

97-CON-R1698

Kans op schade aan bouwwerken door trillingen

29 december 1997

Ir. P.H. Waarts

Intern rapport

Projectnaam : -

Projectnr. : 7.21.1.8611

Pagina's : 21

Tabellen : -

Figuren : -

Bijlagen : 1

1997

Thema : -

WP-onderwerp : 221

Trefwoord(en) : schade, trillingen, bouwwerken

TNO-rapport

97-CON-R1698

**Kans op schade aan bouwwerken bij
trillingen**

Datum	3 februari 2006
Auteur(s)	Ir. P.H. Waarts
Aantal pagina's	21
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Intern Rapport
Projectnummer	7.21.1.8611

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding	3
2. Kans op schade	4
2.1 Praktijk waarnemingen	4
2.2 Sterkte van metselwerk	4
2.2.1 Metselwerk in goede staat	4
2.2.2 Oud metselwerk	5
2.3 Relatie rek van de voeg en trillingssnelheid	5
2.3.1 Dynamische berekeningen	5
2.3.2 Statische berekeningen	6
2.4 Muur met openingen	7
2.5 Gemeten trillingssnelheid	8
3. kansberekening	9
3.1 Metselwerk in goede staat	9
3.2 Metselwerk in slechte staat en monumentale gebouwen	11
3.3 Kans op schade als functie van de factor op de grenswaarde	12
4. Conclusie	13
5. Literatuur	14
BIJLAGE III: VAP in- en output	21

1. Inleiding

In de SBR richtlijn-1 (Schade aan bouwwerken door trillingen) worden grenswaarden gegeven voor trillingen. Als de trilling onder deze grenswaarde blijft is de kans op schade acceptabel laag. Dat wil echter niet zeggen dan bij overschrijding van de grenswaarden schade verwacht mag worden. Pas bij ruime overschrijding van de grenswaarden wordt schade waarschijnlijk geacht. Soms is het wenselijk de kans op schade te kennen bij een overschrijding van de grenswaarde. Dit rapport gaat in op deze kansberekening.

De kansberekening is gebaseerd op rekenmodellen voor de relatie tussen de trillingssnelheid op de fundering en de (trek)spanningen in metselwerk.

2. Kans op schade

2.1 Praktijk waarnemingen

De SBR-richtlijn-1 [1] merkt op: *'overschrijding van de grenswaarde hoeft niet daadwerkelijk tot schade te leiden. De grenswaarden bevatten een veiligheidsmarge; gemiddeld genomen zal eerst bij een zekere overschrijding ervan schade aan de draagconstructie optreden'*. De praktijk wijst uit dat bij een overschrijding met een factor 3 à 4 schade waarschijnlijk wordt. In [2] wordt een prognose model van trillingen beschreven. De door het model berekende voorspellingen hebben eveneens een veiligheidsmarge. In [2] wordt er vanuit gegaan dat in 5% van de gevallen de grenswaarde overschreden mag worden. Het is dan aannemelijk dat ook de grenswaarde een onderschrijdingskans heeft van 5 %. Dat wil zeggen dat in 5 % van de gevallen een trillingssterkte gelijk aan de grenswaarde tot schade zal leiden. Een 5 % onder- of overschrijdingskans is bekend als de karakteristieke waarde van de betreffende grootte.

2.2 Sterkte van metselwerk

2.2.1 Metselwerk in goede staat

De sterkte van metselwerk wordt grotendeels bepaald door de voeg. In [4] zijn de resultaten van trekproeven op metselwerk samengevat. De treksterkte van de voeg blijkt afhankelijk van het gebruikte materiaal. Voor mortelvoegen (geen lijmvoegen) is de gemiddelde treksterkte: $f_t = 0.28 \text{ N/mm}^2$. De standaardafwijking is gelijk aan 0.086 N/mm^2 . Uit [4] blijkt daarnaast een gemiddelde E-modulus van het voegmateriaal van 1505 N/mm^2 en een standaardafwijking van 1161 N/mm^2 . De E-modulus heeft derhalve een variatie-coëfficiënt van ongeveer 75 % en is daarmee vrij hoog.

In [5] is op basis van literatuur onderzoek een gemiddelde hechtteksterkte van 0.3 N/mm^2 afgeleid met een variatie-coëfficiënt van 0.35. Er wordt een gemiddelde E-modulus van 1500 N/mm^2 en een variatie-coëfficiënt van 0.3 gevonden. Opvallend is dat, uitgezonderd de spreiding van de E-modulus, de waarden van [4] en [5] goed overeenkomen. In dit rapport is verder uitgegaan van de gegevens uit [4].

De sterkte van het metselwerk dat beschikbaar is voor het opnemen van de krachten afkomstig van trillingen zal in het algemeen niet gelijk zijn aan de treksterkte. Door initiële spanningen kan dit hoger of lager zijn.

Aangenomen is dat er gemiddeld geen initiële spanning bestaat. Wel is een standaardafwijking van 0.1 N/mm^2 aangenomen. Er kan dus een initiële druk of trekspanning in de voeg aanwezig zijn.

2.2.2 Oud metselwerk

Oud metselwerk valt volgens SBR-richtlijn-1 onder gebouw categorie 3: monumentale gebouwen en metselwerk in slechte staat. Van monumentale gebouwen wordt aangenomen dat de staat van het metselwerk goed is. In [5] wordt gemeld dat de treksterkte van metselwerk uitgevoerd voor het jaar 1900 iets groter is dan de treksterkte van nu uitgevoerd metselwerk. Hoeveel sterker wordt niet gemeld. Aangenomen wordt dat 'iets' sterker, 20 % sterker betekent. Dit zal betekenen dat de kans op schade aan monumentale gebouwen in goede staat iets kleiner zal zijn dan bij nieuwe gebouwen.

Voor metselwerk in slechte staat zijn waarschijnlijk de initiële spanningen verandert ten opzichte van goed metselwerk. Aangenomen wordt dat de initiële spanningen 0.14 N/mm^2 bedragen (de helft van de gemiddelde oorspronkelijke treksterkte). Aangenomen is dat de standaardafwijking niet verandert ten opzichte van goed metselwerk en dat een lognormale verdeling van toepassing is. Bij deze aanname zal er overigens al een behoorlijke kans (ongeveer 10 %) bestaan dat er al scheuren in het metselwerk komen terwijl er nog geen trillingen aanwezig zijn.

