

2. Trillingen

Datum: 25 februari 2008

Bedrijf; Bureau voor Bouwpathologie BB, te Montfoort

Inhoudsopgave

1.0 Inleiding.....	3
2.0. Wat is een trilling?	4
2.1. Eenheden	4
2.2. Soorten trillingen	5
2.2.1. Vrije trilling.....	5
2.2.2. Gedempte trilling	5
2.2.3. Gedwongen trilling (resonantie).....	6
2.3. Energiebronnen.....	6
2.3.1. Kinetische energie.....	6
2.3.2. Potentiële energie	6
2.3.3. Mechanische energie	6
3.0. Wat ziet men in theorie, wanneer men op een trilling inzoomt?	8
4.0. Hoe worden trillingen gemeten?	9
4.1. Te meten grootte en meetprocedure	10
4.1.1. Te meten grootte	10
4.1.2. Meetprocedure en meetomstandigheden.....	10
4.2. Meetpunten en meetrichtingen	10
4.2.1. Meetpunten en meetrichtingen bij trillingen afkomstig uit de bodem.	11
4.3. De apparatuur nauwkeurigheid.....	12
4.3.1. Kalibratie	12
4.3.2. Nauwkeurigheid	12
4.4. Categorieën.....	12
4.5. Praktijk.....	13
5.0. Hoe worden trillingen door een bodem (materiaal) berekend?	14
5.1. Voortplanting van trillingen door de bodem (Barkan).....	14
5.2. Trillingsniveau op de fundering	15
6.0. Waar liggen theoretisch de grenzen voor de trillingen?	16
6.1. Richtlijnen voor de grenswaarden	16
6.2. Type trillingsbronnen.....	16
6.3. Rekenwaarde van de trillingssnelheid	16
6.2.1. Dominantie frequentie.....	17
6.2.2. Rekenwaarde voor de grenswaarde.....	18
6.2.3. Indicatieve en beperkte metingen.....	18
6.2.4. Uitgebreide meting	19
7.0. Welke invloeden hebben effect op het trillingen verloop?	21
7.1. De weg van de trilling.....	21
7.2. Essentiële onderdelen.....	22
7.3. Onder welke omstandigheid ontstaan de hevigste grondtrillingen?	22
8.0. In hoeverre hebben de diepte en de afstand van de bron tot aan het bouwwerk invloed op de trilling?.....	23
8.1. De diepte	23
8.2. De afstand.....	23
9.0. Welke soort trillingen kunnen invloed hebben op een bouwwerk?	24
9.1. Ruimte golven	24
9.2. Oppervlakte golven	25

1.0 Inleiding

De bodem kan gezien worden als een materiaal waar een grondtrilling doorheen wordt getransporteerd. Zoals in "1. Bodemgegevens Nederland" wordt beschreven heeft de bodem invloed op een trilling en andersom. Grondtrillingen zijn trillingen die door de bodem lopen, dit kan op grote diepte of net onder het aard oppervlak, over een lange afstand of een kleine afstand, snel of langzaam, harmonisch of ongelijk, alle kanten op of in een bepaalde richting zijn. Zo zijn er nog veel meer trillingseffecten op te sommen. Een grondtrilling is niet zichtbaar, hij wordt echter pas zichtbaar wanneer hij door een waarneembaar materiaal loopt. In dit verslag wordt er gekeken naar de invloed van verschillende factoren op grondtrillingen. Er wordt verteld wat een trilling is en welke soorten er bestaan.

In elk hoofdstuk worden subvragen beantwoord over grondtrillingen. Het onderwerp wordt behandeld aan de hand van de vragen van grof naar fijn. Het gaat om de volgende subvragen:

1. Wat is een trilling?
2. Wat ziet men in theorie wanneer men op een trilling inzoomt?
3. Hoe worden trillingen gemeten?
4. Hoe worden trillingen door een bodem (materiaal) berekend?
5. Waar liggen theoretisch de grenzen voor de trillingen?
6. Onder welke omstandigheden ontstaan de hevigste trillingen?
7. Welke invloeden hebben effect op het trillingen verloop?
8. In hoeverre hebben de diepte van de trillingsbron en de afstand van de bron tot aan het bouwwerk invloed op de trilling?
9. Welke soort trillingen kunnen invloed hebben op een gebouw?

Esther Stapper

2.0. Wat is een trilling?

Een trilling is een golvende beweging in een materiaal. Het is een periodieke beweging om een evenwichtsstand. Een trilling wordt veroorzaakt door een verstoring van de evenwichtssituatie. Het gevolg van de golvende beweging is dat het materiaal mee beweegt. Hierdoor plant de golf zich voort door het materiaal waardoor deze getransporteerd kan worden naar andere materialen, zoals van bodem naar de fundering van een bouwwerk.

2.1. Eenheden

- Frequentie (f): aantal trillingen (golflengten) per seconde in Hz, maar een meer voorkomende benaming is radiale per seconde (ω)

$$f = \frac{1}{T} \rightarrow [f] = \text{s}^{-1} = \text{Hz (Hertz)}$$

- Trillingstijd (t): Tijdsduur van een volledige trilling in aantal seconde per trilling. ($t = 1/F$)
- Amplitude (A): maximale uitwijking uit een evenwicht = U_{max} (legt bij geluid de geluidssterkte vast)
- Golflengte (λ): de afstand tussen twee opeenvolgende punten in m, in de voortplantingsrichting.
- Trillingssnelheid (v) = de snelheid van een trilling in m/s.

De relatie is $v = \lambda \times F$

Waarbij;

f de frequentie in Hz is

v de voortplantingssnelheid in meter per seconde

λ de golflengte in meter.

- Versnelling (a) = de versnelde snelheid in m/s^2
- (u, t)-diagram: grafiek met u vertikaal, t horizontaal
(u, t)-diagram is een sinus bij harmonische trillingen (zie 2.1. harmonische trillingen)

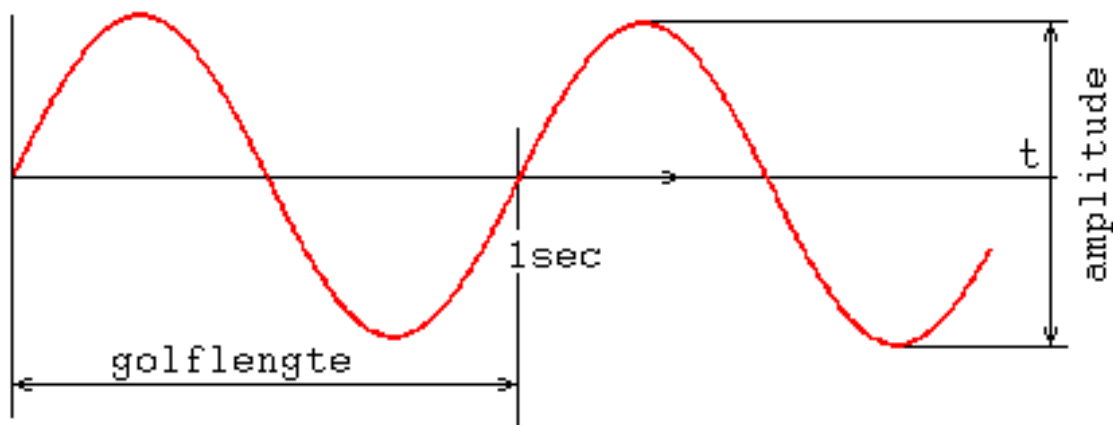


Fig. 2.1. Golflengte en amplitude van een trilling

2.2. Soorten trillingen

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen 3 verschillende trillingen te weten een vrije trilling, gedempte trilling en gedwongen trilling.

2.2.1. Vrije trilling

Aan een vrije trilling gaat geen energie verloren. Het is een golfbeweging die zichzelf na een constant aantal perioden herhaalt. Niet alleen de periode van de trilling is gelijk, maar ook het verloop ervan. Wanneer er een schok van buitenaf op een vrije trilling komt gedraagt de trilling zich over het algemeen als een vrije trilling met dezelfde lengte als de golf waar ze aan toegevoegd zijn. Bij een vrije trilling beweegt de grond niet en zal dus ook geen invloed hebben op gebouwen.

Op een vrije trilling met een sinus (Fig. 2.1.) gelden de volgende formules;

t (in T)	u (in A)
0	$u = \sin(0) = 0$
$\frac{1}{4}$	$u = \sin(2\pi f \cdot \frac{1}{4}T) = \sin(\frac{1}{2}\pi) = 1$
$\frac{1}{2}$	$u = \sin(2\pi f \cdot \frac{1}{2}T) = \sin(\pi) = 0$
$\frac{3}{4}$	$u = \sin(2\pi f \cdot \frac{3}{4}T) = \sin(\frac{3}{2}\pi) = -1$
1	$u = \sin(2\pi f T) = \sin(2\pi) = 0$

Opmerking: $f \cdot T = 1$ want $f = 1/T$

De harmonische beweging van een trillend punt rondom een evenwichtstoestand komt overeen met de beweging op de middellijn van een punt dat met een constante snelheid een cirkel doorloopt. (Fig.2.2)

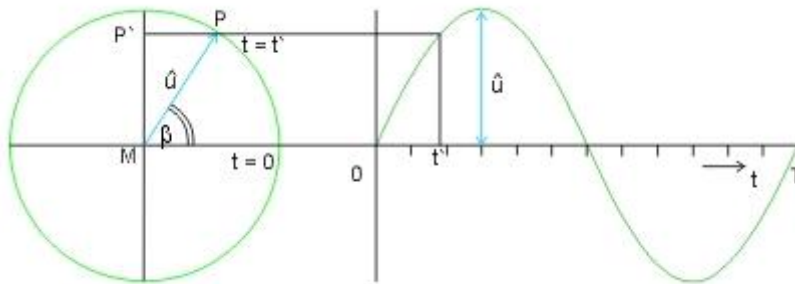


Fig. 2.2. Sinusbeweging in een cirkel

2.2.2. Gedempte trilling

Een gedempte trilling is een trilling waarbij energie verloren gaat. Hierdoor keert het systeem terug naar zijn evenwichtsstand. (Fig. 2.2.) De trilling kan gedempt worden door verschillende oorzaken van buitenaf, o.a. de weerstand van de bodemsoort, de weerstand van de fundering en de hoogte en materiaal van het gebouw, een andere trilling die loodrecht op de trilling staat etc.

