



Rapport

werknr.: **20146258**
project: **GRONINGEN; toetsing Nieuwbouwregeling**
betreft: **onderzoek**

onderdeel **Aardbevingsrisico mestsilo's**

onderdeel

opdrachtgever

Nederlandse Aardolie Maatschappij b.v.
Postbus 28000
9400 HH Assen

onderzoek door

ing. R.J.F. Scheltinga

geredigeerd door

ing. B.A. Grimberg

goedgekeurd door

ing. H. Kerssies

datum

9 april 2015 (a) / 23 april 2015 (b)

rapport

R01(b)

revisie

-

status

definitief

Goudstikker - de Vries
is gevestigd in

Almere
Assen
Delft
Emmen
's-Hertogenbosch
Sneek

www.goudstikker.nl

R01(a) - Aardbevingsrisico mestsilo's - 23 april 2015





Inhoud

1	Inleiding	2
1.1	Achtergrond.....	2
1.2	Afbakening	2
1.3	Leeswijzer	2
2	Randvoorwaarden en uitgangspunten	3
2.1	Algemeen	3
2.2	Informatiebronnen	3
2.3	Normen en richtlijnen	3
3	Mestsilo's	5
3.1	Kenmerken constructie.....	5
3.2	Checklist aardbevingsrisico's.....	5
4	Mestbelasting	7
4.1	Mestsoorten	7
4.2	Viscositeit	7
5	Bevingbelasting	9
5.1	Piekgrondversnelling	9
5.2	Berekeningsmethoden.....	10
6	Sloshing	14
6.1	Algemeen	14
6.2	Analyse van de belastingen.....	15
7	Lateral Force Method	18
7.1	Stappenplan	18
7.2	Noodzaak van overhoogte.....	19
8	Non-lineaire methode	19
8.1	Stappenplan	20
9	Plooi bij stalen silo's	20
10	Fundering	21
10.1	Algemeen	21
10.2	Verweking	21
11	Geraadpleegde literatuur	23
11.1	Voorschriften en richtlijnen	23
11.2	Literatuur	23
11.3	Internet.....	24
12	Samenvatting en conclusies	25
	DISCLAIMER	25



1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In de provincie Groningen hebben zich in de afgelopen tien jaar zeven aardbevingen voorgedaan met een sterkte van 3 of hoger op de schaal van Richter. In dit gebied zijn veel agrarische bedrijven gevestigd. Voor de mestopslag bij deze bedrijven wordt in de meeste gevallen een bovengrondse mestsilo toegepast.

Op verzoek van de NAM hebben wij een onderzoek gedaan naar risico's van aardbevingen ten gevolge van gaswinning specifiek voor mestsilo's en aanbevelingen te doen over een te volgen rekenmethodiek.

1.2 Afbakening

Het onderhavige onderzoeksrapport omvat de resultaten op basis van een literatuurstudie naar de effecten van een aardbeving op bovengrondse mestsilo's, waarbij aan de hand van een kwalitatieve en specifieke risicoanalyse (sloshing) een prioritering en een selectie van de nader uit te werken onderdelen met de grootste risico's van falen kan worden gemaakt.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zijn de randvoorwaarden en de uitgangspunten voor de toetsing op belasting uit bevingen aangegeven. In hoofdstuk 3, 4 en 5 zijn de kenmerken van de types mestsilo's en de specifieke eigenschappen van mestbelasting respectievelijk bevingbelasting beschreven. Onder hoofdstuk 6 wordt het specifieke gevolg van een beving op vloeistoffen (sloshing) uitgebreid toegelicht. In hoofdstuk 7 en 8 zijn de mogelijke methoden van berekenen opgenomen. Hoofdstuk 9 gaat specifiek in op het risico van plooi bij dunwandige stalen mestsilo's. In Hoofdstuk 10 wordt het risico van verweking van de ondergrond (fundering) aangegeven.



2 Randvoorwaarden en uitgangspunten

2.1 Algemeen

In dit hoofdstuk zijn de randvoorwaarden en uitgangspunten opgenomen die voor de kwalitatieve risicoanalyse met betrekking tot aardbevingseffecten voor mestsilo's zijn gehanteerd.

2.2 Informatiebronnen

In Hoofdstuk 10 is een uitgebreide literatuurlijst opgenomen die betrekking heeft op het specifieke aardbevingsonderzoek ten aanzien van mestsilo's.

2.3 Normen en richtlijnen

In het kader van de Europese eenwording en onderlinge aansluiting van de verschillende ontwerpmethoden van de verschillende EU-lidstaten zijn de Eurocodes 0 t/m 8 van toepassing conform Bouwbesluit 2012, aangevuld met de normen uit de NEN 8700 serie voor bestaande bouw.

Het aardbevingsonderzoek is uitgevoerd binnen het kader van Eurocode 8. Hierbij is op dit moment nog geen Nationale Bijlage beschikbaar. Momenteel is hiervoor de Nationale Praktijkrichtlijn NPR 9998 in ontwikkeling (die de status van richtlijn zal gaan dragen).

De uitgangspunten voor de te hanteren belastingen en rekenmethodieken zijn vastgelegd in Eurocode 8.

NEN-EN 1998-1:2005 + C1:2009 + A1:2013

Eurocode 8 - Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies
Deel 1: Algemene regels, seismische belastingen en regels voor gebouwen
Verder in dit rapport te noemen: **EC8-1**

NEN-EN 1998-4:2007

Eurocode 8 - Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies
Deel 4: Silo's, opslagtanks en pijpleidingen
Verder in dit rapport te noemen: **EC8-4**

NEN-EN 1998-5:2005

Eurocode 8 - Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies
Deel 5: Funderingen, grondkerende constructies en geotechnische aspecten
Verder in dit rapport te noemen: **EC8-5**

Tevens wordt gehanteerd de door de NEN uitgegeven MEMO "Voorlopige uitgangspunten voor nieuwbouw en verbouw onder aardbevingsbelasting ten gevolge van gaswinning in het Groningenveld" d.d. 15 mei 2014 (revisie 1, 23 mei 2014) die de status heeft van informatief document. Voor beoordeling van nieuwbouw en verbouw zal voor de interim periode tot het uitkomen van de NPR het advies gelden Eurocode 8 (NEN-EN 1998-serie) toe te passen waarbij voor de noodzakelijke input NDP's (Nationally Determined Parameters) kan worden uitgegaan van waarden uit het memo. Verder in dit rapport te noemen: **Memo**



Addendum

Ten tijde van de totstandkoming van dit rapport is de Ontwerp NPR 9998:2015 (februari 2015) gepubliceerd, vooruitlopend op de publicatie van de nationale bijlagen van de afzonderlijke delen van de NEN-EN 1998-serie (Eurocode 8) en met de vermelding "Publicatie uitsluitend voor commentaar".

EZ (ministerie van Economische Zaken) heeft onlangs aan NAM aangegeven (ons bekend 11 maart 2015) dat de NPR 9998 toegepast dient te worden bij het berekenen van aardbevingsbelastingen en het ontwerpen van aardbevingbestendige gebouwconstructies. Hiermee is het Memo "Voorlopige ontwerpuitgangspunten voor nieuwbouw en verbouw onder aardbevingsbelasting ten gevolge van de gaswinning in het Groningenveld" d.d. 15 mei 2014 (revisie 1, 23 mei 2014) dus komen te vervallen.

