

TNO-rapport

TNO 2021 R10325B

**Schade aan gebouwen door diepe
bodemdaling en -stijging**

Datum	9 maart 2021
Auteur(s)	Dr.Ir. C.P.W. Geurts (TNO) Drs. M.P.D. Pluymaekers (TNO) Prof.Dr.Ir. J.G. Rots (TU Delft)
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	13 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	IMG Groningen
Projectnaam	Schade IMG
Projectnummer	060.45857

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Inhoudsopgave

1	Inleiding en vraagstelling	3
2	Uitgevoerde activiteiten	4
3	Samenvatting van de onderliggende rapporten	5
3.1	Grenswaarden voor schade aan gebouwen [ref. 2]	5
3.2	Bodemdaling en -stijging ten gevolge van de activiteiten in het Groningenveld en gasopslag Norg [ref. 3]	6
3.3	Analyse van INSAR data [ref. 4]	9
3.4	Modelstudies van het effect van bodemdaling op gebouwen [ref. 5]	9
4	Samenvatting en conclusie	11
5	Referenties	12
6	Ondertekening	13

1 Inleiding en vraagstelling

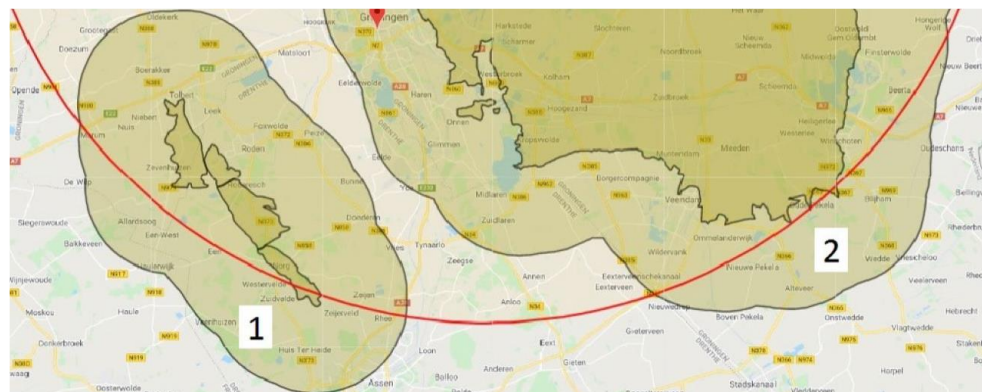
Het Instituut Mijnbouwschade Groningen (IMG) heeft aan TNO en TU Delft gevraagd te adviseren over de effecten van de diepe bodemdaling en -stijging die optreedt door de mijnbouwactiviteiten uit het Groningenveld en de gasopslag Norg. De adviesvraag van IMG aan TNO en TU Delft, zoals door IMG gedefinieerd, luidt als volgt:

Het IMG zou van TNO en TU Delft graag advies ontvangen over welke bodemdaling en -stijging plaatsvindt boven en in de nabijheid van het Groningenveld en de gasopslag Norg en of deze bodemdaling direct tot het ontstaan of het verergeren van schade aan gebouwen kan leiden.

Als TNO en TU Delft deze vraag bevestigend beantwoorden, dan wil het Instituut ook geadviseerd worden over welke methode een deskundige zou moeten hanteren om in een individueel geval te beoordelen of een gebrek/schade in een gebouw is of kan zijn veroorzaakt of verergerd door deze vorm van bodembeweging.

De vraagstelling spitst zich toe op het effectgebied dat is gedefinieerd in het advies dat in 2019 door een panel van deskundigen aan TCMG is uitgebracht [ref. 1]. Dit effectgebied is enerzijds gedefinieerd door een contour waarbinnen de kans op een trillingsnelheid van 2 mm/s of hoger ten gevolge van een beving uit het verleden ten minste 1% is, en door een afstand van 6 km rondom het Groningenveld en de gasopslag Norg.

Het effectgebied wordt in het noordelijke deel bepaald door de '2 mm/s-begrenzing'. In het zuidelijke deel wordt dit daarnaast deels bepaald door de 6 km afstand vanaf het Groningenveld en gasopslag Norg. Dit is in onderstaande figuur weergegeven. Gebied 1 is het gebied dat bepaald wordt door de 6 km contour rond de gasopslag Norg. Gebied 2 is het gebied dat bepaald wordt door de 6 km contour rond het Groningenveld. De rode lijn geeft de '2 mm/s begrenzing' aan.



