SBR Trillingsrichtlijn A:
Schade aan bouwwerken:2017

Aansprakelijkheid

SBRCURnet en degenen die aan dit product hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze publicatie. Toch kan niet worden uitgesloten dat de inhoud onjuistheden bevat. De gebruiker van dit product aanvaardt daarvoor het risico. SBRCURnet sluit, mede ten behoeve van de auteurs, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van informatie uit dit product.

Met nadruk wordt erop gewezen dat deze SBRCURnet publicatie de stand van de techniek en kennis weergeeft op het moment van uitgifte. SBRCURnet houdt zich dan ook aanbevolen te worden geïnformeerd over ervaringen die met het gebruik van deze publicatie worden opgedaan.

© SBRCURnet

Alle rechten voorbehouden. Niets van deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, getransformeerd tot software of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opname of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voorzover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16b Auteurswet 1912 in verbinding met het Besluit van 23 augustus 1985, Stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AW Amstelveen). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient u zich te richten tot: SBRCURnet, Postbus 516, 2600 AM Delft.

No part of this book may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm, stored in a database or retrieval system, or any other means without written permission from the SBRCURnet.

Colofon

Projectmanager
ing. A. Jonker, SBRCURnet

Rapporteur
C.J. Ostendorf, DPA Cauberg-Huygen

Redacteur
ing. A. Jonker, SBRCURnet

Vormgeving
Marja Timmermans, SenS Service

ISBN **978 90 5367 652 3**

SBR Trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken: 2017

SBRCURnet, Delft november 2017

Inhoud

Voorwoord 5

Leeswijzer 9

1 Inleiding 11

2 Onderwerp 13

3 Toepassingsgebied 15

4 Termen en definities 17

5 Eenheden, grootheden en symbolen 21

5.1 Eenheden 21
5.2 Grootheden 21
5.3 Gehanteerde symbolen 21

6 Eisen en bepalingsmethode 23

6.1 Eisen 23
6.2 Bepalingsmethode 23

7 Meetapparatuur 25

7.1 Frequentiebereik 25
7.2 Meetbereik 25
7.3 Meetapparatuur 25
7.3.1 Algemeen 25
7.3.2 Trillingsopnemer 27
7.3.3 Conditionering van het meetsignaal 27
7.3.4 Registratie-instrument 27
7.3.5 Meetinstrument 27
7.4 Kalibratie 27
7.5 Nauwkeurigheid 27

8 Meetmethode 29

8.1 Algemeen 29
8.2 Te meten grootheid 29
8.3 Omstandigheden 29
8.4 Type meting 29
8.5 Meetpunten en meetrichtingen 31
8.5.1 Algemeen 31
8.5.2 Indicatieve meting 33
8.5.3 Beperkte meting 33
8.5.4 Uitgebreide meting 35
8.6 Bevestiging trillingsopnemers 37
8.7 Meetduur 39
8.7.1 Algemeen 39
8.7.2 Harmonische trillingen 41
8.7.3 Stochastische trillingen 41

9 Bepaling van de trillingsbelasting 43

9.1 Algemeen 43
9.2 Bepaling V_{top} en V_{stat} 45
9.2.1 Inleiding 45
9.2.2 Bepaling V_{top} per meetpunt 45
9.2.3 Bepaling V_{stat} per meetpunt 47
9.2.4 Bepaling V_{top} en V_{stat} voor een bron 49
9.3 Bepaling V_d 49
9.4 Bepaling dominante frequentie bij V_{top} 51
9.5 Bepaling a_{top} en a_{stat} van de trillingsversnelling 51
9.5.1 Bepaling a_{top} topwaarde trillingsversnelling 51
9.5.2 Bepaling a_{stat} 51
9.5.3 Rekenwaarde van de trillingsversnelling 51

10 Grenswaarden 53

10.1 Algemeen 53
10.2 Relevante aspecten ter bepaling grenswaarde 57
10.2.1 Constructie categorie 57
10.2.2 Bouwkundige staat 57
10.2.3 Monumentale status 57
10.2.4 Type trillingsbron 59
10.2.5 Fundering (kans op zettingen) 59
10.3 Rekenwaarde van de grenswaarde 61
10.3.1 Algemeen 61
10.3.2 Veiligheidsfactoren 65
10.3.3 Grenswaarde voor de draagconstructie begane grond 65
10.3.4 Grenswaarde voor de draagconstructie hoogste verdieping en niet-dragende onderdelen 69
10.3.5 Grenswaarden voor de trillingsgevoelige fundering 69

11 Rapportage 73

Referenties 75

Bijlage 1 Aanwijzingen en specificaties voor te gebruiken meetapparatuur 77

Bijlage 2 Bevestiging trillingsopnemer bij vloerbedekking 81

Bijlage 3 Bepaling dominante frequentie bij de topwaarde 83

Bijlage 4 Grenswaarden buisleidingen 87

Bijlage 5 Checklist bouwkundige staat 89

Voorwoord

Voor u ligt de revisie van SBR Richtlijn A "Schade aan bouwwerken:2017", met een aantal wijzigingen en toevoegingen ten opzichte van de versie uit 2002 en de heruitgave van 2006 waarin alleen redactionele zaken waren aangepast. De richtlijn is op een aantal punten geactualiseerd en er is ruimte opgenomen voor toelichting op de keuzes die in de richtlijn zijn gemaakt.

In 2011 is geïnventariseerd bij gebruikers van de richtlijn welke behoefte voor aanpassing er was bij een vernieuwde uitgave. Op basis daarvan is een projectplan opgesteld met daarin vier nader uit te werken aspecten: (1) Inzicht in de kans op schade bij overschrijding van de grenswaarden, (2) evaluatie van de grenswaarde voor trillingsgevoelige funderingen, (3) de rol van initiële spanningen en bouwkundige staat en (4) redactie van de nieuwe richtlijn.

Nader inzicht in de optredende waarden voor V_{top} en de kans dat er schade optreedt, is van belang voor betrokken partijen om de risico's in te schatten als de grenswaarden uit de richtlijn onverhoopt worden overschreden. Deze inschatting is van belang voor zowel de veroorzaker van de trillingen, eventuele verzekeraars en voor de eigenaar van het bouwwerk dat aan trillingen blootstaat. Uit een internationale literatuurstudie (onder meer naar de effecten van aardbevingen in de vorm van fragility curves) blijkt dat het tot voor kort ontbrak aan concrete informatie om hier generieke uitspraken over te doen.
Binnen de commissie zijn gegevens verzameld van projecten uit het verleden en deze zijn in geanonimiseerde vorm vertaald naar een indicatie van de relatie tussen trillingsniveau en kans op schade. Daarnaast is een numerieke studie uitgevoerd met behulp van in de praktijk gemeten trillingsniveaus. Op basis van deze studies is een voorstel voor een zogenaamde S curve gemaakt. Met de uitkomst van deze studies zijn richtwaarden afgeleid voor de kans op schade, gegeven een overschrijding van de grenswaarden. Deze zijn in de toelichting bij hoofdstuk 10 weergegeven.

De richtlijn geeft een grenswaarde voor trillingsgevoelige funderingen. Voor deze grenswaarde was sinds het ontstaan van de richtlijn een maximaal optredende versnelling van 1 m/s^2 van toepassing, die in de richtlijn als trillingssnelheid was gepresenteerd. Recente inzichten leiden tot de conclusie dat deze grenswaarde bij lagere frequenties kan leiden tot onderschatting van het effect. Dit is nader onderzocht en uitgewerkt tot een nieuwe definitie van de grenswaarde.

In de vorige versie van de richtlijn werd onderscheid gemaakt in metselwerk in goede staat of slechte staat, als maat om onderscheid te maken tussen al dan niet trillingsgevoelige constructies. Nagegaan is of er meer genuanceerde criteria toe te passen zijn om dit onderscheid te maken. Dit heeft geleid tot een checklist voor de bepaling van de bouwkundige staat, die als bijlage 5 is toegevoegd.
Er is bij de voorbereiding van deze revisie ook nagedacht of onderscheid gemaakt kan of moet worden tussen constructieve en niet-constructieve schade. Er is besloten dit onderscheid niet te maken omdat de richtlijn beoogt schade te voorkomen.

Tenslotte is de richtlijn redactioneel bewerkt, waarbij een aantal onderwerpen is geactualiseerd.

Tijdens het proces van herziening heeft vanwege de gaswinning en de daarmee gepaard gaande aardbevingen het onderwerp schade door trillingen nadrukkelijk aan belang gewonnen. Hoewel de richtlijn niet expliciet voor geïnduceerde aardbevingen is geschreven, is deze toepassing niet uitgesloten.

Namens de commissie hopen wij dat met deze vernieuwde SBR Richtlijn A de beoordeling van trillingen in verband met schade aan gebouwen helderder is neergezet en daarmee een objectieve beoordeling, in het belang van alle partijen, mogelijk is.

SBRCURnet-commissie 1445 - Herziening Trillingsrichtlijn deel A heeft de ontwikkeling van deze richtlijn begeleid. Bij het verschijnen van deze richtlijn was de samenstelling als volgt:

Chris Geurts, voorzitter	TNO
Carel Ostendorf, eindrapporteur	DPA Cauberg-Huygen
Arnold Koopman, rapporteur	Level Acoustics & Vibration
Paul Hölscher, rapporteur	Deltares
Auke Balder	CRUX Engineering
Erik de Bruin	Brem Funderingsexpertise
Jan van Dalen	DaeD ingenieurs
Geert Degrande	KU Leuven
Harry Dekker	Rijkwaterstaat GPO
Martijn van Delft	Allnamics
Yvo Hollman	Bouwrisk
Jan Hoogenboom	Hektec
Hans Huizer	Peutz
Martin op de Kelder	Gemeente Amsterdam
Jan Keijzer	LBP|SIGHT
Alexander Knibbeler	Mos Grondmechanica
Hans J.A. van Leeuwen	DGMR
Hans Liefting	Leiderdorp Instruments
Tiem Muller	IFCO Funderingsexpertise
Fred Pannekoek	Fides Expertise
Gert Ploeg	Gemeente Utrecht
Angela van Rietschoten	Profound
Hans Schinck	Royal HaskoningDHV
Peter Schouten	Arcadis
Ernst Seaber	Fides Expertise
Henk Senhorst	HWBP
Albert-Jan Snethlage	Fugro Land NL
Herke Stuit	Movares
Jeroen Uilenreef	Shell
Agnes van Uitert	Arcadis
Jan de Vos	Geomet-ABO
Ad Vreeswijk	AV Consulting
Nils Yntema	ProRail
Hielke Zandberg	ProRail
Don Zandbergen	Ingenieursbureau Gemeente Rotterdam
Fred Jonker, programmamanager	SBRCURnet

Tijdens het proces van realisatie hebben de volgende personen deelgenomen in de commissie: Joost Bakker (Allnamics), Albert Bunte (Gemeente Utrecht), Robbert Drieman (SBRCURnet), Paul Rebel (Gemeente Amsterdam), Bert Westland (Delta Lloyd) en Patrick IJnsen (Hektec).

Voor de realisatie van deze richtlijn werden financiële en inhoudelijke bijdragen ontvangen van:

- Allnamics
- Brem Funderingsexpertise
- Deltares
- DPA Cauberg-Huygen
- FCK
- Fides Expertise
- Gemeente Rotterdam
- Hektec
- HWBP
- Level Acoustics & Vibration
- ProRail
- Rijkswaterstaat GPO
- TNO
- TKI Deltatechnologie
- Waternet

SBRCURnet spreekt haar dank uit aan deze instanties, alsmede aan de leden van de commissie, die met veel inzet en enthousiasme hebben samengewerkt aan de realisatie van deze richtlijn.

Delft, november 2017
Fred Jonker
Programmamanager Geotechniek en Bodem

Chris Geurts
Voorzitter SBRCURnet-commissie 1445 - Herziening Trillingsrichtlijn deel A

Leeswijzer

De richtlijn bestaat uit twee delen: op de rechter pagina staat de hoofdtekst en op de linker pagina staat waar nodig een toelichting op de hoofdtekst. De toelichting kan een bepaald begrip uitleggen, voorbeelden geven of toelichten waarom een bepaalde keuze is gemaakt. In de hoofdtekst zijn de begrippen waar toelichting op is gegeven, onderstreept.

De opbouw van de richtlijn komt overeen met de eerdere edities van de richtlijn. De bijlagen zijn van belang omdat hierin aanvullende informatie is opgenomen die nodig is voor een goed gebruik van de richtlijn.

De richtlijn mag niet gebruikt worden als enig instrument om een oorzakelijk verband aan te tonen tussen trillingen en schade aan een bouwwerk. Omdat veel verschillende factoren een rol spelen in het ontstaan van schade en bovendien tot een zelfde schadebeeld kunnen leiden, is onderzoek naar de invloed van deze factoren ook noodzakelijk. Alleen door de combinatie van alle factoren te bekijken, kan de mogelijke relevantie van de factor "trillingen" worden beoordeeld.

1

Kans op schade

Bouwkundige schades aan een bouwwerk kunnen op verschillende wijzen ontstaan. Meerdere schademechanismen kunnen tot hetzelfde schadebeeld leiden. Voorbeelden van schademechanismen zijn overschrijding van de treksterkte, de buigtreksterkte of de druksterkte van een materiaal. Deze schademechanismen worden beïnvloed door verschillende factoren zoals de veroudering van materialen, vermoeiing, de invloed van vocht en temperatuur, verandering van belastingen door verbouwingen van het bouwwerk, veranderingen in de bodem onder het bouwwerk en ook door belastingen van buitenaf zoals trillingen. Gedurende de levensduur van een bouwwerk neemt de invloed van veel van deze factoren toe waardoor de kwaliteit van de constructie vermindert en de kans op schade aan het bouwwerk toeneemt. In oude bouwwerken is daarom vaak een vorm van bouwkundige schade te vinden. Oudere bouwwerken kunnen als gevolg van de invloed van tijd en veroudering van materialen kwetsbaarder zijn dan nieuwere bouwwerken en kunnen daardoor minder goed tegen trillingen.

De grenswaarden in de oorspronkelijke richtlijn zijn vastgesteld op basis van praktijkervaring en literatuuronderzoek. Dit betekent dat als de trillingsbelasting onder de grenswaarde blijft, in de meeste gevallen schade ten gevolge van trillingen (constructief of niet-constructief) zal worden voorkomen. Maar doordat veel schademechanismen en factoren een rol kunnen spelen, vaak zelfs gelijktijdig, blijft er altijd een kans op schade bestaan ook als de trillingsbelasting lager is dan de grenswaarden. Daarvan vindt de commissie dat deze kans behoort tot het normaal maatschappelijk risico.
Overschrijding van de grenswaarden leidt tot een toename van de kans op schade die naar mening van de commissie niet gewenst is. In de praktijk blijkt een overschrijding van de grenswaarden niet altijd te vermijden. De gebruiker van de richtlijn dient dan een afweging te maken of de toegenomen kans op schade in die specifieke situatie alsnog aanvaardbaar is.

Verdere verlaging van de grenswaarden verlaagt weliswaar de kans op schade als gevolg van de trillingen maar heeft naar de mening van de commissie weinig effect op de totale kans op schade omdat andere factoren ook een belangrijke rol spelen. Bovendien zou een verlaging van de grenswaarden die waarden meer in het bereik brengen van de trillingsniveaus die optreden tijdens het normaal gebruik van een bouwwerk bijvoorbeeld als gevolg van lopen of het hard sluiten van een deur. De commissie is van mening dat deze trillingsniveaus behoren tot het normaal maatschappelijk risico en daarom niet als grenswaarde mogen dienen. Daarom is er in de richtlijn voor gekozen om de grenswaarden niet te veranderen. Deze keuze wordt onderbouwd door onderzoek ten behoeve van de revisie van de richtlijn naar de relatie tussen schadekans en trillingsniveau [1]. De vergelijking met de praktijkwaarden uit de meetgegevens die door de leden van de commissie zijn verzameld, ondersteunen de grenswaarden maar het aantal cases is te beperkt om een harde conclusie te trekken. Tevens is de complexiteit van de materie nogmaals duidelijk geworden.

Inleiding

Bouwwerken kunnen door verschillende omstandigheden in trilling raken, bijvoorbeeld door machines, passerend verkeer, explosies, wind, of bouwwerkzaamheden. Daardoor bestaat een kans op schade (zie kader 1) die afhankelijk is van de aard en constructiewijze van het bouwwerk en de aard, sterkte en frequentie van de trillingen. Een verificatie van de trillingsbelasting op een bouwwerk in relatie tot het incasseringsvermogen van dat bouwwerk, kan in bepaalde gevallen wenselijk zijn. Deze verificatie kan gebeuren door een trillingsmeting aan het bouwwerk, al dan niet in combinatie met andere typen metingen en berekeningen.

De richtlijn behandelt de wijze waarop trillingsmetingen aan bouwwerken kunnen worden uitgevoerd en de wijze waarop de resultaten van de trillingsmetingen moeten worden verwerkt en beoordeeld.

De richtlijn is opgesteld door de SBRCURnet-commissie 1445 - Herziening Trillingsrichtlijn deel A.
De tekst in de richtlijn is gebaseerd op de voorgaande versie (uitgave 2006). Opmerkingen van gebruikers zijn bij monde van de commissie geïnventariseerd en verwerkt.
Ten opzichte van eerdere edities van de richtlijn zijn drie onderwerpen door de commissie nader onderzocht:

- de schadekans in relatie tot de trillingsniveaus;
- de invloed van verdichting van de bodem door trillingen;
- de invloed van initiële spanningen in een bouwwerk en de bouwkundige staat van een bouwwerk op de beoordeling van de trillingsniveaus.

De resultaten van deze onderzoeken zijn verwerkt in de richtlijn. De rapportages behorende bij deze onderzoeken zijn als achtergronddocumenten beschikbaar.

Trillingen in gebouwen kunnen ook hinderlijk zijn voor mensen die zich in een gebouw bevinden en storingen in gevoelige apparatuur of processen veroorzaken. Op deze aspecten wordt in deze richtlijn niet ingegaan. Hiervoor wordt verwezen naar de SBR richtlijnen B en C [2 en 3].

2

Schade

Hoewel het vaststellen van de oorzaak van schade geen onderwerp in de richtlijn is, is het wel van belang dat inzicht bestaat in de begrippen schade en de onderverdeling in de categorieën constructief en niet-constructief. Deze begrippen kunnen helpen bij de afweging van het risico op schade bij overschrijding van de grenswaarden.

Schade aan een bouwwerk kan de veiligheid en/of levensduur van het bouwwerk beïnvloeden of leiden tot een vermindering van de gebruikswaarde of de economische waarde van het bouwwerk. Onder schade aan een bouwwerk wordt een verandering van de eigenschappen of van de positie van (een onderdeel van) een bouwwerk verstaan, met één of meer van de volgende gevolgen:

a. een verlies van functie, zoals het bezwijken van dragende onderdelen waardoor mogelijk de constructieve veiligheid in het geding komt;
b. een vermindering van de integriteit van het onderdeel of van het bouwwerk als geheel met betrekking tot zijn dragende functie, waarbij sprake is van een significante vermindering van de veiligheid op de korte of langere termijn (vermindering van de verwachte levensduur);
c. het bezwijken van onderdelen van het bouwwerk die weliswaar niet tot de draagconstructie behoren (zoals niet dragende scheidingswanden, plafonds, ornamenten en dergelijke), maar waarvan het bezwijken de veiligheid van personen die zich in of nabij het bouwwerk bevinden, in gevaar kan brengen;
d. een vermindering van de economische waarde of van de gebruikswaarde, zoals bij scheurvorming in metselwerk, bekledingen van constructiedelen, afwerklagen of betegeling zonder dat daarbij de veiligheid van personen die zich in of nabij het bouwwerk bevinden, in gevaar komt.

De schadevormen a, b en c hebben invloed op de (constructieve) veiligheid van het gebouw en zijn daarom te beschouwen als constructieve schade.
De schadevorm d heeft geen betrekking op de constructieve veiligheid maar op een verstoring van het aanzicht van het betreffende onderdeel van het gebouw en wordt daarom gezien als niet-constructieve schade.

Het vergroten van een bestaande schade valt ook aan te merken als schade. Om een oorzakelijk verband tussen de vergroting van de schade en de trillingsbelasting vast te leggen, is enkel het vaststellen van een overschrijding van de grenswaarden niet voldoende. Bij de analyse van de oorzaak tot de vergroting van deze schade, dienen naast trillingen ook de andere schadefactoren te worden beschouwd.

Als de trillingsbelasting lager is dan de grenswaarde, dan is de kans op constructieve schade nihil en de kans op niet-constructieve schade acceptabel klein. Trillingen in combinatie met een andere schadefactor kunnen er voor zorgen dat bij een trillingsbelasting rond de grenswaarde in een enkel geval toch niet-constructieve schade ontstaat of bestaande schade wordt vergroot.

Onderwerp

Deze richtlijn geeft een procedure voor het meten van trillingen, het verwerken van de meetresultaten en een procedure voor de beoordeling van de invloed van trillingen met het oog op mogelijke schade (zie kader 2) aan het bouwwerk of aan onderdelen daarvan.

De richtlijn maakt met betrekking tot de grenswaarden voor de trillingsbelasting geen onderscheid tussen constructieve en niet-constructieve schade. Uit onderzoek en praktijkervaring blijkt dat niet-constructieve schade bij een lagere trillingsbelasting optreedt dan constructieve schade. De in hoofdstuk 10 opgenomen grenswaarden hebben dus vooral betrekking op niet-constructieve schade. De afweging of het risico op niet-constructieve schade in een bepaald geval aanvaardbaar is, valt buiten het onderwerp van deze richtlijn.

3

Bouwwerken

Deze richtlijn beschouwt niet alleen gebouwen maar ook andere bouwkundige constructies geen gebouw zijnde die zijn opgebouwd uit steenachtige materialen. Hierbij valt te denken aan pijlers, kademuren en bruggenhoofden. Constructies geen gebouw zijnde en opgebouwd uit staal en/of hout vallen buiten het toepassingsbereik van de richtlijn omdat zij veel minder kwetsbaar zijn. Voor het vaststellen van de trillingsbelasting van een bouwwerk geen gebouw zijnde kan een uitgebreide meting nodig zijn omdat de krachten niet altijd op de fundering van het bouwwerk aangrijpen. Bij een kademuur of bruggenhoofd bijvoorbeeld kan (een deel van) het bouwwerk zich in de bodem bevinden.
Ook dijklichamen vallen buiten het algemene toepassingsbereik van de richtlijn omdat een dijklichaam geen gebouw is en evenmin een constructie uit steenachtig materiaal. De stabiliteit en integriteit van een dijklichaam kan echter wel beïnvloed worden door bijvoorbeeld verdichting van de bodem onder het dijklichaam. Als die verdichting door trillingen kan zijn veroorzaakt, kunnen de grenswaarden uit de richtlijn worden gebruikt om het trillingsniveau te beoordelen. Deze beoordeling vraagt aanvullende expertise die buiten het bereik van de richtlijn ligt.
Gebouwen met een draagconstructie uit staal vallen buiten het toepassingsgebied van deze richtlijn omdat deze gebouwen in het algemeen minder kwetsbaar zijn dan de gebouwen gemaakt van andere materialen. Als deze gebouwen (niet) dragende delen uit steenachtige materialen bevatten, kunnen deze wel volgens de richtlijn worden beoordeeld. Hiervoor kan een uitgebreide meting nodig zijn.

4

Trillingsbronnen

Over het algemeen zullen de trillingen veroorzaakt worden door menselijke activiteiten maar ook natuurlijke bronnen zoals wind en aardbevingen kunnen trillingen veroorzaken. Trillingen door wind grijpen aan op het gebouw zelf. Om deze trillingen te kunnen meten en beoordelen mag alleen een uitgebreide meting worden uitgevoerd. Dit geldt ook voor bronnen die een hoog geluidniveau in de lage frequenties veroorzaken zoals opstijgende vliegtuigen waardoor lichte gebouwdelen kunnen gaan trillen.
Aardbevingen brengen een bouwwerk vanuit de fundering in trilling. Deze trillingsniveaus kunnen ook beoordeeld worden volgens de richtlijn. Hierbij dient wel aandacht te worden geschonken aan het gebruik van het juiste frequentiebereik (zie ook hoofdstuk 7).

Inpandig heien vindt vaak op korte afstand plaats van de fundering en kan lokaal tot hoge trillingsniveaus leiden. Hoewel deze niveaus in beginsel op basis van de grenswaarden dienen te worden beoordeeld, kan dat leiden tot onwerkbare situaties. In dat geval kunnen aanvullend andere methodieken (zoals bouwkundige opnamen, schademonitoring, vervormingsmetingen) worden gebruikt om het risico op schade verder te beoordelen en te onderbouwen.

5

Beoordeling van een berekende trillingssnelheid

Bij de beoordeling van een berekende trillingssnelheid dient de opsteller van de berekening rekening te houden met de onzekerheid die hoort bij het resultaat van een berekening en de veiligheidsfactoren die horen bij de grenswaarden. De richtlijn noemt hiervoor geen veiligheidsfactoren. Het is aan de opsteller van de berekening om deze onzekerheid zichtbaar in rekening te brengen bij de berekening van V_{top}. Dit kan bijvoorbeeld door middel van een overschrijdingskans. De berekeningsmethode van de trillingsbelasting dient gevalideerd te zijn.

Toepassingsgebied

Deze meet- en beoordelingsrichtlijn is bedoeld om te worden toegepast op bestaande bouwwerken (zie kader 3). De richtlijn geeft inzicht in de beoordeling van de gemeten trillingsbelasting en de ordegrootte van de kans op schade als gevolg van een bepaald trillingsniveau.

De richtlijn heeft betrekking op alle trillingsbronnen (zie kader 4) voor zover de daardoor veroorzaakte trillingen in het beschouwde frequentiebereik voorkomen.

De grenswaarden in de richtlijn kunnen ook worden gebruikt voor de beoordeling van een berekende trillingssnelheid (zie kader 5) voor nieuw te bouwen bouwwerken.