In dit rapport zijn de wijzigingen als gevolg hiervan nog niet integraal verwerkt en voor zover relevant is een toevoeging in cursief geplaatst onder de kop 'NPR 9998'.



3 Mestsilo's

3.1 Kenmerken constructie

Er zijn in hoofdzaak drie types mestsilo's te onderscheiden:

- prefab betonsilo's
- foliesilo's
- stalen mestsilo's

In hoofdzaak worden prefab betonsilo's toegepast. De hoogte van dit type mestsilo is tot 7 meter. De inhoud varieert tot maximaal circa 5.600 m³ en is sterk afhankelijk van de leverancier. Deze betonsilo's worden over het algemeen op staal gefundeerd.

De foliesilo's hebben een geringere hoogte (circa 3 meter) en worden zonder betonvloer of fundering gebouwd. De folie kan op verschillende manieren worden afgesteund:

- door gaasmatten versterkt met een stalen profiel aan de onder- en bovenzijde;
- gesteund door stalen golfplaten (golfplaatsilo).

De inhoud varieert tot maximaal circa 2.500 m³ en is sterk afhankelijk van de leverancier.

De stalen mestsilo's hebben een hoogte tot circa 5,5 meter en een inhoud tot circa 3.000 m³. De silo's worden op verschillende manieren uitgevoerd:

- voorzien van een binnenbekleding van zware kunststof uitgevoerd in PVC, LDPE of EPDM folie;
- opgebouwd met geëmailleerde en onderling aan elkaar geboute staalplaten, waarvan de naden worden afgedicht met elastisch blijvende twee componentenkit.

De berekening van de mesthoogte ten gevolge van een beving en de berekening van de horizontale belasting ten gevolge van deze beving, zijn voor alle types hetzelfde.

3.2 Checklist aardbevingsrisico's

Uitgaande van de algemene uitgangspunten voor bouwen in bevinggevoelig gebied hebben wij een inhoudelijke quickscan van de constructie van mestsilo's als zijnde een gebouw gemaakt.

De resultaten van deze quickscan zijn hieronder weergegeven.

1. Constructieve eenvoud
 - 1.1 draagstructuur: **helder**
 - 1.2 wanden boven elkaar doorgestapeld: **niet van toepassing**
 - 1.3 puntvormige ondersteuning onder wandschijven op hoger gelegen verdiepingen: **niet van toepassing**
 - 1.4 gevelopeningen: **niet van toepassing**
 - 1.5 bouwmethode en materialisatie: **beproefd**
2. Symmetrie
 - 2.1 symmetrisch ontwerp horizontaal: **ja**



- 2.2 symmetrisch ontwerp verticaal: **ja**

- 3. Gelijkmatige stijfheidverdeling
 - 3.1 gelijkmatig geplaatst: **ja**
 - 3.2 symmetrisch geplaatst: **ja**

- 4. Gelijkmatige massaverdeling
 - 4.1 massa laag in het gebouw: **neutraal**
 - 4.2 lichte bouwmaterialen: **nee (bij betonsilo's), ja (bij foliesilo's)**
 - 4.3 lichte kap: **ja (PVC spankap)**
 - 4.4 lichte zoldervloer: **niet van toepassing**

- 5. Torsiestijfheid
 - 5.1 voldoende en evenveel wandlengte (is stijfheid) aanwezig: **ja**

- 6. Schijfwerking op elk niveau
 - 6.1 tussenvloeren met schijfwerking: **niet van toepassing**
 - 6.2 schijfwerking aan bovenzijde gebouw: **nee**

- 7. Goede fundering
 - 7.1 paalfundering met in het werk gestorte funderingsbalken: **nee, in het algemeen niet**
 - 7.2 rekening gehouden met vermindering draagvermogen ten gevolge van verweking: **noodzakelijk** (voor risico van verweken van funderingen (zowel bij funderingen op palen als bij funderingen op staal) zie hoofdstuk 8)

NPR 9998

Conform NPR 9998 bijlage E (Criterium voor verweking zand), § E.2 zijn er nog geen praktische rekenregels om de invloed van een gebouw op staal op de verwekingsgevoeligheid mee te nemen. In afwezigheid daarvan kan voorlopig voor het bepalen van de verwekingsgevoeligheid het effect daarvan worden genegeerd.



4 Mestbelasting

4.1 Mestsoorten

Mestsilo's worden gevuld met drijfmest. Afhankelijk van de mestsoort zijn verschillende waarden van toepassing voor het soortelijk gewicht en het percentage droge stof.

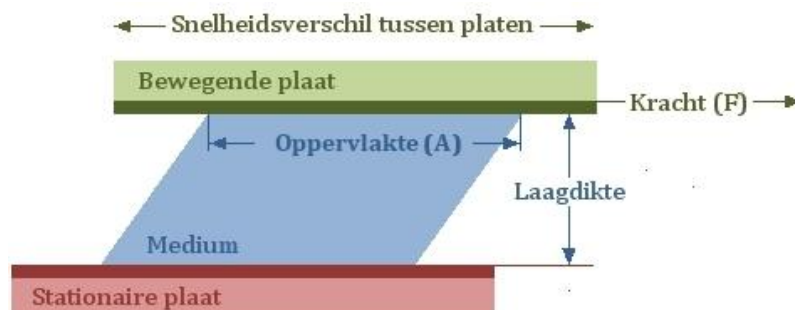
Mestsoort	soortelijk gewicht [kg/m ³]	soortelijk gewicht [kN/m ²]	percentage droge stof [%]
Rundveedrijfmest	1005	10,05	8,6
Vleesvarkensdrijfmest	1040	10,40	9,0
Rundveegier	1030	10,30	2,5
Varkensgier	1010	10,10	2,0

Tabel 1 - mestsoorten

4.2 Viscositeit

Drijfmest bezit net als water een dynamische viscositeit. Viscositeit wordt gedefinieerd als de mate van weerstand die een fluïdum biedt tegen een vervorming door schuifspanning. Eenvoudig gezegd is viscositeit de stroperigheid van een vloeistof. Hoe stroperiger de vloeistof hoe hoger de viscositeit. Zo heeft bijvoorbeeld water een lage viscositeit terwijl ketchup een hoge viscositeit heeft.

Ter verduidelijking: tussen twee denkbeeldige evenwijdige platen bevindt zich een vloeistof. De afstand tussen de platen is de laagdikte dy . Als er een kracht F op de bovenste plaat wordt uitgeoefend, dan zal deze met een bepaalde snelheid dv gaan bewegen. Deze snelheid is afhankelijk van de viscositeit van de vloeistof (het medium) en het contact oppervlak A .



Figuur 1 - viscositeit fluïdum

$$\text{Afschuifspanning} = \frac{\text{Kracht}}{\text{Oppervlakte}} = \frac{F}{A} = \frac{[\text{N}]}{[\text{m}^2]} = [\text{Pa}]$$



$$\text{Afschuifsnelheid} = \frac{\text{Snelheidsverschil}}{\text{Laagdikte}} = \frac{dv}{dy} \quad \frac{[1]}{[s]}$$

$$\text{Viscositeit} = \frac{\text{Afschuifspanning}}{\text{Afschuifsnelheid}} = [\text{Pa.s}]$$

De eenheid voor dynamische viscositeit volgens het SI-stelsel is Pa.s (Pascal.seconde). Lage viscositeiten worden uitgedrukt in mPa.s (1000 mPa.s = 1 Pa.s). Afhankelijk van de toepassing kan de viscositeit volgens verschillende methodes (en met verschillende apparatuur) bepaald worden.

