

Over de invloed van trillingen door bevingen op zettingen van gebouwen

Versie 09-09-2021

Auteurs: Ir. P.C. van Staalduinen en Ing. H.J. Everts

1. Inleiding

IMG heeft gevraagd om advies over de beoordeling van schade die verband houdt met zettingen. In het bijzonder is gevraagd om te adviseren over welk onderzoek een deskundige moet uitvoeren om te kunnen beoordelen of de zettingen al dan niet zijn veroorzaakt of verergerd door de mijnbouwactiviteiten. Er zijn verschillende oorzaken, die aanleiding kunnen zijn voor het ontstaan van gebouwzetting. De belangrijkste daarvan is het eigen gewicht van een gebouw, maar er zijn ook andere oorzaken, zoals grondwaterstandsveranderingen, oxidatie van veen, ophogingen, of de effecten van mijnbouw. Deze notitie betreft uitsluitend zettingen door trillingen, die zijn ontstaan als gevolg van mijnbouw. Andere effecten van mijnbouwactiviteiten (bijv. diepe bodemdaling door samendrukking van diepgelegen lagen) zijn hier niet beschouwd.

Aanleiding voor dit verzoek is de behoefte van het IMG aan een eenduidige beoordelingsmethodiek, die zowel voldoende voortvarend als onderbouwd kan worden uitgevoerd.

In deze notitie wordt in het kader van deze vraag van IMG met de term zettingen bedoeld een (verticale) verplaatsing van een bouwdeel ten opzichte van een ander bouwdeel of van een gebouw als geheel, welke verplaatsing gerelateerd is aan de vervorming van de ondiepe bodem, waarop een gebouw is gefundeerd. Zettingen worden ook wel aangeduid als (ver)zakkingen. Het verplaatsingsverschil tussen gebouwdelen wordt aangeduid als een zettingsverschil. In het kader van deze notitie is er geen onderscheid tussen de begrippen zettingen en (ver)zakkingen.

IMG heeft gevraagd om bij dit advies te betrekken dat – overeenkomstig het advies van het panel van deskundigen van januari 2019 – het wettelijk bewijsvermoeden van toepassing is op een schade die verband houdt met een zetting, niet in causaal verband staat met bodembeweging door mijnbouwactiviteiten, indien daarover voldoende zekerheid kan worden verkregen aan de hand van de onderbouwing in het rapport van de deskundige. Dit betekent dat de lat voor het ontzenuwen van het bewijsvermoeden hoog is gelegd. Voor het ontzenuwen van het bewijsvermoeden is, zo heeft IMG aangegeven, juridisch gezien, echter geen *onomstotelijk* bewijs vereist dat de schade niet is ontstaan en/of verergerd door bodembeweging door mijnbouwactiviteiten. In deze notitie wordt invulling gegeven aan het verzoek van IMG.

In deze notitie worden uitsluitend uitspraken gedaan over de relatie tussen *trillingen* als gevolg van bevingen en *zettingen*; daarvoor kan worden uitgegaan van berekende grenzen voor de trillingssnelheid. Vervolgens moet de relatie met het optreden van *schade* worden vastgesteld. Daarvoor moet in overeenstemming met het Paneladvies in alle gevallen een oorzaak voor het ontstaan van de schade worden aangetoond. Dit geldt ook in geval de trillingssnelheid geringer is dan de geformuleerde grenzen.

2. Samenvatting

De meest krachtige ontzenuwing van het bewijsvermoeden voor het aspect zettingen door trillingen als gevolg van bevingen wordt verkregen door het onderzoek te laten bestaan uit:

- Enerzijds een onderzoek ter plaatse, waarbij wordt vastgesteld dat er zettingen zijn en waarbij de oorzaak – niet zijnde mijnbouwactiviteiten - voor het ontstaan van de zettingen wordt

aangetoond;

- Anderzijds een onderzoek waarmee aannemelijk wordt gemaakt dat de trillingen als gevolg van de opgetreden bevingen door mijnbouwactiviteiten zo gering in sterkte zijn geweest, dat daardoor de zettingen niet kunnen zijn ontstaan of vergroot.

Het in alle gevallen uitvoeren van een dergelijk compleet onderzoek, legt een aanzienlijk beslag op de beschikbare onderzoekscapaciteit. Dit draagt niet bij aan de voortvarendheid. Het IMG heeft daarom gevraagd of het nodig is om dit complete onderzoek voor alle schadegevallen uit te voeren, om voldoende zekerheid te krijgen over of de schade door mijnbouw is ontstaan, of dat er mogelijkheden bestaan om de reikwijdte van het onderzoek te beperken voor wat betreft de invloed van trillingen op de zettingen.

Deze werkwijze komt er in principe op neer dat eerst moet worden vastgesteld en aangetoond dat er zettingen zijn. Wanneer sprake is van zettingen, vangt het onderzoek aan met het maken van een berekening, waarmee de opgetreden trillingssnelheid (overschrijdingskans 1%) als gevolg van geïnduceerde bevingen wordt bepaald. Indien de berekende trillingssnelheid kleiner is dan een nader te bepalen grenswaarde, mag worden aangenomen dat de kans op het ontstaan van zakkingen of het verergeren daarvan, als gevolg van verdichting of verweking door bevingen voldoende klein is. Wordt aan die grenswaarde niet voldaan dan is een meer uitgebreid onderzoek naar de daadwerkelijke oorzaak voor het ontstaan van de zettingen noodzakelijk om de effecten van verdichting of verweking door bevingen te kunnen beoordelen.

In deze notitie wordt daarom een viertal situaties onderscheiden. Deze zijn onderstaand weergegeven. De achterliggende gedachte daarbij is dat bij geïnduceerde bevingen met een trillingssnelheid kleiner dan 10 mm/s (in het Groningse in het algemeen overeenkomend met een grondversnelling van niet meer dan 0,03 m/s²) geen verdichting en ook geen verweking met verdichting als gevolg, optreedt¹. Op grond van NPR9998:2020² is aannemelijk dat dit ook nog geldt voor een trillingssnelheid van 16 mm/s. De kans dat daarmee een verkeerde inschatting wordt gemaakt neemt daarbij echter toe. Om die reden is het, in afwachting van de resultaten van nader onderzoek, raadzaam om in die situaties aanvullend de oorzaak van de schade (niet zijnde trillingen door bevingen als gevolg van mijnbouwactiviteiten) aan te tonen. Bij een trillingssnelheid groter dan 16 mm/s kan, in geval van de aanwezigheid van zandlagen in de ondiepe ondergrond, een door specialisten uit te voeren onderzoek nodig zijn om de verwekingsgevoeligheid vast te stellen. Opgemerkt wordt dat cumulatieve effecten van de trillingen door verschillende bevingen bij het verschijnsel verdichting en verweking niet aan de orde zijn.

Aldus kunnen de volgende 4 situaties worden onderscheiden met betrekking tot de berekende grootste trillingssnelheid die is opgetreden als gevolg van alle geïnduceerde bevingen in het Groningenveld:

- 1) de berekende trillingssnelheid is kleiner dan 10 mm/s (overschrijdingskans 1%); in deze situatie ontstaan of verergeren zettingen niet door trillingen als gevolg van mijnbouwactiviteiten; er is voor het beoordelen van de causaliteit tussen de trillingen door mijnbouwactiviteiten en de zettingen geen diepgaander onderzoek nodig naar de verwekingsgevoeligheid van de ondergrond; er mag van worden uitgegaan dat andere oorzaken (zie paragraaf 4, punten a tot en met f) tot het ontstaan van de zettingen hebben geleid. Duiding van die andere oorzaken van zettingen is vanuit een technisch perspectief niet noodzakelijk om het effect van de trillingen uit te sluiten, maar kan anderszins gewenst zijn.
- 2) de berekende trillingssnelheid is kleiner dan 16 mm/s (overschrijdingskans 1%):

¹ Deze stellingname wordt gedragen door NPR9998:2020, indien een voldoende grote veiligheidsmarge – ten minste een factor 2 - wordt aangehouden. Ook in het advies van het Panel Mestkelders is de grens van 10 mm/s aangehouden.

² Zie bijlage D van NPR9998:2020.