De richtlijn heeft geen rechtstreekse juridische doorwerking in de publiekrechtelijke bouwregelgeving.
In het Bouwbesluit 2012 zijn wel algemene regels gesteld ter voorkoming van schade als gevolg van bouwen en/of slopen (zie artikel 8.1en artikel 8.2 lid c van het Bouwbesluit 2012). Ter nadere invulling van die bepaling(en) kan de richtlijn door de gemeente (beleidsmatig) worden gehanteerd.
Binnen de jurisprudentie heeft de richtlijn inmiddels een zekere status opgebouwd. De grenswaarden in de richtlijn kunnen door de rechterlijke macht gebruikt worden bij de beoordeling van de rechtmatigheid van handelen.

6

Bouwwerk
De term bouwwerk wordt niet als zodanig gedefinieerd in de Woningwet en de Wabo. De gehanteerde definitie is overgenomen uit de Model-bouwverordening van de Vereniging van Nederlandse Gemeenten (VNG) die ook door de Afdeling bestuursrechtspraak van de Raad van State wordt aangehouden (ABRVS 16 april 2014 ECLI:NL:RVS:2014:1331).

7

Bouwwerk geen gebouw zijnde
Definitie in basis overgenomen uit het Bouwbesluit 2012, artikel 1.1 maar aangepast voor de specifieke toepassing in de richtlijn. Dit heeft te maken met het feit dat voor de richtlijn het bouwwerk geen gebouw zijnde moet zijn opgebouwd uit steenachtige materialen. In het bouwbesluit worden een hondenhok, een steiger en een tunnel als voorbeelden genoemd. De richtlijn is met betrekking tot trillingen niet van toepassing op deze voorbeelden (zie ook hoofdstuk 3).

8

Dominante frequentie
Indien een frequentiespectrum meerdere pieken bevat, dient hiervan de dominante frequentie te worden bepaald. Dit hoeft niet de frequentie te zijn met de hoogste topwaarde (de zogenoemde fysisch dominante frequentie). Het gaat om de verhouding tussen de topwaarde van de trillingssnelheid behorende bij een frequentie en de karakteristieke grenswaarde bij dezelfde frequentie. Een frequentie is dominant als de bijbehorende topwaarde het dichtst bij de grenswaarde bij die frequentie ligt, of de grootste overschrijding geeft van de grenswaarde bij die frequentie. In paragraaf 9.4 is een voorbeeld uitgewerkt voor de bepaling van de dominante frequentie.

9

Gebeurtenis
Voorbeelden van gebeurtenissen:

- een passage van een trein, auto, tram, vrachtauto, tractor, laadschop, tank enzovoort is 1 gebeurtenis;
- twee voertuigen tegelijk vormen samen 1 gebeurtenis. De hoogste v_{top} van die gebeurtenis gaat mee in de statistische berekening;
- twee voertuigen kort na elkaar vormen 2 gebeurtenissen. Het zijn verschillende bronnen;
- het heien van 1 paal, is 1 gebeurtenis;
- het intrillen van 1 damwand is 1 gebeurtenis;
- het uittrillen van 1 damwand of buispaal is 1 gebeurtenis;
- als van blok wordt gewisseld op dezelfde paal/damwand: 2 gebeurtenissen omdat er van bron wordt gewisseld;
- onderbrekingen van hei- en intrilwerk binnen dezelfde paal of plank: 2 gebeurtenissen als de onderbreking 5 seconden of langer is;
- heien met snelslaghamer: zie heien;
- sloopwerk met pneumatische of hydraulisch beitel. Ook hier geldt dat als er een pauze van 5 seconden of meer tussen de werkzaamheden zit, er sprake is van een nieuwe gebeurtenis;
- het vallen van materiaal bij slopen: 1 gebeurtenis per vallend object.

10

Gebouw
Definitie overgenomen uit de Woningwet artikel 1 lid 1.

Termen en definities

De termen en definities zijn, voor zover van toepassing, in overeenstemming met NEN ISO 2041 [4].

Amplitude-frequentiekarakteristiek
de verhouding tussen ingaand en uitgaand signaal van een systeem bij een frequentie, gegeven voor een bepaald frequentie-interval.

Bouwwerk (zie kader 6)
een constructie van enige omvang van hout, steen, metaal of ander materiaal, die op de plaats van bestemming hetzij direct of indirect met de grond verbonden is, hetzij direct of indirect steun vindt in of op de grond, bedoeld om ter plaatse te functioneren.

Bouwwerk geen gebouw zijnde (zie kader 7)
een bouwwerk of gedeelte daarvan voor zover dat niet in een gebouw ligt en dat is opgetrokken uit steenachtige materialen.

Continue trilling
een trilling, die zodanige tijd continu aanwezig is dat resonantie op kan treden.

Dominante frequentie (zie kader 8)
de frequentie waarbij de karakteristieke grenswaarde bij die frequentie gedeeld door de trillingssnelheid bij die frequentie de kleinste waarde geeft.

Draagconstructie
het deel van een gebouw dat ervoor zorgt dat het gebouw als geheel en in het bijzonder de vloeren hun dragende functie kunnen blijven vervullen.

Frequentie
aantal trillingen per seconde.

Fysisch dominante frequentie
de overheersende frequentie in dat deel van het signaal waar de topwaarde optreedt.

Gebeurtenis (zie kader 9)
één of meerdere trillingen ten gevolge van een aanwijsbare bron die voorafgegaan wordt en gevolgd wordt door een periode zonder trillingen van de bron van tenminste 5 seconden.

Gebouw (zie kader 10)
bouwwerk dat een voor mensen toegankelijke overdekte geheel of gedeeltelijk met wanden omsloten ruimte vormt.

Harmonische trilling
het verloop van de trillingssnelheid is te beschrijven met een enkele sinusfunctie.

Herhaalde kortdurende trilling
een kortdurende trilling die meermalen voorkomt, steeds gescheiden door een kort tijdsinterval waarin een rustsituatie heerst.

Integriteit
samenhang van de delen zonder noemenswaardige scheurvorming of degradatie in sterkte.

Karakteristieke grenswaarde
de frequentieafhankelijke topwaarde van de trillingssnelheid die hoort bij de betreffende gebouwcategorie zonder toepassing van veiligheidsfactoren.

11

Kortdurende trilling

De kortdurende trilling hoort bij gebeurtenissen zoals een explosie (mijnbouw), het vallen van zwaar materiaal (bijvoorbeeld bij slopen) of een botsing. De aanstoting is dusdanig kort in tijd dat het bouwwerk of een onderdeel van het bouwwerk niet in resonantie komt. Het aantal aanstotingen is bovendien zo gering dat vermoeiing van materialen in een bouwwerk gedurende de levensduur van het bouwwerk niet plaatsvindt. Daarom is een tijdsinterval van 1 jaar gekozen om een kortdurende trilling te onderscheiden van de andere typen.

Bij heien is in ieder geval sprake van herhaald kortdurende trillingen. De periode tussen de aanstoting is steeds kort (ordegrootte seconde(n)) en het aantal aanstotingen in korte tijd relatief groot. Ook als maar één paal wordt geheid, is toch sprake van een herhaald kortdurende trilling. Paragraaf 10.2.4 gaat verder in op het type trilling. In de bijbehorende toelichting zijn voorbeelden opgenomen.

Kortdurende trilling (zie kader 11)
trilling met een kortdurend (doorgaans korter dan enkele seconden), uitdempend karakter. De trilling wordt veroorzaakt door een stootvormige excitatie die maximaal één keer per jaar voorkomt.

Meetduur
de tijdsduur waarin met één configuratie meetpunten een meting wordt uitgevoerd.

Meetpunt
positie op een object waar een trillingsgrootheid (versnelling, snelheid, verplaatsing) wordt gemeten.

Meetrichting
de richting (horizontaal dwars, horizontaal langs en verticaal) waarin de trillingsgrootheid (versnelling, snelheid, verplaatsing) in een meetpunt wordt gemeten.

Meting
het bepalen van de momentane waarde van de trillingsgrootheid gedurende een zeker aaneengesloten tijdsinterval door middel van een meetmethode.

Momentane waarde
de waarde van een variërende grootheid op een zeker tijdstip.

Snelheid
een vectoriële grootheid die de tijdsafgeleide van de verplaatsing weergeeft.

Spectrale dichtheidsfunctie
het in de tijd gemiddelde kwadraat van een over een voldoende klein frequentie-interval gefilterde trillingsgrootheid (versnelling, snelheid, verplaatsing) gedeeld door de breedte van het frequentie-interval.

Stochastische trilling
bij een stochastische trilling wordt de waarde van de amplitude bepaald door het toeval.

Topwaarde
de momentane waarde van een grootheid met de in absolute zin grootste afwijking ten opzichte van de nulwaarde.

Trilling
een variatie van een grootheid (verplaatsing, snelheid, versnelling) als functie van de tijd, die de beweging of de positie van een systeem beschrijft waarbij de grootheid afwisselend groter en kleiner is dan een gemiddelde waarde.

Trillingsbelasting
de combinatie van de topwaarde van de trillingssnelheid en de bijbehorende dominante frequentie.

Trillingstijd
de kleinste verschuiving in de tijd waarbij een periodieke tijdsfunctie met zichzelf samenvalt.

Verplaatsing
een vectoriële grootheid die de verandering van een positie van een lichaam of van een punt aanduidt ten opzichte van een zekere referentie.

Versnelling
een vectoriële grootheid die de tijdsafgeleide van de snelheid weergeeft.

12

NEN 999:1977

Eind 2016 was NEN 999:1997 nog van kracht hoewel delen van de tekst al zijn opgenomen in de Europese norm NEN-EN-ISO 80000-1:2013. De verwachting is dan ook dat NEN 999:1997 op termijn zal worden ingetrokken en de inhoud wordt overgenomen in de NEN-EN-ISO 80000 serie.

Eenheden, grootheden en symbolen

5.1 Eenheden

De te gebruiken eenheden en grootheden moeten in overeenstemming zijn met het Internationale Stelsel van Eenheden (SI), zoals vermeld in NEN-EN-ISO 80000-1:2013 en NEN 999:1977 (zie kader 12).

5.2 Grootheden

a	versnelling, in m/s^2
f	frequentie, in Hz
f_e	eigenfrequentie, in Hz
g	zwaartekrachtversnelling (9,81 m/s^2)
T	trillingstijd, in s
u	verplaatsing, in mm
V, v	snelheid, in mm/s

5.3 Gehanteerde symbolen

De in deze richtlijn gehanteerde symbolen zijn hieronder weergegeven.

a_d	rekenwaarde van de topwaarde van de trillingsversnelling, in m/s^2
a_{kar}	karakteristieke waarde van de grenswaarde van de trillingsversnelling, in m/s^2
a_r	rekenwaarde van de grenswaarde van de trillingsversnelling in m/s^2
a_{top}	de grootste trillingsversnelling (in absolute zin) gedurende de hele meetperiode, in m/s^2
C_D	factor voor de laagdikte
f	frequentie, in Hz
f*	frequentie in Hz, waarvoor $\varphi(f) = 0$
f_{dom}	De voor de beoordeling dominante frequentie, in Hz
f_{max}	grensfrequentie van het laagdoorlaatfilter, in Hz
f_{min}	grensfrequentie van het hoogdoorlaatfilter, in Hz
H	laagdikte, in m
t	tijd, in s
V(t)	momentane waarde van de trillingssnelheid, in mm/s
V_d	Rekenwaarde van de topwaarde van de trillingssnelheid, in mm/s
V_{kar}	karakteristieke waarde van de grenswaarde van de trillingssnelheid, in mm/s
V_r	rekenwaarde van de grenswaarde van de trillingssnelheid, in mm/s
V_{stat}	de statistische bepaalde topwaarde van een trillingssnelheid, in mm/s
V_{top}	de grootste trillingssnelheid (in absolute zin) gedurende de gehele meetperiode, in mm/s
$V_{top,i}$	de grootste trillingssnelheid (in absolute zin) in het meetinterval i, in mm/s
γ_s	partiële veiligheidsfactor die de bouwkundige staat en de monumentale status in rekening brengt
γ_t	partiële veiligheidsfactor die het type trilling in rekening brengt
γ_v	partiële veiligheidsfactor die het type meting in rekening brengt
$\varphi(f)$	maximale referentie fase-frequentiekarakteristiek voor het meetsysteem, in graden
$\varphi_m(f)$	de fase-frequentiekarakteristiek van het meetsysteem, in graden
$\varphi^*(f)$	referentie fase-frequentiekarakteristiek, in graden
$\Delta\varphi(f)$	toelaatbare faseafwijking van het meetsysteem ten opzichte van de referentie fase-frequentiekarakteristiek, in graden

13

Oorzakelijk verband

Als de trillingsbelasting hoger is dan de grenswaarde, betekent dat een verhoogde kans op schade. Het is niet zeker dat daadwerkelijk schade is of zal ontstaan. Om het oorzakelijk verband (causaal verband) achteraf tussen een trillingsbelasting en een opgetreden schade in juridische zin vast te kunnen stellen, is meer nodig dan alleen een overschrijding van de grenswaarden. Omdat veel verschillende factoren een rol spelen en tot een zelfde schadebeeld kunnen leiden, is onderzoek naar de invloed van deze factoren ook noodzakelijk. Alleen door de combinatie van alle factoren te bekijken, kan de mogelijke relevantie van de factor "trillingen" worden beoordeeld. In [5] zijn aanwijzingen opgenomen over de hiervoor geschikte onderzoekswijze.

Naast de analyse van de schadefactoren, is ook de bouwkundige opname een belangrijk instrument bij de bepaling van het oorzakelijk verband. Door de bouwkundig opname van het bouwwerk voor een bepaalde trillingen veroorzakende activiteit te vergelijken met de opname na de trillingen veroorzakende activiteit, ontstaat inzicht in het moment van ontstaan van de schade en de omvang van de ontstane schade. In [6] is omschreven op welke wijze een bouwkundige opname kan worden uitgevoerd.

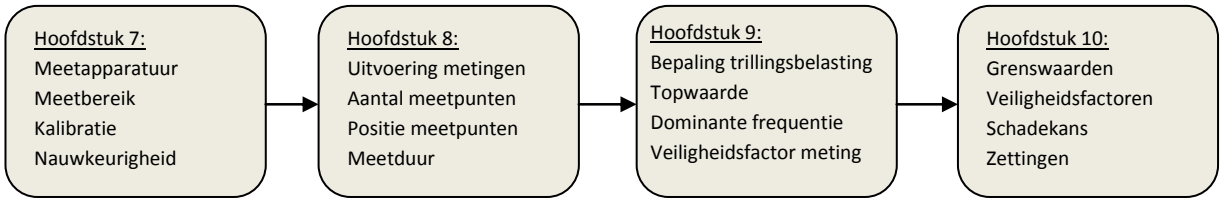
Eisen en bepalingsmethode

6.1 Eisen

Om de kans op schade aan de draagconstructie en aan niet-dragende delen van een bouwwerk als gevolg van trillingen acceptabel klein te houden, dient de trillingsbelasting niet hoger te zijn dan de grenswaarden opgenomen in hoofdstuk 10.
Zolang de grenswaarden uit de richtlijn niet worden overschreden, is de kans op het ontstaan van nieuwe schade of het verergeren van bestaande schade aanvaardbaar klein. Een omgekeerde redenering mag niet zo maar gevolgd worden. Overschrijding van de grenswaarden hoeft niet daadwerkelijk tot schade te leiden. Het zegt alleen dat de kans op schade zodanig is toegenomen dat die kans mogelijk niet meer aanvaardbaar is. In hoofdstuk 10 is de toename van de kans op schade nader gespecificeerd. Of de toename van de kans eventueel alsnog aanvaardbaar kan zijn, dient per situatie te worden afgewogen. De grenswaarden die in deze richtlijn zijn gegeven, bevatten een veiligheidsmarge. Gemiddeld genomen zal pas bij een zekere overschrijding van de grenswaarden schade aan de draagconstructie optreden. Voor het aantonen van een oorzakelijk verband (zie kader 13) tussen de trilling en schade dienen, naast de trillingsbelasting en de bouwkundige staat van een gebouw, ook andere mogelijke schadeoorzaken in beschouwing te worden genomen.

6.2 Bepalingsmethode

De bepalingsmethode van de trillingsbelasting gaat uit van de uitvoering van trillingsmetingen. Bij de uitvoering van de trillingsmetingen dienen de algemene voorwaarden volgens hoofdstuk 7 in acht te worden genomen. De trillingsmetingen dienen op basis van hoofdstuk 8 te worden uitgevoerd. De resultaten van de trillingsmetingen dienen te worden verwerkt volgens hoofdstuk 9. De wijze van beoordeling van de trillingsbelasting is omschreven in hoofdstuk 10. In figuur 6.1 zijn de verschillende onderwerpen per hoofdstuk weergegeven.



Figuur 6.1 Overzicht hoofdstukindeling.

Als de trillingsbelasting door middel van een berekening wordt bepaald, dient bij de bepaling van de trillingsbelasting rekening te worden gehouden met de onzekerheid die bij een berekening hoort door bijvoorbeeld een overschrijdingskans in rekening te brengen. Voor de beoordeling van de trillingsbelasting dient hoofdstuk 10 te worden toegepast.

14

Frequentiebereik

Frequenties in het meetsignaal buiten het interval van 1 tot 100 Hz, dienen te worden uitgefilterd overeenkomstig bijlage 1. Een nieuwe techniek zoals sonisch boren vindt plaats met trilfrequenties tussen 150 en 200 Hz. Ten behoeve van de 2017 revisie van de richtlijn ontbreken de gegevens om de mogelijke invloed van trillingen bij deze frequenties in relatie tot de kans op schade vast te stellen. Daarom is het frequentiebereik vooralsnog niet uitgebreid.

Bij hoge gebouwen kunnen ook frequenties kleiner dan 1 Hz van belang zijn. Deze frequenties vallen buiten het bereik van de richtlijn.

15

Meetbereik

In eerdere versies van de richtlijn is voor de versnellingswaarde een minimale waarde van 10 mm/s^2 opgenomen. Deze waarde past niet bij de laagste trillingssnelheid die moet kunnen worden gemeten bij de laagste frequentie van 1 Hz maar hoort bij een frequentie van 10 Hz. Bij een frequentie van 1 Hz hoort een trillingsversnelling van (afgerond) 1 mm/s^2. De omrekening van snelheid naar versnelling en verplaatsing is uitgevoerd volgens onderstaande tabel. De groen gemarkeerde waarden zijn overgenomen in paragraaf 7.2.

	Frequentie [Hz]				
Grootheid	1	1	100	100	
versnelling	1,26	314,16	125,66	31416	mm/s2
snelheid	0,20	50,00	0,20	50,00	mm/s
verplaatsing	0,03	7,96	0,00032	0,08	mm

16

Meetketen

Er bestaat een grote verscheidenheid aan trillingsmeetapparatuur. Het is binnen de richtlijn niet de bedoeling om apparatuur uit te sluiten zolang ze maar voldoet aan de eisen met betrekking tot frequentiebereik, meetbereik en fasekarakteristiek. Daarom is onderscheid gemaakt tussen de verschillende onderdelen in de meetketen. Veel moderne meetapparatuur combineert verschillende functies of zelfs alle functies waardoor de losse functies niet meer afzonderlijk herkenbaar zijn.

Meetapparatuur

7.1 Frequentiebereik

Deze richtlijn heeft betrekking op de beoordeling van de invloed van de trillingssnelheid in het frequentiebereik (zie kader 14) van 1 tot 100 Hz. In bijlage 1 zijn aanwijzingen en specificaties opgenomen voor de te gebruiken meetapparatuur.

7.2 Meetbereik

De totale meetketen heeft een meetbereik (zie kader 15) van minimaal 0,2 mm/s tot 50 mm/s binnen het frequentiebereik van 1 tot 100 Hz. Een afwijkend meetbereik mag alleen worden toegepast als kan worden aangetoond dat het meetbereik de dominante trillingen van de bron omvat.

Indien de trillingsversnelling of trillingsverplaatsing wordt gemeten, dient het bereik van de meetapparatuur te voldoen aan de volgende waarden:

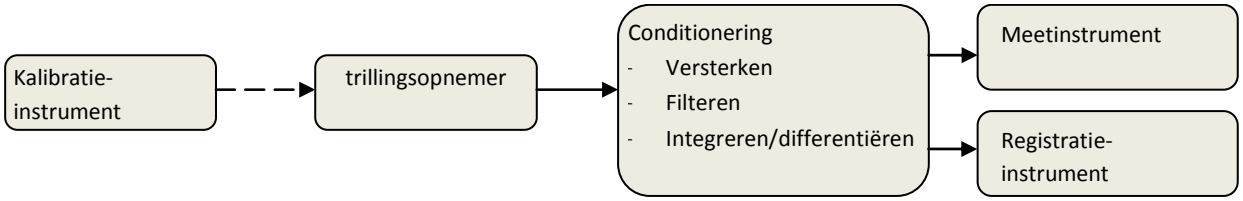
Versnelling: van 1 mm/s^2 tot 30 m/s^2
Verplaatsing: van 0,3 µm tot 8 mm

7.3 Meetapparatuur

7.3.1 Algemeen

In algemene zin bestaat de meetketen (zie kader 16) uit:
- een trillingsopnemer;
- een conditioneringsinstrument;
- een meetinstrument;
- een registratie-instrument;
- een kalibratie-instrument.

Figuur 7.1 geeft een schematisch overzicht van de meetketen. De verschillende onderdelen uit de meetketen kunnen gecombineerd zijn in een meetapparaat. In navolgende paragrafen is een beschrijving gegeven van de verschillende onderdelen uit de meetketen.



Figuur 7.1 Schematisch overzicht meetketen.

17

Registratie-instrument

Moderne trillingsmeetapparatuur opereert in het digitale domein door middel van op computer gebaseerde technieken. Andere analoge of digitale apparatuur zoals analoge magneetbandrecorders (FM) of digitale magneetbandrecorders (DAT) mogen gebruikt worden voor de opslag van real time meetsignalen als ze maar voldoen aan de algemene eisen uit 7.1, 7.2 en 7.5.

18

Meetinstrument

Het meetinstrument is bedoeld om de waarde van V_{top} af te kunnen lezen. Veel meetapparatuur toont de trillingssnelheid $V_{top,i}$ per ingesteld tijdsinterval en de bijbehorende dominante frequentie f_{dom} in dat tijdsinterval. Door bijvoorbeeld elke 10 of 30 seconden $V_{top,i}$ en f_{dom} te tonen, ontstaat goed inzicht in het verloop van de trillingssnelheid gedurende de meetperiode. Dat heeft voordelen in verband met brondetectie en alarmering op basis van het meetresultaat.

Als de metingen zijn uitgevoerd met versnellingsopnemers of verplaatsingsopnemers dan dient het versnellingssignaal te worden omgezet in een snelheidssignaal voordat V_{top} en f_{dom} worden bepaald.

V_{top} en f_{dom} kunnen (achteraf) ook bepaald worden op basis van de opgeslagen real time meetsignalen van het registratie-instrument door middel van software. In dat geval dient de software te voldoen aan de eisen met betrekking tot het frequentiebereik en de nauwkeurigheid.

19

Kalibratie

De trillingsmeetapparatuur dient met regelmatige intervallen door een onafhankelijke kalibratiedienst te worden gekalibreerd. In bijlage K van NEN 3140 en in bijlage A van NEN 10012 staan richtlijnen voor het kalibratie-interval. Het interval is afhankelijk van het gebruik van de apparatuur zoals de omstandigheden waaronder de metingen worden uitgevoerd, de deskundigheid van de gebruiker en de gebruiksfrequentie. In de praktijk wordt een kalibratie-interval van één keer per jaar tot één keer per 2 jaar aanbevolen. Het kalibratie-interval mag niet groter zijn dan 2 jaar.

Bij de keuze van de kalibratiemethode dient bij het gebruik van trillingssnelheidsensoren (geofoons) rekening te worden gehouden met het frequentiegebied tussen 1 en 5 Hz. Als dit frequentiegebied in de metingen van belang is, dan dient de kalibratiemethode ook dit frequentiegebied te bevatten.

Ook de gebruiker dient voor aanvang van de trillingsmetingen de meetapparatuur te controleren op een goede werking. Deze controle mag op een eenvoudigere wijze worden uitgevoerd dan de kalibratie door de kalibratiedienst. Paragraaf 8.1 gaat in op de gebruikerscontrole.

20

Nauwkeurigheid

De eis aan de nauwkeurigheid heeft betrekking op de gemeten waarde. Dit betekent dat bij de ondergrens van het dynamisch bereik (0,2 mm/s), de trillingssnelheid met een nauwkeurigheid van 0,02 mm/s (10%) moet worden vastgesteld. Dit komt overeen met een nauwkeurigheid van 1 dB.

De nauwkeurigheid van het meetresultaat wordt niet alleen bepaald door de nauwkeurigheid van de meetapparatuur zelf maar ook door de uitvoering van de trillingsmeting. Om de gevraagde nauwkeurigheid te behalen, is het van belang dat zorgvuldig wordt gewerkt. Dit betekent:

- De trillingssensor waterpas opstellen;
- Zorgen voor een stijve verbinding tussen de opnemer en het bouwwerk. Vooral bij het gebruik van bevestigingsbeugels of klemmen dient veel aandacht te worden geschonken aan het goed vastdraaien van de bouten, schroeven en moeren zoals ook omschreven in 8.6.

21

FFT

De FFT analyse wordt gebruikt om de dominante frequentie te bepalen. Veel analyzers laten een relatief spectrum zien waarbij de hoogste piek in het spectrum een waarde 1 krijgt en de andere pieken een waarde naar verhouding krijgen. De topwaarde V_{top} mag niet uit het FFT spectrum worden afgelezen maar dient in het tijdsdomein te worden bepaald zoals omschreven in 9.2.

22

Bemonsteringsfrequentie

Voor de sample frequentie geldt als algemene regel dat deze ten minste 10 maal hoger moet zijn dan de hoogste frequentie in het van belang zijnde frequentie-interval. Indien bijvoorbeeld een trilling wordt gemeten met een frequentie van 40 Hz, dan is een sample frequentie van 400 Hz voldoende. Om tot 100 Hz te kunnen meten is een bemonsteringsfrequentie van 1000 Hz nodig.