De dynamische viscositeit van drijfmest is afhankelijk van de volgende factoren:

- soortelijke massa van het drijfmestmengsel
- percentage vaste stoffen
- temperatuur van het mengsel
- afschuifsnelheid (zie boven)

Uitgaand van een gemiddeld drijfmestmengsel (melkvee) kan afhankelijk van de temperatuur een dynamische viscositeit volgens Tabel 2 worden aangehouden, waarbij de volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

- soortelijke massa drijfmestmengsel: 1035 kg/m³
- percentage vaste stoffen: 9,0 %
- afschuifsnelheid: 142,9 1/s

Temperatuur [°C]	Dynamische viscositeit [Pa.s]
10	1,08
20	0,85
30	0,70
40	0,63
50	0,49

Tabel 2 - Viscositeit gemiddeld drijfmestmengsel (melkvee)

Hieruit blijkt dat drijfmestmengsel de viscositeiteigenschappen bezit van een plastisch mengsel.

Ter vergelijking is in Tabel 3 een overzicht opgenomen van de dynamische viscositeit van een aantal verschillende vloeistoffen .

Vloeistof	Dynamische viscositeit [Pa.s]
Water van 20° C	1,00
Olijfolie	10,00
Verf	100,00
Glycerol	1480,00

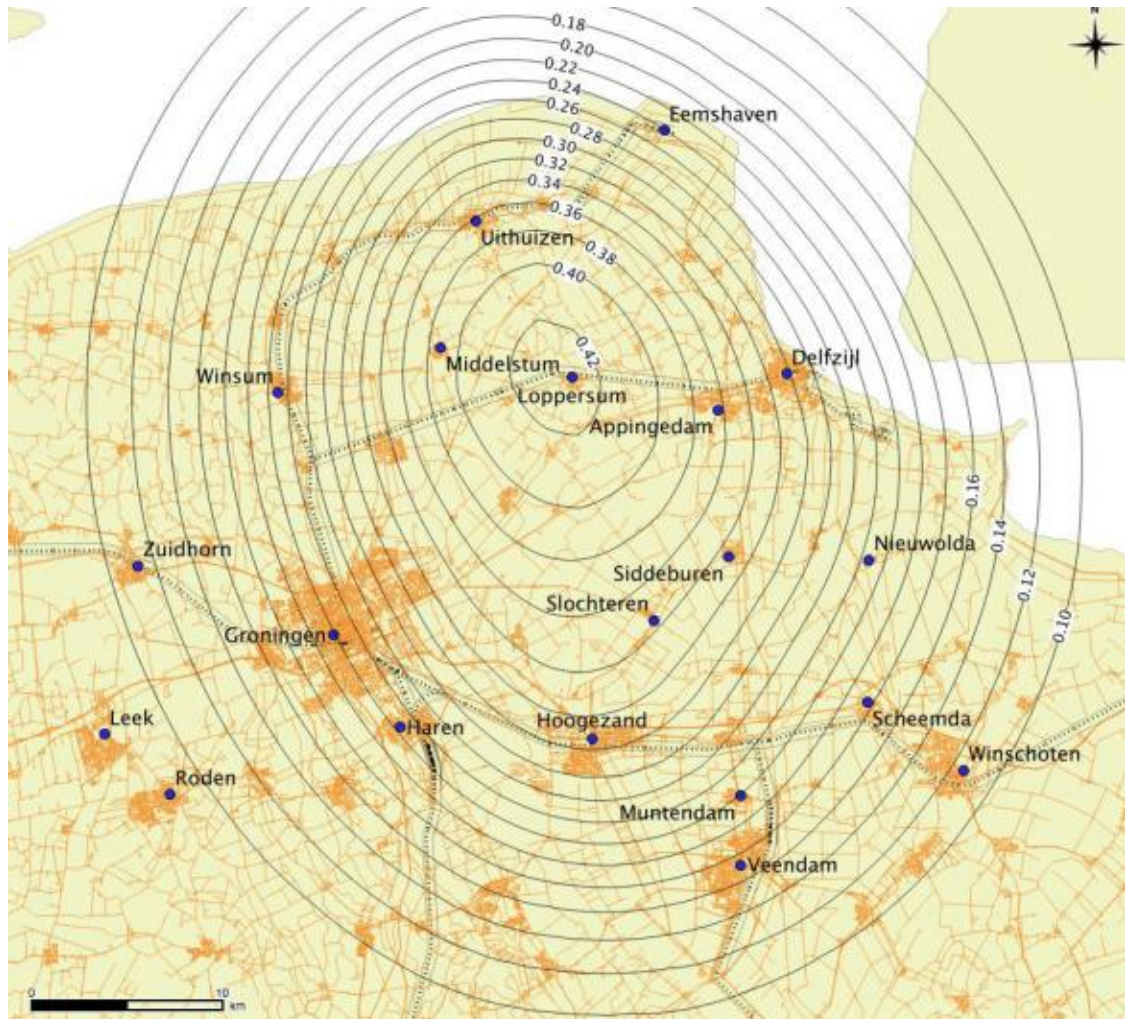
Tabel 2 - Viscositeit verschillende vloeistoffen



5 Bevingbelasting

5.1 Piekgrondversnelling

De bevingbelasting (horizontale krachten uit aardbevingen) dient te worden berekend op basis van de PGA (= piekgrondversnelling). De PGA waarde is afhankelijk van de locatie en varieert voor nieuwbouw van 0,10g t/m 0,42g volgens Figuur 2.



Figuur 2 - Piekgrondversnelling afhankelijk van de locatie (Bron: Memo)

De grootte van de bevingbelasting op mestsilo's wordt beïnvloed door:

- bodemgesteldheid
- interactie mestsilo-ondergrond
- massa en massaverdeling
- stijfheid en stijfheidverdeling
- mate waarin vervorming van de constructie mogelijk is (ductiliteit)



5.2 Berekeningsmethoden

Berekeningen dienen te worden gebaseerd op EC8-1, EC8-4, EC8-5 en (met de status van advies) het Memo. In EC8 worden drie methodes aangegeven om de bevingbelasting te berekenen:

- 1) Lateral force methode of analysis (EC8: § 4.3.3.2)
- 2) Modal response spectrum analysis (EC8: § 4.3.3.3)
- 3) Non-linear methods (EC8: § 4.3.3.4)

1) *Lateral force method of analysis*

De Lateral force method of analysis (LFM) is de minst complexe methode en voldoende voor de bepalen van de bevingbelasting op mestsilo's. De LFM is een "zijdelingse belasting methode" en is gebaseerd op een 1-massa-veer-demper-systeem. Hierbij dient het zwaartepunt van de massa bepaald te worden en aan de hand daarvan wordt een buigend moment uit de horizontaal kracht ten gevolge van de aardbeving berekend.

De uitgangspunten en te hanteren waarden voor toepassing van deze methode worden aangegeven in EC8-1, EC8-4 en de Memo.

Indien de LFM wordt toegepast, moet de constructie voldoen aan de uitgangspunten zoals beschreven in EC8-1, EC8-4 en de Memo:

- symmetrie in de plattegrond
- symmetrie in de hoogte
- ongevoelig voor torsie in elk van de twee hoofdrichtingen
- constante verdiepinghoogte (al of niet gesimuleerd)

Ronde mestsilo's voldoen aan deze uitgangspunten, met de volgende toevoeging:

- geheel of gedeeltelijk verankerd aan de fundering (EC8-4, Annex A, paragraaf A.1)

Bij de methode LFM volstaat de soortelijke massa van mest als uitgangspunt voor de berekening en zijn geen gegevens van de viscositeit vereist.