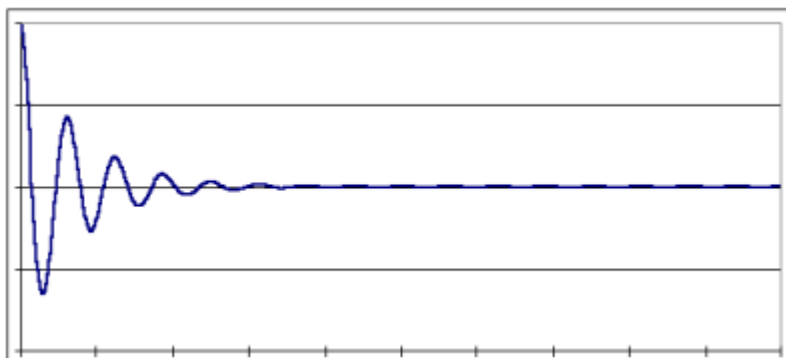


Fig. 2.2. Gedempte trilling

2.2.3. Gedwongen trilling (resonantie)

Een trilling die ontstaat door voortdurende beïnvloeding van buitenaf. Een trillend voorwerp zal bij een ander voorwerp resonantie teweegbrengen door het aanstoten van het tweede voorwerp. Dit voorwerp gaat met de trillingen meetrillen, sterker dan men op grond van de aanstoting zou verwachten. Resonantie kan optreden bij vrijwel elk tastbaar object. Maar bij objecten met een grote interne demping, zoals de bodem, zal de resonantie minder sterk zijn dan bijvoorbeeld bij een stalen ligger. Dit verschijnsel kan ontstaan in een fundering van een bouwwerk, vooral in het staat van de fundering. De grond begint te trillen als gevolg van een machine of voertuig deze veroorzaakt resonantie in de bodem. Omdat de bodem trilt veroorzaakt deze trilling op zijn beurt resonantie in de fundering van een bouwwerk. De sterkte van de resonantie is afhankelijk van de demping van de bodemsoort en de fundering. Als voorbeeld een seismische opname, hierbij is ook sprake van resonantie. Een seismische opname is een opname van de trilling ten gevolge van een aardbeving. Het meetapparaat komt in beweging door de trillingen door de bodem. Door het meten van de voortplantingstijd van trillingen en hun reflecties wordt het gesteentetype en structuur van de ondergrond bepaald.

2.3. Energiebronnen

Als gevolg van een trilling ontstaat er kinetische energie, potentiële energie die samen de mechanische energie veroorzaken ($1+1=2$). Kinetische en potentiële energie zijn vormen van mechanische energie. De totale mechanische energie ten gevolge van een trilling, kan je vinden door alle kinetische energie en alle potentiële energie vanuit de trilling op te tellen.

2.3.1. Kinetische energie

Kinetische energie of bewegingsenergie is een vorm van energie die een materiaal heeft doordat het beweegt. De hoeveelheid is afhankelijk van de massa en de snelheid. De SI eenheid voor kinetische energie is joule.

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * m * v^2$$

2.3.2. Potentiële energie

Potentiële energie is de energie die in een voorwerp aanwezig is dan wel opgeslagen is ten gevolge van een plaats van dit voorwerp in een krachtenveld of ten gevolge van een bijzondere toestand waarin het voorwerp zich bevindt.

Omdat er verschillende soorten krachten zijn, zijn er verschillende soorten potentiële energie. Potentiële energie als gevolg van de zwaartekracht levert bijvoorbeeld zwaartekrachtenergie op. Een ander voorbeeld van potentiële energie is veerenergie en een rotatieveer kan potentiële energie bezitten.

In het geval van de grondtrillingen is er sprake van energie die ontstaat als gevolg van de zwaartekracht, deze ontstaan door het gebruik van machines en voertuigen.

$$E_{\text{pot}} = m * g * h$$

2.3.3. Mechanische energie

Mechanische energie is de som van kinetische en potentiële energie.

$$\begin{aligned} E &= E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} \\ E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} &= \text{constant} \\ 0,9 * E_{\text{kin}} &= E_{\text{pot}} \end{aligned}$$

Bijvoorbeeld een heiblok. Het heiblok neemt ongeveer 10% van de bewegingsenergie op. Waardoor 90% van de valenergie uit het heiblok in de funderingspaal verdwijnt.

Energieomzetting in een harmonische¹ trilling:

Uiterste stand	→ evenwicht	→ uiterste stand
$E_p = \frac{1}{2} C u^2$	$E_p = 0$	$E_p = \frac{1}{2} C u^2$
$E_k = 0$	$E_k = \frac{1}{2} m v^2$	$E_k = 0$

Energiebehoud: bij elke trilling wordt steeds E_{pot} in E_{kin} omgezet en andersom. Hierbij blijft E constant.

¹harmonische trilling = een, zich herhalende beweging van een punt langs een rechte lijn rondom een evenwichtsstand. Het punt beweegt zich vanuit een maximale uitwijking met eenparige versnelling in de richting van de evenwichtsstand. Het punt passeert die evenwichtsstand met zijn maximale snelheid. Na passage van de evenwichtsstand wordt het

punt eenparig vertraagd totdat het aan de andere zijde van de evenwichtsstand een maximale uitwijking heeft. Daar komt het punt tot rust, vervolgens keert de beweging om en gaat het punt weer eenparig versneld bewegen in de richting van de evenwichtsstand. Dit proces herhaalt zich steeds opnieuw.

3.0. Wat ziet men in theorie, wanneer men op een trilling inzoomt?

Praktisch ziet men niks wanneer men op een trilling inzoomt. Een trilling is een niet waarneembaar natuurkundig verschijnsel. Een trilling wordt pas zichtbaar wanneer het door een waarneembaar materiaal gaat. Wel kan men een trilling horen wanneer het om een geluidsgolf gaat. En voelen als men in contact staat met een materiaal waar de trilling doorheen loopt, dit materiaal kan bij grote frequenties ook lucht zijn.

Als men theoretisch inzoomt op een trilling ziet men het volgende:

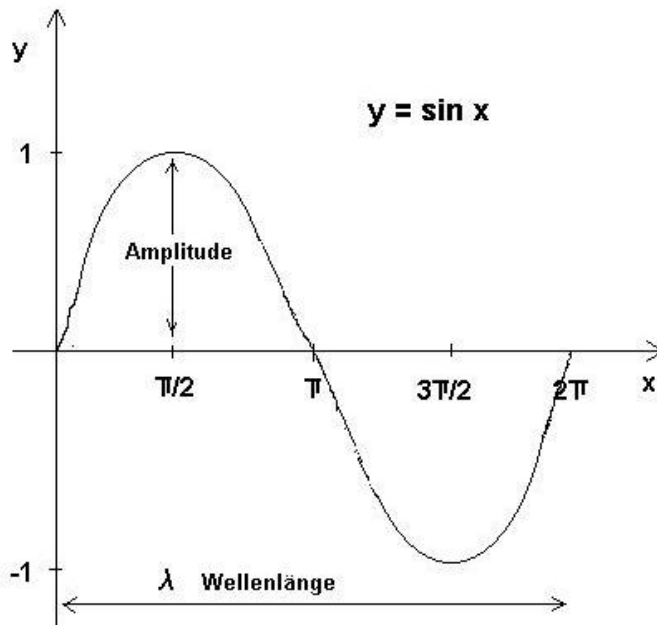


Fig. 3.1. Geschematiseerde trilling

t (in T)	u (in A)
0	$u = \sin(0) = 0$
$\frac{1}{4}$	$u = \sin(2\pi f \cdot \frac{1}{4}T) = \sin(\frac{1}{2}\pi) = 1$
$\frac{1}{2}$	$u = \sin(2\pi f \cdot \frac{1}{2}T) = \sin(\pi) = 0$
$\frac{3}{4}$	$u = \sin(2\pi f \cdot \frac{3}{4}T) = \sin(\frac{3}{2}\pi) = -1$
1	$u = \sin(2\pi f T) = \sin(2\pi) = 0$

Theoretisch gezien ziet men dus alle genoemde eenheden uit het eerste hoofdstuk terug in de golvende beweging van een geschematiseerde trilling. (Fig. 3.1) Om te beginnen de **frequentie (f)**. Het aantal golven die ontstaan bij in een seconde. Een golf is gelijk aan $\sin 2\pi = 1$. De **trillingstijd (t)** is het aantal seconde dat per totaal afgemaakte golf nodig is. Wanneer de frequentie minder wordt dan wordt de trillingstijd groter, en andersom. Dit is te beredeneren volgens de volgende formule;

$$F = 1/t \rightarrow \text{frequentie} = 1/\text{trillingstijd} \rightarrow \lambda/s = 1/(s/\lambda)$$

Amplitude (A) is de hoogte van een golf. Op $\frac{1}{4}$ en $\frac{3}{4}$ van de golf is de uitslag maximaal.