Figuur 1 Effectgebieden rondom gasopslag Norg (1) en het Groningenveld (2)

Dit rapport is een herziene versie van rapport TNO 2021 R10325 met datum 19-februari-2021. De herziening betreft een taalkundige verbetering in hoofdstuk 4 (samenvatting en conclusies).

2 Uitgevoerde activiteiten

De vraagstelling van IMG is door TNO en TU Delft vertaald in een aantal deelvragen met daarbij behorende activiteiten. Voor elk van deze activiteiten is een afzonderlijk rapport opgesteld. De deelvragen met bijbehorende activiteiten zijn:

1. *Welke criteria ten aanzien van het ontstaan van schade aan gebouwen ten gevolge van bodemdaling kunnen worden gesteld?*

Deze vraag is onderzocht in de vorm van een literatuuronderzoek naar de indicatoren die van belang zijn voor schade, en naar de grenswaarden voor die indicatoren waarvoor bij een onderschrijding geen sprake kan zijn van esthetische, functionele of constructieve schade in de vorm van scheurvorming [ref. 2].

2. *Wat is in de historie de diepe bodemdaling en -stijging ten gevolge van de activiteiten in het Groningenveld en gasopslag Norg geweest, en hoe verhoudt het effect van deze diepe bodemdaling en -stijging aan het maaiveld zich tot de onder punt 1 vastgestelde criteria.*

Deze vraag is onderzocht met behulp van de volgende activiteiten:

- a. Berekeningen van de diepe bodemdaling en -stijging die wordt veroorzaakt door de ontwikkeling (afname, dan wel af- en toename) van de drukken in het Groningenveld en gasopslag Norg in het verleden [ref. 3]. De berekende waarden van deze diepe bodemdaling en -stijging zijn vertaald naar de onder punt 1 vastgestelde indicatoren aan het maaiveld. De aldus verkregen uitkomsten worden in dit advies vergeleken met de grenswaarden uit [ref. 2].
- b. Analyse van satellietdata (InSAR) om de daadwerkelijk opgetreden bodemdaling en – stijging aan het maaiveld vast te stellen [ref. 4]. Deze waarnemingen zijn gebruikt om het model voor de berekening van de diepe bodemdaling en -stijging te valideren.
- c. Berekeningen van de effecten op gebouwen als gevolg van de onder 2a gevonden bodemvervormingen [ref. 5] om vast te stellen of schade optreedt.

De antwoorden op deze deelvragen zijn vastgelegd in afzonderlijke rapportages, zie referenties 2 tot en met 5. Dit advies brengt de conclusies van deze onderliggende rapportages bij elkaar en beantwoordt op basis van deze conclusies de adviesvraag van IMG.

De adviesvraag van IMG heeft uitsluitend betrekking op de directe effecten van diepe bodemdaling. Andere oorzaken en indirecte effecten, zoals de mogelijkheid dat de diepe bodemdaling ertoe leidt dat er (bedoeld of onbedoeld) veranderingen plaatsvinden in het grondwaterpeil maken geen onderdeel uit van de adviesvraag van IMG aan TNO en TU Delft, noch wordt ingegaan op schade die kan ontstaan door aardbevingen als gevolg van mijnbouwactiviteiten.

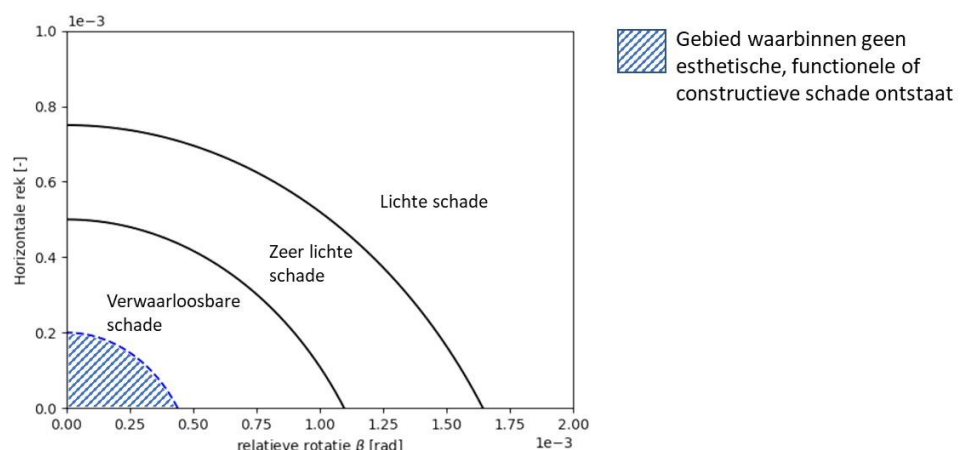
3 Samenvatting van de onderliggende rapporten