2) *Response Spectrum method*

Deze berekening is een quasi statische analyse met de volgende kenmerken:

- 90% van de massa activeren (bepaalt het aantal uitbuigingvormen dat meegerekend moet worden)
- horizontaal spectrum
- verticaal spectrum
- massa

Deze methode dient met specifieke software te worden uitgevoerd: software van AxisVM, Abacus of Scia Engineer.



3a) Pushover Method (Non-lineair method)

De pushover analyse is een fysisch en geometrisch niet-lineaire statische analyse uitgevoerd onder de voorwaarden van een constante zwaartekracht belasting en een constant toenemende horizontale belasting.

Volgens EC8-11 kan de pushover analyse toegepast worden om:

- om de overstrenght ratio values α_v / α_l te bepalen
- om de locatie van plastische mechanismen en constructieve schade in te schatten
- om de constructieve prestaties van bestaande of verbouwde gebouwen te beoordelen voor de toepassing van NEN-EN 1998-3
- als alternatief voor de 'Lateral Force method' (de gedragsfactor q in combinatie met een elastisch ontwerp)

Wanneer de pushover berekening (geen gebruik van een verhoogde q) als alternatief wordt gebruikt voor de 'Lateral Force method' heeft dit als 'voordeel' dat de constructie niet behoeft te voldoen aan de detailleringsregels zoals beschreven in de NEN-EN 1998-1:2004.

De constructie kan worden gedimensioneerd en uitgewerkt conform de detailleringregels zoals in de verschillende materiaalgebonden EN-normen beschreven.

Het rekenen met de 'Pushover Method' kost meer tijd dan de 'lateral Force Method'. Ook vraagt de 'Pushover Method' veel kennis van de te berekenen en te modelleren constructie (gedrag, sterkte en stijfheid). De uitkomsten zijn sterk afhankelijk van een juiste modellering. De 'Pushover Method' kan hierdoor gevoelig zijn voor foute uitkomsten.

3b) Dynamische tijdsdomein berekening (Non-lineair method)

Als alternatieve methode kan de "Dynamische tijdsdomein berekening" (niet-lineair dynamisch) worden toegepast.

Deze methode dient met specifieke software te worden gemaakt en kenmerkt zich door:

- een berekening over de tijd
- de werkelijke of verschaalde versnellingen / verplaatsingen van een aardbeving op de fundering van een 2D of 3D model
- trillingen in drie richtingen
- elastisch en plastisch-elastisch en plastisch
- gebruik van materiaal schademodelen

De viscositeit van drijfmest is een vereiste bij gebruik van een 3-D rekenprogramma met een dynamische rekenmodule.



Grenstoestanden

In EC8-1 worden drie grenstoestanden onderscheiden:

1. Near Collapse (NC): de bouwconstructie staat op instorten maar stort niet in
2. Significant Damage (SD): significante beschadiging
3. Damage Limitation (DL): schade beperking

De grenstoestand NC dient te allen tijde te worden beschouwd terwijl de toestanden SD en DL optioneel kunnen worden beschouwd. Bij een berekening conform EC8-1, EC8-4 en de Memo kan met de grenstoestand NC worden volstaan.

Ductiliteit

Ductiliteit of vervormbaarheid is de mate waarin een materiaal plastische vervorming toelaat. De mate van ductiliteit is gecategoriseerd in EC8-1 in ductiliteitsklassen.

Hierin zijn de volgende categorieën onderscheiden:

DCL:	lage ductiliteit
DCM:	medium ductiliteit
DCL:	hoge ductiliteit

Bij een constructie die valt in DCL (lage ductiliteit) zullen geringere verplaatsingen toelaatbaar zijn dan voor een constructie in DCM of DCH alvorens te bezwijken.

De materiaalkeuze voor de hoofddraagconstructie, de ductiliteitsklasse en het constructietype bepalen welke gedragsfactor (q) gehanteerd dient te worden. De ductiliteitsklassen zijn daarmee gerelateerd aan de gedragsfactor q . Een hogere ductiliteitsklasse zal leiden tot een hogere gedragsfactor.

De gedragsfactor (q) beïnvloedt de hoogte van de piek van het elastisch respons spectrum. Er geldt: hoe hoger de gedragsfactor, hoe lager de piek van het spectrum, hoe lager de bevingbelasting.

De hoogste gedragsfactor wordt verkregen door een combinatie van de volgende eigenschappen:

1. Een hoofddraagconstructie met veel vervormingcapaciteit
2. Een evenredige hoogte verdeling van verdiepingen
3. De keuze voor een ductiel materiaal (materiaal met een hoge ductiliteit)

De te hanteren waarden voor de gedragsfactor q kunnen worden verkregen vanuit EC8-1 en EC8-4 (opmerkingen bij tabellen gedragsfactoren) of vanuit een pushover berekening.

Bij toepassing van de LFM zullen de waarden in EC8-4 afdoende zijn.



Gevolgklasse

Mestsilo's worden geclassificeerd in gevolgklasse CC1a
 $\gamma_I = 0,9$ (Memo)

PGA = 0,1g t/m 0,42g (volgens Figuur 2)

$g = 10 \text{ m/s}^2$

$a_{g;ref} = \text{PGA} \cdot g \text{ [m/s}^2\text{]}$

rekenwaarde voor de piekgrondversnelling $a_g = a_{g;ref} \cdot \gamma_I \text{ [m/s}^2\text{]}$

Gedragsfactor

Mestsilo's staan in het algemeen rechtstreeks op de ondergrond (zonder fundering of met een betonplaat als fundering bij betonsilo's).

Voor de gedragsfactor q mag voor mestsilo's als ondergrens de waarde 1,5 worden aangehouden en de ductiliteitsklasse DCL (volgens EC8-4 § 3.4.a(2)).

Een hogere ductiliteit heeft een gunstig effect op het elastisch respons spectrum en geeft een lagere belasting ten gevolge van aardbevingen.

Merkwaardig genoeg wordt voor de gedragsfactor q in de Eurocode op voorhand geen onderscheid gemaakt in het type silo.

Met behulp van een pushover berekening is het mogelijk om, afhankelijk van het type mestsilo, de werkelijke, wellicht hogere gedragsfactor q te bepalen. Echter een lagere waarde dan $q = 1,5$ hoeft in geen geval te worden aangehouden ¹⁾.

Bij ductiliteitsklasse DCL dient voor de materiaaleigenschappen, diktes en detaillering EC-8-1 (sectie 5 t/m 7) te worden aangehouden.

¹⁾ volgens EC-4, § 4.4, lid (3)P en Annex A § A.2.1.6 dient in afwijking hierop voor het convectieve deel van de belasting door vloeistof (sloshing) altijd een (ongunstiger) waarde $q = 1,0$ te worden aangehouden. Hetgeen begrijpelijk is omdat de (extra) belasting ten gevolge van sloshing niet materiaal afhankelijk is.



