

TNO-rapport

B-90-822

Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen

Datum Maart 1991
 Revisie januari 1993

Auteurs P.C. van Staalduin
 M.Th.J.H. Smits

Pagina's 117
Tabellen 12
Figuren 17

Opdrachtgever Stichting Bouwresearch
Projectnaam
Projectnummer 64.4.2240

WP-onderwerp 215-2
Trefwoord(en) trillingen

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 onderzoeksovereenkomsten 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.

5.	INVENTARISATIE VAN NORMEN, RICHTLIJNEN, PUBLICATIES	52
5.1	Inleiding	52
5.2	Normen, richtlijnen en publicaties Nederland	54
5.3	Normen, richtlijnen en publicaties buitenland	71
5.4	Conclusies naar aanleiding van de inventarisatie	92
6.	AANBEVELINGEN VOOR DE INHOUD VAN EEN BEOORDELINGSRICHTLIJN	97
	GERAADPLEEGDE LITERATUUR	113

1. INLEIDING

In vervolg op een eerdere studie door Cauberg-Huygen [1] heeft de Stichting Bouwresearch aan TNO-Bouw opgedragen een onderzoek uit te voeren, met het doel bestaande normen en richtlijnen met betrekking tot grenswaarden voor het ontstaan van schade aan gebouwen ten gevolge van trillingen te inventariseren. Voorts dient het onderzoek te leiden tot een voorstel voor beoordelings-criteria, die in de toekomst in Nederland gehanteerd zouden kunnen worden.

In dit rapport is verslag gedaan van de uitgevoerde studie. Gelet op de doelstelling van het onderzoek, bestaat het rapport uit twee hoofdonderdelen. Het eerste deel, dat de hoofdstukken 2 tot en met 5 omvat, behandelt de achtergronden van beoordelingscriteria m.b.t. de schadelijke invloed van trillingen. Het tweede deel, hoofdstuk 6, bevat het uitgewerkte voorstel voor een beoordelingsrichtlijn.

In hoofdstuk 2 wordt allereerst ingegaan op definities en begrippen. In hoofdstuk 3 is vervolgens uiteengezet op welke wijze trillingen tot schade aan gebouwen kunnen leiden. In hoofdstuk 4 is aan de hand van praktijkervaringen en met behulp van de literatuur nader uitgewerkt binnen welke grenzen schade door trillingen onwaarschijnlijk is, uitgesplitst naar het type trillingsbron. Hoofdstuk 5 bevat de inventarisatie van relevante binnen- en buitenlandse publicaties, normen en richtlijnen ten aanzien van dit onderwerp. In hoofdstuk 6 zijn aanbevelingen gegeven, waarmee bij het opstellen van Nederlandse richtlijnen rekening zou moeten worden gehouden.

2. TRILLINGEN EN SCHADE; BEGRIPPEN

2.1 Trillingen

In Nederland bevat de Wet Geluidhinder [2] de mogelijkheid dat trillingen en trillingshinder voor de toepassing van deze wet met geluid respectievelijk geluidhinder kunnen worden gelijkgesteld. Tot op heden is overigens van deze mogelijkheid geen gebruik gemaakt. Onder trillingshinder wordt in de Wet Geluidhinder verstaan "gevaar, schade of hinder als gevolg van trillingen". Dit is een zeer ruime definitie, die een groot aantal mogelijke negatieve effecten van trillingen omvat.

In dit rapport wordt uitsluitend ingegaan op de effecten van trillingen op gebouwen. Dit onderwerp wordt in de literatuur doorgaans niet onder trillingshinder begrepen. Vanwege de mogelijke verschillen in interpretatie van het begrip "trillingshinder" zullen wij dit begrip in deze studie niet verder hanteren.

In de zin van de wet geluidhinder zijn trillingen "niet met het menselijk oor waarneembare lucht- of contacttrillingen", dit in tegenstelling tot geluid. Deze definitie is voor de onderhavige studie niet goed bruikbaar, aangezien met deze definitie op voorhand beperkingen ten aanzien van de frequentie van de trillingen worden opgelegd. Als nadere precisering worden in deze studie onder trillingen verstaan verplaatsingen of vervormingen (snelheden, versnellingen) van media of lichamen, die in de tijd relatief snel wisselen. De frequentie van de trilling is bij een sinusvormige trilling het aantal wisselingen per seconde.

Voor wat betreft de definities van trillingen en daarmee samenhangende grootheden wordt in deze studie de terminologie van NEN-ISO 2041 [3] aangehouden.

2.2 Schade aan bouwwerken

Gebouwen worden voor een zekere bestemming als bijvoorbeeld woning, kantoor of magazijn ontworpen. Gedurende de levensduur worden gebouwen aan een groot aantal belastingen onderworpen, die zijn te onderscheiden in belastingen vallend binnen het ontwerpkader van het gebouw (bijvoorbeeld eigen gewicht, nuttige belasting) en belastingen die buiten het ontwerpkader vallen (bijvoorbeeld vormen van overbelasting, belastingen voortvloeiend uit opgelegde vervormingen, bepaalde dynamische belastingen). Trillingen door externe bronnen vormen een van de componenten, die doorgaans buiten het ontwerpkader van bouwwerken valt. Trillingen door interne bronnen (bijvoorbeeld door lopen, door het dichtslaan van deuren, door machines) die samenhangen met het beoogde gebruik van een gebouw vallen in beginsel binnen het ontwerpkader. Zij worden echter vaak niet expliciet bij het ontwerp betrokken, omdat het voldoen aan andere eisen die aan de constructie worden gesteld (bijvoorbeeld een voldoende stijfheid van vloeren) doorgaans een goed functioneren onder deze dynamische belastingen met zich mee brengt.

Een gebouw heeft een zeker incasseringsvermogen voor belastingen die buiten het ontwerpkader vallen. Dit incasseringsvermogen zal primair afhangen van de bestemming waarvoor en de wijze waarop het gebouw ontworpen is (constructief concept), alsmede van het funderingsstelsel en van de toegepaste bouwmaterialen. Dit bepaalt hoeveel reserve in beginsel aanwezig is.

Gedurende het functioneren van een gebouw wordt het gebouw beheerd en onderhouden; er kunnen zich wijzigingen in de constructie voordoen, bijvoorbeeld door een verbouwing, en eventuele wijzigingen in het gebruik. De eigenschappen van de toegepaste bouwmaterialen kunnen achteruitgaan. Ook externe factoren kunnen wijzigen, te denken valt aan wijziging van de grondwaterstand, sloop en bouw van belendende panden en dergelijke. Tenslotte zal met toenemende ouderdom het aantal belastingscombinaties en het aantal belastingswisselingen, dat het

gebouw ondervonden heeft, groter worden. Daarmee wordt de kans groter dat reserves die in beginsel aanwezig waren inmiddels zijn verbruikt. Bij de beoordeling van de staat van een gebouw heeft men met het verleden van het gebouw te maken: dit bepaalt de verdeling van spanningen en krachten en de mate waarin onderdelen van het gebouw daaraan nog weerstand kunnen bieden.

In dit rapport staan de effecten van trillingen op gebouwen centraal. Tot de effecten van trillingen rekenen we onder meer:

- de wisselende spanningen die in onderdelen van gebouwen ontstaan;
- een wijziging van de sterkte of sterkte-ontwikkeling van deze onderdelen, bijvoorbeeld door vermoeiingseffecten;
- een wijziging van andere relevante eigenschappen, zoals bijvoorbeeld de dichtheid van de funderingsgrondslag.

De effecten van trillingen kunnen tot bouwkundige schade leiden. Bouwkundige schade treedt zichtbaar op als het incasseringsvermogen van een gebouw tekort schiet: dit uit zich in overschrijding van de sterkte van onderdelen van het gebouw of in blijvende vervormingen. Overigens zijn trillingen vaak maar één mogelijke oorzaak voor het ontstaan van bouwkundige schade. Voor uitgebreidere discussie wordt verwezen naar [4].

Onder bouwkundige schade verstaan we in deze situatie een zodanige verandering van de eigenschappen van (een onderdeel van) een gebouw, waardoor:

- 1) een vermindering van de integriteit van het onderdeel of van het gebouw als geheel met betrekking tot zijn constructieve functie optreedt;
- 2) een verlies van functie optreedt;
- 3) een vermindering van de gebruikswaarde optreedt.

Voor wat betreft een verandering van de integriteit geldt bovendien dat dit moet leiden tot een significante vermindering van de veiligheid of van de verwachte rest-levensduur van het gebouw.

2.3 Schade en veiligheid

Schade aan een gebouw kan de veiligheid van het gebouw beïnvloeden, of kan slechts betrekking hebben op de gebruikswaarde van het gebouw. Gelet op de veiligheid van personen in een gebouw kan een nadere onderverdeling van schade worden gegeven. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in twee typen schade:

1) Constructieve schade

schade welke gepaard gaat met een vermindering van de integriteit van het onderdeel of van het gebouw als geheel met betrekking tot zijn constructieve functie, waardoor mogelijk de constructieve veiligheid in het geding komt, of schade aan onderdelen van het bouwwerk, die niet tot de hoofddraagconstructie behoren, waarbij de veiligheid van personen in gevaar kan komen.

2) Niet-constructieve schade

schade welke gepaard gaat met een vermindering van de gebruikswaarde of verlies van functie, zonder dat daarbij de veiligheid van personen, die zich in of nabij het bouwwerk bevinden, in gevaar kan komen.

Ter verduidelijking enkele voorbeelden:

Constructieve schade heeft een directe relatie met de constructieve veiligheid van een bouwwerk, zoals genoemd in het Bouwbesluit. Constructieve schade zou daarom ook kunnen worden gedefinieerd als een wijziging aan de hoofddraagconstructie van een bouwwerk, welke een beoordeling van de constructieve veiligheid in beginsel noodzakelijk maakt. Constructieve schade behoeft overigens niet noodzakelijk tot een verminderde veiligheid te leiden, maar kan de levensduur van het bouwwerk bekorten, bijvoorbeeld door wijziging van het statisch schema van het bouwwerk.

Tot constructieve schade wordt onder meer gerekend verlies van sterkte door scheurvorming in dragend metselwerk, bezwijken door overschrijding van de sterkte van liggers of kolommen, vervormingen door ongelijkmatige zettingen van het bouwwerk, instabiliteit of verlies van draagkracht van de fundering en dergelijke.

De tweede categorie, niet-constructieve schade, omvat onder meer schade aan bekledingen en afwerkingen van wanden, vloeren en plafonds en dergelijke, voor zover dit geen consequenties heeft voor de plaatsvastheid van deze bekledingen. Te denken valt in dit verband aan scheurvorming in pleisterwerk (niet doorgaand in het metselwerk), het loslaten van pleisterwerk, het losraken van niet-constructieve voegafdichtingen en dergelijke.

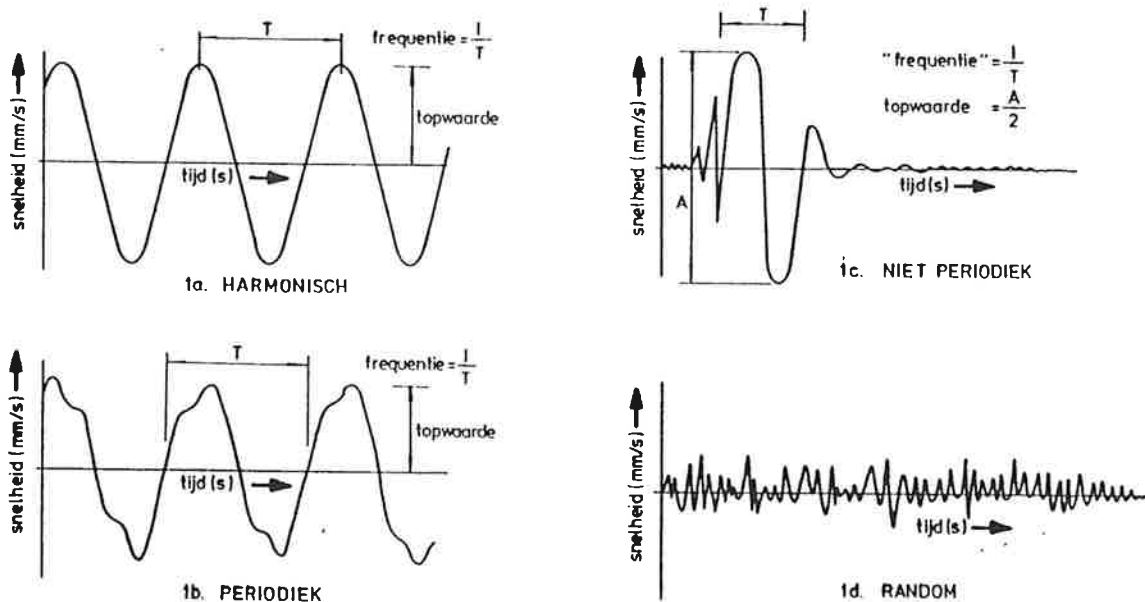
Het is denkbaar dat bij het verlies van sterkte of verlies van evenwicht van onderdelen van het bouwwerk, die weliswaar geen constructieve functie hebben, de veiligheid van personen in het geding kan brengen. Te denken valt in dit verband aan grote stukken pleisterwerk, glas, reclameborden, grote wandversieringen (schilderijen bijv.), verlichtingsarmaturen en dergelijke. Deze schade is niet-constructief van aard, maar kan van significant belang zijn.

Bouwkundige schade ten gevolge van trillingen heeft geen vastomlijnde kenmerken. Op welke wijze schade zich openbaart, hangt van de specifieke constructie af. Het is daarom aan te bevelen de bouwkundige toestand van een gebouw laten vastleggen, alvorens activiteiten te ondernemen, waarvan bekend is dat zij trillingen vertonen, die significant sterker zijn dan de trillingen die een gebouw in de bestaande situatie ondervindt. Dit is de enige manier om duidelijkheid te verkrijgen of de schade is ontstaan tijdens activiteiten, welke trillingen veroorzaakten. Een oordeel over de oorzakelijke relatie kan pas worden gegeven uit een analyse van het schade-patroon, welk in samenhang met gegevens over een groot aantal andere relevante aspecten [4] moet worden beoordeeld.

3.0 INVLOED VAN TRILLINGEN OP GEBOUWEN

3.1 Karakterisering van trillingen

Bouwwerken of onderdelen daarvan kunnen trillingen vertonen. In dit rapport wordt onder trillingen verstaan een relatief snel om een evenwichtstoestand wisselende verplaatsing (snelheid, versnelling, hoekverdraaiing e.d.) of vervorming. De trillingen kunnen in de tijd gezien een harmonisch verloop hebben, maar ook andere vormen zijn mogelijk.



Figuur 3.1, verloop van trillingen in de tijd

In figuur 3.1 zijn enkele trillingsvormen weergegeven. In deze figuur is de gemeten snelheid als functie van de tijd getekend. Het is echter ook mogelijk de versnelling of verplaatsing tegen de tijd uit te zetten.

- 1a. een harmonisch verloop, de snelheid verloopt sinusvormig met de tijd.
- 1b. een periodiek verloop, de snelheid wisselt met een duidelijk herkenbare frequentie om de evenwichtstoestand. Een dergelijke trilling is de optelsom van een beperkt aantal harmonische trillingen.
- 1c. een stootachtig verloop, de snelheid wisselt kortstondig, bijvoorbeeld in minder dan 0,1 seconde, een aantal malen om de evenwichtsstand.
- 1d. een random verloop, de snelheid wisselt om de evenwichtsstand, waarbij geen duidelijke overheersende frequentie herkenbaar is. De trilling kan worden opgevat als de optelsom van harmonische trillingen met een over een breed frequentiegebied uniform verdeelde fasehoek.

Voor de beoordeling van de invloed van trillingen op gebouwen verdient representatie van de meetsignalen in het tijdsdomein veelal de voorkeur. De reden hiervoor is dat éénmalige piekwaarden tot een overschrijding van de bezwijksterkte van brosse constructiematerialen kunnen leiden. Analyse van de trillingen in het frequentiedomein geeft onvoldoende inzicht in deze piekwaarden. Trillingen worden derhalve in de regel gekarakteriseerd door een "topwaarde" of "amplitude", en door een "overheersende frequentie".

De topwaarde geeft de maximale uitwijking gerekend vanaf de evenwichtstoestand aan, de frequentie geeft het aantal wisselingen rondom de evenwichtstoestand per seconde aan.

In het geval van harmonische periodieke trillingen liggen de overheersende frequentie en de topwaarde eenduidig vast. In figuur 1a en 1b zijn deze waarden aangegeven.

In het geval van stootachtige niet periodieke trillingen (figuur 1c) is het definiëren van een overheersende frequentie minder eenvoudig. Door middel van een frequentieanalyse, bijvoorbeeld door Fouriertransformatie, kan de overheersende frequentie in een bepaald tijdsinterval worden bepaald. Het aangeven van een maatgevende amplitude is dan echter discutabel, omdat de lengte van het

tijdsinterval, waarover de analyse plaatsvindt, de berekende amplituden beïnvloedt.

In dit rapport wordt de volgende procedure van de karakterisering van niet periodieke trillingen gehanteerd:

1. definieer in het meetsignaal één of meerdere "hoofdgolven". Deze "hoofdgolf" heeft de grootste uitwijking ten opzichte van de evenwichtstoestand en bevat twee extreme waarden: een positief en een negatief lokaal extreem. De hoofdgolf begint met een doorgang door de evenwichtsstand en eindigt met een doorgang door de evenwichtsstand. Tussen beide nuldoorgangen bevindt zich nog één nuldoorgang.
2. De tijdsduur T van de hoofdgolf is gedefinieerd als de tijdsduur tussen de doorgang door de evenwichtsstand direct voorafgaande aan het eerste extreem tot de doorgang direct na het tweede extreem.
3. De overheersende frequentie is gelijk aan $1/T$ waarbij T de bovenvermelde tijdsduur is.
4. De topwaarde wordt gedefinieerd als de maximale uitwijking in de hoofdgolf ten opzichte van de evenwichtstoestand.

Opmerking

In een meetsignaal, dat zich bijvoorbeeld over 1 seconde uitstrekt, kunnen meerdere hoofdgolven zichtbaar zijn, waarvan niet op voorhand aan te geven is welke golf maatgevend is. In een dergelijk geval dienen al deze golven volgens bovenstaande procedure te worden geanalyseerd.

In het geval van "random" trillingen (figuur 1d) is het vaststellen van een "overheersende frequentie" per definitie onmogelijk.

In een dergelijk geval hangt het van de te beoordelen constructie af, of de analyse zich beperkt tot het vaststellen van piekwaarden zonder bijbehorende frequentie dan wel of een frequentieanalyse wordt uitgevoerd waarbij een amplitudespectrum wordt bepaald. Een dergelijke spectrum analyse zal vaak deel uitmaken van vermoelingsanalyses. Random trillingen waarin hoge trillingsniveaus

voorkomen doen overigens zich niet vaak in gebouwen voor.

Veelal zullen de frequentiekenarakteristiek van de trillingsbron en/of de eigen trillingen van de constructie duidelijk in de waargenomen bewegingen terugkomen.

Het interval van frequenties, dat bij trillingen in gebouwen voorkomt is doorgaans aan de bovenzijde begrensd bij 100 Hz. Alleen in bijzondere gevallen (explosies, steenachtige bodem) kunnen ook hogere frequenties van belang zijn.

Gezien de aanwezige eigenfrequenties van bouwconstructies en van constructieonderdelen kunnen bewegingen met een frequentie kleiner dan 1 Hz als quasi-statisch worden opgevat. Dergelijk langzame bewegingen worden niet als "trillingen" gezien en blijven derhalve buiten beschouwing.

3.2 Karakterisering van trillingsbronnen

Wisselende of stootvormige belastingen zijn noodzakelijk voor het ontstaan van trillingen. Dergelijke belastingen worden bijvoorbeeld op vloeren van gebouwen uitgeoefend door machines (bijvoorbeeld pompen, compressoren) of door het lopen van mensen. Hei- en trilwerkzaamheden in de omgeving van een bouwwerk zal via de ondergrond leiden tot een wisselende belasting die op de fundatie van het bouwwerk uitgeoefend wordt. Passerend weg- en railverkeer of ondergrondse explosies kunnen op dezelfde wijze tot trillingen van bouwwerken aanleiding geven. Verder kan de fluctuerende belasting door wind of door watergolven tot trillingen van bouwwerken leiden. Tenslotte kunnen constructie-onderdelen ook door geluid in trilling geraken.

In de onderstaande tabel 3.1 is een summier opsomming en globale karakterisering van trillingsbronnen gegeven. Het onderscheid tussen periodieke (of harmonische) trillingsexcitatie en stootvormige trillingsexcitatie is van belang omdat periodieke trillingsexcitatie kan leiden tot opslingeren in (delen van) bouwconstructies.

Trillingsbron	Type trillingsexcitatie	overheersende trillingsfrequentie*) (Hz)
verkeer	periodiek	5-15
machines	harmonisch (periodiek)	
heien van palen	stootvormig	10-30
intrillen van palen of planken	periodiek	toerental van het trilblok
ondergrondse explosies	stootvormig	1-20
windbelasting	periodiek (wervelingen)	≤ 5
watergolven	stootvormig (golfklappen) of periodiek	
geluid	stootvormig (b.v. bovengrondse explosies)	
lopen van mensen	stootvormig	2, 4, 6
slaan van deuren	stootvormig	> 50

*) Hiermee wordt bedoeld de waargenomen frequentie op c.q. aan de hoofdconstructie van het gebouw

3.3 Oorzaken van schade

3.3.1 Inleiding

Schade aan bouwwerken ten gevolge van trillingen kan in hoofdzaak op twee manieren veroorzaakt worden:

- 1) Trillingen van (onderdelen van) bouwwerken gaan gepaard met wisselende vervormingen en spanningen. Dit kan aanleiding geven tot directe schade, indien de spanningen zodanig groot zijn dat de sterkte van het onderdeel wordt overschreden. Deze sterkte is voor veel materialen afhankelijk van de snelheid waarmee een bepaalde vervorming wordt opgedrongen. Voorts speelt een rol, dat de sterkte van materialen bij herhaalde spanningswisselingen kan afnemen (vermoeding of degradatie).
- 2) Schade ten gevolge van trillingen kan ook indirect optreden. Dit is het geval indien trillingen van het bouwwerk of trillingen uit de omgeving leiden tot spanningswisselingen van de funderingsgrondslag van het

bouwwerk. Dit kan leiden tot verdichting en daardoor tot (ongelijkmatige) zettingen van het bouwwerk. Dit laatste leidt tot een gewijzigde statische spanningstoestand in het bouwwerk, hetgeen aanleiding kan zijn tot schade.

Het voorkómen van schade vereist dat de intensiteit van de trillingen (eventueel in combinatie met het aantal wisselingen) zodanig moet zijn, dat de sterkte van de constructie niet wordt overschreden. Onder "trillingsintensiteit" wordt hier de grootste topwaarde van de trilling en de bij deze topwaarde behorende dominante frequentie verstaan. In diverse richtlijnen en normen zijn grenswaarden voor de trillingsterkte opgenomen, die blijkens het voorgaande niet los gezien kunnen worden van de eigenschappen van het bouwwerk of onderdelen daarvan, zoals het constructief systeem en de toegepaste bouwmaterialen. Tot welke eisen aan de trillingsterkte dit leidt is nader uitgewerkt in paragraaf 3.3.2.

Verder is er in verband met het voorkómen van indirecte schade ook een relatie tussen de te hanteren grenswaarden en de wijze waarop een bouwwerk in de bodem is gefundeerd en de eigenschappen van de funderingsgrondslag. Voor meer informatie wordt verwezen naar paragraaf 3.3.3.

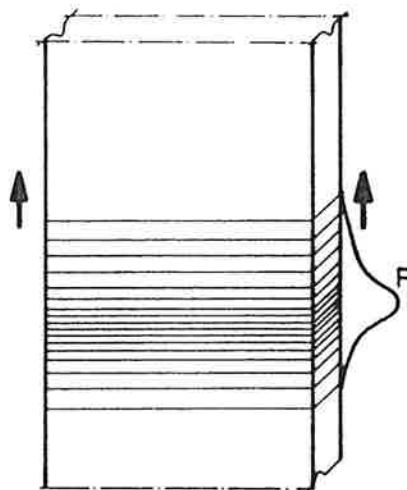
3.3.2 Directe schade door trillingen

Directe schade door trillingen treedt op wanneer een kritische spanning in een constructieonderdeel wordt overschreden. Het zijn dus niet de bewegingen op zichzelf, maar de hierdoor optredende wisselende spanningen in het materiaal die de schade veroorzaken. Wel is het zo dat er een relatie bestaat tussen de optredende bewegingen en de spanningen, dit is dan ook de reden dat in tal van normen en voorschriften de versnellings- (of verplaatsings- dan wel snelheids-) amplitudes als uitgangspunt voor grenswaarden worden gekozen. Spanningen of vervormingen zijn namelijk veel lastiger meetbaar en bovendien is praktisch nooit bekend wat de reeds aanwezige materiaalspanning is.

In deze paragraaf is de relatie tussen de spanning in een onderdeel en de

trillingsintensiteit bepaald voor een aantal voorbeelden. Uit de literatuur zijn meerdere voorbeelden bekend, waarbij ook metingen van zowel vervormingen als van bewegingen zijn uitgevoerd. Zie bijvoorbeeld [22].

Voorbeeld 1, één-dimensionale golfvoortplanting.



Figuur 3.2, één-dimensionale golfvoortplanting

In figuur 3.2 is een voorbeeld van één dimensionale longitudinale golfvoortplanting weergegeven. Golfvoortplanting kan worden waargenomen bij zeer kortdurende hoogfrequente of stootvormige excitatie.