- Indien in de ondiepe ondergrond (tot een diepte van 5 m onder maaiveld) zandlagen aanwezig zijn met een dikte groter dan 0,1 m, dan hoeft de verwekingsgevoeligheid niet te worden onderzocht. In deze situatie moet wel een andere oorzaak (zie paragraaf 4, punten a tot en met f) voor het ontstaan van de zettingen door onderzoek worden aangetoond.
 - Indien de ondiepe ondergrond tot de aangegeven diepte uitsluitend uit klei en of veen bestaat mag worden verondersteld dat de bevingen de zettingen niet hebben veroorzaakt of verergerd; er mag van worden uitgegaan dat andere oorzaken (zie paragraaf 4, punten a tot en met f) tot het ontstaan van de zettingen hebben geleid. Duiding van die andere oorzaken van zettingen is vanuit een technisch perspectief niet noodzakelijk om het effect van de trillingen uit te sluiten, maar kan anderszins gewenst zijn.
- 3) de berekende trillingssnelheid is kleiner dan 40 mm/s (overschrijdingskans 1%):
- In geval van de aanwezigheid in de ondiepe ondergrond (tot een diepte van 5 m onder maaiveld) van zandlagen met een dikte groter dan 0,1 m moet de verwekingsgevoeligheid van de ondergrond worden onderzocht. Voor een toelichting op de beoordeling van de verwekingsgevoeligheid van de ondergrond, zie paragraaf 5.3. Ook moet een andere oorzaak (zie paragraaf 4, punten a tot en met f) voor het ontstaan van de zettingen door onderzoek worden aangetoond.
 - Indien de ondiepe ondergrond tot de aangegeven diepte uitsluitend uit klei en of veen bestaat mag worden verondersteld dat de bevingen de zettingen niet hebben veroorzaakt of verergerd; er mag van worden uitgegaan dat andere oorzaken (zie paragraaf 4, punten a tot en met f) tot het ontstaan van de zettingen hebben geleid. Duiding van die andere oorzaken van zettingen is vanuit een technisch perspectief niet noodzakelijk om het effect van de trillingen uit te sluiten, maar kan anderszins gewenst zijn.
- 4) de berekende trillingssnelheid is groter dan 40 mm/s. In dit geval moeten zowel de zettingsgevoeligheid van de ondergrond als een eventuele andere oorzaak voor het ontstaan van de zettingen worden onderzocht.

Naar mate de trillingen door bevingen sterker zijn geweest is het in zandlagen waarschijnlijker dat die trillingen kunnen hebben geleid tot verweking en verdichting en dus ook tot zettingen. Voor het beoordelen van de kans daarop kan NPR 9998:2020 worden gehanteerd. Deze richtlijn is echter niet eenvoudig hanteerbaar en vergt specialistische kennis. In deze notitie is aangehouden dat voor een trillingssnelheid groter dan 16 mm/s voor zand- en siltlagen zowel moet worden gekeken naar de verdichtingsgevoeligheid van de lagen als naar andere oorzaken voor het ontstaan van de zettingen. Voor een trillingssnelheid tussen 10 en 16 mm/s bij zand mag worden volstaan met een onderzoek naar een andere oorzaak dan de trillingen door bevingen.

3. Uitzonderingen – methodiek niet van toepassing

Deze notitie is opgesteld voor het beoordelen van zettingen van gebouwen die ‘op staal’ zijn gefundeerd, dat wil zeggen: niet op palen zijn gefundeerd. Deze notitie is dus niet bruikbaar voor gebouwen die op palen zijn gefundeerd. Voor gebouwen die op palen zijn gefundeerd en zettingen vertonen wordt in ieder geval nader onderzoek aanbevolen.

Daarnaast is van belang dat nabij hellingen of taluds vervormingen (kruip) van de bodem invloed kunnen hebben op de zakking van gebouwen die op of nabij deze hellingen of taluds zijn gefundeerd. De hier gepresenteerde aanpak is om deze reden niet toepasbaar op deze gevallen. Deze uitzonderingen (*bijzondere gevallen*) laten zich kenmerken door de volgende omstandigheden³:

³ In geval van hellingen of taluds bij watergangen, sloten of kanalen dienen deze hellingen voor wat betreft hun afmetingen volledig en dus tot onder de waterlijn te worden meegenomen.

- a) Het ter plaatse aanwezige terrein heeft aansluitend op het gebouw gemiddeld een helling steiler dan 1 m op 6 m (circa 10 graden), of:
- b) Op een afstand van minder dan 6 m tot het gebouw is in het omliggende terrein een helling steiler dan gemiddeld 20 graden met een hoogteverschil van meer dan 2 m aanwezig.

Volledigheidshalve wordt opgemerkt dat trillingen door aardbevingen, los van zettingen, effect kunnen hebben op schade aan gebouwen. De beoordeling of daarvan sprake is valt buiten het kader van deze notitie⁴.

4. Oorzaken van zettingen

Zettingen kunnen aanleiding geven tot fysieke schade aan een gebouw. Dat gebeurt vooral bij ongelijkmatige zettingen, waarbij bepaalde delen van een gebouw een grotere zetting hebben ondergaan dan andere. Een gebouw dat als geheel een gelijkmatige verticale zetting heeft ondergaan, behoeft daarbij geen schade op te lopen. Zettingen en zettingsverschillen leiden niet altijd tot schade in de vorm van scheuren. Ze kunnen ook leiden tot functionele beperkingen of bezwaren (scheefstand, afwatering, toegangen, etc).

De oorzaken van zettingen – dus van vervorming van de bodem – kunnen verschillend zijn. Onderstaand is ter informatie een aantal oorzaken benoemd. Voor de goede orde wordt opgemerkt dat deze notitie alleen de oorzaak “zettingen door verdichting en verweking als gevolg van bevingen” verder uitwerkt.

Allereerst wordt onderscheiden een vervorming door consolidatie en door kruip door de aanwezigheid van een gebouw:

- a) Indrukking van de bodem onder gebouw en fundering als gevolg van het eigen gewicht van het gebouw (deel: consolidatie). Deze indrukking wordt gekenmerkt door een proces, op relatief korte termijn, waarbij de hogere belasting op de ondergrond leidt tot een dichter op elkaar gaan zitten van de grondkorrels. Dat dichter op elkaar gaan zitten kan alleen optreden als het water dat zich tussen de korrels bevindt deels afstroomt. In zand vindt die afstroming vrijwel instantaan plaats, maar in klei- en veengronden kan dat enkele jaren vergen. Deze zetting wordt ook de primaire of consolidatiezetting genoemd.
- b) Doorgaande vervorming onder het eigen gewicht van een gebouw (deel: kruip). Cohesieve grondsoorten, met name veen en ook klei, blijven een in de tijd doorgaande, maar in snelheid afnemende vervorming vertonen. Deze zetting wordt de secundaire of kruipzetting genoemd. Deze zetting is ongeveer de helft van de totale zakking in een periode van 30 jaar. De kruipzakking treedt overigens deels ook al op in de consolidatie-periode, zodat na de consolidatiezakking nog een restzakking resteert van orde grootte 20% van de totaal te verwachten zakking door eigen gewicht van een gebouw.

De zettingen onder a) en b) zijn direct gerelateerd aan de grootte van de druk onder de fundering, die enerzijds wordt bepaald door het ter plaatse aanwezige gewicht van metselwerk en balken en anderzijds door de breedte van de fundering. Licht belaste funderingen bevinden zich bijvoorbeeld onder kelders en grote raamopeningen; zwaar belaste delen zijn vaak aanwezig onder zijgevels, onder schoorstenen en onder staanders van gebinten in boerderijen.

Daarnaast zijn er oorzaken die niet zijn gerelateerd aan het gebouw.

- c) Een niet onbelangrijke bijdrage aan de maaiveldzakking ontstaat door kruip als gevolg van het eigen gewicht van de grond zelf. Deze zakking, samen met zakking door oxidatie (zie item d), wordt ook wel achtergrondzakking genoemd en bedraagt afhankelijk van de grondopbouw

⁴ Hierbij kan gebruik gemaakt worden van SBR-Richtlijn A

tienden van mm's per jaar tot mm's per jaar.

