

Effecten van bodemverplaatsingen op historische gebouwen

Literatuurstudie



Effecten van bodemverplaatsingen op historische gebouwen
Literatuurstudie

Auteur(s)

Henri Havinga

Effecten van bodemverplaatsingen op historische gebouwen

Literatuurstudie




Opdrachtgever	Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap Rijksdienst voor Cultureel Erfgoed
Contactpersoon	Michiel van Hunen
Referenties	Zie Bijlage A
Trefwoorden	Bodembeweging, historische gebouwen, fundering, schadeverschijnselen

Documentgegevens

Versie	1.1
Datum	23-08-2022
Projectnummer	11207845-000
Document ID	11207845-000-GEO-0004
Pagina's	77
Classificatie	
Status	definitief

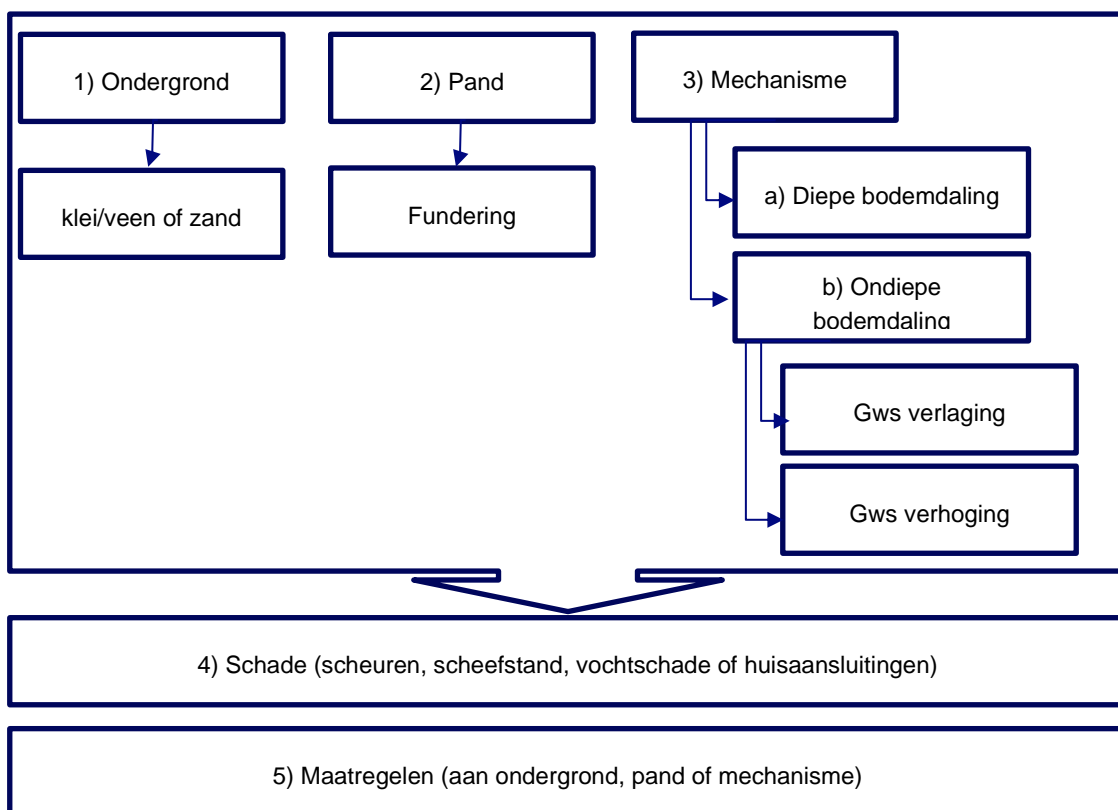
Auteur(s)

	Henri Havinga	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.1	Henri Havinga 	Mandy Korff 	Harm Aantjes 	

Samenvatting

De Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE) wordt steeds vaker geconfronteerd met problemen bij gebouwen die veroorzaakt zijn door bewegingen in of verzakkingen van de ondergrond. RCE heeft behoefte aan kennis over de oorzaken van bodembewegingen en inzicht in de schadeverschijnselen, herstelmethode en herstellkosten in relatie tot deze oorzaken en het type fundering. In deze rapportage is een overzicht gegeven van beschikbare literatuur met betrekking hierop. Hierbij wordt aandacht besteed aan de volgende onderwerpen, zie onderstaand schema.



Ad 1 De ondergrond van Nederland is in sterke mate beïnvloed door menselijk handelen. In klei- en veengebieden treden bodemdalingen op tot maximaal 25 mm per jaar. In Groningen is ten gevolge van de aardgaswinning in 2030 een maaiveldzakking van maximaal 0,4 m voorspeld. In enkele delen van Nederland (met name in het oosten en zuiden), stijgt de bodem. Er zijn metingen en voorspellingen van de bodemdaling en stijging beschikbaar. Deze kunnen worden gebruikt voor een inschatting van de effecten van bodemdaling/stijging.

Ad 2 Historische gebouwen zijn meestal gefundeerd op staal of op houten palen. Voor het beschouwen van de mogelijke schade aan panden door bodembewegingen is inzicht in het type, de afmetingen, diepte en staat van de fundering essentieel. Van veel panden is dit niet beschikbaar en is funderingsonderzoek noodzakelijk. Per bouwperiode is in dit rapport aangegeven wat voorkomende funderingstypen zijn.

Ad 3 Er zijn vele mechanismen die tot schade aan monumenten kunnen leiden. De oorzaak kan in het pand gelegen zijn en een relatie hebben met belastingen of er kunnen externe oorzaken zijn in de vorm van trillingen en zakkingen. In deze literatuurstudie worden de oorzaken gerelateerd aan bodemdaling of stijging beschreven.

Ad 3a Gaswinning en zoutwinning zijn oorzaken van diepe bodemdaling. Uit onderzoek naar diepe bodemdaling/stijging in de gasopslag Norg en het Groningenveld blijkt dat dit niet leidt of niet heeft geleid tot schade aan gebouwen in directe zin. Uit onderzoek naar de gevolgen van zoutwinning blijkt dat de hieruit volgende bodemdaling meestal gelijkmatig is en niet tot schade leidt. Als de zoutholtes (cavernes) instorten kan wél schade aan gebouwen en infrastructuur ontstaan. Door diepe bodemdaling kan wel op indirecte wijze schade ontstaan aan gebouwen en monumenten. De oorzaak hiervan kan liggen in het aanpassen van boezempeil of polderpeil of het dalen van het maaiveld naast een fundering op staal die al bijna tot de maximale capaciteit wordt belast.

Ad 3b Grondwaterstandsverlaging door bijvoorbeeld een peilverlaging of droogte kan leiden tot samendrukking van slappe lagen (klei en veen). Daarnaast kan grondwaterstandsverlaging leiden tot de krimp van klei en oxidatie van veen. Deze mechanismen leiden tot ondiepe bodemdaling. Met name bij ondiepe funderingen kan dit leiden tot zakkingsverschillen. Bij een fundering op houten palen kan de grondwaterstandsverlaging leiden tot droogstand van het hout. Hierdoor kan het hout gaan rotten en de paal haar draagkracht verliezen.

Panden op gemengde funderingen (deel op staal, deel op palen) hebben een grotere kans op schade ten gevolge van bodemdaling/stijging dan panden met één type fundering.

Ook een verhoging van de grondwaterstand kan bij een fundering op staal leiden tot een afname van de draagkracht. Hierdoor kunnen zetting en zettingsverschillen ontstaan. Dit kan leiden tot schade. De kans op schade neemt toe als de grondwaterstand boven het funderingsniveau stijgt. Een geringe grondwaterstijging ten gevolge van bijvoorbeeld een peilverhoging (bijvoorbeeld circa 0,15 m) zal nagenoeg nooit de oorzaak zijn van schade. Voor twijfelgevallen is een beoordelingsprocedure beschikbaar.

Ad 4 Er is een aanzienlijke hoeveelheid literatuur aangaande de relatie tussen bodemdaling/stijging en schade aan panden. Een groot deel hiervan betreft bouwkundige relaties, deze zijn in beperkte mate in deze rapportage opgenomen. Schades aan panden treden vaak op in de vorm van scheuren, scheefstand, vochtschade of schade aan huisaansluitingen. Er zijn verschillende oorzaken van schade zoals trillingen, belastingen en zakkingsverschillen. Scheuren en scheefstand hangen samen met zakkingsverschillen. Er zijn voor metselwerk relaties tussen de zakkingsverschillen en de bijbehorende schadeklasse en restlevensduur.

Ad 5 Er is veel onderzoek verricht (en gaande) om de oorzaken van bodemdaling te verminderen. Dit betreft dan het verminderen van de aandrijvende mechanismen (met name via het beheersen van de grondwaterstanden). Hiervoor is overeenstemming met veel stakeholders nodig. Voor het verminderen van de invloed van bodemdaling en stijging aan individuele panden is funderingsverbetering (nieuwe paalfundering dan wel bodeminjecties) de ge-eigende en goed bekende, doch vaak kostbare weg. Voor het herstel van schades aan gebouwen als gevolg van bodemdaling zijn kentallen voor de schadekosten beschikbaar. Dit betreft het herstel van scheuren, funderingen en schilderwerk.

Op grotere, regionale schaal zijn maatregelen vaak complex en is veel minder literatuur beschikbaar. In deze rapportage is een casestudy uit Gouda opgenomen waar men scenario's voor omgaan met bodemdaling heeft afgewogen. De methodiek van de case studie van Gouda kan gebruikt worden voor een afweging van maatregelen in bepaalde gebieden of voor monumenten specifiek.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding en vraagstelling	9
1.1	Achtergrond/aanleiding	9
1.2	Vraagstelling en leeswijzer	9
2	Aanpak	11
2.1	Inleiding	11
2.2	Lijn 1 Literatuurstudie schadeverschijnselen monumenten	11
2.3	Lijn 2 Herstelmethode en herstelkosten	12
3	Bodemdaling/stijging in Nederland	13
3.1	Totaal beeld bodemdaling/stijging	13
3.2	Bodemdaling door aardgaswinning. NAM velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe	14
3.3	Bodemdaling Friesland	14
3.4	Voorspelling bodemdaling Nederland	15
3.5	Metingen bodemdaling/stijging	16
3.6	Conclusies bodemdaling/stijging	17
4	Funderingen van monumenten	19
4.1	Inleiding	19
4.2	Algemene tijdlijn	20
4.3	Lokale ervaringen	22
4.3.1	Amsterdam	22
4.3.2	Dordrecht	23
4.3.3	Rotterdam	23
4.3.4	Alkmaar	24
4.3.5	Gouda	24
4.3.6	Delft	25
4.3.7	Friesland	25
4.4	Conclusies funderingen van monumenten	26
5	Schades aan monumenten	27
5.1	Typen schade	27
5.1.1	Scheuren en scheefstand	27
5.1.2	Vochtindringing	33
5.1.3	Schade aan aansluitingen	34
5.2	Oorzaken van schade/scheurvorming	35
5.3	Conclusies	37
6	Directe effecten van diepe bodemdaling/stijging	38

6.1	Mechanismen die tot schade leiden	38
6.2	Schade aan gebouwen door diepe bodemdaling en stijging	38
6.3	Invloed van bodemdaling door zoutwinning op bebouwing en infrastructuur	39
6.4	Conclusies	39
7	Indirecte effecten diepe bodemdaling/stijging	40
7.1	Indirecte schade-effecten van diepe bodemdaling en -stijging bij het Groningen gasveld en gasopslag Norg	40
7.2	Schade bij gelijkmatige bodemdaling	45
7.3	Conclusie	45
8	Effecten ondiepe bodemdaling -Grondwaterstandsverlaging, droogte	46
8.1	Inleiding	46
8.2	Impact droogte op houten paal funderingen	47
8.3	Impact droogte op funderingen op staal	49
8.3.1	Samendrukking in klei en veen	50
8.3.2	Krimp van klei en veen	50
8.3.3	Oxidatie van klei en veen	53
8.4	Samenvatting methode schatting herstelkosten	54
8.5	Conclusie	56
9	Effecten ondiepe bodemdaling -grondwaterstandsverhoging	57
9.1	Effecten grondwaterstandsverhoging in Nederland	57
9.2	Effecten grondwaterstandsverhoging internationaal	58
9.3	Conclusies	59
10	Maatregelen	60
10.1	Maatregelen in de vorm van regelgeving	60
10.2	Maatregelen tegengaan oorzaak bodembeweging	60
10.3	Maatregelen op pand niveau	61
10.3.1	Funderingsherstel	61
10.3.2	Schadeherstel scheuren	62
10.3.3	Maatregelen tegen vochtindringing	63
10.3.4	Oplossingen voor huisaansluitingen	64
10.4	Case Gouda op niveau historische binnenstad	65
10.4.1	Inleiding	65
10.4.2	Situatie Gouda	65
10.4.3	Economische analyse	66
10.5	Conclusies	69
11	Conclusies en vervolgstappen	70
11.1	Conclusies bodemdaling	70
11.2	Conclusies funderingen monumenten	70
11.3	Conclusies schade aan monumenten	70
11.4	Conclusies effecten/mechanismen	70

11.5	Conclusies mogelijke maatregelen	71
11.6	Vervolgstappen	71
A	Relevante beschikbare literatuur	73

1 Inleiding en vraagstelling

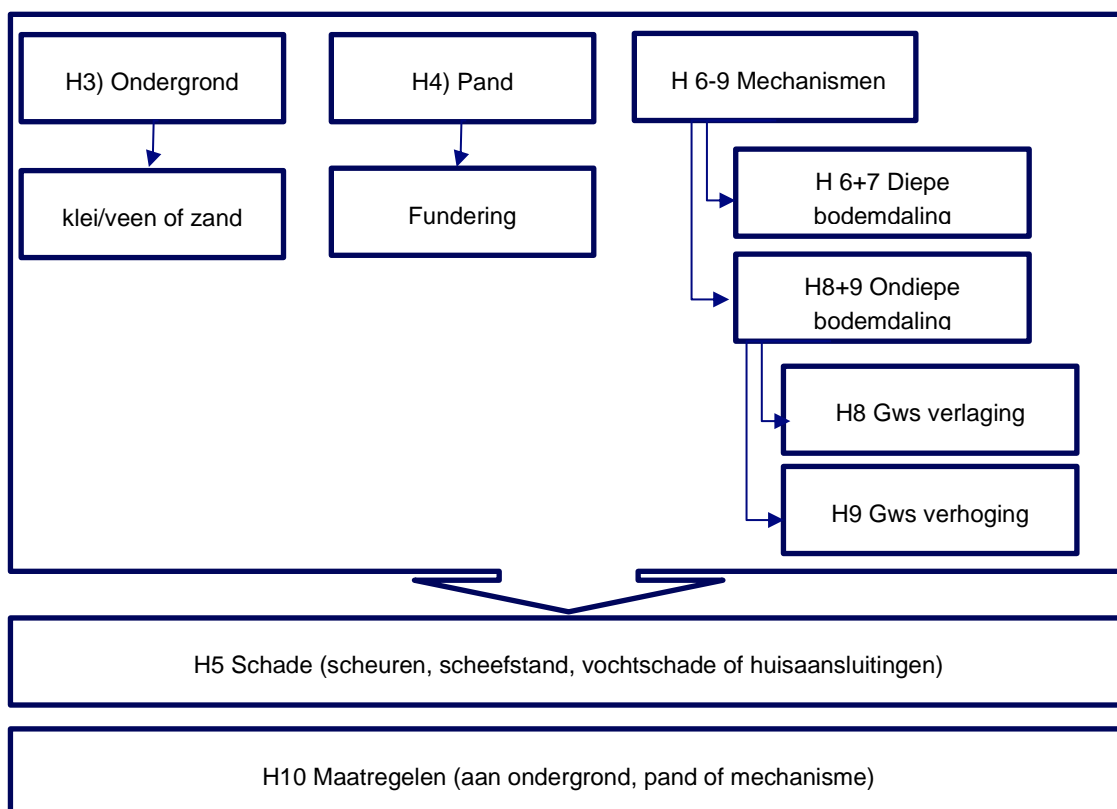
1.1 Achtergrond/aanleiding

De Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE) wordt steeds vaker geconfronteerd met problemen bij gebouwen die veroorzaakt zijn door bewegingen in of verzakkingen van de ondergrond. De erfgoedsector in met name Groningen (maar ook op andere plaatsen in Nederland) heeft te maken met een veelheid van invloeden die de monumenten nadelig kunnen beïnvloeden en kunnen leiden tot schade. Om handelingsperspectief voor met name eigenaren te vergroten vraagt de Rijksdienst voor Cultureel Erfgoed (RCE) om hulpmiddelen om erfgoedprofessionals een beter beeld van/meer kennis over de oorzaken van bodembewegingen te geven en tevens inzicht in de schadeverschijnselen, herstelmethoden en herstelkosten in relatie tot de oorzaken, het type fundering, het bouwtype en de bouwperiode. Beoogd is dat op basis hiervan de adviseurs van de RCE vergunnings- en subsidieaanvragen beter kunnen beoordelen en ze eigenaren beter kunnen adviseren en voorzien van kennis over dit onderwerp.

1.2 Vraagstelling en leeswijzer

In het kader van de aardbevingsproblematiek zijn in Groningen in het afgelopen decennium door verschillende partijen allerlei soorten onderzoek uitgevoerd. Er lijkt al veel kennis beschikbaar te zijn. Deze kennis is nog versnipperd en onvoldoende in samenhang ontsloten. RCE vraagt Deltares allereerst om een synthetiserende literatuurstudie uit te voeren. Het gaat hierbij om het verzamelen en inhoudelijk samenvatten van de op dit onderwerp beschikbare literatuur en data. Het doel is een beter beeld te krijgen van/meer kennis over de oorzaken van de bodembewegingen en meer inzicht in te krijgen in de schadeverschijnselen, in relatie tot de oorzaken van de bodembewegingen, het type fundering, het bouwtype en de bouwperiode. Het rapport moet een overzicht geven van de voor dit thema relevante beschikbare literatuur en data. De literatuur wordt geanalyseerd, samengevat en ontsloten voor erfgoedprofessionals.

In dit rapport wordt na de beschrijving van de aanpak (H2) een overzicht gegeven van de relevante beschikbare literatuur (H3-10). Elk deel/hoofdstuk wordt afgesloten met een conclusie, welke samengevoegd zijn in het laatste hoofdstuk (H11) dat tevens vooruit kijkt naar het vervolg van het onderzoek. De onderwerpen die aan bod komen zijn weergegeven in onderstaand schema:



2 Aanpak

2.1 Inleiding

Er is in Nederland een grote hoeveelheid kennis aanwezig over de invloed van bodembewegingen op gebouwen. Deze kennis is over decennia opgebouwd. Toch ontbreekt het handelingsperspectief vooral door twee oorzaken: ten eerste de versnippering van de kennis en mogelijk de beperkte toegankelijkheid hiervan en ten tweede het gebrek aan focus op monumenten. Tevens is het waarschijnlijk zo dat in onderzoeken de focus op het probleem en de analyse ervan in het verleden groter is geweest dan de focus op maatregelen en kosten voor herstel.

De eerste lijn van het onderzoek is dan ook om door interpretatie en synthese van beschikbare literatuur specifiek voor gebouwde monumenten een beter beeld te krijgen over schadeverschijnselen in relatie tot ondergrond, fundering, bouwtype en bouwperiode. De tweede lijn is een soortgelijk onderzoek naar herstelmethoden en herstelkosten. Hierbij is ook bouwkundige expertise nodig.

Dit rapport is bedoeld als start van lijn 1 en bevat de onderdelen van stap 1.1 a tot en met c. In eerste aanzet wordt de focus gelegd op schade als gevolg van bodemdaling. Naar schade als gevolg van aardbevingen of andere trillingsbronnen (bijvoorbeeld verkeer) (1.1 d) en onderdelen van stappen 1.2 en 1.3 wordt in een vervolgstudie gekeken.

2.2 Lijn 1 Literatuurstudie schadeverschijnselen monumenten

Stap 1.1

Als eerste stap in het onderzoek wordt een overzicht opgesteld van directe en indirecte (schade-)effecten van bodembewegingen op gebouwde monumenten. In deze stap zijn vier onderdelen voorzien:

- a. Paden waarlangs bodemdaling of stijging plaatsvindt.
 - a1. Diepe bodemdaling door bijvoorbeeld mijnbouw, grondwaterwinning.
 - a2. Ondiepe bodemdaling, bijvoorbeeld door verandering van grondwaterstand ten opzichte van funderingen, krimp/zwel, oxidatie, zetting door bouwwerkzaamheden, droogte, kruip, verweking.
- b. De factoren die de grootte van die veranderingen bepalen en in welke omstandigheden deze optreden.
- c. Schademechanismen die kunnen ontstaan, uitgesplitst naar oorzaak, type fundering en bodemopbouw.
- d. Idem voor aardbevingen en trillingen (bijvoorbeeld door verkeer) welke ook schade kunnen veroorzaken.

De onderdelen a t/m c zijn in onderhavige rapportage opgenomen. Onderdeel d zal in een vervolgstudie aan bod komen.

De literatuur die wordt gezocht is gericht op de Nederlandse omstandigheden. Voor specifieke onderdelen (bijvoorbeeld krimp/zwel) wordt tevens in de ons omringende landen informatie vergaard. Het is nadrukkelijk niet de bedoeling een volledig internationale studie uit te voeren.

Stap 1.2

Nadat de algemene analyse is uitgevoerd is het de bedoeling om voor een specifiek gebied voor gebouwde monumenten ook meer zicht te krijgen op de urgentie van de problematiek voor de RCE en monument eigenaren. Daarbij kan mogelijk ook het aantal schademeldingen per gebied/regio/bodemtypen worden gebruikt. In deze stap van het onderzoek worden de resultaten van stap 1,1 voor een nader te bepalen gebied in Groningen verder geanalyseerd en gekwantificeerd door middel van:

- a. Karakterisering van de opgetreden diepe bodemdaling/-stijging op basis van bestaande rapportages.
- b. Karakterisering van ondiepe bodemopbouw onder funderingen.
- c. Kwantificering van de factoren die bijdragen aan de bewegingen.
- d. Kwantificering van de kans op schade.
- e. Vergelijking met aantal schademeldingen per gebied (op basis van informatie RCE).

Stap 1.3

Als derde stap in lijn 1 is voorzien om een specifieke analyse te maken van enkele typen monumenten. Omdat niet al het gebouwde erfgoed op dezelfde wijze constructief en funderings-technisch is opgebouwd, wordt binnen deze activiteit onderscheid gemaakt naar de kwetsbaarheid van verschillende typen monumenten/erfgoed. De belangrijkste typen worden aangeleverd door RCE en ingedeeld aan de hand van constructieve en funderings-technische karakteristieken.

2.3 Lijn 2 Herstelmethode en herstelkosten

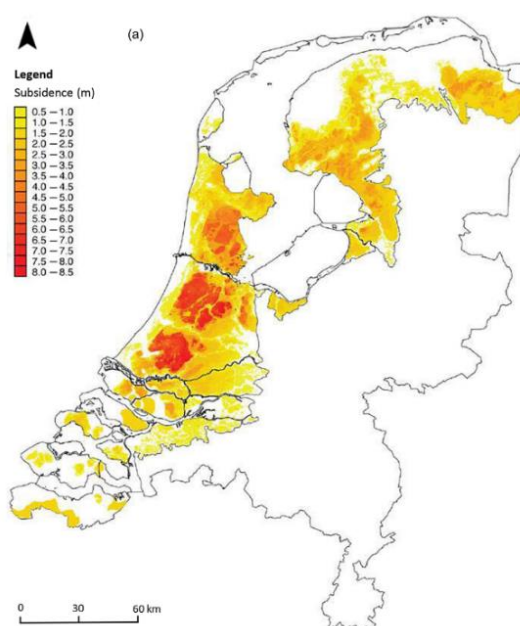
In lijn 2 wordt onderzoek gedaan naar literatuur met betrekking tot herstellmethoden en herstelkosten specifiek voor gebouwd erfgoed. Zoals aangegeven dient voor een totaaloverzicht in deze lijn ook bouwkundige inbreng te worden geleverd door derden.

3 Bodemdaling/stijging in Nederland

3.1 Totaal beeld bodemdaling/stijging

In [Verkenning Bodemdaling 2017] is beschreven hoe de ondergrond van Nederland in sterke mate is beïnvloed door menselijk handelen. De grootste veranderingen traden op in de veen- en kleigebieden (de 'slappe bodems').

In [Erkens et al 2016] is onderzoek uitgevoerd naar de bodemdaling in de afgelopen 1000 jaar in de Nederlandse veengebieden. De eerste oorzaak van de daling is samendrukking en oxidatie van het veen door het verlagen van de grondwaterstand. De tweede oorzaak is het winnen van veen. In het onderzoek is de bodemdaling sinds het jaar 1000 gereconstrueerd. Dit is aangegeven in Figuur 3.1. De grootste bodemdalingen worden gevonden in de voormalige veenwingebieden. In sommige van die gebieden is de bodem in de afgelopen 1000 jaar tot wel 8,5 m gedaald (zie Figuur 3.1).