2.3 Relatie rek van de voeg en trillingssnelheid

2.3.1 Dynamische berekeningen

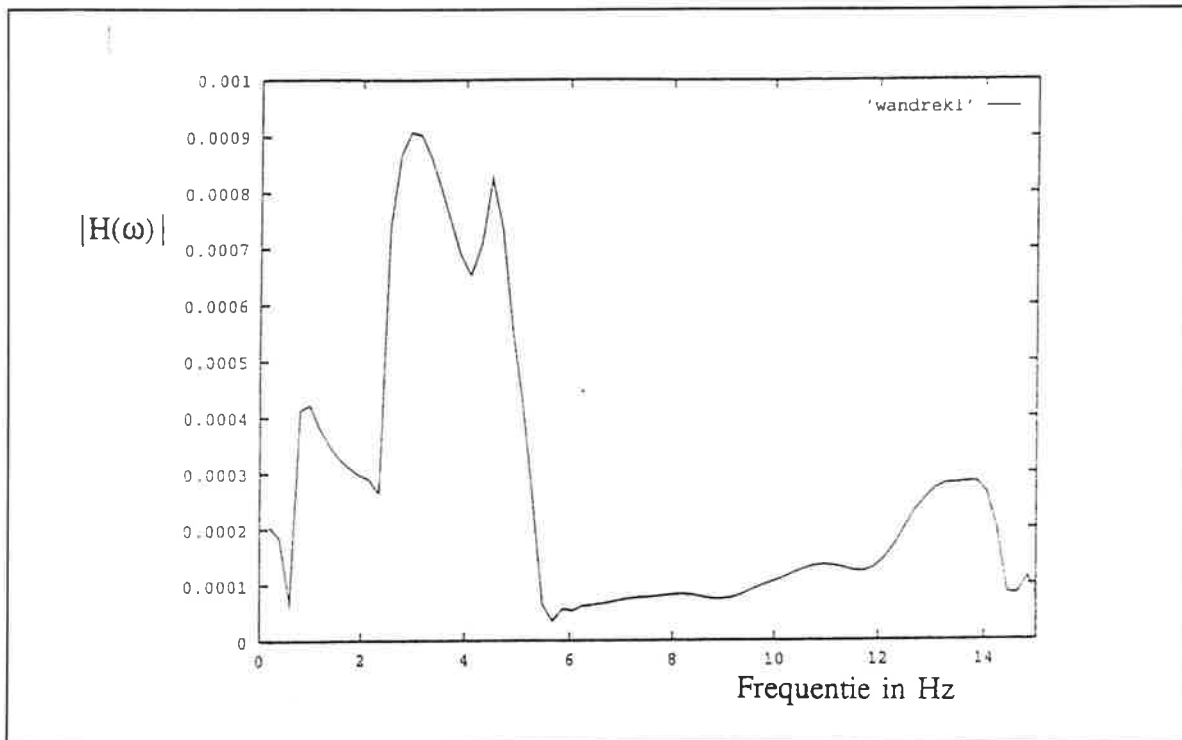
In [3] is getracht, rekenkundig een relatie aan te geven tussen trillingen in de fundering en spanningen in een gebouw uitgevoerd in metselwerk. Hierbij is een muur (zonder openingen) inclusief fundering en bodem gemodelleerd met de Eindige Elementen Methode (DIANA). Er blijkt een relatie te bestaan tussen de rek in de voeg en trillingsnelheid op de fundering die afhankelijk is van de trillingsfrequentie:

$$\varepsilon(\omega) = H(\omega)v_y(\omega) \quad (1)$$

hierin is:

- H de overdrachtsverhouding (s/mm)
- v_y de verticale trillingssnelheid op de fundering (in mm/s);
- ε de verticale rek van de voeg (in m/m).
- ω trillingsfrequentie ($=2\pi f$)

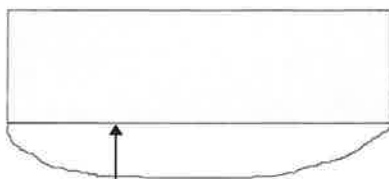
Figuur 1 geeft dit verband aan als functie van de frequentie. Over het gebied van 1 tot 15 Hz blijkt een gemiddelde waarde van H van $3.3 \cdot 10^{-7} \text{ s/mm}$ met een standaardafwijking van ongeveer $2.2 \cdot 10^{-7} \text{ s/mm}$. De figuur is geldig voor de rekken in verticale richting.

Figuur 1: Overdrachtsverhouding tussen trillingssnelheid en rek in de wand (uit [3])

2.3.2 Statische berekeningen

In [3] is uitgegaan van verticale spanningen in een gebouw. Gezien het feit dat er in werkelijkheid initiële verticale drukspanningen (ongeveer 0.5 N/mm^2 per verdieping) in de muur aanwezig zijn, zijn voor het overschrijden van de treksterkte van het materiaal alleen de horizontale spanningen van belang. . Scheuren in metselwerk ontstaan dan ook meestal in de verticale (stoot)voegen.

Ten einde de horizontale spanningen te berekenen is daarom een Eindige Elementen model van een muur gemaakt. Om het rekenwerk te beperken is hier gekozen voor een sinusvormige belasting op de fundering, met een golflengte gelijk aan twee maal de funderingslengte.



Het betreft een muur van 8 m lengte en 3 m hoogte. De volgende materiaalgegevens zijn gebruikt:

E: $1.5 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$;

ν : 0.2;

ρ : 2000 kg/m^3 .

In de berekeningen is er vanuit gegaan dat de constructie spanningsloos is bij aanvang van de belasting. Er zijn dus geen initiële spanningen.

Als de muur wordt belast met een halve sinus met amplitude 1 (N/m), blijkt in x-richting (stootvoegen) een maximale spanning van 1 N/m². In y-richting (lintvoegen) blijkt een maximale spanning 0.5 N/m². In deze situatie (vergelijkbaar met de studie in [3]) zijn de spanningen in horizontale richting dus een factor 2 hoger dan in de verticale richting.

2.4 Muur met openingen

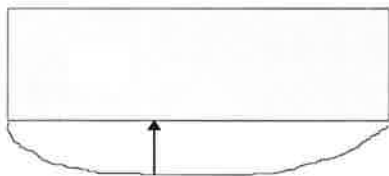
In paragraaf 2.3 is uitgegaan van spanningen in een gebouw zonder raam. Scheuren in metselwerk ontstaan meestal in de hoeken rond (raam) kozijnen. Twee cases zijn onderzocht:

1. muur met raam aan een zijde;
2. muur met raam in het midden.

1. muur met raam aan een zijde.