Golflengte (λ) de lengte van een trilling, deze zit altijd op $\sin(2\pi)$ afhankelijk van hoe groot de afstand x is tussen 0 en 2π . Hoe groter de x des te groter de golflengte. De

trillingsnelheid (v) is afhankelijk van de golflengte, als de golflengte klein is, is de trillingsnelheid groot. Want dan passen er meer golven in een meter. De trillingssnelheid is de snelheid van één trilling in meter per seconde. In een grafiek is het de f. De **versnelling (a)** is vervolgens de f'. De trillingssnelheid is de afgeleide van de versnelling. Zoals uit de

wiskunde les; de versnelling(= helling van de grafiek) is maximaal op 0, ½ en 1 van de golf, omdat daar de lijn het steilste loopt. De versnelling is minimaal(= 0) op ¼ en ¾ van de golf, omdat hier de lijn geen helling heeft, horizontaal loopt. Het u,t-diagram is terug te zien in de grafiek. De u is de “doorbuiging”, amplitude op de verticale as en de t is de tijd op de horizontale as.

4.0. Hoe worden trillingen gemeten?

Trillingen worden gemeten met behulp van een trillingsmeter. Een trillingsmeter meet de trillingsnelheid en trillingssterkte

Omdat dat de trillingsmeter volgens de SBR richtlijnen is afgestemd liggen de maximale toegestane trillingsnelheden tussen de 0,8 en de 100 Hz. Deze zijn van toepassing op de X-, Y-, en Z-richting. De sensor van de trillingsmeter bevat 3 gefoons die de drie richtingen de snelheid meten. Een gefoon is een soort microfoon die de trillingen vanuit de aarde meet. De snelheid van een object kan direct gemeten worden met een deze gefoon. Een gefoon is opgebouwd uit een spoel en een magneet. (Fig. 4.1.) De magneet is in de sensor aan een veertje vrij opgehangen in de spoel. Beweegt nu de gefoon, dan zal de magneet door de massa-traagheid in eerste instantie op zijn plek willen blijven. In de spoel wordt door de beweging van de spoel ten opzichte van de magneet een stroom opgewekt. Deze stroom is evenredig met de snelheid van de beweging: precies het gewenste uitgangssignaal.

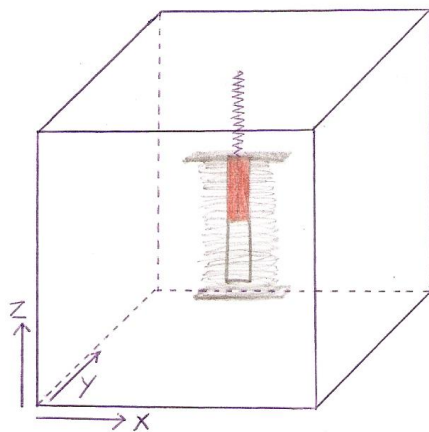


Fig. 4.1. Magneet aan de veer, in de spoel.

De gefoons zitten in een waterdichte ruimte. De ruimte is voorzien van een libel waarmee de sensor waterpas kan worden gesteld. (Fig. 4.2.) De sensoren kunnen aan een muur worden bevestigd of met meegeleverde onderdelen op de grond worden geplaatst. (Fig. 4.3.)



Fig. 4.2. Trillingsensor met libel.



Fig. 4.3. Trillingsensor bevestiging tegen de muur.

4.1. Te meten grootte en meetprocedure

4.1.1. Te meten grootte

Met de trillingsmeter wordt de trillingsnelheid in mm/s en trillingssterkte in Hertz gemeten. Deze waarden worden in drie richtingen gemeten. Twee horizontale richtingen haaks op elkaar en een verticale richting. De toetsingsgrootte bij schade aan gebouwen is de trillingsnelheid van de constructie. In de praktijk wordt vaak met versnellingsmeters in mm/s^2 gewerkt. Het houdt in dat het gemeten signaal door middel van integratie moet worden verwerkt naar de trillingsnelheid in mm/s. De directe meting van de snelheid heeft de voorkeur omdat de bewerkingen van de gemeten waarden dan achterwege kunnen blijven. Wanneer men met de eenheden gaat spelen kan men ook andere groottes uit de grafiek halen. Een voorbeeld, de meter registreert de snelheid van de trilling. De snelheid is in mm/s in een grafiek uitgezet tegen de tijd (s). Hierdoor kan men ook de verplaatsing van de trillingsmeter in mm berekenen; $\text{mm/s} \cdot \text{s} = \text{mm}$.

4.1.2. Meetprocedure en meetomstandigheden

Er wordt onderscheid gemaakt tussen drie trillingsmetingen, het verschil zit in de nauwkeurigheid van de metingen;

- Indicatieve meting
- Beperkte meting
- Uitgebreide meting

De indicatieve en beperkte metingen zijn alleen van toepassing op trillingen die uit de fundering van het gebouw voortkomen. De uitgebreide meting is van toepassing op alle trillingen, ook op bijvoorbeeld trillingen die veroorzaakt worden door laag frequent geluid. Deze wordt met nadruk genoemd omdat bouwdeelen als vloeren en wanden ten gevolge van trillingen en laag frequent geluid schade kunnen ondergaan. Bij laag frequent geluid loopt een hele trage trilling door het bouwwerk, waardoor er een lang tijdsbestek enkele trillingen worden voort geplaatst. Vanuit de praktijk kan gezegd worden dat dit hinderlijk is voor het bouwwerk.

Er dient gemeten te worden onder omstandigheden die aantoonbaar geschikt zijn om de uitkomst van de metingen te vertegenwoordigen, voor de trillingsbelasting waaraan een bouwwerk wordt onderworpen.

Als er een relatie ligt tussen trillingen en een bepaalde bron, dienen de achtergrondtrillingen als de trillingen die werken van de bron gemeten te worden. Hierdoor kan men bepalen op welk moment de bron werkt en of de bron op dat moment invloed uitoefent op het bouwwerk.

4.2. Meetpunten en meetrichtingen

Ten aanzien van de meetpunten en meetrichtingen dient onderscheid gemaakt te worden in trillingen afkomstig uit de bodem en trillingen uit een andere oorsprong. In dit onderzoek gaan we alleen diep in op de trillingen afkomstig uit de bodem.

4.2.1. Meetpunten en meetrichtingen bij trillingen afkomstig uit de bodem.

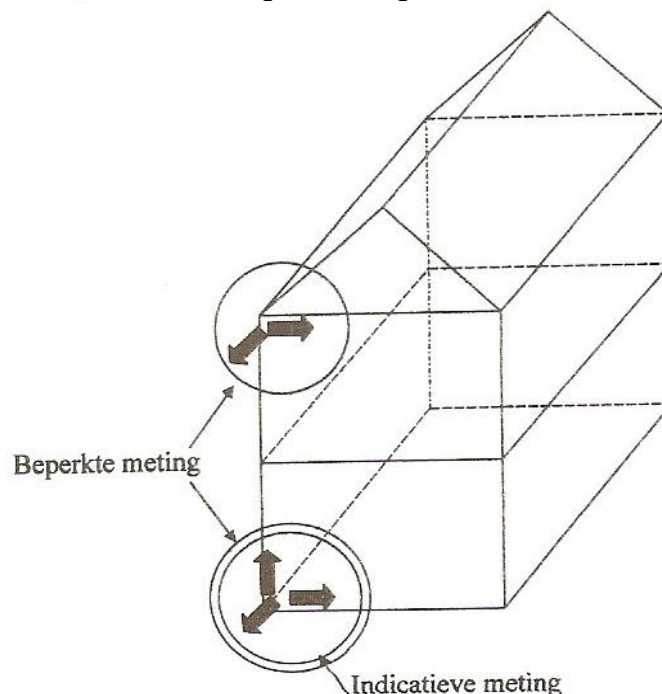
Zoals in “4.1.2. Meetprocedure en meetomstandigheden” werd beschreven zijn er drie soorten metingen mogelijk bij het meten van trillingen uit de bodem; de indicatieve meting, beperkte meting en uitgebreide meting. Bij de eerste twee metingen worden minder trillingsmeters gebruikt dan bij de laatste. Hierdoor is het minder zeker dat op de plaats wordt gemeten waar de grootste trillingssterkten optreden. Dit heeft als gevolg dat er een grote veiligheidsfactor op de meetresultaten wordt gezet.

Indicatieve meting;

Er wordt op één meetpunt gemeten. Dit wordt gekozen op het begane grondniveau in een stijf punt van de draagconstructie, bijvoorbeeld ter plaatse van de liftschacht, draagmuren/kolommen. Verder wordt de kortste afstand tot de bron gekozen. Er wordt in twee horizontale richtingen lood recht op elkaar en de verticale richting gemeten. De gekozen horizontale richtingen worden zoveel mogelijk afgestemd op de hoofdasen van het gebouw.

