met een volume van 0.97 liter. Op analoge wijze kan bepaald worden dat dit overeenstemt met minimumwaarden van 0.62 kg kaoliniet, 0.06 kg cement en 0.71 l water. Om rekening te houden met enig verlies wordt geopteerd voor 0.7 kg kaoliniet, wat overeenstemt met 0.07 kg cement en 0.81 l water. De hoeveelheid Na_2SO_4 wordt vastgelegd op:

$$0.7 \ kg. \ 15000 \frac{mg}{kg} = 10500 \ mg$$

Het totale gewicht aan toe te voegen water bedraagt bijgevolg 915 gram.

Vervolgens wordt een derde *benchtop bender test* opstelling gevuld met een dubbele concentratie aan natriumsulfaat. Hiervoor is een minimum hoeveelheid aan kaoliniet nodig van 0.25 kg. Dit wordt herleid naar 0.30 kg kaoliniet, 0.03 kg cement en 0.35 l water waaraan 9 g Na₂SO₄ toegevoegd wordt.

Tenslotte worden een aantal proefstukken met diameter 5 cm vervaardigd waar CEM III/B 42.5 N-LH/SR LA vervangen wordt door een ander bindmiddel. Er wordt gebruik gemaakt van Georoc producten geleverd door Holcim. Twee proefstukken worden vervaardigd met ROC SOL, drie met ROC S. Net als de referentiebinder worden concentraties van 10% toegepast. De hoeveelheidbepaling gebeurt analoog en wordt hier niet meer herhaald.

4.3. Vervaardiging cilindrische proefstukken

Er zal ongeveer 4 kg kaoliniet gebruikt worden ter vervaardiging van de monsters. Dit materiaal is beschikbaar in zakken van 25 kg van het merk Goonvean. Belangrijk is dat voorafgaand de klonters in het kaoliniet fijn gemaald worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een stamper en vijzel. Opnieuw wordt dit gereedschap eerst gereinigd met gedeïoniseerd water opdat er geen contaminatie zou optreden. Door het fijnmalen zullen de latere grondmonsters een grotere homogeniteit bezitten.



Figuur 50: Kaoliniet voor (links) en na (rechts) fijnmalen

Per mengselsamenstelling worden de benodigde hoeveelheden afgewogen met behulp van een digitale weegschaal. Er wordt gebruik gemaakt van een Acculab weegschaal van de firma Sartorius. Deze kan hoeveelheden tot 6200 gram op 0.01 gram nauwkeurig wegen.

De hoeveelheid sulfaat dient erg nauwkeurig afgewogen te worden. Hiervoor wordt een digitale weegschaal gebruikt die nauwkeurig is tot op drie decimalen na de komma (CP153 Sartorius). Dit type weegschaal bevat een afsluitbare container zodat wijzigingen in luchtdruk geen invloed hebben op de meting.





Figuur 51: Digitale weegschalen Acculab (links) en CP153 (rechts)

Er wordt eerst een bodem water toegevoegd in een glazen maatbeker. Vervolgens wordt het sulfaat toegevoegd. Hierbij mag er geen sulfaat verloren gegaan. Vervolgens wordt de overige hoeveelheid water toegevoegd. Om nauwkeurig het vereiste gewicht te kunnen realiseren wordt bij de laatste toevoeging gebruik gemaakt van een pipet.

Er dient een homogene menging van sulfaat en water te gebeuren. Hierbij worden twee magneten toegevoegd in de maatbeker. Vervolgens wordt de maatbeker in een variërend magnetisch veld geplaatst zodat de magneten in beweging gebracht worden. Na ongeveer tien minuten wordt een homogene menging bekomen. Er wordt gebruik gemaakt van het toestel KMO 2 basic IKA.



Figuur 52: Mengen water-sulfaat oplossing

Het kaoliniet en bindmiddel wordt eerst droog gemengd gedurende een minuut. Hiervoor wordt een automatische Hobart deegmixer gebruikt. Zowel het toestel als de bijhorende mengspatel voeren rotaties uit, respectievelijk met 61 en 107 rotaties per minuut. De mixer wordt overdekt met een plastic afscherming zodat geen verlies van specie uit de mengkom kan geschieden. Vervolgens wordt het water (al dan niet met sulfaatoplossing) toegevoegd en wordt verder gemengd gedurende tien minuten. Halverwege wordt het mengproces onderbroken om specie los te maken van de bodem van de mengkom. Deze zone kan de menger immers moeilijk bereiken.



Figuur 53: Hobart deegmixer (links), droog mengproces (centraal), nat mengproces (rechts)

Vervolgens kunnen de tubes gevuld worden. Dit gebeurt op een triltafel met variabel instelbare trilfrequentie. Hierdoor worden luchtinsluitsels voorkomen. Na vulling wordt ook de bovenzijde afgesloten met plastic folie. De proefstukken worden geplaatst op een schaal waarvan de bodem gevuld wordt met gedeïoniseerd water. Dit om vochtverlies te voorkomen. Het geheel wordt gestockeerd bij een temperatuur van $20 \pm 2^{\circ}$ C.



Figuur 54: Triltafel Retsch

Na een verhardingsperiode van 7 dagen kunnen de proefstukken ontkist worden. Tijdens het vullen werd er op gelet dat de proefstukken met een zekere overmaat gevuld werden. Dit opdat de monsters getrimd kunnen worden en zo een vlak uiteinde hebben.



Figuur 55: Getrimd proefstuk

Vervolgens kunnen de proefstukken automatisch ontkist worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een piston die het monster uit zijn bekisting perst. Ten slotte worden de proefstukken gestockeerd bij 20±2 °C, gedeeltelijk ondergedompeld in gedeïoniseerd water en afgedekt met plastic folie.



Figuur 56: Automatische ontkistingsopstelling

4.4. Nabehandeling proefstukken

Na een hardingsperiode van 115 dagen worden twee CEMIIIB monsters zonder sulfaattoevoeging met diameter 5 cm ondergedompeld in een sulfaatconcentratie. Dit om het verschillend effect van DEF t.o.v. EEF vast te stellen. Er wordt gebruik gemaakt van een concentratie van 25 g/l natriumsulfaat. Op analoge wijze als hiervoor besproken wordt het sulfaat afgewogen en gemengd met een waterhoeveelheid. Vervolgens worden de twee proefstukken ondergedompeld in dit waterbassin.

Eenzelfde procedure werd na 122 dagen uitgevoerd op drie proefstukken met als binder Georoc producten. Een ROC SOL en ROC SI proefstuk worden ondergedompeld in een oplossing met 25 g/l natriumsulfaat en een ROC SI proefstuk wordt ondergedompeld in een oplossing met 10 g/l natriumsulfaat.

- 4.5. Benchtop bender element testopstelling
 - 4.5.1. Algemeen

De gebruikte testopstelling werd al eerder gebruikt door onder meer R.D. Verastegui Flores et al. (2010), J. Mawet (2011) en D. Snoeck (2008).

De buigelementen die in deze proefopstelling gebruikt worden zijn van het type T220-A4-203x (*Piezo Systems, Inc.*). Ze hebben een lengte van 12 mm, een breedte van 6 mm en een dikte van 0.5 mm. Er werden elementen in serie gebruikt voor de zender en ontvanger. Deze werden bekabeld en kregen een coating bestaande uit verschillende lagen polyurethaanvernis zodanig dat deze waterbestendig zouden zijn. Het buigelement en de bekabeling werden gemonteerd in een koperen huls. De elementen werden vastgezet in de huls door alle resterende openingen op te vullen met epoxy. Om een aarding te

voorzien werd een laag geleidende verf aangebracht rond het buigelement die in contact was met de huls, die op zijn beurt geaard was. Bovenop deze verflaag werd een afwerkingslaag polyurethaanvernis aangebracht ter verdere bescherming. De effectieve lengte van het buigelement, dat buiten de huls uitsteekt, bedroeg 6 mm.



Figuur 57: Opbouw piëzo-elektrisch buigelement (Verastegui Flores et al., 2010)

Het toestel zelf bestaat uit twee polymethyl methacrylaat platen (500x130x15 mm³) die een Uvormige, rubberen mal omsluiten. De U-vormige opening dient om het monster in aan te brengen. De buigelementen (zowel de zender als ontvanger) worden tegenover elkaar en in elkaars verlengde vastgemaakt in het plexiglas. Alle onderdelen worden samengehouden door vier lange schroeven die aan beide kanten worden vastgemaakt met bouten die rusten op rubberen rondellen. Deze laatste worden aangebracht om te voorkomen dat de trillingen zich doorheen het apparaat zelf zouden kunnen voortplanten. Dit is uiteraard nooit volledig uit te sluiten.

De vervaardigde mengsels worden, zonder tillen, in de U-vormige opening gegoten. Na voldoende verharding wordt een toplaag gedeïoniseerd water aangebracht en een afdichting met plastic folie voorzien. Zo wordt uitdroging van de specie vermeden.





FIG. 4—Small-strain shear modulus (G_0) monitoring setup: (a) side view; (b) plan view.

Figuur 58: Opstelling Benchtop bender elements test (Verastegui Flores et al., 2010)

De volledige meetopstelling wordt in onderstaand schema verduidelijkt. Als inputsignaal wordt een signaal via de geluidskaart van een computer gegenereerd. Dit signaal kan gegenereerd worden door een ontwikkelde functie in Matlab. Het gaat om een sinusvormig signaal waarbij zowel de frequentie als het aantal periodes kunnen gespecificeerd worden. Dit signaal wordt gestuurd doorheen een versterker of *amplifier* en dit versterkte signaal wordt verstuurd naar de *transmitting transducer*. De versterking van het signaal is nodig opdat een voldoende sterke vervorming van het buigelement en bijgevolg meetbare spanningsgolf gegenereerd wordt. Zowel het inputsignaal (*channel A*) als het versterkte outputsignaal (*channel B*) wordt met behulp van een oscilloscoop (PicoScope) van de firma PicoTech en de nodige software gevisualiseerd op een PC-beeldscherm.



Figuur 59: Principe meetopstelling Benchtop bender element



Figuur 60: Meetopstelling Benchtop bender element

4.5.2. Gegevensverwerking

Om de faseverschuiving van het geregistreerde tijdsignaal te bepalen wordt gebruik gemaakt van kruiscorrelatie. Dit is de meest bewerkelijke methode maar ook de meest objectieve. De aankomsttijd van de golf wordt niet visueel vastgesteld maar door middel van een maximumbepaling. In courante gevallen is de bepaling van dit extremum van de gegenereerde functie niet voor interpretatie vatbaar.

Het opgemeten tijdsignaal wordt met behulp van PicoScope opgeslagen als een tekstbestand. Met behulp van Matlab kan vervolgens kruiscorrelatie toegepast worden. In een eerste stap moet het bekomen tekstbestand omgezet worden naar een matrix waarin de tijd- en voltagedata voorkomen.
Hiertoe wordt een script conv2mat.m geschreven. In onderstaande figuren wordt een voorbeeld van het te behandelen tekstbestand en het ontwikkelde script gegeven.



Figuur 61: Voorbeeld gegenereerd tekstbestand Picoscope



De werking van bovenstaand script verdient enige verduidelijking. Regels 2 en 3 creëren een data element van het type *string* dat bestaat uit de naam van het tekstbestand gevolgd door de extensie .txt. Vervolgens converteert het commando *textread* deze file naar twee vectoren a en b. Beide vectoren hebben nog steeds elementen van het type *string*. De vector a bevat de eerste kolom van de tekstfile, de vector b de tweede kolom. In de regels 6 tot en met 8 wordt overbodige data gewist en de overblijvende data geconverteerd van het type *string* naar het type *double*. Zo wordt een matrix A gecreëerd bestaande uit numerieke gegevens. Onder overbodige data worden alle niet-numerieke gegevens in het tekstbestand verstaan. Dit komt neer op de rijen 1 tot en met 3 en 1001 tot en met 1003. Ten slotte wordt de matrix A gereorganiseerd zodat een matrix met vier kolommen ontstaat. De eerste en derde kolom bevat de tijdsgegevens, de derde en vierde kolom de voltagegegevens, respectievelijk van het ingang- en uitgangsignaal. Een voorbeeld van het bekomen resultaat wordt in onderstaande figuur weergegeven.

	1	2	3	4	5
1	-50	-5	-50	-2244	
2	-49	-10	-49	-2293	
3	-48	-3	-48	-2278	
4	-47	-1	-47	-2260	
5	-46	-2	-46	-2252	
6	-45	4	-45	-2228	
7	-44	6	-44	-2228	
8	-43	11	-43	-2197	
9	-42	8	-42	-2163	
10	-41	14	-41	-2129	
11	-40	14	-40	-2109	
10	20	17	20	2004	

Figuur 63: Gegevensmatrix na omzetting m.b.v. conv2mat.m

Er dient opgemerkt te worden dat de tijdsgegevens starten vanaf -50 µs. Picoscope registreert dus reeds de signalen vooraleer ze gegenereerd worden.