- d) Onomkeerbare wijzigingen van eigenschappen van het bodemmateriaal, bijvoorbeeld door oxidatie van veen, indien dit aan zuurstof wordt blootgesteld. In dit geval neemt het volume van het materiaal sterk af. Ook dit is gerelateerd aan de ligging van de grondwaterspiegel.
- e) Omkeerbare wijzigingen van de eigenschappen van het bodemmateriaal, bijvoorbeeld door krimp of zwel als gevolg van wijziging van vochtgehalte. Dit is vaak gerelateerd aan de ligging van de grondwaterspiegel of aan klimatologische omstandigheden.
- f) Indrukking van de bodem als gevolg van wijzigingen in de grondwaterspiegel. Bij verlaging van de grondwaterspiegel neemt de opwaartse waterdruk af en bijgevolg de spanning tussen de korrels in het bodemmateriaal toe en dit leidt (net als onder invloed van het eigen gewicht van het gebouw) tot een zakking.
- g) Wijzigingen van de dichtheid van het bodemmateriaal door trillingen. Als gevolg van bewegingen van het grondmassief, bijvoorbeeld door bevingen of het intrillen van damwanden, kan een her-rangschikking van korrels plaatsvinden. Kleine korrels kruipen in de poriën tussen grote korrels. Deze her-rangschikking heet verdichting en leidt tot een zakking. Voor verdichting is het nodig dat de korrels ten opzichte van elkaar kunnen verplaatsen, hetgeen alleen het geval is in zandlagen. In cohesieve grondsoorten treedt (door bevingen in Groningen) geen verdichting op.
- h) Als in een zandpakket door verdichting de korrels dichter bij elkaar komen, vermindert het volume van de poriën. Die zijn, beneden de grondwaterspiegel, gevuld met water, dat daardoor onder druk komt te staan. Dat leidt tot een tijdelijke afname van de korrelspanning en dus van de sterkte van de grond. Die afname kan zo groot worden dat zakkingen of zelfs stabiliteitsverlies kan optreden bij taluds of naast zwaar belaste funderingen. Dit proces van tijdelijk verlies aan draagkracht van de ondergrond heet verweking of zettingsvloeiing en treedt alleen op in zand.
- i) Een groot aantal wisselingen van de belasting op de ondergrond, bijvoorbeeld ten gevolge van bevingen, kan leiden tot grote schuifrekken in de ondergrond. In dat geval kan ook in cohesieve gronden sprake zijn van een afname van de sterkte (cyclic softening). Verweking in klei en veen speelt echter geen rol onder de omstandigheden van de bevingen in Groningen als gevolg van het geringe aantal belastingcycli in combinatie met de beperkte trillingssterkte aan het aardoppervlak.

Elk gebouw dat in de ondiepe ondergrond is gefundeerd (dus niet op palen is gefundeerd) zal een indrukking van de ondiepe ondergrond veroorzaken en daarmee een zetting ondergaan. Als de funderingsdrukken ongelijkmatig zijn – dit is afhankelijk van het ontwerp van de fundering en van de gewichtsverdeling in een gebouw - hangt het van de sterkte en de stijfheid van een gebouw af, of door de ongelijkmatige funderingsdrukken fysieke schade aan het gebouw ontstaat. Zettingen (en dus ook ongelijkmatige zettingen) zijn inherent aan het funderen van gebouwen in de ondiepe bodem en zijn gerelateerd aan de eigenschappen van het gebouw en de lokale bodemeigenschappen, via mechanismen a) en b). Dit is ongeacht de invloed van mijnbouwactiviteiten.

Deze verschillende mechanismen die tot zettingen aanleiding kunnen geven, komen vaak in combinatie voor. Zettingen doen zich vaak voor als verschilzettingen, doordat de belasting op de bodem als gevolg van het gebouw niet overal dezelfde is. De bodem onder een gebouw is meestal ook niet volledig homogeen van samenstelling (bijvoorbeeld: de dikte van bodemlagen kan variëren), waardoor bepaalde plaatsen gevoeliger zijn voor zetting dan andere. Oxidatie van bodemmateriaal doet zich alleen voor bij bodemmateriaal van organische oorsprong (veen) en nabij de grondwaterspiegel. Verdichting en verweking komen alleen voor bij bodemmateriaal dat

onsamenhangend is, dus in meer of mindere mate fracties zand bevat. Dit wordt niet-cohesieve grond genoemd. De gevoeligheid voor verweking of verdichting is verder ook nog afhankelijk van de dichtheid die het korrelskelet heeft, van de spannings situatie in de bodem (met name de verticale korreldruk), de geschiedenis van de belasting op de ondergrond en de aard van de bevingsbelasting.

Mijnbouwactiviteiten kunnen invloed hebben op de zettingen van gebouwen. Als gevolg van de mijnbouwactiviteiten treedt (door diepe bodemdaling) een zakking op van het maaiveld; of de grondwaterstand mee zakt of gelijk blijft is mede afhankelijk van de maatregelen van de waterschappen. Dit betreft de mechanismen d) tot en met f). Mijnbouwactiviteiten kunnen daardoor indirect een effect hebben op de zettingen door beïnvloeding van de grondwaterspiegel. Mijnbouwactiviteiten kunnen ook direct een effect hebben op zettingen door (kortdurende) spanningswisselingen in de ondergrond als gevolg van bevingen. Dit betreft de mechanismen g) tot en met i). Op beide manieren kunnen mijnbouwactiviteiten een bijdrage leveren aan de mate van de totale zetting van een gebouw en ook aan de zettingsverschillen. Deze notitie gaat specifiek in op de directe invloed van mijnbouwactiviteiten op de zettingen in de vorm van verdichting of verweking door trillingen, dus de mechanismen g) tot en met i).

5. Fasegewijs onderzoek naar de oorzaak van een zetting

Hierna wordt beschreven hoe in een drietal fasen tot een voldoende onderbouwd oordeel kan worden gekomen over het bestaan van een relatie tussen zettingen en trillingen als gevolg van bevingen door mijnbouwactiviteiten. Om tot dat oordeel te komen kan het afhankelijk van de berekende trillingssnelheid en de grondsoort nodig zijn de verwekingsgevoeligheid van de grond te bepalen of om een andere oorzaak voor het optreden van de zettingen door onderzoek te onderbouwen.

5.1 Fase 1: Informatie uit of aanvullend op de schadeopname van een gebouw

De eerste fase sluit aan op de reguliere opname van de fysieke schade van een gebouw en is erop gericht om vast te stellen of inderdaad sprake is van zettingen en zettingsverschillen.

Indien tijdens of na de reguliere opname het *vermoeden* ontstaat dat zettingen een rol spelen als (mede) oorzaak van de waargenomen fysieke schade zullen voor een adequate beoordeling en verklaring daarvan aanvullende gegevens of waarnemingen nodig zijn. Deze gegevens of waarnemingen kunnen worden verkregen tijdens de reguliere schadeopname of bij een aanvullende opname.

Opmerking: omdat in het stadium van een reguliere, eerste opname nog geen gegevens over de ondergrond beschikbaar zijn, kan alleen een vermoeden voor zettingsschade worden aangegeven. Afhankelijk van de berekende trillingssnelheid zijn aanvullende onderzoeken nodig.

Tijdens de schadeopname in de eerste fase na de reguliere opname

Hieronder wordt een niet limitatieve opsomming gegeven van de waarnemingen die een deskundige kan doen in het kader van een opname van een schade die gerelateerd kan worden aan zettingen en is gericht op het vinden van de oorzaak van het ontstaan van de zettingen.

- 1) Stel vast of er zettingen of zettingsverschillen zijn in vloeren of wanden (bijv. uit het schadepatroon af te leiden of anderszins zichtbaar of voelbaar). Deze verschillen kwantificeren, bijv. met waterpas.
- 2) Beoordeel of er sprake is van een scheefstand van gevels (stand uit het lood), en zo ja, aangeven in welke gevels en in welke mate en richting (deze kwantificeren).
- 3) Beoordeel of het waargenomen schadepatroon eenduidig samenhangt met een mogelijk (nader te onderzoeken) zettingsmechanisme.
- 4) Beoordeel hoe het schadepatroon zich verhoudt ten opzichte van de (mogelijke)

zettingsmechanismen. Dit te vermelden in een schets van gevels en plattegrond met daarin ook in woord en getal de waargenomen horizontale en verticale verplaatsingen, scheurwijdtes etc.

- 5) Schat de ouderdom van de zettingsschade in (bijv. op basis van vervuiling scheurvlak, zichtbare oudere reparaties, etc).
- 6) Als oudere reparaties zichtbaar zijn, beschrijf die reparaties.
- 7) Stel wijdte van reparaties vast en vermeld of deze opnieuw zijn open gaan staan en zo ja over welke wijdte.

Nadere informatie:

Over de volgende aspecten kan - voor zover relevant – in de eerste fase nadere informatie moeten worden ingewonnen. Dit overzicht is niet uitputtend, er kunnen dus nog meer aspecten van belang zijn. Afhankelijk van de situatie zullen niet alle aspecten even belangrijk zijn.