Het betreft een muur van 8 m lengte en 3 m hoogte. Het raam is geplaatst op 2.5 m vanaf de zijkant en 1 m vanaf de onderzijde. Het raam is 2 m breed en 1.5 m hoog. De materiaalgegevens zijn gelijk aan paragraaf 2.3.2

Figuur Ia geeft de mesh van de EEM berekening. Wederom is gerekend met een sinusvormige belasting met amplitude 1 N/m². Figuur Ib geeft de spanningen in x richting (stootvoegen) terwijl figuur Ic de spanningen in verticale richting geeft (lintvoegen).



Voor het overschrijden van de treksterkte van het materiaal zijn alleen de horizontale spanningen van belang. Uit de berekeningen (figuur 1b) blijkt een maximale trek/druk spanning van 3.9 N/m².

Als de resultaten worden vergeleken met de resultaten bij de muur zonder opening dan blijkt dat in het geval dat er een raamopening aanwezig is dat dan de spanningen in horizontale richting een factor 4 hoger zijn dan zonder raamopening. Het blijkt dus dat de horizontale spanningen in een stootvoeg rond het raamkozijn een factor 8 hoger kunnen zijn dan de verticale spanningen in een muur zonder raam.

2. Muur met raam in het midden.

De constructie is gelijk aan dat beschreven onder (1), echter het raam is horizontaal verplaatst. Figuur IIa en IIb geven de resultaten van de EEM berekeningen. In horizontale richting blijkt een

maximale spanning van 1.5 N/m^2 . Een raam in het midden geeft dus lagere spanningen dan een raam aan een zijde.

Figuur IIc en IId geven nog de resultaten van de EEM berekening als de golflengte een factor 2 wordt verkleind. Onder de fundering is dus een volledige sinusbelasting aanwezig. De spanningen in x-richting lopen nu op naar 2.6 N/m^2 .

Geconcludeerd kan worden dat de situatie met de opening aan één zijde maatgevend is. De spanningen in horizontale richting zijn een factor 4 hoger zijn dan in de situatie zonder raamopening. Het blijkt dus dat de horizontale spanningen in een stootvoeg rond het raamkozijn een factor 8 hoger kunnen zijn dan de verticale spanningen in een muur zonder raam. Gezien de variatie in geometrie van muren en openingen wordt een variatie-coëfficiënt op deze factor van 0.25 aangehouden.

Voor de spanning rond de opening resulteert vergelijking (2)

$$\varepsilon(\omega) = kH(\omega)v_y(\omega) \quad (2)$$

hierin is:

- H de overdrachtsverhouding (s/mm);
- k de vermenigvuldigingsfactor voor muur met openingen (-);
- v_y de verticale trillingssnelheid op de fundering (mm/s);
- ε de horizontale rek van de voeg (m/m);
- ω trillingsfrequentie ($=2\pi f$).

2.5 Gemeten trillingssnelheid

In SBR-richtlijn-1 wordt, voor metselwerk in goede staat (categorie 2 volgens SBR-richtlijn-1), een trillingssnelheid van 5 mm/s aangehouden waaronder (waarschijnlijk) geen schade optreedt aan metselwerk. De SBR-richtlijn laat een marge van 5 % toe op de meetresultaten. In dit rapport is dit vertaald naar een variatie-coëfficiënt van 0.02.

Voor gebouwen bestaande uit metselwerk in slechte staat of monumentale gebouwen wordt een grenswaarde van 3 mm/s aangehouden. De achterliggende gedachte is tweërlei: Voor monumentale gebouwen (in goede staat) wordt een lagere overschrijdingskans aangehouden; Bij slecht metselwerk kan er minder trillingen worden opgenomen doordat er al meer initiële spanning in de voeg aanwezig is.

3. kansberekening

Gegeven de stochastische parameters en een model voor de berekening van de spanningen in metselwerk gegeven een trillingssnelheid op de fundering van een gebouw kan de kans op schade in de constructie worden bepaald. Opgemerkt wordt dat eigenlijk de kans op schade in een bouwmuur wordt bepaald. Als er meerdere muren in het gebouw aanwezig zijn dan zal, als de stochastische parameters niet geheel afhankelijk zijn, de kans op schade in het gebouw toenemen. Bij kleine woningen (breedte < 10 m) zal er echter een grote correlatie bestaan tussen de sterkte parameters van de muren. De kans op schade zal dan nauwelijks toenemen als twee muren in plaats van één muur worden beschouwd.

3.1 Metselwerk in goede staat

In tabel 1 zijn stochastische parameters samengevat, waarbij nog wordt opgemerkt dat voor de sterkte parameters en de overdracht een lognormale verdeling is aangehouden. Van de overige parameters wordt verwacht dat deze normaal verdeeld zijn. De betrouwbaarheidsfunctie is als volgt:

$$Z = f_t - \sigma_{ini} - \sigma_{dyn}$$

met:

$$\sigma_{dyn} = E \varepsilon$$

en

$$\varepsilon = k H v_{meet}$$

Tabel 1: stochastische variabelen voor goed metselwerk

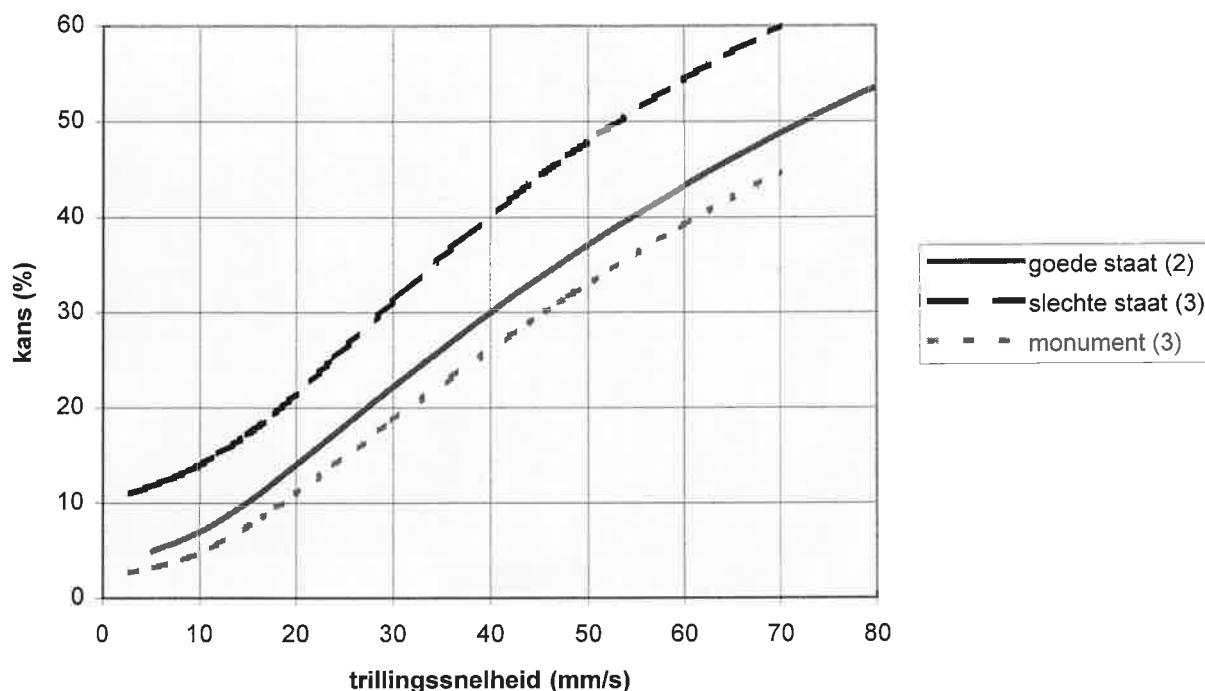
variabele	μ	σ	type
E (N/mm ²)	1505	1161	LN
f _t (N/mm ²)	0.28	0.086	LN
H (s/mm)	3.3 10 ⁻⁷	2.2 10 ⁻⁷	LN
σ_{ini} (N/mm ²)	0.0	0.1	N
k (-)	8	2	LN
v _{meet} (mm/s)	5	0.1	N