Vervolgens kan in Matlab de kruiscorrelatie uitgevoerd worden. Hiertoe wordt onderstaande code geschreven. Deze is een illustratie voor een matrix met naam m112k08.

>> y=xcorr(m112k08(:,4),m112k08(:,2)); >> plot(m112k08(:,1)+50,y(1000:1999))

Figuur 64: Kruiscorrelatie code

In de eerste lijn code wordt de kruiscorrelatie losgelaten op de voltagegegevens van het ingang- en uitgangsignalen. Zoals eerder vermeld worden deze gestockeerd in respectievelijk kolommen 2 en 4 van de matrix. Beide signalen bestaan uit N=1000 elementen. De verschuiving m van het ene signaal ten opzichte van het andere levert enkel een resultaat verschillend van nul op als de absolute waarde van m kleiner blijft dan N. Aangezien m zowel positief als negatief kan zijn is m=2N-1=1999. Er wordt bijgevolg een vector y gecreëerd met 1999 elementen waarvan de eerste 999 elementen overeenstemmen met een negatieve m waarde. Uiteraard kan het uitgangsignaal nooit eerder ontvangen worden dan het ingangsignaal. Bijgevolg is er enkel interesse voor de elementen 1000 tot en met 1999. Element 1000 komt overeen met geen tijdsverschuiving en moet dus geplot worden bij een abscis gelijk aan nul. Voor deze abscis kan gebruik gemaakt worden van de eerste (of derde) kolom van de matrix, op voorwaarde dat de waarden gesommeerd worden met vijftig. Dit is weergegeven in de tweede lijn code.

Ter voorbeeld levert de kruiscorrelatie onderstaande functie op. Het eerste maximum van deze functie stemt overeen met de tijdsverschuiving van het ingangsignaal. Deze bedraagt $252 \ \mu s$.



Figuur 65: Voorbeeld resultaat kruiscorrelatie

De tweede en derde piek volgen ongeveer na één en twee periodes van het ingangsignaal. Latere golvingen kunnen te wijten zijn aan reflecties van de golven in het monster.

4.6. Impact test opstelling

4.6.1. Algemeen

In deze paragraaf wordt het principe van de test besproken die in praktijk zal toegepast worden. Deze vertoont grote gelijkenissen met de *impulse excitation of vibration* test. Er wordt naar gerefereerd als de impact test.

De monsters worden geplaatst op een krik. Deze is in hoogte verstelbaar zodat verschillende afmetingen van monsters kunnen getest worden. De proefstukken worden op een zachte mousse geplaatst. Op deze manier wordt getracht de vrije trilling van de proefstukken zo min mogelijk te belemmeren. De meer gedetailleerde steunpuntconfiguraties zoals besproken in ASTM E 1876 en ASTM C 215 worden niet toegepast. Dit vereenvoudigt de proefopstelling.

Aan het ene uiteinde van een cilindrisch monster wordt een mechanische impact gegeven. Hiervoor kunnen verschillende voorwerpen gebruikt worden. Hier wordt geopteerd voor het handvat van een schroevendraaier en een polymeer staafje met een glasbol op verlijmd. De golven die zich voortplanten in het monster worden geregistreerd door een versnellingsmeter aan het andere uiteinde.

Er worden twee verschillende trillingen geïnduceerd in het proefstuk. De longitudinale eigenmode wordt geëxciteerd door een impact te geven parallel met de langsas van de cilinder op het kopse einde van deze cilinder. De trilling wordt geregistreerd door de versnellingsmeter, geplaatst tegen het andere kopse einde van de cilinder. Deze opstelling is, op de ondersteuning na, identiek aan deze besproken in ASTM E 1876.



Figuur 66: Excitatie longitudinale eigenmode

De transversale eigenmode wordt opgewekt door zowel de impact als de versnellingsmeter loodrecht op de langsas van de cilinder te oriënteren. Opnieuw wordt de versnellingsmeter geplaatst ter hoogte van de *antinode*. Dit is in tegenspraak met ASTM E 1876 maar verwacht wordt dat het contact met de versnellingsmeter het trillingsgedrag van de cilinder weinig beïnvloedt.



Figuur 67: Excitatie transversale eigenmode

Omdat het in praktijk niet evident is een torsiemode te exciteren bij een cilindervormig proefstuk wordt dit achterwege gelaten. Er wordt echter aangenomen dat de transversale eigenfrequentie ongeveer gelijk is aan de eigenfrequentie in torsie. Op die manier wordt de transversale eigenfrequentie gebruikt om de G_0 -modulus te bepalen.

Met behulp van een oscilloscoop met de nodige software (Easyscope) kan de data verwerkt worden.

4.6.2. Versnellingsmeter

De sensor wordt georiënteerd volgens de langsas van het monster of loodrecht hierop afhankelijk of respectievelijk longitudinale of transversale trillingen willen geregistreerd worden. Een goed contact met het monster is noodzakelijk maar een vaste bevestiging is niet nodig.

Een versnellingsmeter is te beschouwen als een massa opgehangen in een behuizing en verbonden met deze behuizing via een veer-dempersysteem.



Figuur 68: Schematische opbouw versnellingsmeter (http://users.ecs.soton.ac.uk)

Het gaat hier om een systeem met één vrijheidsgraad, dus kan de gekende bewegingsvergelijking toegepast worden. De uitwendige belasting kan volgens de tweede wet van Newton geschreven worden als het product van de versnelling van het lichaam en de massa van de versnellingsmeter.

$$M.\ddot{x} + C.\dot{x} + K.x = M.a$$

In *steady state* conditie kan de verplaatsing van de opgehangen massa als constant beschouwd worden. Bijgevolg kan een evenredig verband tussen versnelling lichaam en verplaatsing opgehangen massa neergeschreven worden.

$$a = \frac{K}{M}x$$

Het opmeten van een versnelling wordt dus vervangen door het opmeten van een verplaatsing. Deze verplaatsing wordt vervolgens omgezet naar een voltage. Dit kan op twee verschillende manieren gebeuren.

Een piëzo-elektrische versnellingsmeter heeft eenzelfde werking als de eerder besproken buigingselementen. Door de beweging van de opgehangen massa ontstaan krachten op het element. Door een piëzokeramisch materiaal toe te passen kan dit omgezet worden in een voltage.

Een tweede type is een versnellingsmeter uitgerust met een regelbare condensator. Hier is de beweegbare massa het regelbare gedeelte van de condensator. Door de afstand tussen de twee vaste platen van de condensator te wijzigen ontstaat er een wijziging van de spanning over de condensator.



Figuur 69: Werking regelbare condensator

4.6.3. Gegevensverwerking

De meting die geregistreerd wordt door de versnellingsmeter is een discrete tijdsmeting. Het doel is dit signaal om te zetten naar het frequentiedomein om zo de verschillende frequentiecomponenten waaruit het signaal bestaat te kunnen destilleren. Hiervoor wordt de FFT gebruikt.

Deze FFT geschiedt automatisch in de software die Easyscope aanbiedt. Er is echter alleen maar de mogelijkheid om het tijdsignaal op te slaan. Dit gebeurt in een CSV-bestand. CSV staat voor *comma seperated values*. Een fractie van dergelijk bestand is in onderstaande figuur links te zien. Iedere rij

gegevens bestaat uit twintig waarden, elk gescheiden door een komma en tussen aanhalingstekens geplaatst. Easyscope registreert de laatste tien gegenereerde tijdsignalen, waarbij de recentste eerst voorkomt in het CSV-bestand. De oscilloscoop bestaat uit twee poorten, *channel A* en *channel B*, waarbij enkel de tweede gebruikt wordt. Bijgevolg is er enkel interesse voor de tweede waarde van iedere rij. In totaal zijn er 4097 rijen. Het gaat om 4096 tijdsmetingen. In de laatste rij wordt de *sample rate* weergegeven. Dit is 0.00004 s of 25 kHz.

4090	0,000,"0,000","-5,000","0,000","10,000","2,000","5,0(
4091	-10,000,"2,000","-5,000","0,000","10,000","0,000","5,
4092	0,000,"0,000","5,000","0,000","5,000","2,000","5,000
4093	5,000,"2,000","5,000","2,000","0,000","4,000","-5,00(
4094	0,000,"0,000","15,000","2,000","0,000","0,000","0,00
4095	-5,000,"0,000","-5,000","2,000","0,000","0,000","0,00
4096	-5,000,"2,000","0,000","-2,000","10,000","0,000","5,0
4097	0,00004000,"0,00004000","0,00004000","0,00004000"

~ * * * *	0,00404	100	
2118	0,08468	-190	
2119	0,08472	-150	
2120	0,08476	-42	
2121	0,0848	92	
2122	0,08484	198	
2123	0,08488	216	
2124	0,08492	126	
2125	0 00406	20	

Figuur 70: Opkuisen CSV-bestand

Het bestand moet eerst opgekuist worden vooraleer het in Matlab kan ingevoerd worden. In Excel kan via de functie "Tekst naar kolommen" snel de gegevens per rij omgezet worden naar verschillende kolommen. Vervolgens wordt enkel de tweede kolom behouden. Deze stemt overeen met de laatst opgeslagen voltagemeting in *channel B*. Tenslotte kan een eerste kolom ingevoegd worden met de tijdsintervallen. Als resultaat wordt een matrix bekomen met twee kolommen en 4096 rijen. Een fragment wordt hiervan weergegeven in bovenstaande figuur rechts. Ter controle kan in Excel de tijdsmeting eenvoudig gevisualiseerd worden. Hiervan wordt een voorbeeld weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 71: Tijdsmeting Easyscope

Vervolgens kan de gemodificeerde datafile geïmporteerd worden in Matlab. Hiervan kan eenvoudig een matrix gegenereerd worden. Met onderstaand script wordt vervolgens het frequentiespectrum geplot.



Figuur 72: Script plot frequentiespectrum m.b.v. FFT

Het script vergt de input van de gegenereerde matrix. De frequentie van dit signaal is 25000 Hz en bevat 4096 rijen. De vierde lijn code berekent de kleinste macht van twee die groter is dan L. Dit houdt in dat een signaal met een willekeurig aantal waarden L vervangen wordt door een signaal met NFFT waarden. Dit aantal waarden is een gehele macht van twee en wordt bekomen door een aantal nulelementen toe te voegen aan de tweede kolom van de matrix. Aangezien de matrix steeds 4096 rijen bevat, wat de twaalfde macht is van twee, is dit eigenlijk een overbodige stap. Ze wordt hier enkel vermeld ter volledigheid. Ter herinnering, de FFT eist steeds dat de inputdata een gehele macht is van twee.

Vervolgens wordt de FFT berekend van het inputsignaal. In Matlab wordt deze gedefinieerd als:

$$X[k] = \sum_{n=1}^{N} x[n] e^{-\frac{i2\pi(k-1)(n-1)}{N}}$$

Dit is een factor N groter dan de definitie van de CDFT die eerder gegeven werd. Bijgevolg wordt de FFT gedeeld door L in lijn vijf van het script.

In de zesde lijn wordt de x-as gedefinieerd. Eerder werd vermeld dat hiervoor verschillende mogelijkheden zijn. Het doel hier is echter de eerste fundamentele frequentie te bepalen. Bijgevolg moet de x-as opgedeeld worden in gelijke delen tussen nul en de helft van de *sample rate*. Herinner ook dat enkel de eerste N/2+1 elementen van de gegenereerde vector van belang zijn. De overige bevatten negatieve frequenties.

Er werd nu een vector Y gecreëerd bestaande uit 4096 complexe waarden. Om het frequentiedomein te visualiseren is het interessanter om hiervan de vectorvoorstelling te genereren. Uit de complexe getallenleer is gekend dat de modulus van een vector gegeven wordt door de vierkantswortel van de som van de kwadraten van reële en imaginaire delen van het complexe getal. Dit wordt berekend in lijn zeven.

