

## **Invloed van bodemdaling door zoutwinning Nedmag op bebouwing en infrastructuur**

**Winningsplan 2018, kom met maximale bodemdaling  
van 95 cm**



# **Invloed van bodemdaling door zoutwinning Nedmag op bebouwing en infrastructuur**

**Winningsplan 2018, kom met maximale bodemdaling van 95 cm**

de heer ir. J. Brinkman

## Titel

Invloed van bodemdaling door zoutwinning Nedmag op bebouwing en infrastructuur

## Project

11203195-000

## Kenmerk

11203195-000-GEO-0002

## Pagina's

20

## Trefwoorden

Zoutwinning, bodemdaling, horizontale rekken en relatieve rotatie




## Samenvatting

Bij de dorpen Trips- en Borgercompagnie in de Gemeente Veendam wint Nedmag sinds 1972 magnesiumzouten, op een diepte van ca. 1500 meter. Deze vorm van zoutwinning leidt tot gelijkmatige bodemdaling. Er is onderzocht wat de invloed van de bodemdaling op de bebouwing en infrastructuur is als gevolg van zoutwinning door Nedmag. Deze studie is een actualisatie van de studie uit juli 2018 [5] en aanvullend daarop wordt ook ingegaan op de beïnvloeding van infrastructuur. De studie van juli 2018 is gebaseerd op een bodemdalingsgebied met een maximale daling van 75 cm. In de actualisatie is uitgegaan van:

- De recente inzichten ten aanzien van de beïnvloeding van gebouwen door bodemdaling, waarbij zowel de bouwkundige staat van gebouwen als de snelheid van bodemdaling wordt meegenomen.
- Een bodemdalingsgebied met daarin een maximale diepte van 95 cm conform het winningsplan 2018.

Gebouwschade en schade aan infrastructuur door zetting is een lokaal verschijnsel. Er treedt pas gebouwschade op wanneer zettingsverschillen onder het gebouw tot een zodanige vervorming van het gebouw leiden dat de sterkte van het gebouw of onderdelen ervan overschreden worden, hetzelfde geldt voor infrastructuur. Bodemdaling die door de zoutwinning ontstaat, zal niet tot deze situatie leiden.

Uit het onderzoek blijkt dat de bodemdaling die door de zoutwinning aan de oppervlakte ontstaat, ter plaatse van infrastructuur en gebouwen, zo gelijkmatig is dat de zettingsverschillen en horizontale rek ver onder de toelaatbare grenzen blijven en niet tot schade aan infrastructuur en gebouwen leiden. Ook bij oudere gebouwen en infrastructuur is het niet te verwachten dat er gebouwschade ontstaat.

| Versie | Datum     | Auteur          | Paraaf                                                                              | Review            | Paraaf                                                                                | Goedkeuring       | Paraaf                                                                                |
|--------|-----------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.2    | sep. 2018 | ir. J. Brinkman |                                                                                     | drs. G.A.M. Kruse |                                                                                       | ing. A.T. Aantjes |                                                                                       |
| 1      | okt. 2018 | ir. J. Brinkman |                                                                                     | drs. G.A.M. Kruse |                                                                                       | ing. A.T. Aantjes |                                                                                       |
| 2      | okt. 2018 | ir. J. Brinkman |  | drs. G.A.M. Kruse |  | ing. A.T. Aantjes |  |

## Status

definitief

## Inhoud

|          |                                                                             |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>                                                            | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Bodemdaling</b>                                                          | <b>2</b>  |
| 2.1      | Algemeen                                                                    | 2         |
| 2.2      | Magnesiumzoutwinning Nedmag                                                 | 2         |
| <b>3</b> | <b>Effect van bodemdaling op gebouwen</b>                                   | <b>6</b>  |
| 3.1      | Inleiding                                                                   | 6         |
| 3.2      | Horizontale rek en relatieve rotatie bodem door zoutwinning                 | 9         |
| 3.3      | Beïnvloeding van bebouwing door bodemdaling                                 | 12        |
| 3.3.1    | Relatie gebouwvervorming en mate van beïnvloeding                           | 12        |
| 3.3.2    | Overdracht grondvervormingen naar bouwwerk                                  | 13        |
| 3.3.3    | Snelheid van grondvervormingen en bouwkundige staat van bouwwerk            | 14        |
| 3.3.4    | TU Delft 2018 benadering                                                    | 15        |
| 3.4      | Vergelijking rek en relatieve rotatie van de bodem met gebouwschadecriteria | 15        |
| 3.5      | Toetsing gebouwvervormingen door bodemdaling aan gebouwschade criteria      | 16        |
| <b>4</b> | <b>Beïnvloeding infrastructuur</b>                                          | <b>18</b> |
| <b>5</b> | <b>Conclusie</b>                                                            | <b>19</b> |
| <b>6</b> | <b>Literatuur</b>                                                           | <b>20</b> |

## 1 Inleiding

Bij de dorpen Trips- en Borgercompagnie, gemeente Veendam, produceert Nedmag sinds 1972 magnesiumzouten. De zouten worden door oplosmijnbouw gewonnen, wat inhoudt dat er water in de diepe zoutlagen wordt geïnjecteerd, alwaar de zouten oplossen tot een pekkel met hoge zoutconcentratie (voornamelijk magnesium-chloridezouten). Hiertoe heeft Nedmag tussen 1972 en 2011 13 putten geboord tot in de magnesiumzouten, die zich op een diepte van ongeveer 1,5 tot 1,8 km onder het maaiveld bevinden. Via in deze putten afgehangen buizen wordt water geïnjecteerd en pekkel geproduceerd.

Doordat de magnesiumzouten oplossen ontstaan ondergrondse cavernes, die gevuld zijn met magnesiumchloridepekkel, niet opgeloste zouten en gesteente residu's. Sinds 1993 wordt de zogenaamde 'squeeze methode' toegepast. Deze methode komt erop neer dat men de magnesiumzouten in vaste vorm de gelegenheid geeft naar de cavernes toe te stromen. De vloeiende, hoog-viskeuze, magnesiumzouten worden door het gewicht van de bovengrond naar de cavernes toe geperst, zoals men een tube tandpasta uitperst. Het zout dat aldus naar de caverne is gestroomd lost daar op en kan door Nedmag voor zijn productie benut worden. Omdat de magnesium-zoutlagen dunner worden en de druk in de caverne relatief laag is, daalt de bovengrond als gevolg van zwaartekracht. De daling van de bovengrond is het grootst boven de cavernes en wordt minder naarmate de afstand tot het caverneveld toeneemt.

Nedmag heeft Deltares in september 2018 opdracht gegeven de studie [5] uit juli 2018 naar de gevolgen van de bodemdaling op de bebouwde omgeving te actualiseren en uit te breiden naar de beïnvloeding van infrastructuur. In de studie van juli 2018 werd uitgegaan van een bodemdalingsgebied met een maximale zakking van 75 cm. In de voorliggende actualisatiestudie wordt uitgegaan van de kom in het winningsplan 2018 met een maximale zakking van 95 cm [6].

Het doel van deze studie is de bepaling van het effect van de bodemdaling door zoutwinning op bebouwing en infrastructuur. Bodemdaling (of stijging) ten gevolge van andere oorzaken (gaswinning, klink van toplagen door waterstandverlaging, graafwerkzaamheden, etc.) wordt niet in deze studie meegenomen.

In deze update wordt gebruik gemaakt van de recente inzichten ten aanzien van de beïnvloeding van gebouwen door bodemdaling welke onder meer in 2012 zijn vastgelegd door het Kenniscentrum voor ondergronds bouwen (COB) [1] en in 2018 door de TUDelft [4].

In hoofdstuk 2 wordt beschreven hoe bodemdaling ontstaat en gemeten wordt. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 het effect van bodemdaling op gebouwen behandeld en in hoofdstuk 4 het effect op infrastructuur.

## 2 Bodemdaling

### 2.1 Algemeen

Bij zoutwinning treedt bodemdaling op. Door een gat in de diepe ondergrond te maken wordt het natuurlijke krachtspel in de gesteentes verstoord. Het gewicht van alle boven het gat liggende grond en gesteente moet herverdeeld worden rondom dat gat. Nu heeft zout een zeer speciale eigenschap ten opzichte van vrijwel alle andere gesteentes: het kan deformeren bij relatief lage spanningen en binnen relatief korte tijd. Zout kan vergeleken worden met materialen als asfalt of kaarsvet, die qua gedrag ergens tussen een vast en vloeibaar materiaal zitten. Hoe hoger de belasting op het materiaal, hoe hoger de temperatuur en hoe meer tijd er verstrijkt, hoe meer zout kan vervormen (zonder te breken of te scheuren).