Gegeven de stochastische variabelen in tabel 1 is een kans berekening uitgevoerd naar de kans op schade. De kans is berekend met programma VAP [6] volgens de FORM methode.

Uit de analyse blijkt een kans op schade van 2.4 %. Als uit wordt gegaan van het feit dat er 5 % kans op schade bestaat, zit er blijkbaar meer variatie in de initiële spanning in de constructie. Een kans van 5 % op schade wordt gevonden als de standaard-afwijking 0.13 bedraagt. In bijlage III is de gehele in- en output van het programma VAP gegeven. Hieruit blijkt ook dat de spreiding van de initiële spanning de grootste bijdrage geeft aan de faalkans. De spreiding van de andere parameters is van minder belang.

Gegeven dit uitgangspunt kan ook een kansverdelingsfunctie worden afgeleid die de kans op schade weergeeft als functie van de trillingssnelheid. Deze kansverdelingsfunctie is weergegeven figuur 2.

Figuur 2: kans op schade als functie van trillingssnelheid



3.2 Metselwerk in slechte staat en monumentale gebouwen

Gelijk aan de berekening van metselwerk in goede staat is een kansberekening uitgevoerd naar de kans op schade door trillingen. Voor metselwerk in slechte staat is nu uitgegaan van een gemiddelde initiële spanning van 0.14 N/mm^2 en een lognormale verdeling. De stochastische parameters zijn samengevat in tabel 2 en 3. Voor monumentale gebouwen zijn de gegevens gelijk aan (oud) metselwerk in goede staat. Slechts v_{meet} is lager gekozen (conform SBR-richtlijn-1, gebouw categorie 3)

Tabel 2: stochastische variabelen voor metselwerk in slechte staat

variabele	μ	σ	type
$E \text{ (N/mm}^2\text{)}$	1505	1161	LN
$f_t \text{ (N/mm}^2\text{)}$	0.31	0.086	LN
$H \text{ (s/mm)}$	$3.3 \cdot 10^{-7}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$	LN
$\sigma_{\text{ini}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	0.14	0.13	LN
$k \text{ (-)}$	8	2	LN
$v_{\text{meet}} \text{ (mm/s)}$	3	0.06	N

Tabel 3: stochastische variabelen voor monumentale gebouwen

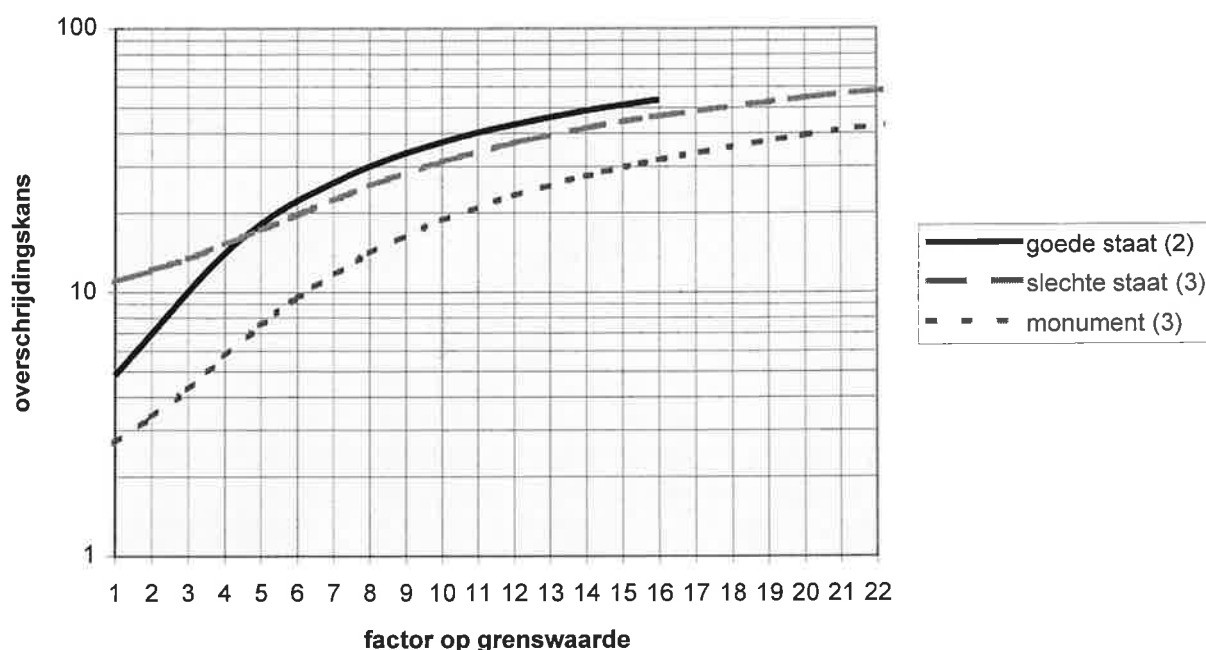
variabele	μ	σ	type
$E \text{ (N/mm}^2\text{)}$	1505	1161	LN
$f_t \text{ (N/mm}^2\text{)}$	0.31	0.086	LN
$H \text{ (s/mm)}$	$3.3 \cdot 10^{-7}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$	LN
$\sigma_{ini} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	0	0.13	N
$k \text{ (-)}$	8	2	LN
$v_{meet} \text{ (mm/s)}$	3	0.06	N

De kans op schade gegeven de trillingssnelheid zijn weergegeven in figuur 2. We zien dat de kans op schade slechts ongeveer 10 % toeneemt bij metselwerk in slechte staat ten opzichte van metselwerk in goede staat. De kans op schade aan monumentale gebouwen is ongeveer 5 % lager dan bij metselwerk in goede staat.