6 Sloshing

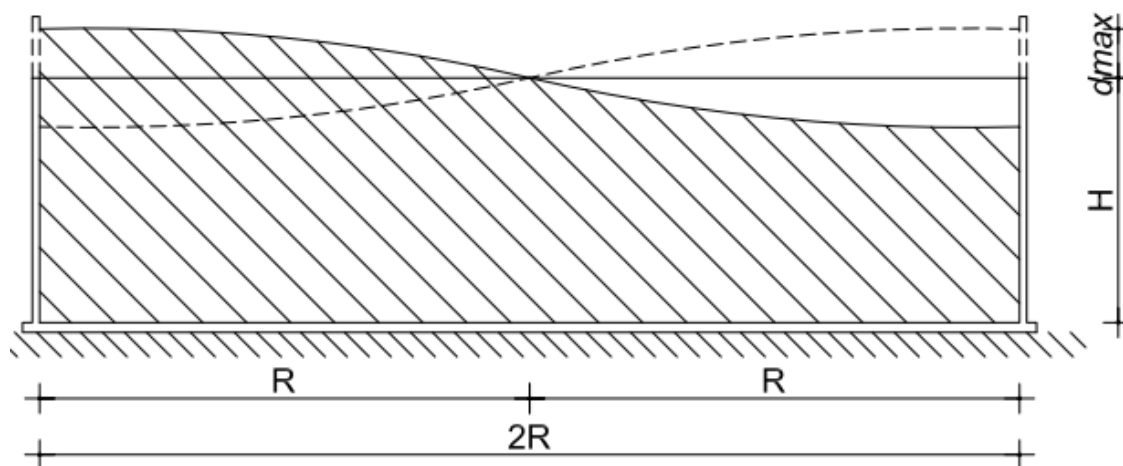
6.1 Algemeen

Sloshing (klotsen) betekent elke beweging van het vrije vloeistofoppervlak in, dit geval van de vloeistof in de silo. Sloshing ontstaat door een aardbeving.

Door de PGA (grondversnelling) ten gevolge van een aardbeving ontstaat een golfbeweging in de drijfmest. Deze golf levert een waarde d_{max} tegen de silowand. Door de hoogte $+d_{max}$ en $-d_{max}$ ontstaat niveauverschil in het mestoppervlak.

Dit geeft de volgende consequenties (zie Figuur 3):

- toename respectievelijk afname van de wanddruk door statische belasting van de mestdruk afhankelijk van de plaats op de omtrek van de wand
- aan de hoge zijde extra belasting ten gevolge van de dynamische belasting van de mestdruk afhankelijk van de plaats op de omtrek van de wand
- bij een hoge d_{max} is het mogelijk dat de mest over de silorand stroomt bij een gevulde silo



Figuur 3 - gevolgen golfbeweging door sloshing

6.2 Analyse van de belastingen

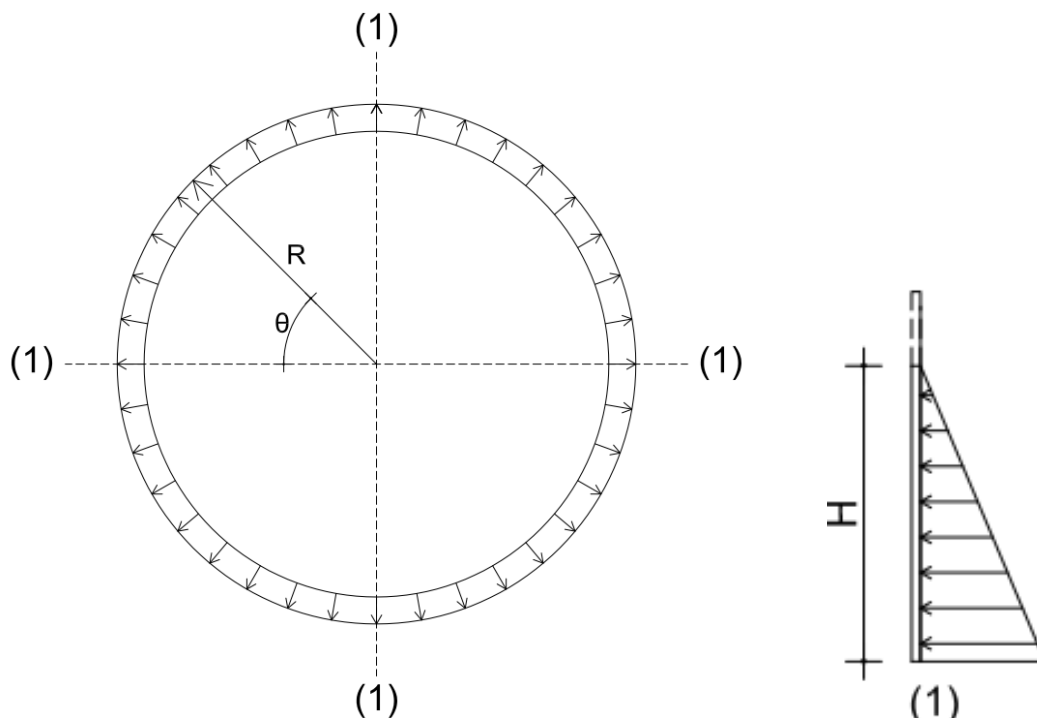
Voor het berekenen van de wanden een mestsilo op aardbevingsbelasting diene de volgende waarden te worden bepaald:

- Hydrostatische drukverdeling op de wanden van de silo (zie Figuur 4)
- Hydrodynamische drukverdeling op de wanden van de silo aan de hoge zijde van de slosh (zie Figuur 5)
- Krachten en momenten ten gevolge van deze hydrostatische en dynamische drukverdeling

De hydrodynamische druk heeft twee componenten:

- Impulsief: recht evenredig met de versnelling van de silo, de drijfmest beweegt met dezelfde snelheid als de silo, op tijdstip T_{imp} (EC8-4 § A.3.2.2.1)
- Convectief: vertegenwoordigt de "slosh" ofwel de beweging van het vrije vloeistofoppervlak, op tijdstip T_{con} (EC8-4 § A.3.2.2.1)

Door de hoogte verschillen t.g.v. $+d_{max}$ en $-d_{max}$ neemt de hydrodynamische druk op de wand aan de hoge zijde van de verplaatsing toe en neemt de druk aan de lage zijde van de verplaatsing af. Hierdoor ontstaat er een extra horizontale kracht die door het belaste wanddeel en de silo in zijn geheel dient te worden opgenomen.