Indien de drukken in de zoutcaverne aanzienlijk lager zijn dan de druk in de zoutlagen rond de caverne, stroomt het zout naar de caverne toe. Dicht bij de cavernes stroomt het zout het snelst en de zoutlaag wordt iets dunner. De bovenliggende gesteentelagen bewegen met het zout mee naar beneden, waardoor er bodemdaling ontstaat.

De omvang van de meeste cavernes in steenzout (keukenzout, Natriumchloride) op 1500 tot 1800 m diepte neemt toe tijdens de zoutwinning. Als in cavernes in steenzout geen zout meer wordt opgelost, worden deze 1- 2% per jaar kleiner door het toevloeien van zout, afhankelijk van de drukontwikkeling in de caverne en de druk op het zout. Dit dichtvloeien wordt caverne-convergentie genoemd. De bodemdaling bedraagt meestal niet meer dan enkele millimeters per jaar en gaat langere tijd na het stoppen van de winning door. Bij de winning van het magnesiumzout bij Veendam wordt een andere methodiek gebruikt.

### 2.2 Magnesiumzoutwinning Nedmag

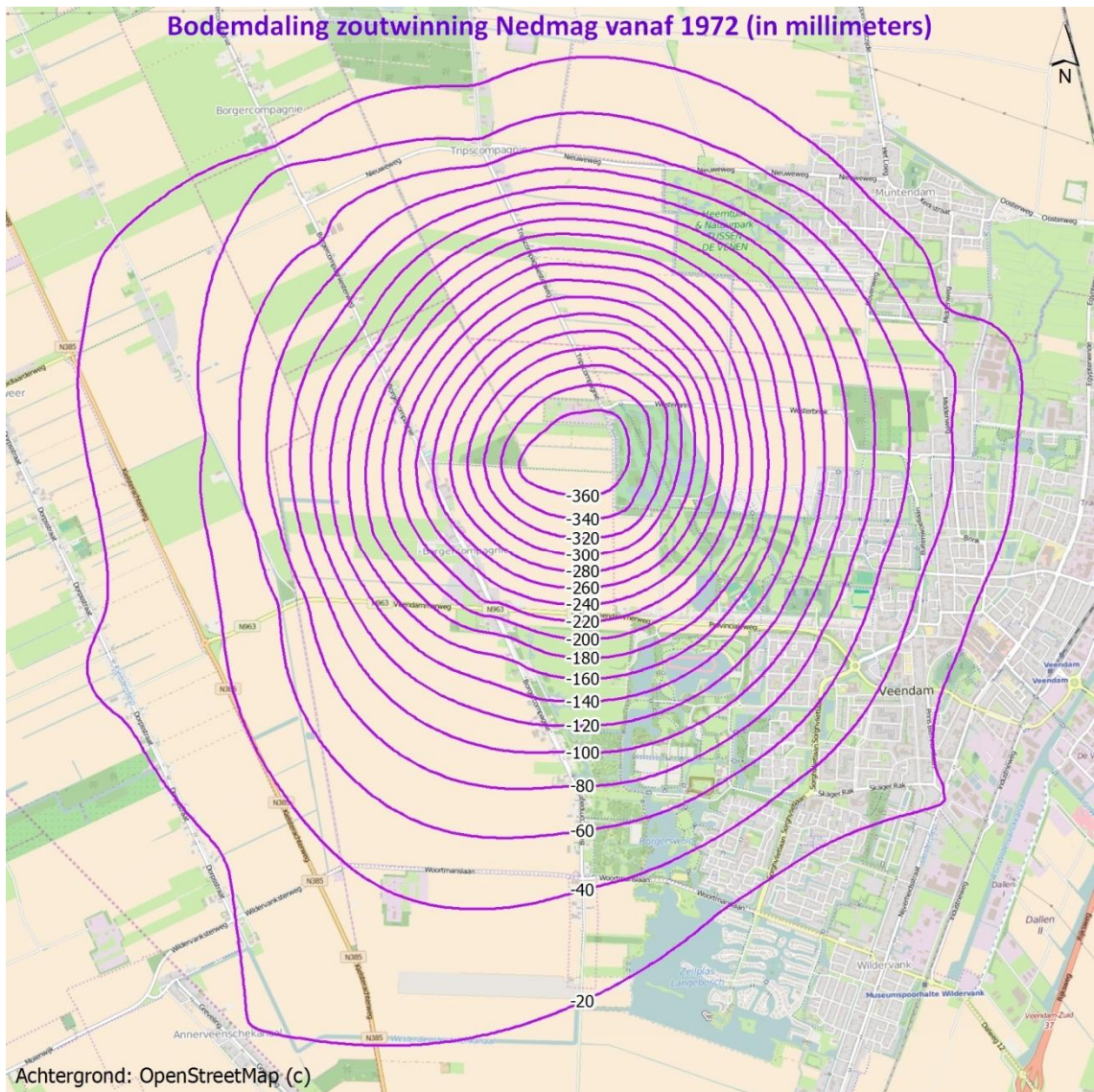
De winning bij Nedmag volgt een andere methode. Hierbij vloeit er tijdens de winningsperiode bijna evenveel zout toe naar de caverne als er gewonnen wordt. Het zogenaamde convergentievolume is in balans met het volume van het zout dat oplost; met andere woorden het volume van de caverne blijft ongeveer constant en beperkt.

De bodemdaling in het zoutwingebied van Nedmag wordt iedere twee jaar gemeten. Via een zogeheten "waterpassing" wordt van een zeer groot aantal meetpunten bepaald hoeveel deze gezakt zijn. De meetpunten zijn meestal aan goed gefundeerde gebouwen bevestigd of op speciaal aangebrachte betonpalen geplaatst. Zou men dit niet doen, dan zou men ook de wisselende effecten van zomer en winter, inclusief grondwaterstanden op de bovengrond, meten, waardoor de metingen onnauwkeurig worden. Bovendien is er dan de kans op verstoring van de meetpunten (door bijvoorbeeld landbewerking, zoals maaien). Door de daling van alle meetpunten te meten kan een contourkaart van de daling gemaakt worden. Contouren zijn in dit geval lijnen met gelijke dalingen. Zo'n lijn verbindt bijvoorbeeld alle punten met een zakking van 20 mm. Het geheel van contourlijnen maakt de bodemdaling inzichtelijk op een plattegrond. Figuur 2.1 geeft een resultaat van zo'n meting (waterpassing) uit 2014. Het diepste deel van het bodemdalingsgebied in de figuur is ongeveer 36 cm gedaald (gerekend vanaf 1972).

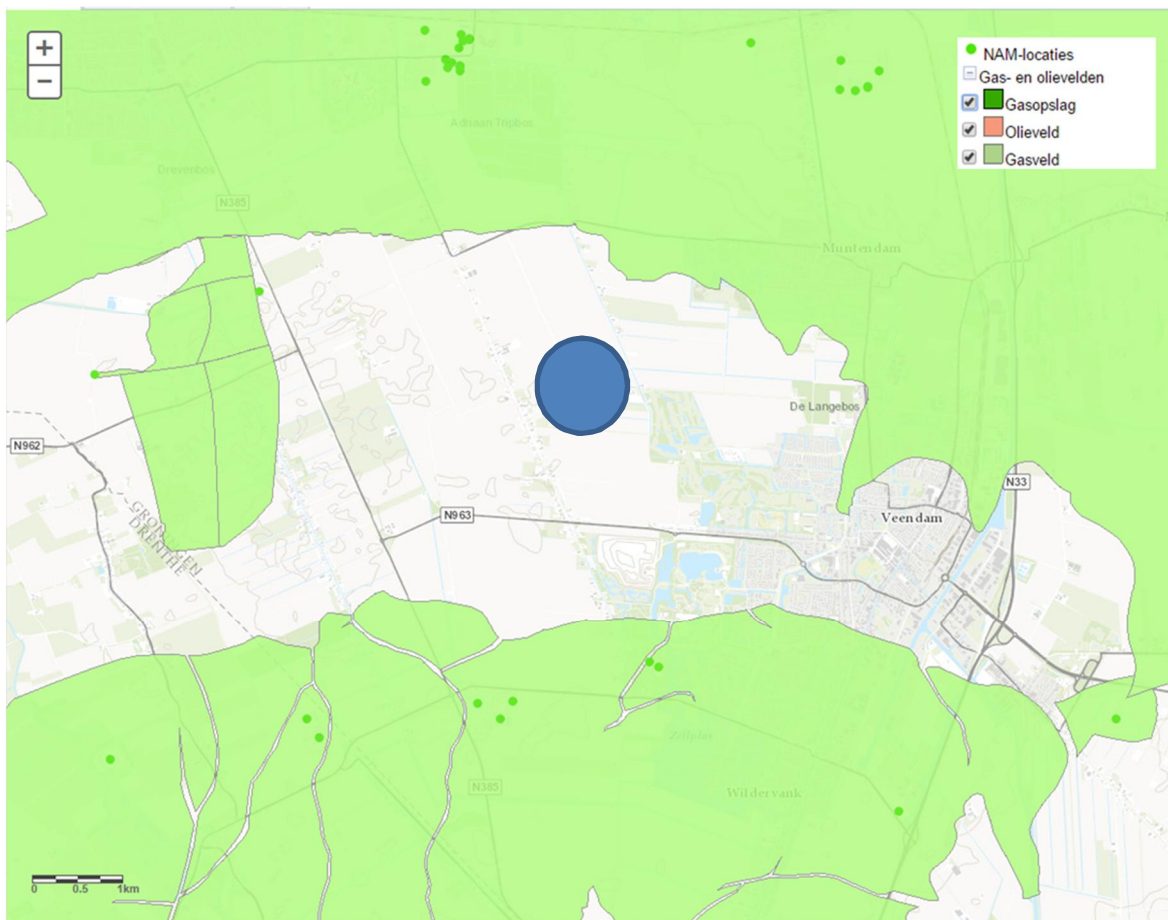
In het winningsplan 2018 [6] wordt uitgegaan van een maximale bodemdaling van 95 cm (gerekend vanaf 1972).