3.3 Kans op schade als functie van de factor op de grenswaarde

Figuur 3 geeft de kans op schade als functie van de overschrijding van de grenswaarde. Voor metselwerk in goede staat kan geconcludeerd worden dat bij een overschrijding met een factor 4 er een kans van 15 % op schade is. Bij een overschrijding met een factor 14 à 15 zal er kans op schade in een op de twee gebouwen. Zoals verwacht is de kans op schade bij monumentale gebouwen lager dan bij metselwerk in goede staat. Bij een trillingssterkte gelijk aan de grenswaarde is de kans op schade ongeveer 2 %. Bij metselwerk in slechte staat is, bij een trillingssterkte gelijk aan de grenswaarde, de kans op schade al 11 %.

Figuur 3: kans op schade (scheuren in metselwerk) als functie van de factor op de grenswaarde



4. Conclusie

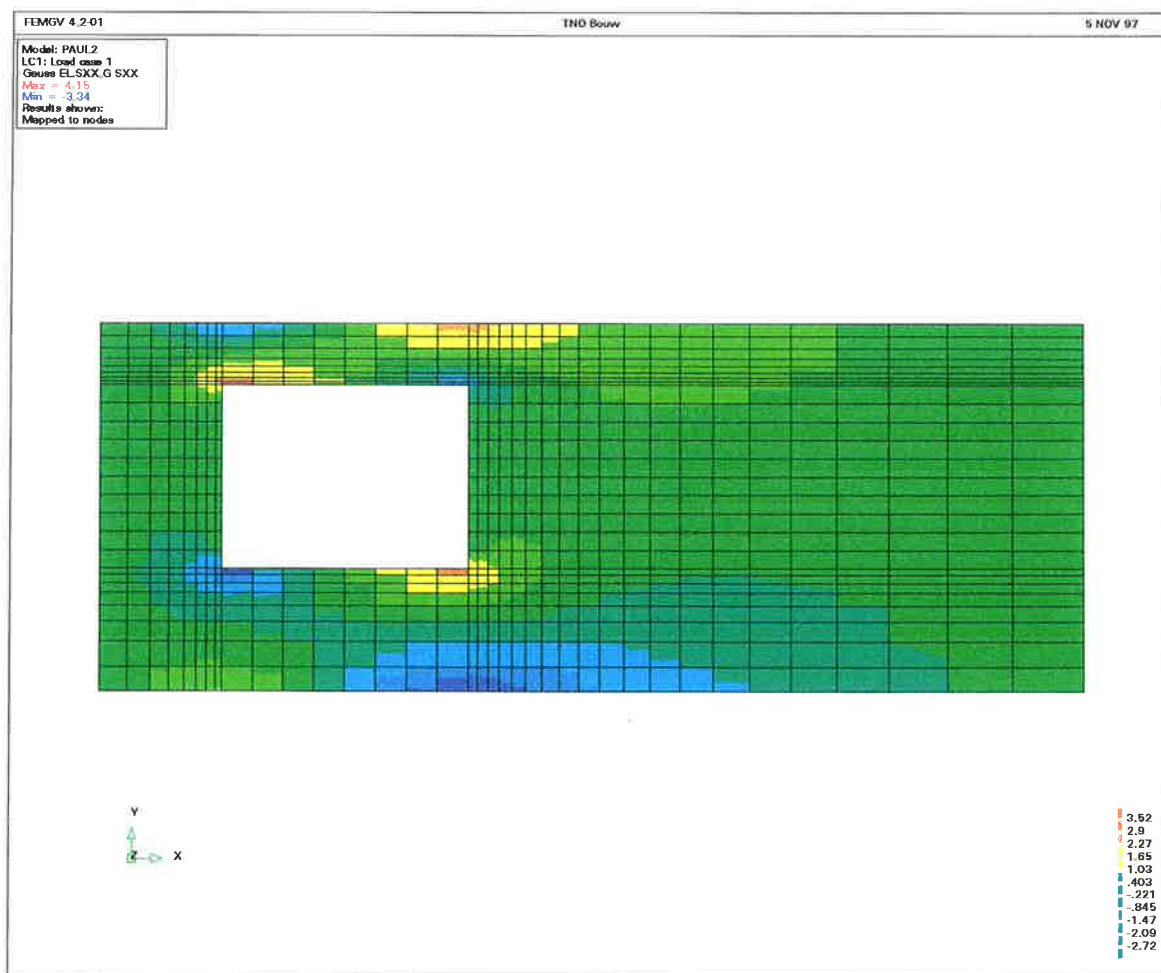
Overschrijding van de grenswaarden volgens SBR-richtlijn-1 hoeft niet daadwerkelijk tot schade te leiden. De grenswaarden bevatten een veiligheidsmarge; gemiddeld genomen zal eerst bij een zekere overschrijding ervan schade aan de draagconstructie optreden. Opgemerkt wordt dat de berekende kansen en factoren alleen geldig zijn voor de trillingen op het fundament van een gebouw en schade aan de draagconstructie.

In de inleiding is gesteld dat eerst bij een zekere overschrijding schade met enige mate van zekerheid zou optreden. Gedacht werd aan een factor 4. Uit figuur 2 blijkt dat bij een overschrijding met een factor 4, de kans op schade 14 % is. Dit houdt in dat als de aangeboden trilling bij 1 op de 7 gebouwen tot schade zal leiden. Pas bij een overschrijding met een factor 14 à 15 zal 1 op de 2 gebouwen schade hebben. Voor gebouwen uit metselwerk in slechte staat is, bij gelijke trillingssnelheid, de kans op schade ongeveer 10 % groter. Voor monumentale gebouwen is de kans op schade ongeveer 5 % kleiner.