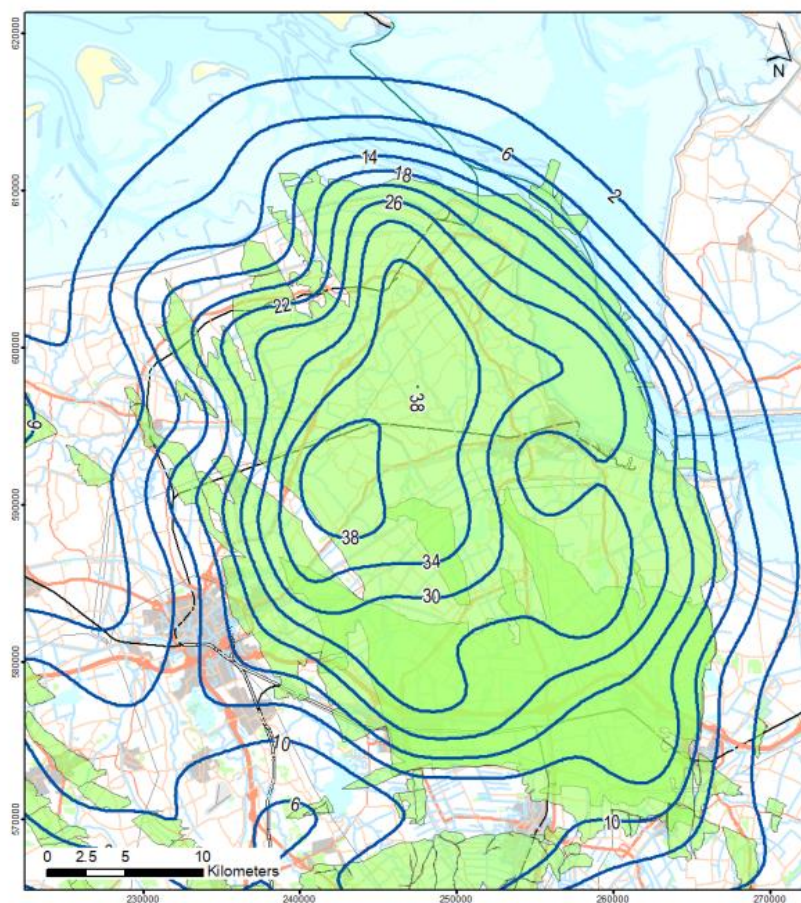


Figuur 3.1: Bodemdaling over de afgelopen 1000 jaar

Dit is bovenop de traag lopende grootschalige (tektonische en iso-statische) bewegingen die van nature al plaatsvinden. Bodemdaling gaat ook vandaag de dag door. Bekende voorbeelden hiervan zijn de bodemdaling door het droogleggen van veengebieden of meren (droogmakerijen) of het indijken van polders. Andere voorbeelden zijn winning van olie, gas, zout of grondwater, het al dan niet permanent verlagen van de ondiepe grondwaterstand (in polders of bij bouwprojecten) en de (bodembelasting door) realisatie van grote infrastructurele of waterbouwkundige werken. Het zijn vooral de door menselijk handelen sterke bodembewegingen (cumulatief tot maximaal ca. 2,5 cm per jaar) die grote financiële en maatschappelijke gevolgen kunnen hebben. De van nature aanwezige bewegingen zijn in dat licht bezien marginaal met ca. 3 cm per eeuw. Hoewel het overgrote deel van de Nederlandse bodembeweging bestaat uit daling, zijn er enkele gebieden, met name in het oosten en zuiden van het land, die stijgen.

3.2 Bodemdaling door aardgaswinning. NAM velden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe

De NAM [NAM 2020] maakt op basis van waterpassingen prognoses van de bodemdaling. In Figuur 3.2 is een voorspelling van de maaiveldzakkingen in 2030 gegeven. De maximale zakking tot 2030 (vanaf 1964) bedraagt 38 cm.



Figuur 3.2 Voorspelling contourlijnen diepe bodemdaling in 2030 in cm t.o.v. de referentie (begin van de gaswinning in 1964) [NAM 2020]. In groen zijn de gasvelden weergegeven.

3.3 Bodemdaling Friesland

Er zijn ook studies die de bodemdaling in een gebied onderzoeken. Een voorbeeld is het onderzoek naar bodemdaling in Friesland. Deltares is niet bekend met lokale onderzoeken in andere provincies. In deze studie komen meerdere oorzaken van bodemdaling aan de orde. De conclusies van de studie zijn interessant omdat deze een goed beeld geven van de meest voorkomende oorzaken van schades en de situatie (grondslag, constructie gebouw, fundering) waarin de schade kan optreden.

In [Onderzoekscommissie Bodemdaling Friesland 1987] is onderzoek verricht naar de mogelijke oorzaken en gevolgen van de dalingen van de bodem in de provincie Friesland, in het bijzonder in de omgeving van Grouw.

De aanleiding was de bezorgdheid over het mogelijk optreden van aardbevingen en het optreden van scheuren in gebouwen en ongelijkmatige bodemverzakkingen, mogelijk als gevolg van aardgaswinning.

Het onderzoek heeft bestaan uit het interpreteren van waterpassingen, geomechanische aspecten van bodemdaling, de waterhuishouding en schade aan bebouwing.

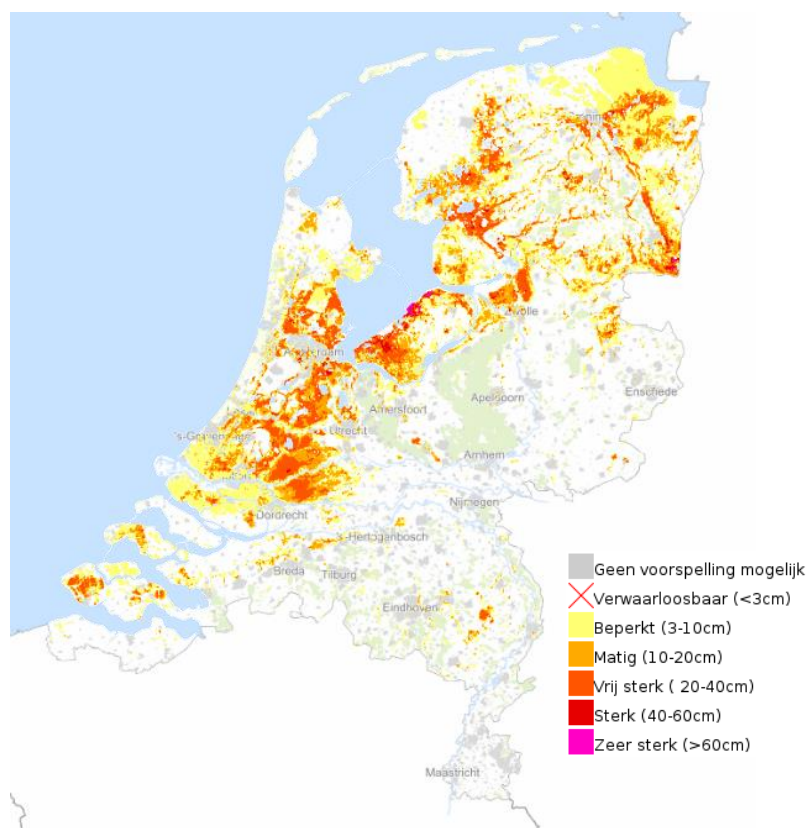
Uit het onderzoek volgt:

- De bodemdaling door aardgaswinning is gering en verloopt vloeiend.
- Dat op enkele punten is een sterkere bodemdaling opgetreden, die zeer waarschijnlijk kan worden verklaard uit plaatselijke omstandigheden in de ondiepe ondergrond.
- Er hebben polderpeilverlagingen plaatsgevonden van enkele decimeters; hierdoor is grondwaterstand gedaald.
- Het effect van extra droge zomers op de grondwaterstand is relatief groot.
- In Friesland komt in klei-op-veen gebieden bij gemetselde gebouwen, die gefundeerd zijn op staal of houten palen, aanzienlijke schade voor. De voornaamste oorzaken zijn: ongelijkmatige bodemdaling, het aanbrengen van aanbouwen, het uitvoeren van onoordeelkundige verbouwingen, het teruglopen van de sterkte van metselwerk, invloed van temperatuur en vocht, verkeerstrillingen, overbelasting van vloeren en wanden.
- Ongelijkmatige bodemdalingen worden voornamelijk veroorzaakt door grondwaterstands­daling bij inhomogene bodem en plaatselijk ongelijkmatige verlaging van het grondwater.
- De aardgaswinning heeft slechts een verwaarloosbare invloed op schade aan gebouwen.

3.4 Voorspelling bodemdaling Nederland

In de klimaateffect-atlas staan kaarten met een voorspelling van de bodemdaling in de periode 2020-2050. De berekende bodemdaling bestaat uit twee componenten: bodemdaling door oxidatie van veen en organisch-rijke bodemlagen, en mechanische bodemdaling door compactie van bodemlagen. Beide processen worden hoofdzakelijk gedreven door ontwatering van de bodem, waardoor organisch materiaal onder invloed van zuurstof kan oxideren en de bodem onder zijn eigen gewicht vervormt door het verminderen van de waterdruk. In principe tonen de kaarten alleen de bodemdaling die voorspelbaar is. Bodemdaling door (kortstondige) grondwaterwinning zit bijvoorbeeld niet expliciet in het model, tenzij het effect van een (langdurige) winning in de bronbestanden zit. Daarnaast tonen de kaarten ook de voorspelbare bodemdaling door de winning van aardolie, -gas en steenzout.

De bodemdaling is afhankelijk van de mate waarin het klimaat veranderd. In een droger en warmer klimaat versnelt en verergert de bodemdaling. Bij hogere temperaturen verloopt veenoxidatie sneller en door een neerslagtekort zakken de grondwaterstanden. Dat leidt tot meer veenoxidatie, krimp van klei en samendrukking van klei en veen. In Figuur 3.3 staat de voorspelde bodemdaling bij een sterke klimaatverandering.

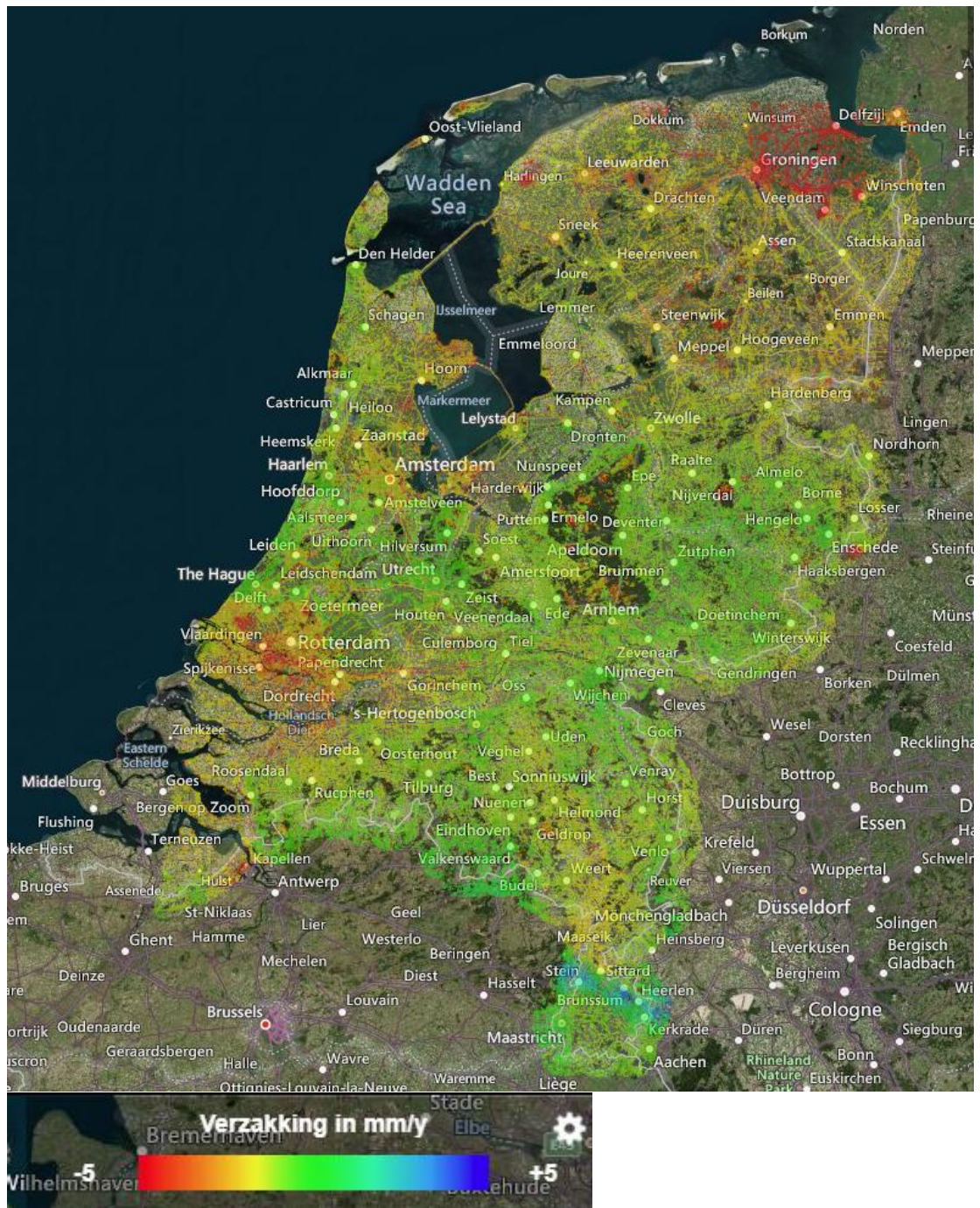


Figuur 3.3 Voorspelling bodemdaling voor de komende decennia bij een sterke klimaatverandering (2020-2050).

Bij een sterke klimaatverandering is in meerdere gebieden in Nederland een bodemdaling van circa 0,5 m berekend.

3.5 Metingen bodemdaling/stijging

Op basis van satellietmetingen is een bodemdalingskaart gemaakt [bodemdalingskaart.nl]. Deze kaart geeft de zakking of stijging in mm/jaar weer (feitelijk is het de gemeten afwijking in de kijkrichting van de satelliet, dit is een benadering voor de verticale beweging). Hierbij is gebruik gemaakt van satellietmetingen tussen januari 2015 en juni 2020. In de metingen zijn diepe en ondiepe bodemdaling niet te onderscheiden. De meest zakkende gebieden (in rood) zijn de lage polders in de regio Delft-Rotterdam-Dordrecht (5-10 mm/jaar) en Noord-Groningen (gebied van de aardgas en zoutwinning) en bedraagt plaatselijk tot meer dan 20 mm/jaar.



Figuur 3.4 Bodemdalingskaart van Nederland op basis van satellietmetingen.

3.6 Conclusies bodemdaling/stijging

- Door de NAM is een voorspelling gemaakt van de bodemdaling als gevolg van aardgaswinning. Ten opzichte van het begin van de aardgaswinning in 1964 is de bodemdaling in 2030 maximaal circa 0,4 m.
- In de klimateffect-atlas staan kaarten met een voorspelling van de bodemdaling in de periode 2020-2050. De berekende bodemdaling bestaat uit twee componenten: bodemdaling door oxidatie van veen en organisch-rijke bodemlagen, en mechanische bodemdaling door compactie van bodemlagen. Bij een sterke klimaatverandering is in meerdere gebieden in Nederland een bodemdaling van circa 0,5 m berekend.
- Satellietmetingen over de periode 2015-2020 geven inzicht in de bodemdaling en stijging over Nederland in die periode. De maximale bodemdaling is opgetreden in de diepe

polders in de regio Delft-Rotterdam-Dordrecht (tot ca 5 mm/jaar) en Noord-Groningen (gebied van de aardgaswinning en zoutwinning, plaatselijk tot 20 mm/jaar).

- De satellietmetingen en kaarten met een voorspelling van de bodemdaling uit de klimaatatlas geven inzicht in de bodemdalingsnelheid. Deze snelheid kan worden gebruikt om de ernst en verdeling van de effecten van de bodembeweging te bepalen. Deze effecten zijn beschreven in de volgende hoofdstukken.

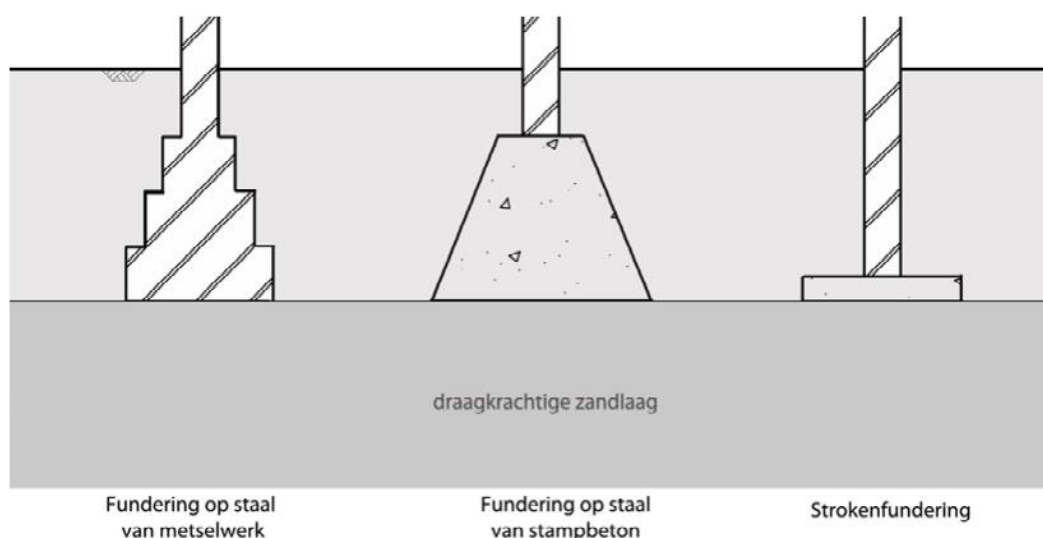
4 Funderingen van monumenten

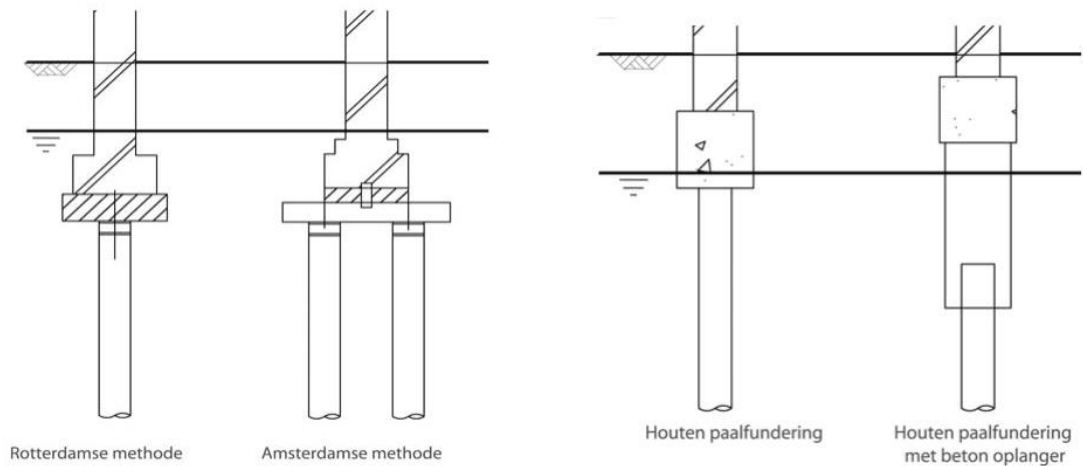
4.1 Inleiding

Monumenten zijn net als veel andere gebouwen in Nederland gefundeerd op ondiepe funderingen (op staal) of op palen. Het type fundering en de toegepaste houtsoort hebben invloed op schades die kunnen ontstaan door bodemdaling, derhalve wordt in deze paragraaf kort stil gestaan bij de verschillende soorten funderingen van (oudere) gebouwen.

Het type fundering hangt af van de locatie van het pand, de ondergrond, de bouwperiode en de waarde van het gebouw. De oude binnensteden zijn vaak ontstaan op de betere gronden (oeverwal, strandwal of donk) of op grondverbeteringen door ophogingen. De oude gebouwen zijn hier vaak ondiep gefundeerd (op staal) of iets dieper (met putten, verdiepte poer of korte paaltjes). Buiten of aan de rand van de steden is de ondergrond vaak slechter. Oudere gebouwen zijn hier toch vaak op staal gefundeerd. Ook gemengde funderingen komen bij monumenten veel voor, als er sprake is van aanbouwen uit verschillende perioden. Panden met grotere afmetingen of groter belang hadden vaak een betere (diepere, zwaardere, langere) funderingen dan kleinere of particuliere gebouwen. In het geval van paalfunderingen is de toegepaste paallengte afhankelijk van de ondergrond en ouderdom. In de 13 eeuw werden korte paaltjes (slieten) toegepast. In de loop er tijd werd het mogelijk steeds langere palen toe te passen (Figuur 4.2).

Figuur 4.1 laat enkele mogelijke opbouwen van een fundering op staal zien (boven) en enkele typische paalfunderingen (onder). Bij alle typen funderingen kan het gaan om doorgaande funderingen of losse poeren. Er kan ook sprake zijn van een plaatfundering die niet alleen onder de muur of gevel maar onder het gehele pand aanwezig is.





Figuur 4.1 Funderingen op staal (boven) en op palen (onder) uit [Van Stigt 1995].

4.2 Algemene tijdlijn

De stichting Erkende Restauratiekwaliteit Monumentenzorg (ERM) beschrijft op haar website de oudste bekende fundering in Nederland, zijnde de fundering van de legioensvestiging Hunerberg bij Nijmegen uit het jaar 70.

[Winsen et al 2015] geeft per periode de ontwikkeling van de funderingstechnieken aan. In de periode 1000-1300 was de bebouwing licht en de fundering zeer beperkt (geen fundering of poerenfundering). tussen 1200 en 1400 vindt de verstening plaats en wordt op staal gefundeerd. De fundering vindt plaats op ophogingen en op daarop gestapeld hout, in een of meerdere lagen. tussen 1300 en 1600 ontstond de fundering op kleef, slieten, vooral in Amsterdam. Vanaf 1550 ontstonden houten funderingspalen “op stuit” dus naar een draagkrachtige zandlaag. Vanaf 1920 kwam de toepassing van beton op en werd tevens geheid met oplangers. Ook betonnen palen kwamen al ruim voor WOII voor, maar vonden nog beperkt toepassing. Na WOII in de jaren 1960 werd de betonnen prefab paal geïntroduceerd.

Voor funderingen op staal werd tot de 16^e eeuw onder de toen nog met name houten gebouwen gebruik gemaakt van funderingen op poeren. In de RCE beeldbank zitten diverse foto's van zeer oude funderingen, zie Figuur 4.2.



Figuur 4.2 Foto fundering op poeren rond 1620 in Den Bosch - Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed Documentnummer 135650 (links) en op staal in metselwerk Hasselt Overijssel waarschijnlijk uit 1725 document 107930.



Figuur 4.3 Fundering op poeren van circa 2 m diep, al dan niet uitgetande voet [Deltares rapport kanaal Almelo].

Tot aan de 17^e eeuw was het niet mogelijk palen diep in het zand te installeren omdat installatie door heiers met de “hand” gebeurde. Palen waren veelal kort en werkten als kleefpalen, dus niet met de punt in een stevige zandlaag. Deze palen worden ook wel slieten genoemd als ze in bundels zijn toegepast. De gebruikte palen waren veelal van grenen of vurenhout. De vroegste funderingen werden gemaakt met eiken hout. Deze houtsoort heeft in tegenstelling tot grenen en vuren, geen last van aantasting door bacteriën. Wel zijn ze net als alle andere houtsoorten gevoelig voor schimmels. Schimmelaantasting treedt op bij droogstand van houten palen. In 1638 kwam er in Amsterdam een wet die bepaalde dat houten palen minimaal een halve voet onder het (toenmalige) grondwater moesten staan ter preventie van aantasting van het hout.

In de 20^e eeuw werd het mogelijk met dieselhamers palen dieper te heien. Vanaf 1920 werden ook betonnen palen toegepast.