In de regio vindt ook bodemdaling plaats door gaswinning; de ligging van de gasvelden is in Figuur 2.2 in groen aangegeven. De bodemdaling door gaswinning valt buiten het kader van deze studie en er wordt niet nader op ingegaan.



Figuur 2.1 Bodemdaling vanaf 1972, waterpassing 2014



Figuur 2.2 Ligging gasvelden (groen) in de omgeving van de Nedmag zoutwinning (blauwe cirkel geeft centrum van de winning aan) [8]

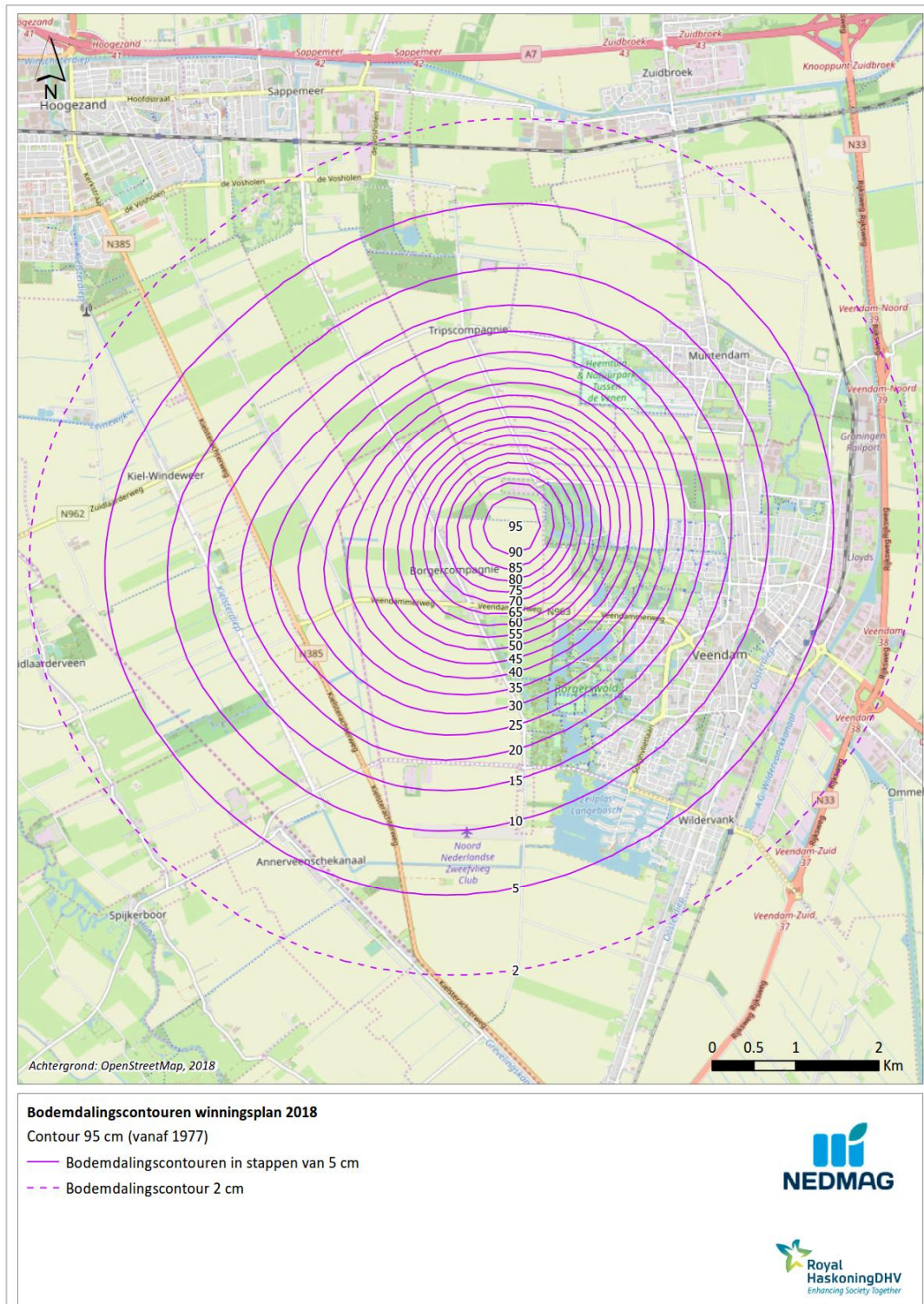
Een waterpassing geeft een goed beeld van de opgetreden bodemdaling:

- De metingen worden onder meer gebruikt om de voorspelde bodemdaling te verifiëren.
- Voor het bepalen van de bodemdaling door zoutwinning wordt een analyse uitgevoerd op de gemeten waterpasdata waarbij een model wordt gebruikt om te corrigeren voor de bodemdaling als gevolg van de gaswinning. Eveneens wordt er gecorrigeerd voor autonome bodemdaling.
- Het Nedmag waterpasmeetnet bestaat uit een groot aantal meetpunten. Er kan evenwel, niet overal gemeten worden.

Om bodemdaling te voorspellen heeft Nedmag een bodemdalingsmodel laten opstellen, dat een verband legt tussen de bodemdaling door zoutwinning en de zoutwinning zelf (het toevloeien van zout naar de caveerne). Resultaten van berekeningen met dit model zijn vervolgens vergeleken met de gemeten bodemdaling door waterpassing. Op basis hiervan is een voorspelling gemaakt die is overgenomen in het winningsplan 2018.

In Figuur 2.3. zijn de contouren weergegeven van de bodemdaling zoals die naar verwachting optreedt bij een maximale bodemdaling door zoutwinning van 95 cm [6]. Deze maximale daling van 95 cm is in deze studie als uitgangspunt genomen voor het bepalen van de maximale invloed van bodemdaling door zoutwinning op de bebouwing en infrastructuur.





Figuur 2.3 Bodemdalingsgebied met een maximale bodemdaling van 95 cm [6]

### 3 Effect van bodemdaling op gebouwen

#### 3.1 Inleiding

Als gevolg van onder andere bodemdaling treden zettingen in de grond op en zakken het maaiveld (aardoppervlak) en de funderingslagen. Afhankelijk van de wijze van funderen ontstaat een interactie tussen gebouw en ondergrond en zal het gebouw geheel of gedeeltelijk meezakken. Als deze zakking ongelijkmatig is over de lengte van de muren van het gebouw zullen hierdoor spanningen in de materialen veranderen. Wanneer deze spanningen de materiaalsterkte overschrijden ontstaat schade (scheuren) dan wel, ontstaat er ontoelaatbare vervorming.

Bij het ontwerpen van de fundatie van gebouwen wordt rekening gehouden met de grondslag onder het gebouw. Gebouwen worden op een draagkrachtige laag gefundeerd. Dit betreft meestal een stevige (zand-) laag, die in Nederland op dieptes van vlak onder het maaiveld tot meer dan 20 m diep ligt. Indien deze draagkrachtige laag zeer ondiep aanwezig is kan volstaan worden met een ondiepe fundering, ook wel een fundering op staal genoemd. Ligt de draagkrachtige zandlaag op grotere diepte dan zal gebruik worden gemaakt van een fundering op palen. Hierbij steekt de paalpunt tot in de zandlaag, of wordt gebruik gemaakt van de weerstand van de grond over de paallengte (kleef).