Indien een longitudinale golf zich voortplant door een homogeen medium met constante doorsnede (zoals een kolom, een schijf of een paal) dan kan worden afgeleid dat het verband tussen spanning en deeltjessnelheid is:

$$\sigma = v \cdot \sqrt{\rho E} \quad (3.1)$$

waarin:

σ = de spanning (druk of trek) (N/m)

v = de deeltjessnelheid (m/s)

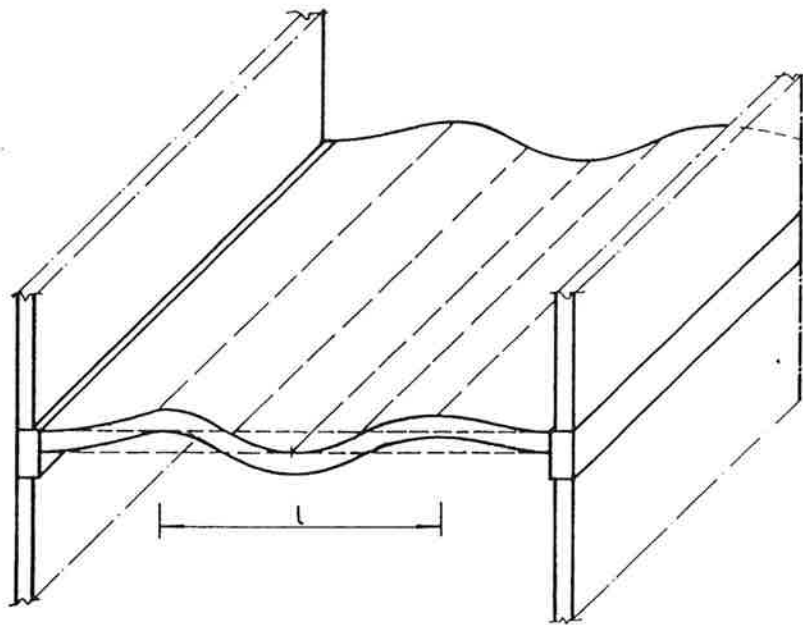
ρ = de massadichtheid van het materiaal (kg/m)

E = de elasticiteitsmodulus (N/m)

Aangezien de golfvoortplantingssnelheid c en de elasticiteitsmodulus E materiaalconstanten zijn is er dus een lineair verband tussen spanning en snelheid. Ook voor méér dimensionale golfvoortplanting worden dergelijke relaties gevonden.

Bij een realistische waarde van c , bijvoorbeeld voor metselwerk 2500 m/s, blijkt dat longitudinale golven zeer snel door constructie-onderdelen heen en weer lopen. Een longitudinale golf kan door een muur met een hoogte van 10 meter in $2 * 10/2500 = 8 * 10^{-3}$ seconde heen en weer lopen. Dit betekent dat de tijdsduur van de excitatie zeer gering moet zijn (enkele milliseconden) om een dergelijke golfvoortplanting mogelijk te maken. De meeste trillingsbronnen als in 3.2 genoemd exciteren de constructie veel langzamer. Behoudens extreme omstandigheden, zoals sloopwerkzaamheden of bovengrondse explosies zal longitudinale golfvoortplanting buiten beschouwing blijven.

De wisselende vervormingen van (onderdelen) van bouwwerken liggen, gezien de frequentiekaracteristiek van de meeste trillingsbronnen en de eigenfrequenties van de constructie(onderdelen), meestal in het frequentiegebied van 1 tot 100 Hz. In dit frequentiegebied betreffen de vervormingen voornamelijk buiging en torsie. Compressie en extensie als in voorbeeld 1 behandeld, blijven beperkt tot uitzonderingsgevallen.

Voorbeeld 2, buiging uit het vlak*Figuur 3.3, buiging uit het vlak*

Het tweede voorbeeld betreft een vloerplaat, die ten gevolge van een opgelegde beweging van de randen in één of meerdere eigentrillingen trilt: zie figuur 3.3. Het langwerpige vloerelement wordt als buiglijger geschematiseerd.

De uitbuiging van de vloer is een functie van tijd en plaats. De eigentrillingsvormen worden eenvoudigheidshalve als sinusfunctie geschematiseerd. De uitbuiging van de vloer kan in dat geval geschreven worden als:

$$u(x, t) = \hat{u} \sin(\omega_n * t) \sin(\pi * \frac{x}{l}) \quad (3.2)$$

waarin:

$u(x,t)$ = uitbuiging (m)
 \hat{u} = topwaarde of amplitude (m)
 ω_n = n^e eigenfrequentie (rad/s)
 t = tijd (s)
 x = horizontale afstand vanaf een willekeurige knoop (zie fig. 3)
 l = golflengte (m)

Genoemde n^e eigenfrequentie voor een vloer met overspanning L is bij benadering:

$$\omega_n = \alpha * \frac{\pi^2 * n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = \alpha * \frac{\pi^2}{\sqrt{12}} * \frac{h * n^2}{L^2} * \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.3)$$

Waarin:

L = de vloeroverspanning (m)

E = de elasticiteitsmodulus van het materiaal (N/m)

I = het traagheidsmoment van de doorsnede (m^4)

h = de dikte van de vloerplaat (m)

A = de doorsnede van de vloerplaat

α = factor van de wijze waarop de vloer is opgelegd
 voor een vrij opgelegde vloer is $\alpha = 1$

ρ = de massadichtheid van het materiaal (kg/m)

de optredende rek is:

$$\epsilon(x, t) = \frac{h}{2} * \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3.4)$$

ofwel, gebruik makend van (3.2):

$$\epsilon(x, t) = \frac{h}{2} * \hat{u} * \frac{\pi^2 * n^2}{\ell^2} * \hat{u} \sin(\omega_n t) \sin\left(\frac{\pi * x * n}{\ell}\right) \quad (3.5)$$

de maximale rek $\hat{\epsilon}$ is:

$$\hat{\epsilon} = \frac{\hat{u} * \pi^2 * h}{2\ell^2} \quad (3.6)$$

Voor een vrij opgelegde vloer is $\ell = L/n$, zodat voor ϵ , gebruik makend van 3.3 kan worden geschreven:

$$\hat{\epsilon} = \hat{u} \sqrt{3} \omega_n \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (3.7)$$

De snelheid van een punt op de vloer in de richting loodrecht op het vlak van de plaat is:

$$V(x, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = \hat{u} \omega_n \cos \omega_n t \sin\left(\frac{\pi x}{\ell}\right) \quad (3.8)$$

de maximale snelheid \hat{v} is:

$$\hat{v} = \hat{u} \omega_n \quad (3.9)$$

Daarmee wordt (3.7):

$$\hat{\epsilon} = \hat{v} \sqrt{3} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (3.10)$$

Wanneer het materiaal voldoet aan de wet van Hooke volgt tenslotte:

$$\sigma = \hat{v} * \sqrt{3\rho E} \quad (3.11)$$

Er is dus een lineair verband tussen maximale spanning en trillingssnelheid loodrecht op het vlak. Opvallend is, dat vergelijking (3.11) in vorm sterke gelijkenis vertoont met (3.1) uit voorbeeld 1, hoewel de bewegingsvorm volledig verschillend is. Stel dat de vloer van beton is en dat de bezwijktrekspanning $2,5 \times 10^6$ N/m² bedraagt. Een realistische waarde voor $\sqrt{\rho E}$ is $7,75 \times 10^6$ Ns.

Daarmede wordt:

$$\hat{v} = \frac{2,5 * 10^6}{7,75 * 10^6 * \sqrt{3}} \approx 0,19 \text{ m/s}$$

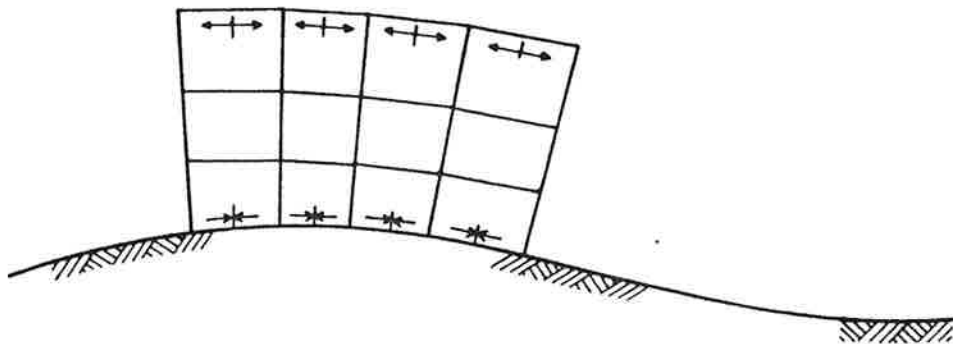
Wanneer de betonvloer door de statische buiging ten gevolge van het eigen gewicht is gescheurd, is de eigenfrequentie van de vloer lager dan die van een ongescheurde vloer. De eigenfrequentie blijkt echter geen invloed te hebben op de optredende spanningsamplitude, zodat het bovenstaande geldig blijft.

Het bovenstaande geldt voor plaat- en lijnvormige objecten die trillen in een of meerdere van hun eigenfrequenties. Bewegingen bij frequenties kleiner dan de eerste eigenfrequentie zijn te beschouwen als quasi-statisch. De belasting is te bepalen uit de versnelling loodrecht op het vlak en uit de massa per eenheid van oppervlak. In dit geval geldt dat de versnelling op het vlak van het object een bepaalde waarde niet mag overschrijden. Deze waarde is het laagst voor die constructie onderdelen, die niet zijn ontworpen op het dragen van belastingen

loodrecht op het vlak (zoals scheidingswanden).

Voorbeeld 3, buiging in het vlak

Trillingen en golfverschijnselen in de bodem zullen leiden tot dynamische belastingen op de fundering van een bouwwerk. Afhankelijk van de voortplantingssnelheid van golfverschijnselen in de bodem kunnen trillingen in de bodem bouwwerken op buiging en/of torsie belasten. De ongunstigste situatie doet zich voor indien de golflengte van een trillingsverschijnsel ongeveer overeenstemt met de lengte of breedte van een bouwwerk. Met name voor gebouwen die de stabiliteit ontleen aan schijven (bijvoorbeeld metselwerk) kunnen deze opgelegde dynamische vervormingen tot schade leiden.



Figuur 3.4, buiging in het vlak

We beschouwen een golfvorming verschijnsel aan het oppervlak van een halfruimte met een voortplantingsnelheid c . We veronderstellen het golfverschijnsel één-dimensionaal. De vervormingen aan het oppervlak en dus ook van objecten aan het oppervlak voldoen aan de golfvergelijking:

$$u(x, t) = f(x - ct) \quad (3.12)$$

waarin:

$u(x, t)$ = verplaatsing van het oppervlak (m)

x = positie langs x -as (m)

c = golfvoortplantingssnelheid (m/s)

t = tijd (s)

Voor de hoekverdraaiing ϵ in een zeker punt van het oppervlak volgt:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{c} * \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.13)$$

En voor de kromming κ :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\frac{1}{c^2} * \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.14)$$

Herschrijven van (3.13) en (3.14) levert:

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{c} * \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{v}{c} \quad (3.15)$$

en:

$$\kappa = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\frac{1}{c^2} * \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{a}{c^2} \quad (3.16)$$

Hierin is v de snelheid loodrecht op het oppervlak en a de versnelling.

Indien de golf tussen twee punten op een onderlinge afstand b bij benadering leidt tot een sinusvormige verplaatsing loodrecht op het oppervlak:

$$w = A \sin(\pi x/b) \quad (3.17)$$

dan geldt voor de maximale kromming tussen deze twee punten $\hat{\kappa}$:

$$\hat{\kappa} = -\frac{\pi^2}{b^2} \hat{u} \quad (3.18)$$

Met (3.16) en (3.18) kan de maximale verplaatsing A tussen twee punten, gelegen op een onderlinge afstand b, worden uitgedrukt als:

$$A = -\frac{b^2 * \hat{a}}{\pi^2 * c^2} \quad (3.19)$$

Dit is equivalent met:

$$\frac{A}{b} = \frac{2}{\pi} * \frac{f * \hat{v}}{c^2} * b \quad (3.20)$$

Hierin is f de trillingsfrequentie van de golf die zich langs het oppervlak van de halfruimte voortplant.

Met $c = f \lambda$ (waarbij λ de golflengte is) volgt tenslotte:

$$\frac{A}{b} = \frac{2}{\pi} * \frac{b}{\lambda} * \frac{\hat{v}}{c} \quad (3.21)$$

De maximale verplaatsing van een punt op een schijf, die deze vervorming wordt opgelegd, is dus evenredig met de trillingsnelheid.

Afhankelijk van de hoogte/lengte verhouding van de schijf van figuur 3.4 zal bezwijken plaatsvinden door overschrijding van de buigtreksterkte of door

overschrijden van de afschuifsterkte.

Op basis van statische berekeningen en beproevingen is het verband onderzocht tussen enerzijds de opgedrongen bodembeweging, gekenmerkt door A en b, en anderzijds de hoogte H en lengte L van de schijf uit figuur 3.4. Daarbij is b gelijk gesteld aan L en bestaat de schijf uit zwak en bros metselwerk. Als meest kritische waarde van de verplaatsing A in de richting van het vlak komt hieruit voor diverse verhoudingen van L en H naar voren:

$$\frac{A}{L} = 2 * 10^{-4}$$

Bij dynamische vervormingen van schijven is de reksnelheid hoger waardoor de breukrek lager is. Derhalve zullen in de praktijk lagere waarden dienen te worden gehanteerd. Volgens een recente studie [30], waarbij grenswaarden uit diverse normen op basis van dit rekenmodel zijn getoetst (uitgaande van een schijflengte L van 10 m) blijkt in het algemeen als kritische waarde te zijn aangehouden:

$$\frac{A}{L} = 1,5 * 10^{-5}$$

Substitutie van deze waarde in (3.21) geeft:

$$\hat{v} = \frac{1,5 * 10^{-5} * \pi \lambda c}{2b} \quad (3.22)$$

Waarin \hat{v} de amplitude van de snelheid loodrecht op het oppervlak is (verticale snelheid) Wanneer voor λ een realistische waarde van 20 meter wordt aangehouden, volgt:

$$\hat{v} = 4,7 * 10^{-5} * c \quad (3.23)$$

De golfvoortplantingssnelheid in de bodem is onder meer afhankelijk van de grondsoort en kan door middel van metingen aan het oppervlak worden vastgesteld. De voortplantingssnelheid van oppervlaktegolven varieert globaal tussen 100 en 300 m/s.

Ook in het derde voorbeeld blijkt het schadecriterium rechtstreeks in verband te staan met de trillingssnelheid. Voor het onderzoek naar directe schadelijke effecten van trillingen op constructies en onderdelen ervan is de trillingssnelheid derhalve de meest aangewezen grootte.

3.3.3 Indirecte schade door trillingen

Schademechanismen

Als gevolg van het voortplanten van trillingen in de grondlagen, waarin gebouwen zijn gefundeerd, is het mogelijk dat indirecte schade aan gebouwen ontstaat. De toegepaste funderingswijzen in Nederland kunnen grofweg worden onderverdeeld in funderingen op staal en funderingen op palen. Beide funderingstypen zijn op verschillende wijze gevoelig voor het ontstaan van schade ten gevolge van het optreden van trillingen in de ondergrond.

De volgende hoofdmechanismen voor het ontstaan van indirecte schade kunnen worden onderscheiden:

- Zettingen van verdichtbare funderingsgrondlagen met als mogelijk gevolg rechtstreekse zettingen van funderingselementen of extra negatieve kleeft op funderingspalen door het verdichten van zandlagen boven de funderingsgrondlaag.
- Opbouw van wateroverspanningen in de funderingsgrondlaag, met als mogelijk gevolg extra zettingen.

Bovenstaande mechanismen zijn, behalve van de bodemeigenschappen, sterk afhankelijk van het type trilling, te karakteriseren door "frequentie" en "amplitude" (zie § 3.1).

Opgemerkt wordt dat er een grote hoeveelheid energie benodigd is om verdichting van grondlagen te bewerkstelligen. De orde van grootte van de optredende zettingen als gevolg van het verdichten, zijn te berekenen met behulp van in-situ relatieve dichtheid en maximale dichtheid. Het ontstaan van zettingen als gevolg van grondverplaatsingen, bijvoorbeeld bij ontgravingen van bouwputten, is vaak een grotere en veel sneller optredende schadeoorzaak.

De opbouw van wateroverspanningen kan reeds na enkele spanningswisselingen in de ondergrond plaats vinden. Het belangrijkste gevolg hiervan zal veelal een tijdelijke verlaagde effectieve spanning in de ondergrond zijn, hetgeen tot enige extra zetting van funderingselementen aanleiding kan geven, indien de bovenbouw slap is en dus geen herverdelingscapaciteit heeft.

Locale wateroverspanningen in zandlagen kunnen in enkele uren na het stoppen van de trillingen dissiperen.

Opbouw van wateroverspanningen kan in extreme gevallen zelfs leiden tot stabiliteitsverlies en tot zettingsvloeiing van losgepakte met water verzadigde zanden.

Een belangrijk verschijnsel, dat zich bij het heien van palen voor kan doen is het "opheien". Wanneer een dicht veld van grondverdringende palen in een volumebestendige grondlaag (zoals een stijve kleilaag) dient te worden aangebracht kan door de verdringing van grond het maaiveld in de omgeving enigszins omhoog komen. Belendende gebouwen kunnen hierdoor schade oplopen.

Deze vorm van indirecte schade, die niet door trillingen wordt veroorzaakt, wordt hier voor de volledigheid genoemd. In sommige gevallen wordt schade, die in werkelijkheid door opheien is veroorzaakt ten onrechte aan trillingen toegeschreven.

Onderstaand zijn de genoemde hoofdmechanismen voor het optreden van indirecte schade meer in detail per funderingstype uitgewerkt.

Funderingen op palen

In Nederland worden verschillende typen paalfunderingen toegepast. Voor de beoordeling van mogelijke schademechanismen bij het optreden van trillingen is het belangrijk onderscheid te maken tussen palen, die gemaakt zijn met grondverdringing en palen, die niet grondverdringend zijn vervaardigd.

Funderingspalen worden in Nederland in het algemeen tot in de diepere, pleistocene zandlaag aangebracht, waardoor de palen hun draagkracht voor een belangrijk deel aan het puntdraagvermogen ontleenen. Lichte, flexibele constructies worden echter ook wel op kortere houten palen gefundeerd ("kleefpalen"), die hun draagkracht ontleenen aan de wrijving tussen de paalschacht en de omringende grond. Veel gebouwen van vòòr 1940 zijn ook op dergelijke houten palen gefundeerd.

De belangrijkste schademechanismen, die zich bij paalfunderingen kunnen voordoen zijn:

- Het optreden van extra negatieve kleef door het verdichten van grondlagen rondom de paalschacht, waardoor een neerwaartse beweging van grond ten opzichte van de paal ontstaat;
- Zettingen van de lagen waar de paal zijn draagkracht aan ontleent.

Grondverdringende paalsystemen:

prefab betonpalen: Dit type funderingspaal is weinig gevoelig voor de gevolgen van in de grond optredende trillingen. Het optreden van extra negatieve kleef kan aanleiding geven tot geringe extra vervormingen. Sterke extra vervorming of deels bezwijken van de paalfundering ten gevolge van extra negatieve kleef kan als onmogelijk worden beschouwd indien de paalfundering is ontworpen volgens NEN 6743.

grondverdringende in de grond gevormde palen (Vibro, Fundex etc.): Hiervoor gelden dezelfde opmerkingen als voor prefab betonpalen.

houten palen: Dit paaltype kan als kleefpaal, maar ook als stuitpaal (gefundeerd in de diepere zandlaag) worden toegepast. Houten palen met een inheinniveau dieper dan ca. 1,0 m in de diepe zandlaag, die ontworpen zijn volgens de inzichten uit NEN 6743 zijn wat schadegevoeligheid voor trillingen betreft vergelijkbaar met prefab betonpalen. Het optreden van extra negatieve kleef kan hierbij wel aanleiding geven tot enige extra vervormingen gezien het geringe puntoppervlak. Oudere stuitpalen die slechts enkele decimeters in het pleistocene zand zijn geheid en kleefpalen zijn echter sterk zettingsgevoelig, zowel door rechtstreekse zetting van de funderingsgrondslag als door extra negatieve kleef.

Voor alle grondverdringende palen geldt dat er nauwelijks mogelijkheid tot verdere verdichting van de grondslag direct rondom de paalpunt mogelijk is. Tijdens het heien of intrillen van deze palen zijn namelijk al hoge trillingsniveaus opgetreden, waardoor de grond in een zone van ca. 5 maal de paaldiameter rondom de paalpunt al haar maximale dichtheid heeft aangenomen. Verdichting van losgepakte lagen nog dieper onder de paalpunt is alleen mogelijk, wanneer de trillingsbron een dergelijke dieptewerking heeft. Dit kan zich voordoen wanneer op korte afstand naast een bestaande paalfundering langere palen worden geheid.

Niet grondverdringende paalsystemen: (avegaarpalen, boorpalen).

Afhankelijk van de manier waarop de paal vervaardigd is kunnen zandlagen rondom de paal een lossere pakking hebben. De grond rondom de paalpunt is bij dit paalsysteem derhalve wel verdichtbaar. Extra negatieve kleef als gevolg van het verdichten van zandlagen boven de paalpunt kan tot behoorlijke vervormingen leiden omdat de paalpunt veel minder stijf reageert dan in het geval van een grondverdringend paalsysteem. Dit type paal is vaak niet of slechts gedeeltelijk gewapend.

Funderingen op staal

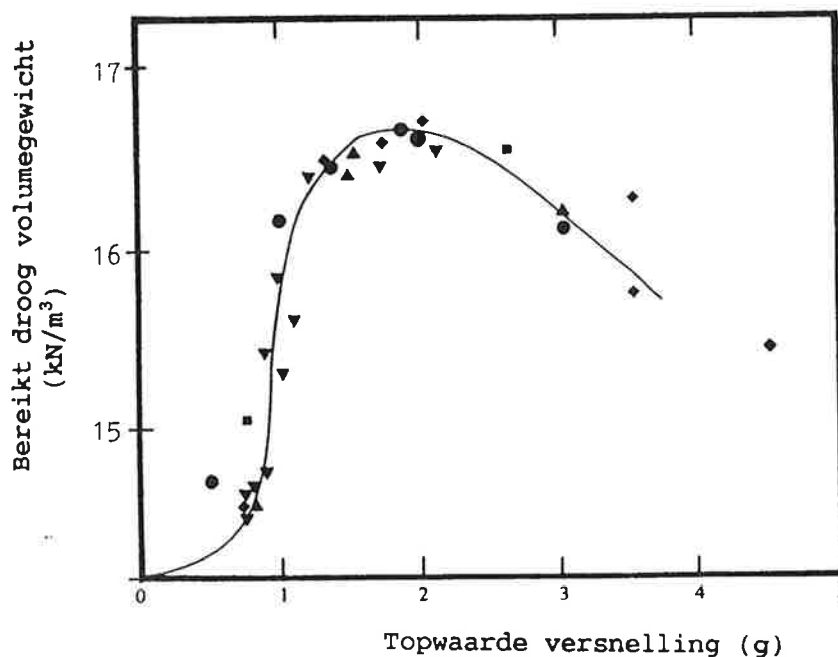
De constructieve uitwerking van een fundering op staal kan bestaan uit een fundering op poeren, op stroken of een doorgaande betonplaat (kelders, vloeren). In dit verband is de aard van het funderingselement echter van ondergeschikt belang ten opzichte van de funderingsgrondslag.

Een fundering op staal is niet per definitie gebonden aan de ligging van draagkrachtige zandlagen op of dicht onder het maaiveld. In het verleden werd regelmatig op staal gefundeerd op cohesief materiaal (klei). Voorbeelden van funderingen op klei worden aangetroffen in oude dorpskernen en bij veel oudere boerderijen langs dijken.

In het algemeen kan gesteld worden, dat bij funderingen op staal de zettingen ten gevolge van verdichting van grondlagen een orde groter kunnen zijn dan bij funderingen op palen. Zettingen ten gevolge van trillingen van enkele tientallen millimeters zijn in het geval van funderingen op staal niet onmogelijk.

Funderingen op niet cohesief materiaal.

Bij staalfunderingen op niet cohesief materiaal (zand) kan de funderingsgrondslag inklinken. Met name slecht verdichte, bijvoorbeeld onder water aangebrachte, grondverbeteringen en ophogingen zijn zeer gevoelig voor verdichtingseffecten. Onderzoek is gedaan naar de benodigde frequentie en amplitude om een verdichting van zandlagen te bereiken. Uit onderstaande figuur 3.5 is af te leiden dat een versnellingsamplitude van ca. 10 m/s^2 over het algemeen noodzakelijk is om droog zand te kunnen verdichten.



Figuur 3.5, verband tussen bereikt droog volumegewicht en verticale versnelling voor een duinzand bij verschillende frequenties (uit: d'Appolonia, E.P., 1970, lit [62])

Bij verzadigde, losgepakte zandlagen kan de amplitude van de versnelling waarbij verdichting optreedt lager liggen. Bij het verdichten van zandlagen is ook de frequentie en het aantal lastwisselingen van belang. Om die reden zullen zandlagen meer zetting vertonen bij harmonische trillingen, zoals bij het intrillen van damwanden voorkomen, dan bij stootvormige trillingen zoals bij het heien van palen.

Opbouw van wateroverspanningen in niet cohesieve grond met een lage doorlatendheid kan leiden tot verlies van draagvermogen of stabiliteitsverlies en zelfs tot zettingsvloeiing.

Funderingen op cohesief materiaal.

Cohesief materiaal, zoals klei, is slecht doorlatend. Stabiliteitsverlies door het opbouwen van wateroverspanning onder invloed van trillingen is in principe mogelijk. Door herhaalde trillingen treedt verkneding van het materiaal op, waardoor zowel de sterkte als de stijfheid achteruitgaan.

Ook voor cohesieve grondsoorten is het aantal lastwisselingen van belang, waardoor periodieke trillingen schadelijker zijn dan stootvormige trillingen.