- 1) Als oudere reparaties zichtbaar zijn, informeer naar het jaar van reparatie.
- 2) Vraag of eigenaren/bewoners beschikken over bouwtekeningen.
- 3) Ga na of er verschillend gefundeerde onderdelen in het gebouw zijn (m.n. funderingswijze van vloeren, gevels, funderingsniveau (waaronder kelders)).
- 4) Ga na of er verschillende bouwjaren van onderdelen van een gebouw zijn (denk aan uitbreidingen).
- 5) Informeer of en zo ja wanneer er belangrijke wijzigingen in het gebruik van het gebouw zijn opgetreden, die invloed gehad kunnen hebben op de belasting op de vloeren of fundering.
- 6) Ga na of er een kruipruimte aanwezig is.
- 7) Informeer of er (wel eens) water in de kruipruimte staat.
- 8) In geval van boerderijen: ga na of informeer of de staanders van de gebinten mogelijk meer zijn gezakt dan de zijgevels. Informeer of de staanders (ooit) gevizeld zijn en zoja, wanneer.
- 9) Ga na of informeer of het terrein aansluitend aan het gebouw is opgehoogd of afgegraven.
- 10) Ga na of informeer of in het terrein aansluitend aan het gebouw graafwerkzaamheden hebben plaatsgevonden (bijv. ten behoeve van riolering, aanleg mestkelders of andere leidingen).
- 11) Ga na of informeer of er bomen zijn weggehaald in de nabijheid van het gebouw (binnen een afstand van de halve kroondiameter van een boom).
- 12) Ga na of informeer of er in het verleden veranderingen zijn opgetreden in slootpeilen, sloten zijn gegraven of gedempt.
- 13) Ga na waar zich mestkelders, waterputten, regenwaterafvoerleidingen en/of rioleringen bevinden met een mogelijke kans op onderspoeling van de fundering door lekkage door deze putten of leidingen.

Indien op basis van de vergaarde gegevens blijkt dat zettingen zijn opgetreden en het vermoeden stand houdt dat zettingen verband houden met de waargenomen fysieke schade, dan moet het onderzoek worden vervolgd met een bureaustudie (fase 2) als voorbereiding op een onderbouwing (fase 3).

5.2 Fase 2: Bureaustudie / gegevensverzameling en eerste interpretatie

Nu is geconcludeerd dat er sprake is van zettingen, moeten de benodigde stappen worden bepaald om een antwoord te verkrijgen op de vraag of die zettingen al dan niet een relatie hebben met de trillingen als gevolg van de mijnbouwactiviteiten. De te berekenen trillingssnelheid vormt daarbij een belangrijk hulpmiddel voor het bepalen van de vervolgstappen.

- 1) De historisch opgetreden bodemtrillingen moeten nu worden gekwantificeerd als topwaarde van de bodemversnelling. Als benadering kan de grootste berekende opgetreden topwaarde van de

trillingsnelheid volgens de trillingstool⁵ (voor alle geïnduceerde bevingen uit het Groningenveld) worden gehanteerd met een overschrijdingskans van 1 %. De topwaarde (rekenwaarde) van de *bodemversnelling* kan vervolgens indicatief worden bepaald door de topwaarde van de trillingsnelheid te vermenigvuldigen met een factor van 30. Hierbij is uitgegaan van een effectieve trillingsfrequentie⁶ van de bodemtrillingen tussen 4 en 5 Hz. Door uit te gaan van een 1% bovengrens is het niet nodig nog toeslagen in rekening te brengen voor opslingeren en herhaalde bevingen⁷ om te komen tot een rekenwaarde;

- 2) Als de berekende trillingsnelheid kleiner is dan 10 mm/s, mag worden geconcludeerd dat de trillingen als gevolg van de mijnbouwactiviteiten de zettingen niet hebben doen ontstaan of verergeren. Of de trillingen al dan niet op een andere wijze kunnen hebben geleid tot schade moet alsnog worden beoordeeld; bij voorkeur via SBR-Richtlijn A. Het onderzoek met betrekking tot de relatie tussen de zettingen en de trillingen door mijnbouwactiviteiten eindigt hier;
- 3) Als de berekende trillingsnelheid groter is dan 10 mm/s, maar kleiner is dan 16 mm/s, moet worden nagegaan of de ondergrond verwekingsgevoelig is. Ga op basis van externe bronnen de samenstelling van de ondiepe bodem na. In geval van op staal gefundeerde panden betreft dit de bovenste 5 à 10 m. De aanbevolen bron is het Geotop-model.⁸
 - a. Indien uit dit onderzoek blijkt dat de ondergrond tot de relevante diepte (5 m beneden maaiveld) (deels) bestaat uit zand (lagen met een dikte groter dan 0,1 m), dan kan de ondergrond verwekingsgevoelig zijn. In dat geval moet fase 3 worden uitgevoerd.
 - b. Indien de samenstelling van de ondiepe bodem tot de relevante diepte (neem hiervoor 5 m beneden maaiveld) bestaat uit klei of veen (eventueel met zandlaagjes zand of silt ter dikte kleiner dan 0,1 m), speelt verdichting geen rol indien de bodemversnelling volgens 1) van fase 2 kleiner is dan 1,25 m/s² (of de topwaarde van de trillingsnelheid kleiner is dan 40 mm/s, overschrijdingskans 1 %). In zeer bijzondere gevallen kan bij een voldoende aantal bodembewegingen en voldoende amplitude, wel een extra waterspanning ontstaan, die leidt tot een afname van de sterkte (cyclic softening). Het optreden van cyclic softening is niet relevant voor de tot nu toe opgetreden kortdurende bevingen in Groningen. Dit vanwege het geringe aantal cycli in combinatie met de tot nu toe opgetreden beperkte trillingssterkten bij een beving.

Als de ondergrond niet verwekingsgevoelig is, zoals bij de aanwezigheid van alleen klei- en veenlagen in de ondiepe ondergrond, eindigt het onderzoek hier met betrekking tot de relatie tussen de zettingen en de trillingen door mijnbouwactiviteiten. Als die verdichtingsgevoeligheid mogelijk wel aanwezig is (in geval van zandlagen in de ondiepe ondergrond met een dikte groter dan 0,1 m) worden onderstaande stappen gevolgd en moet verdere beoordeling plaatsvinden, zoals beschreven in Fase 3.

Op basis van bovenstaande moet in fase 3) worden besloten of voldoende kan worden onderbouwd wat de oorzaak van de opgetreden zettingen is.

5.3 Fase 3: Bureauanalyse / Onderzoek naar de oorzaak van de zettingen

Als deze fase wordt uitgevoerd is sprake van één van de volgende situaties:

- 1) de berekende trillingsnelheid ligt tussen 10 en 16 mm/s en de ondiepe ondergrond is mogelijk verwekingsgevoelig, d.w.z. deze bevat zandlagen met een dikte groter dan 0,1 m. In deze situatie moet achterhaald worden waardoor de zetting is veroorzaakt. Als dat niet mogelijk is, wordt voor het aspect zettingen door trillingen als gevolg van bevingen teruggevallen op het

⁵ De trillingstool is een door IMG gehanteerd instrument om de trillingssterkte van historische geïnduceerde bevingen op willekeurige plaats te kunnen berekenen, op basis van de methode van Bommer e.a. uit 2019.

⁶ De effectieve trillingsfrequentie is afhankelijk van de locatie, van de magnitude van de beving en van de afstand tot het epicentrum. Voor bevingen tussen $M = 2,4$ en $M = 3,6$ en afstanden tot ca. 20 km tot het epicentrum is 4 à 5 Hz een bruikbare waarde.

⁷ Uitsluitend dicht bij het epicentrum van bevingen en in een tijdperiode waarin meer relatief zware bevingen hebben plaatsgevonden, kan een toeslagfactor redelijk zijn (SBR-richtlijn A: factor 1,5).

⁸ Zie het DINO-loket, <https://www.dinoloket.nl/>

- bewijsvermoeden.
- 2) De berekende trillingsnelheid is groter dan 16 mm/s in geval van de aanwezigheid van zandlagen of de berekende trillingsnelheid is groter dan 40 mm/s in geval van klei- en veenlagen (cohesieve lagen). In dat geval moet zowel achterhaald en aangetoond worden waardoor de zetting is veroorzaakt, als de verwekingsgevoeligheid van de bodem worden getoetst. In Bijlage 1 is een methode aangegeven waarin de verdichtingsgevoeligheid en daarmee ook de verwekingsgevoeligheid van zandlagen kan worden bepaald. Als de oorzaak niet kan worden aangewezen, wordt voor het aspect zettingen door trillingen als gevolg van bevingen teruggevallen op het bewijsvermoeden.