Een uitgebreid overzicht van verschillende funderingen is opgenomen in Hattinga Verschure [2012] met vooral details ook over Amsterdam, Alkmaar en Dordrecht. Dit betreft een

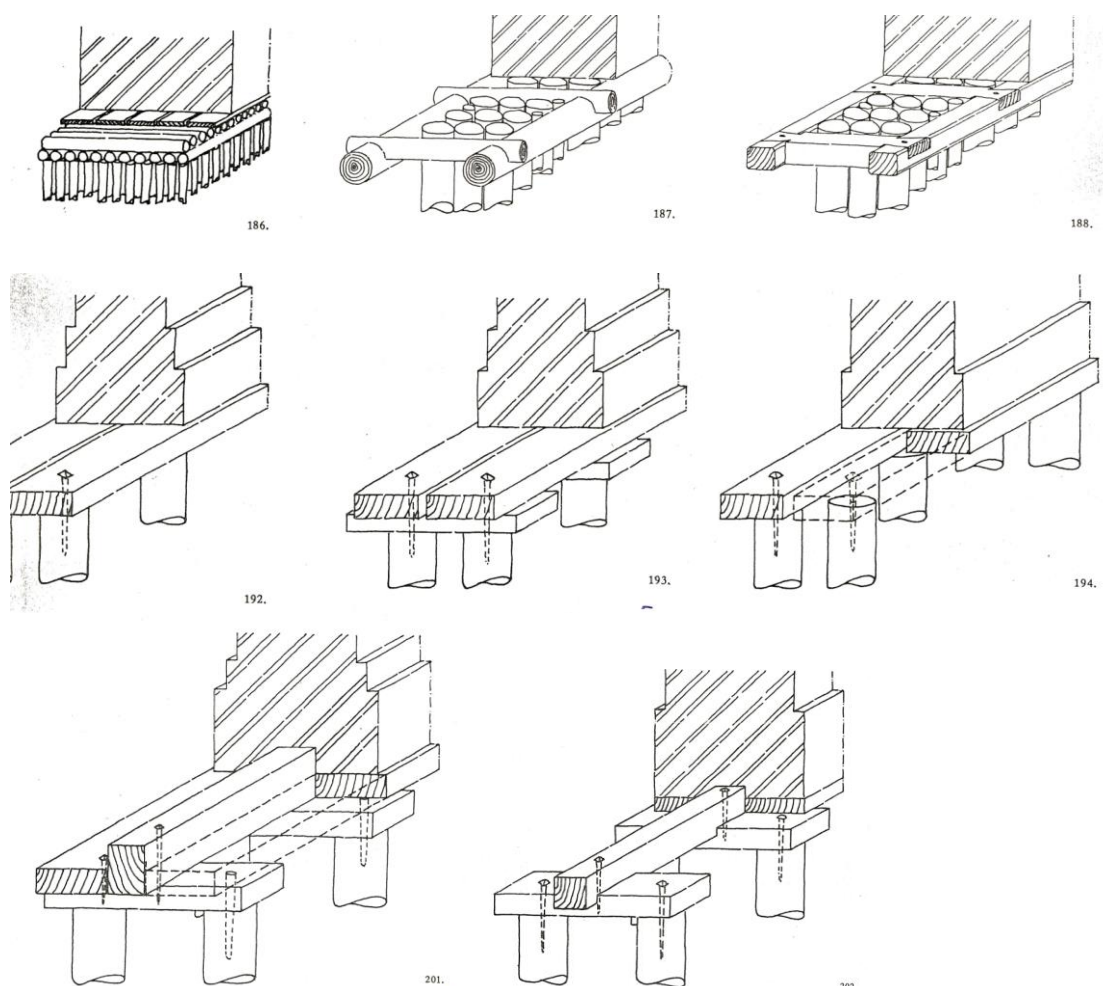
literatuurstudie. In de volgende paragraaf is voor deze steden de oorspronkelijke bron geciteerd.

4.3 Lokale ervaringen

Van enkele steden en regio's is uitgebreider onderzoek bekend naar de toegepaste typen funderingen. In deze paragraaf wordt daarop nader ingegaan. Van andere steden is een dergelijk onderzoek in deze studie niet gevonden. Mogelijk kan via lokale monumentenwachten of gemeenten wel nadere informatie worden achterhaald, dit valt echter buiten de scope van deze literatuurstudie.

4.3.1 Amsterdam

In [Amsterdam 1975] zijn figuren te vinden over de ontwikkeling van funderingen met houten palen vanaf de middeleeuwen tot aan de 20^e eeuw, gebaseerd op ervaringen uit Amsterdam. Dit begint in de 13^e eeuw met de slietenfundering, die langzamerhand wordt vervangen door een roosterwerk en later door de Amsterdamse fundering, met twee palen naast elkaar. Dit in tegenstelling tot de Rotterdamse paalfundering (niet alleen toegepast in Rotterdam) waarbij de palen in een enkele rij zijn toegepast. Een uitgebreid en zeer illustratief overzicht van verschillende funderingstypen in Amsterdam is gegeven in [Gawronski & Veerkamp 2003].



Figuur 4.4 Ontwikkeling van de paalfundering [[Amsterdam 1975]] 186: 2^e helft 13^e eeuw slietenfundering paaltjes 3 a 4 m lang, 187: eind 13^e eeuw rooster met korte paaltjes 4 a 5 m lang, 188: vanaf 2^e helft 14^e eeuw lengte tot op wadstrand; 15^e eeuw tot 1^e zandlaag; 192: opvolger roosterwerk; 193: 2e helft 17^e eeuw introductie kespes; 194: voor kleinere huizen (tot 4 hoog); vanaf 1700 12,5 m lang en op stuit. 201: verbetering van kespes met schuifhout en 202: rond 1840. De getekende bouten (hakkelbouten) verbinden de palen aan de kesp.

De lengte van de palen die is toegepast verschilt sterk per periode. De meeste houten funderingen in Amsterdam staan op de eerste zandlaag (10-12 m diep in het centrum), maar de oudste funderingen eindigen ook wel in de vaak aanwezige wad-zandlaag (met kortere palen te bereiken). De diepte in de eerste zandlaag is veelal 2 tochten, derhalve $2 \times 0.25 \text{ m} = 0.5 \text{ m}$.



Figuur 4.5 Slietenfundering Nieuwe Kerk Amsterdam – foto Rijkdienst voor Cultureel Erfgoed 100.245.

De in Amsterdam toegepaste funderingstypen zijn ook elders in het land aangetroffen.

4.3.2 Dordrecht

Onderzoek naar funderingen in Dordrecht is uitgebreid uitgevoerd en gepubliceerd [Sarfati 2007]. In Dordrecht zijn de meeste monumenten gefundeerd op staal, in tegenstelling tot bijvoorbeeld Amsterdam over veel langere tijd, dus niet alleen in de vroege houtbouw maar ook bij het latere bouwen in metselwerk. De slappe bodem van het oudste deel van de stad is op kunstmatige wijze geschikt gemaakt voor bebouwing door ophogingen en versterkingen met puin, houten palen en schotten. De gemetselde metselwerkfunderingen zijn aangelegd direct op de ondergrond, op liggend hout (1-3 lagen meestal) of op puin of gebroken steen. De muren zijn nagenoeg altijd vertand en soms lokaal extreem diep om te anticiperen op de slappe bodem.

Klaassen & Creemers (2012) beschrijven hoe later funderingsproblemen aan panden met houten palen door een lage grondwaterstand ontstonden in Dordrecht, met schade tot gevolg. Panden met ondiepe funderingen in Dordrecht zakten ook, maar met minder schade tot gevolg.

4.3.3 Rotterdam

De gemeente Rotterdam heeft uitgebreide informatie over funderingen van heel veel panden op de website [duikinjefundering.nl]. Op de kaart staan tevens de gemeentelijke en rijksmonumenten aangegeven.

Er is geen archeologisch onderzoek bekend vanuit Rotterdam, mogelijk dat dit lokaal wel bestaat.

4.3.4 Alkmaar

Onderzoek naar funderingen in Alkmaar is beschreven door [Bitter, 2007].

Door de stevige ondergrond van de Alkmaarse bodem werd er niet tot nauwelijks gebruik gemaakt van grondverbetering door middel van hout en funderingen op kleef of op stuit. Over het algemeen fundeerde men alles op staal, hiertoe groef men een funderingssleuf van nog geen halve meter diep, waarvan men de bodem egaliseerde met zand of mortelgruis. Hierop werd direct het muurwerk opgemetseld. Ook later bij toepassing van metselwerk bleef de fundering op staal in gebruik.

4.3.5 Gouda

Onderzoek naar funderingen in Gouda vindt momenteel plaats in het kader van Gouda Stevige Stad [website Gouda stevige stad]. Circa 80% van de panden in de binnenstad is op staal gefundeerd of op korte paaltjes van circa 5m (op kleef). 5% van de panden staat op houten palen op een diepte van circa NAP -10 tot -13m.

[Winsen et al 2015] beschrijft dat het algemene beeld van de funderingstechniek in Gouda meer overeen komt met het beeld in Dordrecht dan met het beeld in Amsterdam. Er was in Gouda een heimachine beschikbaar sinds 1477, dan nog vooral voor waterwerken en de fundering van het Goudse kasteel. De fundering op een puinlaag (puin van dakpannen/daktegels) zoals in Gouda aangetroffen bij de opgraving Raam 9-23108 was niet onbekend. Een andere 'mogelijk-Goudse' funderingstechniek is een variant op het 'funderen op een onderliggende muur'. In Gouda werden voor de gewenste verbreding van een bestaande fundering evenwijdig aan de oude fundering of muur stammetjes gelegd, waarna daaroverheen een bredere fundering werd aangebracht. Deze funderingswijze hield mogelijk rekening met een benodigde ophogingsfase tijdens de bouw. De stammetjes die naast de eerste fase werden geplaatst lagen ongeveer 'op het oude maaiveld' waarna de nieuwe fundering werd aangebracht en het terrein werd opgehoogd."

In hetzelfde document staat ook dat tot in de zeventiende eeuw voornamelijk een fundering op staal toegepast werd. Voor de oude monumenten, de grotere gebouwen (Stadhuis, Clarissenklooster, deel van het klooster Sint Marie) is gebouwd op slieten/op kleef. De oudste funderingen met houten palen op diepte (stuit) dateren van 1649 Hofje van Bosch, en de Waag (1668) en Arti Legi (1854). Voor woonhuizen is het toepassen van houten palen op stuit vanaf 1909 bekend. Rond 1915 is mogelijk gestart met het toepassen van betonnen funderingsbalkenroosters in combinatie met houten palen. Vermoedelijk is het overgrote deel van de nieuwe gebouwen (niet zijnde aan- en uitbouwen) vanaf 1950 tot midden jaren zeventig van de vorige eeuw gefundeerd op houten palen met betonnen oplangers.

De Goudse bouwverordening uit 1879 stelde voor het eerst eisen aan de diepteligging van het hout van funderingen: namelijk minimaal 1,1 meter beneden NAP. In de verordening van 1903 wordt ook vastgelegd dat voor de gebieden buiten de binnenstad de fundering van nieuwbouw op heipalen dient te staan. Dit wordt echter niet geëist voor nieuwbouw in de binnenstad. [Winsen et al 2015]



Figuur 4.6 Funderingsperiode en mogelijke diepteligging funderingshout in Gouda [Winsen et al 2015].

4.3.6 Delft

Er is geen overzichtstudie van in Delft toegepaste funderingstypen bekend. In het algemeen staan de panden in de binnenstad op staal op de draagkrachtige zandbodem en in de nieuwere wijken daarbuiten op houten of betonnen palen.

Wel is er uit archeologisch onderzoek [Bult 1991] bekend dat bijvoorbeeld aan de Phoenixstraat (ter plaatse van wat nu de Phoenixparkeergarage is) een onderkelderd gebouw uit de 15^e eeuw is aangetroffen met een extra diepe funderingsmuur (tot meer dan 3m onder NAP), dit in verband met een slootaanvulling.

4.3.7 Friesland

In de Friese Veenweidegebieden is de funderingsproblematiek ook onderwerp van onderzoek [Provincie Fryslan, 2008]. In deze gebieden zijn bijna alle panden op houten palen gefundeerd.

“Conform de bouwvoorschriften werd de bovenkant van de houten fundering vaak een halve meter onder de laagst voorkomende grondwaterstand aangelegd. Dat was bedoeld om het hout nat te houden. Behalve op houten palen werd ook op staal gefundeerd. Daarbij is sprake van muren op een breed uitlopende gemetselde funderingsvoet. Een fundering op staal werd vaak toegepast bij ondiepe veengronden; de funderingsvoet werd dan op de zandondergrond aangelegd. Omdat het goedkoper was dan houten palen, werd ook bij dikkere veenpakketten wel op staal gefundeerd. De schadegevallen die in Friesland bekend zijn, hebben voornamelijk betrekking op panden gefundeerd op hout.

De meeste schadegevallen zijn te verwachten in de gemeenten Wymbritseradiel, Weststellingwerf en Opsterland, gevolgd door Lemsterland en Skasterlân. In deze gemeenten staat ruim 80% van de panden met een houten fundering. De problematiek moet

ook spelen in de gemeenten Heerenveen, Tytstjerksteradiel, Boarnsterhim, Smallingerland en Gaasterlân/Sleat. Daar staat 20% van de kwetsbare panden.”

4.4 Conclusies funderingen van monumenten

Het type fundering dat is toegepast is zeer afhankelijk van het pand, de ondergrond, de locatie en de tijdsperiode. In dit hoofdstuk zijn voor zover beschikbaar in grote lijnen de verschillende typen funderingen beschreven.

Voor het beschouwen van mogelijke schade aan panden door bodembewegingen is inzicht in het type, de afmetingen, diepte en staat van de fundering essentieel. Van veel panden is dit niet beschikbaar en is funderingsonderzoek noodzakelijk.

5 Schades aan monumenten

5.1 Typen schade

Schades aan een pand uiten zich in verschillende vormen. Vaak gaat het om scheuren en zakkingsverschillen. Deze schades kunnen veroorzaakt zijn door bewegingen in de bodem, maar kunnen ook een andere oorzaak hebben, bijvoorbeeld een constructief mankement. Bij het optreden van een schade in een monument is het van belang de oorzaak van de schade vast te laten stellen door een bouwkundig schade expert.

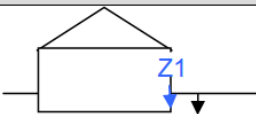
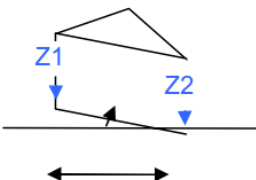
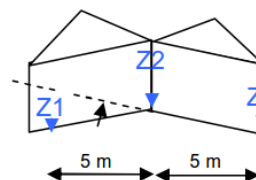
In dit rapport wordt alleen ingegaan op oorzaken van schades als gevolg van verschillende soorten bodembewegingen. Schades met een andere oorzaak worden dus niet behandeld.

5.1.1 Scheuren en scheefstand

Scheuren in gebouwen zijn gerelateerd aan bodembewegingen zijn meestal een gevolg van een verschilvorming tussen de onderdelen van het gebouw. Dit wordt vaak uitgedrukt in het hoekverdraaiingsverschil of ook wel de relatieve hoekverdraaiing genoemd. De definitie hiervan is gegeven in Tabel 5.1.

Gelijkmatige zakking of rotatie/hoekverdraaiing geven meestal geen aanleiding tot scheurvorming. Sommige panden zakken scheef ten gevolge van bodembewegingen. Scheefstand kan wel leiden tot andere verschijnselen zoals scheve vloeren en klemmende deuren.

Tabel 5.1 Definities van termen betreffende zakking en zakkingsverschillen.

funderingsvervorming				
naam	Eenheid	min. aantal zakkingsmetingen	Figuur	Berekening dit rapport
zakking	[mm]	1		z_1
Hoekverdraaiing	[-] of [rad]	2		$\frac{z_1 - z_2}{5}$
Hoekverdraaiingsverschil	[-] of [rad]	3		$\frac{z_1 - 2 * z_2 + z_3}{5}$

¹ deze waarde wordt gehanteerd voor hoekverdraaiingsverschil dat optreedt na renovatie

Voor de ernst van de schade bestaat een internationaal beoordelingskader gebaseerd op aantal en afmeting van de scheuren [Burland 1974]. De systematiek is opgezet voor metselwerk gebouwen. In [F530] is een overzicht opgenomen (Tabel 5.2) van de verschillende schadeklassen, hun karakteristieke schadebeeld en een indicatie van de

verwachte scheurwijdte en de bandbreedte van relatieve hoekverdraaiing waarbij deze kan optreden.

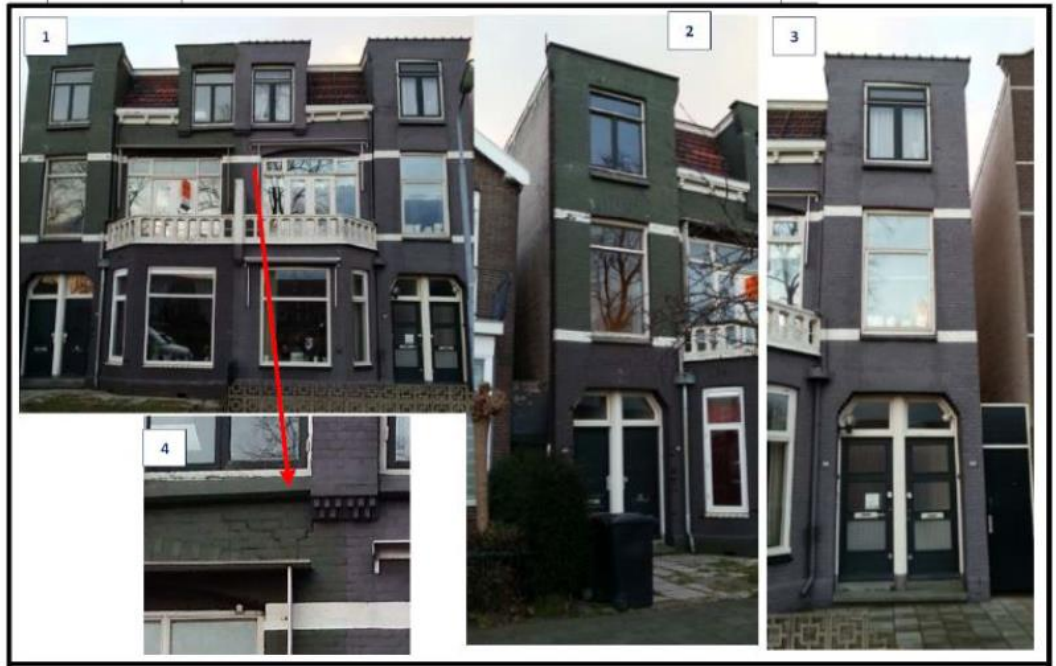
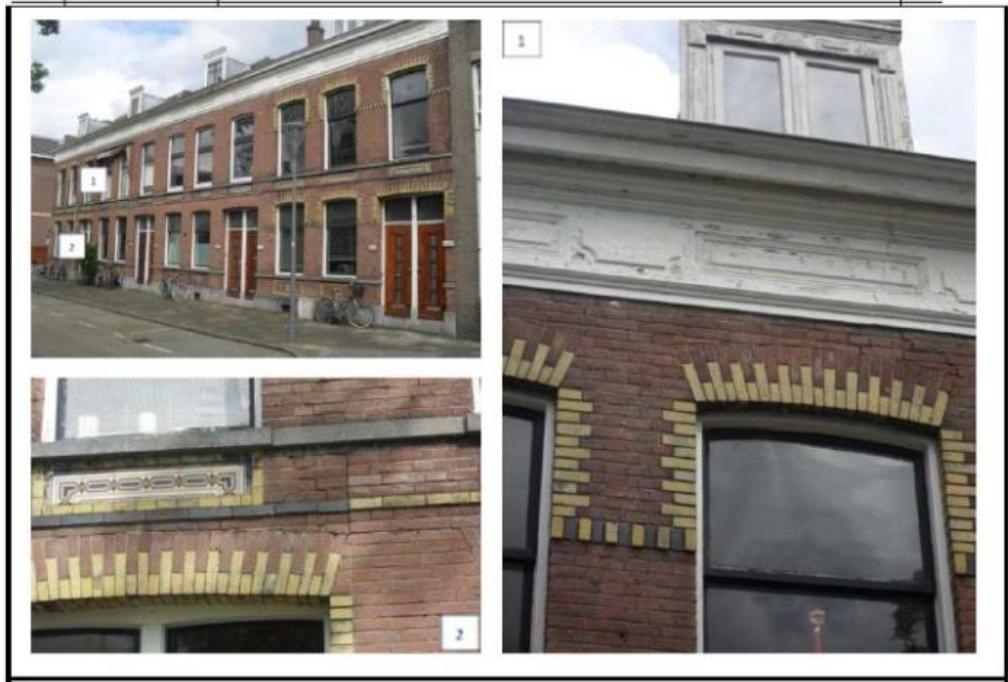
Tabel 5.2 Schadeklassen en bandbreedtes voor metselwerk [F530], met kleine aanpassingen ivm verwijzingen.

Schade-categorie	Schade-klasse	Omschrijving	Scheurwijdte	Karakterisering schadebeeld	Indicatie hoekverdraaiingsverschil
Esthetisch	0	Verwaarloosbaar	< 0,1 mm	Haarscheurtjes	<1:1600 tot 1:500
	1	Zeer licht	0,1 tot 1 mm	Enige scheurvorming in metselwerk. Kleine scheuren, meestal beperkt tot pleisterwerk, die eenvoudig kunnen worden weggewerkt.	1:1600 tot 1:300
	2	Licht	tot 5 mm	Scheuren kunnen aan de buitenzijde zichtbaar zijn en kunnen tot vochtdoorslag leiden. Deuren en ramen klemmen licht. Geringe scheurvorming, kan eenvoudig hersteld worden.	1:1600 tot 1:300
Functioneel	3	Matig	5 tot 15 mm of meerdere scheuren >3 mm	Deuren en ramen klemmen. Mogelijke schade aan nutsaansluitingen. Vochtdoorslag mogelijk. Scheuren zijn zodanig dat metselwerk dient te worden hersteld.	1:600 tot 1:100
	4	Ernstig	15-25 mm, ook afhankelijk van het aantal scheuren	Bruikbaarheid en toegankelijkheid ernstig aangetast. Voelbare scheefstand. Herstel vergt vervanging van muurdelen en andere constructieve elementen.	1:600 tot 1:100
Constructief	5	Zeer ernstig	> 25 mm, hangt van aantal af	Instortingsgevaar. Volledige renovatie noodzakelijk.	>1:300

Opmerkingen bij Tabel 5.2:

- In de tabel is geen rekening gehouden met het effect van horizontale rek per schadetype,
- De in de literatuur gerapporteerde relatieve hoekverdraaiing is sterk afhankelijk van het gebouwtype en de aard van de vervorming. Bij opwaartse buiging wordt aanzienlijk minder rotatie toelaatbaar geacht dan bij neerwaartse buiging. In de geraadpleegde literatuur zijn deze verschillen echter niet consequent weergegeven en deze zijn daarom niet opgenomen in de tabel.
- Voor betonconstructies zijn veel striktere scheurwijdten van toepassing en gelden ook andere bandbreedtes voor de hoekverdraaiing waarbij de genoemde schades optreden.

In Figuur 5.1 zijn ter illustratie enkele voorbeelden van schades bij de genoemde schadeklassen gegeven.





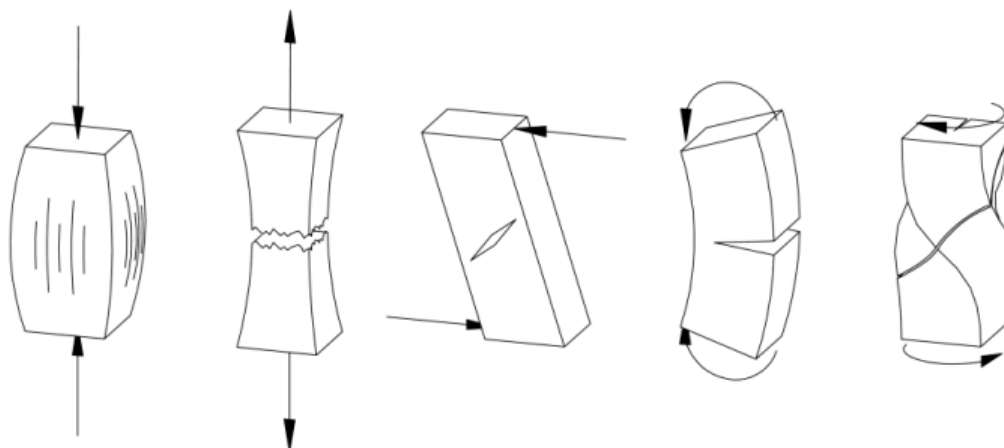
Figuur 5.1 Schadeklassen 2 t/m 5 (van boven naar beneden).

Bij het beoordelen van scheuren dienen de volgende zaken te worden beschouwd [De Vent 2011]: de richting van de scheur, de verplaatsing over de scheur, de variatie in scheurwijdte en de diepte van de scheur. [De Vent 2011] beschrijft deze in meer detail, waarbij in deze rapportage de relatie met bodemdaling wordt samengevat.

Invloed belasting

Er is geen vaste relatie tussen de richting van de scheur en de belastingsrichting. Scheuren in trek ontstaan altijd in de richting loodrecht op de grootste trekspanning. In geval van buiging begint de scheur aan de rand van het gebouwdeel dat uitgerekt wordt. In geval van schuifvervorming heeft de scheur vaak een hoek van 45 graden met de belasting. Torsiescheuren kunnen spiraalvormig zijn. Verder kan de scheur constant zijn over de lengte,

dan is er sprake van een verplaatsing in de richting loodrecht op de scheur. In geval van een scheur die verloopt in wijdte zijn ook rotaties opgetreden.



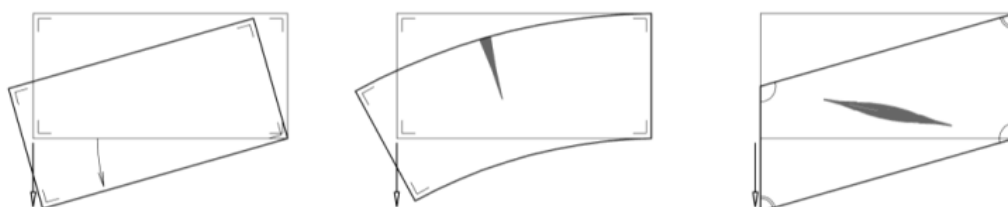
Figuur 5.2 Vijf belastingsrichtingen en hun scheuren, vlnr compressie, trek, schuif, buiging en torsie [De Vent 2011].

Invloed bouwkundige eigenschappen

Bij puur verticale grondvervormingen zijn er afhankelijk van de bouwkundige eigenschappen van het monument in de basis drie hoofdvormen die al dan niet tot scheuren kunnen leiden, zie Figuur 5.3.