3.1 Grenswaarden voor schade aan gebouwen [ref. 2]

Diepe bodemdaling en -stijging leidt tot een langzame beweging van het maaiveld, hetgeen naast zakkings (of zettingen) leidt tot rotaties en krommingen van het maaiveld. Deze bewegingen hebben een invloed op (de fundering van) een gebouw. Ten gevolge van deze bodembewegingen zal een gebouw in zekere mate mee verplaatsen of vervormen. De mate waarin een gebouw in staat is dergelijke verplaatsingen of vervormingen op te nemen is in een literatuurstudie onderzocht. Deze literatuurstudie is gerapporteerd in [ref. 2].

De relevante indicator om de gevoeligheid van een metselwerkgebouw voor schade ten gevolge van zettingen te bepalen is de horizontale rek in het metselwerk. Deze horizontale rek kan worden veroorzaakt door de horizontale rek van de fundering (het gebouw kan een beetje worden uitgerekt of ingedrukt in horizontale richting), alsmede door een kromming of een verschilverplaatsing van de fundering (het gebouw gaat als gevolg daarvan vervormen, waardoor in het metselwerk horizontale rekken ontstaan). De totale rek in het metselwerk is de optelling van de horizontale rek in de fundering en de rek ten gevolge van de relatieve rotatie van de fundering. De relatieve rotatie wordt bepaald door de kromming en de eventuele verschilverplaatsing van de fundering. Voor nadere toelichting wordt verwezen naar [ref. 2]. Het criterium voor het ontstaan van schade is daarom een combinatie van horizontale rek en de relatieve rotatie ter hoogte van de fundering.

Op basis van de literatuurstudie wordt geconcludeerd dat er geen esthetische, functionele of constructieve schade ontstaat als de combinatie van horizontale rek en relatieve rotatie in het gebied ligt dat in Figuur 2 gearceerd is weergegeven. De begrenzing van dit gebied komt overeen met een maximaal optredende horizontale rek van $2 \cdot 10^{-4}$ in het metselwerk, wat als ondergrenswaarde kan worden beschouwd voor het ontstaan van zichtbare scheurvorming.



Figuur 2 Grenswaarden voor schade als gevolg van zettingen en zakkings van de ondergrond [ref. 2].

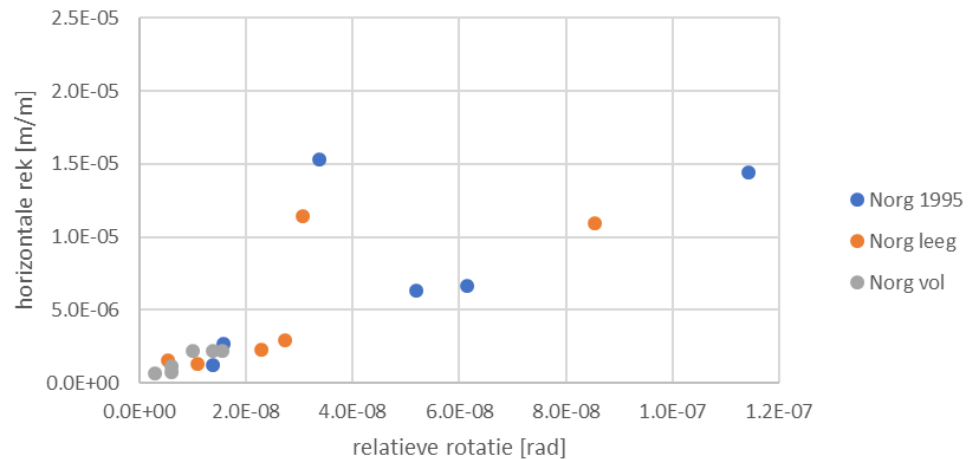
Uit de literatuurstudie volgt verder dat de grenswaarden voor metselwerk strenger zijn dan voor andere bouwmaterialen. Toepassing van de grenswaarden van Figuur 2 voor andere materialen wordt daarom als een veilige keuze beschouwd.

