

3. Constructie

Datum: 24 maart 2008

Bedrijf; Bureau voor bouwpathologie, te Montfoort

Inhoudsopgave

| | |
|---|----|
| 1.0. Inleiding | 3 |
| 2.0. Op welke constructiematerialen hebben trillingen de meest schadelijke invloed? | 4 |
| 2.1. Baksteen..... | 5 |
| 2.2. Kalkzandsteen..... | 6 |
| 2.3. Gewapend beton | 6 |
| 2.4. Staal | 6 |
| 2.5. Hout | 6 |
| 3.0. Welke funderingsmethode is het zwakste ten opzichte van trillingen? | 7 |
| 3.1. Grondtrillingen bij aanbrengen fundering. | 8 |
| 3.1.1. Funderingsmethoden zonder trillingen | 8 |
| 3.1.2. Funderingsmethoden met trillingen | 9 |
| 4.0. Welke bouwmethode is het meest gevoelig voor trillingsschade? | 10 |
| 4.1. Massa en funderingsmethode | 10 |
| 4.2. Trek- en drukkrachten en elasticiteit | 10 |
| 4.3. Hoge en lage gebouwen | 11 |
| 4.4. Draagconstructies bij lage en hoge frequenties | 11 |
| 5.0. Waarom bezwijkt een gebouw ten gevolge van trillingen? | 13 |
| 5.1. Verspreiden van de trilling. | 13 |
| 5.2. Bezijken | 14 |

1.0. Inleiding

Een trilling verplaatst zich van de bron via de grond naar de ontvanger. Dit verslag gaat over de ontvanger, het gebouw. Het gebouw ontvangt als laatste de al dan niet uit gedempte trilling. Hoe dichter een trillingsbron met een gelijke stekte bij het gebouw is des te heftiger de trilling in het gebouw aan zal komen. In het gebouw zal de trilling uitdempen. De sterkte van de trilling is afhankelijk van de bronsterkte, afstand tot de bron, frequentie van de trilling, samenstelling van de bodem bouwwijze en plaats van het gebouw. Of de constructie van een gebouw de trilling kan verwerken is afhankelijk van de materiaaleigenschappen, van de materialen waar het gebouw uit is opgebouwd..

Wat gebeurt er wanneer een trilling vlak langs het gebouw ontstaat? Hoe gaat het constructiemateriaal met deze trillingen om? Op basis van onderzoek naar de scheuren kan worden bepaald of de schade is veroorzaakt door de trillingsbron. In sommige gevallen is het ook mogelijk om voor én na het in bedrijf zijn van de trillingsbron onderzoek te doen naar schade. Dan is de oorzaak van de schade bijna zo goed als achterhaald. Deze situatie komt helaas bijna nooit voor.

In dit verslag wordt antwoord gegeven op de volgende subvragen;

1. Op welke constructiematerialen hebben trillingen de meest schadelijke invloed?
2. Welke funderingsmethode is het zwakste ten opzichte van trillingen?
3. Welke bouwmethode is het meest optimaal tegen bezwijken?
4. Waarom bezwijkt een gebouw ten gevolge van trillingen?

Bij het beantwoorden van de subvragen beperken we ons tot de meest voorkomende constructiematerialen baksteen (tegenwoordig niet 100% constructief materiaal, esthetische buitenblad afwerking), KZS (Kalk Zand Steen) gewapend beton, staal en hout.

2.0. Op welke constructiematerialen hebben trillingen de meest schadelijke invloed?

Een groot deel van de schade aan een gebouw ten gevolge van trillingen ontstaat door de inklinking van het bodemmateriaal onder of rond het gebouw. Hierdoor zal de fundering, met als gevolg het gehele gebouw, gaan zakken. Niet kaarsrecht naar beneden, maar in bijna 100% van de gevallen diagonaal. (4. Schade ten gevolge van trillingen) Een gebouw kan ook bezwijken aan de hand van de beweging die de trilling in het materiaal veroorzaakt. Ten gevolge van deze inklinking van de bodem en onverwachte bewegingen in de constructie zullen er onverwachte krachten optreden in de vloeren en de wanden. Met name de trekkrachten zullen bij enkele materialen ernstige schade veroorzaken. Trekkrachten (Fig. 2.1.a.) zijn krachten die het materiaal waar ze op werken uit elkaar wil trekken. Steenachtige materialen als baksteen, KZS en andere niet gebakken stenen en beton kunnen minder goed trekkrachten opnemen dan materialen als staal en hout. Drukkrachten (Fig. 2.1.b.) daarentegen worden goed opgevangen door het metselwerk. Buiging (Fig. 2.1.c.) is een combinatie van trek en drukkrachten. Ook deze kunnen in de vloer en in de wanden optreden ten gevolge van grondtrillingen.