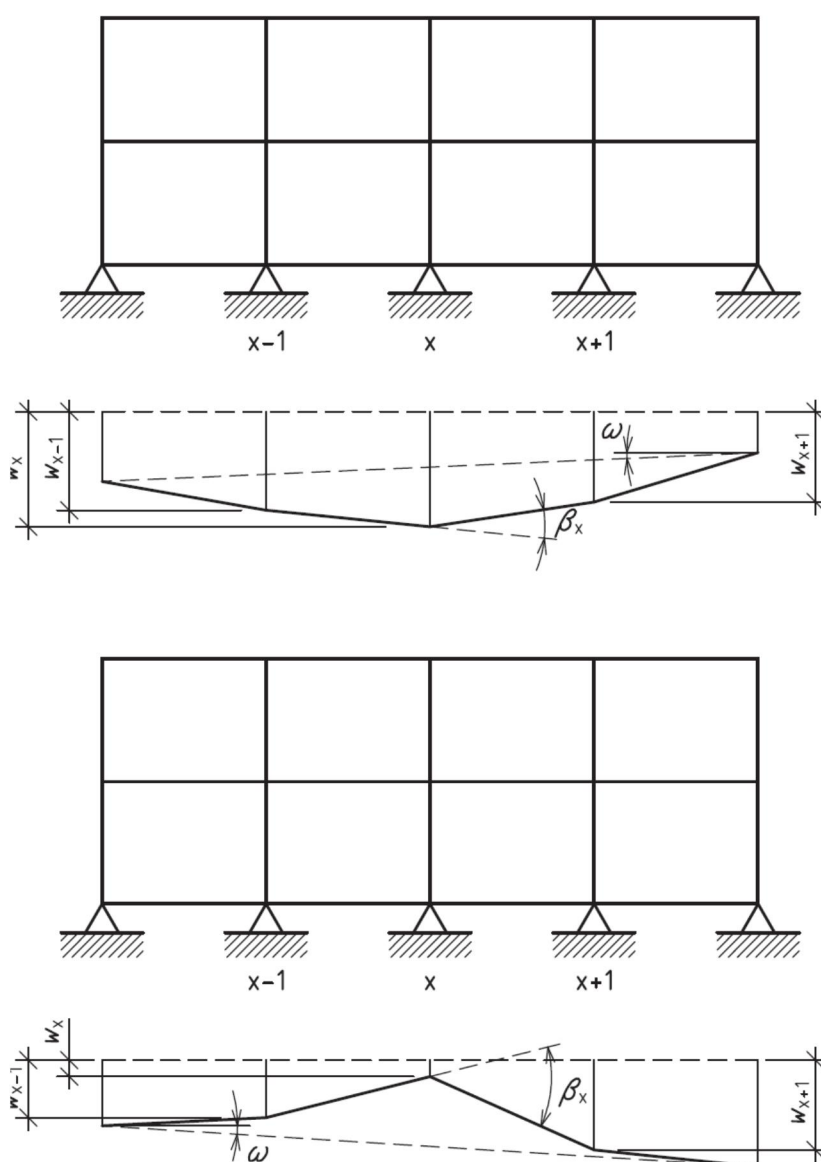
De wijze van funderen is in hoge mate bepalend voor de weerstand van gebouwen tegen zettingen in de ondergrond. Gebouwen die zijn gefundeerd op palen die tot in een draagkrachtige zandlaag steken zijn alleen gevoelig voor zettingen in de diepe ondergrond en niet voor zettingen in de ondiepe ondergrond, tenzij door de wrijvingskracht van de zakkende grond langs de paalschacht (negatieve kleef) de draagkracht van de paal wordt overschreden. Gebouwen op palen die niet tot in de draagkrachtige zandlaag steken zijn gevoelig voor zettingen in zowel de diepe als in de ondiepe ondergrond. De uiteindelijke invloed op de palen is het resultaat van een interactie tussen paal en grond die over de lengte van de paal kan variëren. Voor op staal gefundeerde gebouwen geldt dat deze alleen gevoelig zijn voor zettingen op funderingsniveau. Die zettingen kunnen worden beïnvloed door lagen met geringe stevigheid, zoals veen dat wat dieper in de grond kan voorkomen.

Zettingen in de ondergrond kunnen resulteren in verschillende vormen van zakkingen van een gebouw. Dit betreft het rechtstandig zakken van een gebouw, het scheef zakken van een gebouw en het ongelijkmatig zakken van een gebouw. Zowel het rechtstandig zakken als, meestal, het scheef zakken van een gebouw resulteert niet in schade aan het gebouw, maar kan leiden tot een vermindering van de gebruiksmogelijkheden van het gebouw. Het ongelijkmatig zakken van een gebouw resulteert in gedeeltelijke scheefstand en in opgelegde vervormingen, die vervolgens kunnen resulteren in scheurvorming. Het ongelijkmatig zakken van een gebouw wordt in NEN9997-1:2017 [9] gekarakteriseerd door de volgende grootheden, zie Figuur 3.1:

- Relatieve rotatie ( $\beta_x$  in de onderste twee figuren: gerelateerd aan het verschil in hoogte,  $w$ , tussen twee naburige funderingselementen).
- Scheefstand ( $\omega$  in de bovenste twee figuren: gerelateerd aan het hoogteverschil,  $w$ , over de gehele gevel).

Voor bestaande gebouwen kunnen deze grootheden bepaald worden aan de hand van lintvoegmetingen, bij voorkeur zo dicht mogelijk bij het maaiveld.

Het al dan niet optreden van schade aan een gebouw als gevolg van ongelijkmatige zakkings is uiteraard afhankelijk van de grootte van de ongelijkmatige zakkings. Daarnaast is het ontstaan van schade ook afhankelijk van de opbouw van het gebouw, de toegepaste materialen en de snelheid waarmee de zakkings optreden [1] en [7].



Figuur 3.1 Karakterisering scheefstand en ongelijkmatige zakkings voor een doorsnede van een gebouw, waarbij een funderingspunt is aangegeven met een driehoek [9]

Voor een karakterisering van schade aan gebouwen wordt in Nederland en internationaal veel gebruik gemaakt van de “Ease of repair” tabel, zie Tabel 3.1.

| Schade klasse | Omschrijving                         | Karakterisering schadebeeld                                                                                                                                                                                       | Beïnvloeding op                               |
|---------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 0             | Verwaarloosbaar                      | Haarscheurtjes kleiner dan circa 0,1 mm                                                                                                                                                                           | Esthetica                                     |
| 1             | Zeer licht<br><i>(very slight)</i>   | Kleine scheuren, meestal beperkt tot pleisterwerk, die eenvoudig kunnen worden weggevoerd.<br>Enige scheurvorming in metselwerk.<br>Scheurwijdten tot 1mm.                                                        | Esthetica<br>Gebruikswaarde                   |
| 2             | Licht<br><i>(slight)</i>             | Geringe scheurvorming, kan eenvoudig hersteld worden.<br>Scheuren kunnen aan de buitenzijde zichtbaar zijn en kunnen tot vochtdoorslag leiden.<br>Deuren en ramen kunnen licht klemmen.<br>Scheurwijdte tot 5 mm. | Esthetica<br>Gebruikswaarde / levensduur      |
| 3             | Matig<br><i>(moderate)</i>           | Scheuren zijn zodanig, dat metselwerk dient te worden hersteld. Deuren en ramen klemmen.<br>Mogelijke schade aan nutsaansluitingen.<br>Vochtdoorslag mogelijk.<br>Scheurwijdten van 5 tot 15 mm.                  | Gebruikswaarde<br>Gebruikswaarde / levensduur |
| 4             | Ernstig<br><i>(severe)</i>           | Herstel vergt vervanging van muurdelen en andere constructieve elementen.<br>Bruikbaarheid en toegankelijkheid ernstig aangetast.<br>Voelbare scheefstand.<br>Scheurwijdten van 15 tot 25 mm.                     | Veiligheid<br>Gebruikswaarde / levensduur     |
| 5             | Zeer ernstig<br><i>(very severe)</i> | Volledige renovatie noodzakelijk.<br>Instortingsgevaar.<br>Scheurwijdten groter dan 25 mm.                                                                                                                        | Veiligheid                                    |