Vervolgens kan het frequentiespectrum gegenereerd worden. De abscis van de piekwaarde levert de gezochte eerste fundamentele frequentie. Een voorbeeld is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 73: Voorbeeld generatie frequentiespectrum

Als alternatief voor de FFT kan ook de correlatietheorie toegepast worden. Deze biedt het voordeel dat er niet moet gewerkt worden met complexe getallen. Zoals eerder werd vermeld vergt deze methode wel een grotere rekentijd. De correlatietheorie werd toegepast in onderstaand script. Het resultaat is quasi identiek aan bovenstaande figuur. Er wordt een piekfrequentie van 2594 i.p.v. 2600 Hz bekomen. Tot slot wordt vermeld dat na FFT in Easycope voor de behandelde meting 2609 Hz bekomen wordt.

```
1
      [] function realDFT_plot(matrix)
 2 -
3 -
4 -
         N=4096;
         Fs=25000:
         ReX=zeros(N/2+1,1);
 4 -
5 -
6 -
7 -
8 -
         ImX=zeros(N/2+1,1);
         for k=1:N/2+1
              for n=1:N
                  ReX(k) = ReX(k) + matrix(n, 2) * cos(2*pi*n*k/N);
 9 -
                   ImX(k) = ImX(k) + matrix(n, 2) * sin(2*pi*n*k/N);
9 -
10 -
11 -
              end
         end
12
13 -
         f=Fs/2*linspace(0,1,N/2+1);
14
15 -
16 -
       for k=1:N/2+1
              ReX(k) = 2/N*ReX(k);
16 -
17 -
18 -
19 -
              ImX(k) = -2/N*ImX(k);
              Spectrum(k) = sqrt((ReX(k)^2 + ImX(k)^2));
         end
20
21 -
         plot(f,Spectrum)
```

Figuur 74: Script plot frequentiespectrum m.b.v. correlatietheorie

4.7. Laser Doppler vibrometer test

4.7.1. Algemeen

Het doel van deze test is opnieuw een cilindrisch proefstuk te exciteren en hieruit de eerste eigenfrequenties te destilleren. Als excitatie wordt hier echter geen impact gebruikt, maar geluidsgolven.

Het proefstuk wordt met behulp van vissersdraad opgehangen. Op deze wijze wil een zo groot mogelijke bewegingsvrijheid van de proefstukken bekomen worden. Vervolgens wordt een PC-*speaker* (type: SP-W65-SONO Woofer) gericht op het proefstuk en worden met behulp van witte ruis geluidsgolven het proefstuk geëxciteerd.

De excitatie wordt geregistreerd door middel van een LDV (Polytec OFV-5000) met bijhorende snelheidsdecoder (VD-06). Een laserstraal wordt gericht op een *antinode* van het object, gereflecteerd en opnieuw ontvangen door de LDV. Opdat een goede reflectie zou geschieden worden glasparels aangebracht op het oppervlak van de proefstukken. Uitgaande van het Doppler-effect kan op basis van de faseverschuiving of frequentieverschuiving van de gereflecteerde laser respectievelijk de verplaatsing en snelheid in functie van de tijd bepaald worden. Net als bij de impact test wordt niet de beweging, maar een voltage in functie van de tijd gegenereerd als output.

Wanneer zowel de PC-*speaker* als LDV gericht worden evenwijdig met de langsas van het proefstuk, dan worden longitudinale eigenmodes geregistreerd. Wanneer beide toestellen gericht worden loodrecht op deze as, dan worden de transversale eigenmodes geregistreerd. Dit in analogie met de impact test.



Figuur 75: Opstelling LDV test ter bepaling transversale eigenfrequentie

4.7.2. Gegevensverwerking

De LDV test genereert als resultaat een tekstbestand waarin de geregistreerde voltages in functie van de tijd opgeslagen zijn. Opnieuw wordt in dit tekstbestand de overbodige data gewist en een matrix met numerieke waarden gegenereerd. Vervolgens kan, analoog aan de gegevensverwerking besproken bij de impact test, de FFT toegepast worden. Het script (eigenFFT.m) die hiervoor toegepast wordt is in onderstaande figuur weergegeven.

```
function eigenFFT
 1
 2
        data = dlmread('C1.txt','\t',23,0);
3
 4
        y=data(:,2);
 5
        L=630000;
6
 7
        T=0.000117;
8
        Fs=1/T;
9
10
        NFFT=2<sup>^</sup>nextpow2(L);
11
        Y=fft(y(:),NFFT)/L;
12
        f=Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
13
        Spectrum=2*abs(Y(1:NFFT/2+1));
14 -
        plot(f(10000:NFFT/2+1),Spectrum(10000:NFFT/2+1))
```

Figuur 76: Script plot frequentiespectrum m.b.v. eigenFFT.m

Bij elk verschillend tekstbestand moet de naam van het tekstbestand en eventueel de *sample frequency* aangepast worden.

Het resultaat van bovenstaand script levert een frequentie spectrum met relatief veel ruis. Dit kan gefilterd worden door het script toe te passen ontwikkeld door ir. Vanwalleghem. Wegens de grotere complexiteit wordt het script hier niet weergegeven. Wel wordt in onderstaande figuur de vergelijking gemaakt tussen een frequentie spectrum ten gevolge van het script eigenFFT.m (links) en een spectrum die het resultaat is van het script geschreven door ir. Vanwalleghem (rechts).



Figuur 77: Vergelijking verschillende scripts ter bepaling frequentie spectrum LDV test

De algemene vorm is erg gelijkend en ook de piekfrequenties liggen zeer dicht bij elkaar (3711 Hz versus 3704 Hz). Bij de latere bespreking van resultaten worden steeds de frequenties bepaald door ir. Vanwalleghem gebruikt.

De rekentijd in Matlab bedraagt per bestand ongeveer tien minuten. Het gebruik van de correlatietheorie is hier bijgevolg niet praktisch wegens te lange rekentijden.

4.8. Numeriek onderzoek in Abaqus

Het eindige elementen programma Abaqus bevat een functie die het mogelijk maakt om de eigenfrequenties en overeenstemmende eigenmodes van driedimensionale elementen te berekenen.

Zoals eerder vermeld kunnen de eigenfrequenties van een systeem met n vrijheidsgraden berekend worden uit de gehomogeniseerde bewegingsvergelijking. Indien de demping in het systeem verwaarloosd wordt, dan moet enkel de massamatrix en stijfheidsmatrix van het systeem gekend zijn.

In Abaqus kunnen beide matrices opgesteld worden indien de geometrie van het systeem, densiteit en stijfheidskarakteristieken gespecificeerd worden. Deze laatste zijn de E_0 -modulus en coëfficiënt van Poisson. Vervolgens berekent Abaqus het stelsel van gekoppelde differentiaalvergelijkingen waaruit de bewegingsvergelijk bestaat.

In onderstaande paragrafen wordt de methodiek ter bepaling van deze frequentie stap voor stap weergegeven.

In een eerste stap moet de geometrie van het systeem vastgelegd worden. Om de vergelijking met het experimenteel onderzoek te kunnen maken worden enkel cilinders gebruikt. Er wordt een nieuw *part* aangemaakt in Abaqus CAE. Er wordt gekozen voor een driedimensionaal vervormbaar element dat gecreëerd wordt door middel van extrusie. Ook een globale grootte van de cilinder moet reeds ingegeven worden. Abaqus maakt geen gebruik van absolute eenheden, alles wordt op relatieve schaal berekend. Vervolgens wordt de doorsnede getekend en de extrusie afmeting bepaald.

Axisymmetric Options None available			- End Type Dept - Opti Note	Condition Blind 0.13 ons Twist and clude twist, p	draft cannot pitch: 0	be specified t	ogether.				
Options None available			Opti Note	ons : Twist and clude twist, p	draft cannot pitch: 0	be specified t	ogether.				
					angle: 0	(Degrees)					
n ion			Į								
	n	on	on	on v	n on 2 2 x			on v	on v		

Figuur 78: Creatie part in Abaqus CAE

Vervolgens wordt een materiaal toegekend aan het gecreëerde voorwerp. Het kaolin-cement mengsel wordt gekarakteriseerd door een densiteit, E_0 -modulus en Poisson coëfficiënt. Deze materiaaleigenschappen worden via een *section assignment* gekoppeld aan de cilinder.

🐥 Edit Material	🐣 Edit Material
Name: Clay	Name: Clay
Description:	Description:
Material Behaviors	Material Behaviors
Density	Density
Elastic	Elastic
General Mechanical Intermal Electrical/Magnetic Other	General Mechanical Ihermal Electrical/Magnetic Other
Density	Elastic
Distribution: Uniform 🔹 🥭	Type: Isotropic 💌 🔽 Suboptions
Use temperature-dependent data	Use temperature-dependent data
Number of field variables:	Number of field variables: 0 A
Data	Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term
Mass	No compression
1 1459.39	No tension
	Data
	Young's Poisson's Modulus Ratio
	1 276301657.6 0.201681294
OK Cancel	OK

Figuur 79: Specificatie materiaalkarakteristieken Abaqus CAE

Vooraleer de berekening kan gestart worden moet er een *mesh* voorzien worden. Het type *mesh*element kan vastgelegd worden en de grootte van het element kan bepaald worden.

Tenslotte moet ook een nieuwe belastingstap gecreëerd worden, zodat de frequenties kunnen weergegeven worden als resultaat. Hiervoor moet bij de creatie van een nieuwe stap, de optie *frequency* gekozen worden bij *linear perturbation procedures*. Abaqus biedt de keuze tussen twee eigenwaarden extractie methoden. De Lanczos methode is globaal gezien sneller wanneer een groot aantal eigenmodes is gevraagd bij systemen met veel vrijheidsgraden. De *subspace iteration* method is sneller wanneer minder dan 20 eigenmodes worden gevraagd. Voor deze toepassing is de keuze van

minder belang. Er wordt steeds de Lanczos methode gekozen. Er is enkel interesse in de laagste eigenmodes. Er wordt gespecificeerd om alleen de eerste 40 weer te geven.

A Counte Stars	l l	
Create Step		Edit Step
Name: Step-1		Name: Step-1
Insert new step after		Type: Frequency
Initial		Basic Other
		Description: Extract frequencies
		Nigeom: Off
		Eigensolver: Lanczos Subspace AMS
		Number of eigenvalues requested: O All in frequency range
		Value: 40
Procedure type: Linear perturbation 💌		Frequency shift (cycles/time)**2:
Buckle		Minimum frequency of interest (cycles/time):
Frequency		Maximum frequency of interest (cycler/time)
Static, Linear perturbation Standy, state dynamics, Direct		
Substructure generation		Include acoustic-structural coupling where applicable
		Block size: Default Value:
		Maximum number of block Lanczos steps:
		Use SIM-based linear dynamics procedures
Continue Cancel		
		Include residual modes
		OK

Figuur 80: Creatie frequentiestap Abaqus

Na berekening kunnen de resultaten opgevraagd worden. Met behulp van de functie *animate* kunnen de eigenmodes gevisualiseerd worden. Met behulp van de functie *active steps/frames* kunnen de verschillende eigenmodes met bijhorende frequenties afzonderlijk bekeken worden. Een voorbeeld is hieronder weergegeven.

Active Steps/	Frames		X	
Selection Aids				
Select from:	Select by:	Global range:		
All steps	Time/Length	Min: 0		
Selected st	eps 🔘 Frequency	Max: -1		
Selected from the selected	ames 💿 Frame	Increment: 1		
Unselect ba	se state frames	Selected fram	mes: 1	
🔲 Unselect du	plicate first frames	Upda	te Selection	
Step Name	Description			
🖯 🖌 Step-1			=	
	0 Increment 0: Base	State		
	1 Mode 1: Value =	-2.62902E-07 Freq =	= 0.0000 (cycles/time)	
	2 Mode 2: Value =	1.59044E-07 Freq =	= 6.34714E-05 (cycles/time)	
	3 Mode 3: Value =	2.79203E-07 Freq =	= 8.40969E-05 (cycles/time)	
	4 Mode 4: Value =	3.27683E-07 Freq =	= 9.11060E-05 (cycles/time)	
	5 Mode 5: Value =	5.08935E-07 Freq =	= 1.13541E-04 (cycles/time)	
	6 Mode 6: Value =	9.44580E-07 Freq =	= 1.54682E-04 (cycles/time)	
v .	7 Mode 7: Value =	6.49485E+07 Freq :	= 1282.6 (cycles/time)	A seque/Standard 6. 12-2. Wed Way 19 09:02:09 West-Europa (standaard:lid) 2014
	8 Mode 8: Value =	6.49514E+07 Freg :	= 1282.7 (cycles/time) -	-
•	III		•	-07 Freq = 1282.6 (cycles/cline)
ОК	. (Apply	Cancel	Cole Factor + 1,303e-92

Figuur 81: Weergave eigenfrequenties/eigenmodes Abaqus

5. Resultaten

5.1. Impact test

De stijfheidstoename van alle 22 cilindrische monsters werd gedurende meer dan 3 maanden geregistreerd. Hierbij werd het effect van de cementsoort, de monsterafmetingen en het natriumsulfaat nagegaan.

5.1.1. Referentiemonsters

Er wordt verwacht dat de stijfheidstoename een logaritmisch verloop kent. R.D. Verastegui Flores et al. (2010) deed reeds onderzoek naar het versterkend effect van verschillende cementsoorten op *kaolin clay*. Er werd zowel hoogovencement als portlandcement toegepast en de glijdingsmodulus werd bepaald met behulp van *benchtop bender elements* testen. Er werd geconcludeerd dat portlandcement en hoogovencement (na een hardingstijd van vier dagen) beiden een logaritmische stijging van de glijdingsmodulus kennen. De trend is hierbij onafhankelijk van de hoeveelheid cement.