Beperkte meting

Er wordt een trillingsmeter op het begane grondniveau en een op de hoogste verdieping geplaatst, beide ter plaatse van een stijf punt van de draagconstructie. Verder wordt de kortste afstand tot de bron gekozen. Het meetpunt ter plaatse van de begane grond wordt in twee horizontale richtingen lood recht op elkaar en in de verticale richting gemeten. In het meetpunt ter plaatse van de hoogste verdieping wordt in twee horizontale richtingen lood recht op elkaar gemeten. De gekozen horizontale richtingen worden zoveel mogelijk op elkaar en op de hoofdasen van het gebouw afgestemd.



Uitgebreide meting;

Bij deze meting dient in een groot aantal punten gemeten te worden, dit als aanvulling op de beperkte meting. Op welke plaatsen de trillingsmeters komen te hangen is afhankelijk van het doel van de meting en van de situatie ter plaatse:

Richtlijnen volgens de SBR

- Voor beoordeling van de schade aan de draagconstructie; Meetpunten, onderling 10meter uit elkaar op de begane grondvloer niveau. Als het gebouw hoger is dan 10meter dienen op de tussen gelegen verdiepingen meters

geplaatst te worden. Deze meters meten alleen in horizontale richting, net als de hoogst gelegen meter. Deze richtingen komen overeen met de horizontale richting op de begane grond. De horizontale richtingen zijn zo veel mogelijk gelijk aan de hoofdassen van het gebouw.

- Voor de beoordeling van de schade aan de overige onderdelen.

4.3. De apparatuur nauwkeurigheid

4.3.1. Kalibratie

Kalibreren is het instellen en aanpassen van een systeem of instrument zodat het voldoet aan de specificaties of aan de gestelde eisen ten aanzien van nauwkeurigheid en betrouwbaarheid. Dit moet regelmatig, ongeveer 1 keer per jaar, worden gedaan. Vaak gaat het om het ijken van een schaalverdeling, het op de juiste maat brengen van materiaal, het controleren of een meter bepaalde afwijkingen heeft, het bepalen van afwijkingen bij geschut. In het geval van een trillingsmeter wordt door middel van kalibreren de amplitude-frequentie-respons van het meetsysteem gecontroleerd en gecorrigeerd ten opzichte van een bekend kalibratiesignaal.

4.3.2. Nauwkeurigheid

Er dient gestreefd te worden naar een nauwkeurigheid van 10%, bij de bepaling van de trillingsgrootte. Voor digitale meet instrumenten dient de bemonsteringsfrequentie ten minste 10 maal hoger te zijn dan de hoogste frequentie in het van belang zijnde frequentie-interval.

4.4. Categorieën

Na het meten van de trillingen kan het bouwwerk ingedeeld worden in drie categorieën. Elke categorie staat voor een mate in kwaliteit van de constructie van het bouwwerk.

Categorie 1

- In goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout.
- Onderdelen die geen deel uitmaken van de draagconstructie, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout.
- Draagconstructies van kunstwerken (uit de civiele techniek) die bestaan uit metselwerk zoals pijlers van viaducten, kademuren en dergelijke.

Gebouwen uit staal zijn minder kwetsbaar dan gebouwen uit beton en hout, vandaar dat deze buiten de richtlijn vallen.

Categorie 2

- In goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie van een gebouw, indien deze bestaan uit metselwerk.
- In goede staat verkerende onderdelen van een gebouw die niet tot de draagconstructie behoren, zoals scheidingsconstructies die bestaan uit niet gewapend beton, metselwerk of brosse steenachtige materialen.

Categorie 3

- Onderdelen van oude monumentale gebouwen met grote cultuurhistorische waarde
- In slechte staat verkerende gebouwen uit metselwerk of in slechte staat verkerende onderdelen van gebouwen.

Er is sprake van een slechte bouwkundige staat als;

- de sterkte van de draagconstructie in belangrijke mate is verminderd door reeds aanwezige schade

- De onderlinge samenhang van onderdelen of de sterkte van verbindingen tussen onderdelen zodanig is dat deze door trillingen kan bezwijken of in belangrijke mate kan verzwakken.
 - Omstandigheden die duiden op een slechte staat zijn reeds aanwezige scheuren, kieren, sterke vervorming, verzwakkingen en scheefstand van een gebouw.
- Onderdelen die uit combinaties van verschillende materialen bestaan worden ingedeeld in de categorie met het hoogste categorienummer waartoe een van de materialen behoort.

4.5. Praktijk

Als er een meting moet worden uitgevoerd wordt de sensor bevestigd aan het object dat bloot staat aan de trillingen. In veel gevallen zal dit de draagconstructie van een gebouw zijn. Dit kan een muur, maar ook een kolom zijn. Wanneer hier geen mogelijkheid toe is, kan de sensor ook op de grond worden geplaatst. Voor het uitvoeren van de trillingsmetingen is gespecialiseerde meetapparatuur nodig. Uit de meting moet onmiddellijk blijken hoe groot de belasting is en of er kans is op schade. Daartoe dienen de gemeten waarden meteen afleesbaar te zijn op het meetinstrument. (Fig. 4.4.)



Fig. 4.4. Waarden afleesbaar van het grijze apparaat

Meestal komt hiertoe een expert met een meetinstrument naar de meetplek. Als blijkt dat de trillingen (ruim) beneden de grenswaarde blijven verschuift het doel van de meting van kwantificeren naar bewaken en registreren. Ten behoeve van de bewaking heeft de apparatuur een uitgang welke wordt geactiveerd als de gemeten waarden een ingestelde grens overschrijden. Op deze uitgang kan b.v. een zwaailicht of sirene worden aangesloten. De apparatuur logt de gemeten waarden in een geheugen zodat achteraf kan worden bekeken hoe het verloop van de belasting is geweest, mocht er toch schade zijn ontstaan. Moderne apparatuur heeft voorzieningen die het mogelijk maken de registraties alleen te doen op momenten dat dit ook werkelijk zinvolle gegevens oplevert. Zo kan een ondergrens worden ingesteld voor de registraties. Ook kan er een tijdvenster worden ingesteld voor de registraties. Met deze voorzieningen kan de apparatuur lange tijd meten zonder dat het geheugen vol raakt met nutteloze gegevens.

5.0. Hoe worden trillingen door een bodem (materiaal) berekend?

Wanneer de loop van de trilling door de bodem wordt berekend is het van belang te weten welke onderdelen van invloed zijn op de trillingen. Er wordt gekeken naar het looppad van de trilling, elk onderdeel waar de trilling doorheen gaat heeft invloed op het uiteindelijke sterkte van de trilling, zoals ze worden ervaren.

In het geval van de trillingen ten gevolge van wegverkeer gaat het looppad door de bestrating/asfalt – de bodem – de fundering – de constructie van de woning – en de vloer.

Om het trillingsniveau te bepalen worden de volgende stappen doorlopen;

- Bepaling invloed voortplanting trilling door bodem
- Bepaling invloed van funderingssysteem en afmeting gebouw

5.1. Voortplanting van trillingen door de bodem (Barkan)

Om de overdracht van een trilling door de bodem te berekenen wordt gebruik gemaakt van de Barkan vergelijking;

$$V(r) = V(r_0) \left[\frac{r_0}{r} \right]^n e^{-\alpha(r-r_0)}$$

Waarin;

$V(r)$ Amplitude trillingssnelheid op een afstand r van de bron [m]

$V(r_0)$ Amplitude trillingssnelheid op referentie afstand tot de bron [m]

r Afstand van bron tot ontvanger

r_0 Referentie afstand tot de bron

n Parameter voor beschrijving geometrische uitbereiding [-]

α parameter voor beschrijving van de materiaaldemping [1/m]

Deze vergelijking kan worden gebruikt aan de hand van de metingen die in het veld zijn uitgevoerd. Voor de referentieafstand wordt zelf een keuze gemaakt. Daarom zullen de metingen in het open veld worden gedaan. De overige waarden worden bepaald door een zo goed mogelijke fit te verkrijgen van de Barkan vergelijking met de resultaten van de meting.