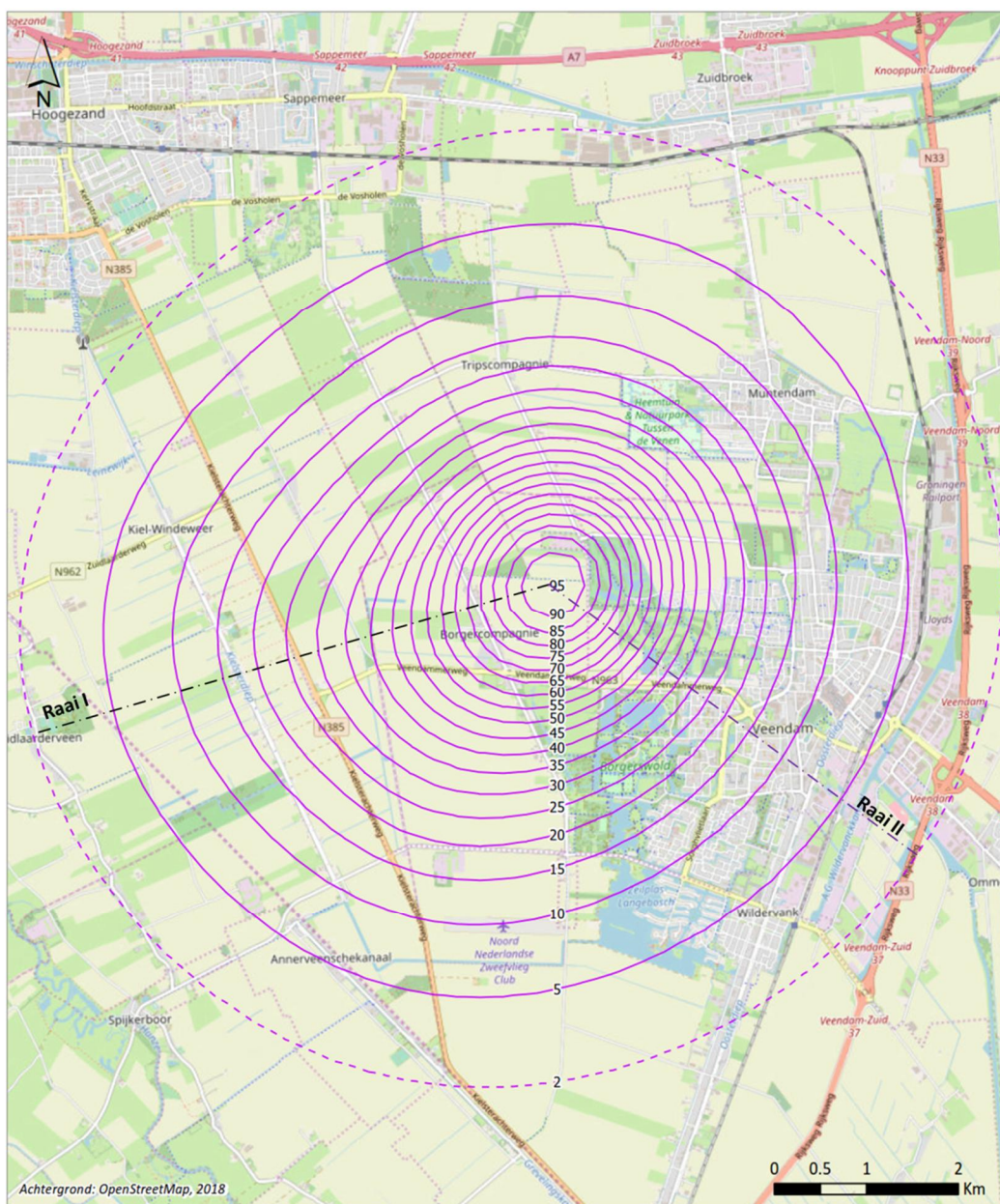
Tabel 3.1 Ease of repair tabel (Nederlandse vertaling) met bijbehorend indicatief schadebeeld naar [2]

De "ease of repair" tabel toont verschillende schadeklassen en een bijbehorend indicatief schadebeeld. In de laatste kolom is aangegeven of de schadeklasse van invloed is op de esthetica, de gebruikswaarde, de levensduur dan wel de veiligheid. De in Tabel 3.1 vermelde schadeklassen worden in paragraaf 3.3 (zie Figuur 3.6) gehanteerd bij de bepaling van de invloed van de bodemdaling op de bebouwing.



### 3.2 Horizontale rek en relatieve rotatie bodem door zoutwinning

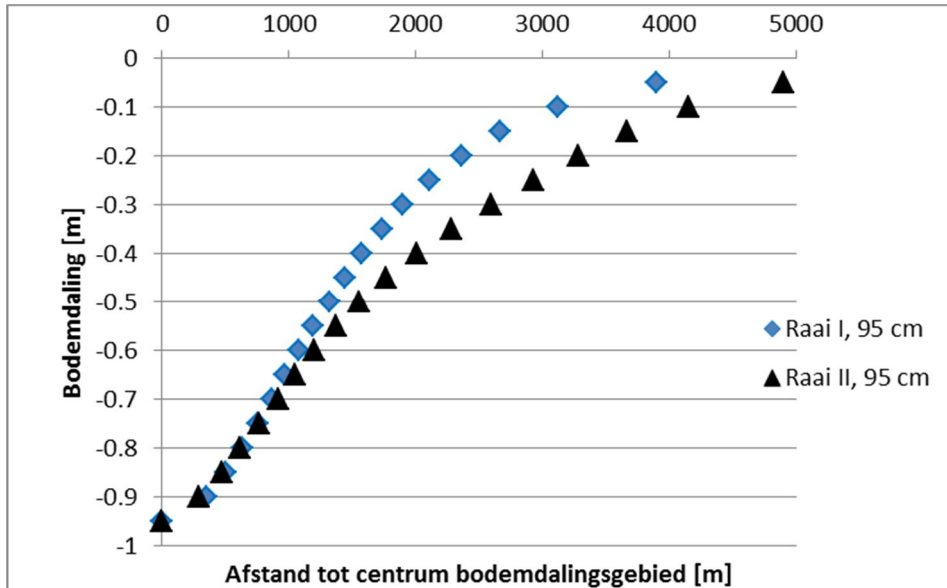
In deze paragraaf wordt de waarde vastgesteld van de parameters die van invloed zijn op de bebouwing namelijk de horizontale rek en de relatieve rotatie. De bodemdaling ten gevolge van het verwijderen van het zout op een diepte van 1,5 -1,8 km uit de cavernes is verspreid over een gebied dat groter is dan het caverneveld zelf en ziet er uit als een grote gelijkmatig gewelfde kom. De in het kader van deze studie aangehouden daling van het zoutwinningsgebied van Nedmag bedraagt in het centrum 95 cm. In Figuur 3.2 zijn twee raaien (doorsneden) aangegeven. Raai II is de raai waarin op basis van de onderlinge ligging van de zakkingscontouren de maximale verwachte horizontale rek optreedt en in raai I treedt op basis hiervan de maximale verwachte relatieve rotatie op.



Figuur 3.2 Bodemdalingsgebied met een maximale bodemdaling van 95 cm (vanaf 1972) [6] met daarin ligging raai I en II



De bodemdaling ter plaatse van de twee raaien van Figuur 3.2 staat in de grafiek van Figuur 3.3 weergegeven.



Figuur 3.3 Bodemdaling bij maximale bodemdaling van 95 cm (vanaf 1972) [6] ter plaatse van raai I en II

Voor het ontstaan van gebouwschade zijn de relatieve rotatie en de horizontale rek van belang, waarvoor in paragraaf 3.3 criteria worden gegeven. Op basis van het bodemdalingsgebied met een maximale daling van 95 cm is ter plaatse van de bodemdalingscontouren de relatieve rotatie bepaald tussen de twee naastgelegen bodemdalingscontouren en vervolgens is op basis hiervan proportioneel de relatieve hoekrotatie bepaald voor een gebouw van 20 m lengte:

$$\beta_{r_n; (r_{n+1} - r_{n-1})} = \left( \frac{u_n - u_{n-1}}{r_n - r_{n-1}} \right) - \left( \frac{u_{n+1} - u_n}{r_{n+1} - r_n} \right)$$

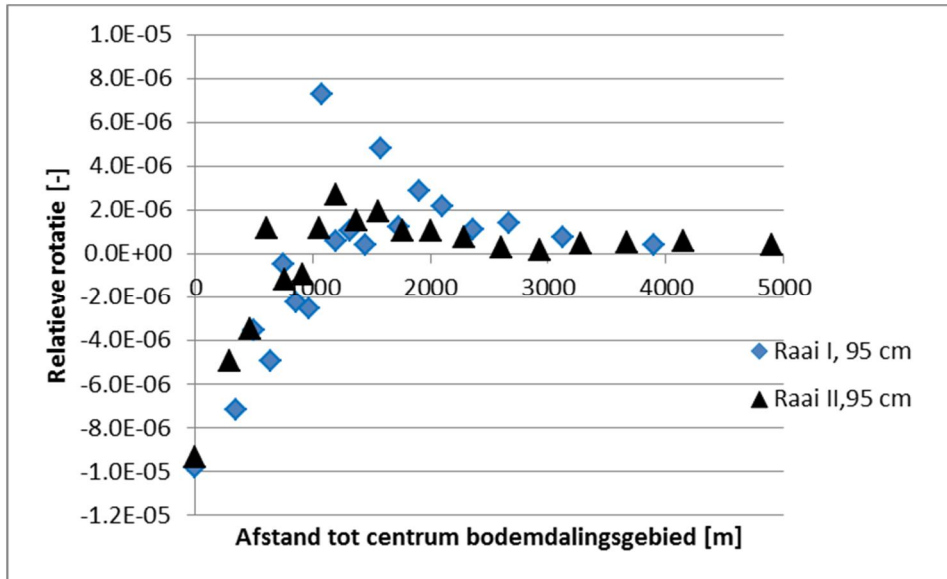
$$\beta_{r_n; 20m} = \frac{20}{r_{n+1} - r_{n-1}} \times \beta_{r_n; (r_{n+1} - r_{n-1})}$$