Aantonen oorzaak zetting

Als het nodig is om de oorzaak van de zettingen te achterhalen kan het nodig zijn om de volgende onderzoeken uit te voeren:

- 1) Vraag (indien nog niet beschikbaar) bouwtekeningen op bij Bouw en Woningtoezicht;
- 2) Ga na of de wijzigingen in het gebruik⁹ van het gebouw en in het gebouw zelf¹⁰ invloed gehad kunnen hebben op het gedrag van gebouw en/of fundering;
- 3) Ga na of aanpassingen in het terrein aansluitend aan het gebouw in de afgelopen jaren invloed gehad kunnen hebben op het gedrag van de fundering;
- 4) Ga na of eventuele graafwerkzaamheden of andere wijzigingen invloed gehad kunnen hebben op het gedrag van de fundering;
- 5) Ga na of er belangrijke oppervlaktewaterpeilen zijn aangepast of grondwaterpeilen zijn gewijzigd en wat de effecten daarvan zijn geweest (aanbevolen bronnen: waterstaatskaarten, peilgegevens en peilbesluiten waterschappen, gegevens grondwaterstanden in DINO loket).
- 6) Beoordeel of de zettingspatronen in overeenstemming zijn te brengen met de belastingen, de samenstelling van de ondergrond en aanlegniveaus van de constructie-onderdelen. Let op mechanismen zoals:
 - zakking door eigen gewicht
 - verschillen in funderingsdruk
 - verschillen in funderingswijze/aanlegniveau en aanlegbreedte
 - wijziging van grondwaterpeil
 - oxidatie van veenlagen
- 7) Bepaal en verzamel de gegevens¹¹ die nodig zijn om de belastingen te kunnen bepalen op fundering van de verschillend gezakte gebouwdelen;
- 8) Bepaal de afmetingen van de fundering¹² en bepaal de funderingsdrukken;
- 9) Bepaal de zakkingen op basis van een statische zakkings- en sterkteberekening¹³ van de fundering en ga na of de waargenomen zakkingen en zakkingsverschillen zich hierdoor voldoende laten verklaren. Beschouw hierbij ten minste de mechanismen die onder 6) zijn genoemd.

Verwekingsgevoeligheid

De verwekingsgevoeligheid van zandlagen en het daaraan voorafgaande proces van verdichting kan worden beoordeeld op basis van een ter plaatse gemaakte sondering. In bijlage 1 is een praktisch toepasbaar model beschreven, waarmee de verdichtingsgevoeligheid van een zandlaag kan worden

⁹ Bij wijziging van gebruik valt te denken aan wijziging van functie, waardoor bijv. belastingen op gebouw of fundering kunnen zijn veranderd.

¹⁰ Te denken valt bijvoorbeeld aan het aanbrengen van een opbouw, het weghalen van dragende wanden of juist het toevoegen van isolerende gemetselde wanden.

¹¹ als onvoldoende gegevens aanwezig zijn dan deze specificeren en laten bepalen d.m.v. aanvullende inspectie (o.a. dikte gevels, draagrichting balken).

¹² als onvoldoende gegevens aanwezig zijn, dan als onderdeel van nader onderzoek ter plaatse de fundering opgraven en inmeten.

¹³ Als geen grondonderzoek ter plaatse aanwezig is, dan als onderdeel van nader onderzoek ter plaatse ten minste 1 handboring maken tot 5 m. diepte (in geval van slappe lagen) of een sondering laten uitvoeren. In geval mogelijk sprake is van de aanwezigheid onder de fundering van samendrukbare lagen zoals klei en veen, moet door middel van prikken of boren onder de fundering worden bepaald of sprake is van een grondverbetering.

beoordeeld. Met die methode kan de eerder aangegeven trillingsnelheid van 16 mm/s mogelijk worden vervangen door een andere, vrijwel altijd hogere waarde.

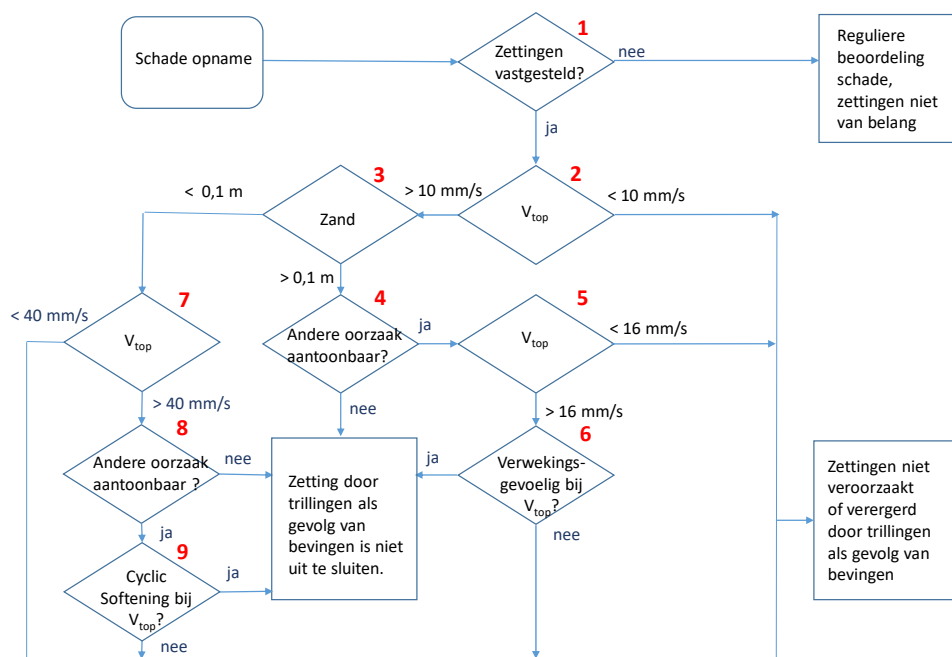
6. Schade-verergering en schade-schadebegroting

Indien op grond van bovenstaande niet kan worden uitgesloten dat bevingen van invloed zijn geweest op de zettingen, kan het zo zijn dat de deskundige moet adviseren over of de schade door bevingen is *veroorzaakt* of daar alleen door is *verergerd*. In dat laatste geval kan de deskundige adviseren over de mate waarin het ontstaan van de schade door een andere oorzaak kan worden verklaard en de mate waarin die (dus) door bevingen kan zijn verergerd. De deskundige kan dit in beginsel doen aan de hand van het hiervoor beschreven onderzoek, voor zover daaruit een voldoende eenduidige oorzaak blijkt voor een bepaalde mate van zetting. Zo nodig kan de mate waarin de andere oorzaak en de bevingen aan het ontstaan van de zetting hebben bijgedragen worden ingeschat, maar dit dient dan wel op een conservatieve manier te gebeuren. Dit betekent dat de deskundige hierbij voor de aanvrager aan de veilige kant zal moeten gaan zitten. De deskundige dient immers, zie ook het hiervoor beschreven uitgangspunt van het IMG, voldoende zekerheid te hebben over de door hem te trekken conclusies.

De mate waarin een zetting kan worden toegerekend aan een andere oorzaak dan de invloed van bevingen, kan van belang zijn bij het begroten van de schadevergoeding. Hierbij kan gedacht worden aan het toerekenen van een gedeelte van de totale herstelkosten. Dit laatste onderwerp valt evenwel buiten het bestek van deze notitie.

7. Stroomdiagram

Onderstaand is het beslissingsproces zoals dat impliciet is weergegeven in de hoofdstukken 1 tot en met 6, expliciet weergegeven in figuur 1. Daar waar gesproken wordt over “andere oorzaak”, wordt steeds bedoeld “andere oorzaak dan zettingen door trillingen als gevolg van geïnduceerde bevingen”.



Figuur 1: Stroomdiagram beslissingsproces voor het bepalen van de relatie tussen zettingen en trillingen door geïnduceerde bevingen.

Volgens het stroomdiagram moeten de volgende stappen worden doorlopen:

1 Vaststellen of er sprake is van zettingen.

1-nee Zo nee, dan is de schade niet ontstaan door zettingen die zijn veroorzaakt of verergerd door de bevingen. Daarmee is niet gezegd dat de bevingen geen schade kunnen hebben veroorzaakt aan het pand. Om daar een indruk van te verkrijgen kan, na het berekenen van de trillingssnelheid met de trillingstool, met behulp van SBR-A worden beoordeeld hoe groot de kans daarop is. In dit stroomdiagram is dat pad niet verder uitgewerkt, omdat deze notitie alleen betrekking heeft op de relatie tussen zettingen en trillingen.