Ter indicatie wordt over het algemeen de volgende waarden voor de parameters α en n aangehouden;

	Van	Mediaan	Tot
α	0,0	0,03	0,1
n	0,0	0,5	1,0

5.2. Trillingsniveau op de fundering

Het trillingsniveau wordt over het algemeen berekend door de fundering en de stijfheid en afmeting van het gebouw. Over het algemeen gelden voor laagbouw (eengezinswoningen) de volgende relaties voor de factoren in verticale en horizontale richting, respectievelijk;

$$H_{xf,z} = \begin{cases} 1 & f < 10\text{Hz} \\ (1.15 - 0.015f) & f = 10 - 50\text{Hz} \end{cases}$$

$$H_{xf,x} = \begin{cases} 1 & f < 10\text{Hz} \\ (1.15 - 0.015f) & f = 10 - 50\text{Hz} \end{cases}$$

Waarin;

$H_{xf,z}$ de verticale reductiefactor

$H_{xf,x}$ de horizontale reductiefactor

f de dominante frequentie in de bodem

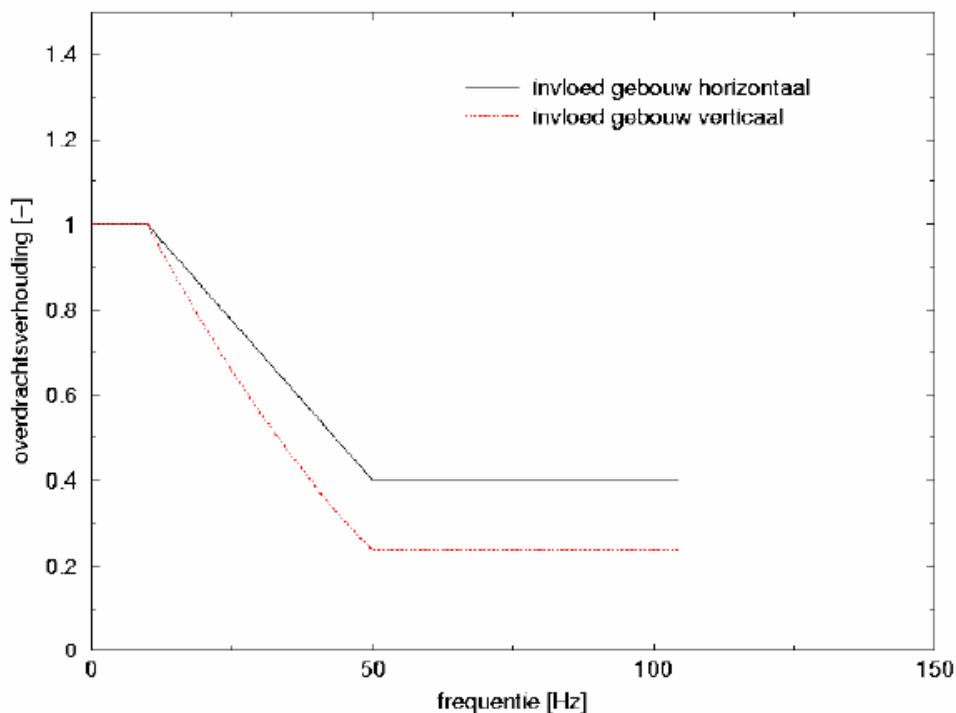


Fig. 5.1. De overdrachtsverhoudingen van de bodem naar het gebouw.

Deze grafiek wil zeggen dat wanneer een frequentie van 10 Hz of kleiner op de fundering van een laag bouwwerk staat, de fundering deze frequentie voor 100% over zal nemen in horizontale en verticale richting. Bij een frequentie tussen de 10 en de 50 Hz zal de overdracht steeds kleiner worden, dit komt doordat de fundering en de grond waar de fundering zich in bevindt de trilling af remt. Bij een frequentie van 50 Hz en hoger wordt er horizontaal en verticaal respectievelijk 40% en 20% van de trilling overgedragen aan de fundering. De bodem blijft vanaf 50 Hz een zelfde hoeveelheid trillingen aan de fundering afgeven. De overdracht in verticale richting neemt tussen de 10 en 50 Hz sneller af dan bij de trillingen in horizontale richting.

6.0. Waar liggen theoretisch de grenzen voor de trillingen?

Volgens SBR deel B en C zijn er grenzen van trillingen voor mensen en apparatuur. In dit onderzoek worden de grenswaarde aangehouden die beschadigingen kunnen veroorzaken aan bouwwerken. Hierover is meer te vinden in SBR deel A, "Schade aan gebouwen".

6.1. Richtlijnen voor de grenswaarden

De meet- en beoordelingsrichtlijn A, "Schade aan gebouwen" bevat richtlijnen voor het meten en beoordelen van schade aan gebouwen. De richtlijn maakt onderscheid in de constructiewijze en de staat van het bouwwerk, deze zijn verdeeld onder een 3 tal categorieën. Zie "4.4. Categorieën".

6.2. Type trillingsbronnen

Er zijn 4 soorten trillingsbronnen te onderscheiden;

1. Continu voorkomende trillingen, gedurende lange tijd, bijvoorbeeld machines, waardoor ook machines die niet permanent in werking zijn of met een korte werkcyclus en een langere rustperiode, zoals het trillen van een vorm of een mal. Uitgesloten zijn weg en rail verkeer.
In de bodem zullen deze trillingen een regelmatige frequentie veroorzaken, waardoor de bodem eventueel kan verzakken. Hier kan men zich op voorbereiden.
2. Herhaald kortdurende trillingen, gedurende langere tijd door weg- en railverkeer waaronder ook heftrucks, bulldozers en kranen op rails.
In de bodem zullen deze trillingen een onregelmatige frequentie veroorzaken, waardoor de bodem onverwachts zal verzakken.
3. Continu of herhaald voorkomende trillingen, gedurende een aaneengesloten tijdsduur, korter dan 3 maanden, zoals bouw- en sloopwerkzaamheden.
In de bodem zullen deze trillingen een regelmatige of onregelmatige trilling veroorzaken. Hierdoor zal de bodem onverwachts verzakken.
4. Incidenteel voorkomende, kortdurende trillingen bijvoorbeeld explosies.
In de bodem zullen deze trillingen een kort hoge frequentie veroorzaken, waardoor de bodem heel onverwachts zal gaan zakken.

6.3. Rekenwaarde van de trillingssnelheid

De rekenwaarde komt uit de SBR deel A "Schade aan gebouwen". Volgens de SBR richtlijnen dient er minimaal 1 week gemeten te worden. Kortere metingen leiden tot statistische onzekerheid. Om deze reden worden de waarden, uit de meting korter dan een week, statisch verwerkt. In de statistische verwerking dienen de achtergrondtrillingen voorkomen te worden. Dit wordt gedaan door bij de verwerking alleen die trillingssterkten te beschouwen die minimaal 50% van de hoogste gemeten trillingssterkte V_{top} bedragen.

$$V_{top,i} > 0,5 V_{top}$$

Maximaal worden de 15 grootste meetwaarden gebruikt. Is er niet 15 keer een trilling gemeten, dan moet er een correctie van de statische topwaarden worden uitgevoerd. De verwerking vindt plaats volgens de volgende formule;

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

Waarin;

V_{stat} statisch berekende topwaarde van de trillingssnelheid van een meetpunt en meetrichting.

- 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} moet bedragen
- β factor gelijk aan 2,62 (dit komt overeen met de kans van 1% overschrijding) 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 de tabel.
- σ de standaard afwijking waarde bepaald over de n (maximaal 15) hoogste waarden van de topwaarde per gebeurtenis:

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

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

Waarin;

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

n aantal topwaarden dat wordt gebruikt in de statische verwerking (maximaal 15)

Nu de topwaarde van de trillingssnelheid bepaald is, kan men kijken of hij gelijk is aan de waarden van V_{top} of V_{stat} . De rekenwaarde van de topwaarde dient te worden bepaald volgens de volgende formule;

$$V_d = V_{top} \gamma_v$$

Waarin;

V_d De rekenwaarde van de trillingssnelheid

V_{top} De gemeten of statisch bepaalde topwaarde van de trillingssnelheid in het meetpunt

γ_v de partiële veiligheidsfactor die het type meting in rekening brengt, conform de tabel;

Type meting	γ_v
indicatief	1,6
beperkt	1,4
uitgebreid	1,0

6.2.1. Dominantie frequentie

Er zijn twee methode om de dominantie frequentie te bepalen;

1. Wordt uitgelegd aan de hand van stappen;

Stap 1. Haal de dominante frequentie uit de grafiek

Stap 2. Zijn er meer maxima, lager dan de dominante frequentie?

Stap 3. Vul de waarden in de volgende vergelijkingen in;

$$V_f / V_n \leq V_g(f) / V_n(f)$$

Stap 4. De dominante frequentie is die frequentie f_n waarvoor de kleinste waarde wordt gevonden in de volgende formule;

$$V_f / V_n \times V_g(n) / V_g(f)$$

Indien deze waarde voor alle frequenties f_n groter is dan 1, is de frequentie f_f de dominante frequentie.

Waarin;

V_f de hoogste waarde bij de frequentie f_f uit de grafiek

- Vn andere maxima uit de grafiek waarvoor geldt $f_n < f_f$
- Vg(f) de grenswaarde bij de frequentie f_f volgens figuur 6.1
- Vn(f) de grenswaarde bij de frequentie f_n volgens figuur 6.1

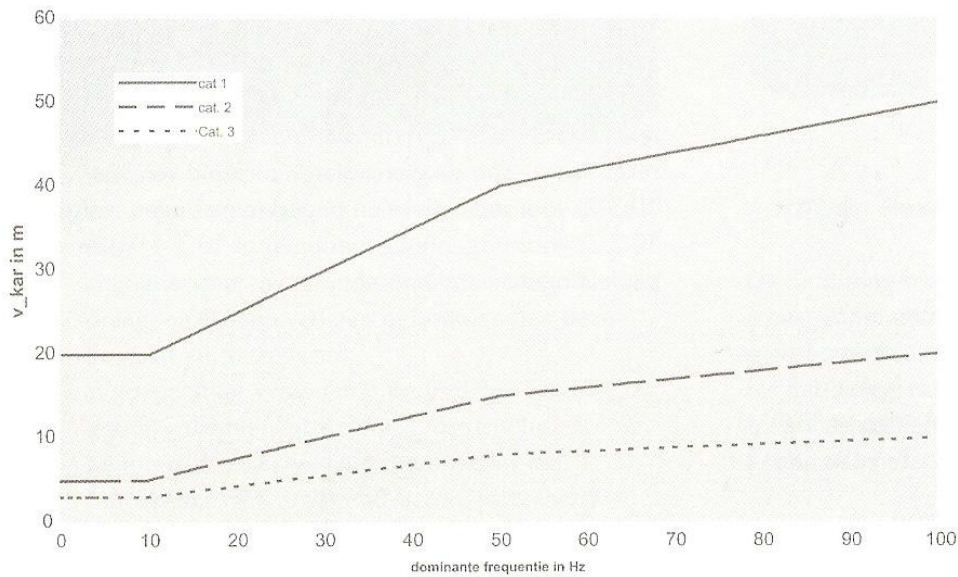


Fig. 6.1 De karakteristieke waarde van de grenswaarde op begane grondvloer niveau, als functie van de dominante frequentie.