Rotatie treedt op als het gebouw relatief stijf is en vrij kan bewegen (geen naastgelegen constructies). In dit geval treden geen scheuren op, de hoeken blijven recht. Buiging treedt op als een wand vastgehouden wordt. Schuifvervorming treedt op als beide wanden verticaal blijven.

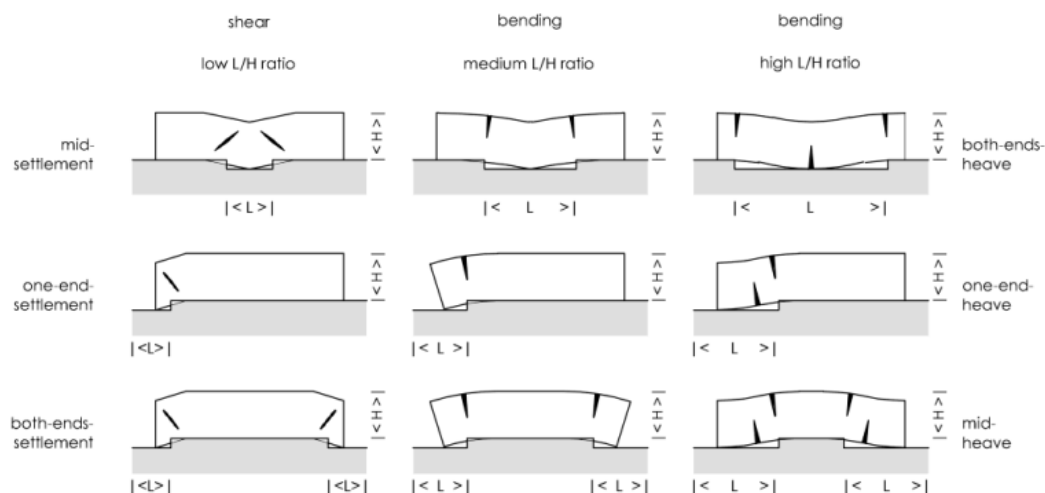
[Netzel 2009] beschrijft hoe de verhouding tussen buig en schuifvervorming af hangt van de geometrie en stijfheid van het gebouw (lange lage gebouwen buigen meer, hoge/korte gebouwen ondergaan vaak meer schuif).



Figuur 5.3 Rotatie, buiging en schuifvervorming [De Vent 2011]

Invloed vorm grondvervorming

[De Vent 2011] beschrijft daarnaast ook hoe de vorm van de grondvervorming ten opzichte van het gebouw invloed heeft op de scheurvorming. In Figuur 5.6 worden voor drie vormen van grondvervorming (zakking in het midden van het gebouw, zakking aan een rand of zakking aan beide randen) het scheurpatroon gegeven voor verschillende verhouding van lengte en hoogte van het gebouw (L/H).



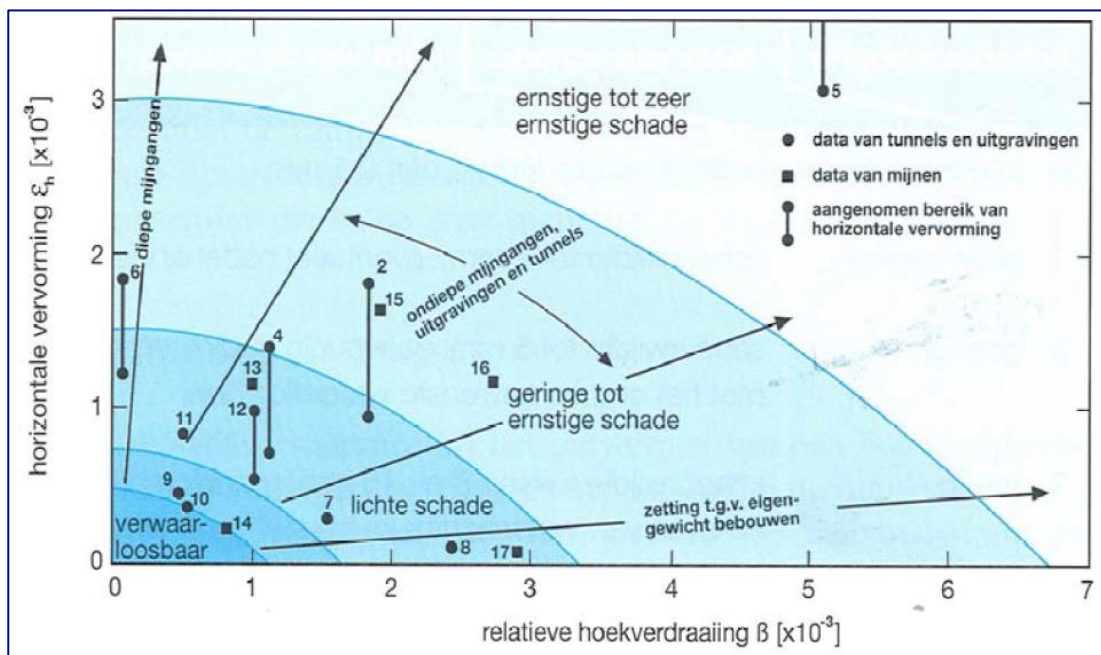
Figuur 5.4 Scheurpatroon bij drie soorten grondvervorming (zakking in het midden van het gebouw, zakking aan een rand of zakking aan beide randen) voor verschillende verhouding van lengte en hoogte van het gebouw (L/H).[De Vent 2011].

De voor deze studie meest relevante conclusies van [De Vent 2011] met betrekking tot scheurvorming zijn:

- Bij het interpreteren van scheuren is de tapsheid meer zeggend dan de precieze locatie of richting.
- Voor scheuren veroorzaakt door buiging, geeft het taps toelopen de relatieve rotatie aan die is opgetreden tussen twee wanddelen.
- Openingen maken een muur kwetsbaarder voor zettingschade: schade treedt eerder op en vergroot sneller.
- Of er een scheur optreedt, of een vervorming zonder scheur, hangt af van de eigenschappen van het metselwerk, en niet van de oorzaak van schade.
- Of een scheur recht of getrappt optreedt, hangt af van de eigenschappen van het metselwerk, en niet van de oorzaak van de schade.

Relatie tussen grondvervorming en schade

De meest gebruikte methode voor het bepalen van de relatie tussen vervorming en schade is die van [Boscardin en Cording 1989], zie Figuur 5.5. Door een combinatie te maken van opgetreden hoekverdraaiingsverschil van het gebouw en de horizontale rek in het gebouw (indien van toepassing) kan een schadeklasse worden afgeleid, waarbij de klassen overeen komen met de hierboven genoemde internationale standaard.



Figuur 5.5 Building response to excavation-induced settlement. [Boscardin en Cording, 1989.]

De methode om de schade in te schatten is empirisch (op basis van metingen elders en ervaringen) en inschattingen van schade kan ook numeriek worden uitgevoerd (met rekenmodellen). In alle gevallen wordt een vereenvoudiging van het gebouw toegepast en is de respons van het gebouw afhankelijk van onder andere de volgende factoren:

- De afmetingen en de staat van het pand, de constructieve samenhang.
- De diepte en het soort fundering.
- De hoeveelheid ramen en andere openingen.
- Eventuele ongelijkmatigheden in belasting naar de fundering (de fundering onder de gevel is bijvoorbeeld vaak zwaarder belast dan de fundering onder de zijmuren).

Bekend is dat het type fundering invloed heeft op de mate waarin de grondbewegingen worden doorgegeven aan de bovenbouw:

- Bij ondiepe funderingen neemt de gevoeligheid toe bij vergelijking van een plaat, strook of poer fundering en dezelfde mate van bodembeweging [o.a. Xu et al 2020].
- Diepere funderingen ondergaan in het algemeen minder grondvervormingen dan ondiepe funderingen, maar kunnen bij dezelfde hoeveelheid grondvervorming wel meer schade ondervinden [Peduto et al 2019; Nicodemo 2020].
- Nieuwere funderingspalen zijn minder gevoelig voor grondvervormingen dan oudere funderingspalen [Korff 2013].

5.1.2 Vochtindringing

Monumentenwacht heeft een document gemaakt over vochtindringing [monumentenwacht onderhoudswijzer #1 Vochtbelasting]:

“Een hoge vochtbelasting onderaan in de buitenmuren kan verschillende oorzaken hebben. Problemen kunnen ontstaan omdat de funderingsvoet in het water staat, door slecht voegwerk en gebreken aan het muurwerk, maar ook indirect door vochtconcentraties ter hoogte van het maaiveld, onder andere als gevolg van spatwater. Door deze extra vochttoevoer wordt het evenwicht tussen vochtopname en verdamping verstoord. Als het voegwerk of buitenpleisterwerk van uw monument ter hoogte van het maaiveld of daaronder is verweerd, uitgesleten of weggevallen, kan dit leiden tot vochtoverlast in het buitenmuurwerk. Vocht trekt in het muurwerk, waardoor de stenen bij koude temperaturen kapot kan vriezen en/of balkkoppen van houten vloeren kunnen inrotten. Daarnaast kan ook het binnen-pleisterwerk vochtschade vertonen en wegvallen. Gips-houdend binnen-pleisterwerk is hier extra gevoelig voor omdat gips hygroscopisch werkt en om die reden vocht aantrekt.”

[Deltares 2017 Gouda] gaat hier verder op in:

Panden die laag liggen ten opzichte van het maaiveld en de grondwaterstand zijn gevoelig voor wateroverlast: met name panden op staal zijn op termijn gevoelig, maar ook panden die op palen gefundeerd zijn kunnen bij een hoge grondwaterstand last krijgen van vochtindringing. Vooral panden op ondiepe funderingen zullen mee zakken met het maaiveld. Bij gelijkblijvende grondwaterstand wordt de grondwaterstand relatief hoger en neemt de wateroverlast toe. Wateroverlast vanuit het grondwater uit zich in ondergelopen kelders, optrekkend vocht (schade aan houten vloeren en muren) en schimmel. Naast wateroverlast vanuit het grondwater zijn laaggelegen panden ook extra gevoelig voor wateroverlast vanaf straat, als oppervlaktewater (bijvoorbeeld door heftige regenbuien) niet goed weg kan stromen.

Optrekkend vocht houdt in dat grondwater wordt geabsorbeerd door de muren (via scheuren en kieren). Dit kan direct vanuit het grondwater in de muren trekken, of indirect via een vochtige kelder of kruipruimte. Een ondergelopen kruipruimte kan voorkomen als deze niet goed vocht dicht is en zich permanent of tijdelijk (deels) onder de grondwaterspiegel bevindt. Naast fysieke schade aan pleisterwerk en houten vloeren, kan optrekkend vocht leiden tot een te hoge luchtvochtigheid in huis: dit is slecht voor de luchtwegen en kan in het ergste geval tot schadelijke schimmels leiden.

Als vuistregel kan gehanteerd worden dat vochtschade ontstaat als het grondwater op < 60 cm van het vloerpeil komt. De oorzaken hierachter kunnen uiteraard verschillen: zetting van het pand bij gelijkblijvend grondwater, of een (extra) hoge grondwaterspiegel door regenval. Of en in welke mate vochtschade daadwerkelijk ontstaat hangt daarnaast af van de kwaliteit van het pand.

Zeker bij oudere huizen met een niet-dampdichte vloer of optrekkend vocht door de muren leidt grondwateroverlast vrijwel zeker tot vochtoverlast in de woning en daarmee tot een grotere kans op gezondheidsklachten. In 2001 ging het in Nederland om 260.000 woningen met incidentele of regelmatige grondwateroverlast.

Naast gezondheidsschade kan een te vochtige of ondergelopen kelder schade veroorzaken aan daar opgeslagen inboedel en/ of voorzieningen, en zijn bij vochtige muren/ schimmel extra investeringen in het opnieuw uitvoeren van pleisterwerk en verf nodig.

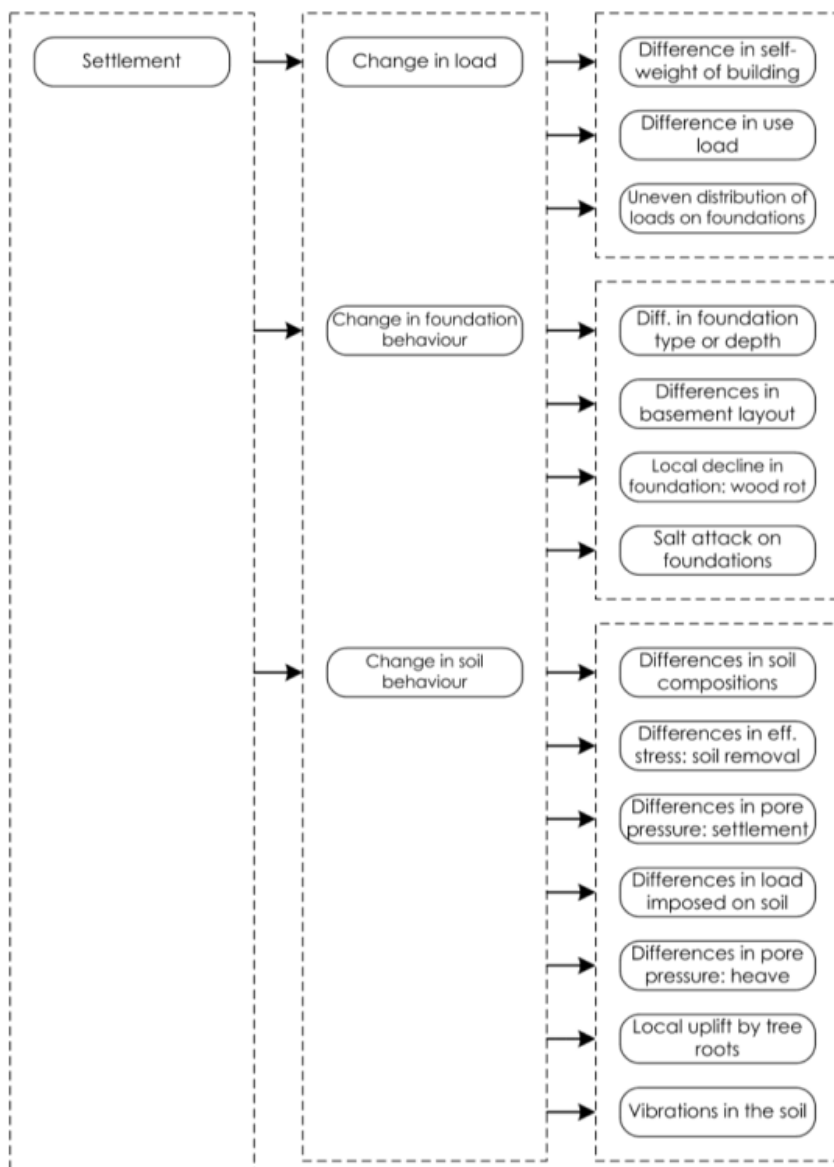
5.1.3 **Schade aan aansluitingen**

Een ongelijkmatige zetting tussen pand en ondergrond heeft vooral impact op de overgang van in grond gelegen (gas, water) leidingen of riolering naar een dieper gefundeerd pand. Bij huisaansluitingen leidt deze overgang tot een sprong in de zetting die tot schade kan leiden. Zowel bij water als bij gasleidingen zijn er in het verleden incidenten geweest waarbij huisaansluitingen faalden. De lekkage die optreedt kan bij het falen van een waterleiding of riolering als hinderlijk worden beschreven. Bij het falen van een gasleiding is de situatie met het vrijkomen van gas erger, namelijk levensbedreigend.

Bij aansluitingen uit de 20e eeuw is vaak extra leiding lengte in de grond nabij de overgang naar het gefundeerde leidingdeel aangebracht. De extra leiding lengte was bedoeld om de leidingvorming door zetting over een grotere lengte te laten optreden. Vanwege de beperkte bewegingscapaciteit van de extra leidinglengte in de grond bleek deze oplossing niet altijd goed te werken. In de 21e eeuw zijn oplossingen ontwikkeld en toegepast die tegen grotere zettingsverschillen bestand zijn (zie paragraaf 11.2.6), de verspreiding van de toepassing hiervan is onbekend.

5.2 Oorzaken van schade/scheurvorming

In [De Vent, 2011] is beschreven op welke wijze scheurvorming kan worden gekoppeld met oorzaken. Figuur 5.6 geeft de oorzaken die gerelateerd zijn aan zettingen en een verandering van grondgedrag (onderste deel van de figuur, die een deel is van de totale “boom” van schades in het oorspronkelijke document).



Figuur 5.6 Oorzaken gerelateerd aan zettingen.

Ook in [Deltares, 2021] is een overzicht gegeven van mogelijke oorzaken van gebouwschade. Dit overzicht is voor deze studie aangepast tot Tabel 5.3. In de tabel is benoemd welke literatuur van toepassing is (uit de lijst van Bijlage A) en in welk vervolghoofdstuk of document deze oorzaak nader wordt beschreven.

Tabel 5-3 Oorzaken van gebouwschade.

Oorzaak	Toelichting	Behandeld in literatuur	Beschrijving in hoofdstuk
Trillingen		ntb, TU Delft 2018,	Volgende rapportage
Gaswinningsbevingen	Alleen binnen trillings-drempelwaarde contour; geen onderdeel van deze studie		
Andere trillingen, bijvoorbeeld verkeer of bouwwerkzaamheden			
Belastingen		TU Delft 2018	Rapportage door derden, geen onderdeel Deltares studie
Verbouwing	Verbouwing/uitbreiding van panden kan leiden tot ongelijkmatige deformaties		
Veroudering	Veroudering kan leiden tot verlies van incasseringsvermogen		
Bomen	Opgelegde vervorming door wortelgroei van bomen		
Eigen gewicht en gewichtsverdeling over funderingselementen (en veranderingen daarin)	Treedt initieel op na ingebruikname gebouw, kan decennia lang doorwerken en kan veranderen door aanpassingen aan gewicht (verbouwen, vloerbelastingen); variatie in lokale grondopbouw kan ook bij gelijkmatige gewichtsverdeling resulteren in verschilzettingen. Combinaties van funderingstypen leveren extra risico.		
Zakkingsverschillen			
Diepe bodemdaling zorgt direct voor zakking aan maaiveld (funderingsniveau)	Zakkingsverschillen worden bepaald door de vorm, afmeting en diepte van de kom		H6
Veranderingen in grondwaterstand nabij funderingselementen door diepe bodemdaling	<ul style="list-style-type: none"> - Autonom - Door bewuste aanpassingen in het waterbeheer 		H7
Veranderingen in grondwaterstand nabij funderingselementen door ondiepe bodemdaling	<ul style="list-style-type: none"> - Autonom - Door bewuste aanpassingen in het waterbeheer 		H8
Veranderingen in grondwaterstand door weer- en klimaateffecten	Door veranderingen in neerslag, verdamping kan grondwaterstand veranderen.		H8
Lokale veranderingen in grondspanning	Door bijvoorbeeld: <ul style="list-style-type: none"> - Ophoging - Opslag van materiaal - Aanpassingen aan drainage, lokale bemaling, onttrekkingen, watergebruik grote bomen - Demping van oude sloten of watergangen 		

In het rapport [Deltares, 2020] wordt ook de invloed van enkele specifieke kunstmatige ingrepen op de kwaliteit van funderingen vermeld als mogelijke schadeoorzaken:

- Een peilverandering.
- De aanleg van een nieuwe riolering.
- Herinrichting straat, bijvoorbeeld nieuwe drainage of verharding.
- Bouwwerkzaamheden.
- Lokale omstandigheden: als voorbeeld zijn te noemen: een lekkend riool, het onttrekken van grondwater met een pomp, de invloed op het grondwaterstand door een boom.
- Structurele verandering van het pand (aan of verbouw).

5.3 Conclusies

- Schade aan monumenten door bodemdaling/stijging uit zich met name in de vorm van scheurvorming, scheefstand, vochtindringing en/of schade aan aansluitingen.
- Voor het beoordelen van de ernst van scheuren in panden bestaat een internationaal kader gebaseerd op aantal en afmeting van de scheuren [Burland 1974]. De systematiek is opgezet voor metselwerk gebouwen.
- Er zijn ook veel bouwkundige oorzaken van schades, deze worden in deze studie niet beschouwd.
- In [DeVent, 2011] en [Deltares, 2021] is een overzicht gegeven van mogelijke oorzaken van gebouwschade.
- Er bestaan relaties voor het bepalen van de schade(klasse) dan wel restlevensduur van de fundering op basis van gemeten of voorspelde zakkingsverschillen uit de bodem.
- Afhankelijk van de soort fundering en de optredende bodemdaling/stijging kan een monument meer of minder gevoelig zijn voor schade.

6 Directe effecten van diepe bodemdaling/stijging

6.1 Mechanismen die tot schade leiden

Directe effecten van diepe bodemdaling worden veroorzaakt door de verschillen die optreden tussen de dalingen (of eventueel stijgingen). Zolang een pand gelijkmatig zakt door diepe bodemdaling zal er geen schade ontstaan. Dit is anders als verschilzettingen optreden. In Hoofdstuk 3 is aangegeven welke “kommen” van bodemdaling in Nederland optreden dan wel worden voorzien. Op basis van de diepte en helling van deze kommen kan een inschatting van de eventueel optredende schade worden gegeven. In Hoofdstuk 5 is beschreven hoe de verschilzakkingen tot schade kunnen leiden.

6.2 Schade aan gebouwen door diepe bodemdaling en stijging

Door TNO [TNO, 2021] en TU Delft [TUD, 2018] is onderzocht of diepe bodemdaling in het Groningenveld en de gasopslag Norg kan leiden tot schade aan gebouwen. Het onderzoek 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 rapportage van TNO en TU Delft, noch wordt ingegaan op schade die kan ontstaan door aardbevingen als gevolg van mijnbouwactiviteiten.

In [TNO,2021] 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 op basis van de Tabel 5.2. Uit de evaluatie van de literatuur blijkt dat metselwerk kwetsbaarder is dan andere bouwmaterialen en dat dit metselwerk criterium derhalve conservatief is.

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. Hieruit blijkt dat de maximale horizontale rek in de kommen berekend is op $1,6 \cdot 10^{-5}$ en de relatieve rotatie (hoekverdraaiing) $1,2 \cdot 10^{-7}$, waarden die in combinatie in de categorie verwaarloosbare schade vallen (zeer dicht bij de oorsprong van Figuur 5.5).

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 directe 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 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/stijging in de gasopslag Norg en het Groningenveld niet leidt of heeft geleid tot schade aan gebouwen.

6.3 Invloed van bodemdaling door zoutwinning op bebouwing en infrastructuur

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 in [Deltares, 2018] onderzocht wat de invloed van de bodemdaling op de bebouwing en infrastructuur is als gevolg van zoutwinning door Nedmag. In de studie is uitgegaan van een bodemdalingsgebied met daarin een maximale daling van 95 cm conform het winningsplan 2018.

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.

6.4 Conclusies

- Diepe bodemdaling/stijging in de gasopslag Norg en het Groningenveld leidt niet of heeft niet geleid tot schade aan gebouwen in directe zin.
- Door zoutwinning treedt bodemdaling op. Uit onderzoek naar zoutwinning door Nedmag in de Gemeente Veendam blijkt dat deze leidt tot een gelijkmatige bodemdaling. De zettingsverschillen en horizontale rek zijn zo klein dat de kans op schade aan infrastructuur en gebouwen minimaal is.

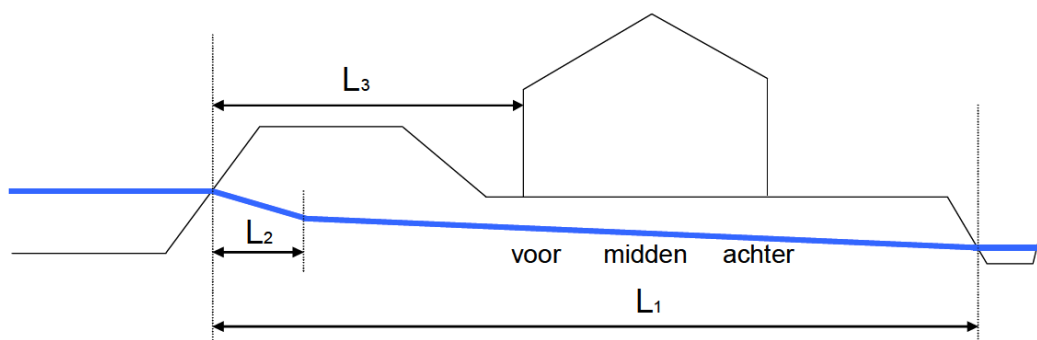
7 Indirecte effecten diepe bodemdaling/stijging

7.1 Indirecte schade-effecten van diepe bodemdaling en -stijging bij het Groningen gasveld en gasopslag Norg

De schade-effecten ten gevolge van indirecte effecten van diepe bodemdaling zijn gelijk aan de schade effecten van ondiepe bodemdaling zoals beschreven in hoofdstuk 7 en zijn daar verder uitgewerkt.

In [Commissie bodemdaling door aardgaswinning, 1987] is een onderzoek uitgevoerd naar ongelijkmatige zakkingen in verband met aardgaswinning in de Provincie Groningen. In deze studie zijn berekeningen uitgevoerd van de invloed van een peilverlaging op gebouwen. Hierbij is een rijtje van 6 woningen gemodelleerd. De ondergrond is met een 3 dimensionaal eindige elementen model geschematiseerd. Uit het onderzoek volgt een waarde voor de maximaal toelaatbare relatieve peilverlaging. Deze is 0,13 m (bij een ondergrond bestaande uit veen) 0,2 m (bij een ondergrond bestaande uit klei) en 0,32 m (bij een ondergrond bestaande uit zand). De toename van de kans op scheurvorming voor het grootste deel van de bebouwing is lager dan 5%.