Bij staalfunderingen op kleigrond is de stijfheid van de fundering gering. Daardoor ontstaat een lage verticale eerste eigenfrequentie van de bouwconstructie met de omringende grond.

In het geval van laagfrequente trillingsbronnen zoals zwaar verkeer kan bij dergelijke funderingen een aanzienlijke opslingering plaatsvinden.

3.4 Conclusies

1. Voor het beoordelen van de rechtstreekse schadelijke invloed van trillingen op gebouwen ligt toepassing van een snelheids criterium voor de hand. De voorbeelden in paragraaf 3.3.2 hebben dit aangetoond.
2. Bij het beoordelen van de indirecte schadelijke invloed van trillingen op gebouwen kunnen veel schademechanismen een rol spelen. Trillingsmetingen alléén zijn in een dergelijk geval ontoereikend om een uitspraak over het schade potentieel van de trillingen te doen.
3. Bij paalfunderingen, die volgens de huidige normen zijn ontworpen, is in veel gevallen aan te tonen, dat optreden van indirecte schade uiterst onwaarschijnlijk is.

Bij funderingen op staal kan in sommige gevallen aangetoond worden, dat gevaar voor indirecte schade door zettingen van de funderingsgrondslag aanwezig is. Funderingen op losgepakte zandlagen blijken daarbij het meest gevoelig voor zettingen ten gevolge van trillingen te zijn.

4. Schade wordt soms ten onrechte aan trillingen toegeschreven. Dit is

bijvoorbeeld het geval wanneer schade optreedt bij het heien van een dicht palenveld waarbij het maaiveld enigzins omhoogkomt ("opheien") of bij vervormingen van de grondkerende wanden die een bouwkuip begrenzen.

Gezien het bovenstaande is het voor een goede beoordeling van de schadelijke invloed van trillingen op gebouwen noodzakelijk, dat de vooraf de uitgangssituatie met betrekking tot de bouwkundige staat van het gebouw wordt vastgelegd. Hierbij dienen minimaal de volgende gegevens over het gebouw te worden verzameld:

- de constructiewijze van het gebouw;
- de bouwkundige staat, waarin begrepen mogelijke initiële spanningen als gevolg van verbouwingen, grondwaterstandsverlagingen, etc.
- type fundering;
- funderingsgrondslag.

Is op grond van deze gegevens de kans op indirecte schade reëel, dan kan niet met uitsluitend trillingsmetingen worden volstaan. De cumulatieve vervormingen van het gebouw tijdens het optreden van de trillingen dienen in dat geval te worden geregistreerd en beoordeeld. Hierbij kan gedacht worden aan scheurmetingen en aan regelmatig herhaalde nauwkeurigheidswaterpassingen.

In kritische gevallen kan ook het gedrag van de ondergrond worden geregistreerd, bijvoorbeeld door het meten van waterspanningen en trillingen in de bodem.

4. PRAKTIJKERVARING BIJ SCHADE DOOR TRILLINGEN

4.1 Inleiding

De kans op bouwkundige schade ten gevolge van trillingen kan worden verkleind, door de trillingsterkte te beperken. De vraag is bij welke trillingsterkte de kans op het optreden van bouwkundige schade aanvaardbaar klein zal zijn. Voor het beantwoorden van die vraag is het noodzakelijk een relatie te leggen tussen de trillingsterkte (dynamische spanningswisselingen) enerzijds en het incasseringsvermogen (aanwezige spanningen en kritieke spanningen) van een gebouw anderzijds.

De relatie tussen de maximale rek (of spanning) ten gevolge van buiging en extensie van een ligger of van een plaat zijn en de maximale trillingsnelheid is in hoofdstuk 3 op basis van theoretische modellen bepaald. Met name in gebouwen, waarin de dragende en scheidende functie is geïntegreerd, zullen door openingen in vlakken en reeds aanwezige defecten (bestaande scheuren) locale vergrotingen van de dynamische spanning optreden (zgn. spanningsconcentraties). De grootte hiervan is op voorhand niet bekend. Idealiter zou een dynamische analyse op het gebouw uitgevoerd moeten worden, ten einde de relatie tussen optredende spanningen en de topwaarde van de trillingsgrootte te bepalen.

Ook de initiële spanningstoestand is meestal niet bekend. Dit is met name het geval bij gebouwen uit metselwerk: hier maken vervormingen door ongelijkmatige zettingen, verbouwingen en discontinuïteiten in gevels het moeilijk een oordeel te vellen.

Tenslotte zijn de kritieke spanningen van een bouw materiaal meestal niet nauwkeurig bekend. Dit speelt met name bij inhomogene, brosse materialen, zoals bijvoorbeeld metselwerk en pleisterwerk. Ook de invloed van factoren als ouderdom, de initiële spanningstoestand, de snelheid van belastingen en

vermoeiingseffecten op de kritieke spanningen is in veel gevallen niet kwantitatief bekend.

Niet alleen zijn er onzekerheden ten aanzien van het incasseringsvermogen van gebouwen. Ook het aantal beschikbare meetopnemers voor het uitvoeren van trillingsmetingen is gering in verhouding tot het aantal onderdelen van een bouwwerk, waaraan schade zou kunnen ontstaan. Bij het kiezen van meetplaatsen wordt daarom selectief te werk gegaan. De keuze voor een zekere meetplaats kan niet altijd met objectieve gegevens worden gemotiveerd. Dit levert een aanvullende onzekerheid in de beoordeling op.

Uit het voorgaande blijkt dat de gezochte relatie meestal niet eenduidig bekend is. Dit is de reden, dat de grenswaarden voor de trillingsterkte, die in de praktijk worden aangehouden een ruime veiligheidsmarge bevatten, waarvan de grootte bij benadering niet bekend is. De gegevens over de van belang zijnde factoren zijn zodanig, dat op dit moment geen grenswaarden kunnen worden geformuleerd, waarbij schade met een kwantificeerbare kans kan worden uitgesloten. De onzekerheid in de te hanteren grenswaarden is een onderwerp dat in de toekomst wellicht nader bekeken zal moeten worden. De huidige studie laat dit niet toe. Grenswaarden worden daarom dikwijls gemotiveerd vanuit de praktijkervaring, dat geen schade optreedt. Opvallend is dat bij het interpreteren van resultaten van metingen uniformiteit ontbreekt over de definitie van schade. Om enig idee te krijgen van grenswaarden, waarvan ervaring bestaat dat zij niet tot schade zullen leiden, zijn in de volgende paragrafen een aantal case-studies en literatuur-gegevens besproken.

4.2 Trillingen van bouwwerken tijdens normaal gebruik

Wij spraken eerder van het feit dat gebouwen een zekere bestemming hebben en dat daarvoor bij het ontwerp bepaalde belastingen worden aangehouden. Voorts zullen

diverse belastingen optreden, die niet in het ontwerp zijn meegenomen, maar die bij het beoogde gebruik van het gebouw op zich wel te voorzien zijn. Bij woningen kunnen we hiertoe rekenen de dynamische belasting op vloeren ten gevolge van het lopen van mensen, de dynamische belasting op muren ten gevolge van het sluiten of dichtslaan van deuren en dergelijke. Een ondergrens voor de toelaatbaarheid van kortdurende trillingen in verband met niet-constructieve schade is dus in wezen bepaald door de trillingsterkteën die bij normaal gebruik van het gebouw kunnen voorkomen, gegeven de situering en de bestemming van het bouwwerk.

4.3. Trillingen veroorzaakt door weg- en railverkeer

4.3.1 Wegverkeer

Trillingen veroorzaakt door wegverkeer zijn vaak aanleiding tot klachten van bewoners of beheerders over trillingshinder voor mensen in een gebouw en/of over mogelijke schade aan een gebouw [4,29]. Over de mogelijke relatie tussen trillingen en schade is een groot aantal case-studies voorhanden. In deze paragraaf is een overzicht van de resultaten van een aantal van deze onderzoeken gegeven.

Trillingen van (onderdelen van) gebouwen kunnen bij het passeren van wegverkeer ontstaan ten gevolge van een combinatie van een of meer van de onderstaande factoren:

- aanstoting van een gebouw door trillingen in de bodem;
- aanstoting van een gebouw door trillingen in de lucht;
- opgelegde quasi-statische vervormingen door het passeren van verkeer;
- belasting van een gebouw door het drukveld rondom een rijdend voertuig;

In Engeland is door het Transport and Road Research Laboratory [31- 42] een aantal case-studies uitgevoerd, waarbij de effecten van passerend verkeer langs gebouwen integraal zijn onderzocht. Dit houdt in dat zowel aandacht is besteed

aan de effecten van trilling en geluid op mensen als op gebouwen. De trillingsterkte is door meting bepaald; bouwkundige inspecties zijn ter plaatse uitgevoerd.

Bij de bestuderende onderzoeken geen relatie tussen de verkeerstrillingen en significante directe en indirecte schade aan de onderzochte gebouwen worden aangetoond. De maximale piekwaarden van de trillingsnelheid gemeten op de fundatie van de onderzochte gebouwen liggen tussen 0.40 en 3.38 mm/s [37,39] bij dominante frequenties in de orde van 10 Hz. Opslingering van vloeren ten opzichte van de verticale trillingscomponent van muren ligt tussen een factor 1,2 en 5,1. In enkele panden werden bovendien dynamische scheurwijdte-metingen uitgevoerd, waarbij bleek dat de topwaarden van de verplaatsingen tijdens de meest intensieve trillingen qua orde van grootte gelijk waren aan die, welke gemeten werden tijdens het dichtslaan van deuren.

Door het TRRL zijn bovendien proeven uitgevoerd [36], waarbij het gedrag van woningen onder een langdurige, kunstmatig aangebrachte trillingsbelasting is onderzocht. De grootste topwaarden van de trillingsnelheid bedroegen hier 2 mm/s gemeten op de fundatie. De conclusie van dit onderzoek is dat geen schade aan de hoofddraagconstructie werd veroorzaakt en slechts enkele fijne scheurtjes in het pleisterwerk konden worden getraceerd.

Genoemde onderzoeken van het TRRL bevatten verder waardevolle informatie inzake de relatie tussen de mate van hinder en een aantal grootheden, zoals trillingsterkte, geluidsterkte en verkeersintensiteit.

IBBC-TNO heeft in de jaren 1984 tot 1989 een aantal case-studies [43] uitgevoerd waarbij trillingsmetingen in combinatie met bouwkundige inspecties werden verricht. Als algemeen beeld komt uit deze onderzoeken naar voren dat de trillingen, welke werden veroorzaakt door normaal wegverkeer, niet tot directe schade (noch constructief, noch niet-constructief) aan in redelijke staat

verkerende gebouwen leiden. De topwaarden van de trillingsnelheid waren in deze gevallen kleiner dan 2,5 mm/s, gemeten op de fundatie. De dominante frequentie ligt doorgaans in de orde van 10 Hz. Voor een overzicht van deze cases wordt verwezen naar tabel 4.1.

Tabel 4.1: Overzicht case-studies trillingen door verkeer van TNO [43].

locatie	bron	omstandigheden	topwaarden*) (mm/s)
St.Odilienberg	wegverkeer	schade oud pand bij verkeersdrempel	1,5
Heeswijk-Dinther	wegverkeer	putdeksel in weg	1,2
Schellinkhout	wegverkeer	schade sinds rioleringswerk	0,3
Leuth	wegverkeer	oud pand met schade	2,0
Veghel	wegverkeer	schade vermoed t.g.v. verkeer	1,2
Enschede	wegverkeer	schade vermoed t.g.v. bus	0,3
Oud Gastel	wegverkeer	schade vermoed t.g.v. vrachtverkeer	1,4
Schagerbrug ¹	wegverkeer	schade vermoed t.g.v. vrachtverkeer	3,0
Den Helder	wegverkeer	schade vermoed t.g.v. bus	1,3
Vught	wegverkeer	schade vermoed t.g.v. vrachtverkeer	0,7
Lisserbroek	wegverkeer	schade vermoed t.g.v. vrachtverkeer	1,5

*) gemeten op de fundatie

¹) causale relatie aannemelijk geacht

In een Zweeds onderzoek door Bonde e.a. [13] worden onderstaande grenswaarden aangegeven voor trillingen ten gevolge van wegverkeer, indien gebouwen zijn gefundeerd op klei of losgepakt zand. Hierbij is vooral op de invloed van het verkeer op de funderingsgrondslag gelet.

Tabel 4.2: Grenswaarden volgens Bonde [13] voor verkeerstrillingen

omschrijving gebouw	snelheid
gevoelige gebouwen en gebouwen van culturele of historische waarde	1 mm/s
nieuwe gebouwen en/of gebouwen met een fundering op staal	2 mm/s
gebouwen gefundeerd op cohesion piles	3 mm/s
gebouwen gefundeerd op palen (dragen op puntweerstand of op kleef)	4 mm/s

Opmerking: meetplaatsen bij deze criteria zijn niet gespecificeerd

De conclusie die uit de bestudeerde case studies kan worden getrokken is dat geen gevallen bekend zijn waar verkeerstrillingen met topwaarden van de snelheid kleiner dan 2 mm/s (gemeten op de fundatie) directe constructieve schade of niet-constructieve schade hebben veroorzaakt aan in redelijke staat verkerende panden.

4.3.2 Trillingen ten gevolge van railverkeer

Railverkeer leidt tot een dynamische belasting van de bodem en daardoor trillingen in de omgeving van het spoor. Deze dynamische belastingen ontstaan onder meer door:

- geometrische afwijkingen in het spoor
- stijfheidsverschillen (bijv. dwarsliggers)
- responsie in de vrijheidsgraden van het materieel
- excentriciteit en onbalans in de wielstellen

Tenslotte is ook het passeren van een reeks (statische) aslasten voor een waarnemer op een vast punt bij de spoorbaan als een dynamisch verschijnsel te

beschouwen.

Uit metingen van de Nederlandse Spoorwegen [63] blijkt dat de grootste topwaarden van trillingen ten gevolge van treinen optreden bij dominante frequenties kleiner dan 10 Hz. De grootst gerapporteerde waarde (op het funderingsniveau van een gebouw gemeten) bedraagt volgens [63] 4 mm/s. De evaluatie van metingen heeft tot nu toe plaatsgevonden met DIN 4150, Teil 3. Dit houdt in dat bij veel voorkomende lage trillingsterkteen (< 2 mm/s) een causale relatie tussen trilling en schade niet aanwezig is verondersteld.

4.4. Trillingen ten gevolge van heiwerkzaamheden

Tijdens het inheien van fundatiepalen of damwanden worden veelvuldig trillingsmetingen uitgevoerd aan belendende panden. De dominante frequenties bij heiwerkzaamheden zijn doorgaans in tussen 10 en 30 Hz. De Nederlandse adviespraktijk baseert zich doorgaans op CUR 57 [7] of op DIN 4150 deel 3 [26]. Op basis van de metingen tijdens heiwerkzaamheden is de ervaring dat voor gebouwen uit metselwerk, die in goede staat verkeren een topwaarde van de trillingsnelheid op het fundatieniveau in de orde van 5 mm/s toelaatbaar is en niet tot directe constructieve schade ten gevolge van de trillingen zal leiden. Bij toepassing van DIN 4150 deel 3 zijn iets hogere waarden toelaatbaar voor woningen (circa 8 mm/s, bij een dominante frequentie van 20 Hz); ook dit heeft voor zover bekend niet tot directe constructieve schade aanleiding gegeven.

Schade in de vorm van lichte scheurvorming (meestal reeds loszittend pleisterwerk of tegelwerk, niet-constructieve voegen) valt echter bij de hiervoor vermelde trillingsterkte niet geheel uit te sluiten. Dit betreft dan oppervlakkige schade, waarbij vermoedelijk vaak reeds sprake was van verborgen gebreken. Bij trillingen die significant boven de gebruikelijke trillingsterkte uitkomen treedt dan schijnbaar plotseling schade op (trigger effect). Dergelijke schade lijkt alleen bij aanhouden van zeer lage grenswaarden (2 mm/s) te kunnen worden voorkomen.

Voor wat betreft de mogelijkheid van indirecte schade, kan op grond van praktijkervaringen en laboratoriumproeven gesteld worden dat versnellingsniveaus lager dan $0,25$ à $0,5$ m/s^2 in het algemeen niet tot zettingen of degradatie van funderingsgrondlagen leiden. Hogere waarden zijn alleen acceptabel indien nader onderzoek ter plaatse dit heeft aangetoond. Wanneer de kans op indirecte schade reëel is, dienen niet alleen de trillingsniveaus te worden geanalyseerd, maar dient ook het cumulatieve effect van verdichting en/of opbouw van wateroverspanningen bij de beoordeling te worden betrokken.

Indirecte schade, in de vorm van zettingen van gebouwen zijn overigens niet altijd ontoelaatbaar. Indien de zettingen gelijkmatig over de oppervlakte van een gebouw tot ontwikkeling komen zal dit geen aanleiding geven voor het ontstaan van schade aan het gebouw. Ongelijkmatige zettingen zullen echter, afhankelijk van de stijfheid van het gebouw, leiden tot scheurvorming. In NEN 6744 (ontwerp norm voor funderingen op staal) is als bruikbaarheidsgrenstoestand een relatieve hoekverdraaiing van $1/500$ gedefinieerd. Voor snel optredende zettingen, zoals deze zich bij trillingen in de bodem kunnen voordoen (dus bij een grote "reksnelheid") is voor reeds bestaande constructies wellicht een strengere eis, $1/1000$, nodig in verband met meer bros materiaalgedrag en de afwezigheid van kruip. De stijfheid van de bouwconstructie is in dezen zeer belangrijk.

Belangrijk voor het mogelijk optreden van indirecte schade door trillingen is ook de aanwezige spanningstoestand in het gebouw. Eerdere interne verbouwingen, ontgravingen of ophogingen in de buurt en grondwateronttrekkingen kunnen reeds geleid hebben tot vervormingen en initiële spanningen in het gebouw. Een geringe extra vervorming of spanning kan dan leiden tot overschrijding van de treksterkte van brosser constructiematerialen.

4.5. Trillingen ten gevolge van vibratoren

Vibratoren oefenen een harmonische belasting op de bodem uit, die geruime tijd kan aanhouden. De frequenties liggen in het algemeen tussen 15 en 25 Hz. Door het aanhoudend karakter van de trilling is er een kans op resonantie van bepaalde onderdelen van gebouwen. Bovendien wordt bij het aan- en uitschakelen van een vibrator een zekere frequentieband doorlopen, waardoor ook bij frequenties anders dan de werkfrequentie een zekere opslingering kan ontstaan. Met name worden in de praktijk opslingeringen van het bouwwerk als geheel in de eerste eigenfrequentie waargenomen. Door het grote aantal wisselingen moet rekening worden gehouden met effecten van vermoeiing.

De Nederlandse ervaringen stemmen goeddeels overeen met de ervaring bij trillingen ten gevolge van heiwerkzaamheden: 5 mm/s op de fundatie van woningen die in goede staat verkeren levert geen schade, mits de trillingsterkte op gevels e.d. 10 mm/s niet overschrijdt. Voor gebouwen uit metselwerk die in slechte staat verkeren levert de combinatie van 2 mm/s op de fundatie, resp. 5 mm/s op gevels evenmin problemen op. Gebruik makend van DIN 4150 deel 3:1986 zou 5 mm/s moeten worden aangehouden.

Grenzen voor trillingen veroorzaakt door vibratoren (trilwalsen) voor verdichtingswerkzaamheden zijn gegeven door Forsblad [12], zoals onderstaand weergegeven.

Tabel 4.3: Grenswaarden voor trillingen t.g.v. vibratoren [12]

omschrijving	snelheid
kans op schade voor ruines en gebouwen van grote historische of culturele waarde	2 mm/s
kans op scheurvorming in woongebouwen met gepleisterde muren en/of plafonds	5 mm/s
kans op schade aan overige woongebouwen	10 mm/s
kans op schade aan gebouwen van beton, zoals industrie-gebouwen e.d.	10 ... 40 mm/s

Opmerking: meetplaatsen bij deze criteria zijn niet gespecificeerd.

4.6 Trillingen ten gevolge van explosies

Explosies veroorzaken voor gebouwen een responsie zoals ten gevolge van een een stoot- of pulsachtige belasting. Bovendien komen explosies relatief weinig voor. Vermoeiingsverschijnselen in bouwwerken ten gevolge van explosiebelastingen zijn daardoor niet relevant. Door het stootachtig karakter zullen geen sterke resonanties optreden. De grenzen die worden aangehouden ter voorkoming van schade aan gebouwen liggen hierdoor relatief hoog. Met betrekking tot schade aan gebouwen door trillingen ten gevolge van explosies bestaat in Nederland betrekkelijk weinig ervaring.

In de Verenigde Staten (Wiss [15]), Zweden (Holmberg [11]), Duitsland (Splittgerber [56-58]), Zwitserland (Bendel [49]) en Oostenrijk is op uitgebreide schaal onderzoek verricht naar de effecten van trillingen ten gevolge van explosies. In de Verenigde Staten en Canada [20, 21] wordt voor woningen in het algemeen de topwaarde van de snelheid ter plaatse van de fundatie beperkt tot 50 mm/s met een maximum aan de topwaarde van de verplaatsing van 770 μm . Medearis

[18] stelt als grens voor laagbouw woningen (zonder een nadere differentiatie naar type constructie), na een evaluatie van een groot aantal explosies, een topwaarde voor de trillingsnelheid van de bodem van 37,6 mm/s voor. Chae [19] differentieert naar type constructie, en komt tot de volgende grenswaarden:

Tabel 4.4: Grenswaarden voor explosies (Chae [19])

omschrijving	snelheid
Bouwwerken (te verstaan als 'engineered structures')	100 mm/s
Nieuwe woningen in goede staat	50 mm/s
Oudere woningen in slechte staat	25 mm/s
oude woningen in zeer slechte staat	12 mm/s

Opmerking: de meetplaatsen bij deze criteria zijn niet gespecificeerd.

Langefors en Kihlstrom [14] adviseren de volgende grenswaarde voor woningen, indien de bodem bestaat uit zand of klei (voortplantingsnelheid van de compressiegolf tussen 300 en 1000 m/s):

Tabel 4.5: Grenswaarde voor woningen (Langefors & Kihlstrom [14])

omschrijving schade-effect	snelheid
geen waarneembare scheurvorming	18 mm/s
kleine scheuren, afvallen van pleisterwerk	30 mm/s
scheurvorming	40 mm/s
ernstige scheurvorming	60 mm/s

Ashley en Parkes [16] vermelden onderstaande waarden:

Tabel 4.6: Grenswaarden volgens Ashley & Parkes [16]

omschrijving bouwwerk	snelheid
gelaste stalen gasleidingen, in goede staat verkerende rioolleidingen 'engineered structures'	50 mm/s
woon-, kantoor- en industriegebouwen	25 mm/s
woningen in slechte staat	12 mm/s
historische gebouwen	7,5 mm/s

Opmerking: de meetplaatsen bij tabellen 4.4 en 4.5 zijn niet gespecificeerd.

In Duitsland wordt de norm DIN 4150 Teil 3 (1986) toegepast op trillingen door explosies. Deze norm zal in hoofdstuk 5 nader worden besproken. De aan te houden grenswaarden zijn gerelateerd aan het type bouwwerk, zie tabel 4.7.

Tabel 4.7: Grenswaarden voor kortdurende trillingen volgens DIN 4150 deel 3 [16], in mm/s

omschrijving	< 10 Hz	10 ... 50 Hz	50 ... 100 Hz
bedrijfs- en industrie-gebouwen en gelijksoortige gebouwen	20	20 ... 40	40 ... 50
woningen en qua constructie gelijksoortige gebouwen	5	5 ... 15	15 ... 20
trillingsgevoelige gebouwen	3	3 ... 8	8 ... 10

In Oostenrijk geschiedt de beoordeling van trillingen volgens de norm ONORM S 9020 [27]. Voor een berekening hiervan zie hoofdstuk 5. De grenswaarden worden uitgedrukt in de topwaarde van de trillingsnelheid en liggen tussen 2,5 mm/s en 30 mm/s.

4.6 Onderlinge samenhang van grenswaarden

In een publicatie van Massarsch [30] zijn de resultaten besproken van een onderzoek naar de normstelling in enkele Europese landen, met name gericht op een onderliggende algemene basis. Een aantal van de normen, die in dit onderzoek werden betrokken, zijn in hoofdstuk 5 van dit rapport nader besproken.