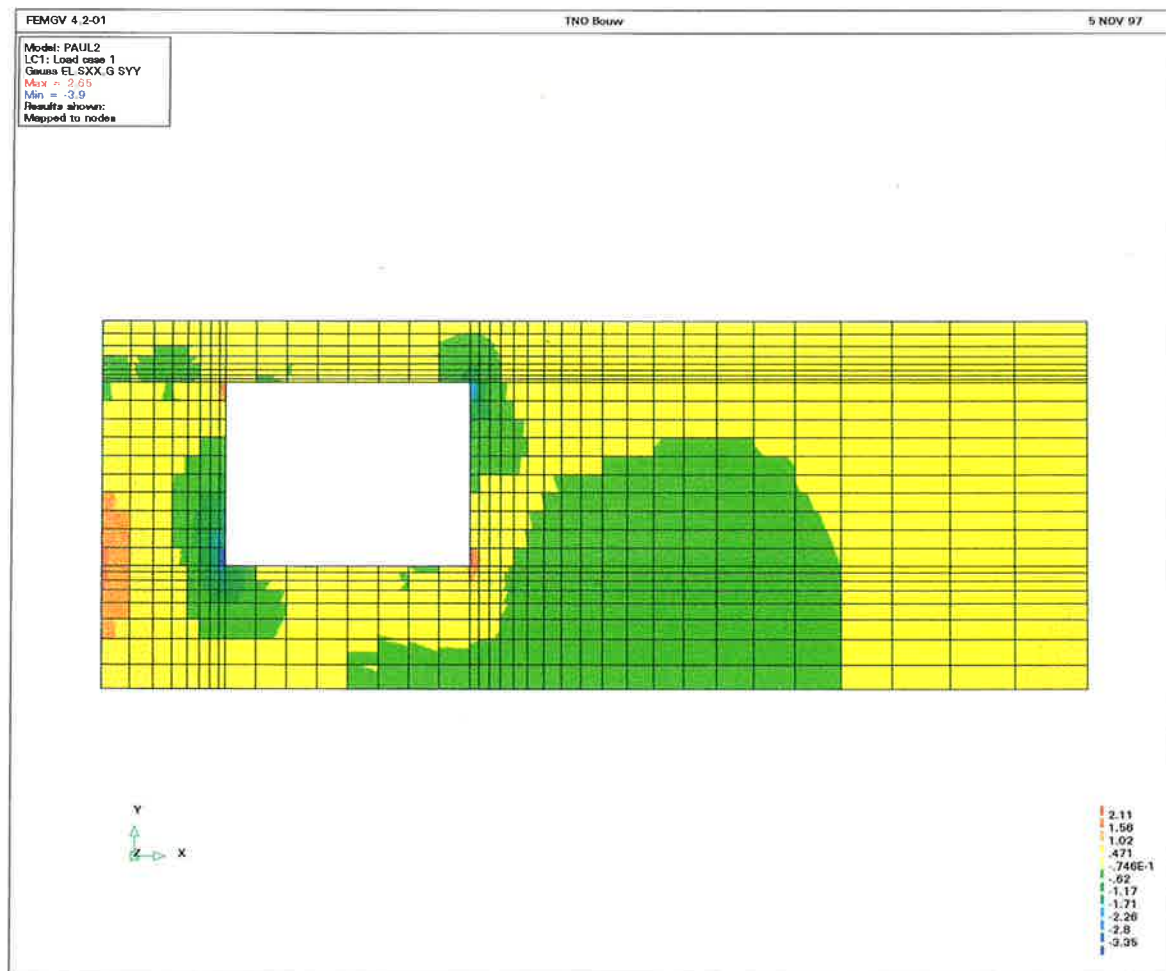
5. Literatuur

- [1] SBR-richtlijn-1 'Schade aan bouwwerken door trillingen, 1993
- [2] CUR-D11, Werkgroep algemeen, 'Schets van een prognose model, algemeen deel, DHV, 1992
- [3] B.H.J. Raaijmaker, 'Modellering van Constructies bij een Dynamische Excitatie via de fundering', TNO rapport 93-CON-R1383, 1994
- [4] R. van der Pluijm, 'Non-Linear Behaviour of Masonry under Tension, Heron, Vol. 42, No. 1. (1997)
- [5] T.M.J. Raijmakers, 'Eigenschappen metselwerk van rond 1900', TNO rapport 95-CON-R0286, 1995
- [6] VAP, Institute of structural engineering, Zurich

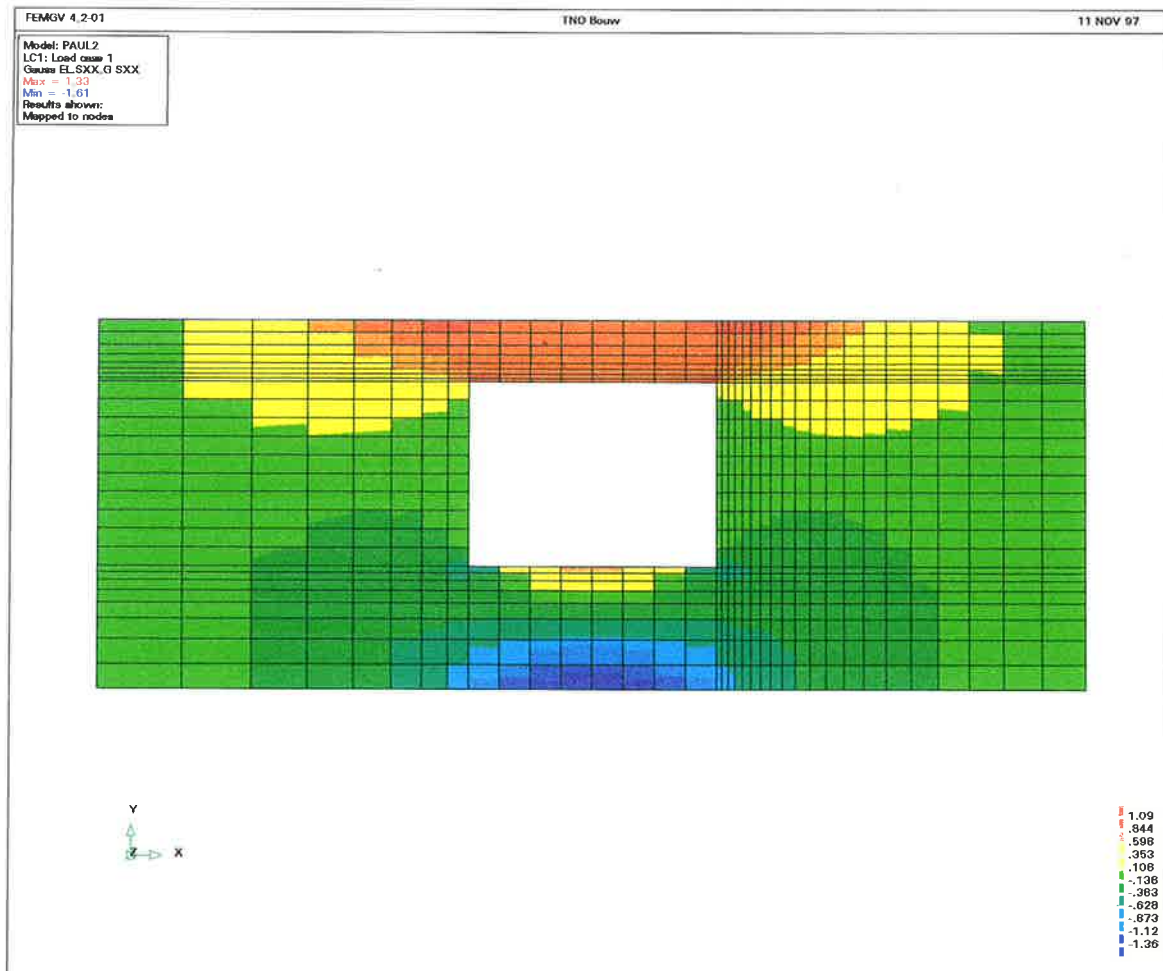
Figuur Ia, spanningen x-richting (halve sinus)