1-ja Zo ja, dan met de trillingstool de trillingssnelheid bepalen en vaststellen of die groter is dan 10 mm/s.

2 Is de berekende trillingssnelheid > 10 mm/s?

2-ja Zo ja, dan vaststellen of er binnen 5 m onder het maaiveld sprake is van zand- of siltlagen met een dikte groter dan 0,1 m. Dat kan met behulp van de resultaten van boringen of sonderingen, die ter plaatse kunnen zijn gemaakt of zijn ontleend aan het Dino-loket.

2-nee Zo nee, dan kan worden geconcludeerd dat de trillingen als gevolg van bevingen de zettingen niet hebben veroorzaakt of verergerd. Vervolgens is het nog steeds noodzakelijk om de oorzaak van de schade te duiden.

3 Zijn er zand- of siltlagen met een dikte groter dan 0,1 m?

3-ja Zo ja, dan door middel van onderzoek ter plaatse vaststellen of er een andere oorzaak is voor het ontstaan van de zettingen. Bijvoorbeeld kan het eigen gewicht van een pand of een recente verbouwing een actor zijn voor het ontstaan van zettingen als gevolg van samendrukking van klei- of veenlagen.

3-nee Dan concluderen dat er in de bovenste 5 m alleen klei- en veenlagen aanwezig zijn en vaststellen of de berekende trillingssnelheid groter is dan 40 mm/s.

4 Is er een andere oorzaak voor de zettingen?

4-ja Zo ja, dan vast stellen of de trillingssnelheid groter is dan 16 mm/s.

4-nee Als er zandlagen zijn, eventueel naast de aanwezigheid van samendrukbare lagen, en er kan voor het ontstaan van de zettingen geen andere oorzaak worden aangetoond, dan kan niet worden uitgesloten dat de trillingen door de bevingen de zettingen hebben veroorzaakt.

5 Is de berekende trillingssnelheid groter dan 16 mm/s?

5-ja Zo ja, dan door nader onderzoek volgens Bijlage 1 of door inschakeling van een specialist, vaststellen of de zetting kan zijn veroorzaakt door verweking en verdichting van de zandlagen.

5-nee Gezien de relatief lage trillingssnelheid (tussen 10 en 16 mm/s) mag bij het aanwezig zijn van een andere oorzaak voor het ontstaan van de zettingen, worden geconcludeerd dat de trillingen door de bevingen de zetting niet hebben veroorzaakt of verergerd. Vervolgens is het nog steeds noodzakelijk om de oorzaak van de schade te duiden.

6 Zijn er verwekingsgevoelige zandlagen?

6-ja Zo ja impliceert dat wanneer zowel sprake is van de aanwezigheid van een andere oorzaak (beslispunt 4) voor het ontstaan van de zettingen en er zijn verdichtingsgevoelige zandlagen, niet kan worden uitgesloten dat een deel van de zettingen is veroorzaakt door de trillingen ten gevolge van de bevingen. De mate waarin hangt dan af van de mate van aantoonbaarheid van de andere oorzaak en de mate van verwekingsgevoeligheid van de ondergrond.

6-nee Er is een andere oorzaak voor het ontstaan van de zettingen (beslispunt 4) en er zijn geen verdichtingsgevoelige zand- of siltlagen. Dan mag worden geconcludeerd dat de zettingen niet zijn veroorzaakt of verergerd door de trillingen door de bevingen. Vervolgens is het nog steeds

noodzakelijk om de oorzaak van de schade te duiden.

7 Is de trillingssnelheid > 40 mm/s?

7-ja Zo ja, dan door middel van onderzoek vaststellen of er een andere oorzaak is voor het ontstaan van de zettingen. Juist in geval van aanwezigheid van klei- en veenlagen, is het eigen gewicht van een constructie en oxidatie een mogelijke andere oorzaak voor het ontstaan van zettingen.

7-nee Is de trillingssnelheid geringer dan 40 mm/s, dan mag op basis van NPR9998:2020 paragraaf 10.2 worden aangenomen dat de zettingen in klei- en veenlagen niet zijn veroorzaakt of verergerd door de trillingen door de bevingen. Vervolgens is het nog steeds noodzakelijk om de oorzaak van de schade te duiden.

8 Is er een andere oorzaak voor de zettingen?

8-ja Zo ja, dan moet vervolgens worden onderzocht of de zettingen mede kunnen zijn veroorzaakt door het in trilling brengen van de ondergrond. Het achterliggende mechanisme is nu niet een herrangschikking van de korrels zoals bij zand het geval kan zijn (verweking), maar het optreden van plastische grondverplaatsingen (cyclic softening). Dat is denkbaar in geval bij zeer grote trillingssnelheid in combinatie met een geringe sterkte van de grond en hoge schuifspanningen, zoals onder de fundering van gebinten.

8-nee Als er geen andere oorzaak kan worden aangetoond, kan niet worden uitgesloten dat de zettingen mede zijn ontstaan of verergerd door de trillingen ten gevolge van de bevingen.

9 Is de ondergrond verwekingsgevoelig?

9-ja Zo ja, dan kan niet worden uitgesloten dat de zettingen mede zijn ontstaan of verergerd door de trillingen ten gevolge van de bevingen. De mate waarin bevingen kunnen hebben bijgedragen aan de zakkings hangt ook af van de andere oorzaak voor het ontstaan van de zettingen. Een trillingssnelheid groter dan 40 mm/s komt niet veel voor. In dergelijke gevallen is het raadzaam een specialist te consulteren.

9-nee Bij het aanwezig zijn van een andere oorzaak en een niet verwekingsgevoelige ondergrond, mag worden geconcludeerd dat de trillingen de zettingen niet kunnen hebben veroorzaakt. Vervolgens is het nog steeds noodzakelijk om de oorzaak van de schade te duiden.

Bijlage 1 Notitie: Bepaling drempelwaarde van versnelling van zandlagen voor het optreden van verdichting.

Versie 2: 19-08-2021

1.0 Inleiding

Op dit moment is er geen praktisch toepasbare methodiek beschreven, waarmee schade-experts of geotechnici de mate van verdichting in zandlagen kunnen bepalen als gevolg van relatief lage trillingsnelheden of grondversnellingen. NPR9998 beschouwt de veiligheid van constructies bij het optreden van *nieuwe* trillingsbelastingen en als gevolg daarvan een bepaalde mate van *toekomstige* schade. Schade-experts zijn echter op zoek naar een model, waarmee op basis van *opgetreden* grondversnellingen kan worden beoordeeld of die versnellingen kunnen hebben bijgedragen aan reeds *opgetreden* schade.

Uit onderzoek is gebleken dat bij door bevingen veroorzaakte trillingsnelheden < 16 mm/s mag worden aangenomen dat geen verdichting van zandlagen is ontstaan. Bij grotere trillingsnelheden mag daar niet zonder nader onderzoek van worden uitgegaan. De voorliggende bijlage 1 beschrijft hoe op basis van een ter plaatse gemaakte sondering voor een specifieke zandlaag de grens voor de trillingsnelheid, waar beneden geen verdichting optreedt, meer nauwkeurig kan worden bepaald. In feite wordt daarmee een vervangende waarde (drempelwaarde) voor de 16 mm/s bepaald.

Onderstaande methode is beschreven door ir. R. Hergarden^{14,15}. Zijn model komt op het volgende neer:

- bepaal de dichtheid van het zand voorafgaande aan een nieuwe trillingsbelasting;
- bepaal de grenswaarde voor de grondversnelling, waarbij dit zand verder verdicht;
- vergelijk deze grenswaarde met de volgens de Trillingstool door een beving veroorzaakte grondversnelling (1%).

Indien de vernieuwde grenswaarde niet is overschreden, is geen verdichting opgetreden.

Het door Hergarden gehanteerde verdichtingsmodel is gebaseerd op algemene aspecten van gronddynamica (Barkan) en is daarom ook geschikt voor het beoordelen van de effecten van trillingsbelastingen van de bevingen als gevolg van mijnbouw.

Een opvallend verschil tussen een trilling ten gevolge van een beving door mijnbouw en trillingen door het inbrengen of verwijderen van een damwand is het aantal veroorzaakte cycli. Bij bevingen is dat minder dan 10 en bij het uittrillen van een damwand kunnen dat er duizenden zijn. Bekend is dat, boven een zeker trillingsniveau, de verdichting toeneemt met het aantal cycli. Hergarden is voor zijn damwandenmodel uitgegaan van het bereiken van een maximale dichtheid. Die dichtheid zal bij bevingen vanwege het geringe aantal cycli (ook bij sommatie van de cycli van alle relevante

¹⁴ R. Hergarden. Afstudeerwerk TU-Delft. Gronddeformaties tijdens het trillend trekken van damwanden (december 2000).