7.3.2 Trillingsopnemer

De trillingsopnemer dient een geijkte absolute opnemer te zijn die in het frequentiegebied tussen 1 en 100 Hz een elektrisch signaal genereert dat lineair-proportioneel is met de versnellings-, snelheids- of verplaatsingscomponent van de trilling in de gekozen meetrichting. Om een betrouwbare meting te kunnen verrichten, dient de opnemer te voldoen aan het meetbereik zoals aangegeven in 7.2.

7.3.3 Conditionering van het meetsignaal

Conditionering van het meetsignaal is noodzakelijk om het door de trillingsopnemer afgegeven signaal te verwerken tot een bruikbaar signaal voor het meet- of registratie-instrument. De conditionering kan bestaan uit:

- versterken;
- filteren;
- integreren of differentiëren.

Deze functies kunnen eventueel gecombineerd worden ondergebracht in de conditioneringsapparatuur.
In bijlage 1 zijn de eisen aan de filtering en de fasekarakteristiek opgenomen.

7.3.4 Registratie-instrument

Het registratie-instrument (zie kader 17) kan worden gebruikt voor het vastleggen van het real time meetsignaal voor verwerking en analyse achteraf. De registratie dient zodanig te zijn dat het gehele frequentiebereik van 1 tot 100 Hz binnen het gevraagde dynamische meetbereik wordt bestreken.

7.3.5 Meetinstrument

Bij beoordeling op trillingsnelheden, dient het meetinstrument (zie kader 18) per meetrichting de waarde voor $V_{top,i}$ en f_{dom} aan te geven. Bij beoordeling op trillingsversnellingen dient het meetinstrument per meetrichting de waarde voor a_{top} aan te geven.

7.4 Kalibratie

De meetapparatuur dient te zijn gekalibreerd (zie kader 19). Door middel van dynamisch kalibreren wordt de amplitude-frequentierespons van het meetsysteem gecontroleerd en eventueel gecorrigeerd ten opzichte van een bekend kalibratiesignaal. In [7] staan aanwijzingen met betrekking tot de wijze waarop de kalibratie kan worden uitgevoerd. Deze wijze is afhankelijk van het gekozen type trillingsopnemer en meet-en/of registratie-instrument. De gekozen kalibratiemethode moet aansluiten bij het frequentiebereik uit paragraaf 7.1 en dynamisch bereik uit paragraaf 7.2. De hele meetketen van opnemer tot meetinstrument en/of registratie-instrument dient bij voorkeur in één keer gekalibreerd te worden binnen het van belang zijnde meetgebied, zowel qua frequentie als trillingsgrootheid. Het kalibratie-interval mag niet groter zijn dan 2 jaar.

7.5 Nauwkeurigheid

Bij de bepaling van de trillingsgrootheid dient een nauwkeurigheid (zie kader 20) behaald te worden van 10%. De nauwkeurigheidseis heeft betrekking op de gehele meetketen.
Bij het gebruik van digitale instrumenten zoals data acquisitie systemen (DAC) en Fast Fourier Analyzers is aandacht nodig voor de volgende randvoorwaarden om voldoende nauwkeurigheid te behalen:

- DAC ≥ 16 bits A/D converter;
- resolutie FFT (zie kader 21) spectrum ≤ 1 Hz;
- bemonsteringsfrequentie (zie kader 22) A/D conversie > 1000 Hz.

23

Goede werking

De controle op de goede werking van de trillingsmeters kan door de gebruiker op verschillende manieren worden uitgevoerd:

a. Door de trillingssensor op een trillingsbron te bevestigen die de sensor met een bekende trillingssnelheid en frequentie in trilling brengt. De gebruiker leest de topwaarde van de trillingssnelheid en de dominante frequentie af en vergelijkt dit met de instelling van de trillingsbron.
b. Bij trillingssensoren met een geofoon kan een elektrische testpuls worden toegevoerd aan de sensor. Veel apparatuur is met deze testmogelijkheid uitgerust. De reactie van de sensor (topwaarde trillingssnelheid en dominante frequentie) wordt afgelezen en vergeleken met de waarden die in de handleiding zijn opgenomen.
c. Door de trillingssensoren dicht bij elkaar te plaatsen en gelijktijdig een trillingsmeting met dezelfde bron (bijvoorbeeld een treinpassage of het intrillen van een damwand) uit te voeren.

Methode a is het meest compleet en betrouwbaar omdat de hele meetketen dynamisch wordt gecontroleerd. Inmiddels bestaan er kleine triltafels die ook de grotere sensoren op een betrouwbare wijze in trilling kunnen brengen.
Methode b is relatief eenvoudig toe te passen maar heeft als nadeel dat geen dynamische controle plaatsvindt maar alleen een elektrische controle. De methode is alleen bij geofoons toepasbaar en niet bij versnellingsopnemers.
Methode c is altijd toe te passen maar introduceert een extra onzekerheid in het meetresultaat doordat de positie van de trillingssensor kan zorgen voor een afwijking in het trillingsniveau. Als de afstand tot de trillingsbron echter voldoende groot is, dan is het verschil in meetpositie minder van invloed. Als vuistregel kan worden aangehouden dat de afstand tussen de meetpunten niet groter mag zijn dan 1% van de afstand tot de bron. Uiteraard dienen alle trillingssensoren goed waterpas te zijn opgesteld en stijf bevestigd te zijn op hetzelfde object. Bij methode c moet de invloed van stoorbronnen worden voorkomen of buiten de beoordeling worden gehouden.
Bij alle methoden dient de afwijking kleiner te zijn dan 10% ten opzichte van de referentie (a en b) of de sensoren onderling (c).

24

Aantoonbaar representatief

De representativiteit van de metingen is een belangrijk aandachtspunt omdat de beoordeling van de trillingen plaatsvindt op basis van de hoogste topwaarde van de trillingssnelheid. Het is dus van belang dat met zoveel mogelijk zekerheid de situatie wordt gemeten die deze hoogste topwaarde veroorzaakt. Bij de controle op representativiteit moeten de volgende vragen worden beantwoord:

- Trillingsbron: wordt de juiste bron gemeten? Met de juiste snelheid behorend bij het productieproces of de verkeersomstandigheden? Bij verkeer als bron: met alle relevante typen treinen, trams of voertuigen? Met de juiste belasting van de trillingsbron? Met de bron op de juiste positie?
- Overdracht: staat de bron op de juiste wijze opgesteld (met of juist zonder trillingsreducerende voorziening)? Is de bodem niet bevroren? Is het grondwaterpeil niet te afwijkend van normaal?
- In de woning: zijn stoorbronnen uitgeschakeld?

Ook als een meting onder aantoonbaar representatieve omstandigheden is uitgevoerd, kan er veel variatie optreden in de trillingsniveaus. Dit is een gevolg van de complexe overdracht van trillingen vanuit de bron tot in het bouwwerk. Daarom is het van belang een meetduur te kiezen met voldoende lengte. Hierdoor ontstaat niet alleen beter inzicht in de statistische verdeling van de trillingsniveaus maar kan ook de representativiteit van de metingen sterk toenemen omdat meer gebeurtenissen van hetzelfde type bron worden gemeten.

Meetmethode

8.1 Algemeen

Dit hoofdstuk beschrijft de wijze waarop de trillingsmetingen worden uitgevoerd en gaat in op:
1. welke grootheid kan worden gemeten;
2. de omstandigheden waaronder de metingen worden uitgevoerd;
3. welk type meting kan worden gekozen;
4. de keuze van de meetpunten;
5. de bevestiging van de trillingsopnemer;
6. de meetduur.

De te gebruiken meetapparatuur moet voldoen aan de in hoofdstuk 7 aangegeven voorwaarden.
Voorafgaand aan de meting en na beëindiging van de meting dient het meetsysteem gecontroleerd te worden op de goede werking (zie kader 23). Het verdient hierbij de voorkeur het hele meetsysteem van opnemer tot uitlees-registratie-apparatuur in één keer te controleren.

8.2 Te meten grootheid

Bij de beoordeling van de trillingsbelasting is de trillingssnelheid de algemene toetsingsgrootheid. Door de trillingssnelheid te meten, kan direct de toetsingsgrootheid worden bepaald. In de praktijk wordt ook met versnellingsopnemers gewerkt. Dit betekent dat het meetsignaal door middel van integratie moet worden bewerkt tot een trillingssnelheid voordat het trillingsniveau kan worden beoordeeld.
In specifieke omstandigheden dient ook de trillingsversnelling te worden bepaald. Dit kan door gebruik te maken van versnellingsopnemers maar ook door de gemeten trillingssnelheid door middel van differentiatie te bewerken tot trillingsversnelling.

8.3 Omstandigheden

Er moet gemeten worden onder omstandigheden die aantoonbaar representatief (zie kader 24) zijn voor de trillingsbelasting waaraan een bouwwerk wordt onderworpen. De representativiteit heeft niet alleen betrekking op de trillingsbron maar ook op de overdracht van de trillingen door de bodem en de omstandigheden in of aan het bouwwerk.

Als een oorzakelijke relatie tussen trillingen en een bepaalde bron moet worden aangetoond, dienen zowel de trillingen tijdens het in werking zijn van de bron als de achtergrondtrillingen zonder het in werking van de bron te worden gemeten. De achtergrondtrillingen moeten worden gemeten voorafgaand aan en na afloop van de metingen waarbij de trillingsbron in werking is. De meetduur voor de achtergrondtrillingen kan afwijken van de meetduur van de trillingsbron (zie ook paragraaf 8.7).

8.4 Type meting

Het type meting hangt af van het type bouwwerk en het aangrijpingspunt van de trillingen: vanuit de bodem via de fundering of op een andere manier. In de richtlijn zijn drie typen metingen omschreven:
1. de indicatieve meting;
2. de beperkte meting;
3. de uitgebreide meting.

25

Tabel 8.1

Bouwwerken geen gebouw zijnde kunnen niet altijd op dezelfde wijze beoordeeld worden als een gebouw. Daarom blijft de primaire keus een uitgebreide meting. Als het bouwwerk geen gebouw zijnde qua opbouw, aangrijppunt van trillingen vergelijkbaar is met een gebouw, dan vormt dat de motivatie om te volstaan met een indicatieve of beperkte meting.

26

Tabel 8.2

Deze tabel biedt een samenvatting van het aantal meetpunten, hun posities en de te meten trillingsrichtingen op basis van het aangrijpingspunt van de trillingen op het bouwwerk en het type meting.

Met betrekking tot het aangrijpingspunt is onderscheid gemaakt tussen trillingen vanuit de bodem en trillingen die niet vanuit de bodem aangrijpen maar bijvoorbeeld door de lucht als gevolg van laagfrequent geluid. In de eerste kolom is dit "anders" genoemd.

Bij het type meting is onderscheid te maken tussen de drie typen metingen. Hieruit volgt het aantal meetpunten. Voor de uitgebreide meting is opgenomen dat het aantal afhankelijk is van het doel van de meting en de situatie. De meetpunten in de uitgebreide meting dienen zowel op de draagconstructie als niet dragende delen te worden gekozen.

In de kolom "posities" is samengevat waar de meetpunten moeten worden gekozen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de beoordeling van de draagconstructie of de kans op zettingen. Dit onderscheid betekent dat het aantal meetpunten toe kan nemen ten opzichte van de eerdere edities van de richtlijn. Als bijvoorbeeld een *beperkte* meting wordt gekozen voor zowel de draagconstructie als voor zettingen, dan zijn in totaal drie meetpunten nodig: twee op de fundering en één op de hoogste verdiepingsvloer. Als gekozen wordt voor twee meetpunten, bijvoorbeeld één op de fundering en één op de hoogste verdiepingsvloer, dan is voor de beoordeling van de draagconstructie sprake van een beperkte meting maar voor de beoordeling van de zettingen van een indicatieve meting. Op funderingsniveau is immers maar één meetpunt aanwezig.

In de kolom richtingen is door middel van de letters A t/m C aangegeven welke trillingsrichtingen minimaal dienen te worden gemeten. Dit onderscheid kan van belang zijn in verband met het beschikbaar aantal kanalen van een meetsysteem.

27

Zettingen

Trillingen in de bodem kunnen leiden tot verdichting van de bodem. Bij bouwwerken met trillingsgevoelige funderingen (zie hoofdstuk 10) kan deze verdichting leiden tot ongelijke zettingen van de constructie en daarmee tot schade.

Door Deltares is in het kader van de revisie van de richtlijn onderzoek uitgevoerd naar de trillingsbelasting waarbij die verdichting op kan treden. In de rapporten [8, 9] is achtergrondinformatie te vinden over de onderzoeksresultaten.

Om het risico op ongelijke zettingen door verdichting van de bodem als gevolg van trillingen te kunnen beoordelen, worden trillingsmetingen uitgevoerd op de fundering van een bouwwerk. In de richtlijn 2017 is voor dit onderzoeksdoel voor de beperkte meting een afwijkende positie van de meetpunten voorgeschreven. Het meetpunt op de hoogste verdiepingsvloer dat deel uit maakt van de "standaard" beperkte meting, heeft namelijk geen toegevoegde waarde voor een onderzoek naar de trillingsbelasting van de fundering. Daarom zijn voor dit doel bij de beperkte meting twee meetpunten gedefinieerd op de fundering zodat op dezelfde wijze als bij onderzoek aan de draagconstructie, een afweging kan worden gemaakt in de keuze tussen een indicatieve, beperkte en uitgebreide meting.

In tabel 8.1 (zie kader 25) is schematisch weergegeven welk type meting kan worden gebruikt.

Tabel 8.1 Overzicht toepassing type metingen.

Aangrijpen trilling	Type bouwwerk	
	Gebouw	Geen gebouw
Vanuit de bodem via de fundering	Indicatief Beperkt Uitgebreid	Uitgebreid
Anders	Uitgebreid	Uitgebreid

Door middel van een indicatieve en beperkte meting kan op een relatief eenvoudige wijze de trillingsbelasting van de draagconstructie van een gebouw worden vastgesteld en inzicht worden verkregen in de ernst van de situatie. Bij de indicatieve en beperkte meting worden minder trillingsopnemers gebruikt dan bij de uitgebreide meting. Hierdoor is het minder zeker dat op de plaats wordt gemeten waar de grootste trillingsbelasting optreedt. Deze onzekerheid leidt ertoe dat een veiligheidsfactor op de meetresultaten wordt gezet voordat een beoordeling wordt uitgevoerd (zie hoofdstuk 9).

8.5 Meetpunten en meetrichtingen

8.5.1 Algemeen

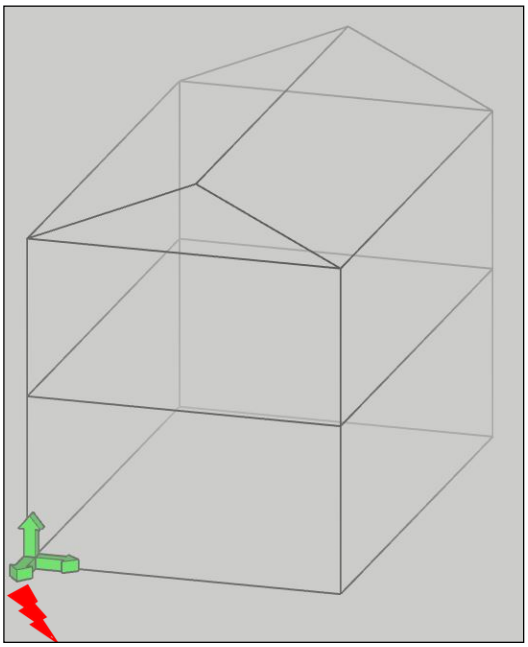
Ten aanzien van de keuze van de meetpunten en meetrichtingen moet onderscheid worden gemaakt in trillingen afkomstig vanuit de bodem en trillingen met een andere oorsprong. Een tweede onderscheid vormt de keuze of de meting tot doel heeft om de trillingsbelasting van de draagconstructie te beoordelen of de kans op zettingen als gevolg van verdichting van de bodem. Dit laatste kan plaatsvinden bij trillingsgevoelige funderingen. Tabel 8.2 (zie kader 26) geeft schematisch weer welke keuzen gemaakt kunnen worden.

Tabel 8.2 Overzicht meetpunten en meetrichtingen.

Aangrijpen trillingen	Type meting	Aantal meetpunten	Positie	Richtingen
Vanuit de bodem	Indicatief (paragraaf 8.5.2)	1	Draagconstructie en zettingen: Fundering, kortste afstand tot de bron (zie figuur 8.1)	A: Horizontaal dwars B: Horizontaal langs C: Verticaal
Vanuit de bodem	Beperkt (paragraaf 8.5.3)	2	Draagconstructie: 1. Fundering, kortste afstand 2. Hoogste verdiepingsvloer (zie figuur 8.2) Zettingen (kader 27): 2 meetpunten op de fundering	Draagconstructie: Fundering: A t/m C Verdieping: A en B (C optioneel) Zettingen: Fundering: A t/m C
Vanuit de bodem en anders	Uitgebreid (paragraaf 8.5.4)	Afhankelijk doel meting en situatie ter plaatse. In ieder geval meetpunten op draagconstructie *en* niet dragende delen.	Draagconstructie en zettingen: om de 10 meter in verticale en horizontale richting. Zettingen minimaal 4 op funderingsniveau Niet dragende delen: Midden vlakken, muren, kolommen, scheidingsconstructies (zie figuur 8.3)	Draagconstructie: Fundering: A t/m C Verdieping: A t/m C Niet dragende delen: Loodrecht op het vlak

28

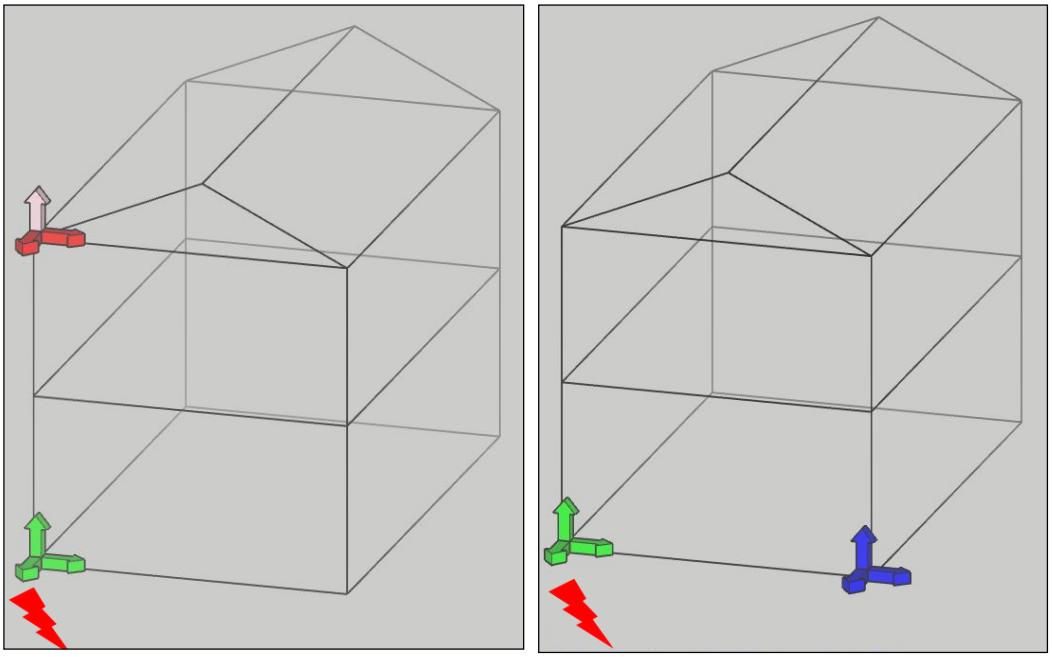
Meetpunt indicatieve meting



Figuur 8.1 Meetpositie indicatieve meting ten opzichte van bron (rode bliksemschicht).

29

Meetpunten beperkte meting



Figuur 8.2 Meetpositie beperkte meting voor de draagconstructie (links) en fundering (rechts) ten opzichte van de bron (rode bliksemschicht).

De navolgende paragrafen geven een nadere uitleg bij de keuze van de meetpunten.

8.5.2 Indicatieve meting

Bij een indicatieve meting wordt slechts op één meetpunt per gebouw gemeten. Dit meetpunt komt overeen met het meetpunt op begane grondniveau in een stijf punt van de draagconstructie. Het meetpunt wordt bovendien op de kleinste afstand tot de bron gekozen. In het meetpunt wordt in verticale en in twee onderling loodrechte horizontale richtingen gemeten. De gekozen horizontale richtingen stemmen zoveel mogelijk overeen met de hoofdassen van het gebouw. Figuur 8.1 toont het meetpunt voor de indicatieve meting (zie kader 28) ten opzichte van de trillingsbron.

8.5.3 Beperkte meting

Bij een beperkte meting wordt op twee meetpunten per gebouw gemeten. Welke punten worden gekozen hangt af van het doel van de meting:

1. voor beoordeling van de trillingsbelasting van de draagconstructie of overige onderdelen van de constructie;
2. voor de beoordeling van de trillingsbelasting op de fundering in verband met de kans op zettingen.

Draagconstructie

Bij een beperkte meting wordt ten minste in één meetpunt op begane grondniveau en ten minste in één meetpunt op de hoogste verdieping van het gebouw gemeten, beide in een stijf punt van de draagconstructie, loodrecht boven elkaar. De meetpunten worden bovendien op de kortste afstand tot de bron gekozen.
In het meetpunt op de begane grond wordt in verticale en in twee onderling loodrechte horizontale richtingen gemeten. Dit meetpunt op begane grondniveau komt overeen met het meetpunt voor de indicatieve meting.
In het meetpunt op de hoogste verdieping wordt minimaal in twee onderling loodrechte horizontale richtingen gemeten. De gekozen horizontale richtingen stemmen zoveel mogelijk overeen met de hoofdassen van het gebouw. In geval van het gebruik van een trillingssensor die alle drie de richtingen gelijktijdig meet, wordt de verticale richting gewoon meegenomen in het onderzoek.

Fundering (kans op zettingen)

Bij een beperkte meting op de fundering wordt ten minste op twee meetpunten op begane grondniveau gemeten. De meetpunten worden gekozen op twee stijve punten van de draagconstructie met de kortste afstand tot de bron. De meetpunten worden op minimaal 10 meter afstand van elkaar gekozen of op de hoeken van het gebouw als die afstand kleiner is.
In de meetpunten wordt in de verticale en in twee onderling loodrechte horizontale richtingen gemeten. De gekozen horizontale richtingen stemmen zoveel mogelijk overeen met de hoofdassen van het gebouw.

Bij een beperkte meting voor zowel de beoordeling van de draagconstructie als de fundering zijn dus tenminste drie meetpunten nodig. Figuur 8.2 toont de meetpunten voor de beperkte meting (zie kader 29).

30

Aantal meetpunten uitgebreide meting

Het aantal gedefinieerde meetpunten voor een uitgebreide meting kan de capaciteit van de beschikbare meetapparatuur overschrijden. Een keuze uit de mogelijke meetpunten is vaak noodzakelijk. Deze keuze moet echter worden gemotiveerd. Met een dergelijke motivering mogen de resultaten van de metingen beoordeeld worden als een uitgebreide meting.
De beperkte meting vormt de basis voor de uitgebreide meting. Aan het aantal meetpunten uit de beperkte meting wordt een aantal extra meetpunten toegevoegd. Gekozen moet worden voor meetpunten op die delen van de draagconstructie of overige onderdelen van het bouwwerk die door hun eigenfrequentie en positie in het gebouw en door hun constructie-eigenschappen gevoelig zullen zijn voor trillingen ten gevolge van de betreffende trillingsbron. Bij de motivering van de keuze van de meetpunten moet onder meer rekening zijn gehouden met:

- het constructief systeem van het bouwwerk;
- de eigenfrequenties van het bouwwerk en onderdelen daarvan in relatie tot de frequentie-inhoud van de bron;
- de mogelijkheid van resonantie;
- de gevoeligheid van onderdelen van het bouwwerk voor trillingen, rekening houdend met de onder 10.2.1 geformuleerde relevante aspecten van het bouwwerk;
- de afstand van het onderdeel tot de bron.

Het is toegestaan om door middel van een aantal kortdurende metingen de meetpunten te selecteren die vervolgens gedurende een langere onbemande meting (enkele dagen, een week) worden gebruikt. Bijvoorbeeld: tijdens de bemande metingen is op 12 meetpunten de trillingssnelheid vastgelegd. Voor de onbemande meting wordt uiteindelijk een selectie gemaakt van 6 meetpunten. Uitgangspunt is wel dat de bron niet zodanig verandert dat andere meetpunten maatgevend kunnen worden. Onderstaande tabel geeft aanwijzingen voor het minimaal te hanteren aantal meetpunten inclusief de meetpunten uit de beperkte meting.

Beoordeling van	Nummer meetpunt	Omschrijving	Opmerking
Draagconstructie begane grond	1	Fundering, kortste afstand tot bron	Zoals bij beperkte meting
	2	Ander meetpunt op draagconstructie met hoogste waarde voor $V_{top,i}$	
Draagconstructie verdieping	3	Hoogste verdiepingsvloer met hoogste $V_{top,i}$	
Verdieping en overige onderdelen	4	Ander meetpunt op de draagconstructie op verdiepingsniveau of onderdeel van het bouwwerk met de hoogste $V_{top,i}$	
Zettingen	5 en 6	Twee aanvullende meetpunten op de draagconstructie op de fundering met de hoogste $V_{top,i}$	Meetpunten 1 en 2 tellen ook mee voor de bepaling van V_{top} voor de fundering

Als niet alle meetpunten gelijktijdig kunnen worden gemeten, dan mogen de meetpunten na elkaar worden gemeten. Hierbij wordt een aantal vaste meetpunten gebruikt die bij elke meting op dezelfde positie zijn bevestigd en een aantal meetpunten die per meting steeds op een andere positie worden ingezet. De vaste meetpunten vormen de referentie en worden gekozen volgens de beperkte meting. De meetresultaten op de referentiepunten worden gebruikt om variaties in het trillingsniveau ten gevolge van de bron vast te stellen. Deze variaties dienen verrekend te worden bij de vergelijking van de resultaten van de variabele meetpunten. Bij de keuze van de meetpunten, kan gebruik worden gemaakt van bovenstaande tabel.