In [Deltares, 2009] wordt een methode beschreven om de invloed van een peilverlaging op bebouwing te berekenen. De ondergrond die in dit rapport is aangehouden is slap tot zeer slap. Voor de geohydrologische situatie is gebruik gemaakt van een sterk vereenvoudigde schematisering. Er is rekening gehouden met een intreeweerstand en hydrologische weerstand van de bodem. Als afstand tot de eerste poldersloot is gerekend met een lengte L_1 van 100 m. Voor de intreeweerstand is een breedte van het invloeds-gebied van 1 m gehanteerd (L_2) en er is vervolgens een lineair verloop aangehouden tot aan de poldersloot. Voor het gebouw waarvoor het effect van de peilverlaging wordt geanalyseerd zijn als afstanden tot het kanaal 1, 20 en 50 m gehanteerd (L_3). Een verlaging van het slootpeil is niet apart geanalyseerd.



Figuur 7.1 Dwarsdoorsnede beschouwd in [Deltares, 2009].

In de studie is gekeken naar het meest schadegevoelige type gebouw, te weten die welke ondiep (op staal) gefundeerd zijn. Gebaseerd op de uitgevoerde berekeningen wordt geconcludeerd dat het toepassen van een relatieve peilverlaging van 50 mm nauwelijks leidt tot een verhoging van de kans op schade aan op staal gefundeerde bebouwing. Deze conclusie geldt ook voor een pand met een gemengde fundering (dus waarbij de verschillende delen van een pand een eigen, andersoortige fundering hebben of op een andere diepte zijn gefundeerd) mits de individuele delen volgens de huidige normen zijn ontworpen. Voor funderingen op houten palen waarvan de koppen boven het grondwaterniveau komen geldt deze conclusie niet.

In [Deltares, 2019] is voor de commissie bodemdaling ingegaan op de vraag of uit de bestaande literatuur (situatie eind 2017) is af te leiden welke mate van peilverandering en de daarbij behorende (kans op) schadetoename in (geo)technisch en in juridisch opzicht als verwaarloosbaar is te beschouwen.

Uit het (geo)technisch onderzoek naar de relatie tussen peilverlaging en gebouwschade op basis van bodemdaling literatuur kan worden geconcludeerd dat bij een relatieve peilverlaging van 0,15 tot 0,30 m de toename van de kans op schade gering is (<5%) en in die zin nog acceptabel. Onder schade wordt hier verstaan lichte scheurvorming (scheuren van 1 mm). Mogelijke uitzonderingen doen zich wederom voor bij gebouwen met gemengde funderingen (fundering op staal en palen) en gebouwen met houten paalfunderingen waarbij het hout komt droog te vallen.

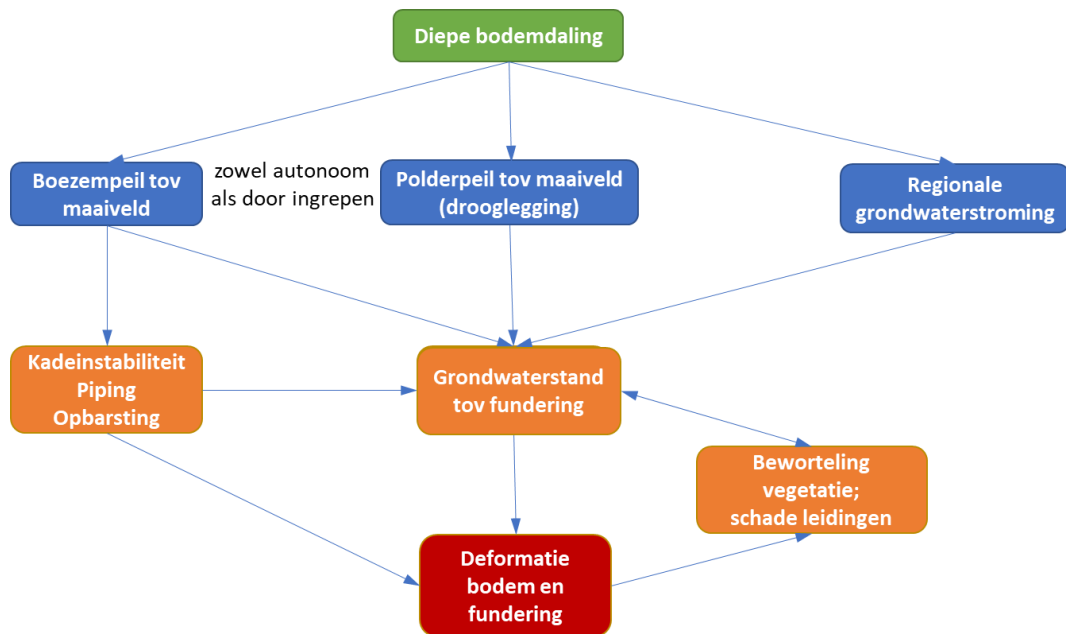
Ten aanzien van [Deltares,2019] wordt opgemerkt dat dit rapport uitgaat van schade door bodemdaling ter plaatse van panden op kleiige ondergrond. Indien sprake is van een veenhoudende ondergrond doet zich bij peilverlaging veenoxidatie voor waarbij op termijn al het veen boven het verlaagde freatisch niveau verdwijnt. Ook het verschijnsel van krimp van kleigronden komt niet aan bod. Beide aspecten komen wel aan bod in [Deltares 2021].

Recenter is voor het Instituut Mijnbouwschade Groningen (IMG) door Deltares in [Deltares 2021] gerapporteerd over mogelijke indirecte (schade)effecten van diepe bodemdaling en -stijging boven en in de nabijheid van het Groningenveld en gasopslag Norg die wordt veroorzaakt door de mijnbouwactiviteiten. De adviesvraag is gericht op twee aandachtsgebieden die zijn aangegeven in Figuur 6.2. De donkere polygoenen corresponderen met het Groningengasveld en gasopslag Norg. De lichtere polygoenen geven een 6 km brede zone rond de gasvelden weer. Samen geven deze groene polygoenen het gebied aan dat IMG hanteert voor potentiële invloed door diepe bodemdaling en -stijging. De rode cirkelboog begrenst het door een panel van deskundigen gedefinieerde gebied waarbinnen een kans van ten minste 1% bestaat dat een trilling-snelheid van ten minste 2 mm/s is opgetreden ten gevolge van bevingen.



Figuur 7.2 Groningengasveld (2) en gasopslag Norg (1).

Het rapport beschrijft verschillende indirecte mechanismen van indirecte effecten, schematisch weergegeven in Figuur 7.3.



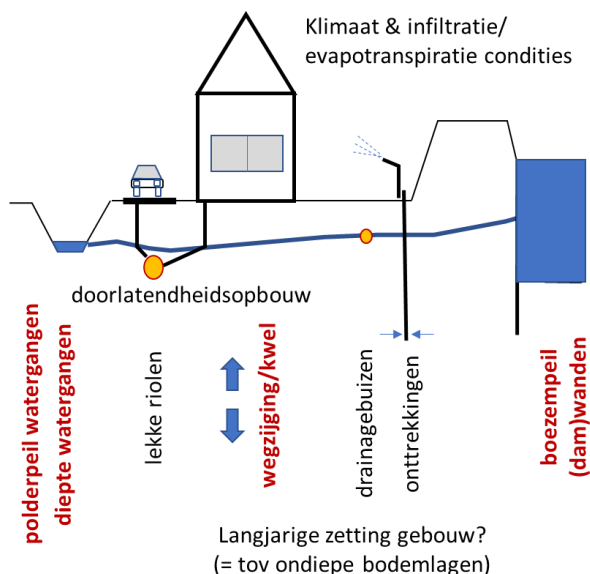
Figuur 7.3 Stroomschema van diepe bodemdaling naar deformatie van de bodem en fundering die uiteindelijk leidt tot schade aan bebouwing.

De drie primaire veranderingen in het grond- en oppervlaktewatersysteem zijn aangegeven met de blauwe kaders. Elk van deze drie primaire veranderingen kan in theorie in meer of mindere mate leiden tot verandering (zowel stijging als daling) van de grondwaterstand ten opzichte van funderingen (centrale oranje kader). Verandering in de grondwaterstand is naar verwachting de belangrijkste schakel naar deformatie van de bodem onder funderingen (rode kader) en daarmee van potentiële schade aan gebouwen. Er zijn ook diverse secundaire effecten (via leidingen, instabiliteit, aantasting).

In alle gevallen verloopt de invloed van de indirecte effecten via de grondwaterstand. Dit is zowel bij indirecte effecten van diepe bodemdaling (dit hoofdstuk) als bij effecten van ondiepe bodemdaling (H8 en H9) het geval.

Het rapport [Deltares, 2021] beschrijft dat de grondwaterstand ter plaatse van funderingen van gebouwen door diverse lokale en regionale factoren wordt bepaald en geeft er een overzicht van in Figuur 7.4. De meeste factoren veranderen in principe niet door diepe bodemdaling of -stijging. Dat geldt bijvoorbeeld voor klimatologische condities, bestrating, de doorlatendheidsopbouw van de aanwezige bodemlagen, de diepte van perceeldrainage en onttrekkingen, bijvoorbeeld voor irrigatie of drinkwater. De factoren die potentieel wel door diepe bodemdaling kunnen veranderen zijn aangegeven in rood: (a) het boezempeil, (b) het polderpeil (beide ten opzichte van maaiveld en daarmee ten opzichte van funderingen), en (c) kwel of wegzijging van of naar diepere watervoerende lagen.

De grondwaterstand is geen vast peil, maar varieert in werkelijkheid met de tijd in reactie op het weer, de seizoenen, winter- en zomerpeilen in het polderpeil en variaties in onttrekkingen. Daarin kunnen ook extreme condities voorkomen zoals bijvoorbeeld het geval is geweest tijdens de recente droge jaren vanaf 2018. In de context van gebouwschade is specifiek de laagste en de hoogste grondwaterstand van belang en de mate waarin diepe bodemdaling deze respectievelijk kan verlagen en verhogen.

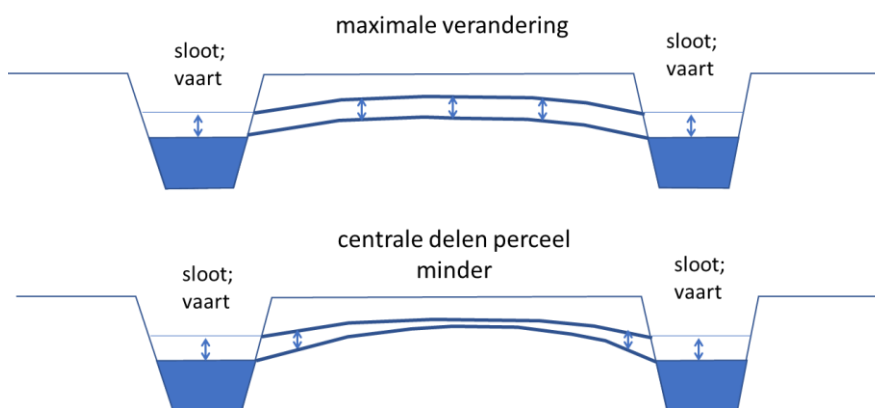


Figuur 7.4 Overzicht van factoren die de gemiddelde grondwaterstand ten opzichte van funderingen bepalen. In rood zijn de factoren aangegeven die kunnen veranderen door diepe bodemdaling.

Verandering via het boezempeil

Boezemwateren hebben een rol in het transport van water over lange afstand en uiteindelijk naar zee. In vergelijking met polders wordt het peil beheerd door relatief grote sluizen en stuwen. Door de functie in het watersysteem wordt het boezempeil daarom zo lang mogelijk gehandhaafd ten opzichte van NAP. Het boezempeil in een gebied met diepe bodemdaling stijgt ten opzichte van het maaiveld en daarmee dus ook ten opzichte van funderingen van gebouwen. De grondwaterstandsverandering is kleiner of gelijk aan de relatieve boezempeilverandering. De grondwaterstandsverandering neemt af met de afstand tot de boezem.

Als het boezempeil boven het grondwater staat (drainerende boezem) reikt de invloed beperkt en neemt sterk af met de afstand (10 tot ≈ 100 m). Bij een lagere boezem (t.o.v. de grondwaterstand) is het effect van diepe bodemdaling gelijk aan de peilverandering nabij de boezem en neemt geleidelijk af over een afstand van tientallen meters tot wel enkele kilometers.



Figuur 7.5 Schematische weergave van grondwaterstandsverandering door een verandering in drooglegging (relatieve verandering van het polderpeil ten opzichte van maaiveld).

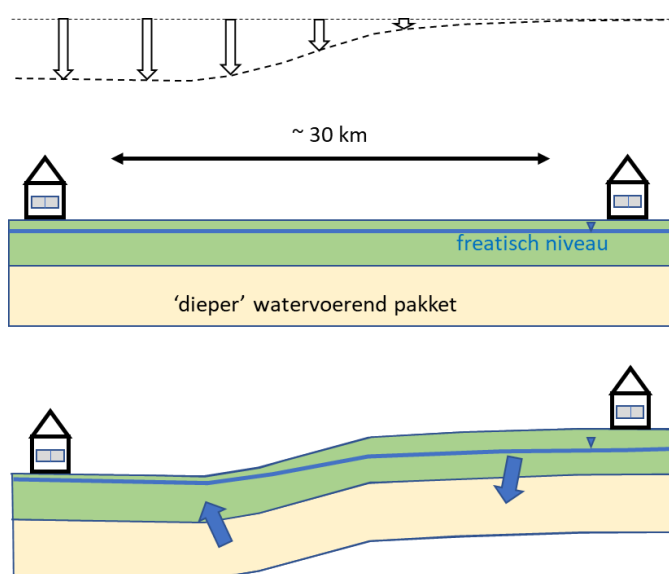
Verandering via het polderpeil

Het polderpeil is het waterpeil in een aaneengesloten stelsel van sloten en vaarten dat tot doel heeft een gewenste drooglegging (verticale afstand tussen maaiveld en oppervlaktewater) te realiseren. De grootte van de peilvakken in een gebied is een afspiegeling van het verloop in maaiveldhoogte en de ruimtelijke verdeling van landgebruiksfuncties. Veelal wordt een lager peil aangehouden in de winter dan in de zomer. Bij uniforme diepe bodemdaling zakt alles mee, inclusief de peil regulerende infrastructuur zoals stuwtjes en gemalen. Hoewel het polderpeil dan mee zakt met de bodemdaling, en daarmee zakt t.o.v. NAP, verandert de drooglegging niet en is er ook geen aanleiding voor een actieve peilaanpassing. Een verhang in de diepe bodemdaling over het peilvak daarentegen zorgt wél voor verandering in de drooglegging, zowel een toename als een afname is mogelijk, afhankelijk van de lokale situatie t.o.v. het afwateringspunt.

De reden voor een polderpeilaanpassing zal zelden alleen diepe bodemdaling zijn. In gebieden met veenbodems en slappe klei veroorzaakt ondiepe bodemdaling over het algemeen afname van de drooglegging. Ook buiten gebieden met diepe bodemdaling worden daardoor met regelmaat polderpeilverlagingen doorgevoerd (indexatie). In gebieden met diepe bodemdaling kunnen beide factoren – diepe én ondiepe bodemdaling – dus bijdragen aan verandering van de drooglegging en daarmee aanleiding geven voor peilaanpassing. De bijdragen zijn bovendien niet volledig onafhankelijk. Verandering in drooglegging door diepe bodemdaling kan ondiepe bodemdaling beïnvloeden.

Verandering via regionale grondwaterstroming

Diepe bodemdaling manifesteert zich in de ontwikkeling van een bodemdalingskom met een diameter van tientallen kilometers (voor een groot veld zoals het Groningen veld). Het freatische grondwater niveau t.o.v. NAP zakt mee met de diepe bodemdaling (zie hierboven) waardoor een verhang ontstaat in het grondwater niveau. Dit verhang veroorzaakt een regionale grondwaterstroming, met veranderingen in reeds aanwezige wegzijging en kwel (omslag van het een naar het ander valt daar ook onder). De dalingskom veroorzaakt een relatieve toename van wegzijging in de randgebieden en een relatieve toename van kwel meer richting de centrale delen van de kom. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 7.6. De wegzijging verlaagt de grondwaterstand iets, en de kwel zorgt juist voor een iets hogere grondwaterstand.



Figuur 7.6 Conceptuele illustratie van grondwaterstandsverandering ten opzichte van maaiveld en funderingen via veranderingen in de regionale grondwaterstroming door diepe bodemdaling. Het grondwatersysteem reageert omgekeerd voor bodemstijging boven een gasopslagveld.

[Deltares 2021] beschrijft alleen grenzen voor mogelijke uitsluiting van de genoemde mechanismen en niet de verwachting van de invloed. De genoemde grenzen zijn dus ook niet direct van toepassing voor het beoordelen van de mate van invloed van een van deze mechanismen op monumenten als de genoemde grenswaarden worden overschreden. Andersom kan er wel vanuit worden gegaan dat als de grenzen niet worden overschreden het mechanisme geen rol (van enige betekenis) speelt voor het betreffende monument.

7.2 Schade bij gelijkmatige bodemdaling

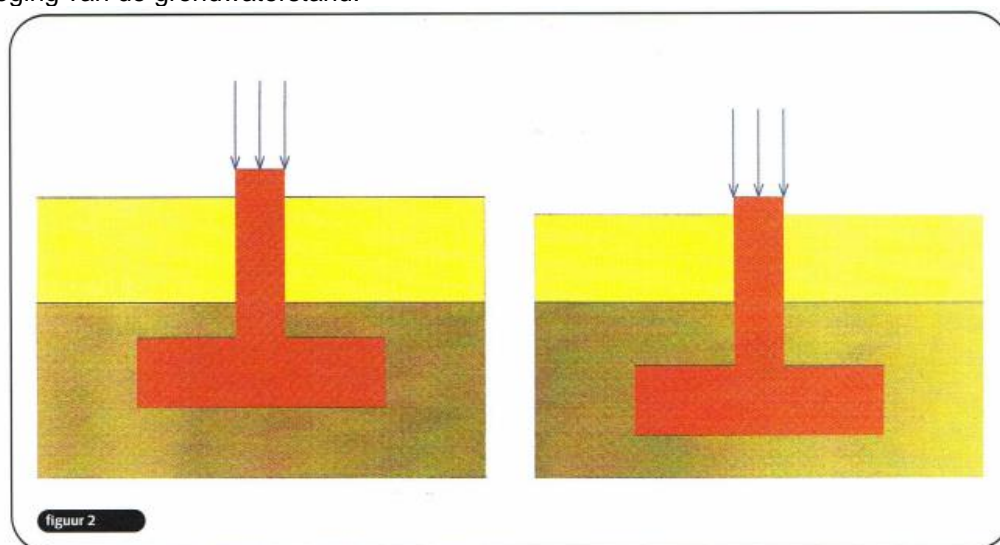
Bij een fundering op staal, met het funderingsniveau beneden de grondwaterstand, kan de draagkracht van de fundering negatief worden beïnvloed als de bodem daalt en de grondwaterstand gelijk blijft. In [Verruijt, 2000] is hier een nadere beschouwing van gegeven, in [Deltares,2021]] is dit aspect ook genoemd.

Als de fundering van het gebouw ongelijkmatig wordt belast en dus verschillende mate van reserve tegen bezwijken heeft, kan dit tot ongelijkmatige zakkingen van het gebouw en eventueel schade leiden.

Het effect wordt veroorzaakt door de verlaging van de effectieve boven-belasting naast de fundering door de relatieve stijging van de grondwaterstand. Voorwaarde voor het optreden van het effect is dat de belasting van de fundering de draagkracht al dicht is genaderd voordat de bodemdaling optreedt.

Deze extra zakkingen kunnen maximaal ongeveer de helft van de maximale hoeveelheid bodemdaling zijn.

Funderingen, waarvan de belasting de waarde overschrijdt die op basis van de gebruikelijke veiligheid mogelijk is, zijn 'overbelast'. Elke extra belasting of afname draagkracht zal leiden tot meer zakking dan bij 'normaal' belaste funderingen [TUD 2018], zo ook bij een relatieve verhoging van de grondwaterstand.



Door bodemdaling zakt in eerste instantie de fundering gewoon mee. Als de grondwaterstand gelijk blijft neemt het draagvermogen af. Om weer voldoende draagkracht te vinden moet de fundering iets extra zakken.

Figuur 7.7 Zakking van de fundering als gevolg van gelijkmatige bodemdaling; de bruine grondlaag is nat. [Verruijt, 2000].

7.3 Conclusie

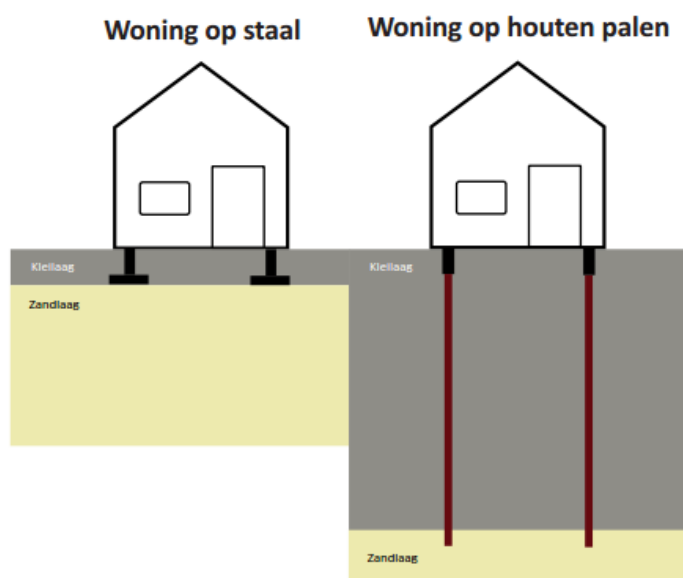
Door diepe bodemdaling kan indirect schade ontstaan aan gebouwen en monumenten. De oorzaak kan liggen in het aanpassen van boezempeil of polderpeil of het dalen van het maaiveld naast een fundering op staal die bijna tot de capaciteit wordt belast.

8 Effecten ondiepe bodemdaling - Grondwaterstandsverlaging, droogte

8.1 Inleiding

Droogte kan leiden tot schade aan ondiepe funderingen op staal en aan houten paalfunderingen. Bij een lage grondwaterstand kunnen de houten palen droog komen te staan waardoor er zuurstof bij kan komen en een rottingsproces in gang wordt gezet. Als de palen lang en/of vaak droog staan verliezen de palen hun draagkracht. Dit kan uiteindelijk leiden tot zinking en schade aan de bovenbouw.

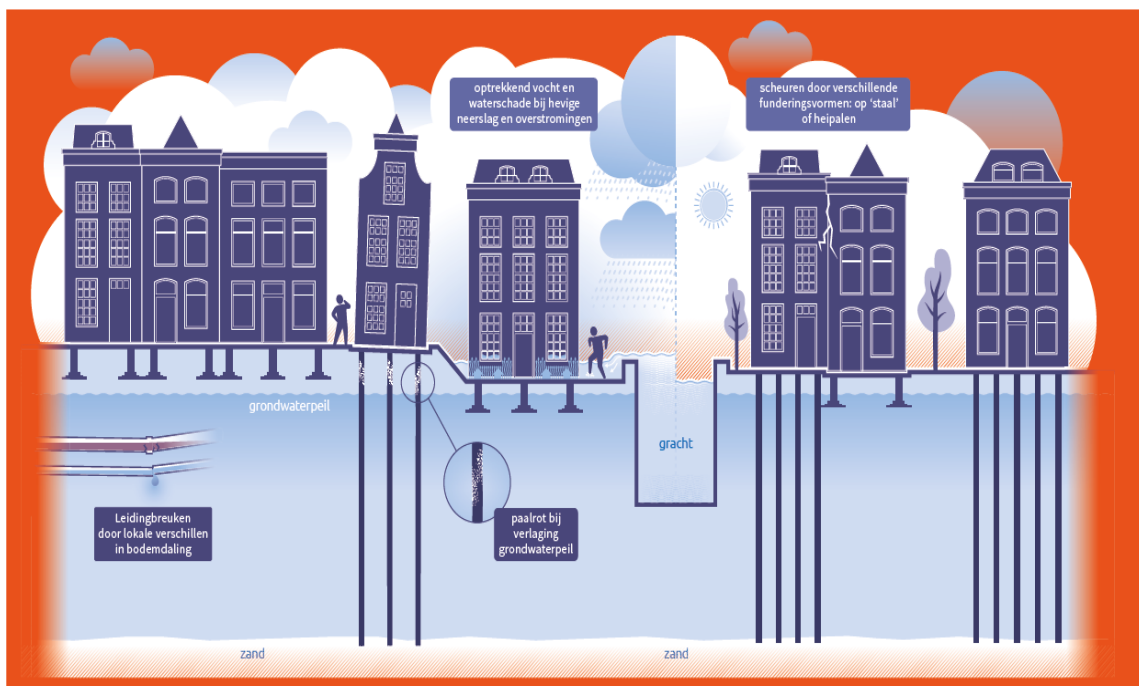
Funderingen op staal staan direct op de bodem. Bij droogte kunnen klei- en veengronden sneller dalen (respectievelijk door compressie en oxidatie). Het bovengelegen pand zakt en bij ongelijkmatige zakking kan er schade ontstaan.