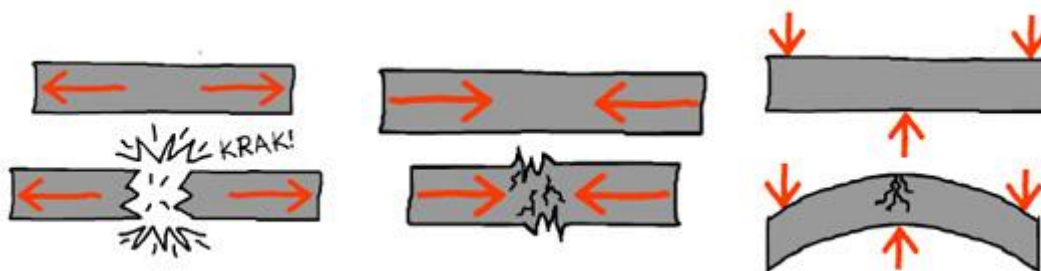


Fig. 2.1.a. Trekkracht.

Fig. 2.1.b. Drukkrachten

Fig. 2.1.c. Buiging

Inklinking van de bodem hoeft niet in elke situatie het gevolg te zijn van trillingen. De bodem kan ook inklinken ten gevolge van een overvloed aan water in de bodem door bijvoorbeeld een lekkende waterleiding. (Fig. 2.2.a.) Ongelijke aanlegdiepen, waardoor er een verschil ontstaat in gewicht. (Fig. 2.2.b.) Geroerde grond, slecht grondbewerking voorafgaande aan de bouw. (Fig. 2.2.c.) Uitgraving in nabijheid van gebouwen. (Fig. 2.2.d.)



Fig. 2.2.a. Waterleiding



Fig. 2.2.b. Ongelijke aanlegdiepte



Fig. 2.2.c. Geroerde grond



Fig. 2.2.d. Uitgravingen nabij het gebouw

2.1. Baksteen

Bakstenen wordt toegepast in situaties waar alleen drukkrachten op staan. Een goed voorbeeld is de gewelfwerking. (Fig. 2.1.) De hele wand is van baksteen, zelfs wanneer er opening in de gevel zitten zorgen de bogen ervoor dat alleen drukkrachten in de gevel optreden. Er is spraken van buiging (trek en drukkrachten), maar door een soort "zeeg" gemaakt uit bakstenen kunnen de stenen de buiging opvangen.

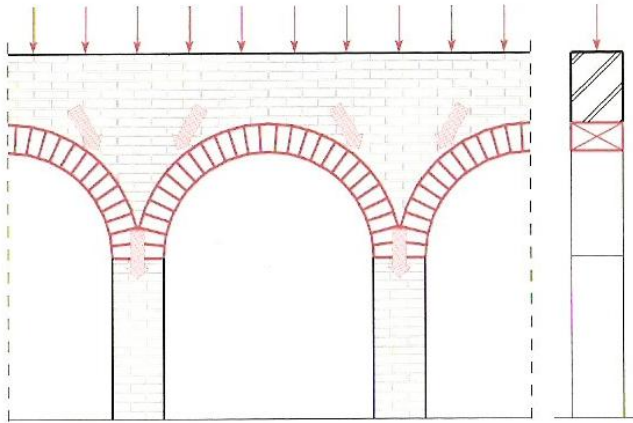


Fig. 2.1. Gewelfwerkingen, met pijltjes aangegeven drukkrachten.

Wanneer de bodem inklinkt ten gevolge van trillingen, kan het pand scheef gaan staan. Hierdoor ontstaan onverwachte krachten. Als voorbeeld de kap van een woning. Er kunnen spatkrachten ontstaan in de kap. (Fig. 2.1) Deze krachten trekken de bakstenen borstwering uit elkaar. De buigkracht die hierdoor in de gevel (borstwering) ontstaat, kunnen scheuren veroorzaken. De trek zal aan de binnenkant van de muur ontstaan, waar vervolgens de scheuren zich zullen vormen. Zoals de pijlen in de figuur aangegeven wordt de kap naar buiten getrokken.

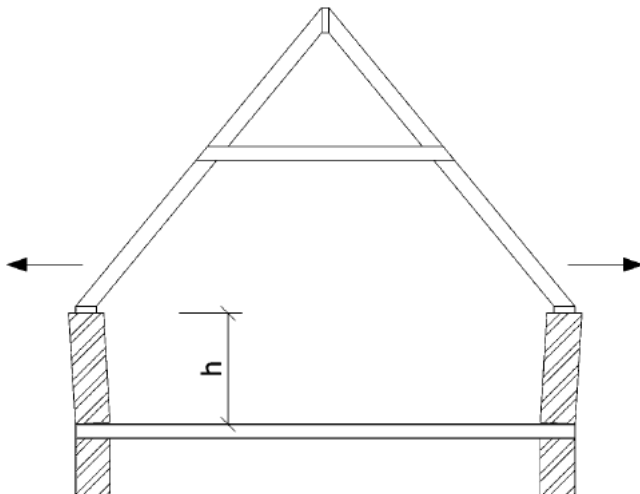


Fig. 2.1. Spatkrachten die een buiging in de gemetselde muur veroorzaakt

Vroeger was cement minder sterkt dan de baksteen waardoor deze als eerste bezweken bij trekspanningen en dus de eerste scheuren in de voegen ontstonden. Dit was handig bij het verwijderen en plaatsen van nieuwe stenen. Tegenwoordig is het cement bijna even hard als de baksteen, waardoor de scheuren over de stenen heen gaan. Dit is onhandig bij het verwijderen van de oude steen, waardoor deze oude steen niet meer hergebruikt kan worden.