Op horizontale dragende elementen die tot de draagconstructie behoren en zijn ontworpen om verticale belastingen op te nemen zoals vloeren, hoeven in het algemeen geen meetposities te worden gekozen.

De onderbouwing van de keuze voor de meetpunten dient in de rapportage te worden opgenomen.

De eigenfrequentie van een constructiedeel kan worden bepaald door het constructiedeel door middel van een stoot (heeldrop, hamer) in trilling te brengen en gelijktijdig een trillingsmeting op het constructiedeel uit te voeren waarmee het spectrum van de reactie van dat constructiedeel op de stoot wordt gemeten. De eigenfrequentie van een constructiedeel kan een rol spelen in de bepaling van de karakteristieke grenswaarde voor dat onderdeel als de dominante frequentie lager is dan de eerste eigenfrequentie van dat constructiedeel. Zie ook paragraaf 10.3.4.

8.5.4 Uitgebreide meting

Bij een uitgebreide meting dient in een groter aantal meetpunten (zie kader 30) te worden gemeten ter aanvulling op de meetpunten volgens de beperkte meting. Op welke plaatsen gemeten wordt, hangt af van het doel van de meting en van de situatie ter plaatse. Hieronder zijn enige richtlijnen gegeven.

Voor de beoordeling van de trillingsbelasting op de draagconstructie
De meetpunten moeten op begane grondniveau gekozen worden in stijve punten van de draagconstructie van het gebouw, uitgaande van het meetpunt op de kortste afstand tot de bron, met onderlinge afstanden van circa 10 m. In deze meetpunten wordt in verticale richting en in twee onderling loodrechte horizontale richtingen gemeten. De horizontale richtingen stemmen zoveel mogelijk overeen met de hoofdassen van het gebouw.

Op het niveau van de hoogste verdiepingsvloer dienen meetpunten gekozen te worden in een stijf punt van de draagconstructie. Deze meetpunten liggen loodrecht boven de meetpunten op begane grondniveau. Als het gebouw hoger is dan 10 m, worden ook op tussengelegen niveaus meetpunten gekozen, zodanig dat de verticale afstand tussen de meetpunten kleiner is dan 10 m. In deze punten wordt in twee onderling loodrechte horizontale richtingen gemeten. Deze richtingen stemmen overeen met de horizontale richtingen op de begane grond.

Bij gebouwen met een draagconstructie bestaande uit metselwerk, ongewapend beton en/of andere brosse bouwmaterialen dienen bovendien meetpunten te worden gekozen in het midden van de overspanning van vlakken, muren en kolommen die tot de draagconstructie behoren. Hier wordt in één richting loodrecht op het vlak of in twee onderling loodrechte richtingen loodrecht op de as van het desbetreffende element gemeten.

Voor de beoordeling van de trillingsbelasting op de fundering
De meetpunten komen overeen met de meetpunten op begane grondniveau voor de beoordeling van de trillingsbelasting op de draagconstructie van het gebouw. Het aantal meetpunten bedraagt minimaal 4.

Voor de beoordeling van de trillingsbelasting op overige onderdelen
De meetpunten worden gekozen in het midden van de overspanning van vlakken, muren en kolommen, al dan niet behorend tot de draagconstructie, en in het midden van de overspanning van liggers, vloervelden, plafonds of vlakken van scheidingsconstructies die niet tot de draagconstructie behoren. De meetrichting moet steeds loodrecht op het vlak of in twee onderling loodrechte richtingen loodrecht op de as van het desbetreffende element zijn gekozen. Figuur 8.3 toont als voorbeeld de meetposities bij een uitgebreide meting.

31

Bevestiging van de trillingsopnemer

De bevestiging van de trillingsopnemer is erg belangrijk om een betrouwbaar meetresultaat te krijgen. Bij de bevestiging is het vooral van belang dat een stijve verbinding met de bouwkundige constructie wordt gemaakt. Dit betekent dat bouten, schroeven, borgmoeren en dergelijke goed moeten worden vastgedraaid. Alleen handvast is onvoldoende. Resonanties waardoor versterking van het trillingsniveau optreedt, dienen in het frequentiegebied tussen 1 en 100 Hz te worden voorkomen. De eerste resonantiefrequentie van de bevestiging moet hoger zijn dan 150 Hz.

Als de trillingsopnemer niet rechtstreeks op de bouwkundige constructie kan worden bevestigd maar gebruik wordt gemaakt van een hulpconstructie in de vorm van bijvoorbeeld een beugel, plateau of klem, is het ook van belang dat de verbinding tussen de hulpconstructie en de bouwkundige constructie voldoende stijf is opdat geen resonanties optreden in het frequentiegebied tussen 1 en 100 Hz. Het verdient daarbij de aanbeveling om de hulpconstructie met meerdere bouten of schroeven te bevestigen aan de bouwkundige constructie. Uiteraard dient de trilingsopnemer zelf ook weer stijf verbonden te worden met de hulpconstructie.
De eerste eigenfrequentie van de hulpconstructie zelf moet boven de 150 Hz liggen om te voorkomen dat resonanties in de hulpconstructie het meetresultaat beïnvloeden. Hulpconstructies uit hout voldoen meestal niet aan deze eis. Geadviseerd wordt om hulpconstructies te kiezen uit aluminium, roestvrij staal of staal waarbij bij het laatste materiaal zeker moet zijn dat de werking van de geofoon niet wordt beïnvloed.

Als een trillingsopnemer door middel van zwaartekracht wordt bevestigd, dat wil zeggen op de bouwkundige constructie wordt neergezet, dan is de bevestiging met name gevoelig voor verstoring door trillingen in de horizontale richting. Door hogere trillingsniveaus in de horizontale richting kan de opnemer verschuiven waardoor de waterpas instelling verloren gaat. Geadviseerd wordt om in geval van te verwachten sterke horizontale trillingen de trillingsopnemer toch te plakken met bijvoorbeeld bijenwas. Dat zorgt voor een stijve verbinding en is meestal makkelijk verwijderbaar van de ondergrond.

32

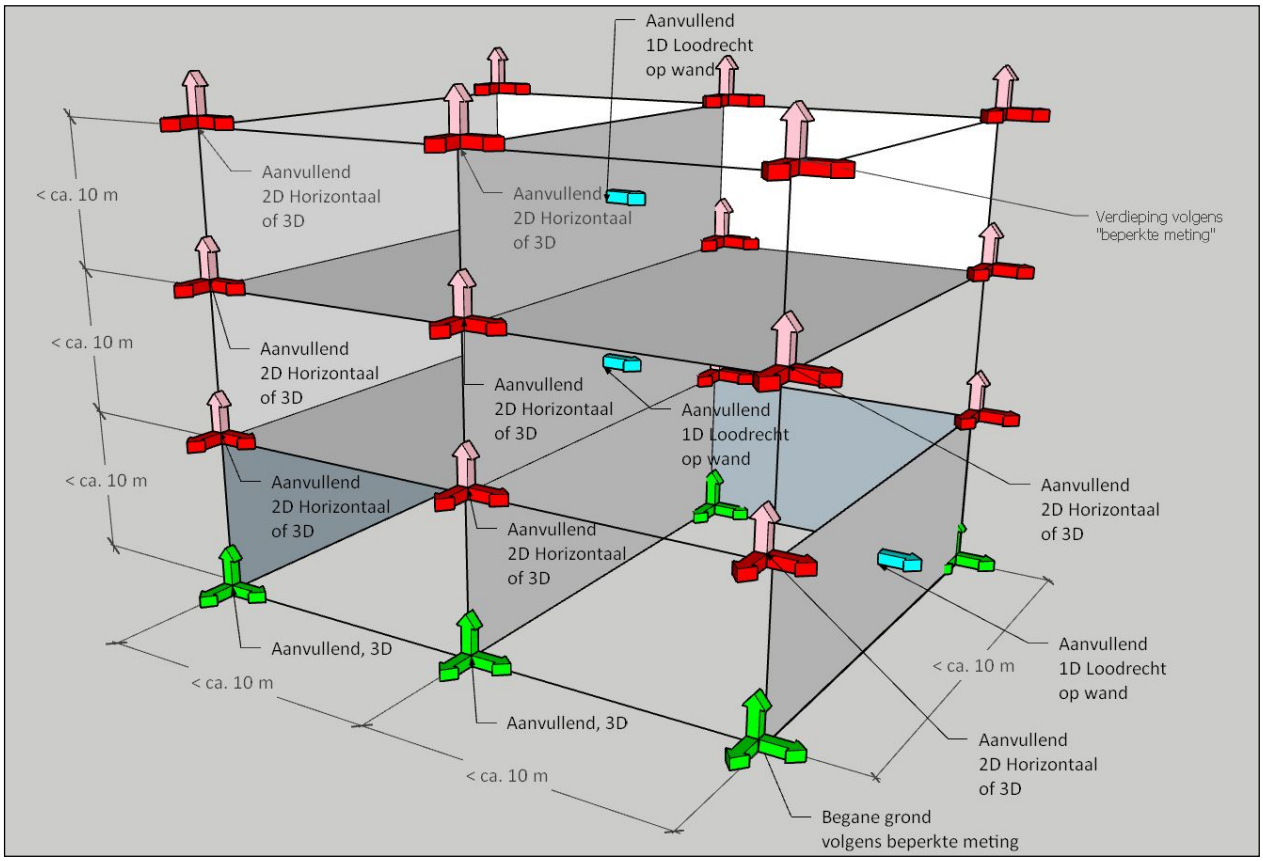
Massa trillingsopnemer

Als een trillingsmeting op de draagconstructie wordt uitgevoerd, dan is een massa van enkele kilo's van de trillingsopnemer geen probleem. Als echter op een licht bouwconstructiedeel moet worden gemeten, dan is het van belang een trillingsopnemer te kiezen die niet te zwaar is. In het algemeen geldt dat de massa van de opnemer met de bevestiging niet groter mag zijn dan 1/10^{e} van de dynamische massa van het meetobject.

33

Waterpas is van belang

Het is bij geofoons van belang dat de trillingsopnemer waterpas wordt gezet. Weliswaar is veel meetapparatuur voorzien van een elektronische compensatie voor een beperkte scheefstand maar daarmee kan niet alles worden gecompenseerd. Met name de meetresultaten en het meetbereik in de horizontale richtingen worden bij geofoons sterk beïnvloed door een slechte waterpassing.
De waterpassing van de trillingsopnemer dient voor aanvang van de metingen te worden gecontroleerd door middel van de ingebouwde libelle of een extern waterpasje. Het externe waterpasje tijdens de metingen niet op de trillingssensor laten liggen want dat zorgt voor stoortrillingen.



Figuur 8.3 Voorbeelden meetpunten en meetrichtingen uitgebreide meting.

8.6 Bevestiging trillingsopnemers

Trillingsopnemers moeten zo worden bevestigd dat de trillingen in de constructie in het van belang zijnde frequentiegebied ter plaatse van de opnemers nauwkeurig worden gemeten. Door de aanwezigheid van de opnemer mag het dynamisch gedrag van het onderdeel waaraan gemeten wordt in het genoemde frequentiegebied niet worden beïnvloed.

Bij de bevestiging van de opnemer (zie kader 31) dienen de volgende voorwaarden in acht te worden genomen:
De massa van opnemer (zie kader 32) en bevestigingshulpmiddelen dient verwaarloosbaar klein te zijn ten opzichte van de dynamische massa van het te meten onderdeel.

- De ondergrond waarop de trillingsopnemer bevestigd wordt, dient schoon en vlak te zijn.
- De opnemer moet waterpas (zie kader 33) en stijf verbonden worden met de constructie door middel van bijvoorbeeld:
  - een schroefverbinding;
  - bijenwas;
  - een magneet;
  - lijm;
  - zwaartekracht.
- Als een meetpunt op de vloer wordt gekozen (bijvoorbeeld op begane grondniveau in de hoek van een ruimte) en de vloer is bedekt met een zachte afdeklaag (vloerbedekking), dan dient deze laag bij voorkeur te worden verwijderd. Is dit niet mogelijk, dan kan in afwijking van het voorgaande gebruikgemaakt worden van de in bijlage 2 aangegeven hulpconstructie. Op deze constructie wordt de trillingsopnemer bevestigd, waarna de punten door de vloerbedekking op de ondergrond worden gedrukt. Binnen het frequentiegebied van 1 tot 100 Hz is het meetresultaat betrouwbaar als de versnellingscomponent van de trilling kleiner is dan 3 m/s^2.
- De aansluitkabels van de trillingsopnemer dienen zo vastgezet te worden dat deze de opnemer niet belasten en beweging van de kabels wordt voorkomen.

34

Opslaginterval

In eerdere edities van de richtlijn is geen aanwijzing gegeven met betrekking tot het aantal bepalingen van $V_{top,i}$ gedurende een meetperiode. Omdat uiteindelijk de topwaarde van de trillingssnelheid moet worden bepaald, zou de meting kunnen resulteren in 1 topwaarde over bijvoorbeeld een meetperiode van 12 uur. Dit is onwenselijk omdat hierdoor geen inzicht bestaat in het verloop en de spreiding van de topwaarde gedurende de meetduur. Daarom is in voorliggende richtlijn een opslaginterval benoemd. Voor de instellingen van het opslaginterval kan gekozen worden uit: 1, 2, 5, 10 of 30 s. Met de keuze voor 30 seconde wordt aangesloten bij SBR richtlijn B (hinder voor personen) waarin verplicht een vast meetinterval van 30 seconden is vastgelegd.

De voordelen van een korter opslaginterval zijn:

1. Beter detecteren van gebeurtenissen (en eventueel herhaald voorkomen van gebeurtenissen binnen een bepaalde tijdsperiode).
2. Het vergelijken van gebeurtenissen tussen verschillende meetsystemen.
3. Het vergelijken van achtergrondtrillingen (indien van toepassing) en de bron.

Het is mogelijk dat een gebeurtenis (passage van een trein bijvoorbeeld) in meerdere intervallen optreedt. Dat is geen probleem omdat uiteindelijk de hoogste waarde van alle $V_{top,i}$ waarden per interval gebruikt moet worden voor de beoordeling.

8.7 Meetduur

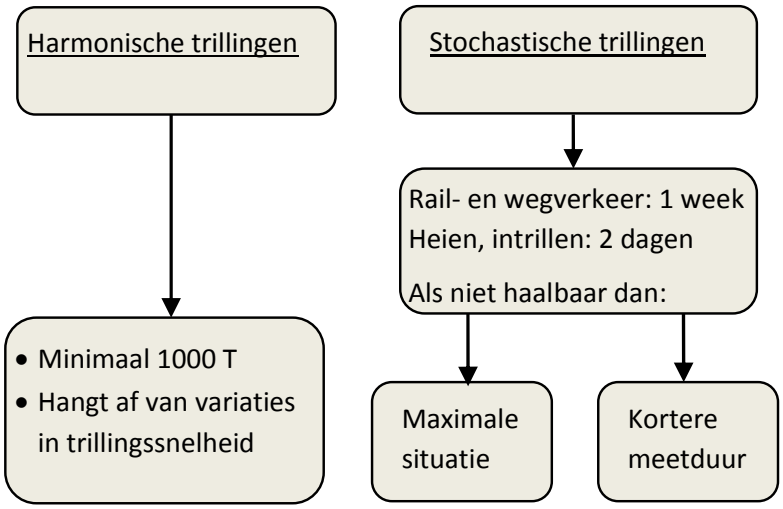
8.7.1 Algemeen

De meetduur omvat minimaal de tijdsduur waarin de trillingsbron of –bronnen in werking zijn. De meetduur mag korter zijn als de representativiteit van de trillingen gedurende deze kortere meetduur kan worden aangetoond, bijvoorbeeld aan de hand van statistische technieken of op basis van worst case waarin de hoogst mogelijke trillingsbelasting is gemeten.

Tijdens de meetduur moeten (met dezelfde configuratie van meetpunten) meerdere metingen worden verricht, die op elkaar dienen aan te sluiten. Het opslaginterval (zie kader 34) bedraagt maximaal 30 seconden. Er mag worden volstaan met het op gezette tijden verrichten van een meting als de trilling aantoonbaar stationair is over de tussenliggende tijd.

Bij de bepaling van de meetduur wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende typen trillingen:
1. continue harmonische trillingen waarbij weinig spreiding optreedt in de trillingssnelheid;
2. stochastische trillingen, zoals weg- en railverkeer maar ook heien en intrillen of achtergrondtrillingen, waarbij veel spreiding op kan treden.

Figuur 8.4 toont schematisch een overzicht van de te kiezen meetduur. In de paragrafen 8.7.2 en 8.7.3 zijn de keuzen verder toegelicht.



Figuur 8.4 Schematische voorstelling meetduur.

35

Maximale situatie

De maximale situatie is de situatie die de hoogste trillingsbelasting oplevert. Meestal is dit de situatie dat de bron op de kortste afstand tot het bouwwerk is gelegen en onder de zwaarste omstandigheden in werking is. Denk bijvoorbeeld aan zwaar vrachtverkeer dat met hoge snelheid over een verkeersdrempel rijdt of de langste heipaal met een zwaar blok op de kortste afstand van de woning.

Een meting volgens de maximale situatie biedt in korte tijd toch al inzicht in de mogelijke risico's op schade. Toch biedt het meten van de maximale situatie bij weinig metingen geen garantie dat werkelijk de hoogste belasting is gemeten. Er kan niet volstaan worden met het meten van 1 passage of het inslaan van een halve heipaal. Ook op deze bronnen zit spreiding in de trillingsimmissie en de overdracht van de trillingen door de bodem. Daarom is het advies om meer passages te meten en ook hier naar de spreiding in de meetresultaten te kijken. Om inzicht te krijgen in het effect van de spreiding in de meetresultaten, kan de statistische verwerking volgens 9.2.3 worden toegepast. Als de berekende statistische V_{stat} heel dicht bij de gemeten V_{top} ligt, dan is een langere meetduur niet zinvol.

Voor treinen kan geen meting in de maximale situatie worden uitgevoerd omdat het niet mogelijk is te kiezen welke trein tijdens de meetperiode voorbij moet komen om met deze trein een aantal passages uit te voeren. Bij deze bron dient een week (bij voorkeur twee weken) te worden gemeten of bij een kortere meetduur de statistische verwerking te worden toegepast.

De keuze voor de maximale situatie dient in de rapportage te worden onderbouwd.

36

Kortere meetduur

Bij een korte meetduur die niet voldoet aan de maximale situatie kan het zijn dat niet alle optredende gebeurtenissen binnen de meetperiode voorkomen. De gekozen meetduur is dan niet representatief en moet verlengd worden.

Om te voorkomen dat bronnen worden gemist, moet men zich ervan vergewissen dat alle denkbare gebeurtenissen in voldoende mate binnen de meetduur vallen. De gekozen meetduur moet dus representatief zijn voor de normale omstandigheden. Om statistiek te kunnen bedrijven dienen minimaal drie gebeurtenissen te worden gemeten maar bij voorkeur meer. Geadviseerd wordt om zo lang te meten dan 30 gebeurtenissen in de meetduur zijn opgenomen.

Bij trillingsmetingen aan verkeer dient de representativiteit te worden aangetoond op basis van verkeerstellingen tijdens de trillingsmetingen. Hierbij dient onderscheid te worden gemaakt naar het soort verkeer voor zover dit invloed heeft op de trillingsniveaus. Te denken valt hierbij aan de snelheid en het gewicht van de passerende voertuigen. De resultaten van de tellingen worden gerelateerd aan de normale omstandigheden. Om de normale omstandigheden te kennen, kan gebruik worden gemaakt van reeds uitgevoerde tellingen of verkeersintensiteitsgegevens via internet.

8.7.2 Harmonische trillingen

Aanbevolen wordt een meetduur van ten minste 1000 T aan te houden, waarin T de periode is die hoort bij de laagste van belang zijnde frequentie van de trilling. Uitgaande van een laagste frequentie van 1 Hz, betekent dit een minimale meettijd van 17 minuten. In de meetduur dient het in- en uitschakelen van het proces te zijn opgenomen als het in- en uitschakelen van belang is voor het proces.

In de praktijk wordt aanbevolen de variaties in de trillingsniveaus mee te beschouwen in relatie tot de bron of het proces waarvan de trillingen worden gemeten. Als de trillingssnelheid varieert, dan is het beter om een langere meetduur te kiezen van bijvoorbeeld enkele uren. Bij de bepaling van de trillingsbelasting is namelijk de topwaarde van de trillingssnelheid van belang. Dit betekent dat de hoogste trillingssnelheid als gevolg van een bron of proces dient te worden bepaald. Bij de bepaling van de meetduur dient dus steeds de vraag te worden gesteld of de meetduur representatief is voor die maximale trillingsbelasting.

Om inzicht te krijgen in het effect van de spreiding in de meetresultaten, kan de statistische verwerking volgens 9.2.3 worden toegepast. Als de berekende statistische $V_{top,stat}$ heel dicht bij de gemeten V_{top} ligt, dan is een langere meetduur niet zinvol.

8.7.3 Stochastische trillingen

Bij stochastische trillingen ten gevolge van bijvoorbeeld weg- en railverkeer maar ook bij min of meer continue trillingen als intrillen, is de kans op een hogere trillingsbelasting groter naarmate gedurende langere tijd gemeten wordt. Daarom moet er minimaal gedurende een voor de trillingsbron representatieve periode gemeten worden (zie ook paragraaf 8.3).

In het geval van *rail- en wegverkeer* dient minimaal een periode van één week te worden gemeten met een voorkeur voor twee weken. Er zijn immers fluctuaties per uur maar ook per dag of week.

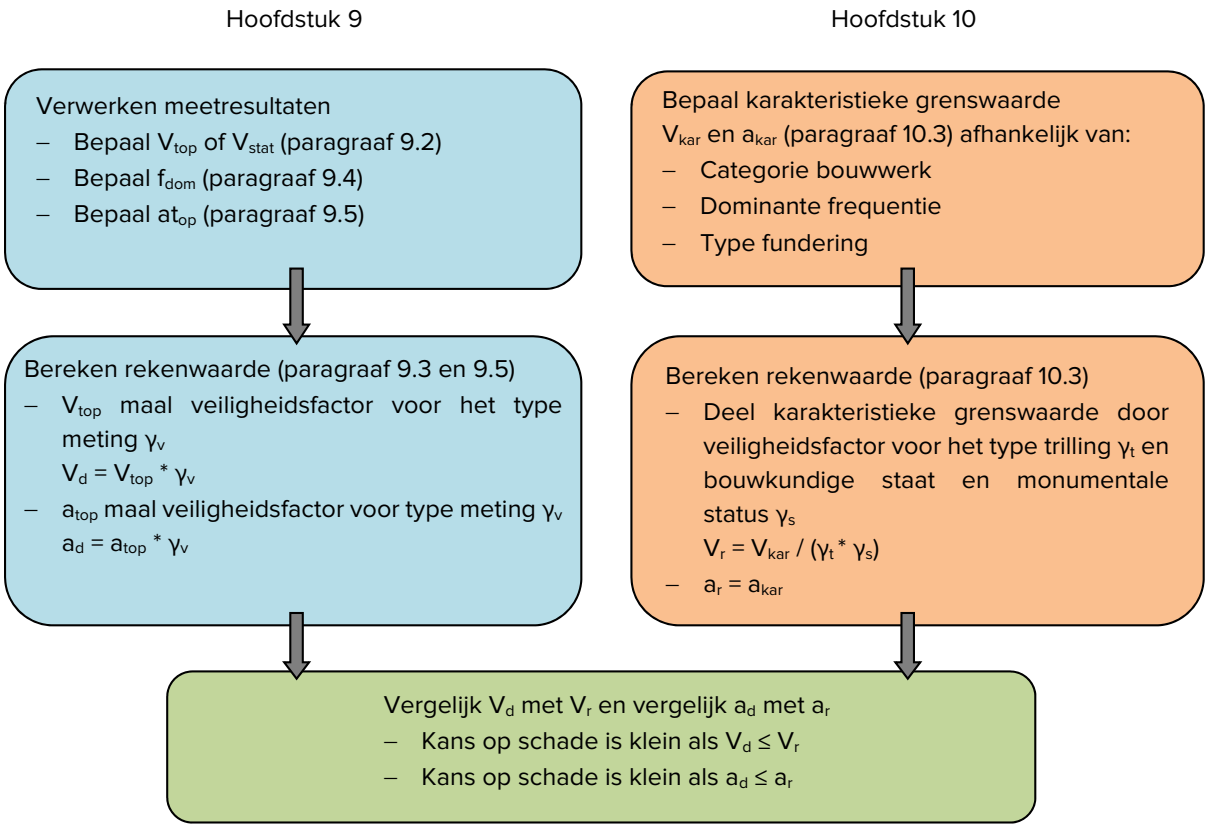
Voor *andere bronnen* (bijvoorbeeld achtergrondtrillingen of het heien van palen of intrillen van damwanden) dient de variatie in trillingsniveau mee beschouwd te worden. De meetduur is afhankelijk van de maximaal representatieve situatie.

Als de meetperiode niet haalbaar is, dan bestaan er twee mogelijkheden:
1. inzicht in de maximale situatie (zie kader 35): als de bron en de maximale omstandigheden bekend zijn, dan hoeft alleen deze situatie te worden gemeten. Hierna volgt verwerking volgens 9.2.2;
2. kortere meetduur (zie kader 36): het meten gedurende kortere tijd leidt tot statistische onzekerheid. Om deze reden worden de meetresultaten statistisch verwerkt. Deze verwerking is omschreven in hoofdstuk 9.2.3.

Bepaling van de trillingsbelasting

9.1 Algemeen

De trillingsbelasting van een bouwwerk bestaat uit de combinatie van de topwaarde van de trillingssnelheid en de bijbehorende dominante frequentie. Beide zaken worden bepaald op basis van de meetresultaten. In verband met de keuze voor het type meting, moet op het meetresultaat vervolgens een veiligheidsfactor worden toegepast. In hoofdstuk 9 is beschreven waaruit de procedure voor het verwerken van de meetresultaten en de toepassing van de veiligheidsfactoren bestaat.
Hoofdstuk 10 gaat in op de bepaling van de grenswaarden. Ook hierin zijn veiligheidsfactoren opgenomen. In figuur 9.1 is schematisch aangegeven hoe de procedures in de hoofdstukken 9 en 10 samenwerken om te komen tot een beoordeling van de trillingsbelasting.