¹⁵ Ir. R.H. Hergarden en prof. Ir. A.F van Tol; Zakkingen tijdens het trillend trekken van damwanden. Geotechniek (april 2001)

bevingen) nooit optreden, zodat voor het beoordelen van de effecten van bevingen door mijnbouw, het model veilig gebruikt kan worden.

2 Achtergronden methodiek bepaling zettingsgevoeligheid van zandlagen.

Hergarden komt tot de conclusie dat de grootte van de verdichting van een zandlaag in hoofdzaak wordt bepaald door 3 aspecten:

- de relatieve dichtheid van de zandlaag voorafgaande aan het in trilling brengen van het zandpakket;
- de relatieve trillingsbelasting. Daaronder wordt verstaan de mate waarin het zandmassief aan grotere versnellingen wordt onderworpen dan in het verleden;
- de trillingsduur; deze is voor damwanden vaak zo lang dat de grond als maximaal verdicht kan worden beschouwd (bij een trillingsduur van meer dan 5 minuten). Bij bevingen door gaswinning is dat uiteraard niet het geval. Door daar wel vanuit te gaan wordt het effect van bevingen overschat en draagt dat bij aan een voor het beoordelen van de effecten van bevingen robuuste toepassing. Daarmee vervalt deze tijd-variabele.

Beide resterende aspecten (relatieve dichtheid en trillingsbelasting) worden eerst toegelicht.

De relatieve dichtheid van een zandlaag zegt iets over de dichtheid die het korrelskelet in het terrein (in situ) heeft ten opzichte van de dichtheid, die het minimaal en maximaal kan krijgen. Het lijkt aannemelijk dat een zandpakket met een zekere dichtheid zich gemakkelijk en veel laat verdichten, wanneer de actuele dichtheid gering is en de maximaal mogelijke dichtheid groot is.

Hergarden gaat op grond van een literatuurstudie ervan uit dat een zandpakket zich pas verder laat verdichten wanneer het aan een grotere trillingsbelasting (drempelwaarde) wordt onderworpen, dan in het verleden ooit heeft plaatsgevonden of past bij de huidige dichtheid.

Voor het bepalen van die drempelwaarde is het beschikken over een sondering **noodzakelijk**. Door een sondering te gebruiken, die is gemaakt nadat de bevingen hebben plaatsgevonden, lijkt het erop dat daarin de invloeden van de bevingen al zijn verwerkt. Dat is inderdaad het geval, maar de invloed daarvan op de grootte van de sondeerweerstand is echter verwaarloosbaar. Door het geringe aantal belastingswisselingen tijdens bevingen is de maximale dichtheid bij het actuele spanningsniveau bij lange na niet bereikt en is de conusweerstand daardoor ook niet noemenswaardig gewijzigd. Ook niet na sommatie van het effect van alle opgetreden bevingen. Om die reden kan de drempelwaarde veilig worden bepaald uit nieuw te maken sonderingen.

3 De procedure voor het beoordelen van de verdichtingsgevoeligheid van een zandlaag.

De procedure voor het bepalen van de drempelwaarde voor de versnelling van een zandlaag, waarboven verdichting optreedt, verloopt als volgt:

- a) Identificeer de potentieel verdichtingsgevoelige zandlaag; beschouw daartoe de lagen tot een diepte van tenminste 5 m beneden het aanlegniveau; als op een diepte van bijvoorbeeld 6 m beneden het funderingsniveau een zandlaag aanwezig is, kan deze in de beschouwing worden meegenomen om elke twijfel weg te nemen.
- b) Bepaal op basis van een sondering de maatgevende conusweerstand q_c van deze zandlaag (de laagste waarde, maar > 2 MPa; bij lagere weerstanden is geen sprake van zandlagen. Laat de waarnemingen over de bovenste 0,25 m en onderste 0,15 m van de zandlaag buiten beschouwing, omdat die mogelijk zijn beïnvloed door lagere weerstanden onder en boven de zandlaag; neem als eenheid voor q_c kN/m².
- c) Bepaal de effectieve korrelspanning σ'_v van deze zandlaag uit het verschil van grondspanning – waterspanning (in kN/m²);
- d) Bepaal de verdichtingsgraad D_r van deze zandlaag volgens:
$$D_r = \frac{1}{2,91} \cdot \ln \left[\frac{q_c}{61 \cdot \sigma_v'^{0,71}} \right] \cdot 100\%$$
- e) Bepaal de drempelwaarde van de bodemversnelling in g, die tot aanvullende verdichting zal leiden volgens:
$$a_{\text{drempel}} = -0,2 \cdot \ln(1 - D_r);$$
- f) Bepaal de drempelwaarde van de trillingssnelheid in mm/s uit:
$$V_{\text{drempel}} = a_{\text{drempel}} \cdot 10000 / (2 \cdot p \cdot 5)$$
- g) Vergelijk V_{drempel} met de met de Trillingstool berekende trillingssnelheid; als die snelheid kleiner is dan V_{drempel} , dan heeft geen verdichting plaatsgevonden.

4 Voorbeeld:

Onderstaande sondering uit de Provincie Groningen wordt als voorbeeld genomen. De toepassing van bovengenoemde methode om de verdichtingsgevoeligheid en daarmee de verwekingsgevoeligheid te bepalen geldt alleen voor zandlagen; zandlagen zijn meer gevoelig voor verweking dan cohesieve lagen, zoals leem-, klei- en veenlagen.

Zandlagen zijn in het algemeen te herkennen aan een relatief grote conusweerstand (> 2 MPa). Alleen in bijzondere gevallen wordt in een zandlaag een lagere conusweerstand gemeten. Een voorbeeld van een bijzonder geval is een laag die is ontstaan door het in water storten van zand, waarna dat bezinkt en verder niet meer wordt verdicht. In natuurlijke afzettingen is de dichtheid in de praktijk altijd groter en de daarbij passende conusweerstand > 2 MPa.

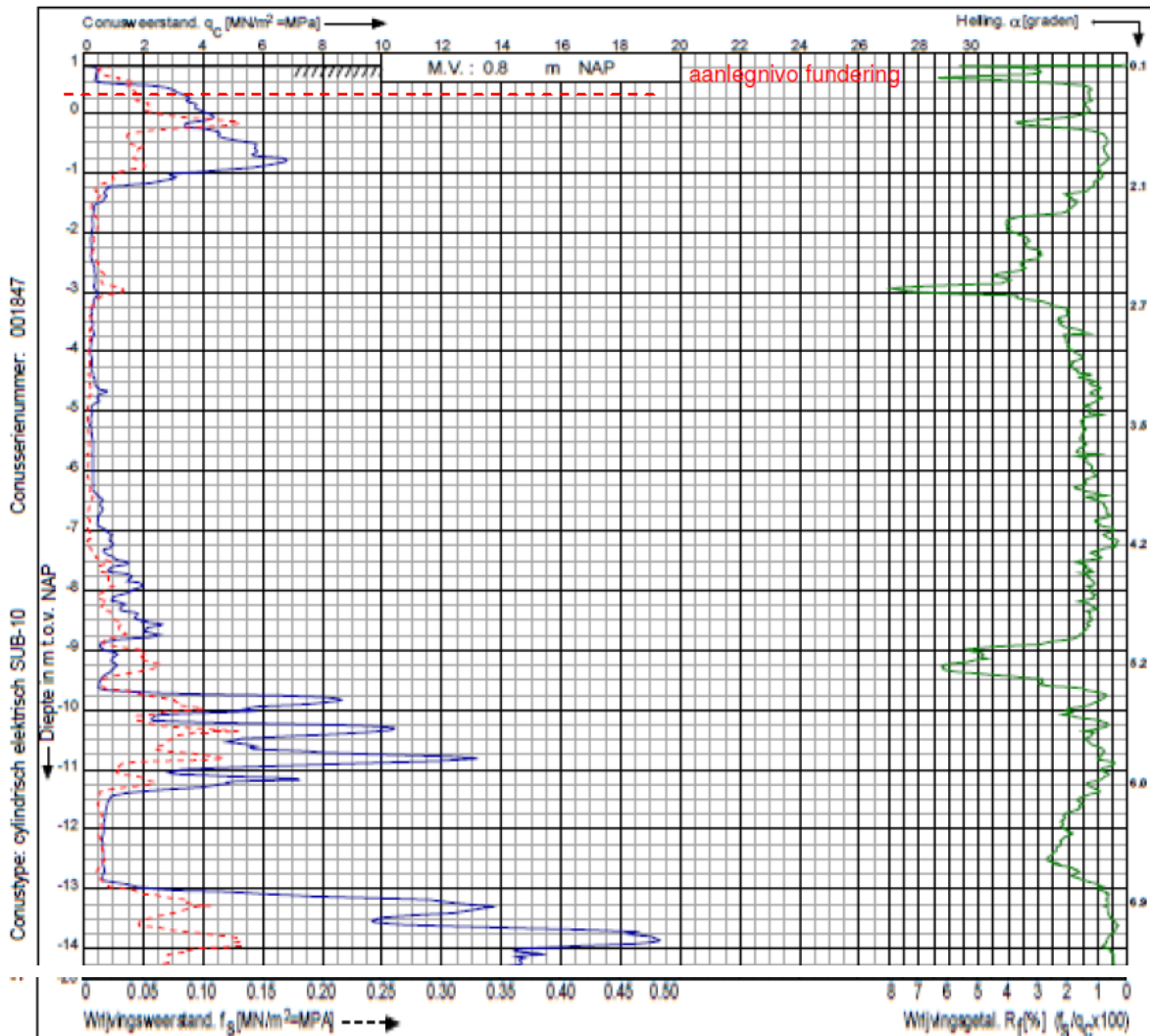
Een nuttig hulpmiddel voor het herkennen van grondsoorten is natuurlijk een (hand-)boring, maar ook het wrijvingsgetal in een sondering geeft een betrouwbaar beeld van de aanwezige grondsoort.