2. Bepaal de dominante frequentie uit de grafiek.

6.2.2. Rekenwaarde voor de grenswaarde

Volgens de praktijkervaring bestaat er een kans van minder dan 1% dat er schade aan bouwwerken en funderingen op zal treden indien de rekenwaarde van V_{top} uit 6.1. kleiner is dan de rekenwaarde van de grenswaarde bepaald volgens 6.2.1 voor indicatieve en beperkte metingen en 6.2.2. uitgebreide metingen.

6.2.3. Indicatieve en beperkte metingen

De rekenwaarde van de grenswaarde wordt bepaald door de volgende formule;

$$V_r = V_{kar} / \gamma_t$$

V_r De rekenwaarde van de grenswaarde

V_{kar} De karakteristieke waarde van de grenswaarde volgens Fig. 6.1, 6.2 en de volgende tabel;

Categorie volgens. 4.4	V_{kar} (mm/s)
1	40
2	15
3	8

Tabel 1

γ_t Veiligheidsfactor die het type trilling in rekening brengt volgens de volgende tabel;

kortdurend	1,0
herhaald kort durend	1,5
continu	2,5

Tabel 2

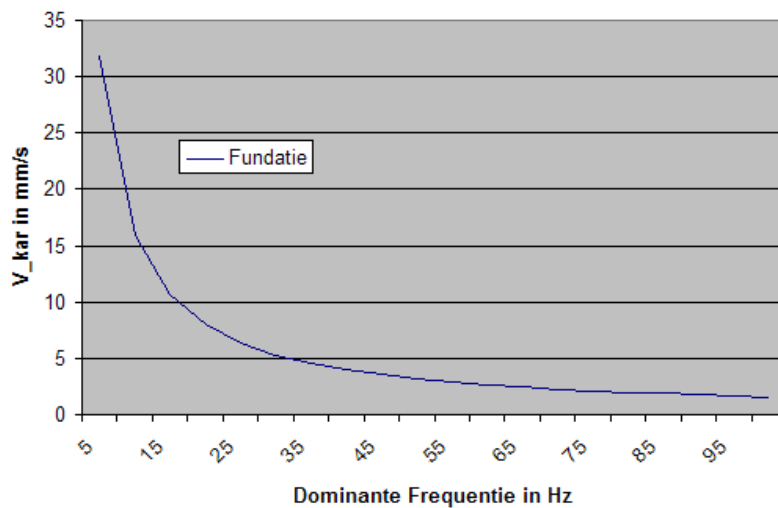


Fig. 6.2 De karakteristieke waarde van de grenswaarde met de nadruk op zetting op het begane grond niveau.

f [Hz]	cat. 1	cat. 2	cat. 3	fund.
0	20,00	5,00	3,00	--
5	20,00	5,00	3,00	31,83
10	20,00	5,00	3,00	15,92
15	22,50	6,25	3,63	10,61
20	25,00	7,50	4,25	7,96
25	27,50	8,75	4,88	6,37
30	30,00	10,00	5,50	5,31
35	32,50	11,25	6,13	4,55
40	35,00	12,50	6,75	3,98
45	37,50	13,75	7,38	3,54
50	40,00	15,00	8,00	3,18
55	41,00	15,50	8,20	2,89
60	42,00	16,00	8,40	2,65
65	43,00	16,50	8,60	2,45
70	44,00	17,00	8,80	2,27
75	45,00	17,50	9,00	2,12
80	46,00	18,00	9,20	1,99
85	47,00	18,50	9,40	1,87
90	48,00	19,00	9,60	1,77
95	49,00	19,50	9,80	1,68
100	50,00	20,00	10,00	1,59

Numerieke waarden van figuur 5.1 en 5.2

6.2.4. Uitgebreide meting

Verticale elementen

Rekenwaarde van de grenswaarde van de trillingssnelheid V_r van verticale elementen (niet behorende tot de draagconstructie) worden bepaald door de volgende formule;

$$V_r = V_{kar} / \gamma_t$$

V_r De rekenwaarde van de grenswaarde

V_{kar} De karakteristieke waarde van de grenswaarde volgens tabel 1

γ_t veiligheidsfactor die het type trilling in rekening brengt volgens tabel 2

Horizontale elementen

Rekenwaarde van de grenswaarde van de trillingssnelheid V_r van horizontale elementen (niet behorende tot de draagconstructie) worden bepaald door de volgende formule;

$$V_r = V_{kar} / \gamma_t$$

V_r De rekenwaarde van de grenswaarde

V_{kar} De karakteristieke waarde van de grenswaarde volgens tabel 1

γ_t veiligheidsfactor die het type trilling in rekening brengt volgens tabel 2

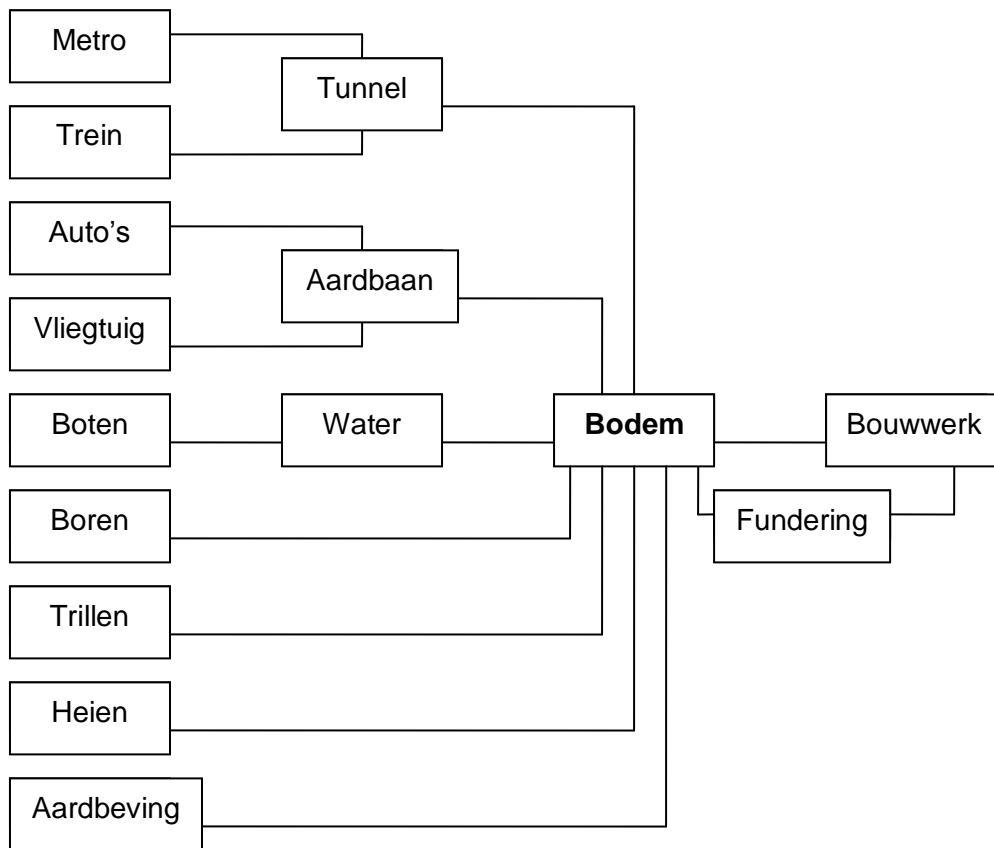
In afwijking tot de formule mag een karakteristieke waarde worden aangehouden volgens Fig. 6.2, waarbij $\gamma_t = 1,0$. Dit is gelijk aan een topwaarde van de versnelling van 1 m/s^2

7.0. Welke invloeden hebben effect op het trillingen verloop?

Er zijn honderden bronnen op te noemen die trillingen veroorzaken, in dit onderzoek verdiepen we ons in de trillingen die door de grond gaan. Dan kunnen we denken aan de volgende trillingsbronnen, wegverkeer, spoorwegverkeer, metroverkeer, heien, trillen van funderingspalen en damwanden, boren van tunnels, aardbevingen, boten door de kanalen/rivieren, landende vliegtuigen op vliegvelden.