Waarin:

- $\beta$  relatieve rotatie
- $u$  bodemdaling op een contourlijn
- $n$  contourlijnummer
- $r$  radiale afstand van contourlijn tot aan het centrum van het bodemdalingsgebied

De voor een gebouw van 20 m lengte berekende relatieve rotaties ter plaatse van raai I en II zijn in Figuur 3.4 weergegeven. Uit de analyse blijkt dat de maximale relatieve rotatie (opbuiging) voor een 20 m lang bouwwerk  $\beta_{max; 20m} = 7,3E-06$  is, ofwel 0,0073‰,

zie Figuur 3.4. De laagste waarde van de relatieve rotatie (doorbuiging) voor een 20 m lang bouwwerk  $\beta_{max;20m} = -9,8E-06$  is, ofwel  $-0,0098\%$ , zie Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Relatieve rotatie ter plaatse van raai I en II van maaiveld voor gebouwlengte van 20 m in het bodemdalingsgebied met maximale bodemdaling van 95 cm [6]

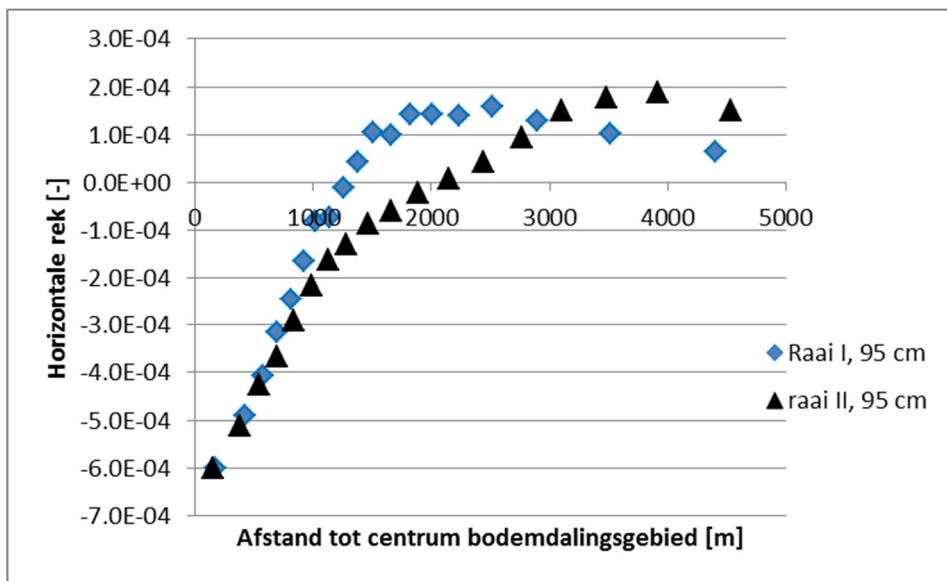
Door O'Reilly & New is [10] een verband tussen de horizontale vervorming,  $w$ , en verticale verplaatsing,  $u$ , gegeven, op een horizontale afstand  $r$  van een volumeverlies/ontgraving op een diepte  $z_0$ :

$$w_n = -r_n \frac{u_n}{z_0}$$

Op basis van deze beschrijving is het mogelijk de gemiddelde rek in radiale richting van het bodemdalingsgebied te bepalen door het verschil in horizontale radiale verplaatsing ter plaatse van twee zakkingscontouren te delen door de afstand tussen die twee punten.

$$\varepsilon_{rr;0,5(r_n+r_{n-1})} = \frac{w_n - w_{n-1}}{r_n - r_{n-1}}$$

Voor het 0,95 m diepe bodemdalingsgebied en diepte  $z_0 = 1500$  m is de horizontale rek aan het maaiveld bepaald. De berekende horizontale rek voor raai I en II zijn in Figuur 3.5 weergegeven. Uit deze analyse volgt dat voor de raaien I en II de minimale horizontale rek  $-6E-04$  (druk) en de maximale rek  $+1,9E-04$  (trek) zijn, ofwel maximaal  $0,19\%$  (zie Figuur 3.8).



Figuur 3.5 Maximale horizontale rek ter plaatse van raai I en II van het maaiveld bij een bodemdalingsgebied met een maximale bodemdaling van 95 cm [6]

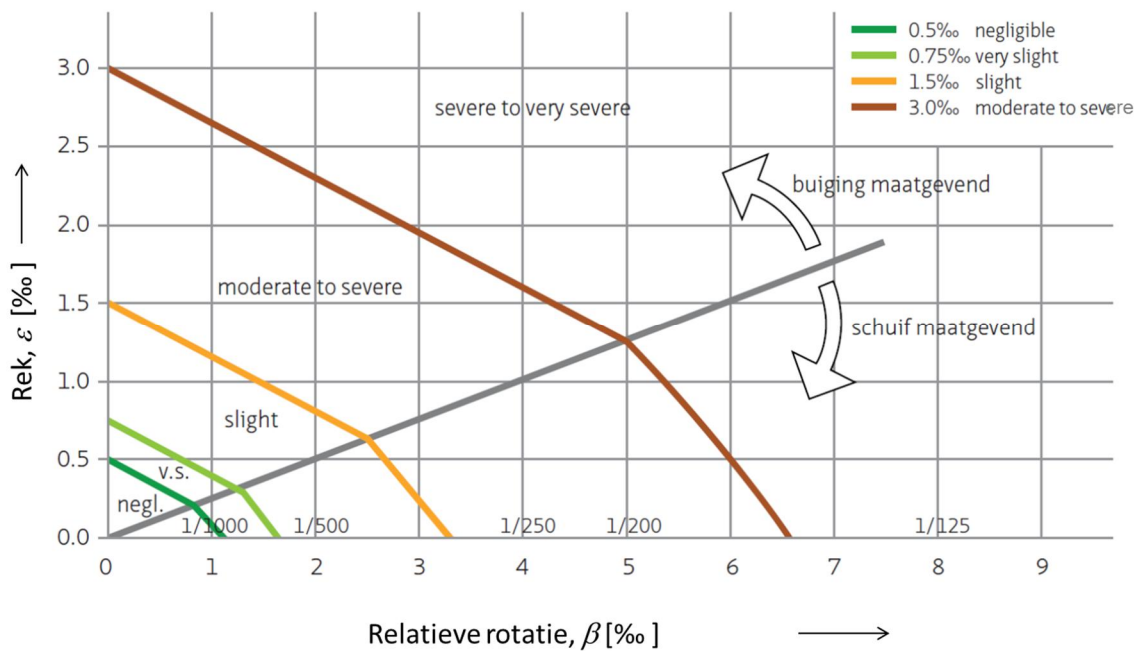
### 3.3 Beïnvloeding van bebouwing door bodemdaling

In deze paragraaf wordt toegelicht welke invloed horizontale rek en de relatieve hoekverdraaiing, zoals bepaald in paragraaf 3.2, hebben op de constructie van gebouwen en op de mogelijke kans op schade aan gebouwen. Allereerst wordt uitgelegd hoe schade aan gebouwen kan ontstaan.

#### 3.3.1 Relatie gebouwvervorming en mate van beïnvloeding

Van de constructie materialen is metselwerk het gevoeligst voor verschillen in zetting. De internationaal meest toegepaste en breed geaccepteerde methode voor het berekenen van de schade op uit metselwerk bestaande gebouwen, is de door Boscardin [3] en Son&Cording [12] beschreven methode [1].