Figuur 8.1 Soorten funderingen [KCAF 2016].

Volgens [Deltares,2020] zijn er naar schatting in Nederland 750.000-1.000.000 panden op een fundering van houten palen of op staal: deze zijn gevoelig voor bodemdaling en lage grondwaterstanden en daarmee voor droogte. Bij het merendeel van de panden is de verwachte ordegrrootte van herstelkosten beperkt, tussen €500-10.000. Bij een kleiner deel van de panden zullen grondige herstelwerkzaamheden en/ of een nieuwe fundering nodig zijn: hier kunnen de kosten oplopen tot € 30.000 - €120.000.

Een illustratie van schademechanismen in relatie tot grondwater en zetting is gegeven in Figuur 8.2.



Figuur 8.2 Illustratie schademechanismen in relatie tot (grond)water en zetting in de binnenstad van Gouda.
Bron: Gouda, folder Stevige Stad.

In [NKWK, 2019] wordt een praktische methode beschreven om de herstelkosten voor een pand dat schade heeft als gevolg van lage grondwaterstanden te schatten. Deze methode is zowel voor panden op houten palen als panden op staal uitgewerkt. Hierbij is gebruikt gemaakt van [Deltares, 2020]. Of een willekeurig pand risico heeft op funderingsproblematiek is van veel factoren afhankelijk: op welk type fundering staat een huis, hoe gevoelig is de locatie voor bodemdaling en verschilzetting, hoe fluctueert de grondwaterstand? Vaak is niet bekend op welke fundering een huis staat, en wat de huidige kwaliteit van de (houten palen) fundering is – mogelijk is deze in het verleden al eens hersteld. Op hoofdlijnen kan op basis van leeftijd en type ondergrond worden ingeschat of een pand op een gevoelige fundering staat: staal of houten palen.

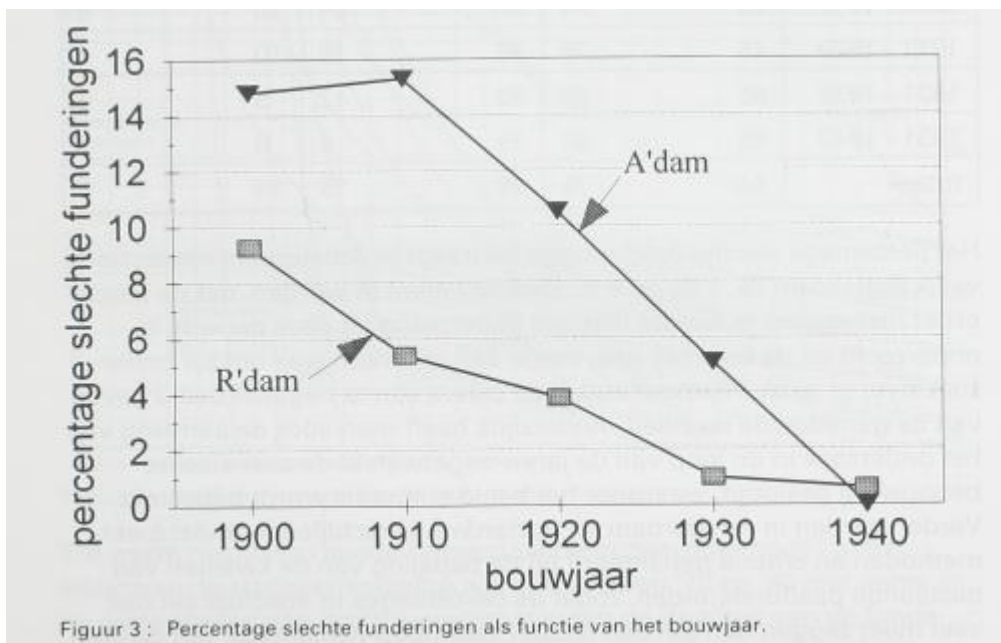
In de paragrafen 8.2 en 8.3 wordt dieper op de verschillende oorzaken ingegaan.

In paragraaf 8.4 wordt een samenvatting van de methode om de herstelkosten te schatten gegeven.

8.2 Impact droogte op houten paal funderingen

Tot de jaren '70 is in Nederland op klei – en veengronden regelmatig gebruik gemaakt van funderingen houten paalfunderingen. Sinds die tijd is het aantal houten palen dat toegepast wordt drastisch verminderd. Houten paalfunderingen kunnen beschadigen door zakkende grond die aan de palen hangt (*negatieve kleef*), bacteriële aantasting en, als het funderingshout droog komt te staan, schimmelaantasting (*paalrot*).

Omdat het veelal om trage processen gaat, kan het zijn dat pas na decennia (significante) schade ontstaat. Bij aantasting door paalrot verliezen palen hun draagkracht, na een gemiddelde cumulatieve droogtestand van 10-20 jaar verzakt het pand.



Figuur 8.3 Aantal panden met slechte funderingen in Amsterdam en Rotterdam in relatie tot het bouwjaar. [Van Tol, 1994].

Het optreden van negatieve kleeft heeft een directe relatie met het optreden van bodemdaling omdat de grond boven de paalpunt (vanaf maaiveld) harder zakt dan de paal zelf en daardoor een extra belasting ontstaat. Negatieve kleeft kent een maximale ontwikkeling, waarna afhankelijk van de verhouding tussen de belasting en de capaciteit van de paal, de paal maximaal net zo hard zal zakken als de grond aan maaiveld.

Het optreden van schimmel- of bacteriële aantasting heeft een constructieve invloed op de draagkracht van de palen. Deze aantasting wordt direct beïnvloed door de grondwaterconditie (zowel hoogte als samenstelling).

Het optreden van schimmel- of bacteriële aantasting heeft een constructieve invloed op de draagkracht van de palen. Deze aantasting wordt direct beïnvloed door de grondwaterconditie (zowel hoogte als samenstelling). Voor houten paalfunderingen bestaat geen algemene richtwaarde wanneer aantasting gaat plaatsvinden, maar wordt de toelaatbare grondwaterstandsverlaging bepaald door hoe ver de grondwaterstand boven het bovenste funderingshout staat, de zogenaamde grondwaterdekking. Volgens de norm voor de beoordeling van bestaande bouw [NEN 8707, 2018] moet de grondwaterstand zich boven het bovenste funderingshout bevinden, dan wel dat in het geval van een te lage grondwaterstand, de houten funderingselementen niet zijn aangetast door schimmels. In een opmerking wordt toegelicht: Het toetsingsniveau van het grondwater wordt bepaald door de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG). Dit toetsingsniveau kan worden afgeleid uit een combinatie van enkele peilbuiswaarnemingen ter plaatse en een langjarige reeks van peilbuiswaarnemingen op enige afstand.

In [F₃O richtlijn houten paalfunderingen onder gebouwen 2016] is m.b.t. de grondwaterstand een indicatie gegeven wat het oordeel over de houten paal fundering zou moeten zijn (wetende dat er vaak een beperkt aantal metingen ter plaatse zijn). Deze tabel is gereproduceerd in

Tabel 8-1. De grondwaterdekking in deze tabel is het verschil tussen de gemeten grondwaterstand (niet GLG) en het bovenste funderingshout.

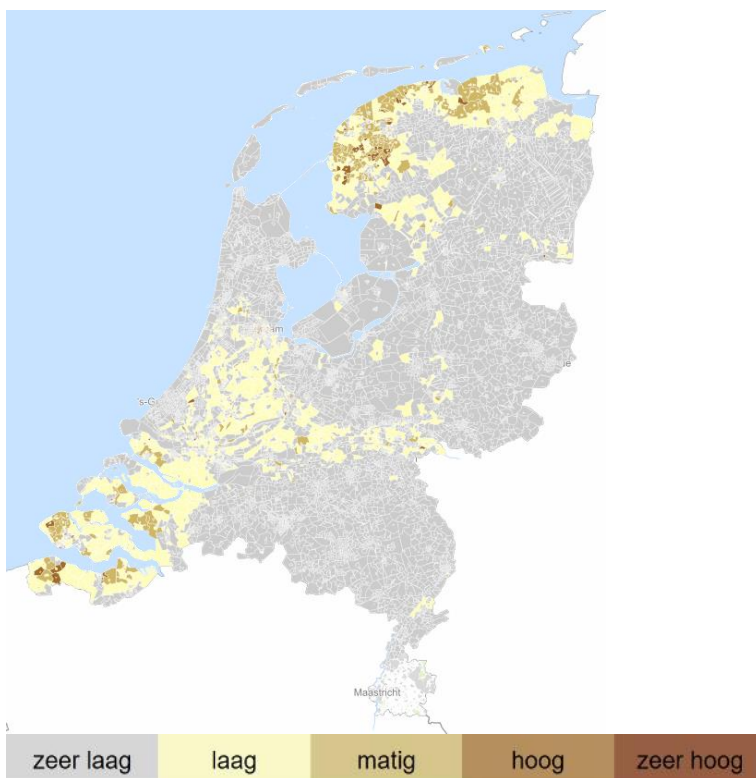
Tabel 8-1 Richtlijn voor benodigde grondwaterdekking volgens de F3O richtlijn.

Grondwaterdekking [cm]	Benaming / oordeel
> 20	Voldoende
20 tot 5	Klein
< 5	Onvoldoende

Voor het vaststellen van de draagkracht en conditie van houten funderingspalen bestaat veel literatuur en handreikingen, zoals bij KCAF en de richtlijn F3O: Richtlijn (2016).

In [Deltares, 2020] wordt schade die ontstaat aan houten palen in de in H5 genoemde 5 schadeklassen onderverdeeld. Voor elke schade klasse is een schatting van de minimale en maximale herstelkosten gemaakt. Het rapport geeft tevens een indicatie van de verwachting van de additionele schade tot 2050 door klimaatverandering.

Veel gemeenten hebben ook een eigen beoordelingssysteem voor de kwaliteit van funderingen, vooral afgeleid voor funderingen op houten palen. Waarden bestaan in Amsterdam, Rotterdam, Schiedam, Dordrecht, Haarlem. Rapport [Deltares 2009] geeft hiervan een overzicht.



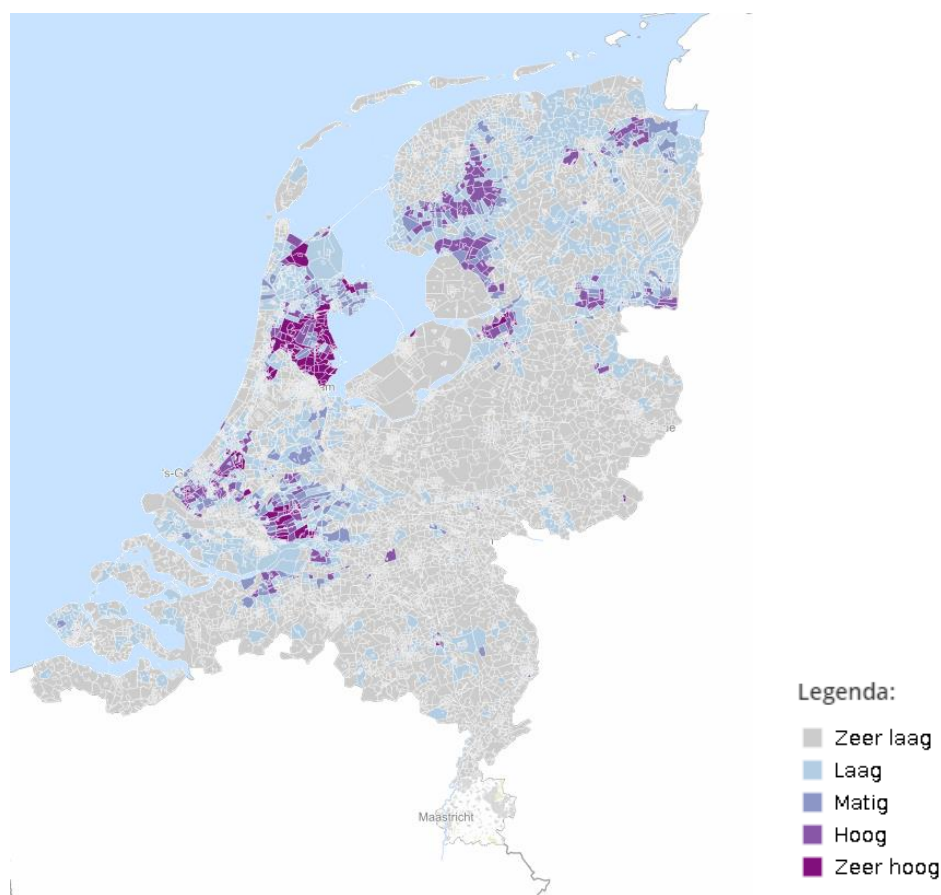
Figuur 8.4 Effect paalrot door droogte (2050) uitgaande van klimaatverandering (hoog). Klimateffectatlas.nl

8.3 Impact droogte op funderingen op staal

Op een ondergrond met weinig draagkracht zoals klei of veen zijn deze funderingen gevoelig voor beschadiging als gevolg van zetting en lage grondwaterstanden. Schade aan panden met een ondiepe fundering kan vooral ontstaan als het pand bij bodemdaling niet gelijkmatig maar scheef zakt. Dit kan veroorzaakt worden door verschillen in bodemsamenstelling of grondwaterstand, en verschillen in belasting.

In [Deltares,2020] wordt schade die ontstaat aan funderingen op staal in de in H5 genoemde 5 schadeklassen onderverdeeld. Voor elke schade klasse is een schatting van de minimale en maximale herstelkosten gemaakt. Het rapport geeft tevens een indicatie van de verwachting van de additionele schade tot 2050 door klimaatverandering.

Voor het vaststellen van de draagkracht en conditie van een fundering op staal bestaat veel literatuur en handreikingen, zoals de richtlijn [F₃O,2014] Onderzoek en beoordeling van funderingen op staal.



Figuur 8.5 Risico verschilzetting [klimaat-effect-atlas] scenario 2050 hoog.

8.3.1 Samendrukking in klei en veen

Voor samendrukking/zetting wordt er meestal vanuit gegaan dat de kans op schade afhangt van de homogeniteit van de ondergrond. Indien sprake is van een homogene, stevige ondergrond, is de zakking van het gebouw in het algemeen gelijkmatig, waardoor er geen schade zal ontstaan. Bij een inhomogene ondergrond of een ondergrond met slappe, sterk samendrukbare laag kunnen ongelijkmatige zakkingen over het gebouw resulteren in scheefstand en/of scheurvorming. Bij samendrukking spelen vooral verzadigde lagen onder de grondwaterspiegel een rol. Dit mechanisme is vooral relevant voor funderingen op staal.

8.3.2 Krimp van klei en veen

Recent onderzoek door Deltares wijst op een mogelijk grotere invloed van krimp van vooral klei in Nederland dan voorheen gedacht. Ook veen kan krimpen. Krimp is het verschijnsel dat grond in volume afneemt door verdroging, het kan bij vernatting daarna weer zwellen (toename volume). Dit cyclische gedrag kan tot vervormingen van maaiveld en panden leiden.

Bij funderingen op staal kan krimp(-zwell) schade optreden wanneer klei aanwezig is tussen de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) en de fundering. Door de sterke ruimtelijke verschillen in verdamping en vernatting onder fundering door de seizoenen vindt ongelijkmatige uitdroging van en vochtopname door de klei plaats [Fityus [2004]; [Jones,2012]. Bij grondwaterstands daling kan de krimp-zwell dynamiek sterker worden wanneer een grotere kleidikte blootgesteld wordt aan de vochtverandering of wanneer de grondwaterstand vaker tot onder de basis van de kleilaag zakt waardoor deze sterker uitdroogt en krimpt (en sterker zwelt in de in de opvolgende natte periode). Verschil-

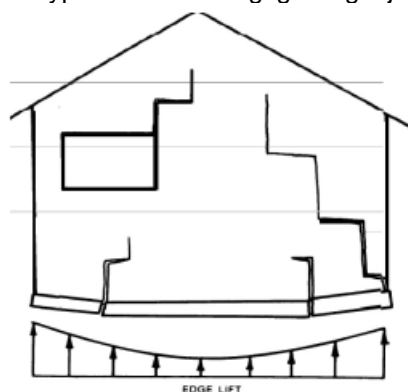
zakking/heffing door krimp-zwel vervorming is veel minder afhankelijk van inhomogene ondergrond dan verschil-zetting door samendrukking doordat verdamping intrinsiek ongelijkmatig is. Bovendien is het percentage volumeverandering door krimp-zwel erg groot in vergelijking met volumeverlies door samendrukking/zetting. Wanneer klei boven de grondwaterspiegel komt en vocht verliest door verdamping, is de korrelspanningstoename vergelijkbaar met dat van 10 tot 100 m grondwaterstandsverlaging zoals gehanteerd in zettingsberekeningen. In Nederland is nog weinig onderzoek gedaan naar krimp-zwel schade. Er zijn sterke aanwijzingen dat dit proces een steeds belangrijkere rol speelt in kleigebieden in relatie tot een toename aan klimatologische droogte.

Er zijn voorbeelden van schades ten gevolge van (vermoedelijk) krimp/zwel gedrag over de periode 2018-2020, zie iguur 8.6.



Figuur 8.6 Voorbeelden schade ten gevolge van krimp/zwel van klei (Utrecht, Zevenaar, Roden met klok mee).

Een typisch vervormingsgedrag bij krimp/zwel ziet er als volgt uit:



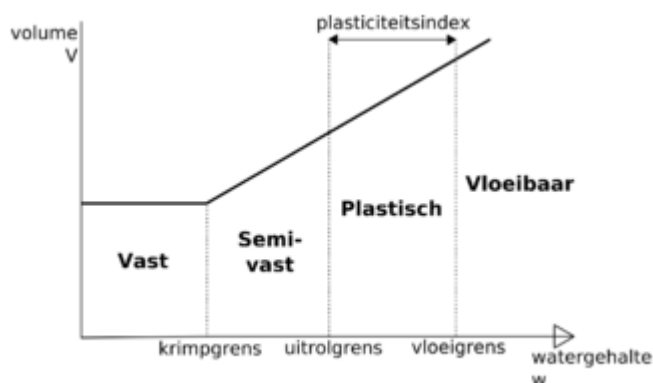
Figuur 8.7 Vervormingsgedrag bij krimp of zwel.

Het krimp/ zwel gedrag hangt samen met de dikte van de klei en de seizoensfluctuaties van de grondwaterstand. Het zwellenvermogen van klei hangt af van de mineralogische samenstelling, waarbij vooral smectiet zwellen gevoelig is en Kaolien of Iliet minder gevoelig. Het zwellenvermogen kan ook worden vergeleken met de plasticiteitsindex van klei (PI).

De **plasticiteitsindex** PI van een grondmonster is het verschil in watergehalte tussen de vloeigrens w_L en de uitrolgrens w_P (de Atterbergse grenzen), of anders gezegd het verschil in watergehalte nodig voor de overgang van een semi-vaste toestand tot een plastische toestand en van plastisch tot de vloeibare toestand:

$$PI = w_L - w_P.$$

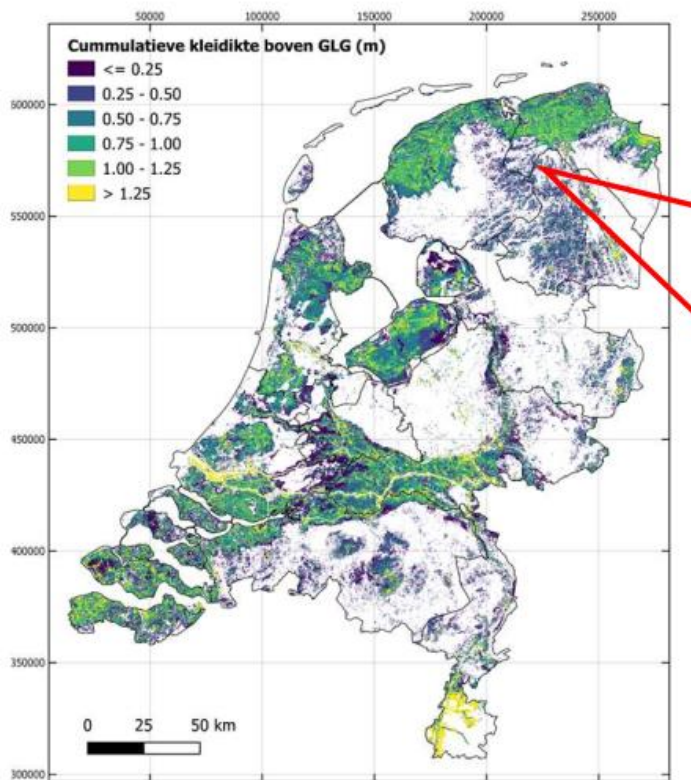
Het geeft de grootte van het gebied (in watergehalte) waarbij de grond zich plastisch gedraagt.



Figuur 8.8 Plasticiteitsindex.

Klei met een PI groter dan 40 heeft een hoge zwellenpotentiaal [Deakin 2005]. De gemeten vrije zwel in het laboratorium bedraagt 3,5% van de hoogte van het monster, vertaald naar een situatie buiten zou dat 3,5% van de dikte van de kleilaag zijn.

In [Deltares,2021] is voor de gevoeligheid voor krimp/zwel gebruik gemaakt van de kleidikte tussen de toplaag (0,5m onder maaiveld, diepte van de fundering) en de GLG waarde. Als de kleidikte in deze zone groter is, is er een grotere gevoeligheid.



Figuur 8.9 Cumulatieve kleidikte boven GLG [m] [uitsnede uit Deltares, 2021].

8.3.3 Oxidatie van klei en veen

Wanneer onder het funderingselement veen aanwezig is en de grondwaterstand kan dalen tot in die laag kan door oxidatie/krimp extra zakking van dat funderingselement optreden.

Door zuurstofindringing in veen vindt afbraak van het organisch materiaal door oxidatie plaats waardoor het veen sterkte verliest en organisch materiaal verdwijnt in de gasfase (CO_2). Of dit risico bestaat is vooral afhankelijk van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) ten opzichte van het veen. Verlaging van de (gemiddelde) grondwaterstand zal in de regel ook gepaard gaan met een GLG verlaging. Hierdoor kan oxidatie in gang gezet worden of worden versterkt. Elke laagdiktereductie zal blijvend zijn en niet terugveren. Met de huidige beschikbare kennis moet worden vastgesteld dat een fundering op staal met veen onder het funderingsniveau naar alle waarschijnlijkheid in normale omstandigheden niet te handhaven is (een lage technische levensduur) omdat vervormingen (en dus zakkingsverschillen over een gebouw) doorgaans al hoog zijn.

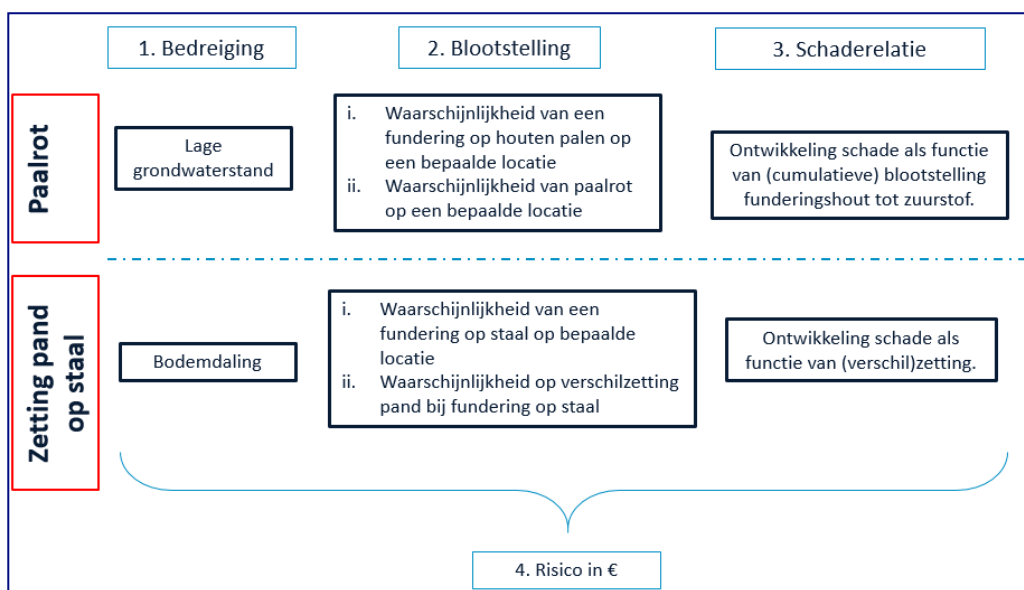
Veenoxidatie (prognose 2020-2050) is opgenomen in de klimaat-effectatlas en opgenomen in de effecten zoals beschreven in Hoofdstuk 3.

8.4 Samenvatting methode schatting herstelkosten

In [NKWK, 2019] wordt een praktische methode beschreven om de herstelkosten voor een pand dat schade heeft als gevolg van lage grondwaterstanden te schatten.