3.2 Bodemdaling en -stijging ten gevolge van de activiteiten in het Groningenveld en gasopslag Norg [ref. 3]

Om te bepalen of de diepe bodemdaling en –stijging kan leiden tot schade aan gebouwen is de diepe bodemdaling van het Groningenveld en gasopslag Norg in het verleden bepaald, evenals de diepe bodemdaling en -stijging die te verwachten is tijdens het gebruik van Gasopslag Norg. De uitgevoerde berekeningen en bijbehorende resultaten zijn gegeven in [ref. 3]. Uit de berekende verplaatsingen zijn de resulterende horizontale rekken, de krommingen en daaruit voor een gebouw van 10 m lengte de relatieve rotaties bepaald. Dit is gedaan voor het maaiveld, dus zonder gebouw. Deze horizontale rekken en relatieve rotaties worden hierna vergeleken met de grenswaarden volgens [ref. 2]. Ten behoeve van deze vergelijking worden de voor de grond berekende rekken en relatieve rotaties gelijk gesteld aan die in de fundering van een gebouw. In werkelijkheid zal de fundering de beweging van de bodem slechts gedeeltelijk volgen, waardoor de resulterende relatieve rotaties in de fundering kleiner zijn dan in de bodem. De gehanteerde benadering kan daarom worden beschouwd als conservatief voor de optredende rekken in een gebouw. Hieronder worden de resultaten samengevat voor de gasopslag Norg en voor het Groningenveld.

Bodemdaling en -stijging boven gasopslag Norg

De maximaal opgetreden diepe bodemdaling van het Norgveld dateert van 1995, toen de productie van gas uit het veld werd gestopt. Thans is het Norgveld in gebruik als gasopslag, binnen wettelijk vastgelegde grenzen voor de druk in het reservoir. Voor zowel de onder- en bovengrens van deze reservoirdruk, als voor de situatie in 1995, is bepaald hoe groot de maaiveldbeweging als gevolg van de activiteiten in het Norgveld is. Hieruit zijn de maximaal optredende rekken en krommingen berekend. Uit de berekende krommingen zijn vervolgens de relatieve rotaties bepaald. Dit is gedaan langs een aantal lijnen over het Norgveld. De definitie van de lijnen en de resultaten zijn beschreven in [ref. 3]. De maximale absolute waarden voor de horizontale rekken en de relatieve rotaties zijn in Figuur 3 gegeven.



Figuur 3 Maximale horizontale rekken en relatieve rotaties voor elk van de beschouwde lijnen (zie ref. 3) voor gasopslag Norg.

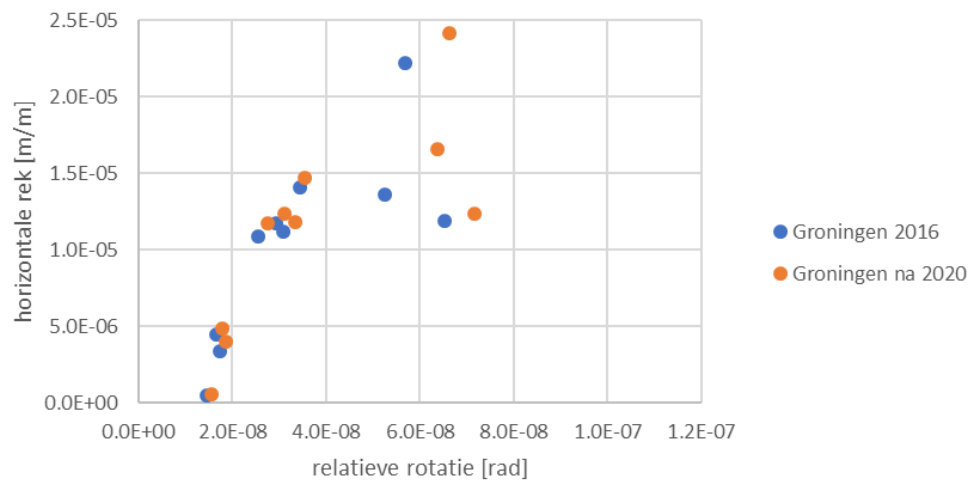
Uit deze figuur blijkt dat de maximaal optredende horizontale rekken gelijk zijn aan ongeveer $1.6 \cdot 10^{-5}$, en dat binnen de optredende horizontale rekken de maximale relatieve rotatie gelijk is aan $1.2 \cdot 10^{-7}$. Deze maxima behoren bij de situatie in 1995 toen de conventionele gasproductie beëindigd was. De waarden behorend bij de bodemdaling als gasopslag Norg leeg is, en de waarden bij de bodemstijging als gasopslag Norg vol is, liggen daar nog onder.