2.2. Kalkzandsteen

Bij kalkzandsteen is er sprake van hetzelfde verhaal als bij baksteen, het materiaal kan geen trekkrachten opvangen, alleen drukkrachten. Sparingen, met een grotere overspanning dan 900mm, kunnen daarom alleen worden opgelost door middel van het toepassen van een latei. Of de sparingen dienen door gezet te worden tot de onderzijde van de bovenliggende vloer. Bij sparingen ontstaan er namelijk trekkrachten in de blokken/stenen boven de opening. De scheuren zullen door de blokken heen gaan, omdat de mortel sterker is dan de blokken. Dit effect wordt versterkt wanneer er trillingen optreden.

2.3. Gewapend beton

Gewapend beton kan trekkrachten opnemen. Het is niet de betonmortel die de krachten opvangt, maar de stalen wapening die in het beton verwerkt is. Om de lage treksterkte van beton te compenseren wordt op trek belaste elementen meer wapening toegepast. Zodra het beton gaat scheuren neemt de wapening de inwendige trekkrachten over en blijft de scheurwijdte beperkt. Hieruit blijkt dat homogene materialen, staal, beter trekkrachten op kunnen nemen dan heterogene, beton, materialen. Homogene materialen kleven beter als een geheel aan elkaar, waardoor het lastiger is ze uit elkaar te trekken. Wanneer beton niet voorzien is van wapening kan het geen trekkrachten opnemen, en zullen er grotere scheuren ontstaan ten gevolge van trillingen, dan wanneer er wapening in het beton is verwerkt. Beton neemt drukkrachten op beter dan staal. Wanneer een trilling door een betonnen balk of kolom loopt zal de wapening mee gaan trillen. Omdat staal sterker is dan beton laat de wapening los en kan het beton af gaan brokkelen.

2.4. Staal

Staal kan trek en drukkrachten opnemen. Dit materiaal zal daarom haast geen schade ondervinden onder invloed van trillingen. Wanneer een staalconstructie langere tijd onderhevig is aan veel trillingen, raak door de herhalende beweging van de trillingen de elasticiteit uit het materiaal en zal het ten gevolge van vermoeiing bezwijken. Wanneer de bodem inklinkt ten gevolge van trillingen en de stalen constructie mee zakt kan het staal bezwijken ten gevolge van knik. Het element zal buigen. Bij buiging ontstaan trek en drukkrachten. Door de elasticiteit van het materiaal zal staal niet direct breken, maar met de buiging meevormen.

2.5. Hout

Houtconstructies blijken in aardbevingsgevoelige gebieden beter bestand tegen trillingen dan massieve, heterogene, bouwvormen. Scheuren komen zelden voor. Wanneer de kolommen en liggers maximaal gedimensioneerd zijn zal geen schade ontstaan aan de houtconstructie. Met name bij de bevestiging van de houten delen kunnen stevige constructies gemaakt worden, door de stalen verbindingsmiddelen, die met hun elasticiteit tijdelijk met de trillingen mee bewegen. Hout is van nature een stevig materiaal, de eigenschappen van het materiaal worden niet aangepast voordat ze toegepast worden in de bouw. Hierdoor hebben ze dezelfde opbouw als wanneer ze nog in de natuur voorkomen. Bij erg grote buigingen zullen er scheuren aan de trekzijde ontstaan.

Deze materiaal eigenschappen verklaren waarom de categorieën in de SBR verdeeld zijn in Categorie 1. Staal en hout, de stevigste materialen tegen trillingen, Categorie 2. brosse materialen, metselwerk en beton, heterogene materialen en Categorie 3. slechte staat verkerende gebouwen, (alle soorten materialen, maar verzwakt door de jaren heen. (zie 2. Trillingen, 4.4 Categorieën)

3.0. Welke funderingsmethode is het zwakste ten opzichte van trillingen?

Conform het SBR (stichting bouw research) worden funderingen opgesplitst in trillingsgevoelige funderingen en niet trillingsgevoelige funderingen. Een fundering op staal bestaat uit funderingsstroken met eventueel oplegconstructies. Een fundering op palen bestaat uit funderingspalen met eventueel poeren of balken. Rond om de stroken en de palen bevindt zich de bodem. De fundering wordt samen met het bouwwerk geclassificeerd. (zie Trillingen, 4.4. Categorieën)

Ter beoordeling van de mogelijke schade ten gevolge van trillingen op de fundering en daarop rustende constructie kunnen trillingsgevoelige en niet trillingsgevoelige funderingen worden onderscheiden;

Trillingsgevoelige fundering;

- Fundering op staal op verdichtbaar of verkneedbaar bodemmateriaal, zoals veen en klei, met uitzondering op funderingen op zeer vaste zandlagen. Fundering op staal kunnen poeren, stroken of platen zijn.
- Funderingen met niet-grondverdringende palen, zoals avergaarpalen¹ en boorpalen, met uitzondering van palen waarvan kan worden aangetoond dat deze nauwelijks extra zakking zullen vertonen onder verhoogde negatieve kleef² of verdichting van lagen onder het paalniveau.
- Fundering met grondverdringende palen die zakkingen kunnen vertonen onder extra negatieve kleef en verdichting van lagen onder het paalniveau. Alle kleefpalen vallen onder dit niveau.