Als relevante factoren bij normstelling komen hierbij naar voren:

- het type trillingsbron, samenhangend met de potentiële vermoeiing in bouw- en funderingsmateriaal. Een onderscheid in continue trillingen, herhaald voorkomende transiente trillingsverschijnselen en zelden voorkomende transients blijkt daarbij zinvol.
- het type bouwwerk, geclassificeerd naar de trillingsgevoeligheid; in genoemde studie is aangehouden:
 1. zeer trillingsgevoelige gebouwen, historische gebouwen
 2. trillingsgevoelige gebouwen (dat wil zeggen met wandafwerkingen van tegels of pleisterwerk), gefundeerd op staal
 3. goed gefundeerde gebouwen met betonnen wanden, niet trillingsgevoelig
 4. gebouwen uit staal of gewapend beton, industrie-gebouwen
- het type fundering, met name de funderingsgrondslag. Uitgaande van het schademechanisme van voorbeeld 4 uit hoofdstuk 3 is de voortplantingsnelheid van de oppervlaktegolf in de bodem belangrijk.
- de schade die wordt verwacht c.q. geaccepteerd; de schade is hierbij kwalitatief als volgt gekarakteriseerd:
 1. onbetekenend
 2. zichtbare scheuren

3. matige scheuren
4. grote ('bedeutende') schade

Afhankelijk van de gebouwklasse, de voortplantingsnelheid van de oppervlaktegolf, van de trillingsbron en van de toelaatbare schade kan een toelaatbare trillingsnelheid worden bepaald, uitgaande van het schade-mechanisme van voorbeeld 4 uit hoofdstuk 3, volgens:

$$v_z = A_1 A_2 A_3 5 \cdot 10^{-5} c$$

waarin:

c de voortplantingsnelheid van oppervlaktegolven, in m/s

v_z de toelaatbare trillingsnelheid, in m/s, gemeten op de fundatie

A_i ($i=1,2,3$) factoren voor type gebouw, type schade en type trillingsbron, zoals onderstaand vermeld:

trillingsbron:	A_1
- stootvormig	1,0
- herhaald stootvormig	0,6
- continu	0,3

Effecten van vermoeiing leiden tot een reductie van de toelaatbare waarden tot een factor van ruim 3. DIN 4150 (Teil 3) adviseert eveneens een reductiefactor voor vermoeiing van 3.

type gebouw:	A_2
- zeer trillingsgevoelige gebouwen, historische gebouwen	0,5
- trillingsgevoelige gebouwen (dat wil zeggen met wandafwerkingen van tegels of	1,0

- pleisterwerk), gefundeerd op staal
- goed gefundeerde gebouwen met betonnen wanden, niet trillingsgevoelig 1,5
 - gebouwen uit staal of gewapend beton, industrie-gebouwen 2,5

type schade:	A ₃	
- onbetekend	0,7	
- zichtbare scheurvorming		1,0
- matige scheurvorming		2,0
- belangrijke schade		4,0

voorbeeld:

Voor de Nederlandse omstandigheden met $c = 100$ m/s, trillingen door verkeer, vinden we voor een normale woning voor het geval van onbetekende schade een maximale topwaarde tussen:

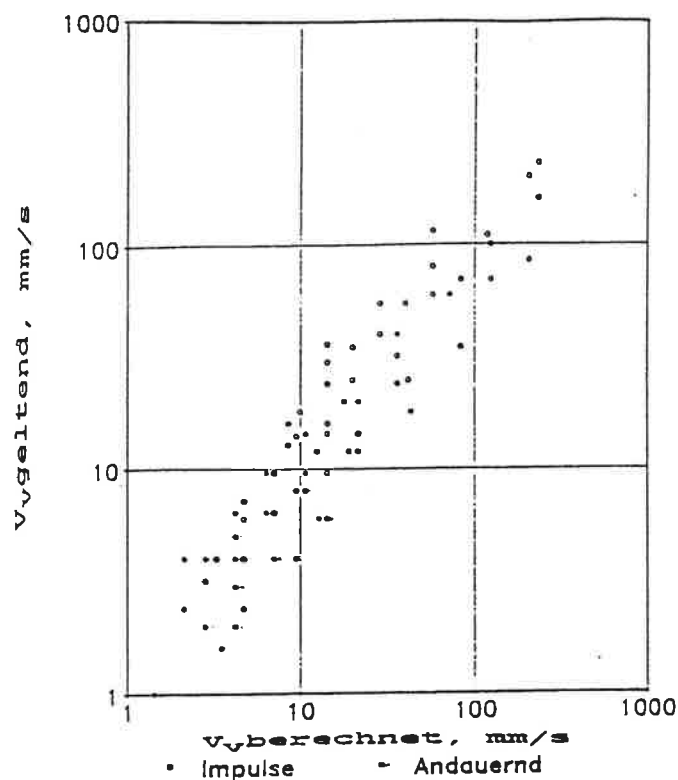
$$v_z = 0,3 \cdot 1,0 \cdot 0,7 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \quad \text{en}$$

$$v_z = 0,6 \cdot 1,0 \cdot 0,7 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Afhankelijk van de classificatie van verkeer als continue trilling of als herhaalde transient. Deze waarde komt redelijk overeen met de praktijkervaring (zie par. 4.3 en 4.5). Voor heiwerkzaamheden volgt in deze situatie een maximale snelheid van 2,1 mm/s, hetgeen gelet op de praktijkervaring aan de voorzichtige kant is.

Met bovenstaande methodiek zijn de grenswaarden van DIN 4150 deel 3, SN 640312, Langefors & Kihlstrom, Persson, Bonde, Forssblad, New, Van Brederode en Van Zoest onder een noemer gebracht. Onderstaande figuur geeft de relatie tussen de berekeningsmethodiek van Massarsch en de in de normen gegeven waarden.

Figuur 4.1: Overzicht topwaarden normen vs. berekening volgens [30]



4.8 Conclusies n.a.v. praktijkervaringen

Zoals eerder al opgemerkt, bevatten de grenswaarden, die in de literatuur worden geciteerd en die in de Nederlandse praktijk worden gebruikt waarschijnlijk een aanzienlijke veiligheidsmarge.

Bij trillingen door verkeer wordt uit een aantal case- studies geconcludeerd dat topwaarden kleiner 2 mm/s gemeten op het begane grondniveau van woningen in goede tot slechte staat niet tot directe schade (constructief of niet-constructief) aanleiding zullen geven. De grenswaarden gegeven door Bonde bevestigen dit beeld.

In de Nederlandse praktijk wordt voor heiwerkzaamheden 5 mm/s (gemeten op het

begane grondniveau) bij in goede staat verkerende woningen acceptabel geacht; er zijn geen gevallen van constructieve schade bekend, waarbij er een directe relatie is met trillingen. Bij woningen die in slechte staat verkeren wordt soms 2 mm/s aangehouden. Bij bouwwerken met een groter incasseringsvermogen, zoals constructies uit gewapende beton, wordt 12,5 mm/s of meer toegelaten. Deze ervaringen gelden ook ten aanzien van trillingen door vibratoren, waarbij echter de trillingen van muren uit metselwerk beperkt moeten blijven (10 mm/s).

De Nederlandse ervaring t.a.v. schade door trillingen veroorzaakt door explosies is beperkt. Ervaringen uit Amerikaanse en Zweedse literatuur geven aan dat aanzienlijk hogere waarden toelaatbaar zijn (7,5 tot 12 mm/s op fundatie-niveau voor historische gebouwen resp. woningen die in slechte staat verkeren). Gegevens over de bodemgesteldheid, fundering en andere bouwkundige zaken zijn overigens in de geraadpleegde literatuur niet aangetroffen. In de Duitse en Oostenrijkse norm worden hogere toelaatbare topwaarden gekoppeld aan een hogere dominante frequentie van het trillingsverschijnsel. Bij lage dominante frequenties (orde: 10 à 20 Hz) geven deze normen grenswaarden die heel redelijk met de Nederlandse praktijk overeenstemmen. Een vloeiende overgang naar lagere toelaatbare waarden voor lage dominante frequenties is daarmee gecreëerd.

Gesteld kan worden dat de ervaring van directe schade door trillingen in Nederland zeer beperkt is; dit laatste houdt in dat de richtlijnen waarop de adviespraktijk zich in Nederland doorgaans baseert (TNO BI-67-107, CUR 57 of DIN 4150 deel 3:1986) als veilig beschouwd kunnen worden. In hoeverre sprake is van te conservatieve grenswaarden valt op dit moment niet goed vast te stellen.

De conclusie lijkt gerechtvaardigd dat een beoordelingsrichtlijn voor trillingen met betrekking tot schade aan gebouwen grenswaarden dient te bevatten, die in overeenstemming zijn met deze praktijkervaring. De toelaatbaar geachte waarden van de trillingsterkte moeten dan wel aan het type bouwwerk, de bouwkundige staat en het type trillingsbron gekoppeld worden, om enige nuance in toelaatbare

trillingsintensiteiten te kunnen aangeven.

Voor de lange termijn valt echter aan te bevelen de werkelijk aanwezige veiligheid van deze grenswaarden aan een nader onderzoek te onderwerpen.

5. INVENTARISATIE VAN NORMEN, RICHTLIJNEN, PUBLICATIES

5.1 Inleiding

Als voorstudie voor het opstellen van een voorstel voor Nederlandse richtlijnen ten aanzien van de invloed van trillingen op gebouwen zijn een aantal binnen- en buitenlandse normen en richtlijnen bestudeerd.

Ondanks het ontbreken van normen in Nederland is er een ruime praktijkervaring opgedaan met betrekking tot de beoordeling van de invloed van trillingen op gebouwen. Om die reden is de inventarisatie gesplitst in een deel, dat specifiek betrekking heeft op Nederlandse publicaties, die een zekere normstelling bevatten, en een deel dat betrekking heeft op buitenlandse richtlijnen en voorschriften.

In paragraaf 5.2 komen allereerst de Nederlandse publicaties aan de orde:

- [4] P.J. van Brederode et al. "Invloed van verkeerstrillingen op gebouwen" TNO rapport IBBC B-87-501 en B-87-502
- [5] H. van Koten, "Grenzen voor dynamische bewegingen", TNO rapport IBBC BI-67 107 (1967)
- [6] P.J. van Brederode, J. van Zoest, "Trillingen in de bouw; een overzicht van de problemen", PT/CT 1985 no. 2
- [7] CUR rapport 57 "Dynamische problemen in de bouw", Stichting CUR, 1972
- [9] H. van Koten, T.K. Muller, A.F. van Weele, "Toelaatbare bewegingen voor mensen en gebouwen", PT-Civiele Techniek, februari 1990.
- [10] P.C. van Staalduinen "Het uitvoeren van trillingsmetingen tijdens heiwerkzaamheden voor de beoordeling van schade aan gebouwen", TNO rapport BI-90-154 (1990)

In paragraaf 5.3 wordt ingegaan op een aantal buitenlandse normen, te weten:

[23]	Internationaal	ISO 4866 (NEN-ISO 4866)
[25]	Frankrijk	Reglementation 23-07-1986
[26]	Duitsland	DIN 4150 Teil 3 (1986)
[27]	Oostenrijk	Onorm S 9020
[28]	Zwitserland	SN 640 312

Voor zover bekend bestaan in België [51], Denemarken, UK [22,24], Noorwegen, Denemarken en Zweden [11] geen (wettelijke) richtlijnen voor de invloed van trillingen op gebouwen. De inhoud van de bovengenoemde documenten is gestructureerd samengevat. Hierbij is aandacht besteed aan de volgende aspecten:

- toepassingsgebied van het document;
- frequentiebereik van de beschouwde trillingen;
- classificatie van trillingen (incidenteel, continue, periodiek etc.)
- classificatie van gebouwen (type gebouw, hoofdconstructie etc.)
- classificatie van fundatie en/of funderingsgrondslag;
- omschrijving van de schade, die bij gebruik van de grenswaarden nog zou kunnen optreden. Onderscheid in directe en indirecte schade;
- bevat het document een prognose-methode ten einde het risico van schade vooraf te kunnen inschatten;
- bevat het document aanwijzingen omtrent welke grootheden waar gemeten moeten worden, voorwaarden te stellen aan meetapparatuur en interpretatie en dergelijke;
- welke beoordelingsgrondslag voor trillingen wordt gehanteerd;
- welke procedure (incl. aan te houden grenswaarden) wordt bij de beoordeling van de toelaatbaarheid van trillingen gevolgd.

5.2 Normen, richtlijnen en publicaties Nederland

document:

"GRENZEN VOOR DYNAMISCHE BEWEGINGEN"

auteurs of uitgever:

H. van Koten [5]

status:

TNO rapport (BI-67-107)

versie/datum:

1967

inhoud:

Beoordeling van de invloed van trillingen op gebouwen en op mensen

toepassingsgebied:

(o.a.) bouwwerken

frequenties:

1 ... 100 Hz

classificatie trillingen:

De aard van de trillingen is niet gespecificeerd.

classificatie bouwwerk:

De bouwwerken zijn niet expliciet geclassificeerd ten aanzien van het constructief draagsysteem en toegepaste materialen.

classificatie fundatie:

Het type fundatie en de fundatie-grondslag is niet gespecificeerd.

schade:

Het type schade is gedefinieerd in termen van 'inleiding scheurvorming in metselwerk' e.d. Hiermee is alleen directe schade ten gevolge van trillingen bedoeld.

prognose-methode:

Het document bevat geen prognose- of berekeningsmethode

meetmethode:

Het document bevat geen specificatie van een meetmethode of een referentie van te volgen meetprocedures.

beoordelingsgrondslag:

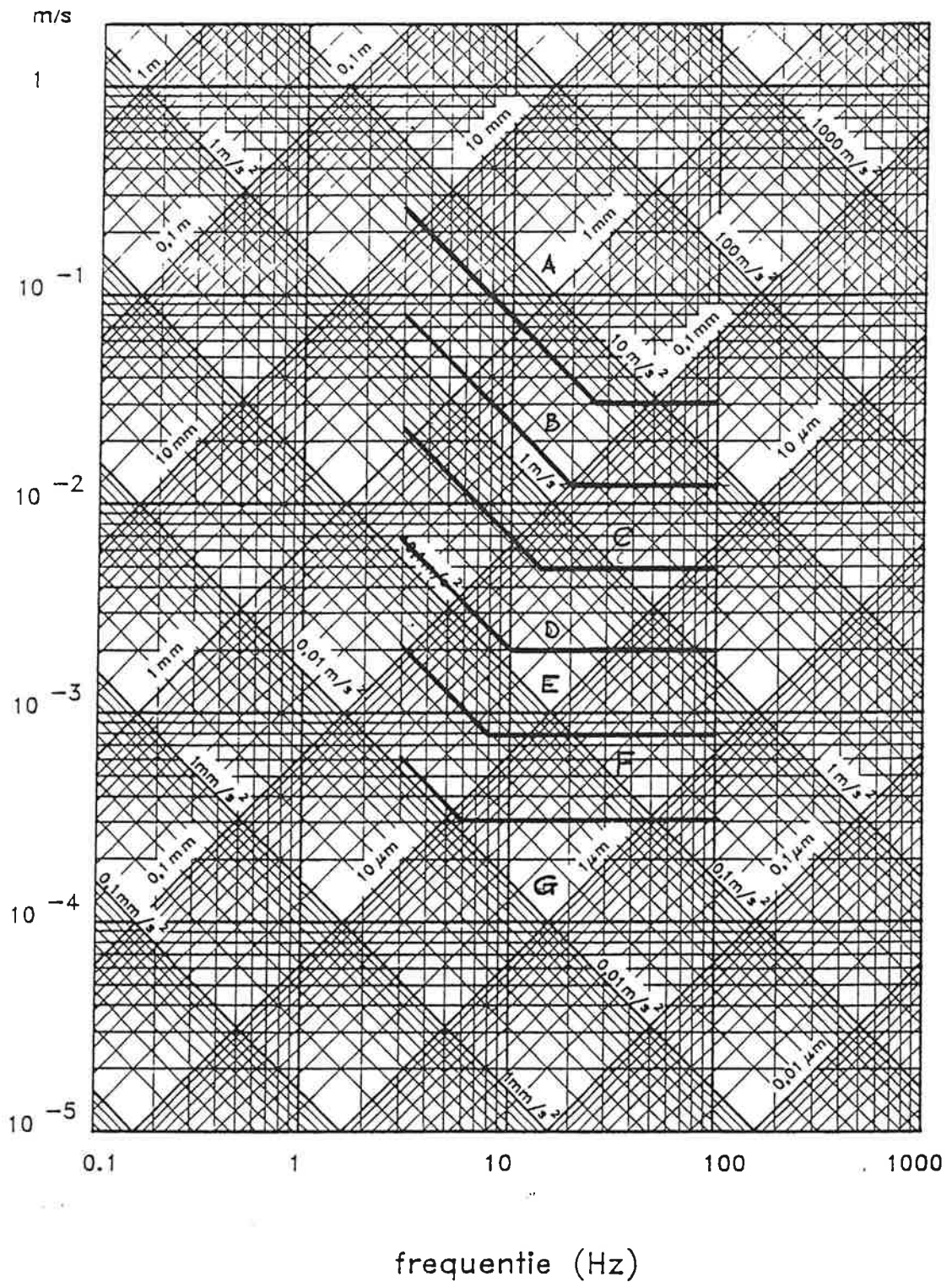
De grootste topwaarde van een trillingsgrootte (versnelling, snelheid of verplaatsing) in combinatie met de dominante frequentie.

Opmerking: niet gespecificeerd is welke componenten van de trilling dienen te zijn beoordeeld (horizontaal, vertikaal of resultante)

beoordelingsprocedure:

De beoordelingsgrondslag definieert een punt in een grafiek. Het veld van de grafiek is ingedeeld in een 7 klassen, begrensd door lijnen van gelijke versnelling of snelheid. De toelaatbaarheid van het trillingsverschijnsel is bepaald door de ligging van het punt in een van de klassen. In kwalitatieve zin is per klasse de toelaatbaarheid in verband met schade aan gebouwen aangegeven.

Figuur 5.1: Nomogram met grenslijnen TNO rapport BI-67-107.



document:

"TRILLINGEN IN DE BOUW; EEN OVERZICHT VAN DE PROBLEMEN"

auteurs of uitgever:

P.J. van Brederode, J. van Zoest [6]

status:

publicatie in PT/Civiele Techniek 1985 (40) 2

inhoud:

de publicatie bevat achtergrond-informatie over gevallen waarin trillingen eens schadelijke invloed kunnen hebben op bouwwerken. Een aanduiding wordt gegeven van te hanteren grenswaarden voor de trillingsterkte

toepassingsgebied:

Bouwwerken

frequenties:

1 ... 100 Hz

classificatie trillingen:

De aard van de trillingen is niet gespecificeerd. In het artikel wordt onder meer melding gemaakt van trillingen door verkeer.

classificatie bouwwerk:

Onderscheid wordt gemaakt in 'normale gebouwen' en 'kwetsbare gebouwen', zonder een duidelijke definitie van deze begrippen.

classificatie fundatie:

Het type fundatie en de funderingsgrondslag zijn niet gespecificeerd.

schade:

Onderscheid is gemaakt tussen directe trillingsschade en indirecte schade door zettingen. Door middel van een rekenregel is indirecte schade gerelateerd aan een toelaatbare trillingsterkte

prognose-methode:

De publicatie bevat geen berekeningsmethode voor de trillingsterkte. Wel bevat zij een rekenregel, zoals hiervoor genoemd voor het relateren van indirecte schade aan een toelaatbare trillingsterkte.

meetmethode:

Er is geen meetmethode gespecificeerd en evenmin is gerefereerd aan een te volgen meetprocedure.

beoordelingsgrondslag:

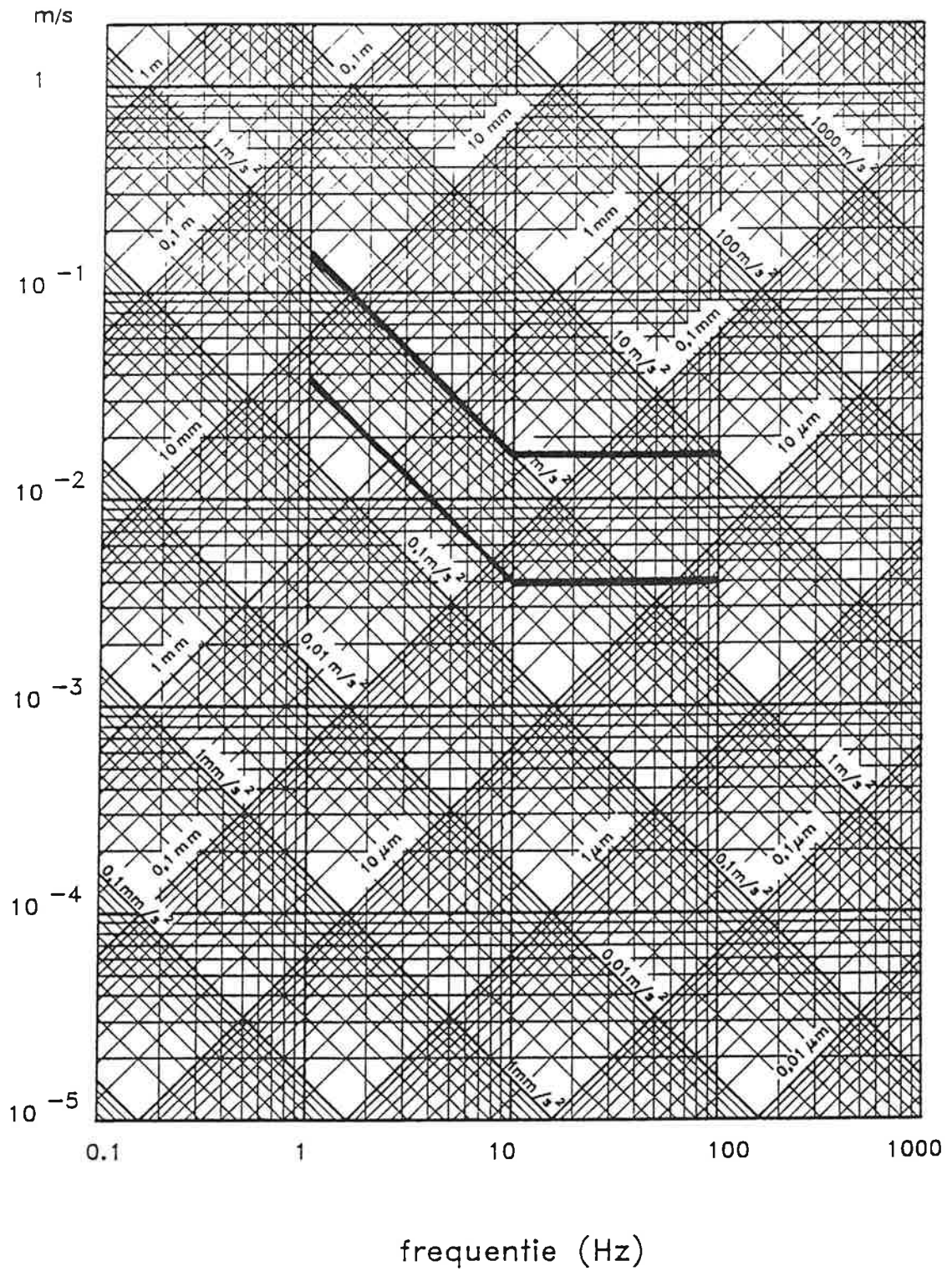
De grootste topwaarde van een trillingsgrootheid (versnelling, snelheid of verplaatsing) in combinatie met de dominante frequentie.

Opmerking: niet gespecificeerd is welke componenten van de trilling dienen te zijn beoordeeld (horizontaal, vertikaal of resultante)

beoordelingsprocedure:

De beoordelingsgrondslag definieert een punt in een grafiek. Het veld van de grafiek is door middel van twee grenslijnen verdeeld, bestaande uit lijnen van gelijke versnelling of snelheid. De grenslijnen zijn gerelateerd aan 'normale gebouwen' en aan 'kwetsbare gebouwen'. De toelaatbaarheid van het trillingsverschijnsel is bepaald door de ligging van het punt ten opzichte van de grenslijnen. Voor frequenties groter dan 10 Hz komen deze grenswaarden neer op 16 resp. 4 mm/s voor de onderscheiden grenslijnen.

Figuur 5.2: Nomogram met de criteria volgens Van Brederode en Van Zoest [6]



document:

"DYNAMISCHE PROBLEMEN IN DE BOUW"

auteurs of uitgever:

Stichting CUR [7]

status:

CUR rapport 57

versie/datum:

december 1972

inhoud:

het rapport gaat in op de modellering van dynamische belastingen op bouwwerken en verschaft daarover de nodige achtergrond-informatie en rekenregels, alsmede een beoordeling van de invloed van de dynamische responsie van bouwconstructies, welke is ontleend aan TNO rapport BI-67- 107. De criteria stemmen volledig met dit rapport overeen. Verwezen zij naar de bespreking van genoemd rapport.

document:

"INVLOED VERKEERSTRILLINGEN OP GEBOUWEN"

auteurs of uitgever:

P.J. van Brederode et al. [4]

status:

TNO rapport (B-87-501 en B-87-502)

[Ook verschenen als VROM publicatie GF-DR-05-01/GR-HR-05-02]

versie/datum:

1987

inhoud:

Beoordeling van de invloed van trillingen door verkeer op gebouwen

toepassingsgebied:

(o.a.) bouwwerken

frequenties:

1 ... 100 Hz

classificatie trillingen:

Het document gaat in op trillingen veroorzaakt door verkeer.

classificatie bouwwerk:

Onderscheid wordt gemaakt in 'normale gebouwen' en 'kwetsbare gebouwen', zonder een duidelijke definitie van deze begrippen.

classificatie fundatie:

Het type fundatie en de funderingsgrondslag zijn niet gespecificeerd.

schade:

Het document behandelt uitsluitend directe trillingsschade. Van vermoeiingsaspecten en van indirecte schade door trillingen wordt gewag gemaakt.

prognose-methode:

Het document bevat geen berekeningsmethode voor de trillingsterkte.

meetmethode:

In het rapport is in globale zin aangegeven op welke wijze gemeten dient te worden ten einde de optredende trillingen aan de grenswaarden te toetsen.

beoordelingsgrondslag:

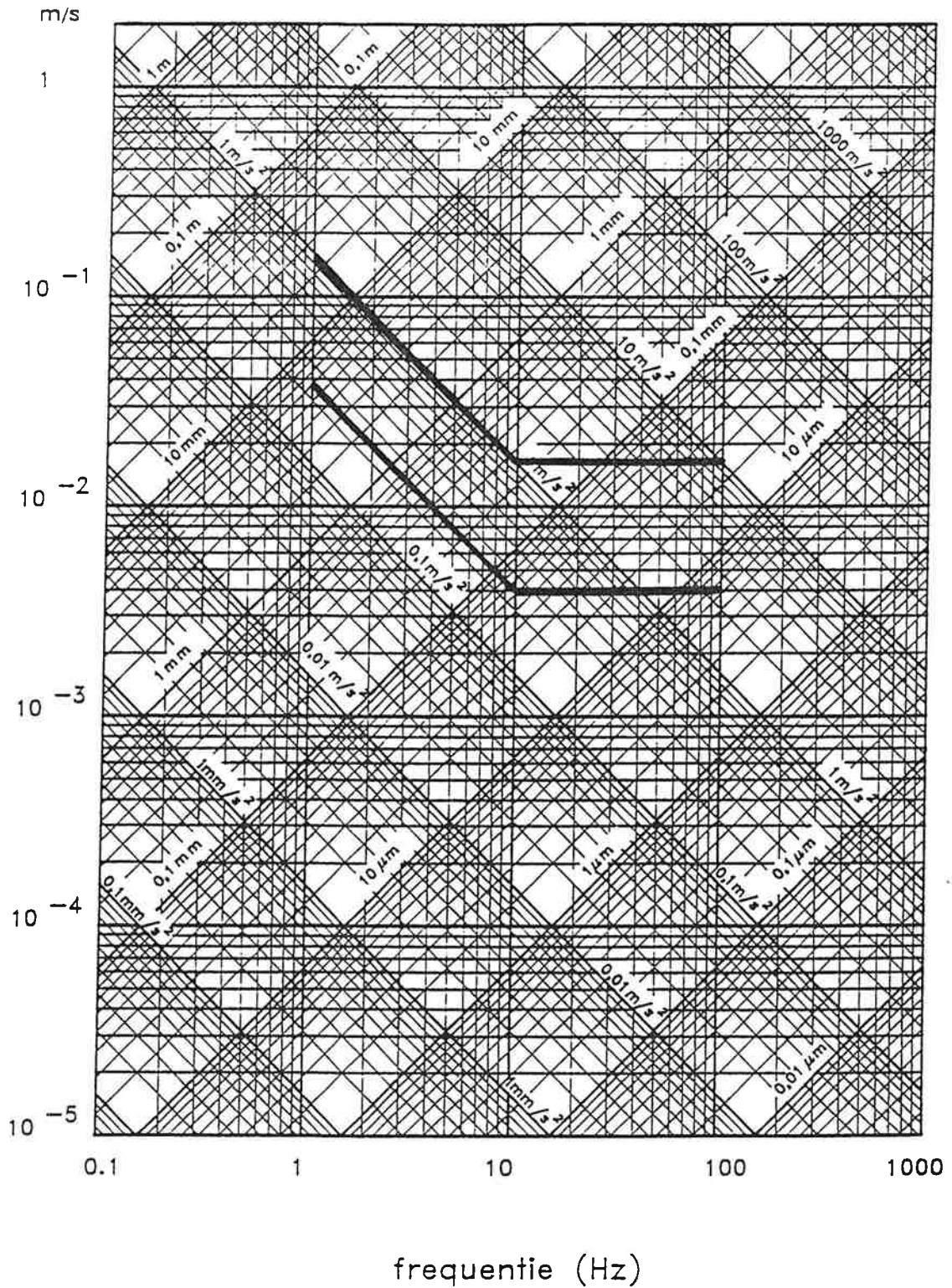
De grootste topwaarde van een trillingsgrootte (versnelling, snelheid of verplaatsing) in combinatie met de dominante frequentie.