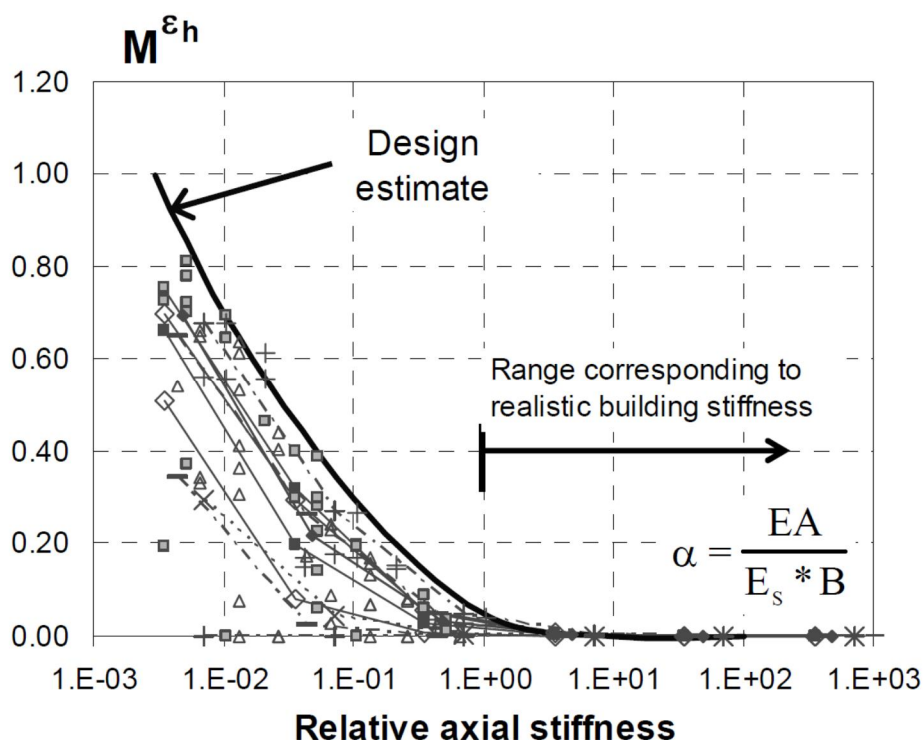
In deze methode is het schadecriterium gebaseerd op een combinatie van de relatieve rotatie en de externe horizontale rek. Het gebouw wordt opgevat als een zogenaamde ligger met zowel buig-als afschuifstijfheid. In Figuur 3.6 is de relatie tussen relatieve rotatie  $\beta$ , horizontale rek  $\varepsilon$  en schadebeeld gegeven die op deze wijze is bepaald [1]. De overgangen tussen schadebeeld (“ease to repair”) klassen in de grafiek zijn gebaseerd op de maximaal optredende rek (trek) in het metselwerk. Door de combinatie van de relatieve rotatie en de externe horizontale rek van een gebouw in Figuur 3.6 uit te zetten wordt de bijbehorende schadebeeld (“ease to repair”) klasse gevonden.



Figuur 3.6 Relatie relatieve rotatie, horizontale rek en schadebeeld naar Son&Gording [1]

### 3.3.2 Overdracht grondvervormingen naar bouwwerk

Vanwege een stijfheidsverschil tussen gebouw en ondergrond zal een bouwwerk de grondvervormingen beperkt volgen. Uit onderzoek blijkt dat bouwwerken de horizontale rek van de bodem slechts zeer beperkt kunnen volgen. In het COB/ Delft Cluster rapport "Aanbevelingen voor Bouwkuipen in Stedelijke omgeving" [1] wordt hiervoor Figuur 3.7 gepresenteerd. Hieruit volgt dat, als bovengrens, een gebouw maximaal 6% van de horizontale bodemvervorming kan volgen zijnde het meest ongunstige geval binnen de realistisch geachte range van gebouwstijfheden zoals weergegeven in Figuur 3.7 voor de meest kwetsbare vorm van fundering. Dit betekent dat het direct toepassen van horizontale rek van de bodem in Figuur 3.6 het schadebeeld overschat (zie paragraaf 3.4).



Figuur 3.7 Modificatiefactoren voor axiale stijfheid volgens [11] Let op: deze figuur geldt alleen voor funderingen op staal met een continue fundering

### 3.3.3 Snelheid van grondvervormingen en bouwkundige staat van bouwwerk

Ten gevolge van kruipeigenschappen van materialen neemt bij langzame vervormingen de kans op gebouwschade af. Daarnaast neemt de kans op schade toe bij een slechtere conditie van een bouwwerk. In Tabel 3.2 zijn aanwijzingen gegeven hoe voor deze effecten de maximale toelaatbare vervorming kan worden aangepast [1].

| zettingssnelheid      | toename van de toelaatbare rek | staat van het gebouw | afname van de toelaatbare rek |
|-----------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| snelle zetting        | 0%                             | goede conditie       | 0%                            |
| matig snelle zetting  | 20%                            | matige conditie      | 20-30%                        |
| lange termijn zetting | 55%                            | slechte conditie     | 55-75%                        |

Tabel 3.2 Aanwijzingen voor aanpassing van de maximaal toelaatbare vervorming om rekening te houden met de initiële staat van het gebouw en snelheid van de vervorming bij het voorspellen van schade [1]

Bij een gebouw in slechte conditie neemt de toelaatbare rek af met wel 75% [1]. Door de toelaatbare rek te vermenigvuldigen met een factor  $f_{bouwstaat} = 0,25$  (=100%-75%) kan de toelaatbare rek hiervoor worden gecorrigeerd.

De definitie die bij lange termijn zetting in Tabel 3.2 hoort is dat er maximaal 10-15% van de totale zetting in het eerste jaar optreedt, wat de maat is voor de hoogste zettingssnelheid.



Voor een eindzetting van maximaal 95 cm mag de zakkingsnelheid maximaal dus 9,5 à 14,25 cm/jaar zijn om over lange termijn zettingen te mogen spreken. Door Nedmag is aangegeven dat de maximale bodemdalingssnelheid onder de grens van 9,5 cm/jaar ligt. De waarden voor langere termijn zetting in Tabel 3.2 zijn dus van toepassing.

De bodemdalingssnelheid ten gevolge van de zoutwinning is dus een lange termijn proces. Hierdoor neemt de toelaatbare rek toe met 55% [1]. Door de toelaatbare rek te vermenigvuldigen met een factor  $f_{\text{snelheid}} = 1,55$  (=100%+55%) kan de toelaatbare rek worden gecorrigeerd.

Voor een in slechte conditie verkerend gebouw zou volgens [1] de combinatie van zeer langzame zetting en de bouwkundige staat resulteren in een correctie van  $f_{\text{bouwstaat}} \times f_{\text{snelheid}} = 0,25 \times 1,55 = 0,39$ .

#### 3.3.4 TUDelft 2018 benadering

In het recente onderzoek van de TUDelft [4] is een nieuwe beoordelingscategorie geïntroduceerd die neerkomt op “geen schade” van bebouwing. De onderzoekers komen tot de conclusie dat binnen het gebied waar Son&Gording in Figuur 3.6 “verwaarloosbare schade” aangeeft een grens kan worden aangegeven waaronder geen schade optreedt. Boven deze grens stelt [4] dat:

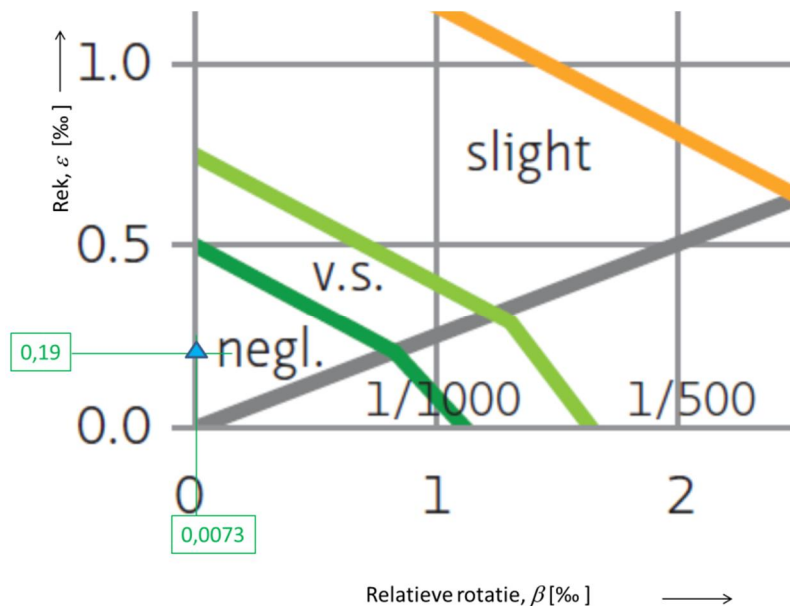
*“Op microniveau is in een gebouw dan mogelijk al een vorm van schade opgetreden, terwijl deze nog niet met het blote oog zichtbaar is in de vorm van (micro)scheuren.”*

De onderzoekers houden als falsificatiecriterium voor gebouwvervormingen aan: een horizontale rek van 0,2 ‰ en een hoekvervorming (relatieve rotatie) van 0,4 ‰.

#### 3.4 Vergelijking rek en relatieve rotatie van de bodem met gebouwschadecriteria

De laagste waarde van de relatieve rotatie (doorbuiging) = -0,0098‰. treedt op in het centrum van de bodemdalingsskom, in dat gedeelte van de bodemdalingsskom treedt een negatieve waarde van de horizontale rek (druk) op die scheurvorming tegengaat. De maximale waarde van de relatieve rotatie gecombineerd met horizontale positieve rek (trek) leidt tot de maatgevende situatie.