Niet-trillingsgevoelige funderingen;

- Staalfundering op een zeer vast zandpakket, waarbij ook verdichting en verkneeding van dieper gelegen lagen, gegeven de eigenschappen van de trillingsbron, niet kunnen leiden tot verzakkingen van het funderingselement groter dan enkele millimeters.
- Funderingen met niet-grondverdringende palen (avergaarpalen, boorpalen die, gegeven de eigenschappen van de trillingsbron, verwaarloosbare verzakkingen zullen vertonen door extra negatieve kleef of verdichting van lagen onder het paalniveau)
- Funderingen met grondverdringende palen die een belangrijk deel van hun draagvermogen ontleen aan het puntdraagvermogen³ en waarvoor geen bijzondere omstandigheden van toepassing zijn die aanleiding kunnen geven tot verzakkingen.

¹ Avergarpalen = Er wordt een gat in de bodem geboord, deze wordt onder overdruk gevuld met beton. De beton wordt door de boor in het gat gepompt terwijl de boor langzaam omhoog komt. Hierdoor zal de wand van het gat niet instorten. Door deze manier van boren zal er geen zand worden opgepropt onder de paal. Dit is bij een geheide paal wel het geval.

² Negatieve kleef = wanneer bijvoorbeeld de grondwaterstand onlaag gaat blijft er zand aan de funderingspaal hangen, deze veroorzaakt een extra belasting aan de paal. Dit kan leiden tot een verzakking. Hierbij heeft zich negatieve kleef ontwikkeld.

³ Puntdraagvermogen = het vermogen dat de punt van een funderingspaal op zich kan nemen.

3.1. Grondtrillingen bij aanbrengen fundering.

3.1.1. Funderingsmethoden zonder trillingen

1. Funderen op staal;

Wanneer de ondergrond van de aan te leggen fundering voldoende draagkrachtig en het gebouw niet te zwaar is, is funderen op staal een goede funderingsmethode.

Houtskeletbouw is een relatief lichte bouwmethode. Bij dit constructiemateriaal zal fundering op staal vaker toegepast kunnen worden. Het aanbrengen van fundering op staal brengt geen trillingen met zich mee die invloed kunnen hebben op de omgeving.

2. Funderen op palen;

Indien de ondergrond van de aan te leggen fundering ter hoogte van de aanlegdiepte van de funderingsbalken, niet voldoende draagkrachtig is, zal men door middel van palen de krachtafdracht van de woning naar een voldoende draagkrachtige grondlaag transporteren.

Bij funderen op palen zijn er een aantal mogelijkheden:

- De schroef injectiepaal;

Deze methode is trillingvrij en grondverdringend. Een schroefinjectiepaal heeft een stalen schacht gevuld met beton. De schroefinjectiepaal wordt toegepast, indien er met betrekking tot rondom gelegen bouwwerken trillingsvrij gebouwd dient te worden.

- De gekoppelde injectiepaal; (Fig. 3.1.)

Deze is evenals de schroef injectiepaal trillingsvrij. De stalen schacht wordt in delen de grond in geheid en tijdens het werk aan elkaar gelast. door het injecteren van grout is de paal geschikt voor trillingarme situaties Nadat de stalen schacht in de grond is aangebracht, kan deze gevuld worden met beton. De gekoppelde injectiepaal wordt toegepast, indien er met betrekking tot rondom gelegen bouwwerken trillingsvrij gebouwd dient te worden.

- De stalen buispaal; (Fig. 3.2)

Dit is een paal die ook trillingsvrij is en vaak toegepast wordt bij heiwerk binnen een bestaand gebouw. De paal wordt opgebouwd uit ter plaatsen aan elkaar gelaste stalen buiselementen. In het eerste buiselement bevindt zich een grindprop. Op deze grindprop valt een heiblok, waarbij de buis zelf als geleiding voor het blok dient. Wanneer de buis op diepte is, wordt hij afgesneden op de juiste hoogte en gevuld met beton.