7.1. De weg van de trilling

Een trilling legt een bepaalde weg af naar een bouwwerk. Onderweg komt hij verschillende materialen tegen die weerstand bieden tegen de trilling, waardoor de trilling zal verzwakken. In het geval van resonantie zal de trilling eventueel versterken. Dit is aan de orde bij materialen met een zwakke interne demping, bijvoorbeeld een staal constructie. De trilling wordt overgebracht (transmissie) na een ander materiaal of element. Dit kan weergegeven worden in een schema;



Van elk materiaal/element zijn verschillende modules;

Bronmodules:

Metro, spoorwegverkeer, wegverkeer, vliegverkeer (landen), boten, boren, trillen, heien en aardbeving.

Bij een aardbeving ontstaat de trilling in de diepere aard lagen. Deze worden bij het KNMI gemeten met een seismograaf. Een seismograaf (seismos = aardbeving en graphein = schrijven) meet en registreert aardbevingen. Hierdoor is het ook mogelijk om aardlagen te bestuderen.

Transmissie:

Aardbaan, tunnel en water naar omgeving

Bodem naar fundering of gebouw.

Bodemmodule:

Gelaagde bodem, klei (zwavel), veen, zand of löss.

Gebouwmodule:

Fundering op staal, fundering op palen.

Meetmodule:

De statische verwerking van meetgegevens uit de praktijk, zie 4.2.

7.2. Essentiële onderdelen

Samengevat is er bij het trillingsprobleem sprake van 3 essentiële onderdelen;

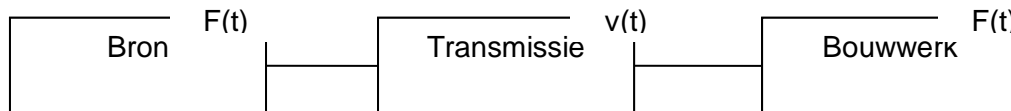
- Bron
- Transmissiemedium
- Ontvanger

Bron.

In een bron wordt ook het ruimtelijk karakter meegenomen in de berekening. Dit is bij een trein anders dan bij heiwerkzaamheden. De trillingen van een trein blijven net onder het maaiveld. De trillingen van heien gaan veel dieper.

Transmissiemedium.

Dit medium kan worden gevormd door een aaneenschakeling van sub-transmissiedelen. Zoals in het schema te zien is, een tunnel/aardbaan, de bodem, een fundering en een gebouw. Geschematiseerd in een model kan men het volgende aannemen;



In het schema ziet men het volgende;

- Interactie tussen de trillingsbron en de grond in Hz ten opzichte van de tijd.
- Voortplantingssnelheid van de trilling in de grond volgens de bodemeigenschappen in mm ten opzichte van de tijd.
- Interactie tussen de grond en het bouwwerk in Hz ten opzichte van de tijd.

Voor de berekening is het van belang dat de transmissiemediën duidelijk worden beschreven. De metingen tussen de bron en het bouwwerk veroorzaken meetgegevens in trillingen ten opzichte van de tijd. Het aantal trillingen en de afstand ten opzichte van de tijd.

Ontvanger.

Meestal is dit een onderdeel van een gebouw of een punt op het maaiveld. Bij de laatste loopt de trilling net onder het maaiveld en zal het niet als eerste bij de fundering aan slaan.

7.3. Onder welke omstandigheid ontstaan de hevigste grondtrillingen?

Men kan concluderen, dat de hevigste grondtrillingen aan de hand van een berekening duidelijk zullen worden. Deze berekening wordt na de metingen (fase 2 uit het onderzoeksplan) en de berekeningen (fase 3 uit het onderzoeksplan) in de conclusie beschreven. Praktisch gezien zullen de hevigste trillingen ontstaan bij heiwerkzaamheden. Deze trillingen zijn door de mens te voelen, wanneer men langs de heimachine staat.

8.0. In hoeverre hebben de diepte en de afstand van de bron tot aan het bouwwerk invloed op de trilling?

Trillingen en diepte van een bron hebben in wezen sterk invloed op de trilling.

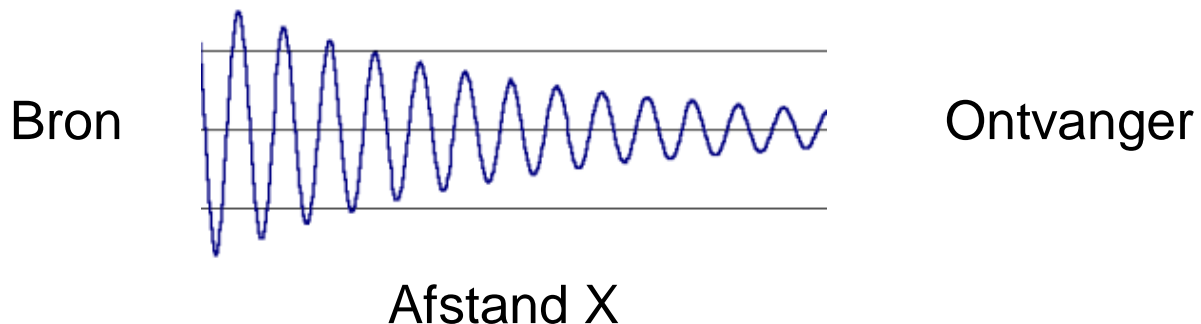
8.1. De diepte

Bij enkele trillingsbronnen ontstaan de trillingen diep in de grond. Zoals bij heiwerkzaamheden, palen en damwanden trillen, boren van tunnels en aardbevingen. Deze trillingen zullen alle richtingen op bewegen. Daarom komen ze ook bij de diepere fundering van andere gebouwen uit. Trillingsbronnen als wegverkeer, spoorwegverkeer, metro's, boten en vliegtuigen veroorzaken een trilling tot niet diep onder de grond. Deze zullen niet aan de palen fundering aangrijpen, maar aan de fundering op staal en direct aan het bouwwerk ten hoogte van het maaiveld.

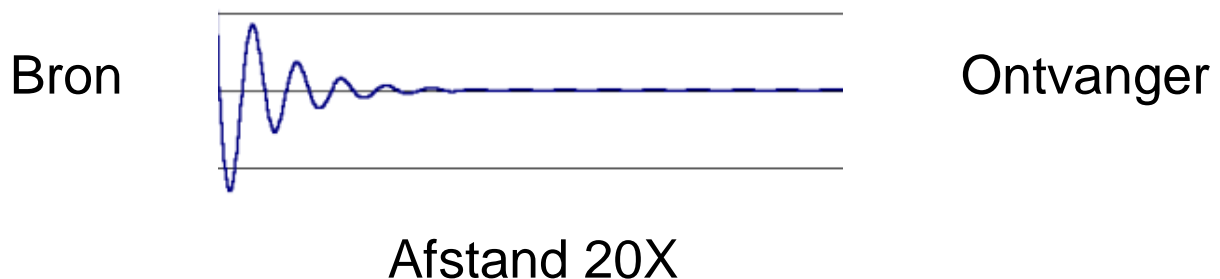
8.2. De afstand

De afstand van de trillingsbron tot een bouwwerk is van belang op de trilling. Des te verder de bron van het gebouw af is des te meer weerstand de grond op de trilling heeft. Zie het volgende schema;

Een bron met een afstand X naar de ontvanger van de trilling. Deze trilt nog even door.



Een bron met een afstand $20X$ naar de ontvanger van de trilling. Deze heeft medio de afstand te veel weerstand ondervonden. Om precies te zijn 20 keer meer weerstand dan in het bovenstaande schema. De ontvanger zal geen hinder ondervinden van de trilling.



Deze schema's zijn afhankelijk van de bodemsoort. De ene bodem biedt meer weerstand tegen de trilling dan de andere. Zie 1. Bodemgegevens Nederland, hoofdstuk 5.

9.0. Welke soort trillingen kunnen invloed hebben op een bouwwerk?

De type trillingsbronnen die invloed kunnen hebben op een bouwwerk worden beschreven in hoofdstuk 6.1.2. Type trillingsbron. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen ruimtegolven en oppervlakte golven. Ruimte golven komen vanuit de aarde, zoals bijvoorbeeld bij een aardbeving. Oppervlaktegolven ontstaan alleen aan het aard oppervlak, dus in twee dimensies. Dus deze golven ontstaan door trillingsbronnen aan het aard oppervlak of niet diep eronder, zoals verkeer en heiwerkzaamheden.

9.1. Ruimte golven

1. P-golf (zie "1. Bodem gegevens Nederland 5.1. Uitgangspunten KNMI")

Dit zijn golven die door het binnenste van de aarde bewegen, primaire golven. Bij P-golven trillen de deeltjes van het materiaal waar de golf doorheen beweegt (het medium) parallel aan de bewegingsrichting van de golf. Net als andere seismische golven kunnen P-golven worden opgewekt bij aardbevingen. De naam primair komt van het feit dat P-golven de eerste golven zijn die aankomen. Een goed voorbeeld van een P-golf is geluid, geluid komt altijd eerder aan dan de trilling. De sterkte neemt snel af, met de formule $1/R^3$ (Fig. 9.1) De P-golf veroorzaakt trillingen horizontale richting, de X- en Y-richting

2. S-golf (zie "1. Bodem gegevens Nederland 5.1. Uitgangspunten KNMI")

Bij S-golven, secundaire golven, trillen deeltjes in het materiaal waar de golf doorheen beweegt (het medium) loodrecht op de bewegingsrichting van de golf. Daarbij treedt schuif op in het materiaal, waaruit afgeleid kan worden dat S-golven alleen kunnen bewegen door elastische materialen. Dus niet door gassen en vloeistoffen. (Fig. 9.1) De S-golf veroorzaakt trillingen in verticale richting, de Z-richting.