Opmerking: welke componenten van de trilling dienen te zijn beoordeeld (horizontaal, vertikaal of resultante) is niet expliciet aangegeven.

beoordelingsprocedure:

De beoordelingsgrondslag definieert een punt in een grafiek. Het veld van de grafiek is door middel van twee grenslijnen verdeeld, bestaande uit lijnen van gelijke versnelling of snelheid. De grenslijnen zijn gerelateerd aan 'normale gebouwen' en aan 'kwetsbare gebouwen'. De toelaatbaarheid van het trillingsverschijnsel is bepaald door de ligging van het punt ten opzichte van de grenslijnen. De grenswaarden stemmen overeen met die, gepresenteerd in het hiervoor besproken artikel van Van Brederode en Van Zoest (voor frequenties groter dan 10 Hz resp. 16 mm/s en 4 mm/s).

Figuur 5.3: Nomogram met criteria volgens van Brederode et al. [4]



document:

"TOELAATBARE BEWEGINGEN VOOR MENSEN EN GEBOUWEN"

auteurs of uitgever:

H. van Koten, T.K. Muller, A.F. van Weele [9]

status:

verschenen in PT Civiele Techniek, februari 1990.

versie/datum:

1990

inhoud:

Beoordeling van de invloed van trillingen op gebouwen en mensen

toepassingsgebied:

(o.a.) bouwwerken

frequenties:

1 ... 100 Hz

classificatie trillingen:

Het document gaat in op trillingen veroorzaakt door diverse bronnen

classificatie bouwwerk:

Er wordt geen expliciet onderscheid gemaakt in het type gebouw. De behandeling van trillingsverschijnselen vindt plaats op het niveau van elementen van het bouwwerk (muren, kolommen e.d.).

classificatie fundatie:

Het type fundatie en de funderingsgrondslag zijn niet gespecificeerd.

schade:

Het document behandelt uitsluitend directe trillingsschade. Vermoeiingsaspecten en van indirecte schade door trillingen komen niet aan de orde.

prognose-methode:

Het document bevat geen berekeningsmethode voor de trillingsterkte.

meetmethode:

In het document is niet aangegeven hoe gemeten moet worden ten einde de optredende trillingen aan de grenswaarden te toetsen.

beoordelingsgrondslag:

De grootste topwaarde van een trillingsgrootheid (versnelling, snelheid of verplaatsing) in combinatie met de dominante frequentie.

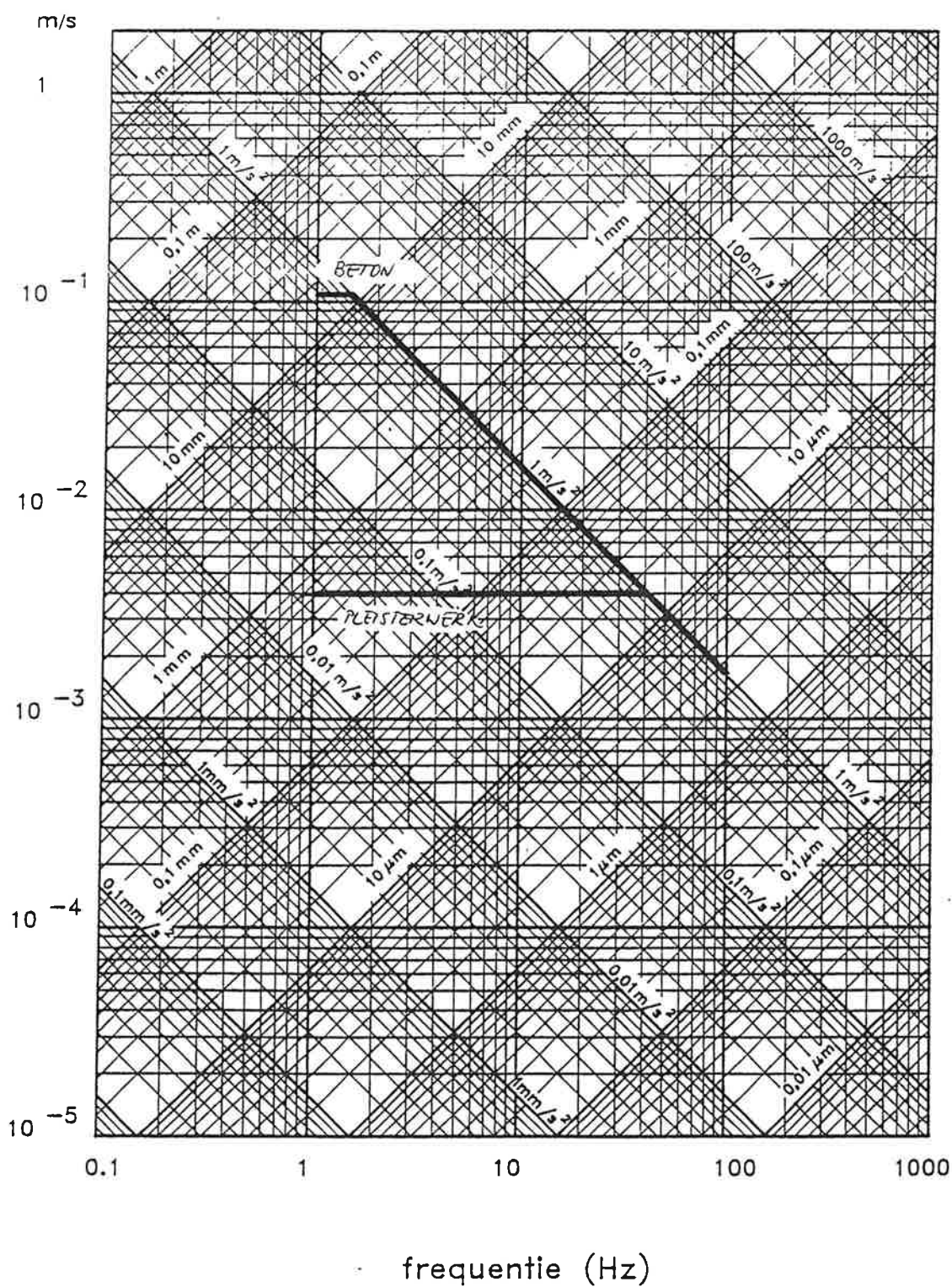
Opmerking: welke componenten van de trilling dienen te zijn beoordeeld (horizontaal, vertikaal of resultante) is niet expliciet aangegeven.

beoordelingsprocedure:

De beoordelingsgrondslag definieert een punt in een grafiek. Het veld van de grafiek is door middel van een grenslijnen verdeeld in een toelaatbaar en een ontoelaatbaar gebied. De toelaatbaarheid van het trillingsverschijnsel is bepaald door de ligging van het punt ten opzichte van de grenslijn. Voor hoge frequenties is een constante versnelling (topwaarde 0,1 g) het criterium, voor lage frequenties is een constante snelheid het criterium. De waarde van de snelheid hangt af van de eigenschappen van het beschouwde onderdeel van het bouwwerk.

Opmerking: Deze combinatie van grenslijnen wijkt af van de eerder behandelde referenties. De begrenzing van de versnelling bij hoge frequenties is gemotiveerd uit het voorkomen van schade aan de inventaris van gebouwen, zoals bijvoorbeeld het schuiven van serviesgoed.

Figuur 5.4: Nomogram met criteria volgens Van Koten et al. [9]



document:

"HET UITVOEREN VAN TRILLINGSMETINGEN TIJDENS HEIWERKZAAMHEDEN VOOR DE BEOORDELING VAN SCHADE AAN GEBOUWEN"

auteurs of uitgever:

P.C. van Staalduinen [10]

status:

TNO rapport BI-90-154

versie/datum:

1990

inhoud:

Beoordeling van de invloed van trillingen tijdens heiwerkzaamheden op gebouwen

toepassingsgebied:

(o.a.) bouwwerken

frequenties:

1 ... 100 Hz

classificatie trillingen:

Het document gaat in op trillingen veroorzaakt door hei- of trilwerkzaamheden.

classificatie bouwwerk:

Onderscheid wordt gemaakt in de volgende klassen gebouwen:

- 1a) Gebouwen en bouwwerken met een hoofddraagconstructie bestaande uit een beton- staal- of houtconstructies. Indien de scheidingsconstructies bestaan uit niet-gewapend beton, metselwerk of steenachtige materialen dient voor de scheidingsconstructies te worden uitgegaan van categorie 2.

De gebouwen en bouwwerken zijn gefundeerd op palen, op staal op of een grondverbetering, waarbij de fundatie bestaat uit een gewapend betonconstructie.

- 1b) Gebouwen en bouwwerken als onder 1a), waarbij de fundatie bestaat uit niet gewapend beton of metselwerk. Bouwwerken bestaande uit metselwerk (pijlers van viaducten, kademuren etc.), gefundeerd op palen, op staal of op grondverbetering waarbij de fundatie bestaat uit metselwerk of uit niet-gewapend beton.
- 2) Gebouwen met geïntegreerde hoofddraagconstructie en afbouwconstructie bestaande uit metselwerk.vScheidingsconstructies in metselwerk of steenachtige materialen in gebouwen, die behoren tot categorie 1.
- 3) Gebouwen van historische waarde of grote ouderdom uit categorie 1b) en 2) en gebouwen in slechte bouwkundige staat.

classificatie fundatie:

Het type fundatie is hiervoor in beschouwing genomen. De funderingsgrondslag is niet gespecificeerd.

schade:

Het document behandelt uitsluitend directe trillingsschade. Van vermoeiingsaspecten en van indirecte schade door trillingen wordt gewag gemaakt.

prognose-methode:

Het document bevat geen berekeningsmethode voor de trillingsterkte.

meetmethode:

In het rapport is gedetailleerd aangegeven op welke wijze (plaats en richting) gemeten dient te worden ten einde de optredende trillingen aan de grenswaarden te toetsen.

beoordelingsgrondslag:

De grootste topwaarde van een trillingsgrootheid (versnelling, snelheid of verplaatsing) in combinatie met de dominante frequentie.

Opmerking: welke componenten van de trilling dienen te zijn beoordeeld (horizontaal, vertikaal of resultante) is niet expliciet aangegeven.

beoordelingsprocedure:

De beoordelingsgrondslag definieert een punt in een grafiek. Deze grafiek is reeds behandeld in CUR rapport 57 en TNO rapport BI-67-107.

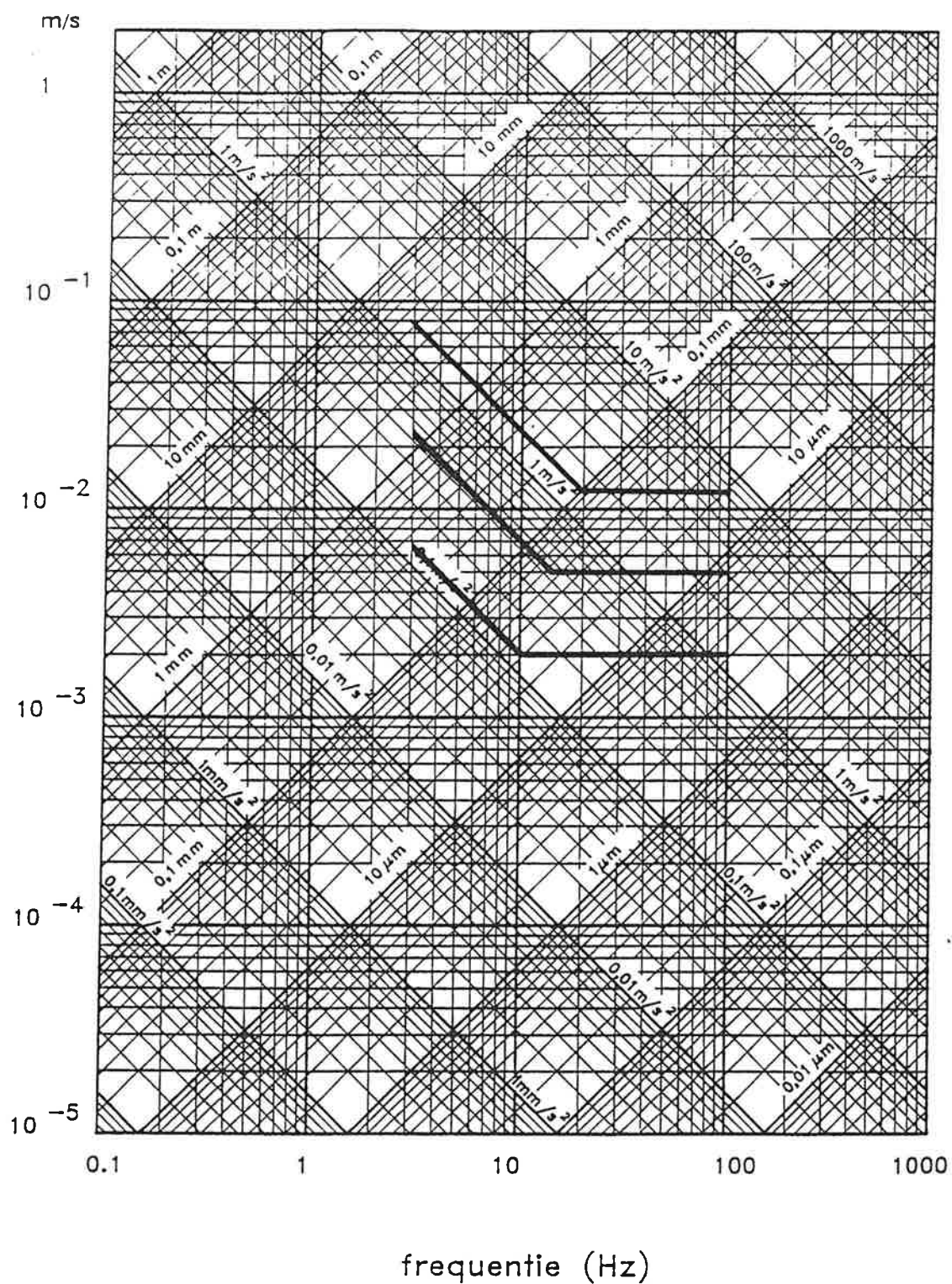
De grenswaarden bestaan uit een constante versnelling voor lage frequenties en uit een constante snelheid voor hoge frequenties. Als **veilige** grenzen zijn aangegeven:

categorie 1a en 1b 12,5 mm/s of 1,5 m/s² (C,D,E,F,G toelaatbaar)

categorie 2 5 mm/s of 0.45 m/s² (D,E,F,G toelaatbaar)

categorie 3 2 mm/s of 0.13 m/s² (E,F,G toelaatbaar)

Figuur 5.5: Nomogram met criteria volgens Van Staalduinen [10]



5.3 Normen, richtlijnen en publicaties buitenland

document:

"ERSCHÜTTERUNGEN IM BAUWESEN: EINWIRKUNGEN AUF BAULICHE ANLAGEN"

auteurs of uitgever:

Deutsches Institut für Normung, Berlin (Normenausschuss Bauwesen) [26]

status:

Duitse norm DIN 4150 Teil 3

versie/datum:

mei 1986

inhoud:

Beoordeling van de invloed van trillingen op gebouwen

toepassingsgebied:

bouwwerken

frequenties:

0 ... 100 Hz

classificatie trillingen:

onderscheid is gemaakt in kortdurende trillingen (welke geen vermoeiingseffecten teweeg zullen brengen) en stationaire trillingen. Er is geen onderscheid in harmonisch, periodiek, random, impuls en dergelijke.

classificatie bouwwerk:

De bouwwerken zijn onderverdeeld in de volgende klassen:

- bedrijfs- en industriegebouwen en gelijksoortige bouwwerken

- woongebouwen en bouwwerken van gelijksoortige constructie of met gelijksoortig gebruiksdoel;
- gebouwen, die door hun trillingsgevoeligheid niet in de voorgaande klassen kunnen worden ingedeeld en bovendien een bijzonder karakter hebben (bijv. monumenten)

classificatie fundatie:

Het type fundatie en de fundatie-grondslag is niet gespecificeerd.

schade:

De schade is gekarakteriseerd als schade die tot een vermindering van de gebruikswaarde van het bouwwerk leidt. Dit is ten eerste schade die stabiliteit of sterkte van een bouwwerk nadelig beïnvloed, maar ook bijvoorbeeld bedoeld scheuren in pleisterwerk, vergroting van bestaande scheuren en dergelijke meer cosmetische schade. De norm behandelt uitsluitend directe trillingsschade. Indirecte schade door zetting is expliciet uitgesloten.

prognose-methode:

Het document bevat geen prognose- of berekeningsmethode. Wel bevat de norm een formule, waarmee op basis van gemeten topwaarden van de trillingsnelheid bij stationaire trillingen de spanning in een onderdeel van het bouwwerk dat op buiging wordt belast kan worden berekend.

Opmerking: in een herziene versie van DIN 4150 Teil 1 zal een dergelijke oriënterende berekeningsmethode worden opgenomen.

meetmethode:

Het document bevat een aanduiding van de meetplaatsen, meetrichtingen en te meten grootheden, alsmede een referentie naar voorwaarden waaraan de meetapparatuur moet voldoen (DIN 45669 Teil 1).

beoordelingsgrondslag:

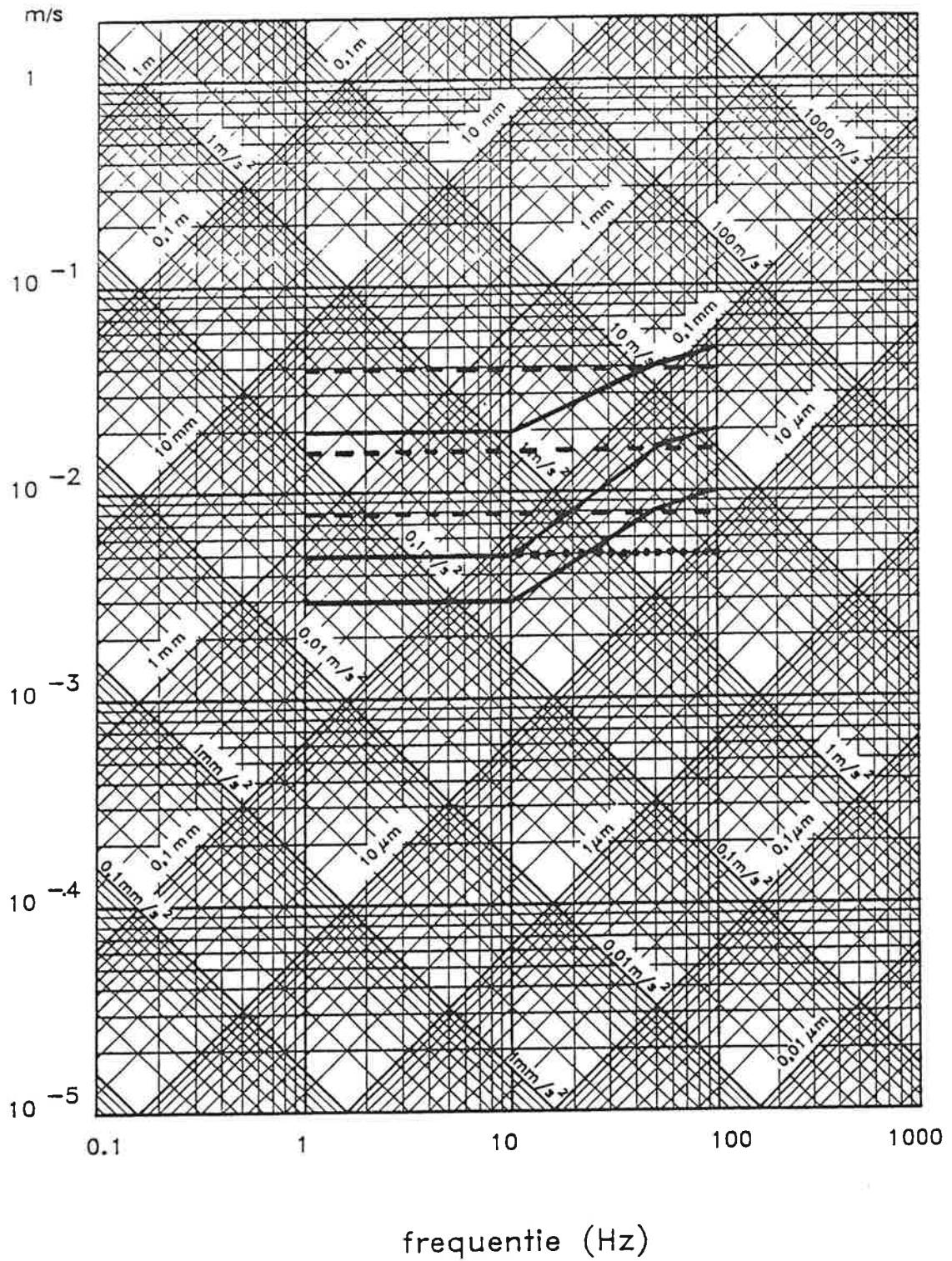
De grootste topwaarde van de trillingsgrootheid (versnelling, snelheid of verplaatsing) in combinatie met de dominante frequentie.

Aangegeven is dat op de fundatie in drie orthogonale richtingen gemeten moet worden en op de bovenste verdieping in twee horizontale richtingen. Aangehouden dient te worden de grootste waarde van de drie trillingscomponenten (vertikaal, horizontaal1 en horizontaal2). Aanvullend moet in het midden van vloervelden in verticale richting gemeten worden.

beoordelingsprocedure:

- 1) kortdurende trillingen: De beoordelingsgrondslag definieert een punt in een grafiek. In de grafiek zijn drie grenslijnen aangegeven, welke in relatie staan tot de aangegeven bouwwerkklassen. De grenswaarden zijn frequentie-afhankelijk. Trillingen zijn toelaatbaar indien zij, op de fundatie gemeten, onder de betreffende grenslijn liggen. Trillingen van vloervelden zijn toelaatbaar indien de topwaarde van de snelheid kleiner is dan 20 mm/s. De topwaarde van de trilling van de bovenste verdieping in horizontale richting dient kleiner te zijn dan resp. 8, 15 en 40 mm/s, afhankelijk van de klasse waartoe het bouwwerk behoort.
- 2) Voor stationaire trillingen voor onderdelen van bouwwerken zoals vloeren geldt als grens 10 mm/s; als grens voor bouwwerken als geheel geldt 5 mm/s in horizontale richting op bovenste verdieping. De meetpunten worden gekozen zoals hiervoor aangegeven.