Het wrijvingsgetal is in figuur 3 aan de rechterzijde van de grafiek getekend. Het wrijvingsgetal is het quotiënt van de wrijvingsweerstand en de conusweerstand en wordt uitgedrukt in %. Het wrijvingsgetal is alleen toepasbaar beneden de grondwaterspiegel.

In het algemeen wordt de volgende relatie tussen wrijvingsgetal en grondsoort aangehouden:

Wrijvingsgetal(%)	Grondsoort	Gemiddeld volumegewicht in kN/m ³
0,5-1	zand	17/20 (boven/onderwater)
1-2	Leem, silt	17-16
2-5	Klei tot veenhoudende klei	16-13
5-10	Kleihoudend veen tot veen	12-10

Tabel 1 Relatie wrijvingsgetal-grondsoort



Figuur 3: Sondering te Oosterwijtwerd.

Op basis van zowel de conusweerstand als het wrijvingsgetal is sprake van de aanwezigheid van de volgende 2 zandlagen:

- NAP - 0,5 tot NAP - 1 m; het pand is op 1,5 m - maaiveld (=NAP -0,7 m) gefundeerd. De laagste weerstand in het traject NAP -0,7 m tot NAP - 1 m bevindt zich op NAP -0,7 m; deze bedraagt 5,5 MPa = 5500 kN/m²
- NAP - 8,5 m tot NAP - 9 m; het wrijvingsgetal bedraagt hier 1,5% hetgeen meer is dan 1 %, waardoor geen sprake is van cohesieloos zand en de laag ligt dieper dan 5 m, zodat deze laag

in feite om 2 redenen niet beschouwd hoeft te worden. Vanuit educatief oogpunt wordt dit toch gedaan. De conusweerstand in deze laag bedraagt op NAP – 8,5 m circa 2 MPa= 2000 kN/m².

Op grotere diepte zijn nog meer zandlagen aanwezig maar deze zijn vanwege de diepteligging niet maatgevend.

De maatgevende conusweerstand in een zandlaag moet worden bepaald binnen de volgende grenzen:

- 0,25 m beneden de bovenkant van de zandlaag;
- 0,15 m boven de onderkant van de zandlaag.

Deze grenzen zijn bepaald door alleen de gemeten conusweerstand mee te tellen, die bij toepassing van een standaard sondeerconus, niet zijn beïnvloed door de slappe lagen boven en onder de zandlaag. Aan deze eis is in beide zandlagen voldaan.

De grondopbouw ter plaatse is volgens de sondering uit figuur 3 ongeveer als volgt:

Diepte in m t.o.v. NAP	Grondsoort	Representatief laag volume-gewicht (kN/m ³)	Gesommeerde representatieve grondspanning t.p.v. onderkant laag (kN/m ²)
+0,8 tot -0,7	Zand	17	25,5
-0,7 tot -1,0	Zand (onder water)	20	31,5
-1,0 tot -1,75	Leem	16,5	43,9
-1,75 tot -2,75	Klei, venig	14	57,9
-2,75 tot -3,25	Veen	10	62,9
-3,25 tot -7	Klei-leem	16	122,9
-7 tot -8,5	Zand/silt	17	148,4

Tabel 2 Laagindeling en grondspanning ter plaatse van de sondering uit figuur 3.

Bij de bepaling van het natte volumegewicht is gekeken naar de grenzen zoals deze zijn aangegeven in tabel 1. Klei met een wrijvingsgetal van 2% heeft ongeveer een volumegewicht van 16 kN/m³, maar het volumegewicht van klei met een wrijvingsgetal van 5% zal dichterbij 13 kN/m³ liggen. Voor tussenliggende waarden kan worden geïnterpoleerd.

Nu moet voor beide lagen de korrelspanning worden bepaald uit het verschil tussen de grondspanning en de waterspanning. De waterspanning op NAP – 0,7 m bedraagt 0, zodat de korrelspanning op NAP – 0,7 m ook 25,5 kN/m² bedraagt (zie tabel 2). Voor de bepaling van de waterspanning kan een relatief lage grondwaterstand worden aangehouden (5% kans op een lagere grondwaterstand) of van het winterpeil. Het is dan niet nodig om de waterspanning te bepalen ten tijde van de bevingen.

Op een diepte van NAP – 8,5 m bedraagt de waterspanning $(8,5-0,7)*10 = 78$ kN/m².

De korrelspanning σ'_v is dan op dat niveau $148,4- 78 = 70,4$ kN/m².

Nu wordt voor beide lagen de relatieve dichtheid en de drempelwaarde bepaald. Voor de laag op NAP –0,7 m zijn deze:

$D_r = 1 / 2,91 * \ln (5500 / (61 * 25,5^{0,71})) * 100\% = 76\%$. De relatieve dichtheid is dan 76% en de bijbehorende drempelwaarde voor de versnelling:

$a_{drempel} = -0,2 * \ln (1 - 0,76) = 0,283 \text{ g}$. Deze drempelwaarde is om te rekenen naar mm/s volgens:

$V_{drempel} = a_{drempel} * 10000 / (2 * \pi * 5)$ ofwel $V_{drempel} = 0,283 * 10000 / (2 * 3,141 * 5) = 90 \text{ mm/s}$.

In de onderhavige case betekent dit dat in de beschouwde zandlaag geen verdichting is te verwachten bij een trillingssnelheid v (1% kans op overschrijden) kleiner dan 90 mm/s.

Was hier een 10% lagere korrelspanning berekend, dan was de berekende relatieve dichtheid 78% geweest, $v_{drempel} = 0,30$ en de bijbehorende trillingssnelheid 96 mm/s. Bij een 10% hogere korrelspanning was deze trillingssnelheid 84 mm/s geweest. Om die reden wordt, gegeven een conusweerstand, uitgegaan van een relatief hoge korrelspanning en daarmee een lage waterstand.

Eenzelfde berekening wordt gemaakt voor de zandlaag op NAP – 8,5 m. De relatieve dichtheid is dan:

$D_r = 1 / 2,91 * \ln (2000 / (61 * 70,4^{0,71})) * 100\% = 16\%$. Dit is lager dan de eerder genoemde 20%, die voor een op natuurlijke wijze afgezet zand niet lager is, zodat geconcludeerd kan worden dat het hier niet om een zandlaag gaat en deze dus niet verdichtingsgevoelig is. Het wrijvingsgetal wees daar ook al op, want deze was $> 1,0\%$.

Het toepassen van een aanvullende veiligheidsfactor op de bepaalde drempelwaarde is niet nodig, indien van een relatief lage grondwaterspiegel en gemiddelde volumegewichten wordt uitgegaan (zie tabel 1), terwijl de drempelwaarde wordt getoetst aan de 1% trillingssnelheid van de Trillingstool.