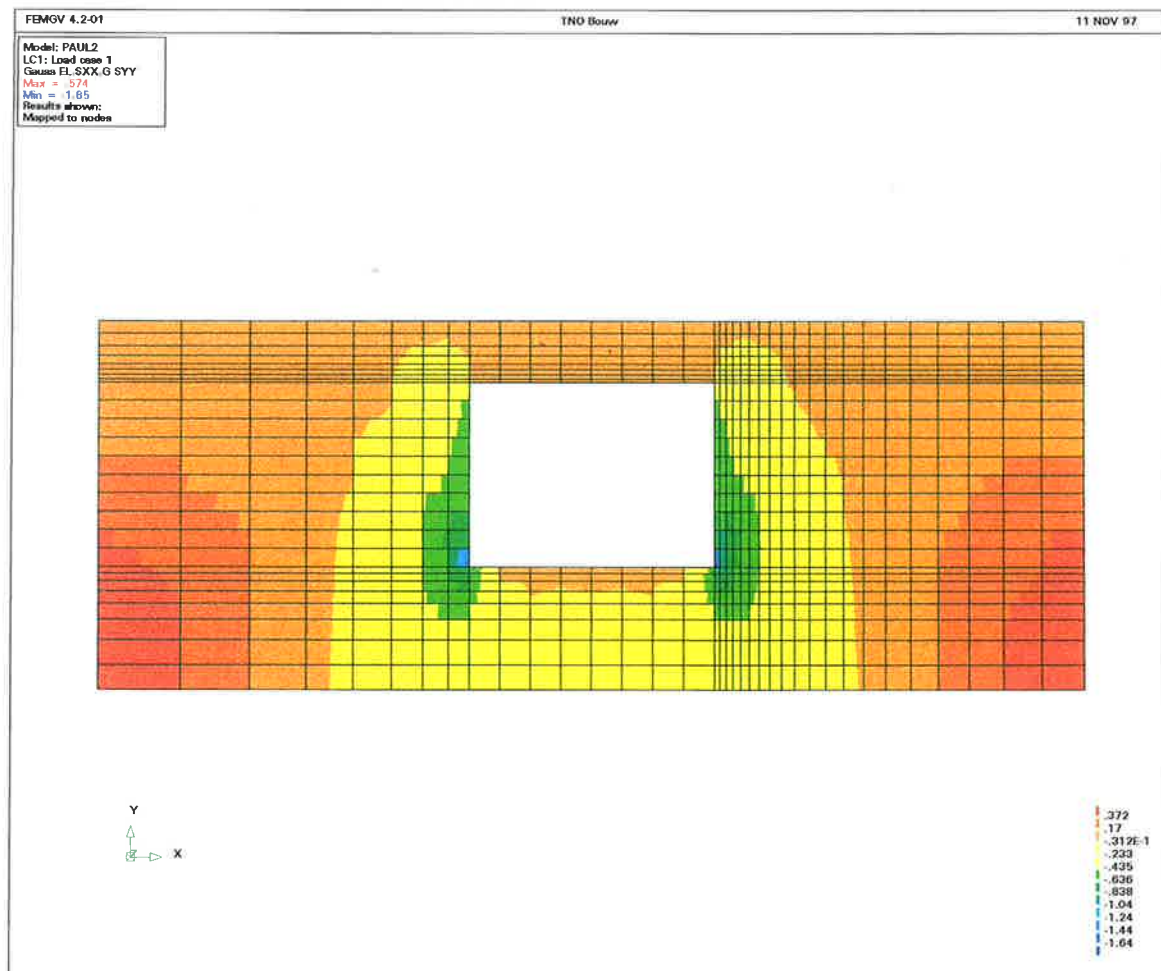
Figuur Ib: Spanningen y-richting (halve sinus)