Figuur 5.6: Criteria volgens DIN 4150 deel 3 (1986) [26]



document:

"BAUWERKERSCHÜTTUNGEN – SPRENGERSCHÜTTUNGEN UND VERGLEICHBARE IMPULSFÖRMIGE IMMISIONEN"

auteurs of uitgever:

Österreichisches Normungsinstitut, Wien (Fachnormenausschuss 170 Schwingungen)
[27]

status:

Oostenrijkse norm (Önorm) S 9020

versie/datum:

1 augustus 1986

inhoud:

Beoordeling van de invloed van trillingen ten gevolge van explosies op gebouwen

toepassingsgebied:

bouwwerken

frequenties:

2 ... 100 Hz (uitzonderingsgevallen: 2 - 250 Hz)

classificatie trillingen:

de norm heeft alleen betrekking op kortdurende, pulsachtige trillingen ten gevolge van explosies of ten gevolge van heiwerkzaamheden.

classificatie bouwwerk:

De bouwwerken zijn onderverdeeld in de volgende klassen:

1. Bedrijfs- en industriegebouwen:
 - . hoofddraagconstructie als raamwerk met een stijve kern, bestaande uit

- staal of gewapend beton;
 - . hoofddraagconstructie gebaseerd op schijfvormige onderdelen, bestaande uit ter plaatse gestort of prefab beton;
 - . hoofddraagconstructies bestaande uit hout ('engineered')
2. woongebouwen met een hoofddraagconstructie zoals hiervoor of bestaande uit metselwerk met vloeren uit ter plaatse gestort beton. Woongebouwen met een hoofddraagconstructie bestaande uit hout, uitzonderd vakwerkgebouwen, waar hout en metselwerk samenwerkt.
 3. Vakwerkgebouwen (hout/metselwerk), gebouwen met houten of prefab vloeren.
 4. Beschermden monumenten

classificatie fundatie:

Er wordt onderscheid gemaakt in de fundatie-grondslag. Criterium daarbij is de voortplantingsnelheid van compressie-golven door de bodem. De grenswaarden zijn afhankelijk van deze grootte. Het type fundatie is verder niet gespecificeerd.

schade:

De norm geeft niet expliciet aan welk type en in welke mate schade bij het aanhouden van de voorgeschreven procedures en grenswaarden niet zal optreden. Gelet op de aangegeven procedures is de norm van toepassing op directe schade.

prognose-methode:

Het document bevat geen prognose-methode voor de bepaling van de trillingsterkte.

meetmethode:

Het document bevat een aanduiding van de meetplaatsen, meetrichtingen en te meten grootheden.

beoordelingsgrondslag:

De grootste topwaarde van de trillingssnelheid in combinatie met de dominante frequentie.

De meetplaatsen en meetrichtingen hangen af van de gevolgde beoordelingsprocedure (zie hieronder).

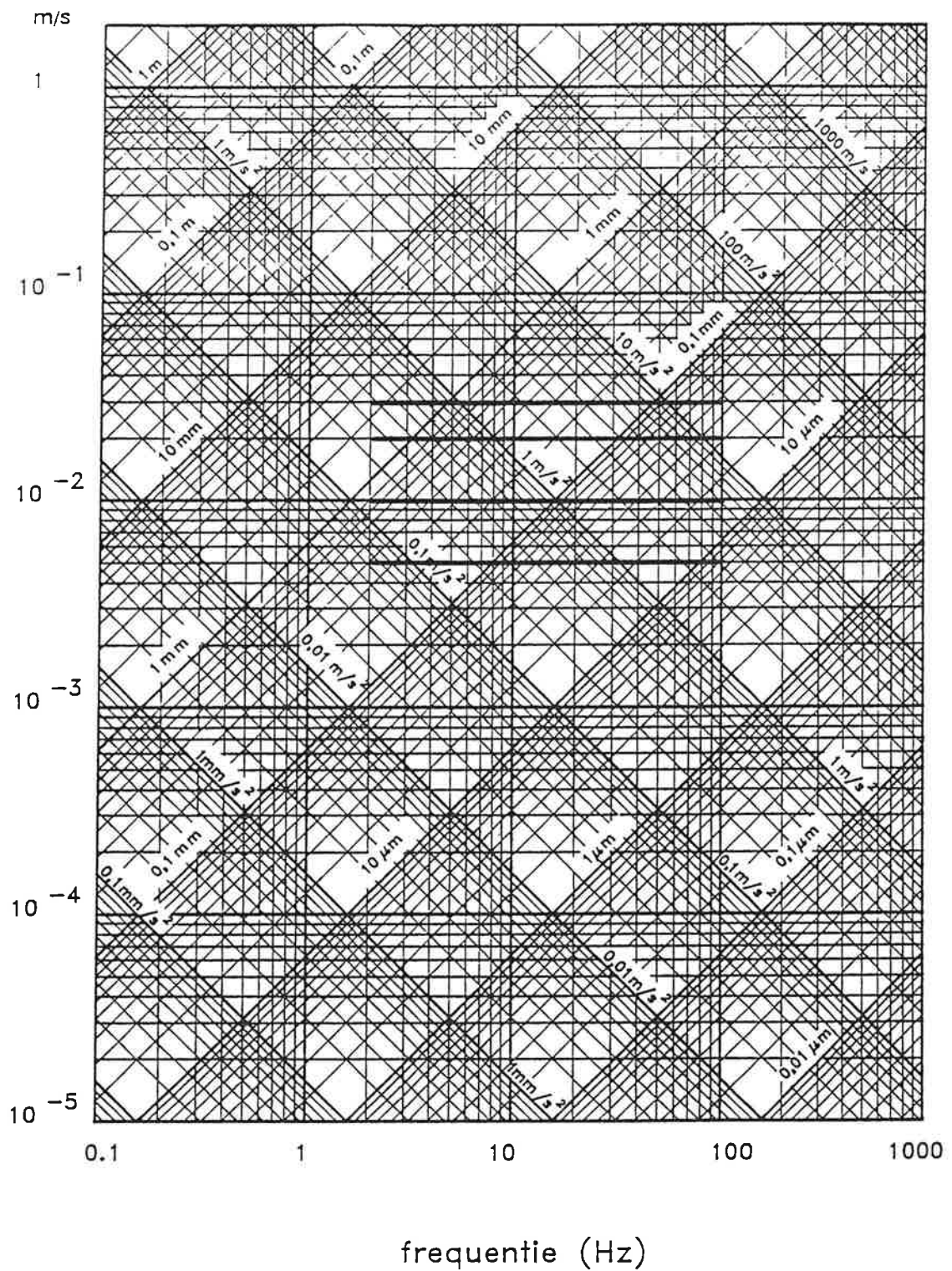
beoordelingsprocedure:

De norm kent vier verschillende beoordelingsprocedures, volgens het principe van grof naar fijn.

- 1) Beoordeling door middel van een lading/afstands-relatie. De norm geeft in een grafiek aan bij welke combinaties van lading en afstand de topwaarden naar verwachting kleiner zullen zijn dan 2,5 mm/s. Metingen zijn niet nodig.
- 2) Beoordeling door middel van trillingsmetingen. Gemeten dienen te worden de drie trillingscomponenten op een punt van de fundatie. Hieruit wordt de grootste waarde van de resultante bepaald. Een eenvoudige procedure is hiervoor in de norm gegeven. Afhankelijk van de gebouwklasse geldt als grenswaarde 30, 20, 10 en 5 mm/s. Ter voorkoming van scheuren in pleisterwerk e.d. dienen de waarden te worden gereduceerd met 0,7. Scheurvorming in metselwerk zal nog voorkomen worden bij een verhoging van de genoemde grenzen met een factor 1,2.
- 3) Beoordeling door middel van trillingsmeting met aanvullend geotechnisch onderzoek. In aanvulling op de onder 2) genoemde procedure wordt de voortplantingsnelheid van P-golven in de bodem bepaald. Indien deze groter is dan 500 m/s kunnen de hiervoor genoemde grenzen worden verhoogd.
- 4) Bepaling van de dynamische responsie van een gebouw en beoordeling van de dynamische spanningstoestand. Rekenkundige analyses dienen vooraf te worden uitgevoerd, waarbij de responsie van het gebouw ten gevolge van de dynamische belasting wordt bepaald. Invoer gegevens (materiaalgrootheden,

eigenfrequenties etc.) kunnen uit orienterende metingen worden bepaald. Geotechnische gegevens worden verzameld of gemeten (o.a. voortplantingsnelheid van P-golven). De analyses leiden tot een toelaatbare responsie van het gebouw. Het overschrijden hiervan dient door middel van trillingsmetingen op gespecificeerde punten van het gebouw te worden bewaakt.

Figuur 5.7: Nomogram met criteria volgens ÖNORM S 9020 [27]



document:

"ERSCHÜTTERUNGSEINWIRKUNGEN AUF BAUWERKE"

auteurs of uitgever:

Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich; VSS Kommission 3,
Ober- und Unterbau [28]

status:

Zwitserse norm SN 640 312.

versie/datum:

1979

inhoud:

Beoordeling van de invloed van trillingen op gebouwen

toepassingsgebied:

bouwwerken

frequenties:

2 ... 300 Hz

classificatie trillingen:

onderscheid is gemaakt in trillingen ten gevolge van explosies, waarbij nauwelijks resonantie effecten een rol zullen spelen, en trillingen ten gevolge van verkeer, machines en bouwwerkzaamheden.

Er is geen onderscheid in harmonisch, periodiek, random, impuls en dergelijke.

classificatie bouwwerk:

'De bouwwerken zijn onderverdeeld in de volgende klassen:

1. bedrijfs- en industriegebouwen uit staal of gewapend beton, keermuren, bruggen, masten, pijpleidingen (bovengronds), betonnen tunnels e.d.
2. gebouwen met betonnen fundamenteën en vloeren en opgaand metselwerk. Tunnels e.d. uit metselwerk. Ondergrondse pijpleidingen.
3. gebouwen met betonnen fundamenteën en opgaand metselwerk, met houten vloeren.
4. gebouwen die bijzonder trillingsgevoelig zijn of bijzonder waarde hebben.

De bouwkundige staat en de ouderdom van het gebouw moet worden beschouwd, als gevolg waarvan een gebouw een klasse lager kan worden ingedeeld.

classificatie fundatie:

Het type fundatie en de fundatie-grondslag is niet expliciet gespecificeerd, maar is volgens de normtekst in de grenswaarden meegenomen.

schade:

De schade is gekarakteriseerd als schade die een vermindering van de gebruikswaarde van het bouwwerk leidt. Schade zoals het loslaten van (reeds loszittend) pleisterwerk valt hier niet onder. Bij het aanhouden van de gestelde grenswaarden zal slechts bij uitzondering lichte schade (loslaten van pleisterwerk e.d.) optreden. De norm behandelt uitsluitend directe trillingsschade. Indirecte schade door zetting is expliciet uitgesloten.

prognose-methode:

Het document bevat geen prognose- of berekeningsmethode.

meetmethode:

Het document bevat een globale aanduiding van de meetplaatsen, meetrichtingen, te meten grootheden en voorwaarden waaraan de meetapparatuur moet voldoen.

beoordelingsgrondslag:

De grootste topwaarde van de trillingsgrootheid (versnelling, snelheid of verplaatsing) in combinatie met de dominante frequentie.

beoordelingsprocedure:

Afhankelijk van de gebouwklasse en het type trillingsbron zijn grenswaarden als functie van de frequentie aangegeven. De toelaatbare trillingsnelheid is voor lage frequenties constant.

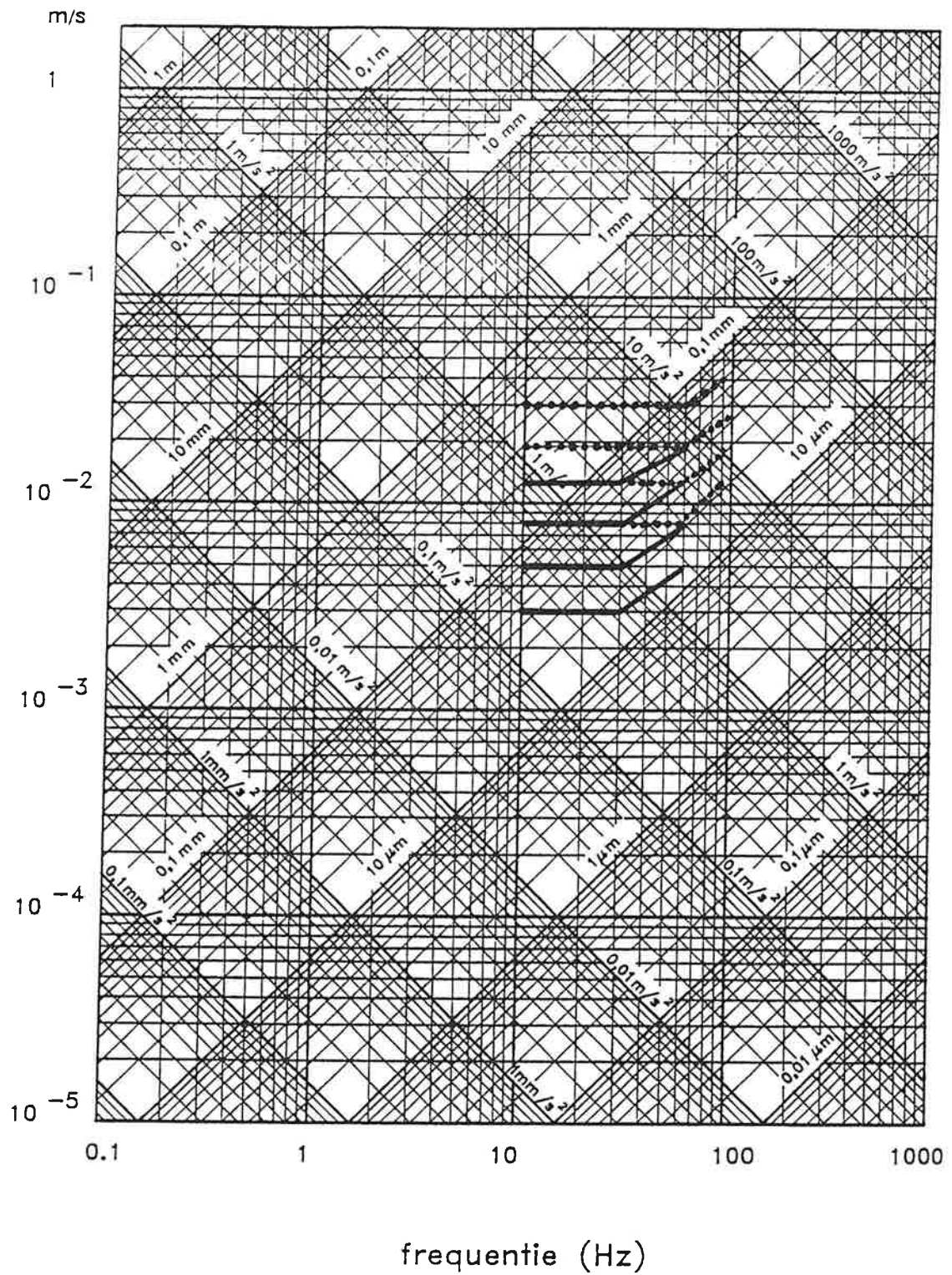
Trillingen door machines, verkeer, bouwwerkzaamheden:

frequenties:	10 ... 30 Hz	30 ... 60 Hz
klasse 1	12 mm/s	12 ... 18 mm/s
klasse 2	8 mm/s	8 ... 12 mm/s
klasse 3	5 mm/s	5 ... 8 mm/s
klasse 4	3 mm/s	3 ... 5 mm/s

Trillingen door explosies:

frequenties:	10 ... 60 Hz	60 ... 90 Hz
klasse 1	30 mm/s	30 ... 40 mm/s
klasse 2	18 mm/s	18 ... 25 mm/s
klasse 3	12 mm/s	12 ... 18 mm/s
klasse 4	8 mm/s	8 ... 12 mm/s

Figuur 5.8: Nomogram met criteria volgens de Zwitserse norm SN 640 312 [28]



document:

"MECHANICAL VIBRATION AND SHOCK – MEASUREMENT AND EVALUATION OF VIBRATION EFFECTS ON BUILDINGS – GUIDELINES FOR THE USE OF BASIS STANDARD METHODS"

auteurs of uitgever:

International Organizations for Standardization ISO (ISO TC 108) [23]

status:

NEN-ISO 4866

versie/datum:

1990

inhoud:

Meet- en classificatiemethoden voor de beoordeling van de invloed van trillingen op gebouwen (Engelstalige versie)

toepassingsgebied:

bouwwerken (m.u.v. kerncentrales, fabrieken, dammen, tanks, silos en dergelijke)

frequenties:

0,1 ... 500 Hz

classificatie trillingen:

onderscheid is gemaakt in continue trillingen en transiente trillingsverschijnselen.

Er is ten behoeve van de signaalverwerking onderscheid in deterministische trillingen en random trillingen.

classificatie bouwwerk:

De volgende aspecten van het bouwwerk dienen te worden beschouwd:

- aard en staat van het gebouw
- dynamische eigenschappen (eigenfrequentie en demping)
- afmetingen van het gebouw
- interactie met funderingsgrondslag
- zettingsgevoeligheid funderingsgrondslag

De bouwwerken worden op basis van aard en staat onderverdeeld in 15 klassen. Hieraan is een bijlage van het document gewijd.

classificatie fundatie:

Het type fundatie wordt geclassificeerd, alsmede de fundatie-grondslag.

schade:

De schade is gekarakteriseerd als schade die een vermindering van de gebruikswaarde van het bouwwerk leidt. Schade zoals het loslaten van (reeds loszittend) pleisterwerk valt hier niet onder. Bij het aanhouden van de gestelde grenswaarden zal slechts bij uitzondering lichte schade (loslaten van pleisterwerk e.d.) optreden. De norm behandelt uitsluitend directe trillingsschade. Indirecte schade door zetting is expliciet uitgesloten.

prognose-methode:

Het document bevat geen prognose- of berekeningsmethode.

meetmethode:

Het document bevat een globale aanduiding van de meetplaatsen, meetrichtingen en de te meten grootheden. Verder wordt zeer globaal ingegaan op de mogelijkheden van verwerking van de meetresultaten

beoordelingsgrondslag:

De grootste topwaarde van de trillingsgrootte (versnelling, snelheid of

verplaatsing).

beoordelingsprocedure:

Afhankelijk van de gebouwklasse, de fundatieklasse en de klasse van de funderingsgrondslag komt een bouwwerk in een van de 12 categorieën, die de mate van trillingsgevoeligheid aangeven. Aan elke categorie kunnen grenswaarden worden gekoppeld, maar dat is niet nader uitgewerkt.

Opmerking: de gevolgde methodiek is ontleend aan [24].

document:

"REGLEMENTATION RELATIVE AUX VIBRATIONS MECANIQUES EMISES DANS L'ENVIRONNEMENT
PAR LES INSTALLATIONS CLASSEES POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT"

auteurs of uitgever:

Ministere charge de l'environnement (Frankrijk)
Direction de la prevention des pollutions; service de l'environnement industriel.
[25]

status:

Wettelijk voorschrift (Frankrijk)

versie/datum:

circulaire 23 van 23 juli 1986

inhoud:

Meet- en classificatiemethoden voor de beoordeling van de invloed van trillingen
op gebouwen (Franstalige versie)

toepassingsgebied:

bouwwerken (m.u.v. kerncentrales, fabrieken, tunnels, dammen, tanks, silos en
dergelijke)

frequenties:

4 ... 100 Hz

classificatie trillingen:

onderscheid is gemaakt in continue trillingen en transiente
trillingsverschijnselen.

classificatie bouwwerk:

De bouwwerken worden op basis van aard en staat onderverdeeld in 15 klassen (zie ook ISO 4866). In een tabel zijn voorbeelden gegeven, hetgeen de indeling vereenvoudigd.

classificatie fundatie:

Het type fundatie wordt onderverdeeld in 3 klassen en de fundatie- grondslag in 6 klassen.

schade:

Onderscheid wordt gemaakt in direct en indirecte schade ten gevolge van trillingen. Schade kan zijn scheurvorming, zetting etc.

prognose-methode:

Het document bevat geen prognose- of berekeningsmethode.

meetmethode:

Het document bevat een aanduiding van de meetplaatsen, meetrichtingen en de te meten grootheden, een en ander in relatie tot de afmetingen en aard van een bouwwerk.

beoordelingsgrondslag:

De grootste topwaarde van een der componenten van de trillingsnelheid in combinatie met de (dominante) frequentie en de duur van het verschijnsel.

beoordelingsprocedure:

Afhankelijk van de gebouwklasse, de fundatieklasse en de klasse van de funderingsgrondslag komt een bouwwerk in een van de 13 categorieën, die de mate van trillingsgevoeligheid aangeven. Deze categorieën zijn weer samengevoegd tot 3 klassen, waarvoor onderstaande grenswaarden zijn gedefinieerd.

Aparte grenswaarden zijn gegeven voor continue en impulsachtige trillingen.

Continue trillingen

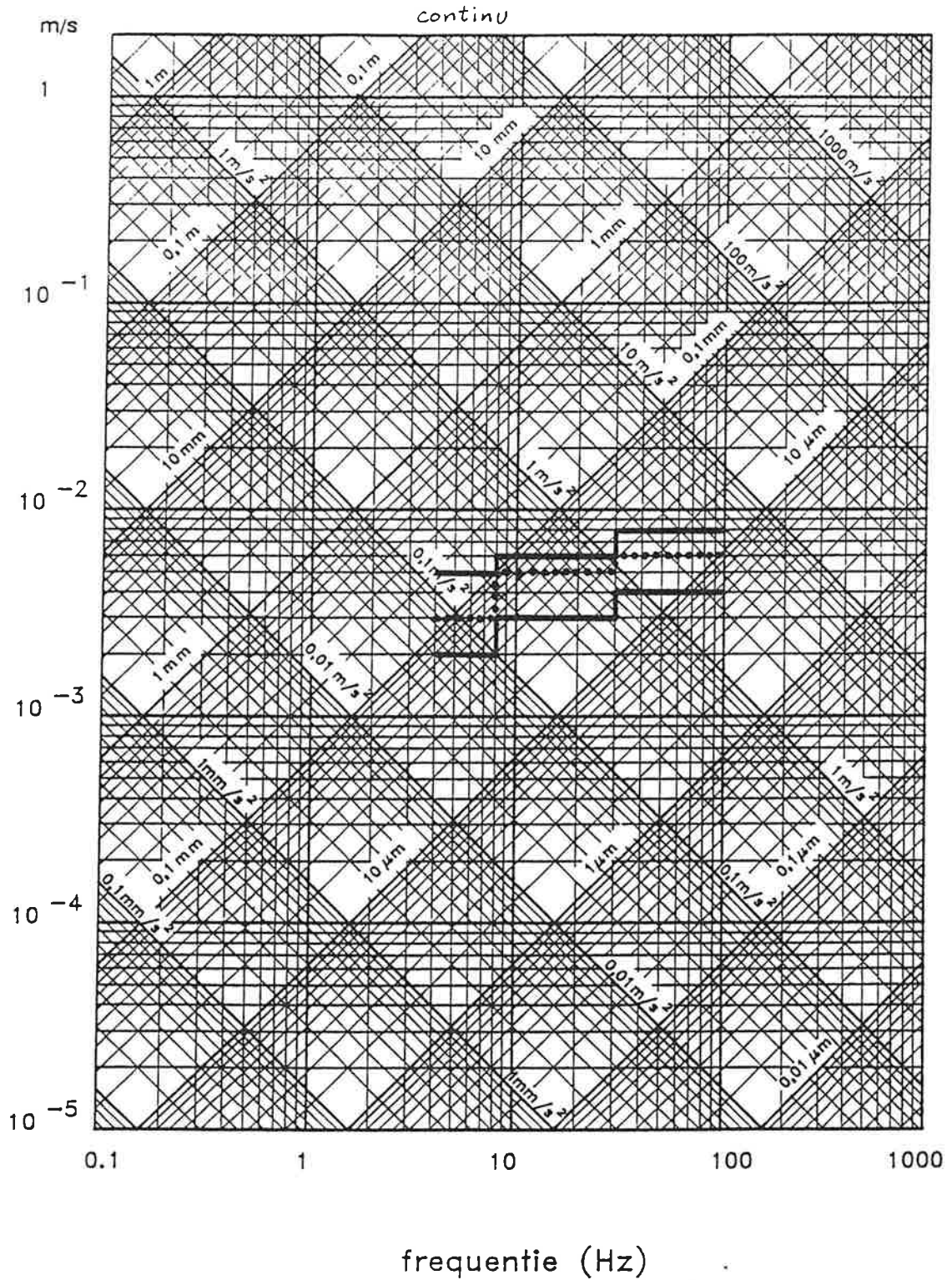
frequentie	4 ... 8 Hz	8 ... 30 Hz	30 ... 100 Hz
klasse I	5 mm/s	6 mm/s	8 mm/s
klasse II	3 mm/s	5 mm/s	6 mm/s
klasse III	2 mm/s	3 mm/s	4 mm/s

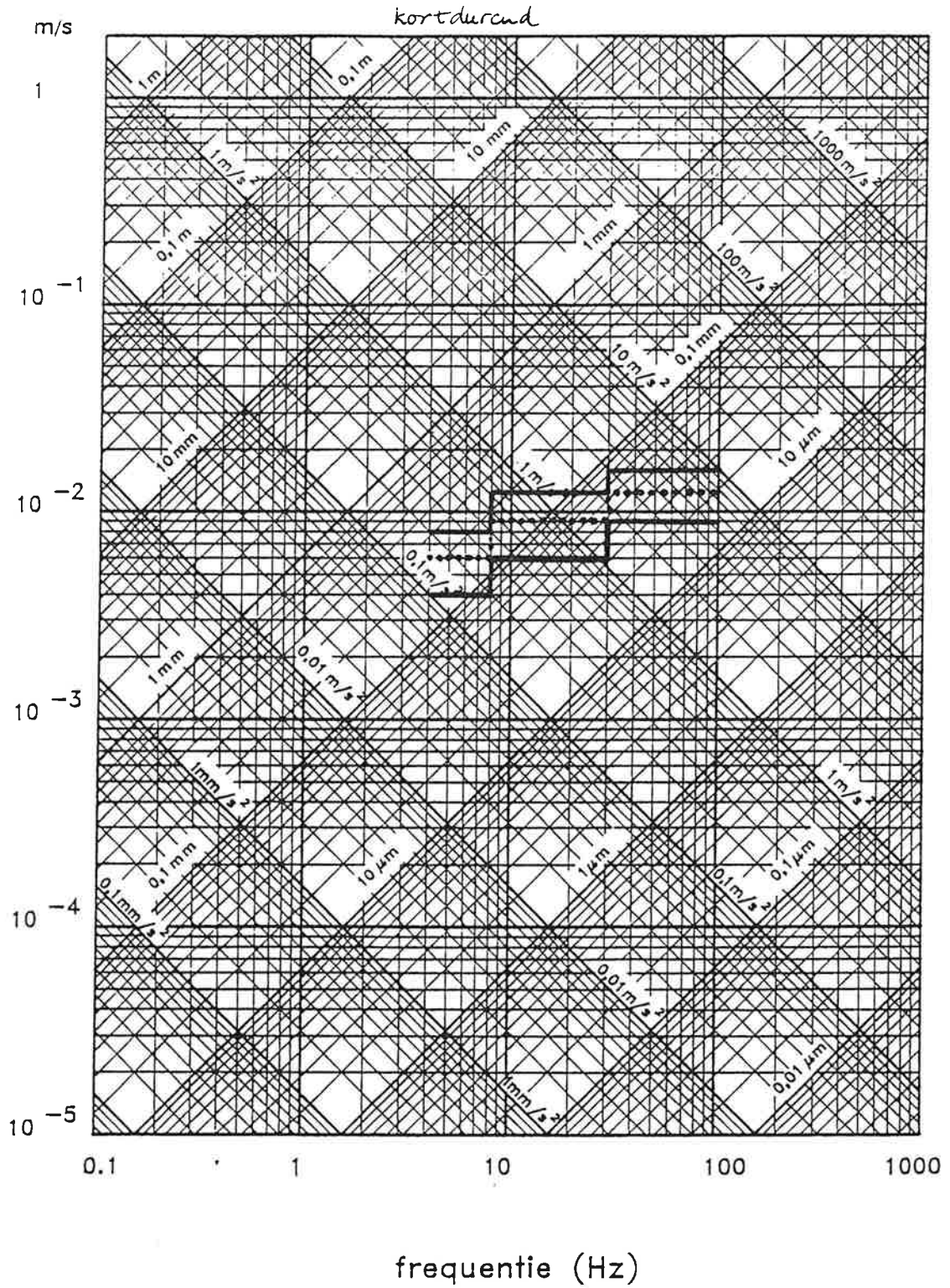
(Opmerking: bij frequenties groter dan 100 Hz kunnen hogere waarden worden toegelaten)

Impulsachtige trillingen

frequentie	4 ... 8 Hz	8 ... 30 Hz	30 ... 100 Hz
klasse I	8 mm/s	12 mm/s	15 mm/s
klasse II	6 mm/s	9 mm/s	12 mm/s
klasse III	4 mm/s	6 mm/s	9 mm/s

Figuur 5.9: Nomogram met criteria volgens de Franse Reglementation [25]





5.4 Conclusies naar aanleiding van de inventarisatie

5.4.1 Nederlandse literatuur

De Nederlandse documenten die zijn bestudeerd hebben gemeen dat zij hun basis vinden in het TNO rapport BI-67-107. Er zijn echter in de loop der tijd diverse varianten voorgesteld, onder meer door Van Brederode en Van Zoest (1985) en Van Brederode et al. (1987) en door Van Koten et al. (1989) en Van Koten (1990). Met name in de geotechnische praktijk (heitrillingen) wordt bij de beoordeling van de invloed van trillingen op gebouwen vaak gewerkt met de oorspronkelijke grenswaarden uit rapport BI-67-107 of met de identieke grafiek uit CUR 57.