In de bovenste grafiek in onderstaande figuur is de stijfheidstoename van de referentiemonsters gevisualiseerd. Dit zijn de proefstukken met een diameter van 5 cm, gemengd met CEM III/B 42.5 N-LH/SR LA zonder toevoeging van sulfaten. De waarden in de grafiek zijn uitgemiddeld over 10 monsters.





Figuur 82: Toename stijfheid referentiemonsters onder impact test

Op het zicht is inderdaad een logaritmisch verloop van zowel E_0 als G_0 -modulus op te merken. Beiden bereiken een constant niveau na ongeveer drie maand. Wanneer enkel de data tot drie maand weergegeven wordt en een logaritmische trendlijn op de data gepast wordt, dan wordt inderdaad een zeer grote affiniteit ontdekt. Dit is weergegeven in de onderste grafiek van bovenstaande figuur. Verder is het ook duidelijk dat op ieder tijdstip de E_0 -modulus groter is dan de G_0 -modulus. Dit is logisch voor een positieve Poisson coëfficiënt. In onderstaande grafiek is het verloop van deze coëfficiënt weergegeven. Deze valt binnen het interval geldend voor kleigronden (M. Budhu, 2011).



Figuur 83: Poisson coëfficiënt referentiemonsters

5.1.2. Invloed monsterafmetingen

H. Thornton en A. Alexander (1987) maakten gebruik van de FFRT om het effect van proefstukafmetingen op de transversale eerste eigenfrequentie te bepalen. Hiervoor werden betonnen proefstukken gebruikt. Er werd geconcludeerd dat wanneer de dikte van de gebruikte proefstukken toeneemt of de lengte afneemt, de eerste transversale eigenfrequentie toeneemt. Met andere woorden: bij stijgende D/l stijgt de eerste transversale eigenfrequentie.

S. Mansour (2014) deed gelijkaardig onderzoek op proefstukken vervaardigd uit asfaltbeton. Hij gebruikte hiervoor de impact test. Hij concludeerde dat bij stijgende lengte van de proefstukken de longitudinale en transversale eigenfrequenties afnemen, en dit zelfs bij dezelfde D/l verhoudingen. Ook L. Obert en W.I. Duvall (1941) toonden aan dat betonnen proefstukken met grotere afmetingen aanleiding geven tot een kleinere longitudinale eigenfrequentie.

Bovenstaande vaststellingen zijn grotendeels in overeenstemming met de bekomen resultaten. In onderstaande grafieken is het verloop van de eerste longitudinale en transversale eigenfrequentie voor de verschillende proefstukken te zien. Zoals verwacht daalt de eigenfrequentie naarmate de proefstukken langer worden. Deze frequenties dalen echter ook bij stijgende diameter, wat in tegenspraak is met H. Thornton en A. Alexander (1987). Om het precieze effect van enerzijds diameter en anderzijds lengte te kunnen vaststellen zouden proefstukken met constante lengte en variërende diameter (en omgekeerd) moeten getest worden. Meer informatie hierover wordt gegeven in de sectie handelend over het numerieke onderzoek in Abaqus.



Zoals eerder besproken is de E_0 en G_0 -modulus evenredig met de overeenkomstige eigenfrequentie in het kwadraat, maar ook met de lengte van het proefstuk in het kwadraat. Hierdoor heeft een groter proefstuk niet noodzakelijk een lagere stijfheid.

De invloed die de afmetingen van de proefstukken hebben op de stijfheidsevolutie is weergegeven in onderstaande grafieken. De bovenste grafiek maakt duidelijk dat de afmetingen, en in het bijzonder de verhouding diameter over lengte, weinig tot geen invloed heeft op de E_0 -modulus.

De G_0 -modulus daarentegen blijkt wel zekere invloed te ondervinden. Hoe groter de afmetingen van de proefstukken worden (en in dit geval ook bij stijgende D/l), hoe groter de glijdingsmodulus wordt. Dit is weergegeven in de onderste grafiek. Later in deze thesis zal geconcludeerd worden dat enkel de D/l-verhouding en niet de absolute afmetingen van de proefstukken een effect hebben op de G_0 -modulus.





Figuur 85: Invloed afmetingen impact test

Uiteraard moet de impact test idealiter gelijke stijfheidskarakteristieken opleveren, ongeacht de afmetingen van de proefstukken. Uit numeriek onderzoek zal echter blijken dat, tengevolge het gebruik van de eigenfrequentie in buiging in plaats van torsie, de G_0 -modulus toeneemt bij toenemende D/l-verhouding.

5.1.3. Invloed cement type

Uit onderstaande grafieken blijkt duidelijk dat de Georoc producten aanleiding geven tot een geringere stijfheid in vergelijking met het hoogovencement. Ook is de stijfheidsevolutie bij deze binders eerder lineair dan logaritmisch. Eventueel zal de trend ook logaritmisch worden na een langere meetperiode. Dit valt echter buiten het kader van deze thesis en is ook weinig relevant.





Figuur 86: Invloed cement impact test

De monsters gemengd met ROC SOL vertonen een zeer lage beginstijfheid. Deze was initieel onvoldoende om met behulp van de impact test tot betrouwbare resultaten te komen. Dit wordt ook weerspiegeld in de berekening van de Poisson coëfficiënt. Pas na een hardingstijd van ongeveer 30 dagen kunnen de resultaten als betrouwbaar beschouwd worden. Algemeen kan gesteld worden dat, met behulp van de impact test, de E₀-modulus betrouwbaar kan ingeschat worden vanaf een waarde van ongeveer 120 MPa. Voor de G₀-modulus bedraagt dit ongeveer 50 MPa.



Figuur 87: Poisson coëfficiënt Georoc monsters

5.1.4. Invloed natriumsulfaat

In veel literatuur (Rasheeduzaffar et al. (1990); O.S. Baghabra Al-Amoudi (2002); M. Collepardi (2004); G. Di Emidio & R.D. Verastegui Flores (2012)) wordt het schadelijk effect van sulfaten op gecementeerde mengsels besproken. Dit schadelijk effect is echter niet terug te vinden in de proefstukken die initieel gemengd werden met natriumsulfaat. Integendeel, een grotere beginstijfheid werd waargenomen. Dit is weergegeven in onderstaande grafieken.





Figuur 88: Invloed sulfaat impact test

De reden hiervoor is dat er geen sprake is van DEF maar EEF. Het ettringiet vormt zich reeds in het nog plastische mengsel. De hierbij horende volumetoename kan bijgevolg geschieden zonder het opwekken van spanningen en scheuren. Dit verklaart waarom de stijfheid van proefstukken gemengd met sulfaten niet lager ligt dan de referentiemonsters, maar heeft geen verklaring waarom ze hoger ligt. Hiervoor moet het hydratatieproces van de cement klinkermineralen bestudeerd worden. De reactie van het mineraal C_3A met water gaat gepaard met een sterkte afname van de mortel. Wanneer echter gips aanwezig is wordt dit negatief effect beperkt gehouden, en dit tot het gips opgebruikt is (V. Boel, 2009). Alle cementsoorten bevatten een hoeveelheid gips, onder de vorm van calciumsulfaat, maar door de reacties met het natriumsulfaat bevatten de proefstukken met sulfaten een grotere hoeveelheid aan gips in vergelijking met de referentiemonsters. Bijgevolg worden de negatieve effecten van het C_3A beperkter gehouden.

De uiteindelijke sterkte van de mortel wordt gedomineerd door het hydratatieproduct CSH (V. Boel, 2009). Onder andere J. Prasad et al. (2006) poneren dat CSH niet tussenkomt in de reacties opgewekt door het natriumsulfaat. Dit verklaart waarom zowel de proefstukken met als zonder sulfaten eenzelfde stijfheid vertonen op langere termijn.

Om het effect van DEF op verschillende monsters in kaart te brengen werden enkele proefstukken, na een hardingsperiode van meer dan drie maand, ondergedompeld in natriumsulfaat oplossingen.

In onderstaande twee grafieken is het effect op twee referentiemonsters weergegeven. Nu is er een duidelijke daling van zowel de E_0 -modulus als G_0 -modulus waar te nemen. Dit werd ook waargenomen door G. Di Emidio en R.D. Verastegui Flores (2012). In dit onderzoek was de daling van de G_0 -modulus echter nog extremer. Dit kan verklaard worden doordat de hardingstijd daar maar 80 dagen in plaats van 115 dagen was. Ook werd een andere testopstelling gebruikt. Met behulp van een *PermeaBender cell* kan een waterstroming gecreëerd worden doorheen het proefstuk. Hierdoor kunnen de sulfaten beter penetreren in het proefstuk.



Figuur 89: Effect Na2SO4 op stijfheid referentiemonsters



Figuur 90: Invloed van natriumsulfaat op G0 bij mengsel van hoogovencement en kaoliniet (R.D. Verastegui Flores & G. Di Emidio, 2013)

De referentiemonsters zijn voorzien van een cement met hoge weerstand tegen sulfaten. De stijfheidsdaling resulteert niet in een totale verbrokkeling van de monsters en na ongeveer 25 dagen is geen verdere stijfheidsdaling meer waar te nemen. Dit waarschijnlijk omdat de sulfaten in oplossing opgebruikt zijn.

De Georoc cementsoorten hebben minder weerstand tegen sulfaten. Hier is dan ook een grotere daling van de stijfheid te verwachten. In eerste instantie werd zowel een ROC SOL als ROC SI proefstuk ondergedompeld in een zelfde concentratie natriumsulfaat (25 g/l). Na een dag bleek de degradatie van de proefstukken echter al dermate hoog dat er geen betekenisvolle resultaten meer konden bekomen worden met de impact test. In onderstaande foto's is duidelijk het expansieve karakter van het natriumsulfaat waar te nemen. De proefstukken vertonen immers een hoge graad van afschilfering.



Figuur 91: Effect 25g/l Na2SO4 op ROC SOL (links) en ROC SI (rechts) proefstukken

Om toch tot enkele resultaten te komen werd een tweede ROC SI proefstuk onderworpen aan een lagere concentratie natriumsulfaat. Nu werd er slechts 10 g/l toegepast. Ook nu werd op korte termijn al visueel schade vastgesteld, hetzij minder extreem. Er is, in vergelijking met de sulfaatbestendige

cementsoort, een veel grotere daling van de stijfheid waar te nemen, zie hiervoor figuur 93. Er dient wel vermeld te worden dat de laatste meting weinig betrouwbaar is. Er worden immers waarden voor E_0 en G_0 -modulus bepaald die lager liggen dan respectievelijk 120 en 50 MPa. Dit houdt in dat de bepaling van de overeenstemmende eigenfrequenties moeilijk en weinig betrouwbaar waren. Dit volgt ook uit de berekening van de Poisson coëfficiënt voor deze laatste meting. Er wordt een waarde van 1.74 bekomen, wat niet haalbaar is.



Figuur 92: Effect 10 g/l Na2SO4 op ROC SI



Evolution stiffness ROC SI-kaolin

Figuur 93: Effect Na2SO4 op stijfheid ROC SI proefstuk

5.2. Vergelijking impact test met modale analyse in Abaqus

5.2.1. Invloed mesh-fijnheid

Naarmate de eigenmodes complexer worden van vorm is er een grotere *mesh*-fijnheid nodig in Abaqus om de eigenmode correct weer te geven. Bij een te grove *mesh* kan de eigenmode onvoldoende nauwkeurig weergegeven worden en zullen inaccurate eigenfrequenties bekomen worden.

De invloed van deze *mesh*-fijnheid wordt onderzocht door de analyse voor een specifieke cilinder door te rekenen voor verschillende *mesh*-fijnheden. De karakteristieken van de onderzochte cilinder zijn weergegeven in onderstaande tabel. Het gaat om karakteristieken horende bij een cilinder die ook werkelijk getest werd met behulp van de impact test.

Densiteit	1422 kg/m ³
E ₀ -modulus	159,07 N/mm²
Poisson coëfficiënt	0.29
Diameter	0.05 m
Lengte	0.10 m
Type element	C3D6

Figuur 94: Karakteristieken cilinder ter bepaling invloed mesh-fijnheid

De laatste rij van bovenstaande tabel geeft weer dat een triangulair prisma met zes knopen gebruikt wordt als *mesh*-element. Abaqus biedt ook andere mogelijkheden, maar het type element blijkt weinig invloed te hebben op de resultaten. Voor alle Abaqus berekeningen werd dan ook het C3D6 element gebruikt.

Onderstaande figuur visualiseert het effect van de *mesh*-fijnheid. Van links naar rechts werden respectievelijk 15, 539 en 57650 elementen toegepast.