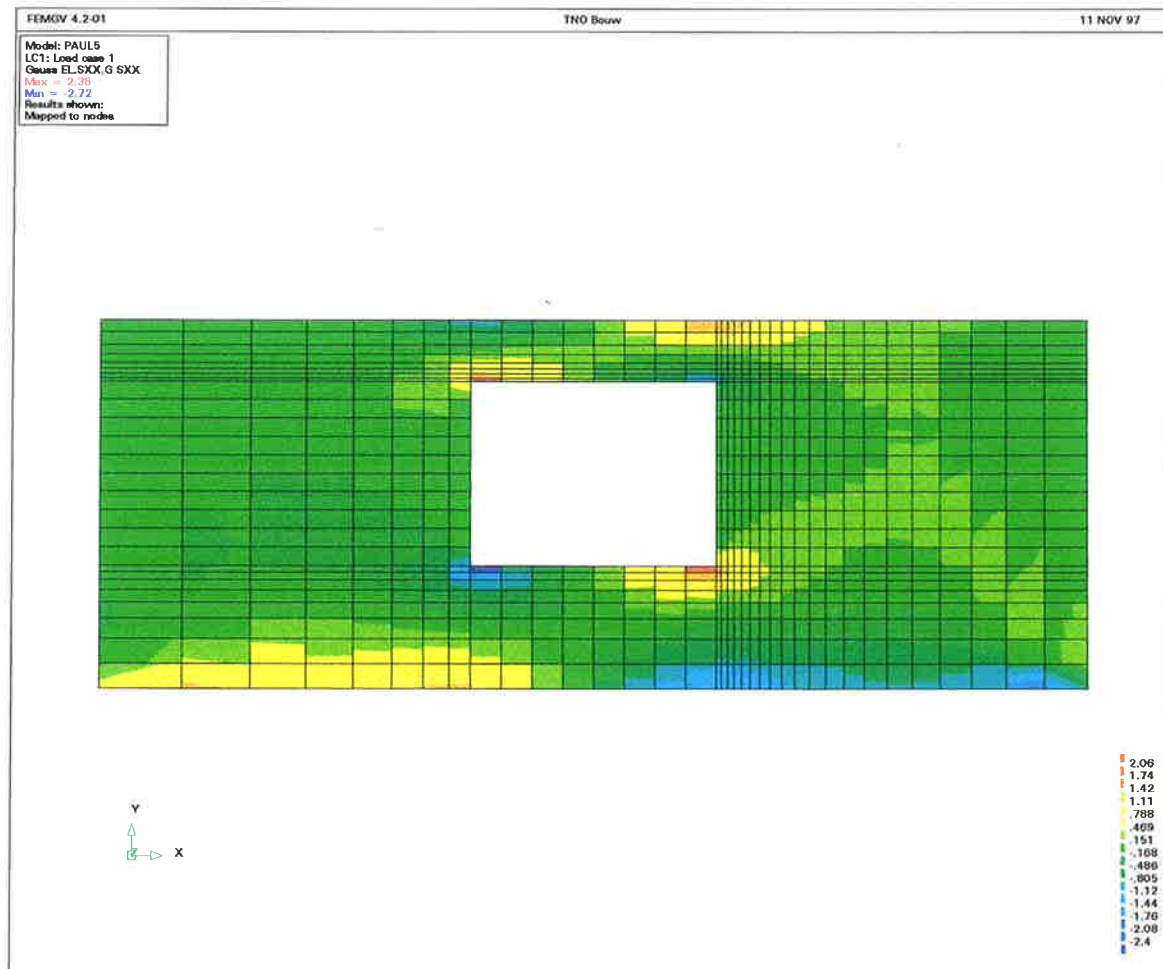
Figuur IIIa, Spanningen in x-richting bij muur met raam in het midden (halve sinus)



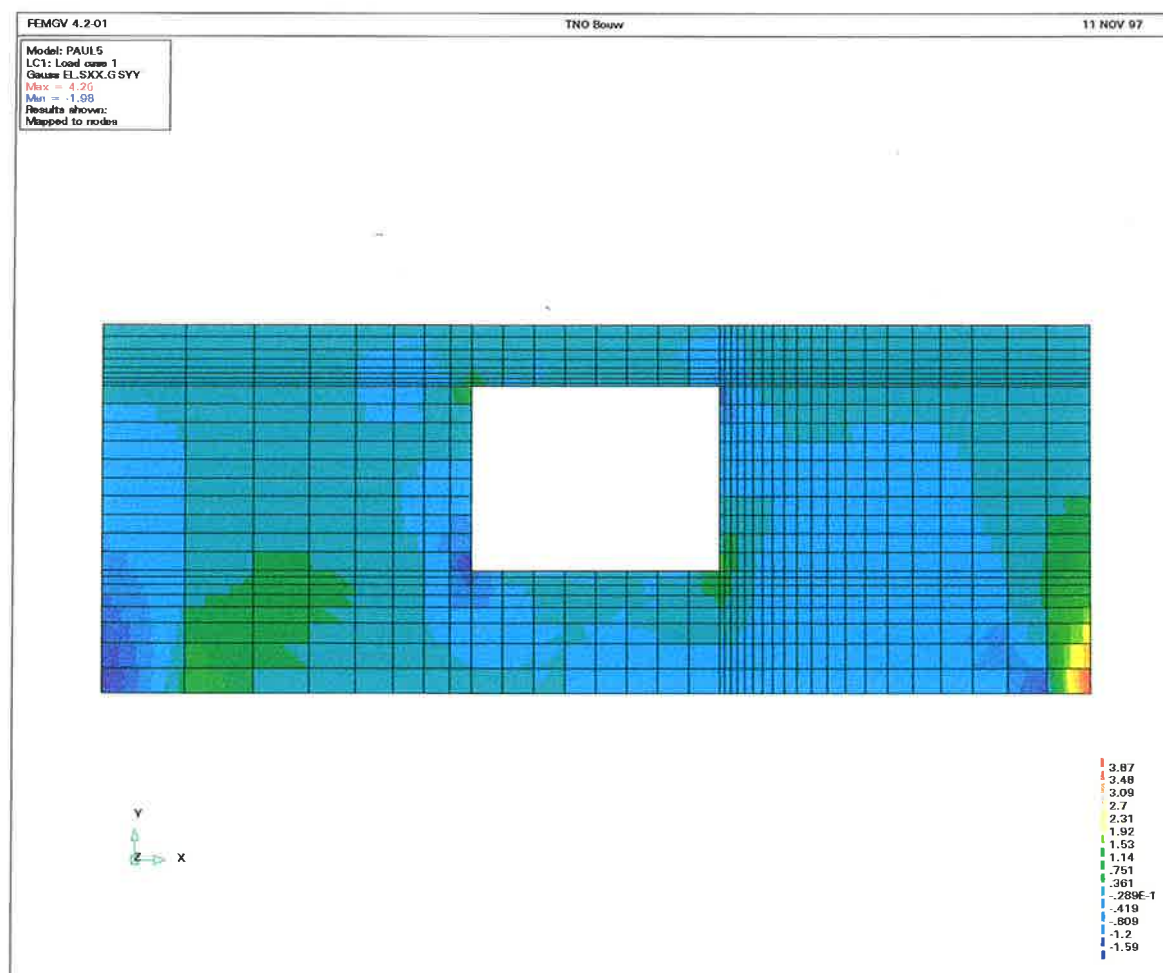
Figuur IIb, Spanningen in y-richting bij muur met raam in het midden (halve sinus)



Figuur IIc, Spanningen in x-richting bij muur met raam in het midden (hele sinus)



Figuur IId, Spanningen in y-richting bij muur met raam in het midden (hele sinus)



BIJLAGE III: VAP in- en output

Categorie 2

FORM Analysis of G:

HL - Index = 1.66 $P(G < 0) = 0.0481$

Name	Alpha	Design Value
E	0.109	1.344e+03
H	-0.097	2.264e+03
k	0.039	7.887
ini	0.885	0.191
span	-0.440	0.215
vmeet	0.003	5.001e+00

Voor cat 3 (slechte staat):

FORM Analysis of G:

HL - Index = 1.23 $P(G < 0) = 0.11$

Name	Alpha	Design Value
E	0.037	1.226e+03
H	-0.033	2.435e+03
k	0.013	7.793
ini	0.939	0.255
span	-0.339	0.267
vmeet	0.001	3.000e+00