Opvallend in alle documenten is dat de wijze waarop de metingen moeten plaatsvinden, de meetrichting en de meetposities niet duidelijk zijn aangegeven. Er is sprake van criteria zonder een vastomlijnde meetprocedure.

Verder wordt de constructie-wijze, de staat van een gebouw en de fundatie en het type trillingsbron niet systematisch in beschouwing genomen. De publicaties bieden daardoor de mogelijkheid te kiezen uit verschillende grenswaarden. In hoofdstuk 4 is hierop reeds ingegaan. De keuze zal in de praktijk wel op een min of meer rationele manier tot stand komen, maar dit biedt op zich weinig duidelijkheid. In [10] is een duidelijker procedure voor het kiezen van de grenswaarden voorgesteld.

Mede gelet op de opgedane praktijkervaring zijn de Nederlandse referenties belangrijk voor het niveau van de grenswaarden. Ten aanzien van procedures, classificatie en dergelijke bieden ze echter weinig houvast.

5.4.2 Buitenlandse documenten

DIN 4150 Teil 3:

De Duitse norm is ingebed in een complete normstructuur, welke tevens algemene basisgegevens (DIN 4150 Teil 1) en voorwaarden voor meetapparatuur (DIN 45669 Teil 1 + Teil 2) bevat. DIN 4150 is internationaal zeer bekend en wordt ook in Nederland toegepast als beoordelingsgrondslag.

Over de inhoud van DIN 4150 deel 3 kan worden opgemerkt dat meetposities in relatie tot te hanteren grenswaarden duidelijk zijn gespecificeerd. Minder duidelijk is echter het onderscheid dat in de norm wordt gemaakt tussen kortdurende trillingsverschijnselen en stationaire trillingen. Met name is de classificatie van trillingen door heiwerkzaamheden niet duidelijk. Te verwachten is dat hiervoor kritischer waarden te hanteren zijn dan voor trillingen ten gevolge van zelden voorkomende explosies.

In DIN 4150 Teil 3 is een overgang gecreëerd van kortdurende trillingen bij hoge frequenties (met relatief hoge toelaatbare waarden voor de trillingssnelheid) en kortdurende trillingen bij lage frequenties (met toelaatbare waarden, die liggen op het niveau van de Nederlandse praktijk). Hiermee is aansluiting verkregen op grenswaarden, die speciaal voor explosief in steenachtige bodem gehanteerd worden.

Het onderscheid tussen kortdurende en continue trillingen heeft zijn weerslag gevonden in de aan de houden grenswaarden. De norm kent een klasse-indeling van gebouwen; bij de indeling van gebouwen in deze klassen wordt geen aandacht besteed aan de funderingsgrondslag. Schade in de vorm van zettingen zijn als mogelijk effect van trillingen zelfs expliciet uitgesloten in de norm.

De in DIN 4150 deel 3 gehanteerde grenswaarden worden internationaal als

conservatief beschouwd. Bij globale vergelijking met TNO BI-67-107 of CUR 57 blijken de grenswaarden van DIN 4150 deel 3 in het algemeen iets hoger.

Concluderend kan worden gesteld dat DIN 4150 deel 3 qua opzet en systematiek een bruikbare invulling geeft van een beoordelingsvoorschrift. Daarnaast vormt de internationale bekendheid van de norm en het feit dat de gegeven grenswaarden niet sterk afwijken van de in Nederland gevolgde praktijk een belangrijk gegeven.

Oostenrijkse norm ÖNORM S 9020:

Een beperking van de norm is dat deze alleen bedoeld is voor impulsachtige trillingsbronnen, zoals explosies en heiwerkzaamheden. Dit toepassingsgebied is voor het doel van deze studie te beperkt. Opmerkelijk is voorts dat het herhaald karakter van de trillingen tijdens heiwerkzaamheden niet in de grenswaarden is verwerkt.

In de norm wordt consequent een werkwijze gevolgd, die te karakteriseren is als 'werken van grof naar fijn'. Een eenvoudige verificatie van optredende trillingen is toegestaan, waarbij dan conservatievere grenswaarden moeten worden gehanteerd.

NEN-ISO 4866

De internationale norm 4866 is in 1990 door de NNI normcommissie 'Trillingen en schok' als Nederlandse norm geaccepteerd. Deze status van de norm betekent dat de hierin gevolgde werkwijze voor de beoordeling van de invloed van trillingen op gebouwen van belangrijk gewicht moet zijn bij het opstellen van een beoordelingsrichtlijn.

In de huidige vorm is NEN-ISO 4866 echter te zeer een 'reference document' om in de praktijk toegepast te worden. Een groot aantal abstracte stukken zou uit het document moeten worden weggelaten. Bovendien zal concrete informatie t.a.v. grenswaarden moeten worden toegevoegd. De classificatie van gebouwen, fundatietype en funderingsgrondslag dient aan de Nederlandse omstandigheden te worden aangepast. Als belangrijk bezwaar geldt hier dat de procedure tot indeling van een gebouw in een van de 14 categorieën als te gecompliceerd wordt beschouwd en bovendien een schijn van nauwkeurigheid wekt, die niet past bij de "nauwkeurigheid" van de aan te houden grenswaarden.

Concluderend kunnen we stellen dat de op te stellen beoordelingsrichtlijn met NEN-ISO 4866 in overeenstemming moet zijn voor wat betreft de beoordelingsprocedure, maar er zal naar een vereenvoudiging ten opzichte van NEN-ISO 4866 gestreefd moeten worden.

Franse Reglementation

De opzet van deze norm verschilt niet veel van NEN-ISO 4866: de algemene structuur van ISO 4866 is concreet ingevuld. De hiervoor genoemde positieve en negatieve aspecten van NEN-ISO 4866 zijn ook op de Franse Reglementation van toepassing.

De invulling leidt bovendien tot grenswaarden die iets kritischer zijn dan in de Nederlandse praktijk gebruikelijk. De huidige praktijk- ervaring in Nederland noodzaakt, voor zover nu te overzien, niet tot een verscherping van de eisen.

De conclusie omtrent de Franse Reglementation stemt verder overeen met de conclusies gegeven bij NEN-ISO 4866.

Zwitserse norm SN 604 312

De inhoud van de norm verschilt inhoudelijk niet veel van DIN 4150. Er zijn nuance-verschillen waar het de classificatie van gebouwen betreft.

5.4.4 Algemene conclusies

Uit de bestudeerde normen en publicaties blijkt een grote verscheidenheid. Als belangrijkste elementen van belang voor een op te stellen beoordelingsrichtlijn zijn naar voren gekomen:

- 1) De te volgen aanpak en systematiek zou moeten overeenstemmen met NEN-ISO 4866 en DIN 4150 deel 3
- 2) Een vereenvoudiging ten opzichte van NEN-ISO 4866 en de Franse Reglementation voor wat betreft de classificatie van gebouwen is gewenst.
- 3) De grenswaarden uit de bestudeerde publicaties en normen verschillen op aspecten. Zij zijn daardoor niet altijd onderling vergelijkbaar. Mede naar aanleiding van hoofdstuk 4 kan worden gesteld dat grenswaarden van het niveau van DIN 4150 deel 3 en van huidige Nederlandse praktijk elkaar niet veel ontlopen en als voldoende veilig gekenmerkt kunnen worden. We benadrukken nogmaals dat het werkelijke veiligheidsniveau niet gekwantificeerd kan worden.

6. AANBEVELINGEN VOOR DE INHOUD VAN EEN BEOORDELINGS-RICHTLIJN

In dit hoofdstuk zijn naar aanleiding van de informatie uit de hoofdstukken 4 en 5 een aantal randvoorwaarden geformuleerd, die bij het opstellen van Nederlandse grenswaarden met betrekking tot trillingschade aan gebouwen van belang zijn.

1) randvoorwaarden t.a.v. de nu gangbare praktijk:

De manier waarop meetsignalen geïnterpreteerd en beoordeeld worden mag niet sterk afwijken van de nu gangbare praktijk. Uit de voorgaande hoofdstukken is niet gebleken dat hierin duidelijke tekortkomingen zijn.

Dit leidt tot de volgende randvoorwaarden:

a) interpretatie van meetsignalen

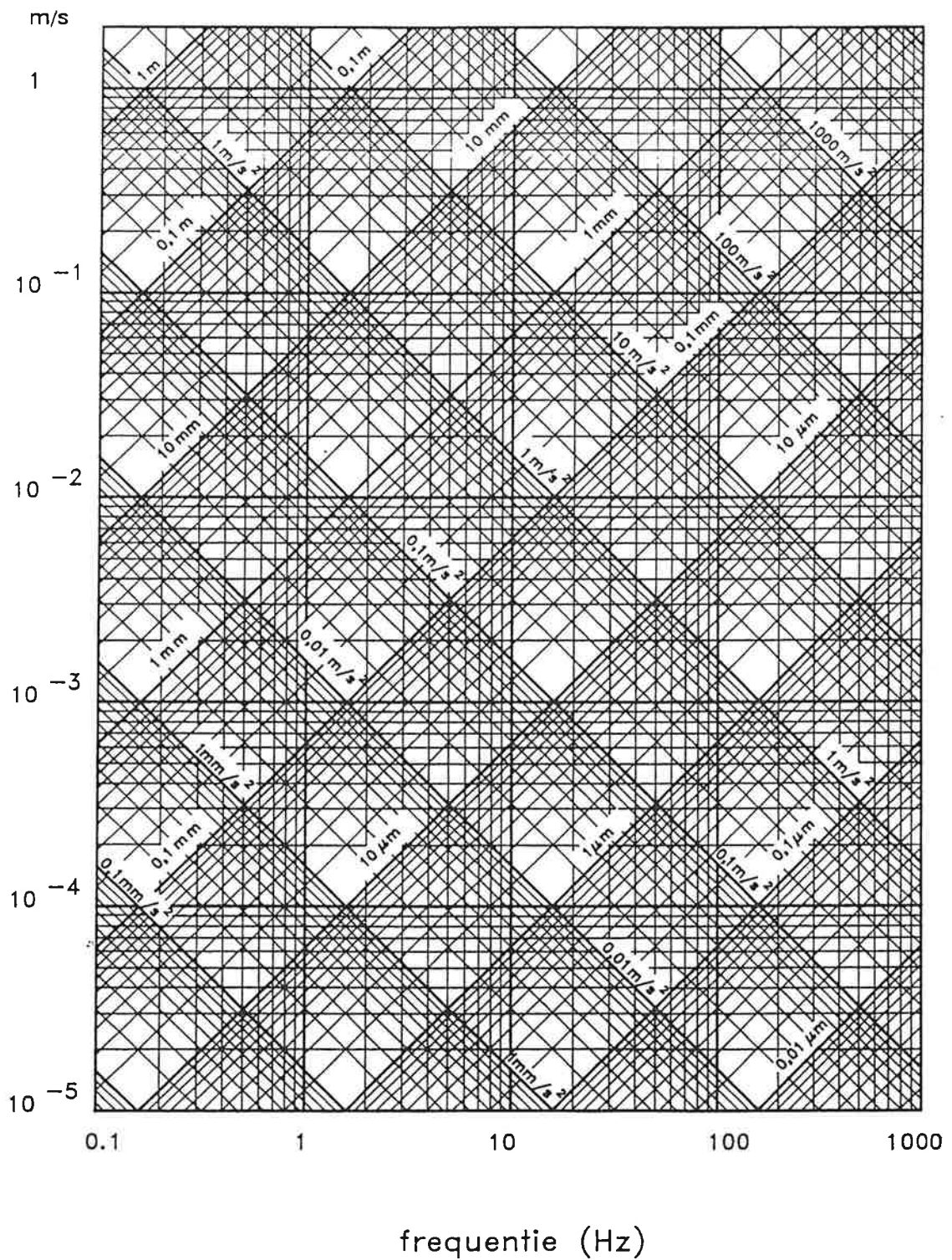
Voor de beoordeling van de invloed van trillingen op gebouwen verdient een analyse van de meetsignalen in het tijdsdomein de voorkeur. De reden hiervoor is dat eenmalige piekwaarden tot een overschrijding van de sterkte van (met name brosse) bouwmaterialen kunnen leiden. Analyse van de trillingen in het frequentie-domein geeft onvoldoende inzicht in deze piekwaarden. Trillingen dienen daarom te worden gekarakteriseerd door een topwaarde of amplitude, en door een dominante frequentie. De topwaarde geeft de maximale afwijking van de gemiddelde waarde aan; de dominante frequentie geeft het aantal wisselingen per seconde, ten tijde van het optreden van de topwaarde.

b) format en niveau van de grenswaarden

Gezien de gestelde criteria voor rechtstreekse schade heeft het formuleren van grenswaarden voor de trillingsnelheid in een grafiek als functie van de dominante frequentie de voorkeur. Daarmee wordt aansluiting verkregen op de in de Nederlandse praktijk veel gebruikte grafiek uit CUR rapport 57/TNO rapport BI-67-

107, alsmede op de presentatie-wijze uit DIN 4150 deel 3 (1986). Gezien het brede bereik van de mogelijke meetwaarden is een logaritmische schaal zowel voor de verticale as als voor de horizontale as wenselijk. Figuur 6.1 geeft een mogelijke basis-grafiek weer.

Figuur 6.1: Basisgrafiek voor het weergeven van de trillingsintensiteit



Verder dient rekening te worden gehouden met nationaal en/of internationaal gebruikte richtlijnen en normen, zoals CUR 57 en DIN 4150 Teil 3 (1986). Volgens de huidige praktijk-ervaring zijn de grenswaarden die hieraan kunnen worden ontleend aan de veilige kant, in die zin dat geen gevallen van directe schade bekend zijn indien aan deze richtlijnen werd voldaan. Men zie hiervoor hoofdstuk 3 en 4.

2) randvoorwaarden t.a.v. type gebouw en fundatie:

De te introduceren grenswaarden dienen, in navolging van bijvoorbeeld DIN 4150 deel 3 (1986) te worden gedifferentieerd naar het type gebouw. Gezien de mogelijkheid van indirecte schade verdient het de voorkeur ook onderscheid te maken in het type fundering en ook de funderingsgrondslag hierin te betrekken. Daarnaast is ook de huidige staat van het gebouw sterk van invloed op de capaciteit om trillingen zonder schade op te nemen. Onderstaand zijn deze aspecten nader uitgewerkt.

a) Type gebouw en onderdelen

Gebouwen en onderdelen daarvan worden ingedeeld in drie categorieën. Meer categorieën zou de beoordeling van de trillingen naar onze mening te gecompliceerd maken en zou bovendien geen recht doen aan de onzekerheden, die bij het opstellen van de grenswaarden een rol spelen. Bij het opstellen van de indeling in gebouwtypen is gebruik gemaakt van TNO rapport BI-90-154, van de Duitse norm DIN 4150 deel 3 en de Oostenrijkse norm S 9020.

categorie 1:

1. Gebouwen en bouwwerken met een hoofddraagconstructie van gewapend beton, staal of hout. Indien scheidingsconstructies en funderingselementen bestaan uit niet-gewapend beton, metselwerk of steenachtige materialen dient alleen voor deze elementen te worden uitgegaan van categorie 2.

(Voor scheidingsconstructies uit andere materialen, zoals hout en kunststof is geen indeling in een categorie gedefinieerd, aangezien deze elementen zeer sterk kunnen trillen zonder schade op te lopen, vanwege een gunstige verhouding tussen de treksterkte, de elasticiteitsmodulus en de dichtheid van het materiaal.)

2. Bouwwerken, niet zijnde gebouwen, bestaande uit metselwerk

categorie 2:

1. Gebouwen, waarvan zowel de hoofddraagconstructie en afbouwconstructie zijn uitgevoerd in metselwerk en waarbij de dragende en afbouwfunctie is geïntegreerd.
2. Scheidingsconstructies in niet-gewapend beton, metselwerk of (brosse) steenachtige materialen in gebouwen die behoren tot categorie 1 of 2.

categorie 3:

1. Monumentale gebouwen en overige gebouwen met een grote historische waarde;
2. Gebouwen of onderdelen daarvan, die verkeren in een slechte bouwkundige staat.

Het begrip 'slechte bouwkundige staat' blijkt moeilijk te definiëren. In de praktijk wordt hieronder verstaan dat het gebouw zichtbaar aan incasseringsvermogen tegen een additionele belasting door trillingen heeft ingeboet. Een slechte bouwkundige staat kenmerkt zich bijvoorbeeld door scheurvorming in metselwerk op plaatsen die ten aanzien van sterkte en stabiliteit van de hoofddraagconstructie van belang zijn en in losgeraakte verbindingen (denk bijvoorbeeld aan muurankers). Ook zichtbare schade, die gelet op de plaats en aard van de schade eenvoudig zal uitbreiden indien een gebouw aan trillingen wordt blootgesteld, kan het oordeel slechte bouwkundige staat noodzakelijk maken.

Type fundering

Een fundering bestaat uit de funderingselementen (oplegconstructie, poeren, funderingsbalken, platen, palen) en uit grond rondom de funderingselementen. De funderingselementen worden voor de indeling in gebouwcategorieën tot het gebouw gerekend. Van belang is de wijze waarop de kracht naar de ondergrond wordt afgedragen. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt in funderingen op staal en funderingen op palen. Voor de beoordeling van de mogelijke schadelijke invloed van trillingen is echter alleen de kans op het optreden van indirecte schade van belang (zie paragraaf 3.3.3). Derhalve is de indeling beperkt tot twee categorieën: trillingsgevoelige en niet-trillingsgevoelige funderingen.

funderingstype 1: trillingsgevoelige funderingen

1. Funderingen op staal, met uitzondering van funderingen op zeer vaste zandlagen. De funderingselementen kunnen hier bestaan uit poeren, stroken of platen. In deze categorie vallen alle staalfunderingen op verdichtbaar of verkneedbaar materiaal;
2. Funderingen met niet grondverdringende palen (avegaarpalen, boorpalen), met uitzondering van palen, waarvan kan worden aangetoond dat deze nauwelijks extra zakking zullen vertonen onder verhoogde negatieve kleef dan wel verdichting van de lagen onder het paalpuntniveau.
3. Funderingen met grondverdringende palen, die zakkingen kunnen vertonen onder extra negatieve kleef en verdichting van lagen onder het paalpuntniveau. Alle kleefpalen vallen in deze categorie.

funderingstype 2: niet-trillingsgevoelige funderingen

1. Staal-funderingen op een zeer vast zandpakket, waarbij ook verdichting of verkneding van dieper gelegen lagen, gegeven de eigenschappen van de trillingsbron, niet kunnen leiden tot zakkingen van het funderingselement groter dan enkele millimeters.
2. Funderingen met niet grondverdringende palen (avegaarpalen, boorpalen welke, gegeven de eigenschappen van de trillingsbron, verwaarloosbare zakkingen zullen vertonen door extra negatieve kleef dan wel verdichting van lagen onder het paalpuntniveau.
3. Funderingen met grondverdringende palen, die een belangrijk deel van hun draagvermogen ontleen aan het puntdraagvermogen en waarvoor geen bijzondere omstandigheden van toepassing zijn, die aanleiding kunnen geven tot zakkingen.

3) randvoorwaarden t.a.v. trillingsbronnen:

Bij incidenteel voorkomende trillingen met een stootachtig karakter zal er bij gelijke amplitude en frequentie minder kans op schade zijn dan bij continue trillingen.

Dit wordt enerzijds veroorzaakt doordat bij continue trillingen de kans groter is dat trillingen met grote intensiteiten voorkomen vanwege resonanties. Of al dan niet resonantie-verschijnselen kunnen optreden hoeft overigens niet direct een neerslag te vinden in de grenswaarden, indien we ervan uitgaan dat de trillingen gemeten worden op die plaatsen, waar de grootste trillingsterkte voorkomt. Alleen in geval van metingen van beperkte omvang is het van belang de mogelijkheid van resonanties elders in rekening te brengen.

Anderzijds moet bij continue trillingen rekening worden gehouden met vermoeiingseffecten ten aanzien van de sterkte van bouwmaterialen en met doorgaande verdichting of verkneding van funderingsgronsslagen.

Een classificatie van de trillingen is wenselijk, zodanig dat met mogelijke vermoeiingseffecten rekening gehouden kan worden bij het stellen van grenswaarden. Men zou onderscheid kunnen maken in incidenteel voorkomende stootvormige trillingen, herhaald voorkomende trillingen met een stootvormig karakter, semi-continue trillingen, en continue trillingen, zoals onderstaand:

geen vermoeiingseffecten:

- incidenteel voorkomend, kortdurend, ten gevolge van een stootachtige belasting. Een voorbeeld zijn trillingen door explosies, waarbij vermoeiingseffecten in bouwmaterialen niet van belang zijn.

mogelijke vermoeiingseffecten:

- herhaalde kortdurende trillingen ten gevolge van een stootachtige belasting, bijvoorbeeld heiwerkzaamheden;
- semi-continue trillingen, bijvoorbeeld veroorzaakt door weg- en railverkeer.
- continue trillingen, bijvoorbeeld veroorzaakt door machines, vibratoren en dergelijke.

4) randvoorwaarden t.a.v. de grenswaarden

De te hanteren grenswaarden moeten op een logische wijze uitdrukking geven aan het schaderisico, dat gerelateerd is aan de hiervoor genoemde aspecten (type trilling, type gebouw of -onderdeel, type fundering en funderingsgrondslag). Dit vereist een omschrijving van het begrip schade en een verantwoording van de wijze waarop daaraan grenswaarden zijn gekoppeld.

Voor het begrip 'schade' wordt verwezen naar hoofdstuk 2. Ten aanzien van het schaderisico (kans*gevolg) is het aan te bevelen onderscheid te maken in schade van constructieve aard enerzijds en schade van niet constructieve aard anderzijds.

Tot schade van constructieve aard valt in de eerste plaats schade aan de hoofddraagconstructie te rekenen. Verder zou, in verband met de veiligheid van personen in gebouwen, hiertoe ook gerekend moeten worden schade aan onderdelen van het gebouw, die niet tot de hoofddraagconstructie behoren, maar die wel een zodanige dragende functie hebben, dat bij verlies daarvan gevaar voor personen zou kunnen ontstaan.

Tot schade van niet-constructieve aard kan worden gerekend het scheuren van niet constructieve voegen, loslaten van bekledingen en afwerkingen (bijvoorbeeld pleisterwerk), schade aan niet dragende scheidingswanden en dergelijke.