Figuur 95: visualisatie mesh-fijnheid Abaqus

In onderstaande grafiek is telkens de eerste longitudinale en transversale eigenfrequentie uitgezet in functie van het aantal elementen waaruit de *mesh* bestaat. Er is een duidelijke convergentie waar te nemen naar het experimentele resultaat van de impact test.



Figuur 96: Invloed mesh-fijnheid op eigenfrequenties

Er zijn een aantal conclusies te trekken uit bovenstaande grafiek. Zo blijkt de fijnheid van de *mesh* vooral een invloed te hebben op de transversale eigenfrequentie en minder op de longitudinale eigenfrequentie. Dit omdat een buigingsmode een complexere vorm heeft dan een zuivere compressieof elongatiemode. Bijgevolg zijn er meer elementen nodig om de mode correct weer te geven.

Uit dit onderzoek blijkt reeds dat, bij een voldoende fijnheid van het *mesh*, er zeer weinig verschil zit tussen de theoretisch bepaalde eerste eigenfrequenties en de experimenteel bepaalde (zie volle lijnen in bovenstaande grafiek). De gegevensverwerking horende bij de impact test blijkt dus zeer nauwkeurige resultaten op te leveren. Dit bewijst tevens ook dat de gefabriceerde cilinders erg homogeen zijn en enkel in het elastisch gebied getest worden.

Een derde vaststelling is eerder merkwaardig. Blijkbaar wordt er, bij een grovere *mesh*-structuur, steeds een onderschatting van de werkelijke eigenfrequenties gemaakt. Dit is in contradictie met wat je in eerste instantie zou verwachten. Immers, wanneer een element een grovere *mesh* heeft dan ligt zijn aantal vrijheidsgraden lager. Bijgevolg kan het element minder goed vervormen dan in werkelijkheid. Zijn stijfheid wordt dus overschat. Met behulp van de gekende formules (F.E. Richart et al., 1970) leidt dit tot een overschatting van de eigenfrequenties. Dit kan ook geïllustreerd worden door uitwerking van een eenvoudig voorbeeld met behulp van de Lagrange-vergelijking (M. Loccufier, 2013).

Beschouw onderstaande twee systemen. Het eerste systeem heeft slechts één vrijheidsgraad, het tweede systeem heeft er twee. De Lagrange vergelijking voor een wrijvingsloos systeem zonder uitwendige belasting wordt gegeven door:

$$\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = 0$$

Hierin is L het verschil tussen kinetische energie T en potentiële energie V van het systeem en is q een vector die alle vrijheidsgraden bevat.



Figuur 97: Illustratie effect vrijheidsgraden op eigenfrequenties

Voor het systeem met één vrijheidsgraad geldt:

$$L = T - V = \frac{1}{2}m\dot{u}^2 - ku^2$$

Vervolgens leidt uitwerken van de Lagrange-vergelijking tot:

$$-2k.u - m.\ddot{u} = 0$$

Zowel de stijfheidsmatrix K als massamatrix M bevatten slechts één element. De eigenfrequentie wordt berekend uit:

$$\det(K - M\omega^2) = 0$$
$$<=>\omega = \sqrt{2}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

Een analoge berekening kan geschieden bij het systeem met twee vrijheidsgraden. Dit systeem wordt gelijkwaardig aan het eerste als $m_1=m_2=m/2$ en $k_1=k_2=2k/3$. Op deze manier wordt eenzelfde totale massa en stijfheid bekomen.

$$L = T - V = \frac{m}{4}(\dot{u}_1^2 + \dot{u}_2^2) - \frac{k}{3}u_1^2 - \frac{k}{3}(u_2 - u_1)^2 - \frac{k}{3}u_2^2$$

Nu kunnen twee Lagrange-vergelijkingen opgesteld worden. Bijgevolg hebben zowel de massamatrix als stijfheidsmatrix twee rijen en kolommen.

$$M = \begin{bmatrix} m/2 & 0\\ 0 & m/2 \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} 4k/3 & -2k/3\\ -2k/3 & 4k/3 \end{bmatrix}$$

Vervolgens kunnen de twee eigenfrequenties van het systeem berekend worden.

$$det(K - M\omega^2) = 0$$
$$\omega_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$\omega_2 = 2 \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Er kan geconcludeerd worden dat bij het equivalente systeem met meer vrijheidsgraden de eerste eigenfrequentie lager ligt. Een analoog systeem met drie vrijheidsgraden zou leiden tot een eerste eigenfrequentie van ongeveer $0.94\sqrt{\frac{k}{m}}$, wat opnieuw lager is. Dus hoe hoger het aantal vrijheidsgraden, hoe lager de eerste eigenfrequentie.

Alhoewel het niet duidelijk is waarom Abaqus de eerste eigenfrequentie steeds onderschat, is het belangrijker te concluderen dat er een duidelijke convergentie optreedt.

In onderstaande figuur is de rekentijd in Abaqus voorgesteld in functie van het aantal elementen. Slechts vanaf een elementafmeting kleiner dan drie millimeter, wat overeenkomt met 16764 elementen in dit geval, begint de rekentijd gevoelig toe te nemen. Voor verdere berekeningen in Abaqus werden dan ook elementen met grootte drie millimeter toegepast.



Figuur 98: Weergave rekentijd i.f.v. aantal elementen in Abaqus

5.2.2. Vergelijking theoretische en experimentele waarden

Vervolgens wordt een vergelijking gemaakt tussen de impact test resultaten en Abaqus resultaten.

De impact test levert na gegevensverwerking de eerste fundamentele frequentie op. Afhankelijk van de wijze van excitatie is dit een transversale of longitudinale eigenfrequentie. Vervolgens worden de formules beschreven door Richart (1970) toegepast om E_0 -modulus en G_0 -modulus te bepalen. Uit deze data kan ook de Poisson-coëfficiënt afgeleid worden. Vervolgens worden deze resultaten gebruikt als input in Abaqus. Abaqus lost de gehomogeniseerde bewegingsvergelijkingen op en genereert de eerste veertig eigenfrequenties. Door bij iedere eigenfrequentie de eigenmode te visualiseren kan snel de eerste longitudinale en transversale eigenfrequentie gevonden worden. Ten slotte kunnen deze theoretisch bekomen eigenfrequenties vergeleken worden met de experimentele uit de impact test.

De berekeningen in Abaqus worden gedaan op de referentieproefstukken met een diameter van 5 cm en de proefstukken met diameter 3.8 en 7 cm. Als input worden steeds de gemiddelde stijfheidskarakteristieken van de proefstukken ingegeven. Zoals eerder aangegeven wordt steeds een *mesh* gebruikt bestaande uit C3D6 elementen met grootte drie millimeter.

Doordat alle gesimuleerde proefstukken een relatief kleine D/l verhouding hebben is het eenvoudig om de verschillende eigenmodes visueel van elkaar te onderscheiden. In onderstaande figuur is een visualisatie gegeven van de eerste vier eigenmodes bij een verhouding diameter lengte van 0.5. De gebruikte *mesh* is hier wel minder fijn dan in de werkelijke berekening.



Figuur 99: Visualisatie eerste vier eigenmodes

De meest linkse eigenmode is een wringingsmode, de twee middelste eigenmodes zijn beiden buigingsmodes en de rechtse eigenmode is een longitudinale mode. Bij een voldoende fijne *mesh* leveren beide buigingsmodes identieke eigenfrequenties op. Er zijn dus slechts drie belangrijke eigenmodes.

De vergelijking tussen het numerieke en experimentele onderzoek is samengevat in onderstaande grafieken. De drie bovenste grafieken handelen over de cilindrische proefstukken met diameter 7cm. Daaronder zijn de resultaten weergegeven voor respectievelijk diameter 5 en 3.8 cm.



Figuur 100: Vergelijking theoretische en experimentele frequenties

Bij alle cilinderafmetingen blijken de experimenteel bepaalde longitudinale eigenfrequenties quasi exact overeen te komen met de theoretisch bepaalde frequenties in Abaqus. Dit is weergegeven in de grafieken (a), (d) en (g). Bij de transversale frequenties (grafieken (b), (e) en (h)) is een, zij het klein, verschil waar te nemen tussen numerieke en experimentele data.

Bij het verschil tussen numerieke en experimentele transversale frequenties kunnen a priori verschillende verklaringen gezocht worden:

Het verschil bij de transversale frequenties kan te wijten zijn aan de *mesh* fijnheid. Alhoewel een redelijk fijne *mesh* toegepast is, blijft het een benadering van de werkelijkheid. In realiteit zijn er nog meer vrijheidsgraden aanwezig in de cilinder. Aangezien Abaqus steeds een onderschatting maakt van de eigenfrequenties, is het verklaarbaar dat de numerieke waarden steeds wat lager liggen dan de experimenteel bepaalde. De buigingsmode heeft een complexere vorm dan de compressiemode. Dit kan verklaren waarom de longitudinale eigenfrequenties beter overeenkomen.

Een tweede mogelijke verklaring is de volgende: wanneer niet de transversale maar de torsie eigenfrequenties geplot worden tegen de experimentele waarden, dan wordt een veel betere gelijkheid bekomen. Dit is zichtbaar in de grafieken (c), (f) en (i). Alhoewel er dus geen torsiemoment uitgeoefend wordt op de proefstukken, komt de eerste eigenfrequentie wel overeen met een torsiemode. Dit zou een praktisch voordeel inhouden omdat dan geen wringend moment moet uigeoefend worden op de proefstukken om de G_0 -modulus te bepalen. Het lijkt echter weinig waarschijnlijk dat een torsiemode in de cilinder opgewekt wordt ten gevolge van een dwarse impact.

Ook het contact met de versnellingsmeter kan aan de basis liggen voor het verschil tussen numerieke en experimentele transversale frequenties. In Abaqus kan de cilinder immers volledig vrij bewegen, waar in de experimentele proefopstelling de cilinder contact maakt met de versnellingsmeter. Deze afwijking is echter niet waar te nemen bij de longitudinale frequenties, waar er ook contact is met de versnellingsmeter. De mogelijkheid bestaat om te werken met contactloze meetapparatuur, zoals een microfoon. Dit valt echter buiten het kader van deze thesis.

De werkelijke oorzaak wordt echter duidelijk in de volgende sectie.

5.2.3. Extrapolatie afmetingen

Het is interessant om te onderzoeken wat de invloed is van de afmetingen van de proefstukken op de eerste eigenfrequenties. Hiertoe worden in Abaqus cilinders met gelijke stijfheidskarakteristieken maar verschillende afmetingen doorgerekend. Eerder onderzoek (S. Mansour, 2014; L. Obert & W.I. Duvall, 1941; H. Thornton & A. Alexander, 1987) indiceerde reeds dat langere cilinders aanleiding

geven tot kleinere eigenfrequenties. Verder zou zowel diameter als verhouding diameter over lengte van de proefstukken een rol spelen.

In eerste instantie worden in Abaqus cilinders doorgerekend met constante lengte maar variërende diameter. Verdere input in Abaqus is weergegeven in onderstaande tabel.

Densiteit	1422 kg/m³
E ₀ -modulus	446,90 N/mm²
Poisson coëfficiënt	0,24
Lengte	0.10 m
Type element	C3D6

Figuur 101: Karakteristieken cilinders ter bepaling invloed lengte

Vervolgens worden de eerste eigenfrequenties (transversaal, torsie en longitudinaal) doorgerekend voor diameters gaande van 0.01 tot 0.1 m. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande grafiek.



Influence diameter on natural frequencies

Figuur 102: Effect diameter proefstukken op eigenfrequenties

Opdat de impact test tot betrouwbare resultaten zou leiden bij variërende proefstukken, moeten de eigenfrequenties van proefstukken met gelijke lengte maar verschillende diameter gelijk zijn aan elkaar. De E_0 en G_0 -modulus worden immers berekend door onderstaande formules en zijn materiaalconstanten.

$$E_0 = \rho (2f_{1,lon}l)^2$$
$$G_0 = \rho (2f_{1,tor}l)^2$$

Uit bovenstaande grafiek blijken inderdaad de longitudinale en torsie eigenfrequentie onafhankelijk te zijn van de diameter. De longitudinale eigenfrequentie vertoont wel een lichte daling bij toenemende diameter. Er moet echter opgemerkt worden dat bovenstaande formules enkel geldend zijn voor de golfvoortplanting in staafvormige elementen (Richart, 1970). Een diameter van 0.1 m leidt hier reeds tot D/l=1, wat nog moeilijk als een staaf kan beschouwd worden. Binnen het toepassingsgebied van de gebruikte formules blijkt dus ook de longitudinale eigenfrequentie redelijk constant te blijven. Verder vermeldt ASTM E1876 een correctiefactor K, die toegepast wordt op bovenstaande formule ter bepaling van E_0 .

$$E_0 = \frac{\rho (2f_{1,lon}l)^2}{K}$$
$$K = 1 - \frac{\pi^2 v^2 D^2}{8l^2}$$

Door toepassing van deze K factor, wordt de paarse curve gegenereerd. Zoals te zien in onderstaande grafiek, benadert deze beter een constante.