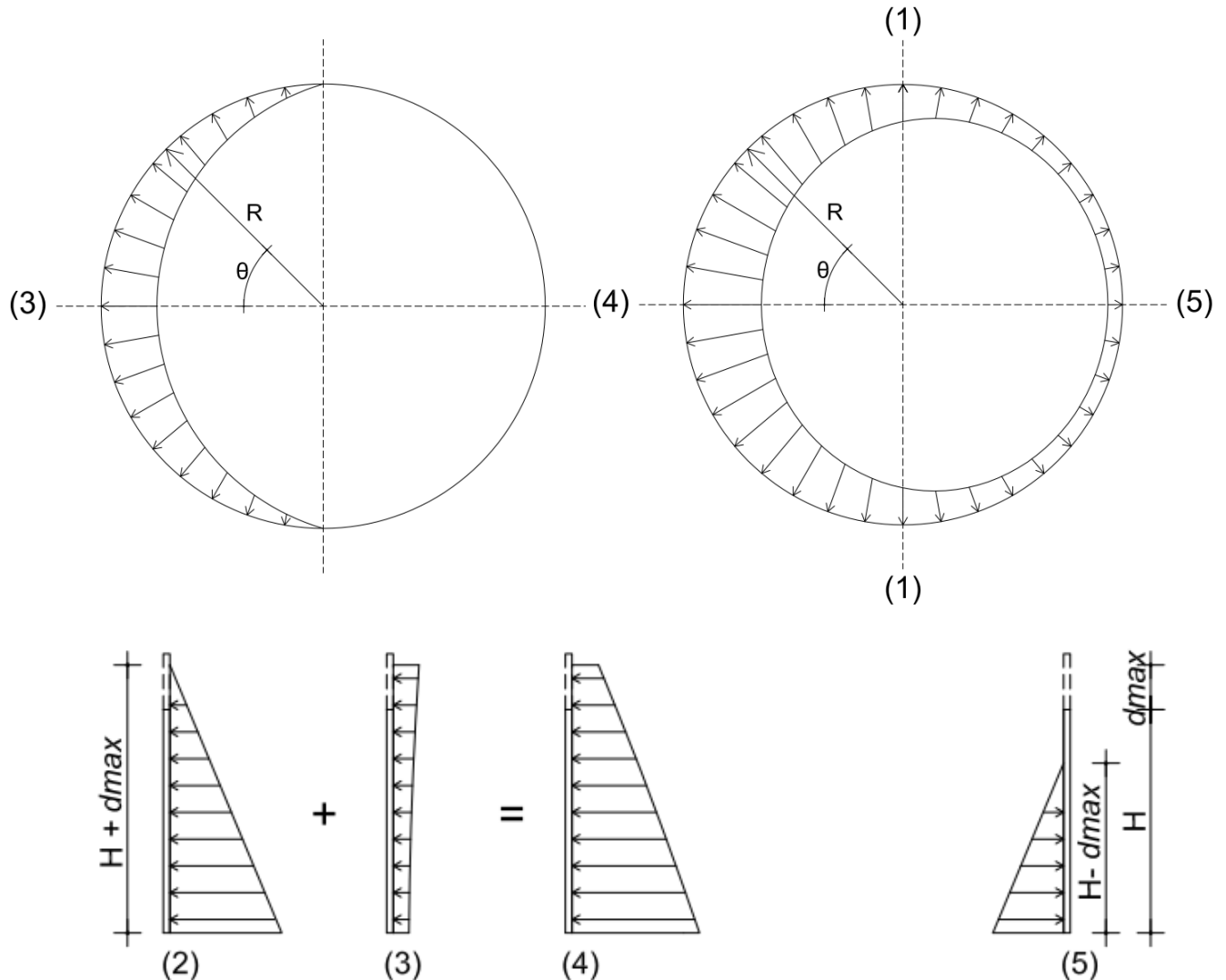


Figuur 4 - statische belasting (wanddruk) door mest bij een hoogte H

Bij silo's zonder bevingbelasting is de statische druk op de wanden over de gehele cirkelomtrek gelijk (zie figuur 4).



Het gevolg van sloshing is een verandering van de statische en dynamische druk op de wanden. Hierdoor wordt de silo niet meer symmetrisch belast en treden er verschillende en grotere momenten op in de silowand.



Figuur 5 - statische en dynamische belasting (wanddruk) door mest bij een hoogte H

- (1) statische wanddruk door mest bij een hoogte H
- (2) statische wanddruk door mest bij een hoogte $H + d_{max}$
- (3) dynamische wanddruk bij een straal R en een hoogte $H + d_{max}$
- (4) statische wanddruk + dynamische wanddruk = (2) + (3)
- (5) statische wanddruk door mest bij een hoogte $H - d_{max}$

Door de cirkelvorm van silo's neemt de maximale druk ten gevolge van de dynamische wanddruk af naar rato van de hoek θ met een factor $R \cdot \cos \theta$. Verticaal is de dynamische druk niet lineair, zie (4).

De huidige mestsilo's zijn op deze toename van belasting en op de ongelijkmatige wanddruk niet berekend..



De maximale verticale verplaatsing d_{max} (in m) ten gevolge van sloshing van de vloeistof wordt bepaald volgens EC8-4 § A.2.1.4:

$$d_{max} = 0,837 \cdot R \cdot S_a$$

R = straal silo in m¹

S_a = $S_{e(T)}/g$ = elastic response spectra (zie EC8-1, EC8-4 en de Memo)

Toetsing van de aardbevingsbelasting

Belastinggevallen

Voor mestsilo's welke voldoen aan de voorwaarden van de LFM dienen de volgende standaard belastinggevallen te worden beschouwd:

- BG1 Permanent
- BG2a Aardbeving NC (mestsilo vol, inclusief dynamische belasting)
- BG2b Aardbeving NC (mestsilo leeg)

Hierbij is het belastinggeval wind verwaarloosd. Conform EC8-1/EC-4/Memo kan worden volstaan met een beschouwing van de grenstoestand NC (Near Collapse).

Belastingcombinaties

Bovenstaande belastinggevallen dienen gecombineerd te worden tot de volgende belastingcombinaties:

- BC1 1,0 • BG1 + 1,0 • BG2a
- BC2 1,0 • BG1 + 1,0 • BG2b

Uiteraard zijn deze belastingen in alle richtingen van een cirkelvormige silo hetzelfde.



7 Lateral Force Method

7.1 Stappenplan

Voor de berekening van de aardbevingsbelasting op basis van de Lateral Force Method volgens EC8-1, EC8-4, en de Memo moeten de volgende stappen worden doorlopen:

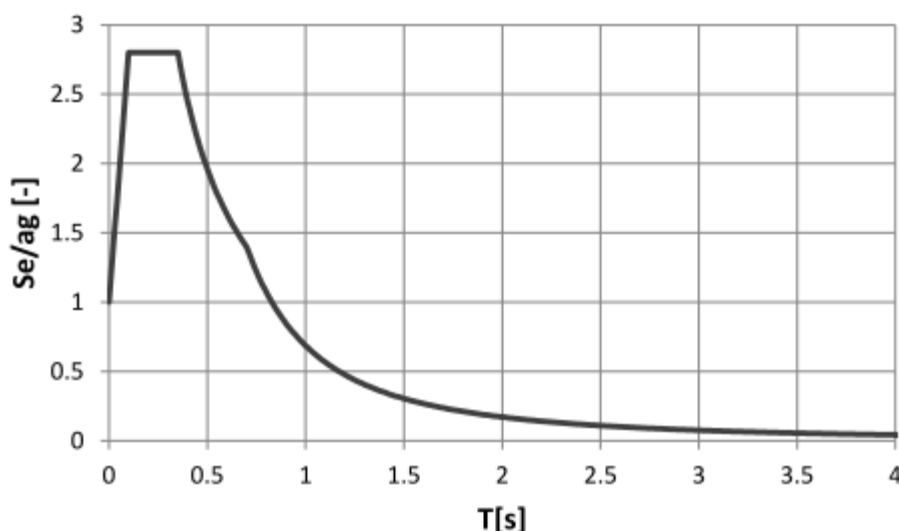
Stap 1: bepaal gevolgklasse, grenstoestand en γ_I (Memo: Tabel 1)

Voor mestsilo's: CC1a, near collapse (NC), $\gamma_I = 0,9$

Stap 2: bepaal S , T_B , T_C , en T_D (Memo: pag.9)

Voor het horizontale elastisch respons spectrum geldt:

$$\begin{array}{ll} S = 1,0 & T_B = 0,10 \text{ s} \\ T_C = 0,35 \text{ s} & T_D = 0,70 \text{ s} \end{array}$$



Figuur 6 - elastisch respons spectrum uit Memo

Stap 3: Bepaal $a_{g,ref}$ afhankelijk van gebied (Memo: Figuur 1)

Stap 4: Bepaal ductiliteitklasse en gedragsfactor q (EC8-4: § 3.4 a), (2), (3))

Volgens EC8-4: § 3.4 a), (2), (3) gedragsfactor $q = 1,5$ hanteren waarbij de mestsilo ingedeeld dient te worden in klasse DCL. De bepaalde waarde mag volgens tabel 1 uit de Memo worden vermenigvuldigd met 1,33.