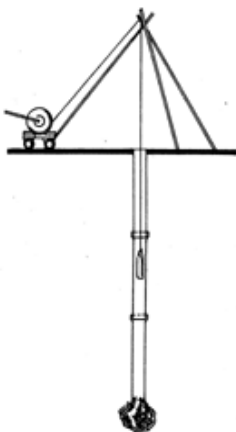


Fig. 3.2. Stalen buispaal, met grindprop

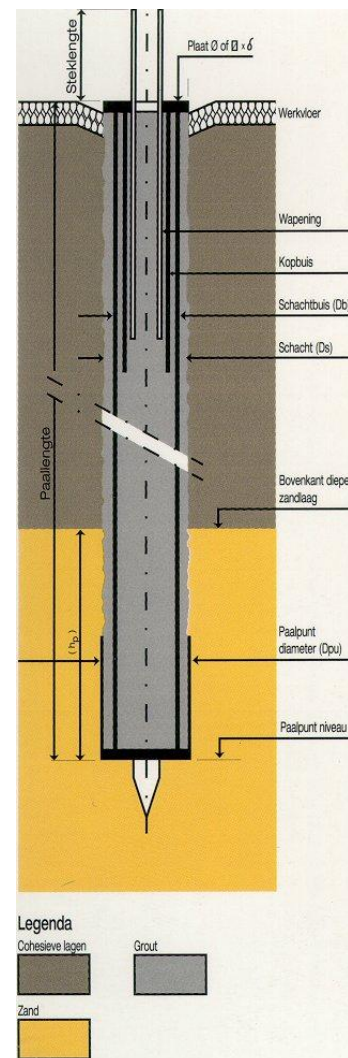


Fig. 3.1. Gekoppelde injectiepaal

- De hoogwaardig beton segment heipaal (Fig. 3.3);

Dit is een paal opgebouwd uit geprefabriceerde betonnen segmenten van hoge sterkteklasse. Deze segmenten worden onderling verbonden door middel van een stalen bus. De stalen bus wordt met behulp van een speciale klemminrichting op het paalsegment geperst, zodat een klemmende verbinding ontstaat. Voor dit paalsysteem is een speciale verende heimuts gemaakt, die in combinatie met de hoge betonkwaliteit van de paal zorgt voor een optimaal evenwicht tussen valblok en paal. Hierdoor wordt met een vrij licht valblok een optimaal slag-effect bewerkstelligd. Dit heeft als gevolg dat het een trillingsvrije funderingsmethode is.

- De palenwand; (Fig. 3.4.)

Dit is eveneens een trillingsvrije funderingsmethode. Hierbij wordt gebruik gemaakt van schroef injectiepalen. Deze palen worden naast elkaar geplaatst en vormen samen een wand.

1. Geleide wanden realiseren.
2. Primaire palen.
3. Secundaire gewapende palen.
4. Betonnen verbindingbalk storten.

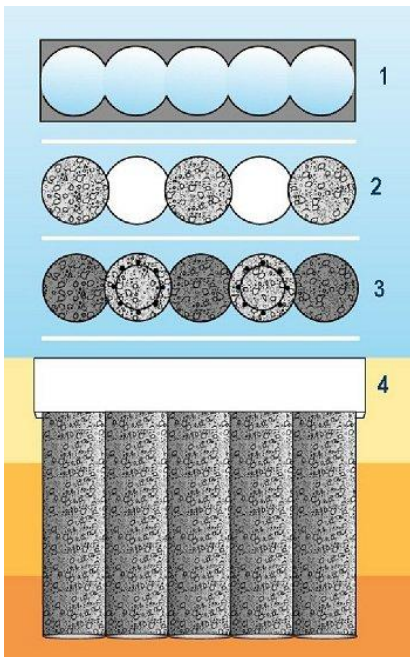


Fig. 3.4. Palenwand

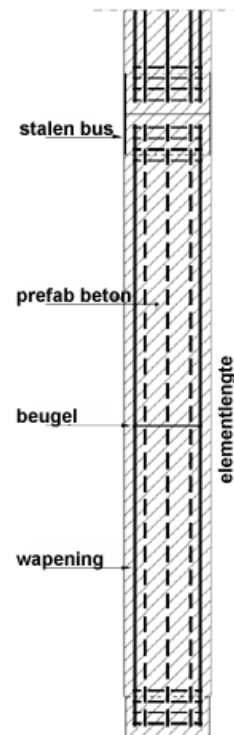


Fig. 3.3. Hoogwaardig beton segment heipaal

- De voorboortechneik;

Dit is tevens een trillingsvrije methode. Deze methode boord een schacht in de grondlaag. Na het boren wordt deze schacht voorzien van wapening en gevuld met bentoniet¹ beton. Het boren veroorzaakt geen trillingen.

3.1.2. Funderingsmethoden met trillingen

- De heipaal methode;

De heipaal is de meest toegepaste fundering methode. Deze methode maakt gebruik van geprefabriceerde betonnen palen. Door middel van een heistellage, worden de palen de grond in geslagen. De heipaalmethode is de goedkoopste methode, maar levert echter wel trillingen aan het omliggende grondoppervlak, wat schade aan omliggende gebouwen kan veroorzaken.