De methodiek voor beoordeling van het risico op funderingsschade door paalrot en vershilzetting van panden op staal bestaat uit vier elementen:

- 1 **Bedreiging:** het karakteriseren van de fysische omstandigheden die tot schade kunnen leiden: in dit geval gaat het om bodemdaling en lage grondwaterstanden.
- 2 **Blootstelling:** Analyse van factoren die ervoor zorgen dat een gebouw gevoelig is voor schade – bijvoorbeeld het type fundering, en de karakteristieken van die fundering
- 3 **Schaderelaties:** De relatie tussen de mate van schade bij blootgestelde gebouwen bij een bepaalde mate van bedreiging.
- 4 **Risico in €:** in dit geval is alleen directe schade bepaald op basis van herstelkosten, waarbij wordt aangenomen dat alle schade éénmalig hersteld wordt.

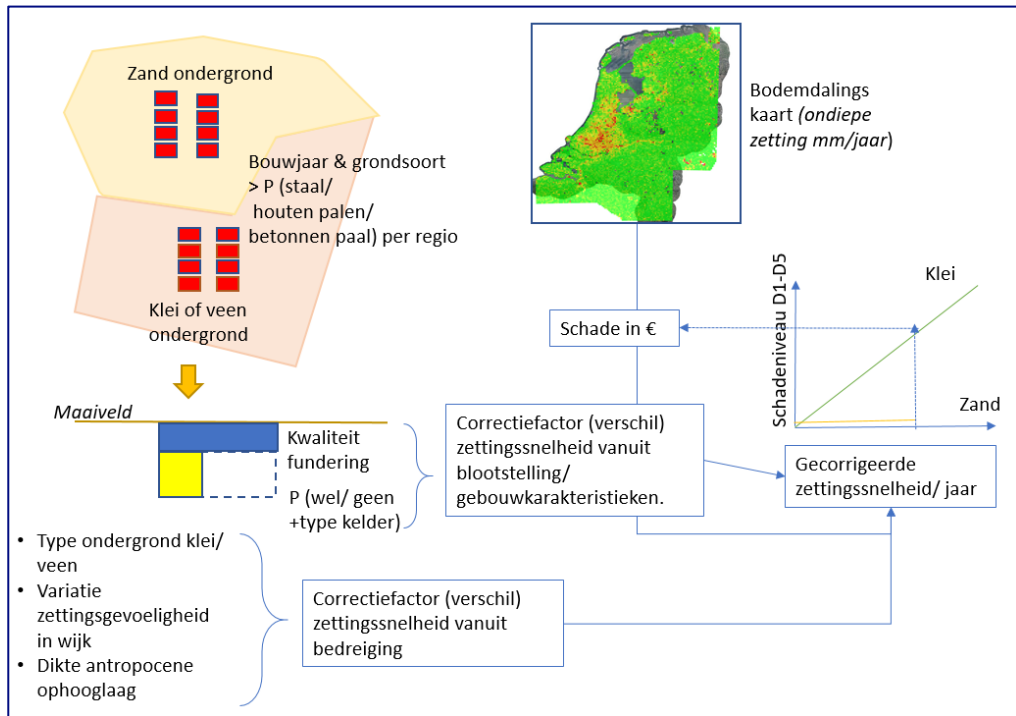


Figuur 8.10 Algemene aanpak risicoanalyse voor paalrot en zetting van panden op staal.

Methodie paalrot

De methode om het risico op paalrot in te schatten bestaat uit drie onderdelen (Figuur 8.11):

- i. Een inschatting van de kans dat een pand op houten palen gefundeerd is.
- ii. Een inschatting van de gevoeligheid van elk pand voor droogstand: hoeveel dagen per jaar is de paalfundering naar verwachting blootgesteld aan zuurstof? Belangrijke factoren zijn de diepteligging van het funderingshout en de grondwaterstand.
- iii. Schaderelatie – een inschatting van de gevolgen van droogstand voor het verwachte schadeniveau in 2050, afhankelijk van type ondergrond ter hoogte van de paalkop

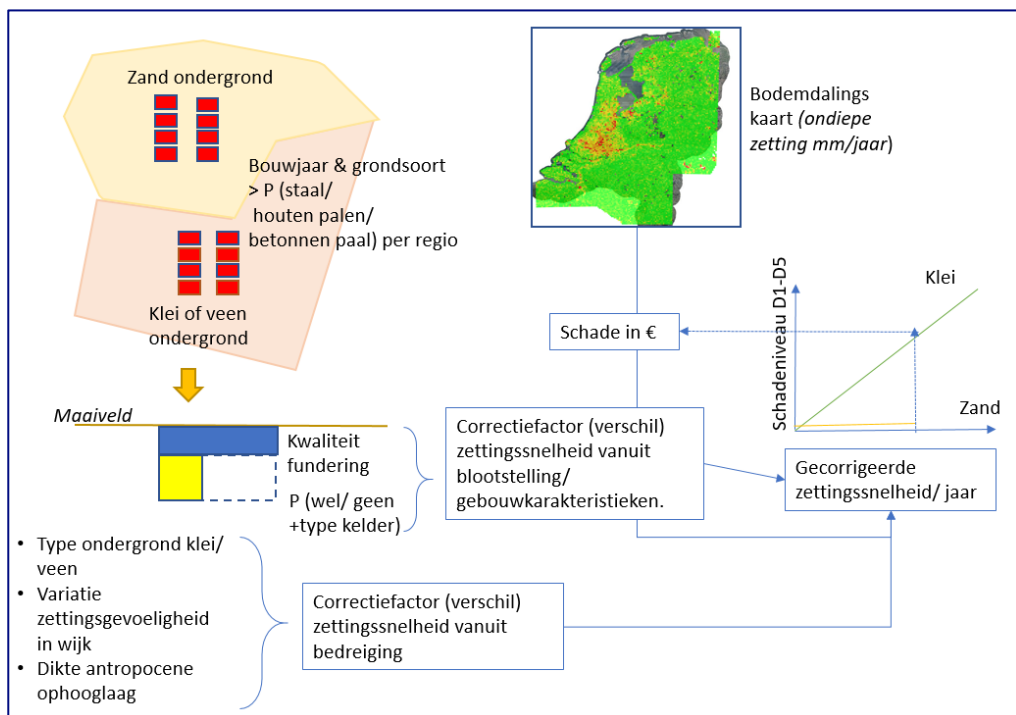


Figuur 8.11 Overzicht aanpak risicoanalyse houten paalfunderingen – paalrot.

Methode fundering op staal

De methode om het risico op verschilzetting bij een pand op staal in te schatten bestaat uit drie onderdelen:

- Een inschatting van de kans dat een pand op staal gefundeerd is.
- Een inschatting van de gevoeligheid van een pand voor verschilzetting. Belangrijke factoren zijn snelheid van bodemdaling, gevoeligheid van ondergrond op locatie en eigenschappen van het pand zelf.
- Schaderelatie: verwacht schadeniveau bij een bepaalde verschilzetting.



Figuur 8.12 Methode verschilzetting fundering op staal.

8.5 Conclusie

Panden op staal of houten palen zijn gevoelig voor grondwaterstandsverlaging. Panden op houten palen zijn gevoelig als de grondwaterstand lang onder de paalkop staat. Voor panden op staal treden vooral zakkingsverschillen, met als mogelijk gevolg schade, op bij heterogene bodem en/of ongelijkmatige grondwaterstandsverlaging. Panden op gemengde funderingen (deel op staal, deel op palen) hebben een grotere kans op schade dan panden met één type fundering.

Er is een praktische methode ontwikkeld om op landelijke schaal de schade voor een pand met een fundering op palen of staal te schatten.

9 Effecten ondiepe bodemdaling - grondwaterstandsverhoging

9.1 Effecten grondwaterstandsverhoging in Nederland

Een grondwaterstandsverhoging kan leiden tot zakking en schade aan panden. Een stijging van de grondwaterstand kan leiden tot wateroverlast en vermindering van draagkracht van de fundering. In het verdiepend schade-onderzoek kanaal Almelo – de Haandrik [Deltares, 2021]] is op verzoek van de Provincie Overijssel door Deltares onderzocht wat de relatie op is tussen de schadebeelden aan de panden langs het kanaal Almelo – De Haandrik en de uitvoering van werkzaamheden aan het kanaal in de periode 2011 – 2016. Hierin is ook het aspect van grondwaterstijging beschouwd.

De enige kanaalingreep, die tot stijging van de grondwaterstand kan hebben geleid, is het baggeren van het kanaal. Deze ingreep heeft ertoe geleid dat de grondwaterstand bij de panden 20 tot 30 cm omhoog kan zijn gegaan. Stijging van de grondwaterstand door baggeren is tijdelijk van aard en moet samenvallen met een natte periode om tot wateroverlast of invloed op de draagkracht te leiden.

Bij 7 van de 21 onderzochte panden is er een mogelijke bijdrage vastgesteld door baggerwerkzaamheden van het kanaal. Bij 4 van deze panden kan de draagkracht van de fundering tijdelijk zijn afgenomen en daardoor kan een zakking in de orde van 5 a 10% van de totale zakking van deze panden zijn opgetreden. Bij één pand kan scheurvorming in kelder vloeren zijn veroorzaakt door het baggeren. [Deltares 2021] geeft dus aan dat, soortgelijk aan hetgeen beschreven in [Verruijt 2000] in paragraaf 9.2, een effect van schade aan een gebouw mogelijk is bij een stijging van de grondwaterstand relatief ten opzichte van de fundering.

In [Bijnagte et al, 2006] is een beoordelingsprocedure opgesteld om schadegevallen te beoordelen. Eerst moet worden vastgesteld of er een afname van de drooglegging is. Als dit het geval is, moet worden berekend of de fundering een zeer lage veiligheid heeft. Als de veiligheid zeer laag is, zijn extra grondonderzoek ter plaatse en meer nauwkeurige berekeningen nodig. Indien uit deze laatste berekeningen blijkt dat de veiligheid niet voldoende is moet worden vastgesteld hoeveel de eventuele bijdrage van de grondwaterstijging aan de totale vervorming is. Hiervoor zijn het bepalen van de opgetreden vervormingen van het gebouw door middel van waterpassingen, het uitvoeren van een plaatdrukproef en berekeningen met een eindige elementenmodel noodzakelijk. De procedure is toegepast op een praktijkgeval van een woning met schade. In dat geval was de peilverhoging 0,13 m. Voor dit praktijkgeval bleek het effect van de peilverhoging vrijwel nihil. De eindconclusie van [Bijnagte et al, 2006] is dat peilverhoging nagenoeg nooit de oorzaak zal zijn van schade. Voor twijfelgevallen is de beoordelingsprocedure opgesteld.

Er is ook internationaal literatuur op dit onderwerp.

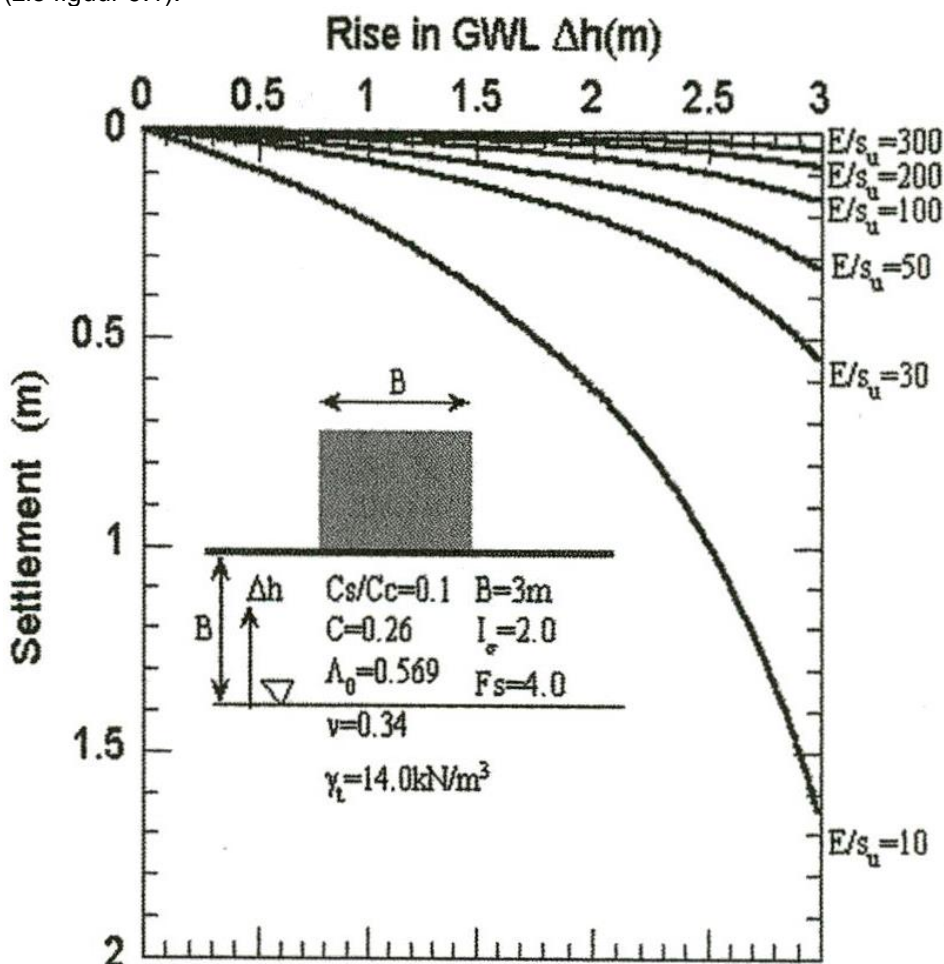
9.2 Effecten grondwaterstandsverhoging internationaal

In [Yasuhar et al 2003] wordt een berekeningsmethode gepresenteerd om de mogelijkheid tot instabiliteit van een fundering op staal als gevolg van een stijgende grondwaterstand te bepalen. Berekeningen zijn gemaakt voor funderingen in zand en funderingen in klei. Een stijgende grondwaterstand leidt tot een afname van de draagkracht.

Als voorbeeld wordt een fundering op zand beschouwd. De fundering is 0,5 m breed en ligt 0,5 meter onder maaiveld. De grondwaterstand ligt 0,5 m onder het funderingsniveau. Bij een grondwaterstandstijging van 0,5 m blijft de grondwaterstand net onder het funderingsniveau. De draagkracht neemt dan met circa 25% af. Stijgt de grondwaterstand boven het funderingsniveau, dan neemt de draagkracht iets sneller af. Als de grondwaterstand met 1,0 m stijgt (dus tot maaiveldniveau) is de afname van de draagkracht 60%. Dat is een groot effect.

Voor dezelfde fundering in klei neemt de draagkracht nog niet veel af (5%) zolang de grondwaterstand nog onder het funderingsniveau blijft. Stijgt het grondwater tot maaiveld dan neemt de draagkracht snel af (50%).

In de paper staat ook een berekeningsmethode voor de zetting van de fundering als gevolg van het stijgen van de grondwaterstand. Deze zetting is afhankelijk van de stijfheid van de ondergrond en de grootte van de grondwaterstijging in relatie tot de breedte van de fundering (zie figuur 9.1).



Figuur 9.1 Voorbeeld van zetting van fundering op staal in klei door stijging van de grondwaterstand.

9.3 Conclusies

Bij een fundering op staal leidt het stijgen van de grondwaterstand tot een afname van de draagkracht. Hierdoor kunnen zetting en zettingsverschillen ontstaan. Dit kan leiden tot schade. De afname van de draagkracht is beperkt als de grondwaterstand 0,5 m stijgt en nog onder het funderingsniveau blijft. Als de grondwaterstand 1 m stijgt, en boven het funderingsniveau komt, is de afname van de draagkracht groot.

Een geringe grondwaterstijging ten gevolge van een peilverhoging (bijvoorbeeld circa 0,15 m) zal nagenoeg nooit de oorzaak zijn van schade. Voor twijfelgevallen is een beoordelingsprocedure beschikbaar.

10 Maatregelen

10.1 Maatregelen in de vorm van regelgeving

Uit [KCAF handleiding funderingsproblematiek 2016]:

De gemeente heeft vanuit de Waterwet een zorgplicht voor het grondwater in openbaar gebied. De eigenaar van een perceel met gebouw is verantwoordelijk voor het grondwater vanaf de erfgrans en daarmee ook voor de eigen fundering. Omdat grondwater niet simpelweg te stapelen is, is een samenwerking tussen gemeenten en eigenaren nodig bij het voorkomen of uitbreiden van funderingsproblemen.

Bij schade zeggen eigenaren vaak geen invloed te hebben op het grondwaterniveau. Van de gemeente verwachten ze een tegemoetkoming in de herstelkosten van de fundering. De huidige jurisprudentie ondersteunt deze zienswijze niet, zoals het voorbeeld in Dordrecht laat zien (zie de uitspraak Dordrecht HR:2012:BX7487). Tot nu toe zijn er geen uitspraken geweest die tot een tegemoetkoming hebben geleid door veranderingen in het grondwaterpeil door bodemdaling, behalve als het waterschap (verantwoordelijk voor de peilen) het peil meer dan noodzakelijk voor het volgen van de bodemdaling heeft verlaagd [veenweiderapport Friesland].

De Hoge Raad heeft inmiddels ook bevestigd dat de gemeente niet verantwoordelijk is voor funderingsschade aan houten palen als gevolg van droogstand door lekkende riolen, mits deze zich voldoende heeft ingespannen (opstellen van beleid en het bloksgewijs vervangen van de riolering) nadat de problemen van de lekkende riolen bekend werden.

In het LOSS project (www.nwa-loss.nl) wordt momenteel onderzoek gedaan naar de juridische en governance aspecten van maatregelen om bodemdaling tegen te gaan. Maatregelen in deze hoek zijn bijvoorbeeld aanpassingen in ruimtelijke planning, watermanagement en landgebruik. In met name klei bodems kan keuze van boomtype voorkomen dat overmatig water aan de bodem wordt onttrokken. Verder kunnen regels en belastingen worden ingesteld voor de hoeveelheid onttrokken grondwater.

10.2 Maatregelen tegengaan oorzaak bodembeweging

Er is veel onderzoek verricht (en gaande) om de oorzaken van bodemdaling te verminderen. Het gaat dan vaak om ingrepen in het (grond)watersysteem, zoals het aanbrengen van drainage/infiltratie of het niet verder verlagen van de grondwaterstand.

ERM beschrijft op hun website de volgende mogelijke maatregelen:

“Maatregelen om de waterhuishouding te verbeteren moeten er voor zorgen dat ter plaatse van de fundering de grondwaterstand wordt verhoogd. Er moet dus toevoer van water plaatsvinden.

- Het plaatsen van een infiltratiedrain.
- Een infiltratiedrain is een horizontale geperforeerde buis waarmee water in de bodem wordt geïnfiltrated.
- Het toepassen van retourbemaling.
- Met behulp van retourbemaling wordt elders opgepompt grondwater weer in de bodem teruggebracht.
- Het plaatsen van damwanden (meestal van staal) of van kleiwanden.

Een damwand is een constructie, die bestaat uit een verticaal in de grond geplaatste wand. De wand bestaat uit losse planken die waterdicht worden aangebracht. Een kleiwand heeft dezelfde functie. Daarbij wordt er vervolgens water toegevoerd.

Dergelijke maatregelen gaan een individueel monument of verzameling monumenten vaak ver te boven en zijn hier derhalve niet verder uitgewerkt.

Voor grootschalige maatregelen wordt verwezen naar de studie van [PBL 2016] of de [regiodeal bodemdaling Groene Hart].

Op wijkniveau geeft [KCAF 2014] voorbeelden van de effectiviteit van grondwateraanvulling voor funderingbehoud.

Kennis over en praktijkervaringen met maatregelen worden ook verzameld op www.slappebodem.nl, en verder ontwikkeld in het Nationaal Kennisprogramma bodemdaling en het NWA-LOSS project.

10.3 Maatregelen op pand niveau

10.3.1 Funderingsherstel

Funderingsherstel kan worden uitgevoerd door de belasting op de fundering te verminderen, deze gedeeltelijk (partieel) of geheel te vervangen. Voor een dergelijk herstel kan worden verwezen naar de F3O richtlijnen voor houten paalfunderingen en funderingen op staal, recent vervangen door Funderingen onder gebouwen [KCAF, 2022]. Ook het handboek funderingsherstel [CURnet 2018] is nog relevant.

Verminderen negatieve kleef

Door het verwijderen van grond rondom de palen kan een paalfundering worden ontlast van de negatieve kleef. Zwaar ophogingsmateriaal, zoals zand, kan worden vervangen door een licht materiaal, zoals schuimbeton of een lichtgewicht granulair product. Bij een te zware belasting van het pand, bijvoorbeeld door het inbrengen van betonnen vloeren, is het soms mogelijk de verzwaring op te vangen door enkele extra palen te heien.

Partieel herstellen fundering

Partieel herstellen van de fundering is soms nodig als panden gemeenschappelijke bouwmuren hebben.

Bij paalkopverlaging wordt de houten paal voor een deel ontgraven, op een vastgesteld veel lager niveau afgezaagd en het tussenstuk voorzien van een vijzel en gewapend beton. De fundering moet dan wel voldoende draagvermogen hebben. Maar let op: Paalkopverlaging geeft geen verbetering van het totale draagvermogen, dus lost het eventuele probleem met negatieve kleef niet op. Lees verder bij: schade bij bemalen. Deze herstelmethode wordt alleen nog toegepast in heel specifieke situaties.

Totaal funderingsherstel

Bij het totaal vervangen van de fundering worden bij oude panden in binnensteden vaak nieuwe kleine diameter palen aangebracht, die via inkassingen met balken of een vloer aan de bestaande muren worden bevestigd.

Injecties

[ERM website] Op zandgronden kunnen injectiemethoden voor grondverbetering worden gebruikt. Bij injectie worden er materialen of additieven in de grond ingebracht. Daarmee wordt de sterkte, de draagkracht of de stabiliteit van de grond verbeterd. Deze methoden zijn in de meeste klei- of veengronden niet toepasbaar.

Kosten funderingsherstel (uit case Gouda rapport; paragraaf 10.3)

Het installeren van een diepe fundering onder een ondiep gefundeerd pand gaat als volgt: de aanwezige fundering blijft in de grond en ernaast of eronder worden betonnen palen geïnstalleerd. Dat gebeurt idealiter met een trilling-arme methode zoals persen, om trillingsschade te voorkomen. Dezelfde methode wordt toegepast bij herstel van houten paalfunderingen. In de binnensteden ligt de fundering vaak in een laag waar ook historisch puin in zit. Daardoor kunnen de kosten hoger uitvallen dan gemiddeld. Een vergelijkend onderzoek naar funderingsherstelkosten [Veldkamp 2012] laat bedragen tussen € 25.000-

52.500 per huis zien. De indicatie voor Dordrecht is hoger dan voor andere steden, omdat het hier vaak gaat om grotere en duurdere woningen.

Tabel 10.1 Kentallen voor herstel van schade aan gebouwen [Veldkamp 2012].

Municipality	Restoration costs per house	Loan	Working load	Source problem
Dordrecht	€ 52,500	€ 6,810	800	Fungi
Gouda	€ 25,000	€ 15,000	Not known	Fungi
Haarlem	€ 30,000	€ 18,500	3500	Bacteria
Schiedam	€ 29,500	€ 4,500	All houses with a shallow foundation	Negative suction
Waddinxveen	€ 23,325	€ 13,613	Not known	Fungi
Zaanstad	€ 28,000	€ 1,815	1700	Bacteria

10.3.2 Schadeherstel scheuren

Er zijn weinig bronnen die een schatting geven van de herstelkosten van scheuren. Naar verwachting is er een relatief brede bandbreedte: oude, historische panden zijn duurder om te herstellen dan nieuwbouwwoningen. Ook is er een verschil tussen het optisch herstellen (voegen, kitten) en grondig herstellen van de woning. Dit hangt af van de schadecategorie: deze lopen van oppervlakkig herstel tot in het ergste geval volledig verbouwen van het pand. Momenteel loopt een onderzoek in een viertal steden in Nederland waar de herstelkosten van schade wordt onderzocht. In Tabel 10.2 staan enkele kentallen genoemd. Op basis hiervan lijken gemiddelde herstelkosten rond € 4000 te liggen. Er valt echter te verwachten dat er op termijn ook woningen zijn die in de ernstigste schadecategorie zullen vallen: waar stabiliteit van het pand in gevaar is en het hele pand moet worden hersteld.

Tabel 10.2 Kentallen voor herstel van schade aan gebouwen door bodemdaling.

	Herstel van	Bron
€4200 (prijspeil 2007)	'Casco': basis vloeren en muren van de woning, niet cosmetisch. Onderdeel van herstelwerkzaamheden aan fundering. Gemiddeld bedrag Dordrecht 2003-2007	(Bellaart 2008)
Meer dan € 5000	Onbekend	(Vries et al. 2016)
3600 £ (prijspeil 1993)	Claims bij verzekeringen in Engeland voor schade door scheuren bij lage woningen	(Shabha and Kuhwald 1995)
1100-1600 € bij een te herstellen oppervlak van 20 m ² . ²⁵	Herstel van scheuren aan façade	(Offerteadviseur 2016)

De bandbreedte voor kosten van herstel per gebouw (KCAF, uit rapport klimaatschadeschatter funderingen).

Tabel 10.3 Minimum en maximum bedragen voor herstel gebouwen (200 m3) in € .

Schadeklasse	Herstelwerkzaamheden	Min	Max
D1	Schilderwerk binnen	1.000	2.000
D2	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers	2.500	5.000
D3	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers, herstel pleisterwerk	5.000	10.000
D4	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers, herstel pleisterwerk, herstel kozijnen, vloeren	30.000	60.000
D5	Schilderwerk binnen, opvullen/ herstel scheuren (buiten), huur van steigers,	60.000	120.000

10.3.3 Maatregelen tegen vochtindringing

Voor het waterdicht maken van panden of kelders zijn diverse producten op de markt.