Influence diameter on stiffness

Figuur 103: Effect K factor op E₀-modulus

De transversale eigenfrequentie blijkt echter zeer afhankelijk te zijn van de diameter van de proefstukken. Ze stijgt bij stijgende diameter, wat ook geconcludeerd werd door H. Thornton en A. Alexander (1987). Dit heeft zijn gevolgen op de correctheid van de impact test. Dit wordt verduidelijkt in volgende alinea.

Met de impact test worden de eigenfrequenties van proefstukken berekend. Vervolgens kan de theorie beschreven door Richart (1970) gebruikt worden om de stijfheidskarakteristieken van de proefstukken te bepalen. De glijdingsmodulus wordt, volgens deze theorie, berekend op basis van de eerste eigenfrequentie in torsie. Aangezien het in praktijk moeilijk is een wringend moment uit te oefenen op cilindervormige proefstukken, werd dit vervangen door een transversale belasting. Zo wordt met de impact test niet de eerste eigenfrequentie in torsie, maar de eerste eigenfrequentie in buiging bepaald. Er wordt verder uitgegaan van de veronderstelling dat deze beide frequenties gelijk zijn aan elkaar. Bij de geteste proefstukken is dit ook grosso modo het geval, zie hiervoor Figuur 100. Deze proefstukken hebben echter allen een D/l-verhouding van ongeveer 0.50. Op bovenstaande grafiek is zichtbaar dat net bij dergelijke D/l-verhoudingen de transversale eigenfrequentie ongeveer gelijk is aan de frequentie in torsie. Wanneer echter meer afgeweken wordt van deze D/l-verhouding, zal de eigenfrequentie in torsie fouter ingeschat worden. Er kan bijgevolg geconcludeerd worden dat de bepaling van de G₀-modulus met behulp van de impact test enkel correct is voor monsters met een D/l-verhouding van 0.54.

Wanneer de eerste transversale eigenfrequentie opgemeten wordt, kan deze omgezet worden naar de eerste eigenfrequentie in torsie. Deze relatie wordt bekomen door de verhouding van beide frequenties uit te zetten in functie van de D/l-verhouding. Zoals hieronder links zichtbaar, beantwoord deze relatie aan een vierdegraads polynoom. Wanneer de verhouding van berekende G₀-moduli uitgezet wordt in functie van de D/l-verhouding, dan wordt met goede benadering een kwadratische relatie bekomen.



Figuur 104: Relatie tussen D/L en f,tra/f,tor (links) en G,tra/G,tor (rechts)

Het gelijkstellen van bovenstaande functievoorschriften aan één, levert de D/l-verhouding waarbij respectievelijk de eigenfrequenties (in torsie en buiging) en de berekende G_0 -moduli aan elkaar gelijk zijn.

$$\frac{f_{1,tra}}{f_{1,tor}} = 1 <=> \frac{D}{L} = 0.536$$
$$\frac{G_{tra}}{G_{tor}} = 1 <=> \frac{D}{L} = 0.539$$

Voor kleine D/l-verhoudingen (D/l<0.7) is de relatie tussen G_{tra}/G_{tor} en D/L als lineair te beschouwen. Dit is weergegeven in onderstaande grafiek.



Linear relation between G,tra/G,tor and D/L for D/L<0,7



Voor dit lineaire verband geldt:

$$\frac{G_{tra}}{G_{tor}} = 1 < => \frac{D}{L} = 0.544$$

Vervolgens kan ook het effect van de lengte onderzocht worden. Hiertoe wordt ditmaal de diameter constant gehouden op 0.05 m en wordt gerekend met een variërende lengte, gaande van 0.05 tot 0.5 m. Verwacht wordt dat de eigenfrequenties dalen bij toenemende lengte. Dit is ook het geval, zoals weergegeven in onderstaande grafiek.



Figuur 106: Effect lengte proefstukken op eigenfrequenties

Deze variërende eigenfrequenties betekenen echter niet dat de stijfheidskarakteristieken van de proefstukken ook variëren bij verschillende lengtes. Volgens de theorie van de golfvoortplanting in staafvormige elementen (Richart, 1970) moeten deze frequenties in het kwadraat immers vermenigvuldigd worden met de lengte van het proefstuk. De berekening van de stijfheidskarakteristieken is gevisualiseerd in onderstaande grafiek.



Influence length on stiffness

Figuur 107: Effect lengte proefstukken op stijfheidskarakteristieken

Dezelfde conclusies kunnen getrokken worden. De G_0 en E_0 -modulus van de proefstukken kunnen als een constante beschouwd worden bij variërende lengte op voorwaarde dat gerekend wordt met respectievelijk de torsie en longitudinale eigenfrequenties. Bij kleine lengtes wordt de E_0 -modulus hier wel onderschat. Dit kan deels gecompenseerd worden door opnieuw de K factor te introduceren (zie paarse curve). Verder heeft de onderschatting van de E_0 -modulus bij grote D/l-verhoudingen ook te maken met numerieke fouten. In dit geval heeft een grote D/l-verhouding kleine cilinders tot gevolg. Bij gebruik van gelijke elementen daalt de *mesh*-fijnheid bijgevolg. Eerder werd reeds gezien dat een onvoldoende fijne *mesh* leidt tot onderschatting van de eigenfrequenties (en dus ook stijfheidskarakteristieken).

Analoog als bij variërende diameter kunnen ook hier de verbanden tussen $f_{1,tra}/f_{1,tor}$ en G_{tra}/G_{tor} in functie van D/l gevisualiseerd worden. Dit is weergegeven in onderstaande grafieken. Quasi identieke relaties kunnen opgesteld worden.


Figuur 108: Relatie tussen D/L en f,tra/f,tor en G,tra/G,tor

Dezelfde conclusies kunnen getrokken worden als bij een variërende diameter. Bij D/l-verhoudingen die kleiner zijn dan 0.7 heerst een lineair verband tussen G_{tra}/G_{tor} en D/l. Bij een D/l-verhouding van ongeveer 0.54 is de transversale eigenfrequentie gelijk aan deze in torsie.

De opgestelde verbanden blijven ook zeer goed gelden voor cilindrische proefstukken met andere stijfheidskarakteristieken of densiteit. In onderstaande grafieken is de vergelijking gemaakt tussen het referentieproefstuk, waarvan de gegevens terug te vinden zijn in Figuur 101, en een beperkt aantal proefstukken met gewijzigde E_0 -modulus, Poisson coëfficiënt of densiteit.





Figuur 109: Invloed stijfheidskarakteristieken en densiteit op relaties tussen D/L en f,tra/f,tor en G,tra/G,tor

Tenslotte werd nagegaan wat het effect is van de globale cilinder afmetingen op de stijfheidskarakteristieken. Hiertoe werden in Abaqus enkele cilinders doorgerekend met een gelijke D/l-verhouding maar variërende groottes. Uit voorgaande paragrafen bleek al dat bij stijgende lengte G_{tra} afneemt en bij stijgende diameter G_{tra} toeneemt, en dit volgens een quasi identieke trend. Verwacht wordt dus dat de absolute grootte van de elementen geen effect heeft op de glijdingsmodulus. Dit wordt bevestigd door de resultaten in onderstaande grafiek.



Figuur 110: Effect grootte proefstukken op stijfheidskarakteristieken

Hieruit blijkt duidelijk dat de absolute afmetingen van de proefstukken geen invloed hebben op G_0 en E_0 -modulus. De G_0 -modulus gebaseerd op eigenfrequenties in torsie of buiging liggen hier zeer dicht bij elkaar. Dit omdat een D/l-verhouding van 0.5 gebruikt werd. Hoe meer deze waarde afwijkt van 0.54, hoe groter het verschil tussen beide G_0 -moduli zal zijn.

Er kan geconcludeerd worden dat de berekende G_0 -modulus door middel van de impact test enkel de correcte waarde is voor proefstukken met D/l=0.54. Indien andere verhoudingen toegepast worden kunnen de bekomen G_0 -moduli wel geconverteerd worden naar de correcte waarden. Dit gebeurt door de bekomen resultaten te delen door de werkelijke D/l-verhouding en te vermenigvuldigen met 0.54. In onderstaande figuur is deze conversie uitgevoerd. In de linkse figuur is nogmaals de evolutie van G_0 -modulus terug te zien voor de verschillende proefstukken. In de rechtse figuur is deze evolutie weergegeven na conversie. Het is duidelijk waarneembaar dat de G_0 -modulus nu onafhankelijk geworden is van de proefstukafmetingen.



Figuur 111: Conversie G₀-moduli

Tenslotte is nu ook een verklaring gevonden voor de afwijking tussen theoretische en experimentele transversale eigenfrequenties in Figuur 100. De input in Abaqus is immers niet volledig correct want gebaseerd of de eigenfrequentie in buiging in plaats van torsie.

5.3. Vergelijking impact test met benchtop test

In deze sectie worden de berekende G_0 -moduli van beide testopstellingen met elkaar vergeleken. Aangezien de *benchtop* test enkel uitgevoerd werd met *bender elements* en niet met *extender elements*, kan er geen vergelijking gemaakt worden tussen de E_0 -moduli.

In vorige sectie werd duidelijk dat de berekende G_0 -moduli, uitgaande van de impact test, voor de referentieproefstukken onderschat werden. Meer correcte waarden werden bekomen door de berekende G_0 -moduli te vermenigvuldigen met 1.08 (0.54/0.5). Wanneer in deze sectie verwezen wordt naar de G_0 -moduli van de impact test, dan gaat het over deze vergrote waarden.

Zoals reeds in de literatuurstudie vermeld werd, bestaan er verschillende methoden om de reistijd van de spanningsgolf te meten bij de *benchtop* test. Hier werd de reistijd zowel bepaald met de *first time to arrival* (fta), *peak to peak* (ptp) en kruiscorrelatie methode.

Eerder werd reeds vermeld dat de kruiscorrelatie een functie oplevert die een ordinaat in functie van de tijdsverschuiving input-output signaal visualiseert. Het maximum van deze functie valt dan samen met de reistijd van de spanningsgolf. Ten gevolge van golfreflecties zal deze functie echter meerdere lokale maxima vertonen. Meestal zal het eerste maxima samenvallen met de beoogde reistijd van de spanningsgolf. Toch is het interessant om steeds deze reistijd te vergelijken met de visueel vastgestelde tijd. Dit wordt later duidelijk.

In onderstaande grafieken zijn voor de drie *benchtop* testopstellingen de evolutie van de verschillende reistijden weergegeven. De twee visuele methoden (fta en ptp) leiden steeds tot quasi exacte resultaten. Bij de testopstellingen zonder sulfaten en met 15 *parts per million* (ppm) natriumsulfaat blijkt de kruiscorrelatie methode (weergegeven met cross) tot gelijkaardige resultaten te leiden in vergelijking met de visuele methoden. Bij de derde testopstelling (30 ppm sulfaat) vertoont de kruiscorrelatie methode echter een sprong na een hardingstijd van 14 dagen. Na deze datum vertoont de methode opnieuw een goede gelijkenis met de visuele methoden. Voor deze datum worden de reistijden echter onderschat. Deze knik is niet logisch, daarom wordt bij de kruiscorrelatie methode ook de reistijd horende bij het tweede maximum geplot. In de grafieken is dit weergegeven als crossmax, dit omdat dit tweede extremum steeds groter is dan het eerste.



Figuur 112: Vergelijking reistijden benchtop testopstellingen

Wanneer de grafiek horende bij de testopstelling met 30 ppm sulfaten beter bekeken wordt, dan blijkt tot een hardingstijd van 14 dagen de crossmax resultaten nauw aan te sluiten bij de visuele opmetingen. Bij langere hardingstijden begint de reistijd horende bij crossmax opnieuw te stijgen. Dit is onlogisch en voor deze hardingstijden wordt een betere overeenkomst gevonden als de cross resultaten weerhouden worden. Dit illustreert dat de resultaten via de kruiscorrelatie methode niet blind mogen weerhouden worden maar dat aangeraden wordt steeds de vergelijking met de visuele resultaten te maken.

In onderstaande grafieken is de vergelijking gemaakt tussen de *benchtop* testopstellingen en de impact test.



Comparison G-moduli: benchtop 0ppm vs. impact test



De bovenste grafiek vergelijkt de gemiddelde G_0 -modulus waarden van de referentiemonsters met de waarden bekomen uit de *benchtop* zonder sulfaten. Bij deze *benchtop* testopstelling werden de G_0 -moduli berekend uitgaande van drie verschillende tijdsmetingen (fta, cross, crossmax). De *peak to peak* methode werd niet gevisualiseerd omdat deze toch identieke resultaten oplevert als de *first time to arrival* methode. Onmiddellijk wordt duidelijk dat G_crossmax geen realistische waarden zijn. Dit was ook al duidelijk bij het bestuderen van de reistijden. Opvallend is wel dat de G_0 -modulus, bepaald uitgaande van de impact test, kleiner is dan deze uitgaande van de *benchtop* test. Dit is te wijten aan het feit dat de referentieproefstukken ontkist werden en daardoor een zekere verstoring onderhingen. Daarentegen kunnen de *benchtop* opstellingen als niet-verstoorde proefstukken beschouwd worden.