¹Betonnet = een in de natuur voorkomende natrium-kleisoort met deeltjes die zo klein zijn dat ze de grond waterdicht kan maken. Het materiaal absorbeert het water

4.0. Welke bouwmethode is het meest gevoelig voor trillingschade?

4.1. Massa en funderingsmethode

De meest heftige trillingsbron, na een aardbeving, is de heimachine. De heimachine veroorzaakt een trilling, met een lage frequentie, ter plaatsen van de hoogte van de paalpunt van de fundering. Gebouwen met een fundering op staal in de buurt van heiwerkzaamheden hebben, met name in het begin van de heden, last van de grondtrillingen. Dit komt doordat de trillingen op dat moment net onder het maaiveld lopen, op dit niveau bevindt zich de fundering op staal. Een gebouw op palen daarentegen zal tijdens de hele heiwerkzaamheden last hebben van de grondtrillingen, aangezien de trillingen zich constant op dezelfde hoogte bevinden als waar de paal zich bevindt. De massa van een gebouw heeft ook invloed op de schade. Hoe te groter het gebouw des te minder schade aan het gebouw zal ontstaan. Hoe kleiner (minder massa) het gebouw, des te harder het gaat trillen en des te meer schade er op zal treden. Wanneer de paal op het niveau zit van de draagkrachtige laag, wordt er harder geheid, om hem goed vast te zetten of om door te slaan naar een eventueel diepere zandlaag. Dit kan effect hebben op funderingspalen in de omgeving. Een gebouw op palen is de langste tijd onderhevig aan trillingen. Een gebouw op staal alleen in het begin. Een klein gebouw met een kleine massa verwerkt de trillingen minder goed dan een groot gebouw, met veel massa. Draagconstructies bij lage en hoge trilling frequenties In een schema (Fig. 4.1) kunnen we de volgende conclusie trekken, in hoeverre de opbouw van het gebouw bestand is tegen trillingen van heiwerkzaamheden.



Fig. 4.1. Gebouwen zijn bestand tegen trillingen.

4.2. Trek- en drukkrachten en elasticiteit

Met name homogene materialen kunnen trekkrachten goed opvangen. Het zijn materialen die opgebouwd zijn uit één materiaal. Heterogene materialen zijn opgebouwd uit twee of meer soorten materialen, die elk andere eigenschappen hebben. Deze materialen zitten aan elkaar "geplakt". Bijvoorbeeld beton (Fig. 4.2.), deze bestaat uit grind en is gebonden met betonspecie. Het bindmiddel dat zich in een heterogeen materiaal bevindt is minder sterk dan een homogeen materiaal. Daarom zullen heterogene materialen sneller scheuren vertonen. Deze scheuren ontstaan ter plaatsen van de verbinding tussen de verschillende soorten materialen. Tegenwoordig worden de bindmiddelen steeds sterker, waardoor het niet altijd zeker is dat de scheuren ter plaatsen van het bindmiddel ontstaan. Een homogeen materiaal bevat geen bindmiddelen en heeft daardoor geen zwakke plekken, waar het zou kunnen scheuren.



Fig. 4.2. Structuur beton, wit is het bindmiddel, donker het vulmiddel.

De elasticiteit van het materiaal heeft invloed op de verdraagzaamheid van trillingen. Een materiaal kan zich aanpassen aan de trillingen tot hij zijn elasticiteit heeft verloren. Bij deze materiaal eigenschap is een homogeen materiaal elastischer dan een heterogeen materiaal. Dit is het gevolg van de het zwakke bindmiddel tussen de verschillende materialen in een heterogeen materiaal. Het bindmiddel kan elastisch zijn, maar de verbinding van het bindmiddel en het materiaal des te minder.

Elk materiaal heeft een overschrijdende treksterkte bij een bepaalde trillingsnelheid in mm/s. Wanneer deze waarde overschreden wordt, bestaat de kans dat er schade aan het materiaal ontstaat. Bij de volgende trillingsnelheden zullen de materialen het begeven.

Staal 2000 mm/s

Hout 1600 mm/s

Beton = 100 mm/s

Metselwerk = 9 mm/s

(Pleisterwerk = 4 mm/s)

Voor de veiligheid van de gebouwen worden trillingsnelheden vanaf 0,75 mm/s als grens gerekend, voor de maximale trillingsnelheid. Want niet alleen de draagconstructie kan schade oplopen ook de scheidingswandjes en kozijnen aan de binnenkant van het gebouw.

4.3. Hoge en lage gebouwen

Bij heterogene constructiematerialen komen trillingen over het algemeen niet hoger dan 2 à 3 verdiepingen. Wanneer het constructiemateriaal staal in de constructie verwerkt is, bestaat er een kans dat de trilling hoger in het gebouwen komt. Bij staal loopt men het risico dat er resonantie optreedt. De trilling zou een hogere frequentie krijgen, dan waarmee hij de fundering van het gebouw heeft bereikt. Een hogere frequentie kan geen kwaad, aangezien de trillingstijd dan kleiner wordt en de bovenste verdiepingen van het gebouw minder lang open staan voor trillingen. De tijd waarin de trilling door een gebouw loopt staat nauw verbonden met de frequentie. Des te hoger de frequentie, des te kleiner de trillingstijd, want $F = 1 / T$. Zie 4.4. Draagconstructies bij lage en hoge frequenties. Wanneer de trilling al dan niet boven in het gebouw terecht komt zal hij of een weg terug naar beneden zoeken of verdwijnen uit de bovenste constructiedelen. De trillingen dempen in scheidende constructiedelen uit, of in de buitenlucht.