Bodemdaling boven Groningenveld

Voor het gehele Groningenveld is voor 2016 bepaald wat de diepe bodemdaling ten gevolge van de gaswinning is geweest. Daarnaast is een conservatieve waarde bepaald voor de diepe bodemdaling na 2020 op basis van de toenmalige productieprognoses.

Hieruit zijn de maximaal optredende horizontale rekken en krommingen vastgesteld. Dit is gedaan langs een aantal lijnen over het veld. De definitie van deze lijnen en de resultaten zijn beschreven in [ref. 3].

Uit de krommingen zijn de relatieve rotaties bepaald, om deze te kunnen vergelijken met de grenswaarden die in [ref. 2] zijn gerapporteerd. De maximale absolute waarden voor de horizontale rekken en de relatieve rotaties zijn in Figuur 4 gegeven.

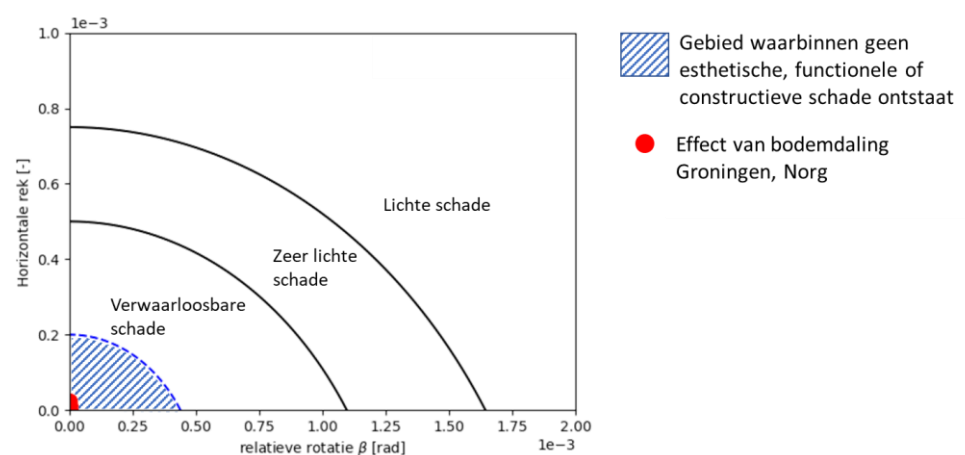


Figuur 4 Maximale horizontale rekken en relatieve rotaties voor elk van de beschouwde lijnen in het Groningenveld.

Uit deze figuur blijkt dat de maximaal optredende horizontale rekken gelijk zijn aan $2.5 \cdot 10^{-5}$, en dat binnen de optredende horizontale rekken de maximale relatieve rotatie gelijk is aan $7 \cdot 10^{-8}$. Deze maxima zijn een bovengrenswaarde voor de situatie bij het stoppen van de productie zoals voorzien in 2022. De maximale waarden voor de situatie in 2016 liggen daar enigszins onder.

Vergelijking van berekende waarden van bodemdalings-indicatoren met de grenswaarden voor schade uit de literatuurstudie

In Figuur 5 zijn de resultaten uit Figuur 3 en Figuur 4 uitgezet tegen de grenswaarden voor schade als gevolg van zettingen en zakkingen van de ondergrond zoals deze uit de literatuur volgen (zie Figuur 2). Figuur 5 maakt in één oogopslag duidelijk dat de horizontale rekken en relatieve rotaties van zowel gasopslag Norg als het Groningenveld zeer waarschijnlijk niet zullen leiden tot schade.



Figuur 5 Vergelijking tussen grenswaarden uit literatuur en berekende bodemdaling van Groningenveld en gasopslag Norg.