In afwijking hierop dient voor het convectieve deel van de belasting door de vloeistof (sloshing) altijd een waarde $q = 1,0$ te worden gerekend.

Stap 5: Bereken T_{imp} en T_{con} (EC8-4: § A.3.2.2.1)

T_{imp} en T_{con} bepalen volgens EC8-4: tabel A.2

Voor T_{con} maximaal $T_{(s)} = 4$ aanhouden



- Stap 6:** Bereken $S_d(T_{imp})$ en $S_d(T_{con})$ (Memo: pagina 9)
Waarden van $S_d(T_{imp})$ en $S_d(T_{con})$ afhankelijk van het tijdstip T_{imp} en T_{con} volgens de Memo, formules op pagina 9.
- Stap 7:** Bereken de hoogte van d_{max} (EC8-4: § A.2.1.4)
De waarde d_{max} is afhankelijk van de straal R en T_{con}
- Stap 8:** Bereken m_i , m_w en m_r volgens gewichtsber. (EC8-4: §A.3.2.2.2)
Gewicht van wanden, dak en mestinhoud van de silo berekenen
Gewicht van eventuele silovloer (inclusief onderste helft van de silowanden) is te verwaarlozen massa.
- Stap 9:** Bereken Q en M (EC8-4: §A.3.2.2.2)
- Stap 10:** Bereken de maximale wanddruk p_c (EC8-4: §A.2.1.3)

7.2 Noodzaak van overhoogte

Voor silo's van gebruikelijke afmetingen blijkt dat de trillingstijd van 4 seconden voor het convectieve deel van de belasting door vloeistof (sloshing) al snel wordt overschreden. Uit berekening volgt ook dat met een trillingstijd van 4 seconden bij een PGA waarde van 0,42g het effect van sloshing bijna is te verwaarlozen. De waarde d_{max} is dan slechts enkele centimeters.

In de praktijk zal een silo praktisch nooit tot de rand worden gevuld, maar wordt uit veiligheidsoverweging wel de belasting uit vloeistof tot de bovenzijde van de silowand berekend.

In de normen is geen bovengrens voor de trillingstijd van het convectieve deel van de belasting aangetroffen. Wel is in EC-1 § 3.2.2.5 een bovengrens voor $S_d(T)$ voorgeschreven middels de factor $\beta = 0,2$ welke van toepassing kan worden beschouwd op het impulsieve deel van de belasting.

In de Amerikaanse norm ANSI/AWWA D103-09 (Factory-Coated Bolted Carbon Steel Tanks for Water Storage) wordt geen bovengrens gesteld aan de trillingstijd voor het convectieve deel van de belasting. In de voorbeeldberekening volgens document [12] van de literatuurlijst bij dit rapport is eveneens geen bovengrens aan T_{con} gesteld. De in het voorbeeld berekende trillingstijd is 4,96 seconde.

Omdat de tot nu toe gemeten duur van de geïnduceerde aardbevingen in het Groningenveld kort is in vergelijking tot tektonische aardbevingen is het twijfelachtig of de duur van de geïnduceerde aardbevingen lang genoeg is om de golfbeweging in de silo tot stand te laten komen. Onze aanbeveling is door de normcommissie nader te laten onderzoeken in hoeverre dit impact oplevert voor de siloberekeningen.

8 Non-lineaire methode



8.1 Stappenplan

Voor de berekening van de bevingbelasting volgens non-lineaire methodes dienen in het kort de volgende stappen te worden doorlopen:

- Stap 1:** Invoer constructie mestsilo in een 3D rekenpakket
- Stap 2:** Invoer beddingconstante grondpakket onder de mestsilo (zie hfdst 9)
- Stap 3:** Invoer elastisch response spectrum uit de Memo
- Stap 4:** Invoer fysische eigenschappen drijfmest afgestemd op de viscositeit
- Stap 5:** Berekenen krachten en momenten volgens niet lineaire berekening

Berekeningen volgens non-lineaire methodes kunnen onder andere met de volgende programma's worden uitgevoerd:

- AxisVM
- Abacus
- Scia Engineer

9 Plooi bij stalen silo's

Bij dunwandige stalen silo's bestaat het gevaar voor plooi. Uit document [12] blijkt het gevolg daarvan.

Er bestaat kans op het ontstaan van een olifantvoet net boven de fundering, enerzijds door plooi en anderzijds door randverstoring als gevolg van de inklemming in de fundering. De silo kan dan niet vrij uitzetten waardoor buikvorming ontstaat. Dit gebeurt ook bij de normale situatie, maar is dan slechts enkele centimeters en is derhalve acceptabel.

Boven in de silo ontstaan door de aanwezigheid van het dak en de asymmetrische belasting grote schuifspanningen. Omdat bovenin de plaatdikte vaak erg gering is, bestaat ook hier de kans op plooi.

In de literatuur (zie Buckling of Steel Shells: European Design Recommendations no. 56 en de Amerikaanse norm ANSI/AWWA D103-09: Factory-Coated Bolted Carbon Steel Tanks for Water Storage) worden hiervoor rekenregels gegeven waarin de steundruk van de vloeistof is verdisconteerd.

Boven de vloeistof is geen steundruk aanwezig waardoor de wand hier erg gevoelig is voor plooi. Onze aanbeveling is dit door de normcommissie nader te laten onderzoeken en voor dunwandige silo's een controle op plooi in de NPR 9998 resulterend in de Nationale Bijlage op te nemen.



10 Fundering

10.1 Algemeen

De ondergrond en de fundering van de mestsilo worden ten gevolge van een beving belast op:

- verticale massa van het totale gewicht
- horizontale kracht Q uit de aardbevingsberekening
- moment M uit de aardbevingsberekening

Door deze belastingen zal de grondslag en fundering onder de mestsilo niet gelijkmatig worden belast. Eén zijde zal zwaarder worden belast dan de andere zijde. Hierdoor treedt er verschil op in grondspanning of paalbelasting. Dit kan leiden tot scheefstand en als gevolg daarvan instorting van de mestsilo.

Voor de berekening volgens de LFM dient de silowand geheel of gedeeltelijk verankerd aan de fundering. Met een berekening volgens de balktheorie (vormvaste doorsnede) kan hieruit volgen dat op deze verankering trekkrachten ontstaan.

Bij prefab betonsilo's zal deze trekkracht door het eigengewicht van de wand worden gereduceerd.

Bij stalen mestsilo's zal dit niet het geval zijn en zijn de trekkrachten op de ankers aanzienlijk.