4.4. Draagconstructies bij lage en hoge frequenties

Een starre en stijve draagconstructie zal, bij een gelijke trillingsbron met een gelijke trillingssterkte en trillingstijd, minder schade ondervinden dan een lichte en slanke constructie. Met name staalbouw heeft constructievormen die bij voorkeur slank uitgevoerd kunnen en zullen worden. Een starre draagconstructie verzet zich tegen de trillingen. Een lichte constructie beweegt tot op een zekere hoogte met de trilling mee. Wanneer de elasticiteit, ten gevolge van grondtrillingen, uit het materiaal is zal hij bezwijken ten gevolge van vermoeiing. Bij een starre constructie zal veel meer kracht nodig zijn tot hij het schade vertoont, waardoor de constructie bij dezelfde trillingssterkte langer onbeschadigd zal blijven dan een slanke constructie.

Het verschil in opnemen van frequentie grootheden is ook afhankelijk van de soort frequenties. Laag frequente trillingen (onder 100 Hz) worden geproduceerd door natuurlijke en technische bronnen. Enkele voorbeelden van bronnen die in Nederland een laag frequente trilling veroorzaken zijn aardbevingen, wind, watervallen, verbrandingsmotoren (van een boot, auto of vliegtuig), heiwerkzaamheden, graafwerkzaamheden, trillende bruggen, transformator en verbrandingsinstallaties. Laag frequente trillingen komen in het algemeen vaker voor in gebouwen dan hoog frequente trillingen en zullen de grootste oorzaak van schade aan gebouwen zijn, omdat:

1. Laag frequente trillingen meer voorkomen en sterkere trillingen veroorzaken.
2. Laag frequente trillingen minder sterk worden gedempt in de overdracht.
3. Constructiedelen eigenfrequenties hebben en juist bij lage frequenties door (resonantie) versterking op zal treden.

Dit is de reden waarom veel trillingsmeters tot 100Hz meten.

In typisch Nederlandse laagbouw tot ongeveer 3 bouwlagen komen trillingstijden voor in de orde van 0,2 tot 0,05 seconde, dus (eigen-) frequenties van 5 tot 10Hz ($F=1/T$). Laag frequente trillingen zullen zetting en hierdoor schade veroorzaken aan constructies. Dit komt doordat een trilling met een lage frequentie een grotere trillingstijd heeft dan een trilling met een hoge frequentie.

Voorbeeld;

$$F = 1 / T \text{ geeft } T = 1 / F$$

Lage frequentie; 50 Hz

$$\text{Trillingssnelheid; } 1 / 50 = 0,02 \text{ sec}$$

Hoge frequentie; 1000 Hz

$$\text{Trillingssnelheid; } 1 / 1000 = 0,001 \text{ sec}$$

De trillingen hebben met name veel effect op lichte slanke staalconstructies, aangezien de resonantie in deze bouwmethode extra groot is door het materiaal en de slanke vormgeving.

Hoog frequente trillingen (boven 100 Hz) kunnen hoorbaar zijn, tot hinderlijk voor de mens, zonder dat er spraken is van trillingsschade. Bij een starre als een lichte constructie zullen hoog frequente trillingen geen effect hebben op de stabiliteit en veiligheid van het gebouw.

5.0. Waarom bezwijkt een gebouw ten gevolge van trillingen?

Conform IFCO Funderingsexpertise (www.ifco.nl) wordt een gebouw op een afstand van 15meter tot de heimachine schadevrij verklaard. Men denkt al snel dat een gebouw in gaat storten als ze trillingen voelen. Dit zijn vaak trillingen met een hoge frequentie. Ze voelen zich niet meer veilig en ervaren een trilling als hinder bij een trillingssnelheid van 0,3 mm/s met een trillingssterkte van groter dan 100 Hz. Een gebouw zal pas schade kunnen vertonen bij een trillingssnelheid, sneller dan 0,75 mm/s bij een laag frequente trilling.

Een gebouw bezwijkt niet direct ten gevolge van grondtrillingen. In veel gevallen gebeurt helemaal niks met het gebouw, er treed zelfs geen schade op. Wanneer een gebouw schade ondervindt ten gevolge van grondtrillingen kan dat verschillende oorzaken hebben. De grond trilt waar de trillingen doorheen loopt. De bodem kan inklinken, het gebouw gaat scheef staan en er kunnen scheuren ontstaan. Dit is de meest logische volgorde bij schade aan gebouwen.

Een gebouw kan op twee manier schade ondervinden ten gevolge van trillingen;

1. Doordat de trilling zich naar beneden verplaatst

Wanneer een trilling zich naar beneden de fundering in verplaatst zal de bodem mee blijven trillen en is er kans op inklinking van de bodem. Deze inklinking veroorzaakt scheefstand, die op zijn beurt onverwachtse krachten in de constructie veroorzaakt. Deze krachten kunnen scheuren in het metselwerk en knik in staal veroorzaken.