Figuur 9.1 Schema bepaling en beoordeling trillingsbelasting volgens hoofdstuk 9 en 10.

Het bewerken van de meetresultaten bestaat uit het bepalen van de karakteristieke waarde van de topwaarde (V_{top}) tijdens de meetduur volgens 9.2, het bepalen van de rekenwaarde van de topwaarde (V_d) volgens 9.3 en het bepalen van de daarbij behorende dominante frequentie (f_{dom}) volgens 9.4.
Voor de beoordeling van de kans op zettingen van de fundering kan het nodig zijn dat de trillingsversnelling moet worden bepaald. Hiervoor is de procedure beschreven in paragraaf 9.5.

37

Stoortrillingen

Stoortrillingen zijn alle trillingen die niet horen bij een bepaalde bron. Als bijvoorbeeld trillingsmetingen worden uitgevoerd bij het inheien van palen maar ondertussen wordt ook geboord in de muur waar de trillingssensor aan is opgehangen, dan vormt het boren een stoortrilling voor de beoordeling van het heiwerk.
Het boren kan als afzonderlijke bron worden gezien waarvoor het heien weer de stoorbron vormt. In dat geval dient voor beide bronnen apart een V_{top} waarde te worden bepaald en verder te worden verwerkt.
Tijdens de metingen dienen stoortrillingen zoveel mogelijk vermeden te worden.

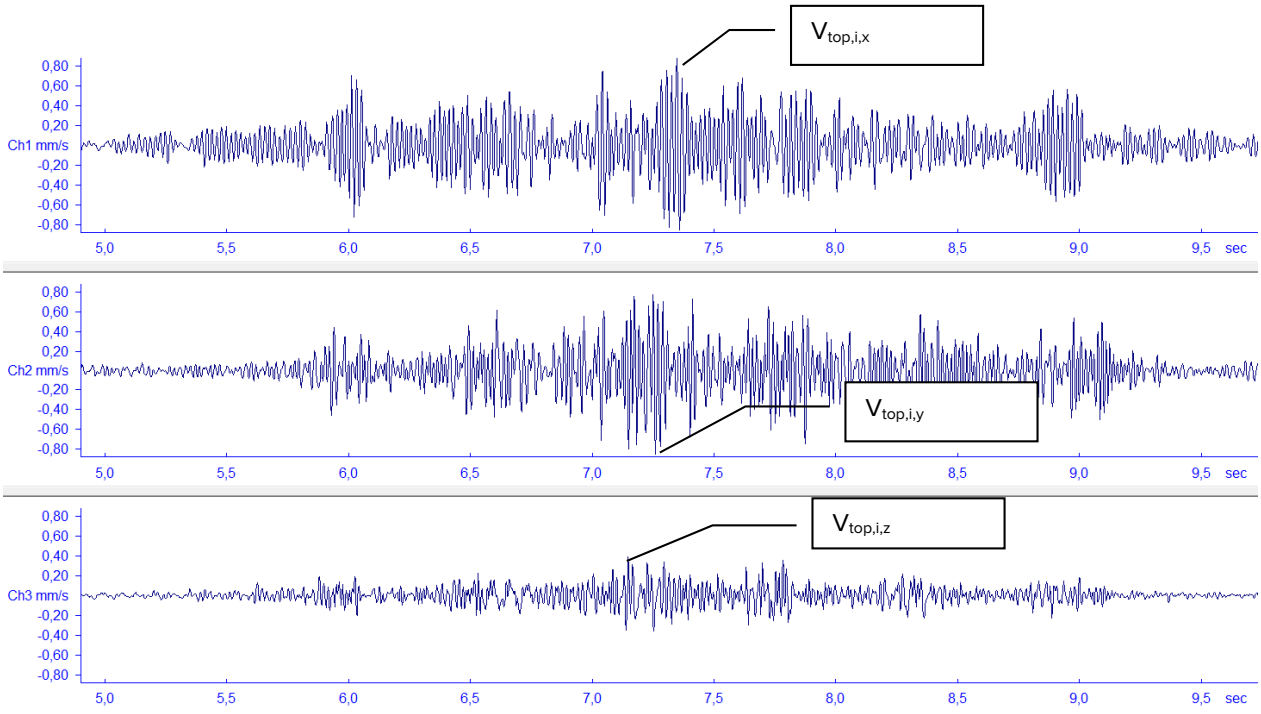
Stoortrillingen kunnen deel uit maken van de achtergrondtrillingen. Stel dat trillingsmetingen worden uitgevoerd aan heiwerk in een gebouw waar ook treinen langs komen, dan vormen de trillingen als gevolg van de treinen de stoortrillingen bij de beoordeling van de heitrillingen. De treintrillingen maken deel uit van de achtergrondtrillingen.

Als er een oorzakelijke relatie moet worden aangetoond tussen de gemeten trillingen en een bepaalde bron, dan dient de topwaarde voor de achtergrondtrillingen significant lager te zijn dan de topwaarde van de trillingen afkomstig van de beschouwde bron. De topwaarde van de brontrillingen is tenminste 2 keer hoger dan de topwaarde van de achtergrondtrillingen. Wordt hieraan voldaan, dan is het meetresultaat voldoende betrouwbaar. Is dit niet het geval, dan kan een frequentieanalyse van zowel de achtergrondtrillingen als van de trillingen afkomstig van de beschouwde bron uitkomst bieden.

38

Topwaarde $V_{top,i}$

Voorbeeld van de bepaling van $V_{top,i}$ per richting voor een gebeurtenis, in dit geval de passage van een trein.
Ch1 (bovenste grafiek) geeft het verloop van de trillingssnelheid in de horizontale dwars richting.
Ch2 (middelste grafiek) geeft het verloop van de trillingssnelheid in de horizontale langs richting.
Ch3 (onderste grafiek) geeft het verloop van de trillingssnelheid in de verticale richting.



$V_{top,i,x}$ = 0,88 mm/s
$V_{top,i,y}$ = 0,85 mm/s
$V_{top,i,z}$ = 0,39 mm/s
$V_{top,i}$ is de hoogste waarde = 0,88 mm/s

9.2 Bepaling V_{top} en V_{stat}

9.2.1 Inleiding

Als bij de meting van stochastische trillingen gekozen is voor de "kortere meetduur" (zie paragraaf 8.7.3) dan moet de trillingsbelasting worden bepaald door middel van een statistische analyse conform 9.2.3 (V_{stat}). In alle andere gevallen dient de trillingsbelasting te worden bepaald volgens 9.2.2.

Alvorens V_{top} of V_{stat} van een trillingsbron kan worden bepaald, dienen stoortrillingen (zie kader 37) te worden verwijderd opdat zij niet meegenomen worden in de bepaling van V_{top} of V_{stat}. In de rapportage worden de stoortrillingen wel benoemd en wordt gemotiveerd waarom ze zijn verwijderd.

9.2.2 Bepaling V_{top} per meetpunt

De topwaarde (zie kader 38) V_{top} is de grootste absolute momentane waarde van de trillingssnelheid gemeten in een meetpunt. Bij de bepaling van V_{top} dient rekening te worden gehouden met:

- de gebeurtenis die wordt beoordeeld;
- de meetrichtingen;
- het aantal meetpunten en hun positie.

Gebeurtenis

Als gedurende de totale meetduur gebeurtenissen van verschillende bronnen optreden, dan dient de bepaling van de trillingsbelasting per bron plaats te vinden. Dit is ook het geval als de dominante frequentie niet constant is gedurende de meting. Ook dan dient de bepaling van de trillingsbelasting per dominante frequentie plaats te vinden.

Meetrichtingen

V_{top} dient per richting te worden bepaald en niet vectorieel te worden opgeteld. De richting met de hoogste waarde voor V_{top} wordt gebruikt voor de bepaling van de trillingsbelasting.

Aantal meetpunten

Bij een indicatieve meting is er maar één meetpunt waarmee de trillingsbelasting bepaald wordt. Deze trillingsbelasting wordt gebruikt voor de beoordeling van zowel de begane grond als de verdieping en de fundering.
Als een beperkte meting is uitgevoerd, wordt het meetpunt op de fundering gebruikt voor de trillingsbelasting van de begane grond en fundering en het meetpunt op de verdieping voor de bepaling van de trillingsbelasting op de verdieping en onderdelen van de draagconstructie. Bij een beperkte meting dient V_{top} dus voor beide meetpunten afzonderlijk te worden bepaald en gebruikt.

Bij een uitgebreide meting dient V_{top} per meetpunt te worden bepaald. Als bijvoorbeeld meerdere meetpunten op de fundering zijn gelegen, wordt het meetpunt met de hoogste waarde voor V_{top} gebruikt voor de bepaling van de trillingsbelasting voor de fundering.

39

Voorbeeldberekening V_{stat}

In dit voorbeeld zijn 17 passages van een representatieve vrachtwagen gemeten. Van elke passage is $V_{top,i}$ gemeten.
In de eerste stap zijn de $V_{top,i}$ waarden aflopend gesorteerd. Vervolgens is bepaald welke passage een $V_{top,i}$ heeft veroorzaakt die kleiner is dan 0,5 maal V_{top}. Deze passages zijn niet meegenomen in het vervolg van de berekening van V_{stat}. Op deze wijze vallen 2 passages af.
Van de overgebleven 15 passages is achtereenvolgens berekend:

1. de gemiddelde waarde (μ in de formule);
2. de standaardafwijking (σ in de formule en op te roepen met de functie STDEV.S in Excel).

Omdat 15 passages worden gebruikt in de berekening, bedraagt de waarde voor β 2,62 op basis van tabel 9.1.
Uit de berekening volgt dat V_{stat} een waarde heeft van 1,0 terwijl V_{top} gemeten een waarde heeft van 0,92. Als de gemeten groep passages representatief is voor alle mogelijke passages en er was een grotere groep passages gemeten, dan was zeer waarschijnlijk een V_{top} van 1,0 gemeten in plaats van 0,92.

v_{topi} passage [mm/s]	v_{topi} passage gestorteerd [mm/s]	> 0,5 * vtop?	Passage nummer	v_{topi} [mm/s]
0,63	0,92		1	0,92
0,72	0,91	ja	2	0,91
0,92	0,89	ja	3	0,89
0,54	0,83	ja	4	0,83
0,66	0,83	ja	5	0,83
0,45	0,79	ja	6	0,79
0,58	0,78	ja	7	0,78
0,89	0,72	ja	8	0,72
0,53	0,68	ja	9	0,68
0,68	0,66	ja	10	0,66
0,83	0,65	ja	11	0,65
0,78	0,63	ja	12	0,63
0,34	0,58	ja	13	0,58
0,79	0,54	ja	14	0,54
0,83	0,53	ja	15	0,53
0,91	0,45	nee		
0,65	0,34	nee		

gemiddelde	0,7293
stdev	0,1317
aantal passages	15
beta	2,62
V_{top} [mm/s]	0,9
V_{stat} [mm/s]	1,0

Als V_{stat} kleiner is dan V_{top} dan betekent dat vaak dat er één passage is met een $V_{top,i}$ die veel hoger is dan de overige $V_{top,i}$ van de andere passages. In dat geval dient te worden nagegaan of de meting wel voldoende representatief is geweest. Als het type voertuig dat de hoogste $V_{top,i}$ heeft veroorzaakt, behoort tot het normale verkeersbeeld, dan dienen meer van deze passages te worden gemeten. De meetduur dient verlengd te worden. Het kan ook zijn dat de betreffende passage een uitzondering vormt en niet tot het normale verkeersbeeld behoort of dat er iets bijzonders met het voertuig was waardoor veel hogere trillingsniveaus zijn ontstaan dan zonder deze bijzondere omstandigheden. In dat geval mag de passage *gemotiveerd* buiten de berekening van V_{stat} worden gelaten. Zonder deze passage zal V_{stat} over het algemeen groter zijn dan V_{top}.

9.2.3 Bepaling V_{stat} per meetpunt

De statistische verwerking van de meetresultaten wordt toegepast als gekozen is voor een kortere meetduur volgens paragraaf 8.7. De kortere meetduur leidt namelijk tot meer onzekerheid over de hoogste waarde van V_{top}. Door middel van de statistische verwerking wordt deze onzekerheid in rekening gebracht.

Van elk interval i waarin een bepaalde gebeurtenis optreedt, dient de topwaarde van de trillingsgrootheid $V_{top,i}$ te worden bepaald. Dit betekent dat bijvoorbeeld voor elke passage van een voertuig of voor elke heipaal de waarde $V_{top,i}$ moet worden bepaald.

V_{stat} wordt berekend per meetrichting. De richting met de hoogste waarde voor V_{stat} wordt gebruikt voor de bepaling van de trillingsbelasting. Indien een beperkte of uitgebreide meting is uitgevoerd dan dient V_{stat} per meetpunt te worden bepaald.

De statistische verwerking wordt toegepast op de topwaarden per gebeurtenis en is gebaseerd op een lognormale verdeling. In de statistische verwerking dienen stoortillingen en achtergrondtrillingen voorkomen te worden. Dit wordt gerealiseerd door bij de verwerking alleen die gebeurtenissen te beschouwen die trillingssnelheden veroorzaken die minimaal 50% van de hoogst gemeten trillingssnelheid V_{top} (bepaald volgens 9.2.2.) bedragen. Bij de statistische verwerking worden daarna alleen de 15 grootste topwaarden van $V_{top,i}$ gebruikt. Dit voorkomt dat bij het ontbreken van een duidelijke grens tussen de achtergrondtrillingen en de trillingen ten gevolge van de gebeurtenissen, de statistische verwerking tot excessieve resultaten zou leiden. Als er minder dan 15 van dergelijke gebeurtenissen zijn opgetreden, moet er een statistische correctie van de statistische topwaarde worden uitgevoerd. Geadviseerd wordt de meetduur zodanig te kiezen dat minimaal 15 gebeurtenissen met $V_{top,i} > 0.5\ V_{top}$ zijn opgetreden.

De statistische verwerking vindt plaats volgens de formule:

$$V_{stat} = \mu\ e^{\beta\sigma/\mu}$$

waarin:

V_{stat} = de statistisch berekende topwaarde van de trillingssnelheid van een meetpunt afgerond op 1 cijfer achter de komma;

μ = de gemiddelde topwaarde bepaald over n (maximaal 15) hoogste waarden van de topwaarde per interval, waarbij de topwaarde per interval $V_{top,i}$ minimaal 50% van de gemeten waarde van V_{top} (volgens 9.2.3.) moet bedragen;

β = factor gelijk aan 2,62. De waarde van β komt overeen met de eenzijdige kritieke waarde van de student-verdeling met n-1 vrijheidsgraden bij een overschrijdingskans van 1%. Als er minder dan 15 waarden van $v_{top,i}$ in de bepaling van het gemiddelde zijn meegenomen, dan volgt de waarde van β uit tabel 9.1;

σ = de standaardafwijking waarde bepaald over de n (maximaal 15) hoogste waarden van de topwaarde per gebeurtenis:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i-1}^{n} \frac{(V_{top,i} - \mu)^2}{n - 1}}$$

$V_{top,i}$ = de topwaarde van de trillingssnelheid in het meetinterval i;

n = aantal topwaarden dat wordt gebruikt in de statistische verwerking (minimaal 3, maximaal 15).

In de toelichting is een voorbeeldberekening (zie kader 39) voor V_{stat} opgenomen.

40

Veiligheidsfactor in de praktijk

In de praktijk is het bij sommige meetapparatuur mogelijk om aan te geven welke type meting wordt gebruikt. De bijbehorende veiligheidsfactor wordt dan verrekend met de karakteristieke grenswaarde en de veiligheidsfactor voor het type trilling. Voordeel van deze methode is dat de gemeten waarde direct vergeleken kan worden met de toetsingswaarde zonder dat aan de gemeten waarde nog rekenwerk te pas komt.

Voor een eerste beoordeling van de situatie in het veld bestaat geen principieel bezwaar tegen deze methode. Voor de rapportage van de meetresultaten mag de methode echter niet gebruikt worden. Ten eerste heeft de veiligheidsfactor voor het type meting niks te maken met de grenswaarde en de afwegingen die daar bij horen en ten tweede wordt het vergelijken van meetresultaten tussen verschillende rapportages onderling veel lastiger omdat geen consistentie meer bestaat in de toetsingswaarden.

Tabel 9.1 Factor β afhankelijk van het aantal waarden $V_{top,i}$ dat voor de bepaling van het gemiddelde en standaardafwijking is gebruikt.

n	β
3	6,96
4	4,54
5	3,75
6	3,36
7	3,14
8	3,00
9	2,90
10	2,82
11	2,76
12	2,72
13	2,68
14	2,65
15	2,62

9.2.4 Bepaling V_{top} en V_{stat} voor een bron

V_{top} of V_{stat} voor een bron wordt bepaald op basis van de hoogste waarde per meetpunt. Dit resulteert in:

- 1 waarde voor V_{top} of V_{stat} in geval van een indicatieve meting (begane grond, beoordeling draagconstructie en fundering);
- 2 waarden voor V_{top} of V_{stat} in geval van een beperkte meting (begane grond en verdieping, beoordeling van de draagconstructie);
- 2 waarden voor V_{top} of V_{stat} in geval van een beperkte meting (voor de beoordeling van de fundering voor de kans op zettingen);
- 3 waarden of meer voor V_{top} of V_{stat} in geval van een uitgebreide meting (begane grond, fundering en verdieping voor beoordeling draagconstructie en fundering. Aanvullend 1 of meer V_{top} of V_{stat} waarde(n) voor niet-dragende delen van de constructie).

9.3 Bepaling V_d

Met behulp van paragraaf 9.2 is V_{top} of V_{stat} bepaald. Op deze waarde dient een veiligheidsfactor (zie kader 40) te worden toegepast die de onzekerheid over het meetresultaat in rekening brengt. Deze veiligheidsfactor is afhankelijk van het type meting (zie paragraaf 8.4 en tabel 9.2).
De aldus berekende trillingssnelheid heet V_d, de rekenwaarde van de trillingssnelheid. De waarde voor V_d wordt beoordeeld op basis van de grenswaarden uit hoofdstuk 10.
De rekenwaarde van de topwaarde van de trillingssnelheid dient te worden bepaald volgens:

$V_d = V_{top} * \gamma_v$ of $V_d = V_{stat} * \gamma_v$

Hierbij is

V_d de rekenwaarde van de trillingssnelheid afgerond op 1 cijfer achter de komma;
V_{top} de gemeten topwaarde van de trillingssnelheid in het meetpunt;
V_{stat} de statistisch berekende topwaarde van de trillingssnelheid (volgens 9.2.3) in het meetpunt;
γ_v de partiële veiligheidsfactor die het type meting in rekening brengt, conform tabel 9.2.

Tabel 9.2 Partiële veiligheidsfactoren γ_v die het type meting in rekening brengen.

Type meting	γ_v
Indicatief	1,6
Beperkt	1,4
Uitgebreid	1,0

41

Methode 1b

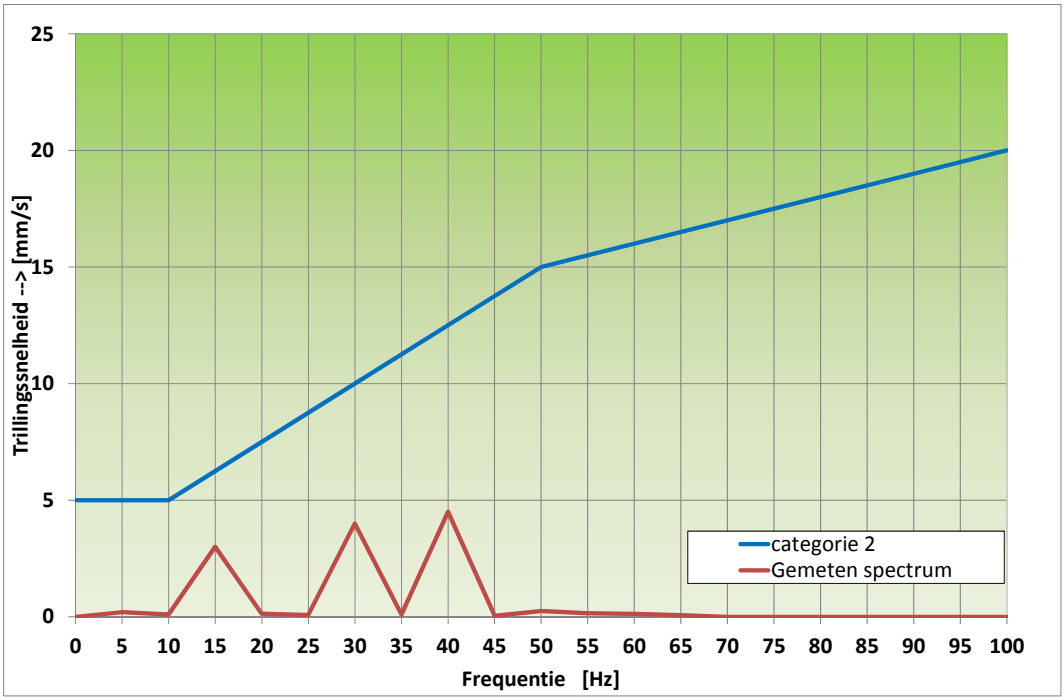
In de oorspronkelijke versie van de richtlijn werd gesproken over methode 1 en 2. Om geen verwarring over de benaming van de methode te krijgen, is de oorspronkelijke nummering gehandhaafd. Om dat methode 1b de voorkeur heeft boven methode 2, is ze voor methode 2 geplaatst. Er bestaat geen voorkeur voor methode 1b of 1.

Het voordeel van de methode is dat de frequentieafhankelijkheid van de grenswaarden al toegepast wordt op de gemeten trillingssnelheid door middel van een weging. Laagfrequente trillingen krijgen zo de nadruk in de gewogen trillingssnelheid ten opzichte van hoogfrequente trillingen. Dat past bij de strengste grenswaarde bij de lage frequenties. Er ontstaat op deze wijze een gewogen rekenwaarde van de trillingssnelheid V_d die als ééngestalswaarde eenvoudig vergeleken kan worden met een ééngetalswaarde voor de grenswaarde. Een nadeel van de methode kan zijn dat alleen gewogen trillingsniveaus worden opgeslagen waardoor ander soortig onderzoek met de ongewogen waarden wellicht niet mogelijk is. Dit hangt af van de wijze waarop de fabrikanten van de meetapparatuur methode 1b implementeren in hun apparatuur.

42

Voorbeeld bepaling dominante frequentie bij meerdere pieken in het spectrum

Een FFT spectrum behorende bij V_{top} bevat drie pieken, namelijk bij 15, 30 en 40 Hz (zie onderstaande figuur). De vraag is welke frequentie dominant is in het kader van SBR richtlijn A.



Bij de bepaling van de dominantie gaat het om de verhouding tot de karakteristieke grenswaarde V_{kar} (zie hoofdstuk 10.3). De frequentie met het kleinste verhoudingsgetal is dominant (zie verder vervolg op volgende pagina toelichting).

Voor iedere piek in het frequentiespectrum dient de bijbehorende karakteristieke grenswaarde te worden bepaald op basis van tabel 10.8. Vervolgens wordt Vkar gedeeld door de waarde van Vtop voor de betreffende frequentie. Als we uitgaan van een categorie 2 bouwwerk dan geldt:
Voor de frequentie van 40 Hz: Vkar = 12,5 mm/s en V (gemeten) = 4,5 mm/s. Vkar/V = 12,5/4,5 = 2,78
Voor de frequentie van 30 Hz: Vkar = 10,0 mm/s en V (gemeten) = 4,0 mm/s. Vkar/V = 10,0/4,0 = 2,50
Voor de frequentie van 15 Hz: Vkar = 6,25 mm/s en V (gemeten) = 3,0 mm/s. Vkar/V = 6,25/3,0 = 2,08
De piek bij 15 Hz geeft het kleinste verhoudingsgetal en is dus dominant.
De waarde van het getal is niet belangrijk. Het geeft alleen maar de verhouding weer tot de grenswaarde.

Van meetapparatuur die automatisch de dominante frequentie bepaalt, moet worden geverifieerd dat niet altijd de frequentie met de hoogste trillingssnelheid automatisch dominant is maar dat rekening wordt gehouden met de verhouding tot de grenswaarde. Dit kan door op basis van het tijdsignaal een FFT analyse uit te voeren en op basis van bovenstaande werkwijze de dominante frequentie te bepalen en te vergelijken met de door de apparatuur aangegeven dominante frequentie.

De berekening van V_d resulteert in:
- 1 waarde voor V_d in geval van een indicatieve meting (begane grond, fundering, voor de draagconstructie);
- 2 waarden voor V_d in geval van een beperkte meting (begane grond, fundering en verdieping, voor de draagconstructie);
- als een uitgebreide meting is uitgevoerd dan is V_d gelijk aan V_{top} omdat de veiligheidsfactor een waarde 1 heeft. Bij een uitgebreide meting zijn de meetpunten zo gekozen dat de positie van het meetpunt geen onzekerheid meer geeft over de gemeten waarde.

9.4 Bepaling dominante frequentie bij V_{top}

De dominante frequentie wordt gebruikt bij de bepaling van de grenswaarden (zie hoofdstuk 10) voor de beoordeling van de trillingsbelasting op begane grond niveau. Voor de fundering, de verdieping en onderdelen van de constructie is de dominante frequentie niet nodig. De grenswaarden hiervoor zijn niet frequentie-afhankelijk. De dominante frequentie wordt bepaald voor die gebeurtenis die verantwoordelijk is voor V_d.