Bij dunwandige stalen silo's is het gebruikelijker de krachten in de wand te berekenen volgens de membraamtheorie. Bij toepassing van deze methode blijkt dat de krachten op de fundering maximaal worden ter plaatse van de neutrale lijn (waar de buigspanningen volgens de balktheorie nul zijn). Berekeningen volgens de membraamtheorie zijn met de beschikbare EEM software (Eindige Elementen Methode) te maken. Hierbij zullen automatisch de membraamkrachten worden bepaald omdat de wand zelf bij deze schematisering geen of nagenoeg geen moment kan opnemen.

10.2 Verweking

Uit de gewichtsberekening volgt de massa van de mestsilo. Uit de massa van de mestsilo volgt de bevingbelasting conform de te hanteren voorschriften.

Bij de controle van de fundering op staal of op palen op aardbevingsbelasting moet rekening worden gehouden met de horizontale belasting. Daarnaast dient worden onderzocht of verweking van aanwezige zandlagen kan ontstaan. Bij potklei is geen risico op verweking aanwezig.

Ten gevolge van de verweking door wateroverspanning neemt de conusweerstand af.

De reductiefactor van de conusweerstand is

$$\sqrt{1 - r_u}$$

waarin r_u = de relatieve waterspanning (zie EC8-5)



Ten behoeve van de berekening van een aardbevingsbestendige fundering behoort een geotechnisch bodemonderzoek inclusief funderingsadvies en een beschouwing van mogelijk optredende verweking te worden opgesteld.

NPR 9998

Conform NPR 9998 bijlage E (Criterium voor verweking zand), § E.2 zijn er nog geen praktische rekenregels om de invloed van een gebouw op staal op de verwekingsgevoeligheid mee te nemen. In afwezigheid daarvan kan voorlopig voor het bepalen van de verwekingsgevoeligheid het effect daarvan worden genegeerd.



11 Geraadpleegde literatuur

11.1 Voorschriften en richtlijnen

- [1] NEN-EN 1998-1:2005 + C1:2009 + A1:2013
Eurocode 8 - Ontwerp en berekening van aardbevingbestendige constructies
Deel 1: Algemene regels, seismische belasting en regels voor gebouwen
- [2] NEN-EN 1998-4: 2007
Eurocode 8 - Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies
Deel 4: Silo's, opslagtanks en pijpleidingen
- [3] NEN-EN 1998-5: 2005
Eurocode 8 - Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies
Deel 5: Fundering, grondkerende constructies en geotechnische aspecten
- [4] MEMO Voorlopige ontwerpuitgangspunten voor nieuwbouw en verbouw onder
aardbevingsbelasting ten gevolge van de gaswinning in het Groningenveld d.d. 15
mei 2014 (revisie 1, 23 mei 2014)

11.2 Literatuur

- [5] Leidraad berekenen van een aardbevingsbelasting conform EC8/Memo volgens de
Lateral Force Method of analysis, ingenieursbureau Zonneveld b.v.
- [6] Unit 41 : Fluid Mechanics unit code:T/601/1445 OUTCOME 2 TUTORIAL 2-
VISCOSITEIT
- [7] Rheological properties of dairy cattle manure 23 augustus 2004, Hamed M. El-
Mashad (23-08-2004)
- [8] Physical and flow properties of solid and semi-solid manure as related to the design of
handling and lan application equipment july 14 -17,2002
- [9] Analysis and structural behavior of cylindrical steel tanks under seismic effect
The 12th international Conference on Metal Structures- ICMS, Wroclaw 2011
- [10] Seismic Design of Elevated Slurry Storage Tanks for AS/NZS 1170
- [11] DESIGN RECOMMENDATION FOR STORAGE TANKS AND THEIR SUPPORTS
WITH EMPHASIS ON SEISMIC DESIGN (2010 EDITION)
- [12] Simple procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks (Structural Engineering
International 3/2000
- [13] Model of a Sloshing tank Comsol Multiphysics © 2009 Comsol Inc. all rights reserved
- [14] Elastic Earthquake Respons Spectra Cie 619 Chapter 4 - Seismic Analysis
- [15] CIE619-Lecture08-SDOF-SpectralAnalysi.pdf



11.3 Internet

- [16] <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1649097>
- [17] http://www.ipenz.org.nz/IPENZ/forms/pdfs/PN27-Dairy_Farm_Infrastructure.pdf
- [18] <http://www.scribd.com/doc/168242229/NZS-3106-2009-Concrete-Structures-for-the-Storage-Liquids>
- [19] <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Ac05687ee-10b8-4ea6-9c77-f49f6594cdf0/>
- [20] <http://scripties.ned.ub.rug.nl/archives.php?id=19&page=84&sort=date>



12 Samenvatting en conclusies

Bij het berekenen van mestsilo's op de gevolgen van belastingen uit een aardbeving dient rekening te worden gehouden met het typische gedrag van een vloeistof die in beweging wordt gebracht (het zogenaamde 'sloshing' ofwel klotsen) waardoor naast een statische belasting een (extra) dynamische belasting op de silowanden ontstaat die in de omtrek varieert en niet rechtlijnig van verloop in de hoogte is.

Met gebruik van de Lateral Force Method voor de berekeningen is dit effect veilig te benaderen, waarbij de uitkomsten naar alle waarschijnlijkheid zullen leiden tot een economisch acceptabele overschatting van de belastingen.

Ondanks de verschillende types mestsilo's (prefab betonsilo's, foliesilo's, stalen mestsilo's) voorziet Eurocode niet in een verschillende gedragsfactor per type silo (afhankelijk van de materialisatie). In Eurocode wordt alleen onderscheid gemaakt tussen silo's op kolommen (boven maaiveld) en silo's op een vaste ondergrond. Mestsilo's komen alleen voor op een vaste ondergrond (palen hier ook toe gerekend).

Als ondergrens voor de gedragsfactor q in de Eurocode mag voor alle types silo's op een vaste ondergrond de waarde 1,5 worden aangehouden. Met een pushover berekening kan een hogere gedragsfactor worden bepaald. In afwijking hierop dient voor het convectieve deel van de belasting door de vloeistof (sloshing) altijd een waarde $q = 1,0$ te worden gerekend.

Bij mestsilo's is door de dynamische belasting het effect van de verweking van een eventueel direct onderliggende zandlaag (ook bij fundering op palen) groter dan bij een statisch bouwwerk. Hier dient nadrukkelijk rekening mee te worden gehouden.

NPR 9998

Conform NPR 9998 bijlage E (Criterium voor verweking zand), § E.2 zijn er nog geen praktische rekenregels om de invloed van een gebouw op staal op de verwekingsgevoeligheid mee te nemen. In afwezigheid daarvan kan voorlopig voor het bepalen van de verwekingsgevoeligheid het effect daarvan worden genegeerd.

DISCLAIMER

Dit rapport bevat de resultaten van een onderzoek uitgevoerd naar de risico's van aardbevingen ten gevolge van de gaswinning specifiek voor mestsilo's en over een te volgen rekenmethodiek aanbevelingen te doen om te voldoen aan de grenstoestand NC van de Ontwerp NPR 9998:2015 (publicatie februari 2015).

Ingenieursbureau voor Bouwtechniek Goudstikker - de Vries BV en/of Nederlandse Aardolie Maatschappij BV aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor de bouwwerken die mede met de resultaten van het onderzoek volgens dit rapport tot stand worden gebracht en/of de financiële gevolgen die uit het gebruik van dit rapport voortvloeien. De indiener en hoofdconstructeur blijven verantwoordelijk en aansprakelijk voor de bouwconstructies die in dit rapport worden behandeld.