2. Doordat de trilling zich omhoog verplaatst.

Wanneer een trilling zich naar boven het gebouw in verplaatst ontstaan ook hier onverwachte krachten, de trilling plant zich voort. Ten gevolge van het schudden van de constructie ontstaan er scheuren in het metselwerk en verzwakt de elasticiteit in een stalen constructie. Dit kan eventueel vermoeiing van het staal met zich mee brengen.

5.1. Verspreiden van de trilling.

Een trilling kan de fundering van een gebouw aan het maaiveld of bij palen diep onder de grond bereiken. Wanneer de trilling de fundering bereikt gaat het zich in de praktijk in alle richtingen verdelen. De trillingen zullen omlaag, omhoog, recht door de fundering, parallel en diagonaal aan de balken en palen lopen.

Omlaag

Wanneer de trilling zich naar beneden voort plant zal hij snel uitdempen. Dit heeft te maken met de soort fundering. Bij een fundering op staal, verdwijnt de trilling terug in de grond. Bij een fundering op palen loopt de trilling door en langs de paal naar beneden. Dit veroorzaakt o.a. de negatieve kleeft. De eigenschappen van het brosse beton en de verschillende grondsoorten, waar de paal in verpakt is, zullen de trilling uitdempen.

Omhoog.

Wanneer een deel van de trilling zich, omhoog, het gebouw in voort plant is de kans op schade het grootst. De trilling zet zich afhankelijk van de brosheid en poreusheid van het materiaal snel of langzaam en lang of kort voort in het constructiemateriaal. Hoe brosser het materiaal, zoals metselwerk, des te minder ver de trilling zich voort zal zetten. Wanneer het om een stalen constructie gaat plant de trilling zich veel makkelijker en sneller voort door het materiaal.

Haaks op de fundering.

Wanneer een trilling recht door de fundering loopt gaat hij bij een paal en bij een fundering op staal recht door het beton heen. De trilling zal zich aan de andere kant verder door zetten. Dit wil zeggen dat de trilling zich in de grond verder voort plant. Of dat hij in de

kruipruimte of kelder uit komt. Hier zal het zich haast direct uitdempen aangezien de voortplantingssnelheid van een trilling door lucht hooguit 330 mm/s.

Parallel aan de fundering

Hetzelfde verhaal als bij de trilling die zich verder omlaag zetten, maar dan omgekeerd, doen zich voor bij de horizontale richtingen. Bij een fundering op staal zullen de trillingen die parallel aan de funderingsbalken lopen uitdempen door de verpakking van de grond en de brosheid van het beton. De wapening kan mee gaan trillen waardoor de bevestiging met het beton los laat.

Hieruit kan me concluderen dat trillingen die in de bodem ontstaan een negatief effect kunnen hebben op de constructie en de fundering. Met name trillingen in verticale richting omhoog het gebouw in en omlaag de fundering of bodem in kunnen funest zijn voor de constructie.

5.2. Bezwijken

De constructie van een gebouw bezwijkt wanneer het in de bezwijktoestand komt. De weg hier naar toe is als volgt:

1. De fundering en daardoor de draagconstructie wordt getroffen door een of meer grote onverwachtse kracht(en), ten gevolge van diepe trillingen zoals heiwerkzaamheden (Fig. 5.1) en oppervlaktetrillingen verkeer en/of zware machines, over een drempel (Fig. 5.2), aardbevingen etc.



Fig. 5.1. Heiwerkzaamheden



Fig. 5.2. Vrachtwagen over een drempel

2. De elasticiteit van het constructiemateriaal komt in werking en houdt de constructie schade vrij. Dit betekent dat het materiaal niet permanent vervormt. Met name staal heeft een grote elasticiteit. Metselwerk daarentegen een kleine elasticiteit.
3. De elasticiteit verliest van de onverwachtse kracht, de verlenging van het materiaal wordt te groot en er ontstaan scheuren en buigingen in de draagconstructie. Dit is het plastische gedrag van het materiaal. (Fig. 5.3)

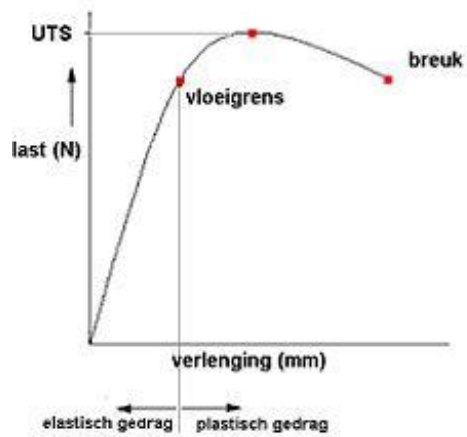


Fig. 5.3. Elasticiteit en plasticiteit van een materiaal.

4. In het geval van metselwerk gaan de scheuren zich als dilataties gedragen en worden daardoor dieper, langer en breder. Het staal knik of vermoeit door de te grote of lange tijd herhalende kracht op de constructie. Er ontstaat een breuk.