Vanwege de complexiteit van de aanwezige en optredende spanningen in bouwwerken ten gevolge van trillingen en vanwege de grote spreiding in sterkte van de toegepaste bouwmaterialen is het aan te bevelen uit te gaan van grenswaarden, waarvan in de praktijk gebleken is dat zij met een aanvaardbaar kleine kans tot schade leiden. Zij moeten bovendien algemeen toepasbaar zijn.

Concreet wordt aanbevolen met het oog op constructieve schade:

- grenswaarden voor incidenteel optredende kortdurende trillingen ten gevolge van stootachtige belastingen te baseren op DIN 4150 deel 3 (1986), tabel 1 uit deze norm.
- grenswaarden voor herhaald optredende kortdurende trillingen ten gevolge van stootachtige belastingen te baseren op DIN 4150 deel 3, doch de trillingsterkte te verminderen wegens een vergrote kans op schade door

vermoeding, met een factor 0,6.

Hiermee is tevens de kans op schade aan dragende onderdelen van metselwerk op het niveau, dat in de Nederlandse praktijk is gehanteerd ($0,6 * 15 = 9$ mm/s).

- grenswaarden voor continu en semi-continu optredende trillingen te baseren op de in DIN 4150 deel 3 gehanteerde filosofie, namelijk een maximale waarde voor de trillingsnelheid op het hoogste punt van het gebouw.

De volgende aanvullingen worden voorgesteld:

- laat de maximale waarde gelden voor ieder punt van de hoofddraagconstructie;
- differentieer de grenswaarde naar de gebouwcategorie; respectievelijk 24, 9 en 5 mm/s

Met het oog op niet-constructieve schade:

- Het is wenselijk hiervoor apart grenswaarden op te nemen. Voorgesteld wordt voor verticale elementen, al dan niet behorend tot de hoofddraagconstructie, de waarden 40, 15 en 8 mm/s op te nemen voor kortdurende stootachtige trillingen, en deze voor herhaald kortdurende trillingen te reduceren tot 24, 9 en 5 mm/s (reductie tot 60 %), en voor continue trillingen tot 16, 6 en 3 mm/s (reductie tot 40 %).
- Er moet expliciet rekening gehouden worden met het feit dat verticale elementen niet ontworpen kunnen zijn op het dragen van een belasting loodrecht op het vlak. Voorgesteld wordt de optredende versnellingen bij een als quasi-statisch te beschouwen trillingsbelasting te beperken. Deze grenzen zouden zo moeten worden gekozen dat een continue overgang optreedt ter plaatse van de eigenfrequentie.

De eigenfrequentie zal vaak niet bekend zijn. Voorgesteld wordt de overgang bij 10 Hz te laten plaatsvinden. De toelaatbare versnelling volgt dan direct uit de

hiervoor gegeven waarden van de snelheid.

- Voor horizontale elementen (plafonds e.d.) die geen deel uitmaken van de hoofddraagconstructie zal een versnelling van 1 m/s² (ongeveer 10 % van het eigen gewicht) in het algemeen acceptabel zijn.

5) vereenvoudigde verificatie, uitgebreide verificatie

Het is naar onze mening wenselijk dat de mogelijkheid bestaat om door middel van eenvoudige metingen te verifiëren dat de trillingsterkte ten gevolge van bepaalde activiteiten zo laag is dat geen uitgebreidere metingen noodzakelijk zijn. Een mogelijkheid tot het uitvoeren van een beperkte meting heeft echter alleen zin, indien de kans niet groot is, dat zich buiten de voorgeschreven meetplaatsen sterke vergrotingen van de trillingen kunnen voordoen. Bij trillingen met een continu karakter zal een beperkte meting dus niet mogelijk zijn.

Als op beperkte schaal gemeten wordt moet dat tot uitdrukking komen in de te hanteren grenswaarden. Een uitgebreidere instrumentatie biedt minder onzekerheid, hetgeen hogere grenswaarden rechtvaardigt. Deze onzekerheid zou objectief aan de hand van een aantal cases onderzocht kunnen worden. Als voorstel formuleren wij hier:

- beperkte meting, bij eenmalige kordurende, stootachtige trillingsverschijnselen: vermenigvuldig grenswaarden voor het desbetreffende meetpunt met 0,8.
- beperkte meting, bij herhaald voorkomende kordurende, stootachtige trillingsverschijnselen: vermenigvuldig grenswaarden voor het desbetreffende meetpunt met 0,6.

Als meest uitgebreide verificatie kan de situatie worden beschouwd dat de grenswaarden voor de trillingsterkte door middel van een analyse van de aanwezige en door trillingen additioneel optredende spanningen worden bepaald, rekening

houdend met de onzekerheden in de geometrie van het (onderdeel van het) bouwwerk en in de materiaalgegevens. In de beoordelingsrichtlijn zou op deze mogelijkheid gewezen moeten worden, zonder dat dit verder is uitgewerkt. Het zal overigens duidelijk zijn dat van deze mogelijkheid in de dagelijkse praktijk nauwelijks gebruik gemaakt zal worden.

6) randvoorwaarden t.a.v. de controle door meting

De trillingsterkte moet op een eenduidige wijze kunnen worden gemeten. Dit betekent dat in een apart op te stellen document onder meer aandacht moet worden besteed aan:

- keuze meetpunten in relatie tot gebouwstructuur en trillingsbron;
- keuze van de meetduur e.d.;
- algemene eisen te stellen aan meetapparatuur, calibratie, signaalverwerking e.d.

7) Resume voorgestelde grenswaarden

Op basis van de bestudeerde literatuur, normen en richtlijnen, op basis van de hiervoor omschreven randvoorwaarden, en op basis van de ervaringen in de Nederlandse praktijk ten aanzien van schade aan gebouwen wordt voorgesteld van de volgende grenswaarden uit te gaan.

beperkte meting

Grenswaarde: ter voorkoming constructieve en niet constructieve schade;
meetpunten: een meetpunt op begane grondniveau

klasse	trillingsbron	
	kortduurend	herhaald kortdurend
1	0.8 (a)	0.6 (a); (d)
2	0.8 (b)	0.6 (b); (d)
3	0.8 (c)	0.6 (c); (d)

Opmerking: (a), (b), (c) en (d) zijn lijnen in figuur 6.2 en 6.3.

uitgebreide meting

grenswaarden: ter voorkoming van constructieve schade

meetpunten: op bg niveau en hoger gelegen punten van de hoofd draagconstructie.
Verder op dragende wanden van metselwerk.

klasse	trilling					
	kortdurend		herhaald kortdurend		semi-continu	
	bg niveau	hoger	bg niveau	hoger	bg niveau	hoger
1	(a)	40 mm/s	0.8(a);(d)	32 mm/s	0.4(a);(d)	16 mm/s
2	(b)	15	0.8(b);(d)	12	0.4(b);(d)	6
3	(c)	8	0.8(c);(d)	6,4	0.4(c);(d)	3,2

Opmerking: (a), (b), (c) en (d) zijn lijnen in de figuren 6.2 en 6.3.

grenswaarden: ter voorkoming niet constructieve schade aan verticale elementen;

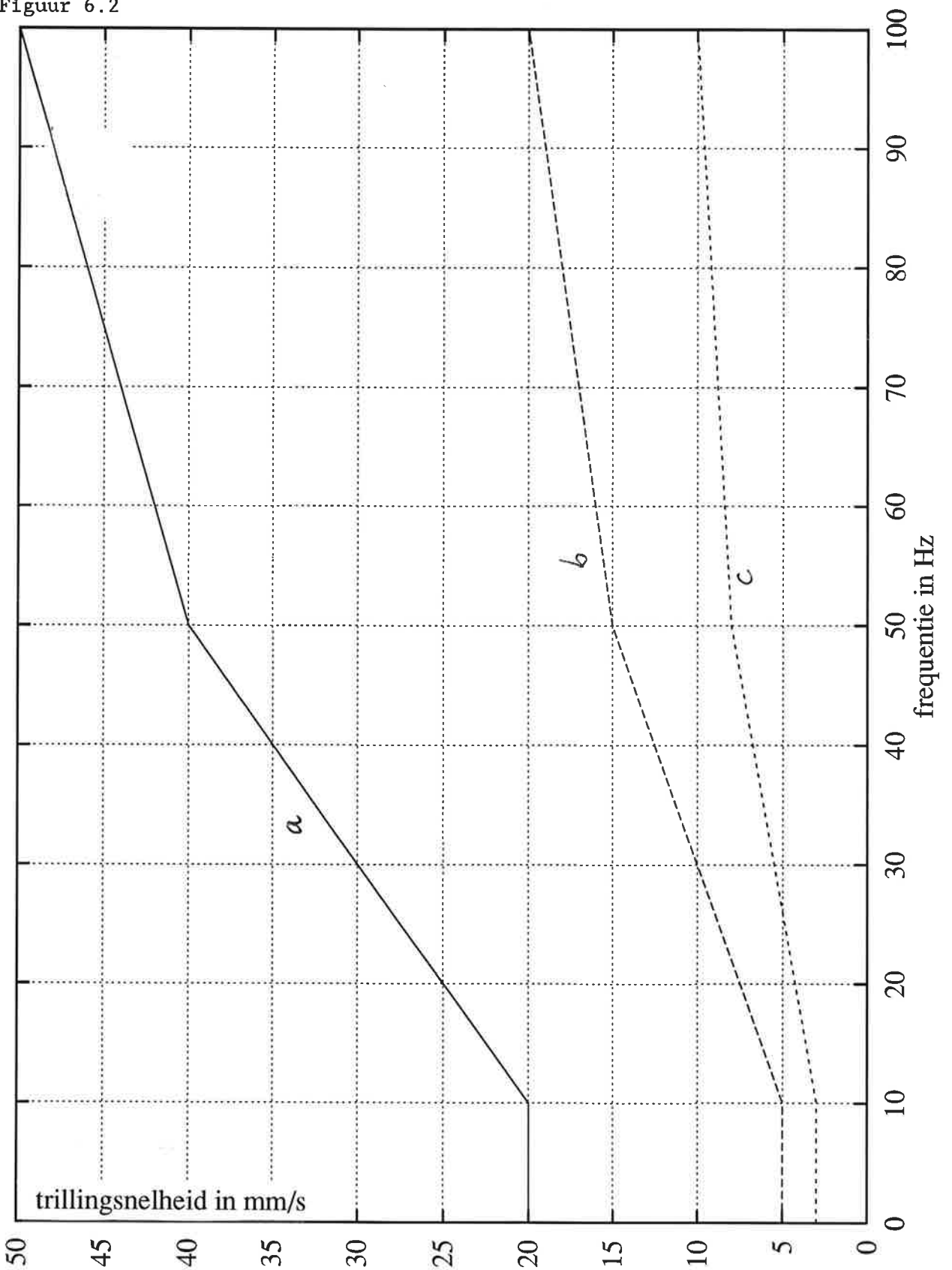
meetpunten: in het midden van de overspanning van vlakken en kolommen

klasse	trilling		
	kortdurend	herhaald kortdurend	semi-continu
1	40 mm/s	24 mm/s	16 mm/s
2	15	9	6
3	8	5	3

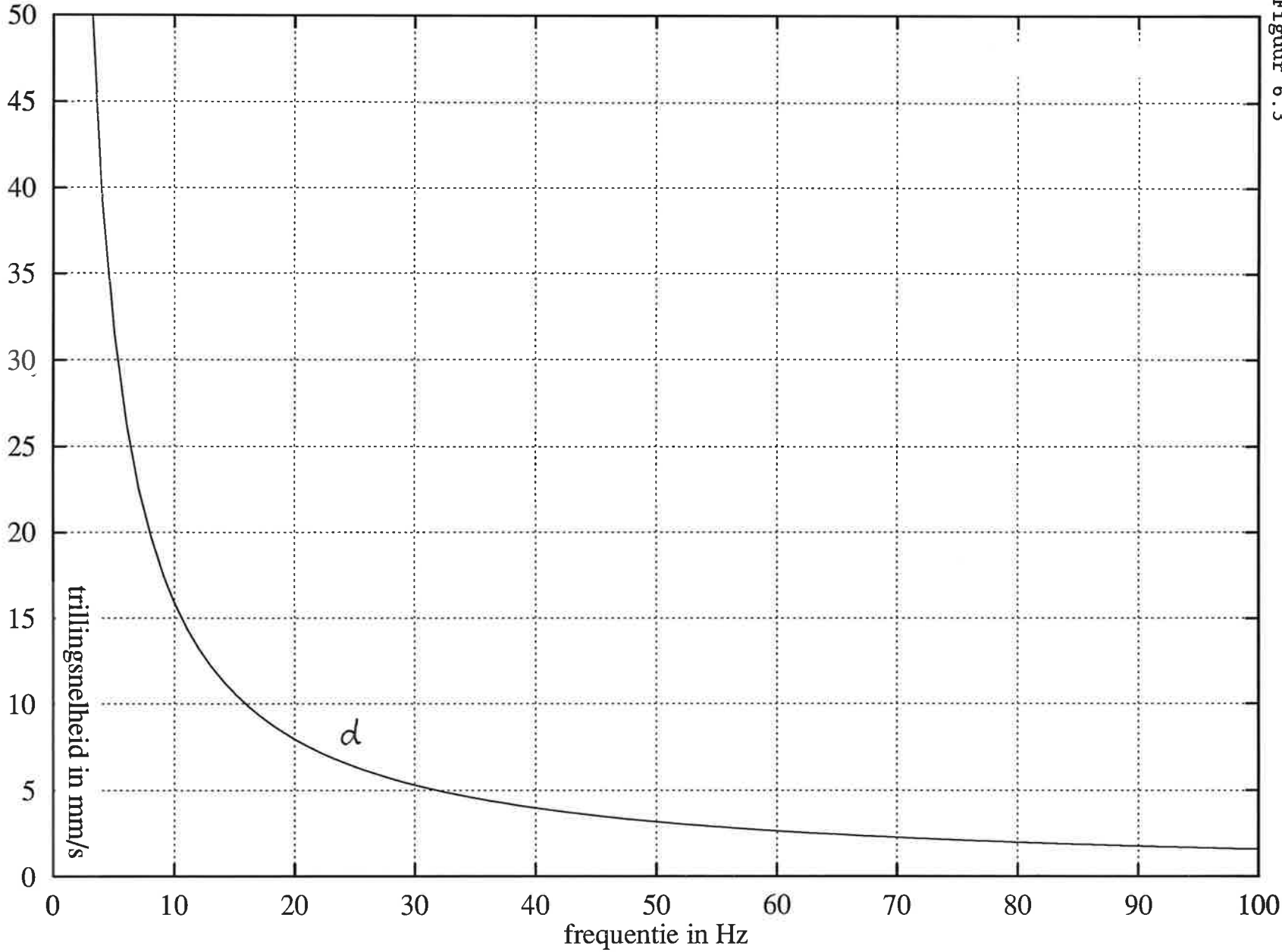
grenswaarden: ter voorkoming niet constructieve schade aan horizontale elementen;
meetpunten: in het midden van de overspanning van vlakken of liggers

klasse	trilling		
	kortdurend	herhaald kortdurend	semi-continu
1	40 mm/s of 1 m/s ²	24 mm/s of 1 m/s ²	16 mm/s of 1 m/s ²
2	15	9	6
3	8	5	3

Figuur 6.2



Figuur 6.3



GERAADPLEEGDE LITERATUUR

- [1] Cauberg-Huygen rapport 890159 "Prognose en beoordeling van trillingen in de gebouwde omgeving; inventarisatie van bestaand onderzoek en opstelling van een onderzoeksplan" Rotterdam, maart 1990
- [2] Wet Geluidhinder
- [3] NEN-ISO 2041: Trillingen en Schok - verklarende woordenlijst.
- [4] P.J. van Brederode et al. "Invloed van verkeerstrillingen op gebouwen" TNO rapport IBBC B-87-501 en B-87-502
- [5] H. van Koten, "Grenzen voor dynamische bewegingen", TNO rapport IBBC BI-76-107 (1967)
- [6] P.J. van Brederode, J. van Zoest, "Trillingen in de bouw; een overzicht van de problemen", PT/CT 1985 no. 2
- [7] CUR rapport 57 "Dynamische problemen in de bouw", Stichting CUR, 1972
- [8] Y.K. Wynia, "Trillingen en gebouwschade", PT/Bouwtechniek, 39 (1984), nr. 9, 25-28.
- [9] H. van Koten, T.K. Muller, A.F. van Weele, "Toelaatbare bewegingen voor mensen en gebouwen", PT Civiele Techniek, No. 1, februari 1990.
- [10] P.C. van Staalduinen "Het uitvoeren van trillingsmetingen tijdens heiwerkzaamheden voor de beoordeling van schade aan gebouwen", TNO rapport BI-90-154 (1990)
- [11] R. Holmberg et al. "Vibrations generated by traffic and building construction activities" Swedish council for Building Research, D15:1984.
- [12] L. Forssblad, "Vibratory Soil and Rock Fill Compaction", Dynapac Maskin AB, Solna, Zweden, 1981.
- [13] G. Bonde, G. Rundqvist et al, "Criteria for acceptable traffic- induced vibrations", Institute of Technology, Uppsala University, UPTEC 81 42 R. (1981) (in het Zweeds)
- [14] U. Langefors, B. Kihlström, "The Modern Technique of Rock Blasting", 2nd Ed. Almqvist & Wiksells Boktryckeri AB, Uppsala, 1967.
- [15] J.F. Wiss "Construction vibrations: State of the art" ASCE J. Geotechn.

- Eng.Div GT 2, February 1981, pp 167-181
- [16] C. Ashley, D.B. Parkes "Blasting in urban areas", Tunnels Tunneling 8, no. 6, september 1976, 60-67.
 - [17] B.M. New, "Vibration caused by underground construction", ... 217- 229
 - [18] K. Medearis, "The development of rational damage criteria for low- rise structures subjected to blasting vibrations", Proc. 18th U.S. Symp. on Rock Mechanics, June 1977, pp 1A2-1 - 1A2-6.
 - [19] Y.S. Chae, "Design of Excavation Blasts to Prevent Damage", Civil Engineering ASCE, Vol. 48, No. 4, april 1978, pp 77-79.
 - [20] A.T. Edwards, T.D. Northwood, "Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures", The Engineer, Vol. 210, september 1960, pp 538-546
 - [21] H.R. Nicholls, C.F. Johnson, "Blasting Vibrations and their effects on structures", Bureau of Mines Bulletin 656, 1971.
 - [22] R.J. Steffens "Structural Vibration and damage", Building Research Establishment Report, London, 1974.
 - [23] ISO 4866 "Mechanical vibration and Shock - Measurement and evaluation of vibration effects on buildings - Guidelines for the use of basic standard methods" 1990
 - [24] J.H.A. Crockett, "Piling vibrations and structural fatigue", Proc. Recent Developments in the desing and construction of piles", ICE, London, 1979, pp 305-320
 - [25] "Reglementation relative aux vibrations mecaniques emises dans l'environnement par les installations classees pour la protection de l'environnement", Ministere charge de l'environnement (Frankrijk); circulaire 23 van 23 juli 1986
 - [26] DIN 4150 Teil 3 "Erschutterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf bauliche Anlagen" mei 1986

- [27] ONORM S 9020 "Bauwerksserschütterungen - Sprengerschütterungen und vergleichbare impulsformige Immisionen" augustus 1986.
- [28] SN 640 312 "Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke" 1979
- [29] F. Hoffer "Hinder en schade ten gevolge van verkeerstrillingen", Wetenschapswinkel TU-Delft, 1990.
- [30] K.R. Massarsch "Erschütterungsschaden verursacht durch bodenverformung" Commemorative Volume, Universität Karlsruhe, 1990.
- [31] D.J. Martin, P.M. Nelson, R.C. Hill, "Measurement and analysis of traffic induced vibrations in buildings", TRRL Supplementary Report 402, TRRL, Crowthorne, 1978.
- [32] D.J. Martin, "Low frequency traffic noise and building vibration", TRRL Supplementary report 429, TRRL, Crowthorne, 1978.
- [33] D.J. Martin, "Ground vibrations from impact pile driving during road construction", TRRL supplementary report 544, TRRL, Crowthorne, 1980.
- [34] C.J. Baughan, D.J. Martin, "Vibration nuisance from road traffic at fourteen residential sites", TRRL laboratory report 1020, TRRL, Crowthorne, 1981
- [35] G.R. Watts, "Traffic-induced ground-borne vibrations in dwellings", TRRL Research Report 102, TRRL, Crowthorne, 1987.
- [36] G.R. Watts (ed.), "Traffic Vibration and building damage - TRRL papers presented at Acoustics '87", TRRL Research Report 146, TRRL Crowthorne, 1988.
- [37] G.R. Watts, "Case studies of the effects of traffic induced vibrations on heritage buildings", TRRL Research Report 156, TRRL, Crowthorne, 1988
- [38] B.M. New, "Trial and construction induced blasting vibration at the Penmeanbach Road Tunnel", TRRL Research Report 181, TRRL, Crowthorne, 1989.
- [39] G.R. Watts, "The effects of traffic induced vibrations on heritage buildings - further case studies", TRRL Research Report 207, TRRL, Crowthorne, 1989.
- [40] G.R. Watts, "Groundborne vibrations generated by HGVs - effects of

- vehicle, road and ground parameters", Proc. Inst. Acoustic, Vol. 11, part 5 (1989), 99 - 109.
- [41] G.R. Watts, "Traffic Induced vibrations in buildings", TRRL Research Report 246, TRRL, Crowthorne, 1990.
- [42] C.J. Muskett, R.A. Hood, "Vibration Damage to Occupied Buildings", TRRL Contractor Report 144, TRRL, Crowthorne, 1990.
- [43] IBBC-TNO rapporten B-86-262 (Den Haag), B-83-254 (St. Odilienberg), B-83-588 (Heeswijk Dinther), B-86-240 (Schellinkhout), B-87-108 (Leuth), B-86-668 (Uitgeest), B-86-667 (Veghel), B-84-027 (Enschede), B-87-723 (Schagerbrug), B-87-726 (Den Helder), B-89-059 (Vught), B-88-026 (Lisserbroek).
- [44] J.C. Tukker, "De trillingsbestrijding", PT 8 december 1972, 1017- 1021.
- [45] A.J. Francken, "Het verminderen van machinetrillingen in gebouwconstructies in verband met bewoningseisen", Bouw 38 1418- 1420.
- [46] J.A. Studer, A. Susstrunk, "Erschutterungen infolge Bau, Industrie und Verkehr", Schweizer Ingenieur und Architect", 8/87, 172-178.
- [47] S. Riemens, "Trillingsoverdracht op gebouwen", Extern, V (1976), nr. 4, 237-260.
- [48] ISO/DP 10137 "Bases for Design of Structures - Serviceability of Buildings against vibration", ISO/TC 108 SC2, doc. N48.
- [49] H. Bendel, "Erschutterungsbeanspruchung von Bauwerken", Schweizerische Bauzeitung, 89, Heft 21, (27 mei 1971) 511-515.
- [50] A. Raab, "Einwirkung von Erschutterungen auf Gebaude - Anhaltswerte verschiedener Staaten", Schweizer Ingenieur und Architect 4/80 45- 48.
- [51] J. Boxho, "Schiettrillingen - Criteria voor beschadiging en leefmilieu", Annalen der Mijnen van Belgie, 10, 893-918.
- [52] A.G. Spruijt, "Naar een beoordelingsstelsel voor trillinghinder en - objectschade", NAG jaarnaal, 97, maart 1989, 41-52.

- [53] L. Auersch, B. Ebner, "Erschütterungsimmissionen in Gebäuden - Eine Parameterstudie und messtechnische Untersuchungen zur Deckenresonanz", Bautechnik 66, (1988), 271-276.
- [54] H. Splittgerber, "Zur Übertragung von Erschütterungsimmissionen in Gebäuden", Aus der Tätigkeit der LIS, 1987, 57 - 63.
- [55] H. Splittgerber, R. Ohle, Auswirkungen von Erschütterungsimmissionen auf eine 800 Jahre alte Kirche", Aus der Tätigkeit der Lis, 1986, 79 - 83
- [56] H. Splittgerber, "Über die dynamische Beanspruchung von Gebäuden durch Sprengerschütterungen", Nobel Helfte, Heft 5, September 1970, 170 - 179.
- [57] H. Splittgerber, "Verformung von Gebäuden in waagerechter Richtung durch Sprengerschütterungen", Teil 1, Berechnungsverfahren, VDI-Zeitschrift, Band 111 (1969), nr. 11, 709-713.
- [58] H. Splittgerber, "Verformung von Gebäuden in waagerechter Richtung durch Sprengerschütterungen", Teil 2, Beispiel zur Berechnung und Folgerungen für eine Beurteilung von Sprengerschütterungen auf Gebäude", VDI-Zeitschrift, Band 111 (1969), nr. 17, 1185-1192
- [59] J. Jakobsen, "Ground Vibration from rail traffic", J. Low Freq. Noise & Vibr., Vol. 6 (1987), no. 3.
- [60] R. Gasch, "Schwingungsmessungen in Bauteilen", Berichte aus der Bauforschung, Heft 58, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1968.
- [61] A.J. Francken, "Trillingshinder, een literatuurstudie", rapport IL- HR-12-01, Interdepartementale commissie geluidhinder, Leidschendam, 1981.
- [62] E.P. D'Appolonia, "Dynamic Loading", ASCE J. Soil Mech. and Found. Div, (SML), 1970, p 58
- [63] G.W.J. Heijnen, "Basisdocument Trillingen veroorzaakt door treinverkeer", Nederlandse Spoorwegen, Centrum voor Technisch Onderzoek, CTO/6/10.009/074, Utrecht, maart 1990.

B-90-822

**Trillingscriteria m.b.t. schade aan
gebouwen**

Maart 1991
Revisie januari 1993

P.C. van Staalduinen
M.Th.J.H. Smits

Opdrachtgever:
Stichting Bouwresearch

Projectnaam: -
Projectnr. : 64.4.2240

Pagina's : 117
Tabellen : 12
Figuren : 17
Bijlagen : -

1995

Thema : -
WP-onderwerp : 215-2
Trefwoord(en): trillingen