Analoge besluiten kunnen getrokken worden op basis van de onderste grafiek. Deze vergelijkt de gemiddelde G_0 -moduli van de proefstukken vermengd met 15ppm natriumsulfaat met de *benchtop* opstelling met gelijke concentratie sulfaten.

Alhoewel de absolute waarden van glijdingsmoduli verschillen bij beide testen, kent de stijfheidsevolutie toch een analoog verloop. Dit wordt gevisualiseerd in onderstaande grafieken. Hier wordt de glijdingsmodulus genormaliseerd met de waarde na 28 dagen. In deze grafieken zijn de G_0 -moduli horende bij de *benchtop* testopstelling gebaseerd op de *first time of arrival*. Onderstaande grafieken wijzen erop dat, door de monsters te ontkisten, een lagere beginstijfheid bekomen wordt bij de proefstukken getest met de impact test. Vervolgens wordt echter een analoge stijfheidstoename bekomen.



Figuur 113: Vergelijking genormaliseerde stijfheidsevolutie impact-benchtop

Tenslotte wordt in onderstaande grafiek de resultaten van de *benchtop* testopstelling met 30 ppm sulfaten weergegeven. Hier kan niet de vergelijking gemaakt worden met de impact test omdat geen proefstukken met dergelijke sulfaatconcentratie vervaardigd werden. Betreffende de kruiscorrelatie: de resultaten voor een hardingstijd van 14 dagen zijn gebaseerd op de crossmax-reistijd. Deze na 14 dagen zijn gebaseerd op de cross-reistijd.



Figuur 114: G₀-moduli benchtop 30 ppm

5.4. Vergelijking impact test met LDV test

Vier verschillende cilinders werden na een hardingsperiode van 27 en 91 dagen getest met de LDV test. Het gaat om twee referentieproefstukken, een proefstuk met diameter 7 cm en een proefstuk met diameter 3.8 cm.

De berekende eigenfrequenties na FFT zijn weergegeven in onderstaande grafieken en worden vergeleken met de eigenfrequenties bekomen uit de impact test. Het is duidelijk dat beide testopstellingen tot erg analoge resultaten leiden. De gemiddelde afwijking op de opmeting van de eerste longitudinale eigenfrequentie bedraagt 2%. Voor de eerste transversale eigenfrequentie is dit 1%.



Vervolgens kunnen de gekende formules gebruikt worden om de stijfheidskarakteristieken te berekenen. In onderstaande figuur zijn de berekende E_0 -moduli met behulp van de LDV test weergegeven als punten en worden deze vergeleken met de impact test (volle lijn).



Comparison E-moduli impact vs. LDV test

Tenslotte kunnen ook de berekende G_0 -moduli met elkaar vergeleken worden. Zoals reeds besproken in sectie 5.2.3, zijn de G_0 -moduli van LDV-test en impact test gecorrigeerd naargelang de D/lverhouding. Aanvullend werden de vier cilinders ook getest met *bender elements*. Op deze wijze kan de G_0 -modulus bepaald worden op een wijze analoog aan de *benchtop* testopstelling. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande grafieken.



500

₩ 400 ₩ 300

200

100

Comparison G-moduli impact vs. LDV test

het materiaal, zoals bij de *benchtop* testopstelling. Ze worden enkel tegen de cilinders gehouden.

LDV test

Impact test

Bender test

500

@ 400 W 300

200

100

c

LDV test

Impact test

Bender test

6. Conclusies

6.1. Vergelijking toegepaste niet-destructieve testen

De impact test of *impulse excitation of vibration method* heeft als grootste voordeel (ten opzichte van andere testmethoden) zijn eenvoud. Een versnellingsmeter en oscilloscoop zijn de enige benodigde apparatuur. De LDV test en *benchtop* test vergen respectievelijk de aankoop van een vibrometer en *bender elements*. Los van de verhoogde kosten, leidt dit ook tot een verminderde transparantie van de testen. Bepaalde defecten aan apparatuur worden immers niet altijd tijdig gesignaliseerd of zijn moeilijk oplosbaar.

De impact test en LDV test bieden de mogelijkheid om zonder veel inspanning informatie over E_0 en G_0 -modulus te bekomen. Met een *benchtop* testopstelling met ingewerkte *bender elements* is het enkel mogelijk om de G_0 -modulus te berekenen.

Met de besproken opstellingen voor de impact test en LDV test is het echter enkel mogelijk om de eerste eigenfrequentie in buiging te bepalen en niet de eerste eigenfrequentie in torsie. De berekening van G_0 -moduli is in functie van deze laatste. Het gebruik van de eerste eigenfrequentie in buiging ter bepaling van de G_0 -modulus levert resultaten op die in functie zijn van de D/l-verhouding van de geteste proefstukken. Uit numeriek onderzoek werd afgeleid dat voor D/l-verhoudingen kleiner dan 0.7 een lineair verband geldig is tussen de G_0 -modulus berekend op basis van de eerste eigenfrequentie in torsie. Dit verband kan als volgt benaderd worden.

$$G_{tor} = \frac{0.54}{D/L} G_{tra}$$

De testopstelling die gebruik maakt van *bender elements* behoeft deze conversie niet aangezien niet in het frequentiedomein gewerkt wordt. Verder vertonen de geteste mengsels in de *benchtop* testopstelling een geringere verstoring in vergelijking met de cilindrische proefstukken. Deze laatste vertonen een lagere beginstijfheid ten gevolge het ontkisten. De stijfheidsevolutie daarentegen is analoog. De opmeting van een eerste eigenfrequentie kan wel als objectiever beschouwd worden dan de bepaling van aankomsttijd van een spanningsgolf. Dit maakt de resultaten van impact test en LDV test betrouwbaarder in vergelijking met een *bender elements* test.

De berekende stijfheidskarakteristieken met de LDV test en impact test zijn erg gelijkend en vertonen ook een zeer goede gelijkenis met de numerieke resultaten. Dit impliceert dat de proefstukken een grote homogeniteit bezitten en zich elastisch gedragen onder de toegepaste excitaties. Anderzijds wijst dit erop dat de randvoorwaarden de bewegingsvrijheid van de proefstukken nauwelijks limiteren.

6.2. Effect sulfaataanval, cementsoort en dimensies proefstukken op stijfheid

De proefstukken die bij aanmaak vermengd werden met natriumsulfaatconcentraties vertonen geen afname van stijfheid. Integendeel, er wordt een grotere beginstijfheid bekomen in vergelijking met de proefstukken zonder sulfaten. De expansie van het gevormde ettringiet kan spanningsloos geschieden in het nog vloeibare mengsel. Daarenboven wordt de nefaste reactie van het klinkermineraal C_3A met water meer gecompenseerd door de hogere hoeveelheden aan gips. De stijfheid op lange termijn wordt bepaald door het hydratatieproduct CSH en is bijgevolg identiek bij proefstukken met en zonder sulfaten.

Wanneer proefstukken na verharding ondergedompeld worden in een natriumsulfaatoplossing, dan is het destructieve karakter van de ettringiet vorming wel duidelijk waarneembaar. Dit omdat nu de expansieve reacties leiden tot inwendige spanningen en scheurvorming. Ook wordt nu duidelijk dat de stijfheidsafname sterk afhankelijk is van de toegepaste cementsoort. Sulfaatbestendige cementsoorten vertonen een beperkte stijfheidsafname zonder afschilfering. Georoc cementsoorten vertonen een quasi totale stijfheidsafname met grote scheurvorming en afschilfering.

De Georoc cementsoorten vertonen verder ook een geringere stijfheidstoename in vergelijking met het hoogovencement. Een logaritmisch verloop is hier ook niet merkbaar. Ter volledigheid moet wel vermeld worden dat enkel de reactie met kaoliniet met zeer hoog watergehalte getest werd. De reacties tussen Georoc cementen en werkelijke grondsoorten valt buiten het toepassingsgebied van deze thesis.

Tenslotte werd geconcludeerd dat de afmetingen van cilindrische proefstukken geen effect hebben op de stijfheidskarakteristieken. Dit wel op voorwaarde dat de eerste eigenfrequentie in torsie opgemeten wordt of de nodige conversies gebeuren op de berekende G₀-modulus.

7. Referentielijst

Amin M.M. et al. (2007). Effects of Magnesium Sulfate Attack on Ordinary Portland Cement (OPC) Morters. *Portugaliae Electrochimica Acta*, nr. 26, pp. 235-242. Geraadpleegd op 28 oktober 2013 via <u>http://www.bhrc.ac.ir</u>

Baeten, J. (2002). *Meetsystemen* [syllabus]. Katholieke Hogeschool Limburg, Departement industriële wetenschappen en technologie.

Baghabra Al-Amoudi, O.S. (2002). Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments. *Cement & Concrete Composites*, 24, pp. 305-316.

Bahador, M. & Pak, A. (2008). Small-Strain Shear Modulus of Cement-Admixed Kaolinite. *Geotech Geol Eng.*

Banks, B. et al. (1962). Ultrasonic Flaw Detection in Metals. Prentice-Hall.

Boel, V. (2009). *Bouwmaterialen* [syllabus]. Hogeschool Gent, Departement Toegepaste Ingenieurswetenschappen.

Bracewell, R. (1978). *The Fourier Transform and its Applications*, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., 444 p.

Breuning, M. (1990). Piëzo-elektrische elementen en hun toepassingen. *Mikroniek*, nr. 5/6, pp. 131-136. Geraadpleegd op 16 november 2013 via <u>www.dspe.nl</u>

Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations*. (3de druk). Arizona: John Wiley & Sons, Inc.

Camacho-Tauta, J.F. (2012). A procedure to calibrate and perform the bender element test. *Dyna*, nr. 176, pp. 10-18.

Carino, N.J. et al. (1986), A Point Source - Point Receiver Technique for Flaw Detection in Concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 83, No. 2, pp. 199-208.

Carino, N.J. (2001). *The impact echo method: an overview* [brochure].National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, Building and Fire Research Laboratory.

Chee-Ming Chan. (2010). Bender Element Test in Soil Specimens: Identifying the Shear Wave Arrival Time, *EJGE*, vol. 15, pp. 1263-1276.

Collepardi, M. (2004). A State-of-the-Art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26, nr. 6, pp. 755. Geraadpleegd op 20 oktober 2013 via www.sciencedirect.com

Das, B.M. & Ramana, G.V. (2010). Principles of Soil Dynamics. (2de druk).

Davis, A.G. et al. (1998). *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures* [ACI Committee 228]. American Concrete Institute.

Delfosse-Ribay, E. et al. (2004). Shear modulus and damping ratio of grouted sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nr. 24, pp. 461-471.

Di Emidio, G. & Verastegui Flores, R.D. (2012). Impact of sulfates on the mechanical and hydraulic behavior of a cement-clay mix. Universiteit Gent, Geotechnisch labo.

Di Emidio, G. & Verastegui Flores, R.D. (2013). Hydraulic conductivity and small-strain stiffness of a cement-bentonite sample exposed to suphates. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.*

Gaidis, J.M. & Rosenburg, M. (1986). New test for determining fundamental frequencies of concrete. *Cement Concr. Aggregates*, CCAGDP, 8(2), 117.

Hendee, W.R. & Ritenour, E.R. (2002). *Medical Imaging Physics*. (4de druk). Wiley-Liss, Inc.

Henderson, I.K. (2011). *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*. Geraadpleegd op 16 november via <u>http://www.americanpiezo.com</u>

Ibrahim, A. et al. (2011). Determination of very small strain shear modulus of Auckland residual soils using bender elements. *Building and Earthquake-Resilient Society*.

Khan, Z. et al. (2010). Frequency dependent dynamic properties from resonant column and cyclic triaxial tests. *Journal of The Franklin Institute*, nr. 348, pp. 1363-1376.

Krautkrämer, J. and Krautkrämer, H. (1990). *Ultrasonic Testing of Materials*. (4de druk). Springer-Verlag, New York.

Kumar, J. & Madhusudhan, B.N. (2010). A note on the measurement of travel times using bender and extender elements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, nr.1, pp. 630-634. Geraadpleegd op 29 september 2013 via <u>www.sciencedirect.com</u>

Loccufier, M. (2013). *Dynamica van Constructies* [syllabus]. Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen.

Malhatra, V.M. & Carino, N.J. (2004). *Nondestructive testing of concrete*. (2de druk). CRC Press.