3.3 Analyse van INSAR data [ref. 4]

Door TU Delft is een analyse uitgevoerd van de met satellieten waargenomen bodembewegingen aan het maaiveld van de gasopslag Norg in de periode 2015 – 2019. Deze meetdata zijn verwerkt tot verticale verplaatsingen en krommingen aan het maaiveld. Deze zijn vergeleken met de berekende resultaten uit [ref. 3] van de twee uiterste toestanden van de gasopslag: gevuld of leeg geproduceerd.

De omvang van de verticale bodembeweging afgeleid van InSAR waarnemingen is vergelijkbaar of kleiner ten opzichte van de TNO modelresultaten van de bodemdaling en -stijging van de gasopslag Norg. Hieruit volgt dat ook de opgetreden horizontale rekken en relatieve hoekverdraaiingen vergelijkbaar of kleiner zijn ten opzichte van de gemodelleerde waarden. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de modelberekeningen een conservatief beeld geven van de werkelijk optredende vervormingen ten gevolge van diepe bodemdaling.

Naar aanleiding van deze bevindingen wordt verwacht dat een vergelijkbare analyse voor het Groningenveld niet tot andere conclusies zal leiden.

3.4 Modelstudies van het effect van bodemdaling op gebouwen [ref. 5]

Door de TU Delft is een aanvullende modelstudie uitgevoerd naar de invloed van diepe bodemdaling op bovenliggende, kwetsbare metselwerk gebouwen. Deze modelstudie is uitgevoerd op basis van de eindige elementenmethode. Hierbij is een expliciet schade-criterium gehanteerd (de 'Psi'-benadering' die rechtstreeks scheurwijdte, scheurlengte en scheuraantal in zich bergt), in combinatie met conservatieve model-aannames.

In de modellering wordt een denkbeeldig gasveld leeggeproduceerd of een denkbeeldige gasopslag wordt gevuld dan wel leeggeproduceerd. Het model is gekalibreerd aan de uitkomsten voor de modelstudie voor het jaar 1995 dat de maximaal opgetreden daling bij gasopslag Norg representeert [ref. 3].

Voor de koppeling van ondergrond naar gebouw is onderzocht wat de invloed is van de mate van koppeling. De aanname van ontkoppelde berekeningen is de meest ongunstige en daarmee conservatief. Hierbij wordt verondersteld dat alle grondvervorming (zowel verticaal als horizontaal) volledig wordt doorgegeven aan het gebouw. In werkelijkheid heeft het gebouw stijfheid en massa en zal het daardoor aanmerkelijk minder vervormen dan de grond ter plaatse van het maaiveld. Daarnaast is uit literatuur bekend dat een beperkt percentage horizontale overdracht reëel is, een indicatie hiervan is 30%. Daarom zijn naast de meest ongunstige situatie van 100% koppeling ook variatiestudies uitgevoerd waarbij respectievelijk 75%, 50%, 25% en 0% van de horizontale grondvervorming wordt overgedragen op het gebouw.

Verder is de locatie van het gebouw op de meest ongunstigst denkbare plek in de dalingskom aangenomen, ter plaatse van de grootste kromming en horizontale rek, zowel voor neerbuiging (sagging, bij gasextractie) als opbuiging (hogging, bij gasinjectie). In de modelberekeningen is ook gekeken naar het cyclisch gedrag door afwisselend bodemdaling en -stijging van de gasopslag Norg. Tevens is de

invloed van mogelijk reeds aanwezige schade onderzocht. Deze aspecten zijn aanvullend op de in de literatuurstudie [ref. 2] waargenomen cases.

Drie verschillende gevels zijn onderzocht met eigenschappen representatief voor de Nederlandse situatie, een lange gevel met kleine openingen, een lange gevel met grote openingen en een korte gevel met openingen. In alle gevallen is eerst de daadwerkelijke bodemvervorming opgelegd, waarbij voor geen enkel geval scheurvorming werd geconstateerd. Vervolgens is de bodemvervorming steeds proportioneel opgeschaald totdat zichtbare schade optrad. Zichtbare schade komt overeen met een scheur met een breedte van 0.1 mm, conform genoemde 'Psi'-methodiek. De kritische horizontale rekken (waarbij zichtbare schade ontstaat) zijn in de orde van grootte van $1 \cdot 10^{-4}$. Deze waarde is lager dan de uit de literatuur afgeleide grenswaarde. Dit verschil is te verklaren door de gemaakte keuzes in de modelberekeningen waarbij extra zekerheid is ingebouwd.