De dominante frequentie is de overheersende frequentie in dat deel van het signaal waar de topwaarde optreedt. Voor de bepaling van de dominante frequentie kunnen drie methoden worden gebruikt waarbij methode 1 en 1b (zie kader 41) de voorkeur hebben:
- methode 1: de dominante frequentie is die frequentie waarbij het spectrum of spectrale dichtheid van de trillingssnelheid een maximum bereikt;
- methode 1b: deze methode bepaalt de $V_{top,dominant}$. Dit is de trillingssnelheid die het dichtst bij de grenswaarde ligt. Hierbij wordt $V_{top,i}$ gewogen conform de frequentiekarakteristiek voor de grenswaarden op begane grondniveau. Voor de bepaling wordt verwezen naar [10];
- methode 2: als vereenvoudigde procedure is het ook toegestaan vanuit het tijdsdomein de dominante frequentie te bepalen.

Methode 1 en 2 zijn uitgebreid beschreven in bijlage 3.
In de toelichting is aan de hand van een voorbeeld omschreven hoe de dominante frequentie wordt bepaald als het spectrum meerdere pieken (zie kader 42) bevat.

9.5 Bepaling a_{top} en a_{stat} van de trillingsversnelling

9.5.1 Bepaling a_{top} topwaarde trillingsversnelling

De trillingsversnelling wordt gebruikt bij de beoordeling van de kans op zettingen bij een trillingsgevoelige fundering en hoeft alleen maar in dat geval te worden bepaald. In paragraaf 10.2.5 is omschreven wanneer sprake is van een trillingsgevoelige fundering. De topwaarde van de trillingsversnelling dient in het tijddomein te worden bepaald volgens dezelfde methode zoals die voor V_{top} in paragraaf 9.2 wordt gevolgd.

9.5.2 Bepaling a_{stat}

Als voor de berekening van V_d gebruik is gemaakt van de statistische methode, dan dient de statistische methode ook voor a_d te worden toegepast. Hiervoor moet dezelfde rekenwijze worden gevolgd, zoals omschreven in paragraaf 9.2.3.

9.5.3 Rekenwaarde van de trillingsversnelling

Om de rekenwaarde van de trillingsversnelling a_d te bepalen, is de veiligheidsfactor voor het type meting γ_v (zie tabel 9.2) van toepassing volgens:

$a_d = a_{top} * \gamma_v$ of $a_d = a_{stat} * \gamma_v$

De wijze van beoordeling is omschreven in paragraaf 10.3.5.

43

Kans op schade in metselwerk bij overschrijding van V_r

De grenswaarden in de richtlijn zijn oorspronkelijk tot stand gekomen op basis van ervaringen in de praktijk, aanvankelijk in Duitsland, later in Nederland. De grenswaarden zijn zo gekozen dat bij waarden voor V_{top} (V_d) beneden de grenswaarden, het optreden van schade als gevolg van trillingen onwaarschijnlijk is. Dit wil niet zeggen dat bij overschrijding van de grenswaarden er zeker wel schade optreedt. De kans op schade zal met toenemende waarde voor V_{top} hoger worden.

Er is bij verschillende partijen behoefte om te kunnen inschatten wat het risico op schade is bij overschrijdingen van de grenswaarden. Daartoe is door [11] een studie uitgevoerd aan de hand waarvan een eerste indicatie kan worden gegeven. Deze kansen zijn ingeschat op basis van verzamelde praktijkgegevens bij leden van de SBR commissie, een numeriek onderzoek en vergelijking met gegevens uit de literatuur.
De praktijkgegevens zijn afkomstig van verschillende soorten gebouwen, trillingsbronnen en typen trillingen, waarbij verbanden met het al dan niet optreden van schade zijn vastgesteld.
De numerieke studie is uitgevoerd voor constructies uit metselwerk. Voor de van belang zijnde mechanismes is gebruik gemaakt van de literatuurstudie naar trillingscriteria uit 1990 [12] die destijds als basis voor de SBR Richtlijn 1 (later A) heeft gefungeerd.
In onderstaande tabel is de kans op schade aan een bouwwerk gerelateerd aan de verhouding tussen V_d/V_r. Deze kansen moeten als orde van grootte inschatting worden gezien voor gebruik in bijvoorbeeld risico inschattingen. Ze zijn zeker niet bedoeld als exacte waarde voor individuele bouwwerken. De tabel mag niet worden uitgebreid voor overschrijdingsfactoren groter dan 3.

Ordegrootte kans op schade voor draagconstructie en onderdelen van de constructie uit metselwerk

Factor op grenswaarde	Ordegrootte kans op schade
1 x grenswaarde ($V_d/V_r = 1$)	Ongeveer 1 %
1,2	Ongeveer 3%
1,5	Ongeveer 5%
2	Ongeveer 10%
3	Ongeveer 30%

Grenswaarden

10

10.1 Algemeen

In dit hoofdstuk zijn de grenswaarden opgenomen voor de verschillende aspecten van een bouwwerk. Het gaat hierbij om:
1. de draagconstructie op begane grond niveau;
2. de hoogste verdieping van de draagconstructie en onderdelen van de constructie die niet tot de draagconstructie behoren;
3. de fundering in verband met de kans op zettingen als gevolg van verdichting van de bodem.

De grenswaarde die voor de beoordeling wordt gebruikt heet de rekenwaarde van de grenswaarde en wordt aangegeven met V_r. Paragraaf 10.3 beschrijft de procedure voor de bepaling van V_r voor de verschillende aspecten van het bouwwerk.
Voor de beoordeling van de kans op zettingen dient naast de trillingssnelheid ook de trillingsversnelling te worden beoordeeld.

De beoordeling van de trillingsbelasting bestaat uit een vergelijking van V_d (bepaald in hoofdstuk 9) met V_r. Als V_d kleiner is dan V_r of gelijk is aan V_r, dan is de kans op schade acceptabel klein (ordegrootte 1% of minder). Als V_d groter is dan V_r, dan is de kans op schade (zie kader 43) groter.

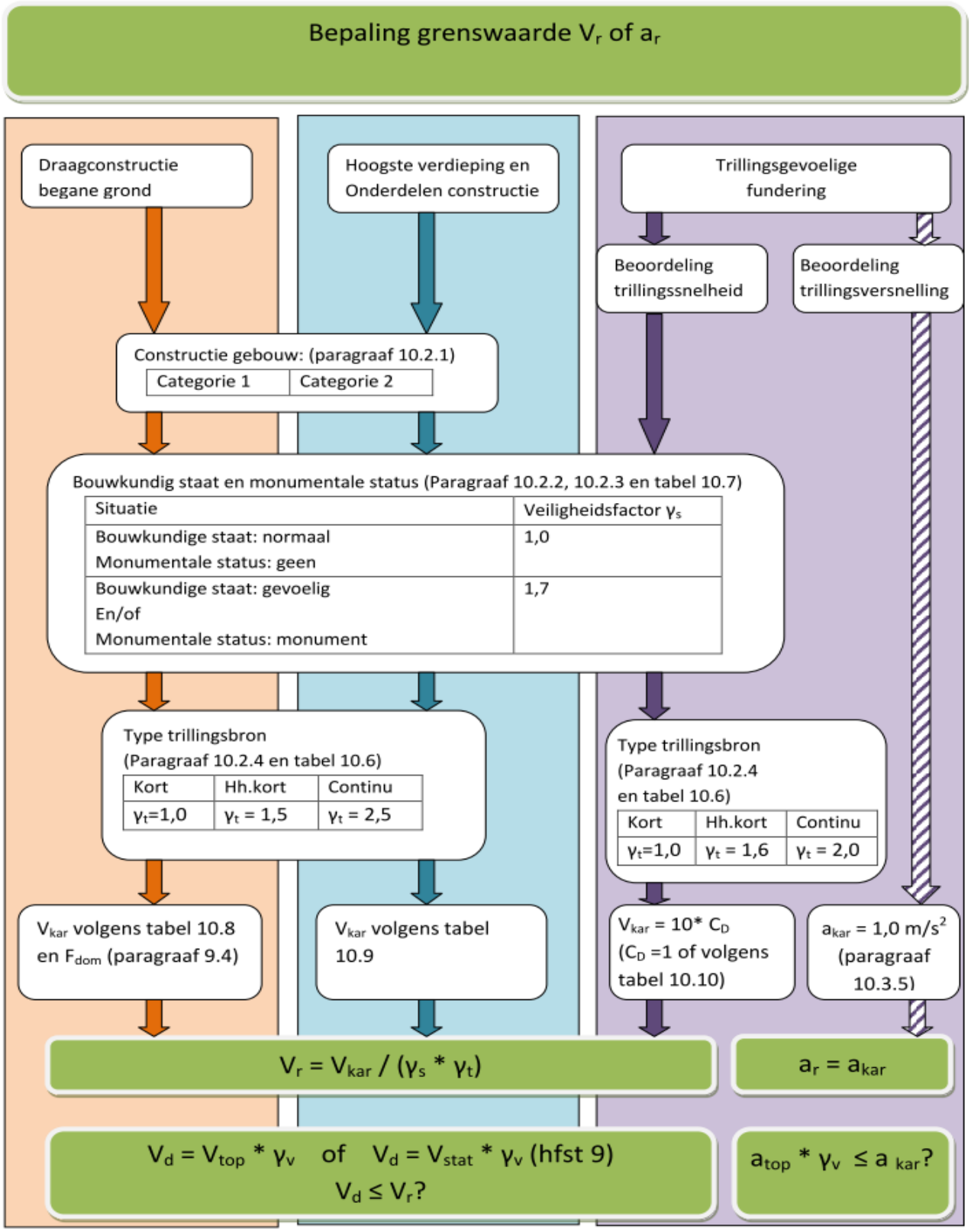
De beoordeling van de trillingsversnelling bestaat uit een vergelijking van a_d (bepaald in hoofdstuk 9) met a_r. Als a_d kleiner is dan a_r of gelijk is aan a_r, dan is de kans op schade acceptabel klein. Als a_d groter is dan a_r, dan is de kans op schade (zie kader 43) groter.

In bijlage 4 zijn aanvullend grenswaarden opgenomen die gebruikt kunnen worden voor pijpleidingen.

De grenswaarden zijn afhankelijk van:
a. de dominante frequentie;
b. de constructie van een bouwwerk (twee categorieën);
c. de bouwkundige staat van het bouwwerk (normaal of gevoelig);
d. de monumentale status van het bouwwerk;
e. het type trilling (drie types);
f. het type fundering.

De bepaling van de dominante frequentie is beschreven in hoofdstuk 9. De bepaling van de categorie van het bouwwerk, de bouwkundige staat, de monumentale status, het type trillingsbron en het type fundering zijn beschreven in paragraaf 10.2.

In figuur 10.1 is de bepaling van V_r of a_r (voor de trillingsgevoelige fundering) schematisch weergegeven.



Figuur 10.1 Schema bepaling V_r en a_r.

44

Categorie bouwwerken
Bouwwerken met een draagconstructie uit staal vallen buiten het toepassingsgebied van deze richtlijn omdat deze bouwwerken in het algemeen minder kwetsbaar zijn voor schade als gevolg van trillingen dan de bouwwerken gemaakt van andere materialen. Als deze bouwwerken dragende delen uit steenachtige materialen bevatten, kunnen deze delen wel volgens de richtlijn worden beoordeeld. Hiervoor kan een uitgebreide meting nodig zijn.
Onderdelen van bouwwerken bestaande uit staal vallen eveneens buiten het toepassingsgebied van de richtlijn.
Onderdelen van bouwwerken opgebouwd uit voorgespannen beton kunnen in categorie 1 worden ingedeeld, waarbij opgemerkt wordt dat deze onderdelen aanzienlijk hogere trillingsbelastingen kunnen weerstaan dan de grenswaarden die voor deze categorie zijn gegeven.
Bouwwerken bestaande uit combinaties van materialen, bijvoorbeeld een draagconstructie uit beton en niet dragende delen uit metselwerk, worden ingedeeld in de hoogste categorie (met de strengste grenswaarden) waartoe één van de materialen behoort omdat dat materiaal het meest kwetsbaar is. Bij uitvoering van een indicatieve trillingsmeting in dergelijke situaties, wordt de trillingsbelasting dus bepaald op de betonnen draagconstructie en beoordeeld op basis van categorie 2, metselwerk. Het is mogelijk om de draagconstructie en de niet dragende constructiedelen apart te beoordelen als op beide onderdelen apart is gemeten. Daarvoor is dan een uitgebreide meting nodig.

In eerdere edities van de richtlijn was nog sprake van een categorie 3 bouwwerk voor bouwwerken met monumentale status of gebouwen uit metselwerk dat in slechte staat verkeert. In de 2017 editie is categorie 3 vervallen en vervangen door een veiligheidsfactor. Daardoor kan een monument dat niet uit metselwerk bestaat (zoals monumentale bunkers uit gewapend beton) worden ingedeeld in categorie 1 (gewapend beton) en door de veiligheidsfactor extra worden beschermd zonder dat onredelijk strenge grenswaarden worden opgelegd.

45

Checklist
Voor de bouwkundige staat is een checklist opgesteld die tijdens een inspectie van een bouwwerk en eventueel met behulp van bouwkundige tekeningen kan worden ingevuld. Daarmee breidt de richtlijn haar werkgebied enigszins uit in de richting van de bouwkunde. De commissie is zich ervan bewust dat de benodigde bouwkundige kennis niet altijd aanwezig zal zijn bij de uitvoerders van het trillingsonderzoek maar vindt het onderwerp van te groot belang om geen aanzet te geven tot deze nieuwe werkwijze.

De checklist is bedoeld om vast te stellen of er sprake is van verhoogde gevoeligheid voor trillingen vanwege (lokaal) verminderde sterkte of verhoogde initiële spanningen. De checklist is niet geschikt voor een algemene bouwkundige schadebeoordeling. De lijst is evenmin geschikt voor het bepalen van de oorzaken van schade.

46

Monumentale status
Voor rijksmonumenten kan de monumentale status van een bouwwerk kan worden nagegaan via het Monumentenregister. Deze site vermeldt geen provinciale of gemeentelijke monumenten. Daarvoor kunnen de regionale of lokale monumenten-lijsten worden geraadpleegd.

10.2 Relevante aspecten ter bepaling grenswaarde

10.2.1 Constructie categorie

Bouwwerken en onderdelen van bouwwerken zijn ingedeeld in twee verschillende categorieën (zie kader 44) die gebaseerd zijn op de constructiewijze. Tabel 10.1 geeft een overzicht.

Tabel 10.1 Overzicht categoriale indeling bouwwerken.

Categorie	Omschrijving
1	• Onderdelen van de draagconstructie, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout. • Onderdelen van een bouwwerk die geen deel uitmaken van de draagconstructie (bijvoorbeeld scheidingsconstructies), indien deze bestaan uit gewapend beton of hout. • Draagconstructies van bouwwerken, geen gebouw zijnde, die bestaan uit metselwerk zoals pijlers van viaducten, kademuren en dergelijke.
2	• Onderdelen van de draagconstructie van een gebouw, indien deze bestaan uit metselwerk. • Onderdelen van een gebouw die niet tot de draagconstructie behoren, zoals scheidingsconstructies die bestaan uit niet-gewapend beton, metselwerk of uit brosse steenachtige materialen.

10.2.2 Bouwkundige staat

Bouwwerken en onderdelen van bouwwerken zijn ingedeeld naar bouwkundige staat betreffende de gevoeligheid voor trillingen. Er is sprake van een hogere gevoeligheid indien door veroudering, verbouwingen of andere oorzaken de sterkte in onderdelen is afgenomen ("slechte staat") of de spanningen zijn toegenomen ("initiële spanningen").
Om te bepalen of een bouwwerk of onderdeel van een bouwwerk in slechte staat verkeert of dat initiële spanningen een rol spelen, dient gebruik te worden gemaakt van de checklist (zie kader 45) uit bijlage 5. De checklist leidt tot een puntentelling. Een bouwwerk valt in de staat "gevoelig" als op basis van de checklist het aantal punten een drempelwaarde overschrijdt.
De checklist bevat de relevante soorten sterkteverminderingen en spanningsvermeerderingen, de bijbehorende bouwkundige oorzaken, de bijhorende bouwkundige gevolgen en de wijze waarop deze door waarneming ter plaatse kunnen worden vastgesteld.

De bouwkundige staat kent twee toestanden, zoals omschreven in tabel 10.2.

Tabel 10.2 Overzicht indeling bouwwerken en onderdelen naar bouwkundige staat.

Staat	Omschrijving
Gevoelig	• Bouwwerken of onderdelen waarvan de sterkte is verminderd. • Bouwwerken of onderdelen waarin sprake is van extra initiële spanningen.
Normaal	• Bouwwerken of onderdelen waarvan de bouwkundige staat niet gevoelig is.

10.2.3 Monumentale status

Bouwwerken zijn ingedeeld naar monumentale status (zie kader 46). Deze status kent twee toestanden zoals omschreven in tabel 10.3.

Tabel 10.3 Overzicht indeling bouwwerken naar monumentale status.

Status	Omschrijving

Monument	• Bouwwerken die van overheidswege een monumentale status zijn toegekend, zoals:
	  • Rijksmonument;
	  • Provinciaal monument;
	  • Gemeentelijk monument.

Geen	• Bouwwerken die geen monumentale status hebben.

47

Kortdurend of herhaald kortdurend?

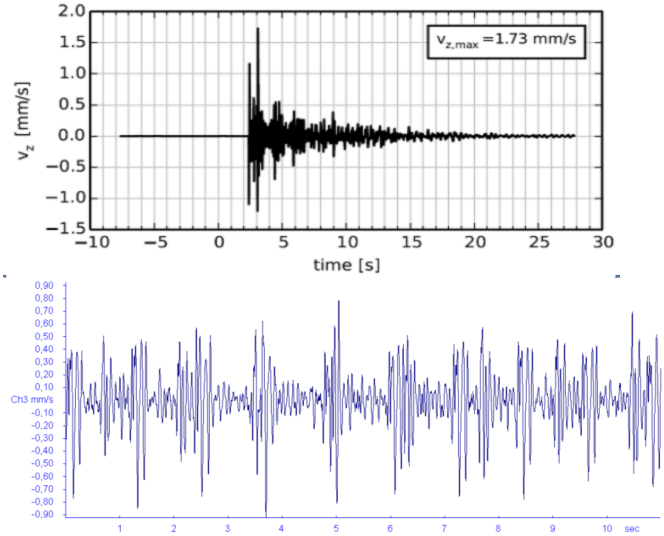
In de afweging tussen kortdurende of herhaald kortdurende trillingen spelen twee zaken een rol:

1. Kunnen de aanstotingen leiden tot vermoeiing in de constructie over de hele levensduur van het bouwwerk?
2. Kunnen de aanstotingen leiden tot resonantie van een (deel van) de constructie?

De kortdurende trilling hoort bij gebeurtenissen die zorgen voor een eenmalige stootvormige aanstoting. Als richtwaarde is uitgegaan van maximaal één gebeurtenis per jaar. De kans op resonantie in het bouwwerk als gevolg van de aanstoting is klein en het aantal aanstotingen gedurende de levensduur van het bouwwerk is zo gering dat cumulatie van effecten (zoals vermoeiing) evenmin een rol speelt.

Als de kortdurende aanstotingen in snel tempo achter elkaar volgen, zoals bij heien, of heel vaak plaatsvinden, zoals bij verkeer, dan is sprake van herhaald kortdurende trillingen. Als de aanstoting bestaat uit een grote piek voorafgegaan of gevolgd door een groot aantal veel kleinere pieken (minstens factor 3 lager) dan kan toch sprake zijn van een kortdurende trilling omdat de kleine pieken niet bijdragen aan de kans op vermoeiing.

Een trillingsbron kan alleen gemotiveerd als "kortdurend" worden geclassificeerd waarbij op basis van het verloop van de trillingssnelheid in het tijddomein moet worden aangetoond dat de kans op vermoeiing of resonantie minimaal is. Kan dat niet worden aangetoond, dan is sprake van herhaald kortdurende trillingen of continue trillingen.



Voorbeeld tijdsignaal kortdurende trilling (bovenste figuur) en herhaald kortdurende trilling (onderste figuur).

48

Continue trillingen

Continue trillingen kunnen leiden tot het optreden van resonantie in een bouwdeel omdat het bouwdeel door de continue trilling de tijd krijgt om in resonantie te raken. Een trilling kan al continue zijn als de tijdsduur enkele seconden duurt. De tijdsduur van kortdurende trillingen is veel korter, net als bij herhaald kortdurende trillingen. Daardoor is de kans op resonantie veel kleiner.

Resonantie treedt op als het bouwdeel door de trilling in de eigenfrequentie van het bouwdeel wordt aangestoten. Dit leidt tot een hoger trillingsniveau van het bouwdeel en daarmee tot een grotere kans op mogelijk schade aan dat bouwdeel.

Weg- en railverkeer kan zowel continu als herhaald kortdurend zijn. Van belang is of er resonanties kunnen optreden. Bij bijvoorbeeld een lange goederentrein of een continue verkeersstroom van vrachtwagens kan dit het geval zijn. Bij de keuze van het type trillingsbron dient een gemotiveerde keuze te worden gemaakt. De kans op resonantie kan worden ingeschat aan de hand van de tijdsduur van de trillingen en door de eigenfrequentie van het bouwdeel te bepalen en te vergelijken met de maatgevende frequenties die voorkomen in het trillingsspectrum van de trillingsbron. Als frequenties overeenkomen en de trillingsduur enkele seconden of langer duurt, dan bestaat voor deze frequenties kans op resonantie.

10.2.4 Type trillingsbron

Bij de bepaling van de rekenwaarde van de grenswaarde dient ook rekening te worden gehouden met het type trillingsbron. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen drie typen. Tabel 10.4 laat dit zien.

Tabel 10.4 Overzicht type trillingen.

Type	Omschrijving
Kortdurend (zie kader 47)	Trillingen die worden veroorzaakt door een stootvormige excitatie. Het aantal malen dat het trillingsverschijnsel voorkomt, is zo gering dat vermoeiing van constructiematerialen niet kan optreden. Voorbeelden zijn trillingen van de volgende bronnen: • explosies; • botsingen; • omvallen constructie.
Herhaald kortdurend (zie kader 47)	Trillingen die worden veroorzaakt door een stootvormige excitatie die herhaaldelijk voorkomt met dezelfde ordegrootte van trillingssnelheid. Voorbeelden zijn trillingen van de volgende bronnen: • heiwerkzaamheden; • sloophamers, pneumatische beitels; • weg- en railverkeer.
Continu (zie kader 48)	Hieronder worden trillingen verstaan die niet onder de voorgaande twee categorieën kunnen worden ingedeeld of trillingen waarbij resonanties en/of vermoeiingseffecten in de onderdelen van een bouwwerk kunnen optreden. Voorbeelden zijn trillingen van de volgende bronnen: • machines met roterende onderdelen; • verdichtingswerk door middel van trilwalsen; • het inbrengen van fundatiepalen en damwanden met behulp van trilblokken.

10.2.5 Fundering (kans op zettingen)

De fundering bestaat uit funderingselementen (oplegconstructie, poeren, funderingsbalken, platen, palen) en uit de grond rondom de funderingselementen. De funderingselementen worden voor wat betreft hun categoriale indeling samen met het bouwwerk geclassificeerd (zie 10.2.1).

Voor de fundering zijn aparte grenswaarden opgenomen met betrekking tot de kans op zettingen (zie 10.3.4). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen trillingsgevoelige funderingen (met een kans op zettingen) en niet trillingsgevoelige funderingen waarvoor trillingen niet kunnen leiden tot zettingen van de bodem. De grenswaarden zijn alleen van toepassing op trillingsgevoelige funderingen. Als een fundering niet-trillingsgevoelig is, is geen beoordeling nodig van de trillingssnelheid en trillingsversnelling van de fundering met het oog op de kans op zettingen.

Onder trillingsgevoelige funderingen vallen de volgende funderingen:
1. funderingen op staal op verdichtbaar of verkneedbaar bodemmateriaal, met een gesommeerde dikte van de lagen van 0,1 m of meer, met uitzondering van funderingen op zeer vaste zandlagen. De funderingselementen op staal kunnen poeren, stroken of platen zijn;
2. funderingen met niet-grondverdringende palen zoals avegaarpalen en boorpalen;
3. funderingen met grondverdringende kleefpalen;
4. Funderingen met grondverdringende palen die met een druktechniek in de bodem zijn gebracht met uitzondering van funderingen op zeer vaste zandlagen.

Voor bovenstaande funderingen is een aparte beoordeling van de trillingen nodig in verband met de kans op zettingen.

Onder niet-trillingsgevoelige funderingen worden verstaan:

1. staalfunderingen met 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) die, gegeven de eigenschappen van de trillingsbron, verwaarloosbare zakkingen zullen vertonen door extra negatieve kleef of verdichting van lagen onder het paalpuntniveau;
3. funderingen met grondverdringende palen met een hoge positieve kleef waarbij de bodemlagen die voor de positieve kleef zorgen, niet verdichtbaar zijn;
4. funderingen met grondverdringende palen die een belangrijk deel van hun draagvermogen ontlenen aan het puntdraagvermogen en waarvoor geen bijzondere omstandigheden van toepassing zijn die aanleiding kunnen geven tot zakkingen.

Voor de niet-trillingsgevoelige fundering is geen aparte beoordeling van de trillingen nodig.

10.3 Rekenwaarde van de grenswaarde

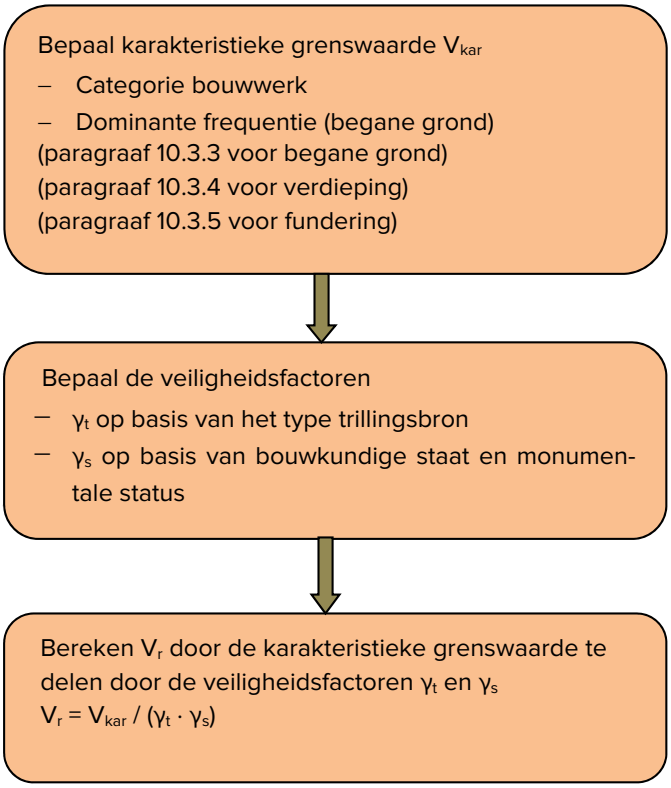
10.3.1 Algemeen

Bij de bepaling van de rekenwaarde van de grenswaarde (V_r) wordt onderscheid gemaakt tussen de beoordeling van de draagconstructie (begane grond en hoogste verdiepingsniveau), niet-dragende delen van een bouwwerk en de aparte beoordeling van de trillingsgevoelige fundering in verband met de kans op zettingen. Tabel 10.5 geeft een overzicht van de verschillende gegevens die nodig zijn bij de bepaling van de rekenwaarde van de grenswaarde.