Mansour, S. (2014). The Impact of Specimen Size and Void Content on the Impact Resonance Testing of Asphalt Concrete. *TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers*.

Nazarian, S et al. (2005). *Quality Management of Flexible Pavement Layers with Seismic Methods* [research report]. University of Texas, Center for Transportation Infrastructure Systems.

Obert, L. & Duvall, W.I., (1941). Discussion of dynamic methods of testing concrete with suggestions for standardization, Proc. ASTM, 41, 1053.

Prasad, J. et al. (2006). Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar. *Asian Journal of Civil Engineering*, 7, nr. 3, pp. 259-268. Geraadpleegd op 28 oktober 2013 via <u>http://www.bhrc.ac.ir</u>

Puppala, A.J. (2005). Experimental studies on ettringite-induced heaving in soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131. nr. 3, pp. 325-337.

Rasheeduzzafar et al. (1990). Influence of cement composition on the corrosion of reinforcement and sulphate resistance of concrete. *ACI Materials Journal*, 87, nr. 2, pp. 114-122.

Richart, F.E. (1970). *Vibrations of Soils and Foundations*. (1ste druk). New Jersey: Prentice Hall.

Smith, S. (1998). *The Scientist and Engineer* 's *Guide to Digital Signal Processing*. Geraadpleegd op 14 februari 2014 via <u>http://www.dspguide.com/pdfbook.htm</u>

Snoeck, D. (2008). *Spannings-vervormingsgedrag van artificieel gecementeerde kaolinietklei* [thesis]. Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen.

Sulfate attack in concrete and mortar (2005). Geraadpleegd op 20 oktober 2013 via <u>http://www.understanding-cement.com/sulfate.html</u>

Thornton, H. & Alexander, A. (1987). *Development of Nondestructive Testing Systems for In Situ Evaluation of Concrete Structures*. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg.

Vanwalleghem, J. et al. (2014). External damping losses in measuring the vibration damping properties in lightly damped specimens using transient time-domain methods. *Journal of Sound and Vibration*, nr. 333, pp. 1596-1611.

Verastegui Flores, R.D. et al. (2010). Small-Strain Shear Modulus and Strength Increase of Cement-Treated Clay. *Geotechnical Testing Journal*, 33, nr.1.

Viggiani, G. & Atkinson, J., Interpretation of bender element tests, Géotechnique, vol. 45, nr. 1, pp. 149-154, 1995.

Young S. Cho (2003). Non-destructive testing of high strength concrete using spectral analysis of surface waves. *NDT&E International*, 36, nr.1, pp. 229-235. Geraadpleegd op 29 september 2013 via <u>www.sciencedirect.com</u>

Figurenlijst

Figuur 1: Weergave normaalspanningen, rekken (Budhu, 2011)	2
Figuur 2: Weergave schuifspanning, glijding (Budhu, 2011)	3
Figuur 3: Rek-spanningsdiagram grond (Budhu, 2011)	3
Figuur 4: Glijdings-schuifspanningsdiagram grond (Budhu, 2011)	4
Figuur 5: Massa-veersysteem (Abaqus documentatie)	5
Figuur 6: Verloop schokbelasting (M. Loccufier, 2013)	6
Figuur 7: Voorbeeld responsie systeem (M. Loccufier, 2013)	7
Figuur 8: Horizontaal evenwicht cilindermoot (Richart F.E., 1970)	8
Figuur 9: Torsie in cilindervormige staaf (Richart F.E., 1970)	9
Figuur 10: Laagste drie eigenmodes cilinder (Richart F.E., 1970)	12
Figuur 11: Schema forced resonance method (ASTM C 215)	13
Figuur 12: Posities steunpunten, driver en pickup (ASTM C 215)	14
Figuur 13: Kristalstructuur keramisch materiaal (I.K. Henderson, 2011)	16
Figuur 14: Polariseren van keramisch materiaal (I.K. Henderson, 2011)	17
Figuur 15: Weergave direct en invers piëzo-elektrisch effect (M. Breuning, 1990)	18
Figuur 16: Verval van piëzo-elektriciteit (J. Baeten, 2002)	18
Figuur 17: Werking buigelement (D. Snoeck, 2008)	19
Figuur 18: Schema bender element test (A.G. Davis, 1998)	19
Figuur 19: Illustratie near field effect (J. Kumar & B.N. Madhusudhan, 2010)	20
Figuur 20: Schematisering Impulse excitation of vibration test (ASTM E 1876)	22
Figuur 21: Vergelijking forced resonance method met impulse excitation of vibration test	
(J.H. Gaudis & M. Rosenurg, 1986)	23
Figuur 22: Configuratie buigingsmode (ASTM E 1876)	24
Figuur 23: Configuratie longitudinale mode (ASTM E 1876)	24
Figuur 24: Configuratie torsiemode (ASTM E 1876)	25
Figuur 25: Opmeting eigenfrequentie in torsie bij cilinders (ASTM C 215)	25
Figuur 26: Vergelijking analytische formules ASTM C 215 en ASTM E 1876	26
Figuur 27: Doppler effect bij bewegende bron (W.R. Hendee & E.R. Ritenour, 2002)	27
Figuur 28: Configuratie LDV (Polytec user manual)	28
Figuur 29: Superpositie twee golven met frequentieverschuiving (http://hyperphysics.phy-	
astr.gsu.edu/hbase/sound/beat.html)	29
Figuur 30: Meetmogelijkheden LDV (Polytec user manual)	29
Figuur 31: Principe RDFT (S. Smith, 1998)	32
Figuur 32: Principe CDFT (S. Smith, 1998)	33
Figuur 33: Voorbeeld time domain decomposition (S. Smith, 1998)	34
Figuur 34: Visualisatie binaire positie (S. Smith, 1998)	34
Figuur 35: Compositie vector in frequentiedomein (S. Smith, 1998)	35
Figuur 36: Oxides en componenten van portlandcement (V. Boel, 2009)	36
Figuur 37: Mechanisme natriumsulfaataanval (M. Santhanam, 2003)	38
Figuur 38: Mechanisme Magnesiumsulfaataanval (M. Santhanam, 2003)	40
Figuur 39: Effect C3A en C3S/C2S op sulfaatbestendigheid (Rasheeduzzafar et al., 1990)	42

Figuur 40: Cementsoorten (Febelcem)	. 43
Figuur 41: Chemische samenstelling CEM III/B 42.5 N LH/SR LA	. 44
Figuur 42: Sterkteklassen cement (Boel, 2009)	. 45
Figuur 43: Structuur kaoliniet (M. Budhu, 2011)	. 47
Figuur 44: Weergave grondtoestanden in functie van watergehalte (M. Budhu, 2011)	. 47
Figuur 45: Gegevens gebruikt natriumsulfaat	. 48
Figuur 46: Indeling agressiviteit grondwater/bodem o.b.v. sulfaatconcentratie (NEN-EN 20)6-
1)	. 48
Figuur 47: Overzicht case studies schade t.g.v. ettringiet vorming (A.J. Puppala, 2005)	. 49
Figuur 48: Voorbereiding cilinders	. 50
Figuur 49: Effect watergehalte op stijfheidsmodulus klei (S. Nazarian, 2005)	. 51
Figuur 50: Kaoliniet voor (links) en na (rechts) fijnmalen	. 53
Figuur 51: Digitale weegschalen Acculab (links) en CP153 (rechts)	. 53
Figuur 52: Mengen water-sulfaat oplossing	. 54
Figuur 53: Hobart deegmixer (links), droog mengproces (centraal), nat mengproces (rechts)54
Figuur 54: Triltafel Retsch	. 55
Figuur 55: Getrimd proefstuk	. 55
Figuur 56: Automatische ontkistingsopstelling	. 56
Figuur 57: Opbouw piëzo-elektrisch buigelement (Verastegui Floret et al., 2010)	. 57
Figuur 58: Opstelling Benchtop bender elements test (Verastegui Floret et al., 2010)	. 58
Figur 59: Principe meetopstelling Benchtop bender element	. 59
Figuur 60: Meetopstelling Benchtop bender element	. 59
Figuur 61: Voorbeeld gegenereerd tekstbestand Picoscope	. 60
Figuur 62: Script conv2mat.m	. 60
Figuur 63: Gegevensmatrix na omzetting m.b.v. conv2mat.m.	. 60
Figuur 64: Kruiscorrelatie code	. 61
Figuur 65: Voorbeeld resultaat kruiscorrelatie	. 61
Figure 66: Excitatie longitudinale eigenmode	. 62
Figure 67: Excitatie transversale eigenmode	. 63
Figure 68: Schematische opbouw versnellingsmeter (http://users.ecs.soton.ac.uk)	. 63
Figure 69: Werking regelbare condensator	. 64
Figure 70: Opkuisen CSV-bestand	. 65
Figure 71: Tijdsmeting Fasyscone	65
Figure 72: Script plot frequentiespectrum m b v FFT	66
Figur 73: Voorbeeld generatie frequentiespectrum	. 00 67
Figur 74: Script plot frequentiespectrum m b v correlatietheorie	. 07 67
Figur 75: Onstelling I DV test ter benaling transversale eigenfrequentie	68
Figur 76: Script plot frequentiespectrum m b v eigenFFT m	60 . 69
Figure 70: Vergelijking verschillende scripts ter benaling frequentie spectrum I DV test	. 02 69
Figur 78: Creatie part in Abacus CAF	71
Figuur 70: Specificatie materiaalkarakteristieken Abacus CAF	. / 1 71
Figur 80: Creatie frequentiestan Abaqus	. 71 72
Figure 81: Weergave eigenfrequenties/eigenmodes Abagus	・14 72
Figure 82: Toename stijfheid referentiemonsters onder impact tost	. 1∠ 71
riguur 62. rochame sujmetu rererenttemonsters onder mipaet test	. 74

Figuur 83: Poisson coëfficiënt referentiemonsters	. 75
Figuur 84: Evolutie eerste eigenfrequenties	. 76
Figuur 85: Invloed afmetingen impact test	. 77
Figuur 86: Invloed cement impact test	. 78
Figuur 87: Poisson coëfficiënt Georoc monsters	. 78
Figuur 88: Invloed sulfaat impact test	. 79
Figuur 89: Effect Na2SO4 op stijfheid referentiemonsters	. 80
Figuur 90: Invloed van natriumsulfaat op G0 bij mengsel van hoogovencement en kaolinie	t
(R.D. Verastegui Flores & G. Di Emidio, 2013)	. 81
Figuur 91: Effect 25g/l Na2SO4 op ROC SOL (links) en ROC SI (rechts) proefstukken	. 81
Figuur 92: Effect 10 g/l Na2SO4 op ROC SI	. 82
Figuur 93: Effect Na2SO4 op stijfheid ROC SI proefstuk	. 82
Figuur 94: Karakteristieken cilinder ter bepaling invloed mesh-fijnheid	. 83
Figuur 95: visualisatie mesh-fijnheid Abaqus	. 83
Figuur 96: Invloed mesh-fijnheid op eigenfrequenties	. 84
Figuur 97: Illustratie effect vrijheidsgraden op eigenfrequenties	. 85
Figuur 98: Weergave rekentijd i.f.v. aantal elementen in Abaqus	. 87
Figuur 99: Visualisatie eerste vier eigenmodes	. 88
Figuur 100: Vergelijking theoretische en experimentele frequenties	. 89
Figuur 101: Karakteristieken cilinders ter bepaling invloed lengte	. 91
Figuur 102: Effect diameter proefstukken op eigenfrequenties	. 91
Figuur 103: Effect K factor op E ₀ -modulus	. 92
Figuur 104: Relatie tussen D/L en f,tra/f,tor (links) en G,tra/G,tor (rechts)	. 93
Figuur 105: Benaderend lineair verband tussen D/L en G,tra/G,tor	. 94
Figuur 106: Effect lengte proefstukken op eigenfrequenties	. 94
Figuur 107: Effect lengte proefstukken op stijfheidskarakteristieken	. 95
Figuur 108: Relatie tussen D/L en f,tra/f,tor en G,tra/G,tor	. 96
Figuur 109: Invloed stijfheidskarakteristieken en densiteit op relaties tussen D/L en f,tra/f,t	or
en G,tra/G,tor	. 97
Figuur 110: Effect grootte proefstukken op stijfheidskarakteristieken	. 97
Figuur 111: Conversie G ₀ -moduli	. 98
Figuur 112: Vergelijking reistijden benchtop testopstellingen	. 99
Figuur 113: Vergelijking genormaliseerde stijfheidsevolutie impact-benchtop	101
Figuur 114: G ₀ -moduli benchtop 30 ppm	101
Figuur 115: Vergelijking eerste natuurlijke frequenties LDV test versus impact test	102
Figuur 116: Vergelijking berekende E ₀ -moduli LDV test versus impact test	103
Figuur 117: Vergelijking berekende G ₀ -moduli LDV test - impact test - bender test	103