In Figuur 3.8 (detail van Figuur 3.6) is de maximale bodemrek = 0,19‰ (trek) en relatieve rotatie = 0,0073‰ (opbuiging) van de bodem die in het bodemdalingsgebied kunnen optreden uitgezet, zie de blauwe driehoek (▲). De meest ongunstige maximale rek en relatieve rotatie van de bodem in het bodemdalingsgebied liggen geheel in het gebied van verwaarloosbare vervorming in de benadering van Son & Gording [1].



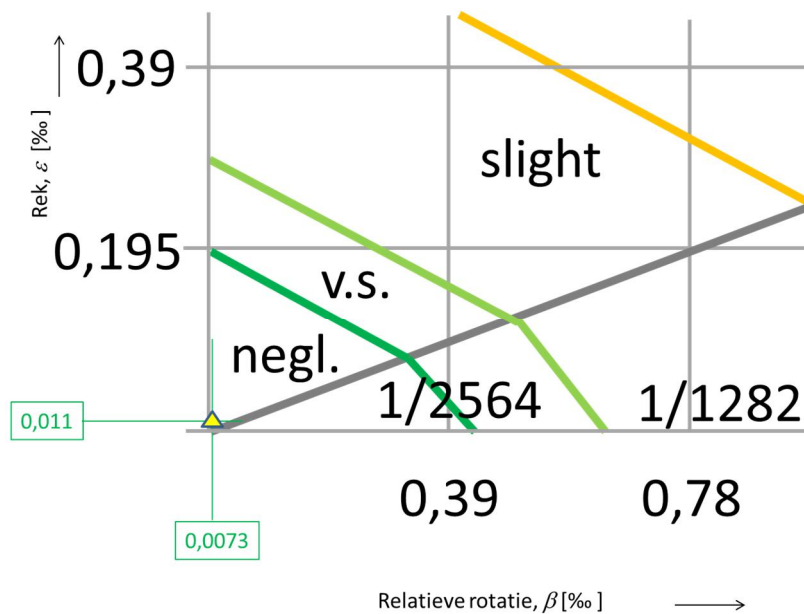
Figuur 3.8 Detail van Figuur 3.6, met daarin uitgezet de combinatie maximaal optredende relatieve rotatie over een lengte van 20 m en maximale rek (trek) bij het bodemdalingsgebied met een maximale diepte van 95 cm (▲)

Verder blijken de maximale bodemrek (trek) van 0,19 ‰, de maximale relatieve rotatie van 0,0073‰ en de absolute waarde van de minimale waarde van de relatieve rotatie van 0,0098‰, van de bodem beneden het “geen schade” criterium uit het recente onderzoek van de TUDelft [5], een horizontale gebouwrek  $\leq 0,2$  ‰ en een gebouwhoekvervorming  $\leq 0,4$  ‰; te liggen.

### 3.5 Toetsing gebouwvervormingen door bodemdaling aan gebouwschade criteria

In de realiteit zal de beïnvloeding van de bebouwing nog minder zijn dan in §3.4 is bepaald aangezien slechts een fractie (6%) van de horizontale bodemrek aan de constructie zal worden overgedragen vanwege de stijfheidsverschillen tussen bodem en constructie zoals in paragraaf 3.3.2 is besproken. Dit betekent dat de maximale aan het gebouw overgedragen horizontale rek reduceert tot 6% van 0,19 ‰ naar 0,011 ‰. Dit gecombineerd met de correctiefactor voor de toelaatbare rek van 0,39 voor zeer langzame zakkingsnelheid en een in slechte conditie verkerend gebouw (zie paragraaf 3.3.3) wordt geïllustreerd in Figuur 3.9.

Figuur 3.9 is gebaseerd op Figuur 3.8 waarbij de waarden op de assen zijn vermenigvuldigd met de in paragraaf 3.3.3 afgeleide factor 0,39. In deze figuur zijn verder de gecorrigeerde maximale rek (trek) van 0,011 ‰. en de maximale relatieve rotatie van de bodem van 0,0073‰ (opbuiging) uitgezet zie de gele driehoek (▲).



Figuur 3.9 Voor lange termijn vervorming en slechte bouwstaat conform [1] aangepast toelaatbare rekgrenzen met daarin uitgezet (met  $\triangle$ ) de combinatie van maximaal optredende relatieve rotatie over een lengte van 20 m en 6% van de maximale horizontale rek (trek) in het bodemdalingsgebied bij een maximale diepte van 95 cm.

Verder blijken de maximale, van de bodem naar het gebouw overgedragen, horizontale rek (trek) van 0,011 ‰, de maximale relatieve rotatie van de bodem 0,0073‰ en de absolute waarde van de minimale waarde van de relatieve rotatie van de bodem 0,0098‰, beneden het “geen schade” criterium uit het recente onderzoek van de TUDelft [4] te liggen, te weten bij een horizontale gebouwrek  $\leq 0,2$  ‰ en een gebouwhoekvervorming  $\leq 0,4$  ‰.

## 4 Beïnvloeding infrastructuur

Als gevolg van onder andere bodemdaling, treden zettingen in de grond op en zakt het maaiveld (aardoppervlak) en de funderingslagen. Afhankelijk van de wijze van funderen ontstaat een interactie tussen infrastructuur en ondergrond en zal infrastructuur geheel of gedeeltelijk meezakken. Als deze zakking ongelijkmatig is over de lengte van een infrastructureel object zullen hierdoor spanningen in de materialen veranderen. Wanneer deze spanningen de materiaalsterkte overschrijden ontstaat schade (scheuren) dan wel, ontstaat er ontoelaatbare vervorming.

In het vorige hoofdstuk is voor de bepaling van het effect van bodemdaling op gebouwen uitgegaan van een gebouw van het meest gevoelige bouw materiaal: metselwerk. Uit de analyse in hoofdstuk 3 volgde dat de vervormingen van de bodem dusdanig gelijkmatig zijn dat deze niet tot schade leiden.

Aangezien zowel de geometrie als de toegepaste materialen in infrastructuur niet ongunstiger zijn dan die van het, in hoofdstuk 3 beschouwde, metselwerk bouwwerk geldt eveneens voor infrastructuur dat de vervormingen van de bodem dusdanig gelijkmatig zijn dat deze niet tot schade leiden.

## 5 Conclusie

Gebouwschade en schade aan infrastructuur door zetting is een lokaal verschijnsel. Er treedt pas gebouwschade op wanneer zettingsverschillen onder het gebouw tot een zodanige vervorming van het gebouw leiden dat de sterkte van het gebouw of onderdelen ervan overschreden worden, hetzelfde geldt voor infrastructuur. Bodemdaling die direct door zoutwinning ontstaat, zal niet tot deze situatie leiden.

Uit het onderzoek blijkt dat de bodemdaling, die direct door zoutwinning aan de oppervlakte ontstaat, ter plaatse van infrastructuur en gebouwen zo gelijkmatig is dat de zettingsverschillen en horizontale rek ver onder de toelaatbare grenzen blijven, waardoor de bodemdaling niet tot schade aan infrastructuur en gebouwen leidt. Ook bij oudere gebouwen en infrastructuur is het niet te verwachten dat er schade ontstaat. Deze bevindingen zijn in lijn met de bevindingen uit de eerdere versie van deze studie uit juli 2018 [5].



## 6 Literatuur

- [1] Aanbevelingen voor het ontwerp van bouwkuipen in stedelijke omgeving F531-ER-12-49785 COB-DC, 2012
- [2] Assessment of damage in low-rise buildings, BRE digest 251 Building Research Establishment 1995
- [3] Building response to excavation-induced settlement. Boscardin, M. D., and Cording, E. J Journal of Geotechnical Engineering 115, 1 Jan.1989.
- [4] Onderzoek oorzaken bouwkundige schade Groningen, TUDelft rapportnummer CM-2018-01 van 11 juli 2018.
- [5] Invloed van bodemdaling door zoutwinning Nedmag op bebouwing ref. 1221076-000-GEO-007 Deltares, 3 juli 2018
- [6] NEDMAG Bodemdalingscontouren winningsplan 2018, Contour 95 cm v2 Royal HaskoningDHV, 2018
- [7] Een literatuurstudie betreffende de zettingen van gebouwen en ermee samenhangende schade rapport BI-82-53, TNO-IBBC oktober 1982
- [8] <http://www.namplatform.nl/> juni 2016
- [9] NEN9997-1:2017, Geotechnisch ontwerp van constructies –Deel 1: Algemene regels, NNI 2017
- [10] Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction, O'Reilly, M.P. and New, B.M., Tunnelling'82, IMM, London 1982
- [11] The response of buildings to movements induced by deep excavations, Goh, K. H., Mair, R.J., proceedings of TC28 conference Roma, 2011
- [12] Tunneling, building response and damage estimation. Son, M., Cording, E.J.Tunnelling Underground Space Technology, 2001.