De uitgevoerde berekeningen tonen aan dat de effecten van diepe bodemdaling en -stijging boven de gasopslag Norg niet leiden tot schade aan de beschouwde gevels. Ook bij het aannemen van een vooraf beschadigde gevel, als ook bij het doorrekenen van het cyclisch gedrag boven de gasopslag wordt geen zichtbare schade geconstateerd.

Uit de analyses van [ref. 2] volgt dat de optredende relatieve rotaties en horizontale rekken in het Groningenveld qua grootte vergelijkbaar zijn met die bij de gasopslag Norg. Daarmee kan bovengenoemde conclusie worden doorgetrokken naar het Groningenveld.

4 Samenvatting en conclusie

Door TNO en TU Delft is onderzocht of diepe bodemdaling in het Groningenveld en de gasopslag Norg kan leiden tot schade aan gebouwen. Hierbij zijn vier deelstudies uitgevoerd, die ten behoeve van het advies zijn samengebracht.

Ten eerste is op basis van een review van internationale literatuur nagegaan welke grenswaarden van toepassing zijn op het ontstaan van schade ten gevolge van bodembewegingen. Deze literatuur is vertaald naar een scherp criterium voor het ontstaan van schade. Uit deze literatuur blijkt dat metselwerk kwetsbaarder is dan andere bouwmaterialen. De gevonden grenswaarden voor metselwerk zijn daarom veilige grenswaarden voor andere materialen.

In een tweede deelstudie zijn de effecten van de diepe bodemdaling en – stijging bij de gasopslag Norg en de diepe bodemdaling voor het Groningenveld berekend. Deze zijn vertaald naar de indicatoren die worden gebruikt om de grenswaarden voor gebouwen weer te geven.

In een derde deelstudie zijn INSAR data vergeleken met de resultaten van de tweede deelstudie. Daaruit volgt dat de meetdata overeenkomen of lagere waarden geven dan de modelstudie, waaruit geconcludeerd is dat de uitkomsten van de modelstudie aan de veilige kant zijn.

Uit een vergelijking tussen de grenswaarden op basis van de literatuur en de berekende effecten van diepe bodemdaling blijkt dat zowel voor de gasopslag Norg als het Groningenveld de effecten van diepe bodemdaling binnen de gestelde grenswaarden blijven en daarmee niet leiden of hebben geleid tot schade aan gebouwen.

Een vierde deelstudie is uitgevoerd waarbij op basis van de bodemdaling, die in de tweede deelstudie is bepaald, is berekend of er schade kan ontstaan. In deze deelstudie is gevarieerd in gevelopbouw en in materiaaleigenschappen. Er zijn ook variaties doorgerekend met reeds aanwezige schade en er is gekeken naar het effect van het cyclisch gedrag op de uitkomsten. In geen van de uitgevoerde berekeningen is schade ontstaan bij de rekken en krommingen zoals deze in de praktijk ontstaan.

Op basis van deze studie wordt geconcludeerd dat diepe bodemdaling in de gasopslag Norg en het Groningenveld niet leidt of heeft geleid tot schade aan gebouwen.

5 Referenties

- [1] Beantwoording vragen Tijdelijke Commissie Mijnbouwschade Groningen Panel van deskundigen, 22 januari 2019 (gepubliceerd op www.schadedoormijnbouw.nl)
- [2] TNO Rapport 2020 R12073, Literature Review: Effects of subsidence on buildings
- [3] TNO Rapport 2020 R12068, Effecten diepe bodemdaling en -stijging rondom de gasopslag Norg en het Groningenveld
- [4] TU Delft: InSAR Analyses of surface vertical displacements – Norg, P. Korswagen - TU Delft, Faculty of Civil Engineering & Geosciences, version 2
- [5] TU Delft: Computational modelling checks of masonry building damage due to deep subsidence, Rots J.G., Korswagen P.A., Longo M. TU Delft Report, Faculty of Civil Engineering & Geosciences, version 5, February 18, 2021.

6 Ondertekening

Delft, maart 2021

TNO

Dr.Ir. C.P.W. Geurts
Auteur

Prof.Dr.Ir. J.G. Rots
Auteur

Dr. P.C. Rasker
B/a Dr. M.R.A. van Vliet
Projectleider

Dr. P.C. Rasker
Research Manager
Structural Reliability