Tabel 10.5 Overzicht benodigde gegevens ter bepaling van de rekenwaarde van de grenswaarde (V_r).

Onderwerp	Draagconstructie begane grond	Draagconstructie hoogste verdieping Niet dragende delen	Trillingsgevoelige fundering
Categorie bouwwerk (10.2.1)	Ja	Ja	Nee
Dominante frequentie (9.4)	Ja	Nee	Nee
Veiligheidsfactor type trilling (tabel 10.6)	Ja	Ja	Ja
Veiligheidsfactor i.v.m. bouwkundige staat (tabel 10.7)	Ja	Ja	Ja
Veiligheidsfactor i.v.m. monumentale status (tabel 10.7)	Ja	Ja	Ja

In algemene zin wordt V_r bepaald volgens het schema in figuur 10.2.



Figuur 10.2 Schema ter bepaling van de rekenwaarde van de grenswaarde V_r.

De rekenwaarde van de grenswaarde wordt bepaald volgens:

$$V_r = V_{kar} / (\gamma_t \cdot \gamma_s)$$

Hierbij is:

V_r de rekenwaarde van de grenswaarde afgerond op 1 cijfer achter de komma;

V_{kar} de karakteristieke waarde van de grenswaarde volgens figuur 10.3 en tabel 10.8 (draagconstructie begane grond) of 10.9 (draagconstructie verdieping en niet-dragende delen) of 10.10 (fundering);

γ_t de partiële veiligheidsfactor die het type trilling in rekening brengt, volgens tabel 10.6 (draagconstructie, onderdelen van een bouwwerk en fundering);

γ_s de partiële veiligheidsfactor die de bouwkundige staat en de monumentale status in rekening brengt, volgens tabel 10.7.

De bepaling van de karakteristieke trillingsversnelling a_{kar} en de rekenwaarde van de grenswaarde van de trillingsversnelling a_r is beschreven in paragraaf 10.3.5.

49

Veiligheidsfactor fundering
De toetsing voor trillingsgevoelige funderingen op de maximaal toelaatbare trillingssnelheid heeft te maken met de zettingen die op lange termijn kunnen ontstaan. De toetsing op maximale trillingsversnelling heeft te maken met het risico dat de fundering op korte termijn zijn draagvermogen verliest bijvoorbeeld door verweking of zetting van de bodem. In de toelichting bij tabel 10.11 in paragraaf 10.3.5 zijn de keuzen verder uitgelegd.

50

Veiligheidsfactor bouwkundige staat en monumentale status
Deze veiligheidsfactor is gebaseerd op de verhouding in grenswaarde tussen categorie 2 en 3 gebouwen uit de eerdere edities van de richtlijn. Deze verhouding is voor de begane grond afhankelijk van de frequentie en varieert tussen een factor 1,66 bij 10 Hz tot een factor 2 bij 100 Hz. Voor de verdieping bedraagt deze verhouding een factor 1,875. De gekozen waarde van 1,7 past bij de laagste dominante frequentie en leidt daardoor niet tot een aanscherping van de grenswaarde.

Voorbeeld:
Voor een categorie 3 bouwwerk en continue trillingen gold bij 10 Hz:
V_{kar} = 3 mm/s, γ_t bedraagt 2,5 dus V_r bedraagt 3/2,5=1,2 mm/s.

In de nieuwe systematiek geldt bij 10 Hz en een categorie 2 bouwwerk met monumentale status of in een gevoelige staat:
V_{kar} = 5 mm/s, γ_t bedraagt 2,5, γ_s bedraagt 1,7 dus V_r bedraagt 5/2,5/1,7 = 1,18 mm/s.

10.3.2 Veiligheidsfactoren

De waarden voor de veiligheidsfactoren zijn opgenomen in de tabellen in deze paragraaf. Tabel 10.6 geeft de waarden voor de veiligheidsfactor γ_t (type trilling).

Tabel 10.6 Overzicht veiligheidsfactoren type trilling bij beoordeling draagconstructie, niet-dragende onderdelen en fundering (zie kader 49).

Type trilling	Veiligheidsfactor γ_t	
	Draagconstructie en onderdelen	Fundering kans op zettingen
Kortdurend	1,0	1,0
Herhaald kortdurend	1,5	1,6
Continu	2,5	2,0

De waarden voor de veiligheidsfactor γ_s (zie kader 50) zijn opgenomen in tabel 10.7. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen combinaties van de verschillende classificaties die aan de bouwkundige staat en de monumentale status kunnen worden gegeven op basis van paragraaf 10.2.2 (bouwkundige staat) en paragraaf 10.2.3 (monumentale status).

Tabel 10.7 Veiligheidsfactoren bouwkundige staat en monumentale status bij beoordeling draagconstructie en niet-dragende onderdelen.

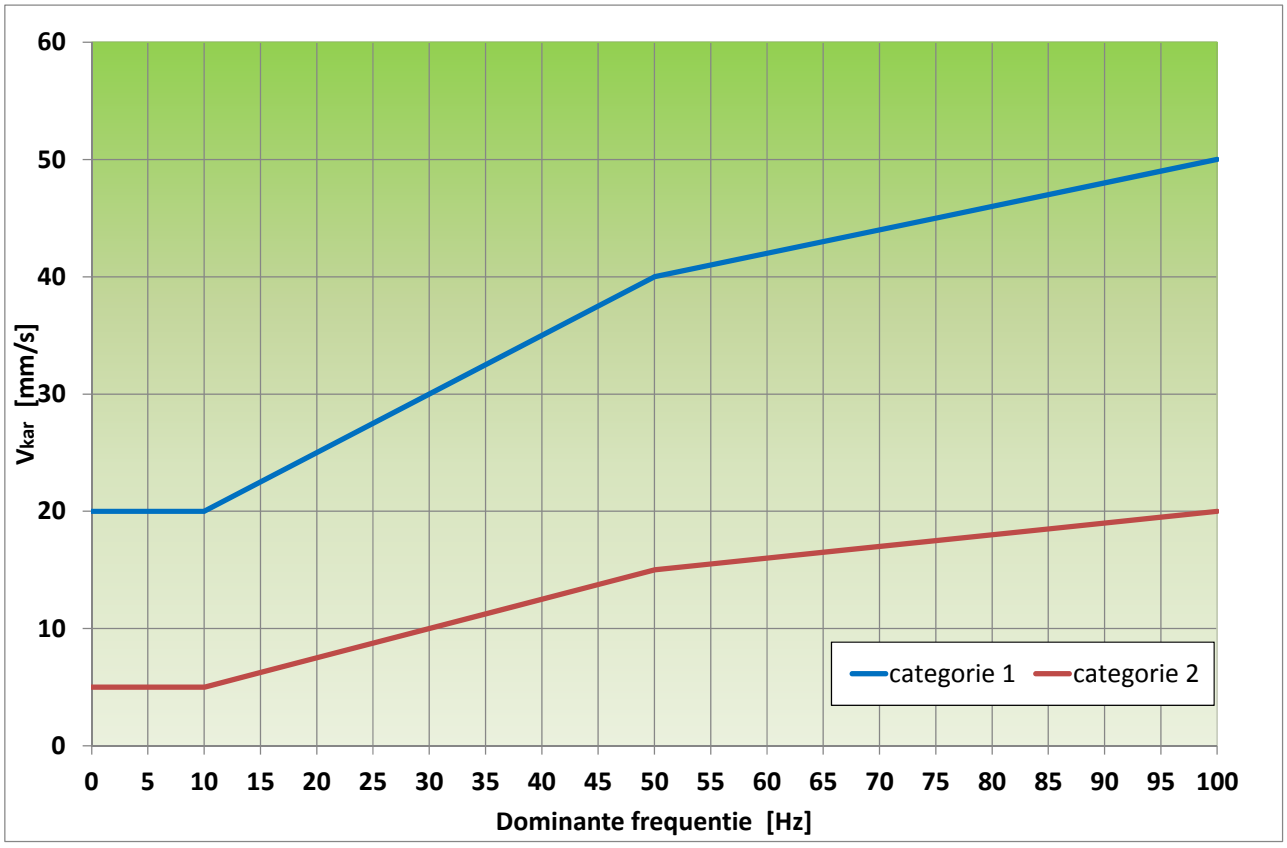
Type trilling	Veiligheidsfactor γ_s
Bouwkundige staat: normaal Monumentale status: geen	1,0
Bouwkundige staat: gevoelig en/of Monumentale status: monument	1,7

10.3.3 Grenswaarde voor de draagconstructie begane grond

De karakteristieke grenswaarden voor de beoordeling van de draagconstructie op begane grondniveau zijn in tabel 10.8 weergegeven. Figuur 10.3 toont de waarden uit tabel 10.8 in een grafiek.
Deze karakteristieke grenswaarden worden toegepast bij alle type metingen.

Tabel 10.8 Karakteristieke grenswaarde per gebouwcategorie voor de draagconstructie begane grond.

Frequentie [Hz]	V_{kar} bouwwerk [mm/s]	
	cat. 1	cat. 2
0	20,00	5,00
5	20,00	5,00
10	20,00	5,00
15	22,50	6,25
20	25,00	7,50
25	27,50	8,75
30	30,00	10,00
35	32,50	11,25
40	35,00	12,50
45	37,50	13,75
50	40,00	15,00
55	41,00	15,50
60	42,00	16,00
65	43,00	16,50
70	44,00	17,00
75	45,00	17,50
80	46,00	18,00
85	47,00	18,50
90	48,00	19,00
95	49,00	19,50
100	50,00	20,00



Figuur 10.3 Karakteristieke grenswaarden begane grond voor de twee categorieën bouwwerk.

51

Trillingssnelheid
De snelheidseis komt voort uit het feit dat bij herhaald optredende cyclische belastingen verdichting kan optreden, waardoor ongelijkmatige zettingen in de bodem kunnen ontstaan. Deze kunnen leiden tot vervormingen van het bouwwerk.

52

Trillingsversnelling
De versnellingseis komt voort uit het feit dat bij versnellingen groter dan de versnelling van de zwaartekracht (g = 9,81 m/s^2) een spanningsloze situatie in de grond ontstaat. Dan reageert de grond heel anders. Een situatie met verlaagde spanning van de bodem moet voorkomen worden. Gekozen is de bestaande grenswaarde van 0,1g in het gebouw voor een indicatieve meting te handhaven omdat er geen aanwijzingen zijn dat deze niet voldoet.
Bij harmonische belastingen is voor frequenties onder de 20-40 Hz de snelheidseis meestal maatgevend, en voor frequenties boven de 20-40 Hz is de versnellingseis maatgevend. De toetsing moet echter altijd op basis van de tijdsignalen plaatsvinden.

53

Laagdikte
De laagdikte van de natuurlijk verdichtbare grond (meestal zand) onder het bouwwerk kan bepaald worden op basis van sonderingsgegevens.
Hoe groter de laagdikte, hoe meer kans er bestaat op verdichting van die laag. Daarom is voor laagdiktes van 8 meter of meer de laagste waarde voor de factor C_D opgenomen. Bij een laagdikte van 1 meter of minder, is de kans op grote zettingen veel kleiner. Daarom heeft de factor voor deze laagdikte een waarde van 2 waardoor de grenswaarde V_{kar} een factor 2 hoger ligt.
Indien de dikte van de zettingsgevoelige lagen onbekend is, moet uitgegaan worden van de maximale laagdikte van 8 m. Er moet wel rekening gehouden worden dat tijdens de bouw mogelijk een grondverbetering is aangebracht van verdichtbare grond die niet altijd op de sonderingen zichtbaar is of dat cohesieve lagen direct onder de fundering zijn vervangen door (wel verdichtbaar) zand.

De aanwezige bestaande dichtheid van de laag onder het bouwwerk is niet in de grenswaarde verrekend omdat deze dichtheid met de thans beschikbare middelen niet eenduidig en betrouwbaar kan worden vastgesteld. Er is vanuit een ongunstige benadering uitgegaan van de veronderstelling dat altijd verdichting op kan treden.

10.3.4 Grenswaarde voor de draagconstructie hoogste verdieping en niet-dragende onderdelen

Algemeen
De karakteristieke grenswaarde voor de beoordeling van de trillingsbelasting op de hoogste verdieping voor de draagconstructie en voor niet dragende delen is weergegeven in tabel 10.9.

Tabel 10.9 Karakteristieke grenswaarde voor draagconstructie hoogste verdieping en voor niet-dragende onderdelen.

Categorie bouwwerk (zie 10.2.1)	V_{kar} [mm/s]
1	40
2	15

Verticale elementen niet dragende delen
Bij aanstootfrequenties lager dan de eerste eigenfrequentie (f_e) van een onderdeel, mag de toetsing plaats vinden op basis van de trillingsversnelling a_{kar}. Deze wordt berekend door de waarde van V_{kar} uit tabel 10.9 te vermenigvuldigen met $2*\pi*f_e$. De eerste eigenfrequentie wordt bij voorkeur bepaald door middel van een meting, waarbij het onderdeel door een stoot wordt belast en de reactie van het onderdeel wordt gemeten.

Horizontale elementen niet dragende delen
Bij aanstootfrequenties lager dan de eerste eigenfrequentie (f_e) van een onderdeel, mag de hoogste waarde voor a_{kar} worden aangehouden volgens:
- a_{kar} is gelijk aan V_{kar} volgens tabel 10.9 vermenigvuldigd met $2*\pi*f_e$;
- a_{kar} is 1 m/s^2.

10.3.5 Grenswaarden voor de trillingsgevoelige fundering

Grenswaarden
Voor de beoordeling van de kans op zettingen door verdichting van de bodem, geldt een grens voor zowel de trillingssnelheid (zie kader 51) als de trillingsversnelling (zie kader 52).

Karakteristieke grenswaarde trillingsversnelling
De karakteristieke grenswaarde a_{kar} bedraagt 1 m/s^2.

Karakteristieke grenswaarde trillingssnelheid
De karakteristieke waarde van de trillingssnelheid V_{kar} wordt berekend volgens de formule:

$$V_{kar} = 10 \cdot C_D$$

De factor C_D wordt bepaald uit de dikte van de zettingsgevoelige laag op basis van de formule

$$C_D = 1 + \frac{(8 - H)}{7}$$

Hierin is:
H de dikte van de zettingsgevoelige laag met een maximale waarde van 8 m;
C_D factor voor de laagdikte.

De factor C_D mag niet groter dan 2 zijn.
Tabel 10.10 geeft de numerieke waarden voor de factor C_D als functie van de laagdikte (zie kader 53).

54

Verschil in toepassing veiligheidsfactoren voor trillingssnelheid en versnelling

- De partiële veiligheidsfactor voor het type trilling moet voor de snelheidseis beschouwd worden omdat het risico dat de maximale dichtheid wordt bereikt, toeneemt met het aantal trillingen. Voor de versnellingseis moet deze factor niet worden toegepast. De versnellingseis voorkomt het optreden van een situatie met verlaagde spanning en is onafhankelijk van het aantal cycli.
- De partiële veiligheidsfactor voor de bouwkundige staat en/of monumentale status moet voor de snelheidseis wel beschouwd worden. Het is immers een maat voor de weerbaarheid of waarde van het gebouw. Voor de versnellingseis moet deze factor niet worden toegepast. Het betreft hier schade aan de fundering (optreden situatie met verlaagde spanning) die zodanig is dat voor elk gebouw deze ontoelaatbaar geacht moet worden.
- De factor voor de laagdikte moet voor de snelheidseis wel beschouwd worden. De zetting neemt immers toe met de laagdikte. Voor de versnellingseis moet deze factor niet worden toegepast. Het effect van de laagdikte op de gevolgen van een situatie met verlaagde spanning is namelijk zeer beperkt.

Overschrijding van de grenswaarden voor de trillingsgevoelige fundering betekent niet dat met zekerheid schade als gevolg van ongelijke zettingen zal ontstaan. Het betekent dat deze mogelijke schadeoorzaak niet kan worden uitgesloten. Door hoogtemetingen uit te voeren voor de trillingen voor, tijdens en na het in werking zijn van de trillingsbron, wordt directe informatie over eventuele zettingen verzameld.

Tabel 10.10 Factor C_D voor V_{kar} fundering afhankelijk van de laagdikte onder het bouwwerk.

Laagdikte [m]	factor C_D
1	2,00
2	1,86
3	1,71
4	1,57
5	1,43
6	1,29
7	1,14
8	1,00

Veiligheidsfactoren

Tabel 10.11 geeft een overzicht van de veiligheidsfactoren die van toepassing zijn bij de bepaling van V_{kar} en a_{kar} in verband met de kans op zettingen.

Tabel 10.11 Toepassing veiligheidsfactoren (zie kader 54) op karakteristieke grenswaarden zetting fundering.

Factor	Toepassen op V_{kar}	Toepassen op a_{kar}
Type trilling (γ_t)	Ja	Nee
Bouwkundige staat Monumentale status (γ_s)	Ja	Nee
Laagdikte (C_D)	Ja	Nee

55

Overige omstandigheden

Voorbeelden van overige omstandigheden kunnen zijn:

- bijzonderheden tijdens het in werking zijn van de bron zoals de bedrijfsomstandigheden of verstoring van de werking van de bron;
- de invloed van stoorbronnen op de meting;
- geotechnische gegevens (grondboringen, sonderingen);
- bijzonderheden van de bodem tijdens de metingen bijvoorbeeld vorst in de grond of een met water verzadigde bodem.

Rapportage

11

De rapportage van het trillingsonderzoek moet in elk geval de volgende elementen bevatten:

1. naam en adres van de organisatie die de metingen heeft uitgevoerd, alsmede de naam van de verantwoordelijke persoon;
2. aanduiding van datum en tijdstip van de meting;
3. omschrijving van de trillingsbron (technische gegevens) en een motivering van de classificatie van de bron ten behoeve van de beoordeling;
4. omschrijving van het bouwwerk (bestemming, constructiewijze, toegepaste bouwmaterialen, fundatie, bijzondere kenmerken);
5. aanduiding van de locatie van de metingen, bij voorkeur aangegeven door een beschrijving en een plattegrond;
6. de positie van de trillingsbron ten opzichte van het bouwwerk waaraan de metingen hebben plaatsgevonden;
7. aanduiding van de meetposities en meetrichtingen, bij voorkeur door middel van een tekening (op schaal) inclusief motivering van de gekozen meetpunten;
8. aanduiding van de gebruikte meetopnemers ,conditionerings-, registratie- en verwerkingsapparatuur (type en fabricaat);
9. een overzicht met gemeten topwaarden van de relevante trillingsgrootheden en de dominante frequentie per meetpunt;
10. een motivering van de classificatie van een bouwwerk en fundering ten behoeve van de beoordeling van de trillingen;
11. een onderbouwing voor de gekozen veiligheidsfactoren;
12. aanduiding van overige omstandigheden (zie kader 55) die bij de beoordeling van de meetresultaten van belang kunnen zijn;
13. een grafisch overzicht van alle meetresultaten inclusief de stoortrillingen waarbij deze op een tijdschaal van 24 uur zijn weergegeven. Indien er geen overschrijdingen zijn geconstateerd, kan gekozen worden voor een grotere tijdschaal. Dit dient in de rapportage onderbouwd te worden;
14. een onderbouwing van de buiten de beoordeling gelaten stoortrillingen.

De meetgegevens en rapportage dienen in het kader van de juridische bewaarplicht en verjaring van aansprakelijkheid minimaal 7 jaar bewaard te worden.

Referenties

[1] TNO Rapport 2017 R11272 Fragility functions for damage in masonry structures caused by vibrations
[2] SBR Richtlijn B Meet- en beoordelingsrichtlijn. Hinder voor personen in gebouwen, 2002.
[3] SBR Richtlijn C Meet- en beoordelingsrichtlijn. Storing aan apparatuur, 2002.
[4] NEN-ISO 2041:2009 Mechanische trillingen, schok en conditiebewaking – Woordenlijst
[5] TNO Rapport 2008 D1322/B Methodiek voor onderzoek naar de oorzaak van gebouwschade
[6] BRL 5024 d.d. 3 oktober 2013 Beoordelingsrichtlijn voor het KOMO® procescertificaat voor het uitvoeren van bouwkundige vooropnamen
[7] DIN 45669:1995 Teil 1 Messung von Schwingungsimmissionen - Anforderungen an Schwingungsmesser.
[8] Deltares Rapport 1220511 - 000 – GEO – 0010 (2016) Literatuuronderzoek Verdichting
[9] Deltares Rapport 1220511 - 000 – GEO – 0011 (2016) Fragility Curves voor Verdichting door Trillingen
[10] DIN 4150 deel 3 (2017) Erschütterungen im Bauwesen - Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
[11] TNO Rapport 2017 11734 (2017), Kans op schade bij trillingen – Evaluatie Database praktijkdata
[12] TNO Rapport B90-822 (1993) Trillingscriteria met betrekking tot schade aan gebouwen

Bijlage 1 Aanwijzingen en specificaties voor te gebruiken meetapparatuur

In bijlage 1 zijn aanwijzingen en specificaties opgenomen voor de te gebruiken meetapparatuur. In algemene zin zal de te gebruiken meetapparatuur bestaan uit:

- een trillingsopnemer;
- een conditioneringsinstrument;
- een meetinstrument;
- een registratie-instrument;
- een kalibratie-instrument.

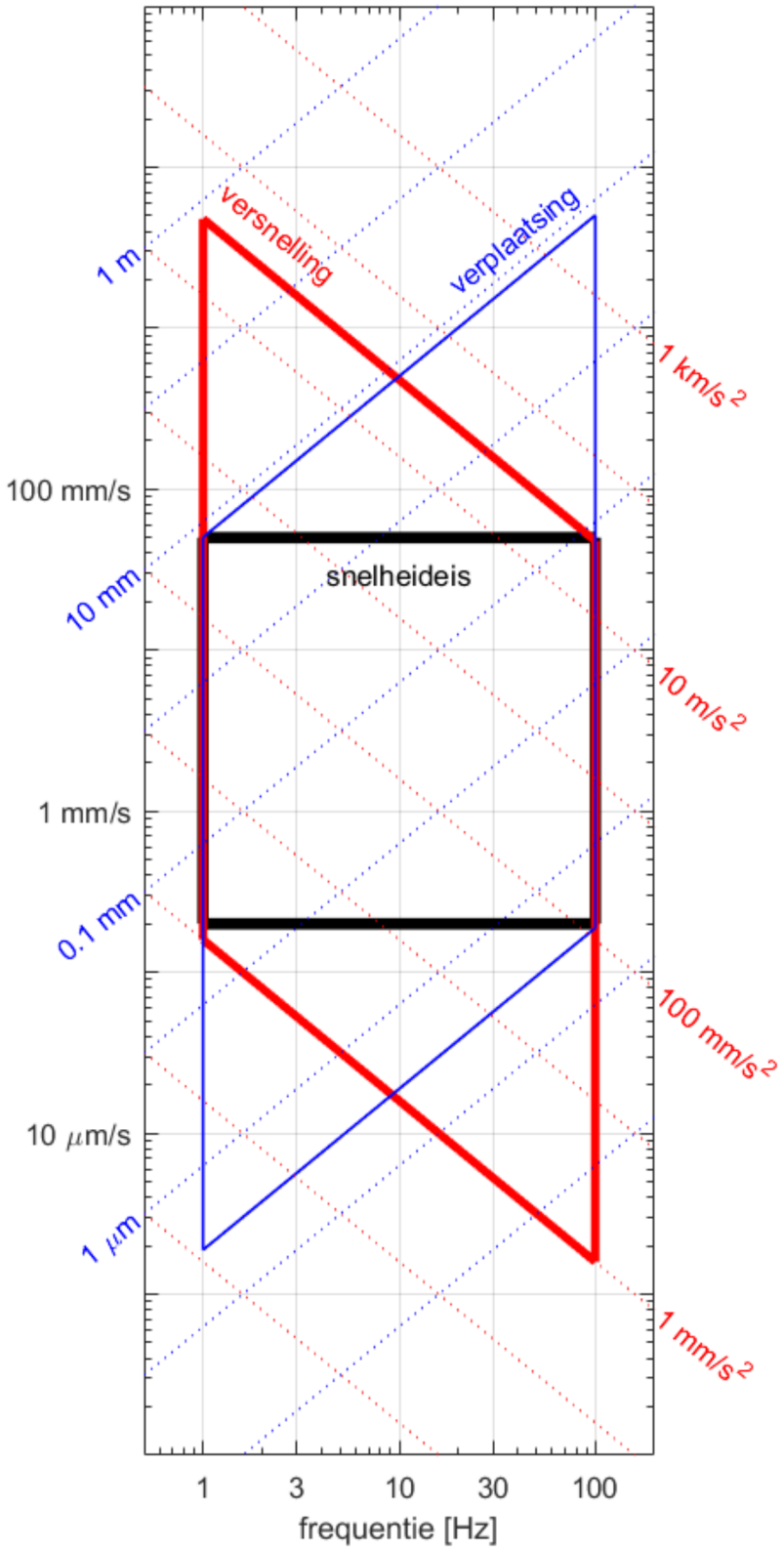
De verschillende onderdelen kunnen gecombineerd zijn in één apparaat.