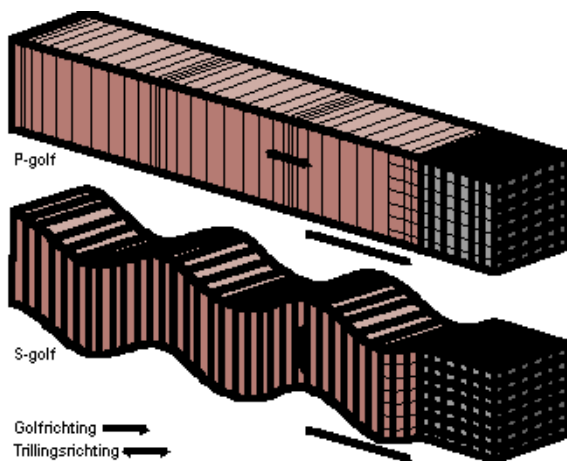


Fig. 9.1 Schematiseerde P-golf en S-golf.

3. Druk en schuifgolven

Druk- en schuifgolven verdwijnen als een halve bol in de aarde. (Fig. 9.2.) De snelheid van druk- en schuifgolven worden berekend aan de hand van de volgende formule;

$$V = C \times 1/R$$

C = een constante

R = straal waarbinnen de trillingsbron zich bevindt

V = de trillingsnelheid

Ook hier is er een relatie tussen snelheid van de druk- en schuifgolven en de afstand tot de trillingsbron. De snelheid van de golf verandert omgekeerd evenredig met de afstand.

De energie van de druk en schuifgolven verdeelt zich over een halve bol in de bodem.

Druk- en schuifgolven = $E / (4 p R^2)$

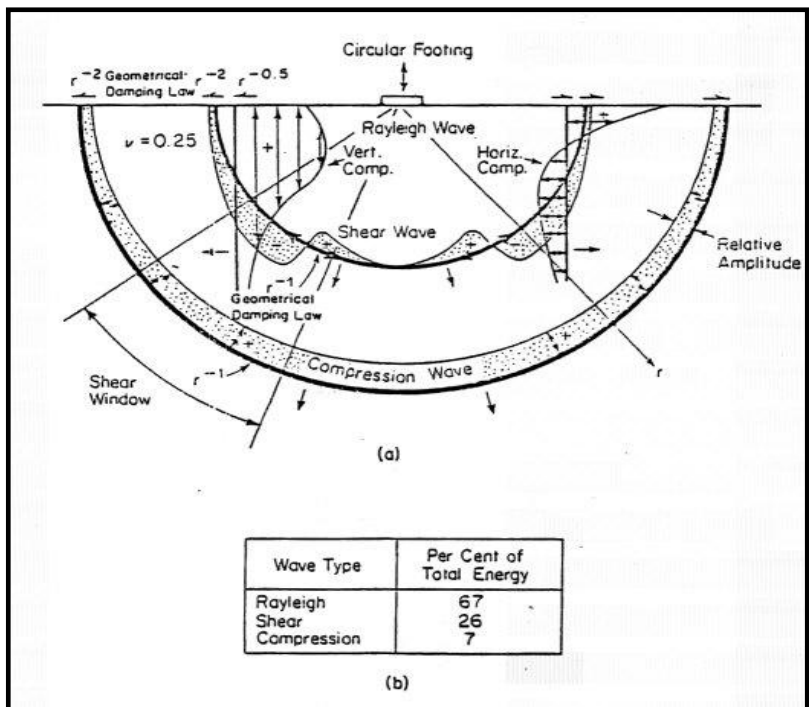


Fig. 9.2. Drie soorten golven; Druk golf, schuif golf en Rayleigh golf

9.2. Oppervlakte golven

3. Love-golf (Q-golf)

Lovegolven planten zich in 2 dimensies over een oppervlak voort. Ze hebben een hogere snelheid dan Rayleighgolven (het andere type oppervlaktegolf), maar een kleinere snelheid dan ruimtegolven. Lovegolven zorgen dat deeltjes in een horizontale cirkels bewegen, die parallel ligt aan de golf richting. Ze verschillen daarin van Rayleighgolven, waarbij de ellipsbeweging juist in het verticale vlak plaatsvindt. Dieper van het oppervlakte af worden de ellipsen steeds kleiner, tot een zone bereikt wordt waarin geen beweging plaats vindt (een knoop). Daaronder vindt de cirkelbeweging van deeltjes in tegenovergestelde richting plaats. De maximum beweging (amplitude) van de deeltjes neemt snel af met de diepte. Bij aardbevingen uit een Lovegolf zich in het heen en weer bewegen van de grond (in plaats van op en neer bij Rayleighgolven). Vanwege de grote hoeveelheid energie die als Lovegolven voortbeweegt, zijn Lovegolven de meest schadelijke en duidelijk voelbare seismische golven tijdens aardbevingen.

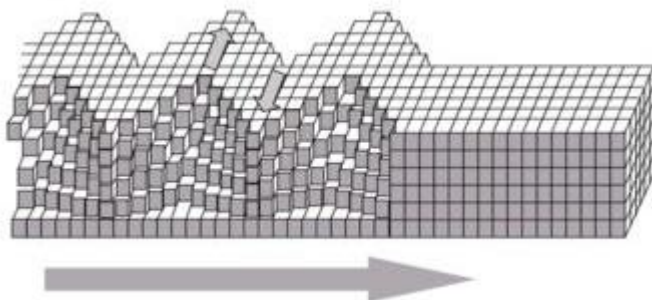


Fig. 9.3. Love-golf

4. Rayleigh-golf

Rayleigh golven zijn golven die aan het aardoppervlak ontstaan, zoals verkeer, maar ook bij de eerste heiklappen. (Fig. 9.4.)

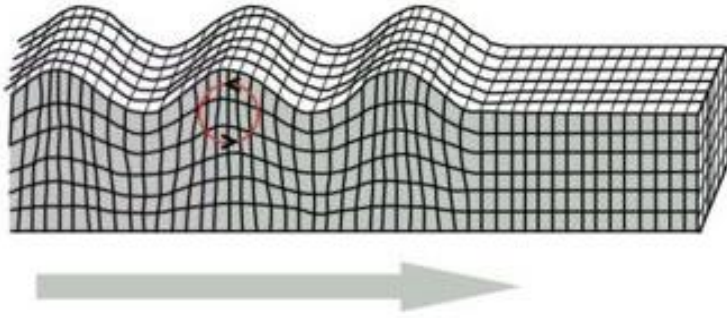


Fig. 9.4. Rayleigh-golf

De snelheid van een Rayleigh golven wordt berekend aan de hand van de volgende formule;

$$V = C \times 1/R^{0,5} \text{ (grotere snelheid dan de ruimtegolven)}$$

C = een constante

R = straal waarbinnen de trillingsbron zich bevind

V = de trillingsnelheid

Er is een relatie tussen snelheid van de Rayleigh golf en de afstand tot de trillingsbron. De snelheid van de golf verandert omgekeerd evenredig met de wortel uit de afstand. Dit wil zeggen dat des te dichter men zich bij de trillingsbron bevind, des te hoger de trillingsnelheid. Wanneer men zich minder dan 1meter van de trillingsbron bevind neemt de trillingsnelheid enorm toe. (Fig. 9.5)

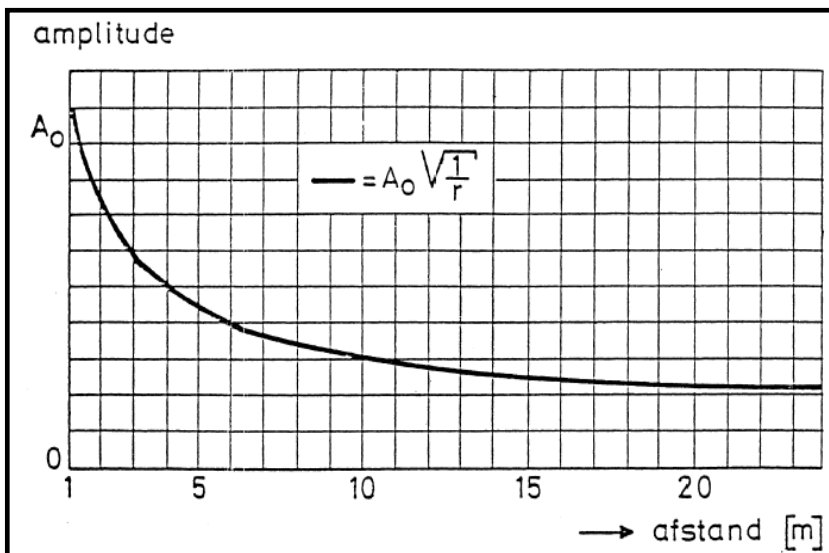


Fig. 9.5. De exponentiële toename van de trillingsnelheid.

De kinetische energie ($= \frac{1}{2} * m * v^2$) van deze golf verdeelt zich over een cirkel aan het oppervlak;

$$\text{Rayleigh golf} = E / (2 \pi R)$$

¹Schuif = in een materiaal verschillende lagen over elkaar schuiven als gevolg van schuifspanning.