Meetbereik

Bij het meetbereik is onderscheid gemaakt tussen de te meten trillingsgrootheid en het bereik in het frequentiegebied:

Snelheid: van 0,2 mm/s tot 50 mm/s
Versnelling: van 1 mm/s^2 tot 30 m/s^2
Verplaatsing: van 0,3 µm tot 8 mm

Figuur B1.1 toont een diagram waarin de meetbereiken voor de verschillende grootheden zijn weergegeven.
Als met versnellingssensoren wordt gewerkt, dient het meetbereik van de apparatuur het rode parallellogram te bevatten. Bij gebruik van een verplaatsingssensor, geldt het blauwe parallellogram.
Een afwijkend meetbereik mag alleen worden toegepast als kan worden aangetoond dat het meetbereik de dominante trillingen van de bron omvat.



Figuur B1.1 Meetbereik voor de trillingssnelheid, trillingsverplaatsing of trillingsversnelling.

Filteren

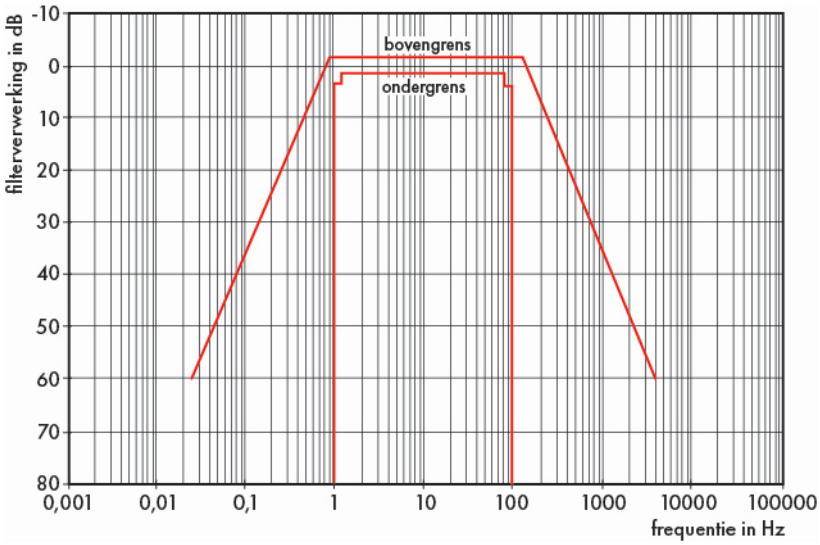
Afhankelijk van het meetbereik van de toegepaste trillingsopnemer bevat het meetsignaal frequentiecomponenten die buiten het te beoordelen frequentiegebied liggen. Deze frequentiecomponenten dienen te worden uitgefilterd door middel van een hoog- en laagdoorlaatfilter.
De filterkarakteristiek is gespecificeerd in tabel B1.1.

Tabel B1.1 Specificaties van de filterkarakteristiek.

Frequentiegebied in Hz	Filterverzwakking	
	In dB	Factor
van 1,25 Hz tot 80,0 Hz	$-1{,}2 \leq \Delta \leq 1{,}4$	$0{,}85 \leq \Delta \leq 1{,}15$
van 1,00 Hz tot 1,25 Hz en van 80,0 tot 100,0 Hz	$-1{,}2 \leq \Delta \leq +2{,}3$	$0{,}85 \leq \Delta \leq 1{,}30$
van 0,80 Hz tot 1,00 Hz en van 100,0 tot 125,0 Hz	$\Delta \geq -1{,}2$	$\Delta \geq 0{,}85$
van 0,80 Hz tot 0,025 Hz en van 125,0 Hz tot 4000 Hz	$\Delta \geq$ 12dB/octaaf*)	$\Delta \geq$ 4/octaaf*)
onder 0,025 Hz en boven 4000 Hz	$\Delta \geq 60$	$\Delta \geq +1000$

*) Gerekend vanaf $\Delta = -1{,}2$ dB respectievelijk $\Delta = 0{,}87$ bij de frequentie van 0,80 Hz voor frequenties lager dan 0,80 Hz en bij de frequentie van 125 Hz voor frequenties boven 125 Hz.

Figuur B1.2 geeft de filterverzwakkingscurve grafisch weer.



Figuur B1.2 Filterverzwakkingscurve.

Integreren/differentiëren

Als de trillingsversnelling wordt gemeten, moet deze door middel van integratie omgezet worden naar een trillingssnelheid. Voor het omzetten van een trillingsverplaatsing naar de trillingssnelheid dient het signaal gedifferentieerd te worden.

Versterken

Met behulp van de (meet- of ladings)versterker wordt het meetsignaal zodanig geconditioneerd dat het in het maximale schaalbereik van het aflees- of registratie-instrument valt. Hiermee wordt de uitleesfout zo klein mogelijk gehouden.

Fasekarakteristiek

Voor het in het tijdsdomein bepalen van de topwaarde van de trillingsgrootheid van een trilling die is opgebouwd uit meerdere frequentiecomponenten, dient de fasekarakteristiek van het meetsysteem te voldoen aan de onderstaande voorwaarde:

$\Delta\varphi(f) \leq 26°$ voor $f_{min} \leq f \leq 2{,}5\ f_{min}$ en

$\Delta\varphi(f) \leq 12°$ voor $f > 2{,}5\ f_{min}$

met: $\Delta\varphi(f) = \varphi_m(f) - \varphi^*(f)$

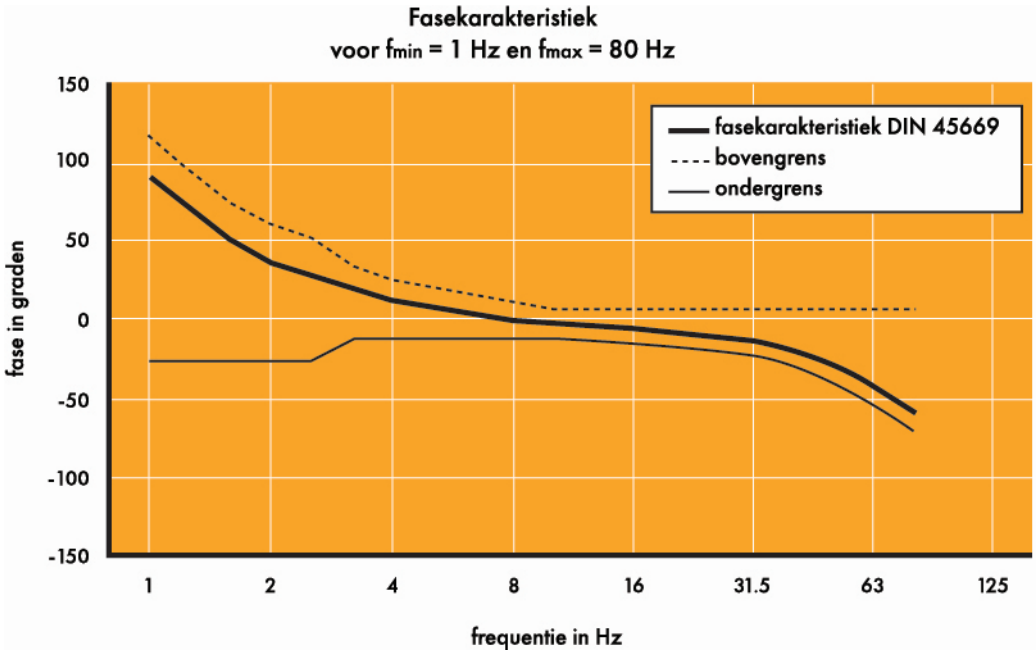
voor: $f \leq f^*$: $0 \leq \varphi^*(f) \leq \varphi(f)$ en $f > f^*$: $\varphi(f) \leq \varphi^*(f) \leq 0$

$$f^* = \sqrt{\frac{f_{max} f_{min}(1{,}2^2 f_{max} + \sqrt{2} f_{min})}{f_{min} + \sqrt{2} f_{max}}}$$

$$\varphi(f) = \arctan\left(\frac{1{,}2}{\frac{f}{f_{min}} - \frac{f_{min}}{f}}\right) + \arctan\left(\frac{\sqrt{2}}{\frac{f}{1{,}2 f_{max}} - \frac{1{,}2 f_{max}}{f}}\right)$$

volgens [7]

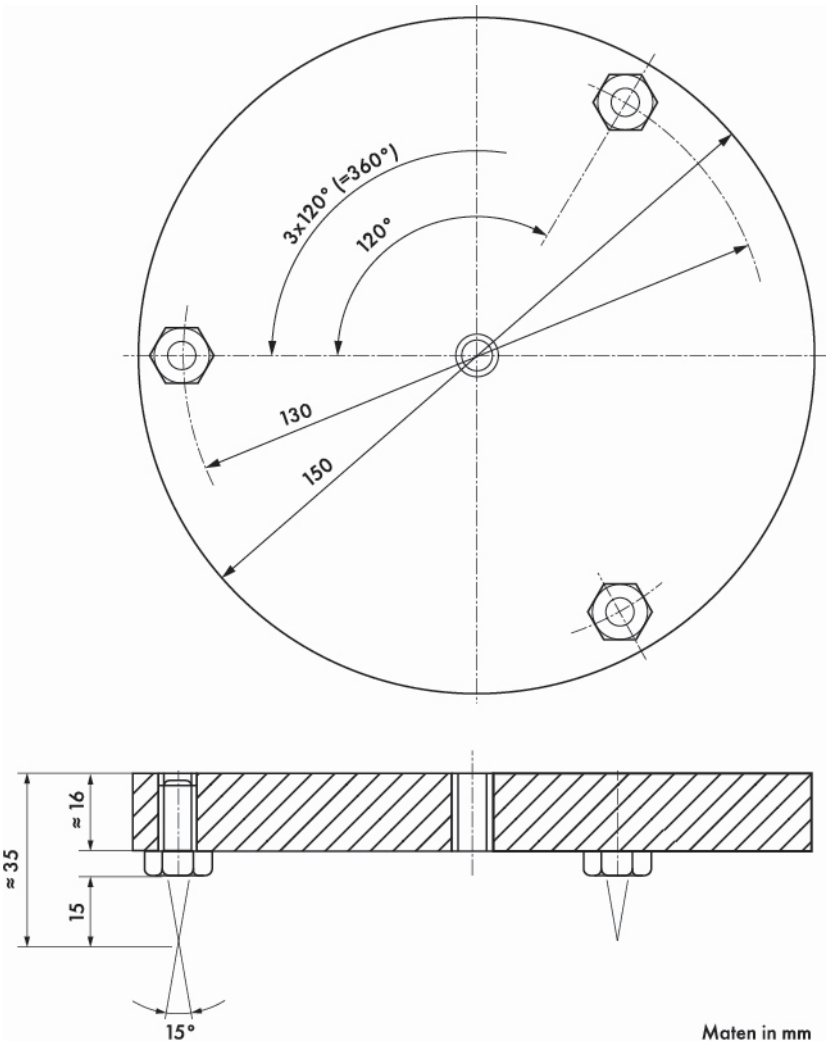
De grenswaarden waarbinnen de fasekarakteristiek hoort te liggen zijn grafisch gepresenteerd in figuur B1.3.



Figuur B1.3 Eisen fasekarakteristiek.

Bijlage 2 Bevestiging trillingsopnemer bij vloerbedekking

Indien de meetpositie op de vloer moet worden gekozen en de vloer is voorzien van een bedekking die van invloed kan zijn op de overdracht van trillingen tussen de vloer en de trillingsopnemer, dan dient de plaat volgens figuur B2.1 te worden gebruikt. De constructie wordt met de punten door de vloerbedekking gedrukt zodat contact wordt gemaakt met de harde ondervloer.
Als de plaat op een harde vloerbedekking wordt gebruikt dan dient er rekening mee te worden gehouden dat de horizontale versnelling niet groter is dan 3 m/s^2 omdat anders de plaat kan verschuiven.



Figuur B2.1 Hulpconstructie bij bevestiging trillingsopnemer op vloer met vloerbedekking.

Bijlage 3 Bepaling dominante frequentie bij de topwaarde

Methode 1
De in deze richtlijn beschreven dominante frequentie is de frequentie waarbij de karakteristieke grenswaarde bij die frequentie gedeeld door de trillingssnelheid bij die frequentie de kleinste waarde geeft. Voor de diverse typen trillingen dient men zich daarbij te baseren op een Fourier-reeks voor harmonische en periodieke trillingen, een Fourier-transformatie voor kortdurende trillingen en een variatiespectrum voor stochastische trillingen.
De procedure om uit het spectrum de voor de toetsing dominante frequentie te bepalen is als volgt:

Stap 1 bepaal de fysisch dominante frequentie. Dit is de frequentie (f_f) waar zich het hoogste maximum (v_f) in het spectrum bevindt;

Stap 2 zijn er in het spectrum geen lokale maxima (pieken) bij frequenties lager dan f_f, dan is f_f de voor de toetsing dominante frequentie. De procedure eindigt bij stap 2;

Stap 3 zijn er in het dichtheidsspectrum lokale maxima (v_n) bij frequenties (f_n) lager dan de fysisch dominante frequentie (f_f), dan wordt de voor de toetsing dominante frequentie bepaald volgens onderstaand voorschrift.

Bepaal voor de fysische dominante frequentie f_f de verhouding tot de grenswaarde V_{kar} door middel van de deling:

$$\frac{V_{kar\,(f)}}{v_f}$$

En voor iedere frequentie f_n de verhouding tot de grenswaarde V_{kar} door middel van:

$$\frac{V_{kar\,(n)}}{v_n}$$

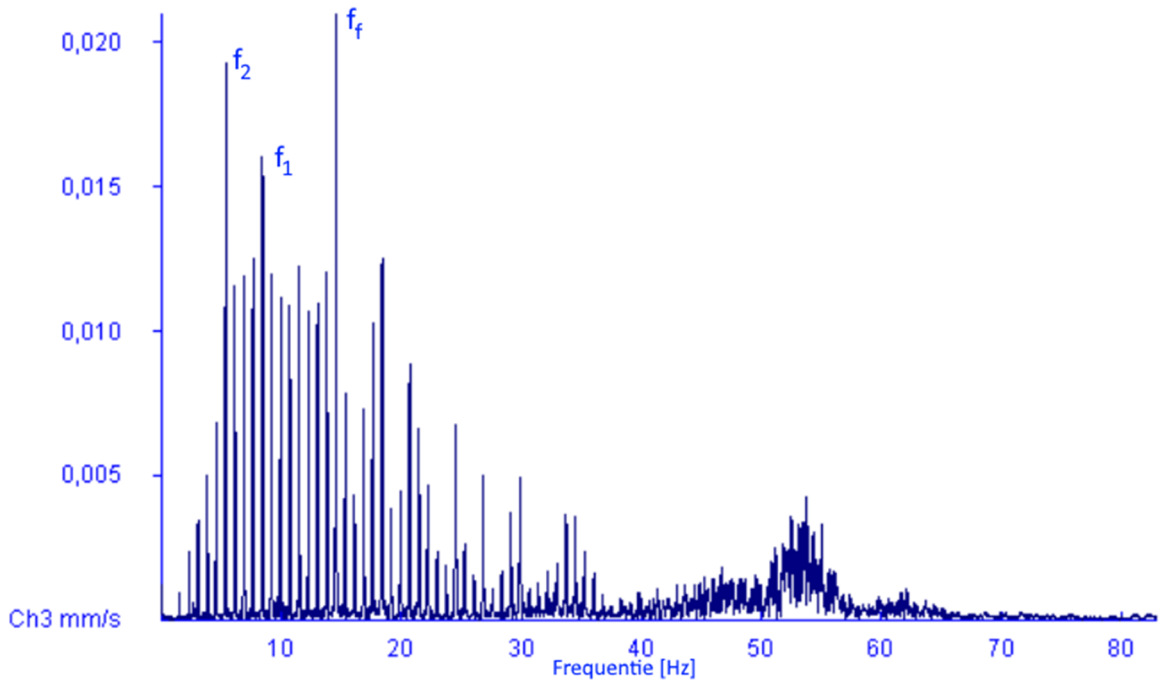
waarin:

v_f is het hoogste maximum uit het dichtheidsspectrum (bij f_f);
v_n is een lokaal maximum uit het dichtheidsspectrum waarvoor geldt dat $f_n < f_f$;
f_f is de fysisch dominante frequentie;
f_n is de frequentie bij het lokaal maximum v_n;
$V_{kar(f)}$ is de grenswaarde bij de frequentie f_f volgens figuur 10.3 (hoofdstuk 10);
$V_{kar(n)}$ is de grenswaarde bij de frequentie f_n volgens figuur 10.3 (hoofdstuk 10).

Stap 4 De dominante frequentie is die frequentie waarvoor de deling uit stap drie de kleinste waarde geeft.

Voorbeeld methode 1

Figuur B3.1 toont het FFT spectrum waarin drie pieken in het spectrum zichtbaar zijn.



Figuur B3.1 Voorbeeld FFT spectrum.

Stap 1: bepaling fysisch dominante frequentie f_f

De frequentie met de hoogste trillingssnelheid bedraagt 15 Hz.

Stap 2: andere pieken in het spectrum?

In dit voorbeeld komen twee andere pieken in het spectrum voor met een frequentie lager dan de fysisch dominante frequentie f_f namelijk f_1 bij 9 Hz en f_2 bij 5 Hz. Dit betekent dat stap 3 en 4 uit de procedure moeten worden gevolgd.

Stap 3: berekening verhouding tot V_{kar} voor iedere frequentie

Voor iedere piek in het spectrum wordt de bijbehorende V_{kar} bepaald (zie tabel 10.8, categorie 2) en de waarde voor de trillingssnelheid v_f (uit figuur B3.1). Dit leidt tot de volgende waarden:

Frequentie	V_{kar} [mm/s]	v [mm/s]	verhouding
f_f (15 Hz)	$V_{kar}(f) = 6,25$	$v_f = 0,022$	6,25/0,022 = 284
f_1 (9 Hz)	$V_{kar}(1) = 5,00$	$v_1 = 0,016$	5,00/0,016 = 312
f_2 (5 Hz)	$V_{kar}(2) = 5,00$	$v_2 = 0,019$	5,00/0,019 = 263

Stap 4: bepalen dominante frequentie

Uit de tabel blijkt dat bij f_2 het kleinste verhoudingsgetal optreedt. Dit betekent dat f_2 de dominante frequentie is en voor de beoordeling van de trillingssnelheid dient te worden gebruikt.

Methode 2

Als vereenvoudigde procedure is het ook toegestaan vanuit het tijdsdomein de dominante frequentie te bepalen. Met deze methode is het niet mogelijk om meerdere dichtbij elkaar liggende frequenties van elkaar te onderscheiden. De procedure is als volgt.

Stap 1 In het meetsignaal (de trillingssnelheid) wordt ter plaatse van de top een hoofdgolf gedefinieerd. Deze heeft de grootste uitwijking ten opzichte van de evenwichtstoestand en bevat twee extreme waarden, een positief een negatief lokaal extreem. De hoofdgolf begint en eindigt met een doorgang door de evenwichtsstand. Tussen beide nuldoorgangen bevindt zich nog een nuldoorgang.

Stap 2 De tijdsduur T van de hoofdgolf is de tijdsduur tussen de doorgang door de evenwichtstoestand direct voorafgaande aan het eerste extreem tot de doorgang direct na het tweede extreem.

Stap 3 De dominante frequentie is gelijk aan 1/T.

Bijlage 4 Grenswaarden buisleidingen

De karakteristieke grenswaarden V_{kar} voor buisleidingen zijn opgenomen in tabel B4.1. Voor de bepaling van de rekenwaarde van de grenswaarde V_r is de veiligheidsfactor γ_t voor het type trilling van toepassing.

Tabel B4.1 Karakteristieke waarde van de grenswaarde voor buisleidingen.

Type buisleiding	V_{kar} (mm/s)
Staal (gelast)	100
Beton, gewapend beton, voorgespannen beton, staal	80
Metselwerk, kunststof	50

Bijlage 5 Checklist bouwkundige staat

Werkwijze
De checklist is bedoeld om vast te stellen of voor een bouwwerk sprake is van verhoogde gevoeligheid voor trillingen vanwege (lokaal) verminderde sterkte of verhoogde initiële spanningen.
De checklist is niet geschikt voor een algemene bouwkundige schadebeoordeling of het bepalen van de oorzaken van schade.

Wijze van gebruik:
1. Het pand wordt van buiten in ogenschouw genomen. Zijn er geen scheuren en is er geen sprake van algemene scheefstand of scheefstand van onderdelen, dan is de bouwkundige staat "normaal" en hoeft de lijst niet te worden doorgenomen.
2. De eerste 7 oorzaken worden één voor één in ogenschouw genomen.
3. Daartoe wordt gekeken of een oorzaak wordt herkend, eventueel na toetsing aan een criterium.
4. Herkende oorzaken krijgen een vinkje ('oorzaakcheck').
5. Als een oorzaak is herkend, wordt meteen gekeken of gevolgschade is te herkennen.
6. Indien oorzaak en bijbehorende gevolgschade zijn herkend, krijgt die een vinkje ('gevolgcheck').
7. Als er een gevolgcheck is gezet bij de eerste 7 oorzaken (en dus ook een oorzaakcheck op dezelfde regel) dan is de bouwkundige staat "gevoelig". De oorzaak krijgt een vinkje of de waarde 4 in kolom 'oorzaak & gevolg check' en het bijbehorende nummer kan worden gebruikt ter vastlegging in rapportages.
8. Het is in principe voldoende na het zetten van de eerste oorzaak & gevolg check bij de eerste 7 oorzaken het onderzoek te stoppen en de lijst dus niet af te maken. Men kan dus ook, bij bijvoorbeeld zeer zichtbare oorzaken, de lijst van de eerste 7 oorzaken in eigen volgorde doorlopen.
9. Indien geen van de eerste 7 oorzaken tot een 'oorzaak & gevolg check' hebben geleid, worden de overige 6 oorzaken in ogenschouw genomen.
10. Indien een oorzaak en de bijbehorende gevolgschade worden herkend, wordt in 'oorzaak & gevolg check' de bijbehorende puntenwaarde genoteerd.
11. Oorzaak 13, waarvoor de woning dient te worden betreden, hoeft alleen behandeld te worden als alle andere oorzaken zijn behandeld en het puntentotaal op dat moment 2 of 3 bedraagt.
12. Zodra in totaal 4 of meer punten zijn toegekend, is de bouwkundige staat "gevoelig".
13. Als na het doorlopen van de gehele lijst het puntentotaal minder dan 4 bedraagt, is de bouwkundige staat "normaal".

nr	Oorzaak van verhoogde trillingsgevoeligheid	Herkenning oorzaak	Criterium	Oorzaak check		Herkenning gevolgschade Diagonaal = al dan niet gedeeltelijk traps	Gevolg check		Punten-waarde	**oorzaak & gevolg**
1	Scheefstand	Lintvoegmeting, vloerwaterpassing Knikkertest	>1:500 meteen rollen			Diagonale scheur tussen twee randen in metselwerk			4	
2	Stijfheidsvariatie in fundering, talud	Landschappelijke ligging (terprand, dijkzijde)	ja / nee			Diagonale scheur tussen twee randen in metselwerk loodrecht op talud			4	
3	Relatieve zetting van de bodem bij fundering op staal	Zie: "trillingsgevoelige fundering"	SBR A			Diagonale scheur tussen twee randen in metselwerk of horizontale scheur vlak boven fundering / maaiveld			4	
4	Slechte paalfundering	Risicogebied en/of funderingsonderzoek en/of: zie "trillingsgevoelige fundering"	Risicokaart, SBR A			Diagonale scheur tussen twee randen in metselwerk of horizontale scheur vlak boven fundering / maaiveld			4	
5	Slechte voegspecie	Voegspecie verkruimeld	>25% opp.			Scheuren in het voegwerk			4	
6	Lange scheuren	X meter of lopen tussen twee "gaten" (deuren, ramen) in vlak	X >= 2			Scheuren elders in hetzelfde vlak			4	
7	Onvoldoende horizontale stijfheid in de constructie	Niet verankerde wanden / geen vertandingen bij aansluitingen, etc.	ja / nee			Scheefstand van betreffende wanden			4	
8	Uitbreiding pand	Uitbouw aanwezig, constructief verbonden aan oudbouw	ja / nee			Scheur bij aansluiting uitbouw			2	
9	Zwak materiaal (specie, baksteen, etc.) + ouderdom	Kleur/structuur + bouwjaar cq renovatiejaar	Risicolijst			Scheuren door het materiaal			2	
10	Variatie in fundatiewijze	Fundatiegegevens	ja / nee			Scheur ter plekke van overgang			2	
11	Lekkage (grote scheuren in metsel-werk, lekkende dakgoot, etc.)	Zoutuitslag / uitloging in metselwerk	Aanwezig op kritieke plekken (bij ramen e.d.)			Scheuren ter plekke en/of in de omgeving van de lekkage			1	
12	Veel (korte) scheuren	#/m2	# >= 1			Lange en/of brede scheuren in hetzelfde vlak of in aansluitende vlakken			1	
13	Sloop van dragende onderdelen (binnenmuren)	Beeld gevel- en binnenwanden niet in overeenstemming met bouwjaar en/of bouwwijze	ja / nee			Diagonale scheur herleidbaar tot weggevallen afdrager			2	

SBRCURnet
SBRCURnet is een onafhankelijk kennisnetwerk voor de gehele bouwsector. Wij zorgen er voor dat professionals in de Burgerlijke en Utiliteitsbouw en in de Grond-Weg- en Waterbouw hun werk beter kunnen doen.

Wij brengen partijen uit de bouwsector met elkaar in contact voor het ontwikkelen van nieuwe vakkennis over actuele vraagstukken. Wij voorzien de sector van betrouwbare, bruikbare vakkennis. Dat doen we door kennis uit te geven in een breed scala aan producten en diensten. Bovendien helpen we bij het implementeren van kennis.

ISBN 978 90 5367 652 3

SBRCURnet
Postbus 516
2600 AM Delft

De Bouwcampus
Van der Burghweg 1
2628 CS Delft

T 015 - 303 0500
info@sbrcurnet.nl
www.sbrcurnet.nl