[Deltares 2017]:

Om wateroverlast vanuit het grondwater te voorkomen zijn er drie opties:

- Lokaal de grondwaterstand reguleren/ verlagen.
- De woning grondwaterproof maken: schade zo veel mogelijk voorkomen door isolatie en vochtbestrijding.
- Schade aan gezondheid door hoge luchtvochtigheid in huis voorkomen door luchtvochtigheid te reguleren.

Om vochtoverlast te voorkomen is een lage grondwaterstand wenselijk: dit kan echter negatieve effecten op het rotten van houten palen en zetting van panden op staal. Een tijdelijke peilverlaging ('winterstreefpeil') in de winter kan mogelijk helpen grondwateroverlast te voorkomen. Daarnaast kan het drainage/ infiltratie riool worden ingezet om lokaal op het grondwater te reguleren. Bij panden waar ook houten palen voorkomen moet dit voorzichtig gemonitord worden.

Om het probleem bij de kern aan te pakken kan een kelder of kruipruimte waterdicht worden gemaakt. Ook hier zijn verschillende manieren voor (www.murenvochtig.nl):

1. Wanden en vloer dichtsmen met waterdichte pasta ('bekuiping': €4000-10.000).
2. Drainagesysteem waarbij water naar een verzamelput geleid wordt vanwaar het kan worden weggepompt – vocht wordt hiermee niet voorkomen, maar stilstaand water wel (€3000-10.000).
3. Injecteren van de muren.

Andere mogelijke oplossingen zijn:

1. Het onderkappen van muren waarbij kunststof vochtkring wordt aangebracht - om dit te kunnen doen moet de grond langs de muren worden afgegraven; deze methode kost gemiddeld € 5000-10.000 per woning.
2. Het isoleren of afdekken van de vloer van kruipruimte/ woonvertrekken met isolatiemateriaal om vochtdamp tegen te houden. Dit kost zo'n € 1500 per woning (interview Ruud van Workum, KCAF).

De simpelste oplossing om schade van een hoge luchtvochtigheid te voorkomen is door een ventilatiesysteem aan te leggen (dit kost zo'n € 1000-2000).

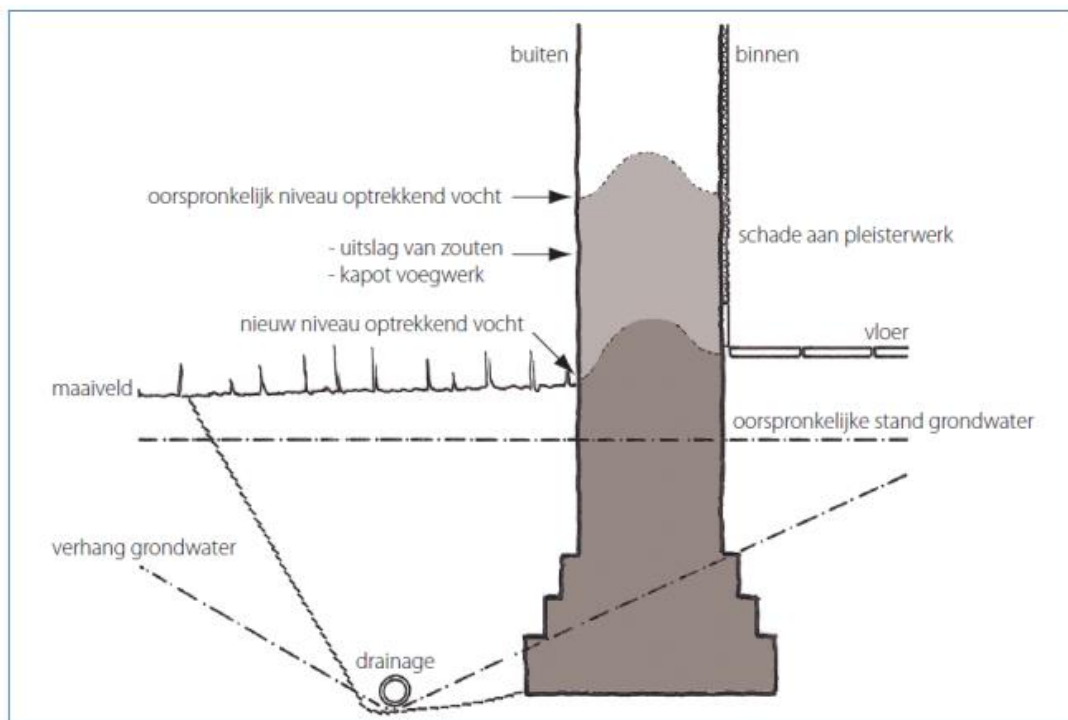
[Monumentenwacht 2020] Geeft aanvullend hierop de volgende preventieve maatregelen om vochtoverlast te voorkomen. Naast maatregelen die bouwkundig zijn (niet gerelateerd aan bodembeweging) noemt men specifiek:

- “- Het controleren of aanpassen van het terrein rondom het monument zodat dit op afschot van de buitenmuren ligt en/of goed afwatert.
- Zorg dat bomen niet te dicht bij het monument staan. Bomen verstoren de vochtuithouding en hun wortels kunnen de fundering van uw monument omhoog drukken.”

Als correctieve maatregelen wordt genoemd het aanbrengen van horizontale drainage. De toepassing hiervan is in meer detail in [Monumentenwacht 2020] beschreven en hier kort samengevat en in Figuur 10.1 weergegeven.

“Drainage is de ondergrondse afvoer van grondwater via drainagebuizen naar het open water of de riolering. Deze drainagebuizen worden rondom het monument gelegd, om regenwater en grondwater sneller af te voeren en zodoende de vochtbelasting in de buitenmuren te verminderen. Met andere woorden, een drainage onttrekt de overmaat aan vocht aan de muur en brengt een nieuwe lager gelegen evenwichtszone tot stand. Voor binnenplaatsen en

grondwerk binnen terrasmuren kan een horizontale drainage eveneens uitkomst bieden. Bij monumentale boerderijen fungeert drainage als een ondergrondse goot voor de afvoer van regenwater. Hierdoor zijn goten onder een rieten dak met enkele rijen dakpannen overbodig. Men legt dit drainagesysteem aan op diepte van de voet van de fundering of in ieder geval 75 cm diep onder het maaiveld, waarna het uitmondt op een hoofddrain, een buitenriolering of op het open oppervlaktewater. Als de drainagebuis lager ligt dan het oppervlaktewater is een pompput met elektrische voeding noodzakelijk. Voor het periodieke onderhoud van de drainage (1 keer in 5 á 10 jaar) moet men doorspoelputten aanbrengen.



Figuur 10.1 Doorsnede van een massieve buitenmuur waarin met drainage het optrekkend vocht zonder ingrepen in de buitenmuur tot een acceptabel niveau kan worden verlaagd [monumentenwacht 2020].

10.3.4 Oplossingen voor huisaansluitingen

Sinds 2006 is een horizontaal flexibel element op de markt dat door rotatie het zetting verschil tussen ondergrond en pand kan opvangen. Het element is beproefd in het laboratorium bij Deltares. In de onderstaande figuur is de beproeving van dit element te zien.



Figuur 10.2: Proef met horizontaal flexibel element.

De gewone flexibele gasaansluiting bleek redelijk goed te werken bij niet al te grote zettingverschillen. Voor zeer bodemdalingsgevoelige gebieden met een te verwachten zettingsverschil van 0,5 m of meer is door fabrikant Pipelife in 2014 een speciale aansluiting ontwikkeld. Deze aansluiting is beproefd in de modelhal van Deltares. Uit de proefresultaten bleek dat de verticaal uitschuifbare aansluiting gasdicht was en dat een maximaal zettingsverschil van 80 cm kon worden opgenomen.

10.4 Case Gouda op niveau historische binnenstad

10.4.1 Inleiding

[Deltares, augustus 2017] beschrijft hoe interventies in een bodemdalingscontext kunnen worden afgewogen in economisch perspectief in het geval van de case Gouda. De economische schattingen in de analyse zijn specifiek voor de context van een verzakkende historische stedelijke zone met een mix van ondiepe en paalfunderingen.

Het centrum van Gouda zakt met ongeveer 3-5 mm/jaar. Hoogstwaarschijnlijk wordt de bodemdaling veroorzaakt door een mix van verdichting van ondiepe niet-geconsolideerde klei- en veenlagen als gevolg van stedelijke belasting en veenoxidatie [van Laarhoven, 2017]. Gebouwen in Gouda van vóór 1900 zijn op staal gefundeerd. Om grondwateroverlast na bodemdaling te voorkomen, is het grondwaterpeil in het verleden een paar keer kunstmatig verlaagd door het waterpeil van de stadsgracht te verlagen. Vanaf 1900 werd bouwen op houten paalfunderingen echter gemeengoed in de regio – rond 1950 vervangen door betonnen palen. Verdere verlaging van het grondwaterpeil, hoewel wenselijk vanuit het oogpunt van vermindering van het wateroverlastrisico, zal naar verwachting aanzienlijke schade aan houten paalconstructies veroorzaken als gevolg van schimmelaantasting, die begint nadat het hout is blootgesteld aan zuurstof.

Ervan uitgaande dat de historische trend van continue verlaging van de grondwaterstanden zich doorzet, zal in de nabije toekomst opnieuw een verlaging van het grondwaterpeil moeten worden uitgevoerd, wat vermoedelijk zal leiden tot een voortzetting (of zelfs versnelling) van de huidige bodemdaling. Op termijn zullen de lagere grondwaterstanden leiden tot aanzienlijke schade aan ongeveer 400 houten paalfunderingen die moeten worden hersteld.

10.4.2 Situatie Gouda

In de binnenstad van Gouda zijn verschillende funderingstypen toegepast :

Periode	Type fundering	Impact bodemdaling
1250-1902	Op 'staal': geen palen maar plat frame op de ondergrond	<i>Dalingsgevoelig</i>
1903-1950	Houten palen	<i>Dalingsgevoelig</i>
	<u>Op kleef</u> : funderingsmuur bestaande uit dicht op elkaar geplaatste ondiepe houten palen (tot 5 meter)	
	<u>Op stuit</u> : fundering op houten palen op een draagkrachtige ondergrond (diepe fundering)	
1920-1950	Houten palen met betonnen ophangers	<i>Dalingsgevoelig bij sterke grondwaterdaling</i>
1950-heden	Betonnen palen op draagkrachtige ondergrond	<i>Niet dalingsgevoelig</i>

Figuur 10.3 Verschillende funderingstypen in Gouda.

Op grond van het rapport van Archeomedia [Winsen et al. 2015] en de informatie over de toegepaste funderingen per periode is de inschatting dat ongeveer de helft van de 3000 woningen in de binnenstad op staal of een houten fundering (op stuit of kleef) staan. Nieuw onderzoek [Groenendijk 2017] wijst uit dat van de woningen gebouwd voor 1950 er waarschijnlijk 450 op houten palen gefundeerd zijn en de helft op diepe, betonnen palen. 1050 panden zakken mee, 450 panden op houten fundering lopen risico op funderingsschade en 1500 panden zijn diep gefundeerd en blijven op dezelfde hoogte.

Op grond van de informatie uit 10.2.2 is voor Gouda aangenomen dat de kosten voor funderingsherstel van het merendeel van de woningen in de binnenstad tussen € 50.000 en 70.000 per woning zullen zijn (getoetst bij ir. Dick de Jong, KCAF).

Voor schadeherstel is uitgegaan van de in 10.2.3 genoemde € 4000 per pand. Er valt echter te verwachten dat er op termijn ook woningen zijn die in de ernstigste schadecategorie zullen vallen: waar stabiliteit van het pand in gevaar is en het hele pand moet worden hersteld.

10.4.3 Economische analyse

In 2017 zijn twee alternatieven ontwikkeld en geanalyseerd: 'Hoog Houden' waarbij infrastructuur en woningen zoveel mogelijk op de huidige hoogte worden gehouden, bijvoorbeeld door te funderen; en 'Laten Zakken'. De grondgedachte van alternatief "Hoog houden" is het voorkomen of verminderen van verdere verzakking van alle gebouwen en infrastructuur. Dit houdt in dat alle ondiepe bouwonderingen in de binnenstad (~1500) worden vervangen door betonnen paalfunderingen, evenals wegen en rioleringen. Een positief effect is dat het waterpeil niet/in mindere mate hoeft te worden verlaagd, waardoor de verlaging van de bodemdaling wordt verondersteld te vertragen tot gemiddeld 2-3 mm/jaar. De grondgedachte van alternatief "Laten zakken" ligt in het verminderen van de negatieve gevolgen van bodemdaling, in plaats van het helemaal voorkomen van bodemdaling. Dit omvat het versterken van constructies om mogelijke schade het hoofd te bieden, b.v. investeren in maatregelen om schade aan houten paalfunderingen te voorkomen en het waterdicht maken van gebouwen bij hoge (grond)waterstanden.

Sociaal- economische effecten van bodemdaling kunnen worden onderverdeeld in directe en indirecte, markt- en niet-markteffecten (Kok en Costa, 2021). Om de meest relevante effecten van de projectalternatieven in het geval van Gouda te identificeren, is een kwalitatieve analyse uitgevoerd op basis van expert judgement. In de kwalitatieve analyse worden verschillende kostenposten met een getal van 0-5 (0: geen hogere kosten t.o.v. het heden; 5: stijgende kosten) gescoord. Hieruit kwam naar voren dat belangrijkste kostenposten naar verwachting zullen liggen op gebied van funderingen, wateroverlast, infrastructuur (riool en wegen) en schade aan funderingen en panden.

De maatregelen die per alternatief zijn beschouwd zijn weergegeven in Tabel 10.4.

Tabel 10.4 Overzicht van maatregelen voor woningen/gebouwen en infrastructuur.

	Nulalternatief	Hoog Houden	Laten Zakken
Gemiddelde daling	3-5 mm/jaar	2-3 mm/jaar	3-5 mm/jaar
Woningen/gebouwen	<p>Periodiek ophogen tuinen</p> <p>Herstel funderingen en schade aan gebouwen</p>	<p>Diepe fundering aanbrengen op ondiep gefundeerde gebouwen</p> <p>Periodiek ophogen tuinen</p>	<p>Preventieve maatregelen ter voorkoming schade door vershilzetting</p> <p>Preventieve maatregelen paalrot houten funderingen</p> <p>'Waterproofen' van gebouwen</p> <p>Aanpassingen aan woning door hoogteverschil met tuin.</p>
Riool	Vervangen opgeboeid riool door DIT-riool	<p>Vervangen opgeboeid riool door DIT-riool</p> <p>Funderen riool</p>	<p>Vervangen opgeboeid riool door DT-riool</p> <p>Aanleg flexibele huisaansluitingen</p>
Watersysteem	Investerings in watersysteem voor toekomstige peilverlagingen	Investerings in watersysteem voor eenmalige peilverlaging van 10 cm.	Investerings in watersysteem voor toekomstige peilverlagingen
Infrastructuur	Periodiek ophogen openbare ruimte	<p>Wegen ophogen op palen zetten</p> <p>(Periodiek) ophogen openbare ruimte</p>	Ophogen openbare ruimte niet van toepassing tenzij sterke vershilzetting.

In Tabel 10.5 zijn de resultaten van de kwalitatieve economische vergelijking opgenomen, de kwantitatieve vergelijking is in het referentierapport terug te vinden.

Tabel 10.5 Overzicht effecten alternatieven 'Hoog Houden' en 'Laten Zakken'.

waarde nul/nul staat aangegeven bij welke stakeholder deze post ligt.

	Categorie	Maatregel/ effect	Nul alternatief	Hoog Houden	Laten Zakken	Stakeholder
Activiteiten	Gebouwen en woningen	Herstellen houten paalfunderingen	2	nvt	2	Huiseigenaar
		Herstellen schade ongelijkmatige zakkings	4	nvt	2	Huiseigenaar
		Installatie diepe paalfundering ondiep gefundeerde gebouwen	nvt	4	nvt	Huiseigenaar
		Waterproof maken panden	nvt	nvt	3	Huiseigenaar
		Periodiek ophogen tuin	1	1	0	Huiseigenaar
	Riool	Installatie DIT riool	3	3	3	Gemeente
		Funderen riool	nvt	2	nvt	Gemeente
		Aanleg flexibele huisaansluiting	nvt	nvt	2	Huiseigenaar
	Watersysteem	Kades	nvt	2	1	Gemeente
		Investerings watersysteem: pompcapaciteit, grotere duikers, opslagcapaciteit	2	nvt	1	Waterschap
	Infrastructuur	Wegen ophogen licht materiaal/ op palen	nvt	2	nvt	Gemeente
		Ophogen openbare ruimte	3	3	nvt	Gemeente
		Investerings gas/elektra/ waterleiding	nvt	2	2	Netbeheerder, waterleidingsbedrijf
Effecten	Kritieke infrastructuur	Riool B&O	0	-1	0	Gemeente
		Wegennetwerk B&O/ veiligheid/ kwaliteit	0	-1	0	0
		Openbare ruimte B&O, kwaliteit	0	0	1	Gemeente
		Kwaliteit beschermd stadsgezicht	2	1	1	Gemeente
		Watersysteem-drainage B&O	1	nvt	1	Waterschap Rijnland
		Kades B&O	2	0	1	Gemeente
	Infrastructuur en gebouwen	Ondergrondse infra: elektra, glas, waterleiding	2	0	1	Stedin, Oase, ?
		Huis: schade aan woningen	2	0	1	Huiseigenaar
		Tuin	1	1	1	Huiseigenaar
		Riool onder eigen perceel	3	0	1	Huiseigenaar
	Milieu	Ondergelopen kelder	1	0	0	Huiseigenaar/ bewoner
		Overstromingsschade	3	0	1	Alle partijen in Gouda
	Sociaal/cultureel	Verlies waarde cultuurhistorisch erfgoed	2	0	1	Bewoner
		Hinder werkzaamheden	2	2 a 3	2	Bewoner
		Gezondheidsschade schimmels door vocht	1	0	0 a 1	Bewoner
		Gezondheidsschade door muggen en andere plaagdieren	1	1	1	Bewoners
		Gezondheidsschade door stress	1	1	1	Bewoner, Bedrijfsleven (reductie productiviteit)
	Economisch	Gederfde inkomsten bedrijven overlast	2	2 a 3	2	Bedrijfsleven
		Waardedaling woningen	2	0	1	Bewoner
		Leveringsonderbreking (water, riool, gas)	1	2	1	Bewoner, bedrijfsleven (detaillist)
Reistijdverlies		2	3	1	Weggebruiker	

De methodiek van deze case studie kan gebruikt worden voor een afweging van maatregelen in bepaalde gebieden of voor monumenten specifiek.

10.5 Conclusies

- Er is veel onderzoek verricht (en gaande) om de oorzaken van bodemdaling te verminderen, veelal is hiervoor echter ingrijpen op grotere schaal nodig.
- Funderingsherstel vermindert de gevoeligheid van een monument voor bodembewegingen. Dit is echter zeer kostbaar.
- Er zijn methoden beschikbaar en kentallen voor het herstel van schades en vochtindringing aan gebouwen als gevolg van bodemdaling. Dit betreft het herstel van scheuren, funderingen en schilderwerk en het aanleggen van drainage of het afdichten van het pand.
- De methodiek van de case studie van Gouda kan gebruikt worden voor een afweging van maatregelen in bepaalde gebieden of voor monumenten specifiek.

11 Conclusies en vervolgstappen

11.1 Conclusies bodemdaling

- Door NAM is een voorspelling gemaakt van de bodemdaling als gevolg van aardgaswinning. Ten opzichte van het begin van de aardgaswinning in 1964 is de bodemdaling in 2030 maximaal circa 0,4 m.
- In de klimaateffect-atlas staan kaarten met een voorspelling van de bodemdaling in de periode 2020-2050. De berekende bodemdaling bestaat uit twee componenten: bodemdaling door oxidatie van veen en organisch-rijke bodemlagen, en mechanische bodemdaling door compactie van bodemlagen. Bij een sterke klimaatverandering is in meerdere gebieden in Nederland een bodemdaling van circa 0,5 m berekend.
- Uit satellietmetingen over de periode 2015-2020 volgt een maximale bodemdaling van circa 5 mm/ jaar. Deze maximale bodemdaling is opgetreden in de regio Delft-Rotterdam-Dordrecht en Noord-Groningen (gebied van de aardgaswinning).

11.2 Conclusies funderingen monumenten

- Monumenten zijn net als veel andere gebouwen in Nederland gefundeerd op ondiepe funderingen (op staal) of op diepere fundering op palen. Het type fundering heeft invloed op schades die kunnen ontstaan door bodemdaling.
- Het type fundering dat is toegepast is zeer afhankelijk van het pand, de ondergrond, de locatie en de tijdsperiode. In dit rapport zijn voor zover beschikbaar in grote lijnen de verschillende typen funderingen beschreven zowel algemeen als voor enkele steden specifiek.
- Voor het beschouwen van mogelijke schade aan panden door bodembewegingen is inzicht in het type, de afmetingen, diepte en staat van de fundering essentieel. Van veel panden is dit niet beschikbaar en is funderingsonderzoek noodzakelijk.

11.3 Conclusies schade aan monumenten

- Schade aan monumenten door bodemdaling/stijging uit zich met name in de vorm van scheurvorming, scheefstand, vochtindringing en/of schade aan aansluitingen.
- Voor het beoordelen van de ernst van scheuren in panden bestaat een internationaal kader gebaseerd op aantal en afmeting van de scheuren [Burland 1974]. De systematiek is opgezet voor metselwerk gebouwen.
- Er zijn ook veel bouwkundige oorzaken van schades, deze worden in deze studie niet beschouwd.
- In [DeVent, 2011] en [Deltares, 2021] is een overzicht gegeven van mogelijke oorzaken van gebouwschade.
- Er bestaan relaties voor het bepalen van de schade(klasse) dan wel restlevensduur van de fundering op basis van gemeten of voorspelde zakkingsverschillen uit de bodem.
- Afhankelijk van de soort fundering en de optredende bodemdaling/stijging kan een monument meer of minder gevoelig zijn voor schade.

11.4 Conclusies effecten/mechanismen

- Diepe bodemdaling/stijging in de gasopslag Norg en het Groningenveld leidt niet of heeft niet geleid tot schade aan gebouwen in directe zin.
- Door zoutwinning treedt bodemdaling op. Deze is meestal gelijkmatig en leidt niet tot schade. Als de zoutholtes (cavernes) instorten kan wél schade aan gebouwen en infrastructuur ontstaan.
- Door diepe bodemdaling kan wel indirect schade ontstaan aan gebouwen en monumenten. De oorzaak kan liggen in het aanpassen van boezempeil of polderpeil of

het dalen van het maaiveld naast een fundering op staal die bijna tot de capaciteit wordt belast.

- Panden op staal of houten palen zijn gevoelig voor grondwaterstandsverlaging. Panden op houten palen zijn gevoelig als de grondwaterstand lang onder de paalkop staat. Voor panden op staal treden vooral zakkingsverschillen, met als mogelijk gevolg schade, op bij heterogene bodem en/of ongelijkmatige grondwaterstandsverlaging. Panden op gemengde funderingen (deel op staal, deel op palen) hebben een grotere kans op schade dan panden met één type fundering.
- Er is een praktische methode ontwikkeld om op landelijke schaal de schade voor een pand met een fundering op palen of staal te schatten.
- Bij een fundering op staal leidt het stijgen van de grondwaterstand tot een afname van de draagkracht. Hierdoor kunnen zetting en zettingsverschillen ontstaan. Dit kan leiden tot schade. De afname van de draagkracht is beperkt als de grondwaterstand 0,5 m stijgt en nog onder het funderingsniveau blijft. Als de grondwaterstand 1 m stijgt, en boven het funderingsniveau komt, is de afname van de draagkracht groot.
- Een geringe grondwaterstijging ten gevolge van een peilverhoging (bijvoorbeeld circa 0,15 m) zal nagenoeg nooit de oorzaak zijn van schade. Voor twijfelgevallen is een beoordelingsprocedure beschikbaar.

11.5 Conclusies mogelijke maatregelen

- Er is veel onderzoek verricht (en gaande) om de oorzaken van bodemdaling te verminderen, veelal is hiervoor echter ingrijpen op grotere schaal nodig.
- Funderingsherstel vermindert de gevoeligheid van een monument voor bodembewegingen. Dit is echter zeer kostbaar.
- Er zijn methoden beschikbaar en kentallen voor het herstel van schades en vochtindringing aan gebouwen als gevolg van bodemdaling. Dit betreft het herstel van scheuren, funderingen en schilderwerk en het aanleggen van drainage of het afdichten van het pand.
- De methodiek van de case studie van Gouda kan gebruikt worden voor een afweging van maatregelen in bepaalde gebieden of voor monumenten specifiek.

11.6 Vervolgstappen

Lijn 1: Literatuurstudie schadeverschijnselen monumenten

Als vervolg op deze literatuurstudie zal worden gekeken naar de directe en indirecte schade van aardbevingen en trillingen (bijvoorbeeld door verkeer). (stap 1d)

Stap 2

Hierna worden als tweede stap in lijn 1 de resultaten van de eerste stap voor een nader te bepalen gebied in Groningen verder geanalyseerd en gekwantificeerd door middel van:

- a. Karakterisering van de opgetreden diepe bodemdaling/-stijging op basis van bestaande rapportages.
- b. Karakterisering van ondiepe bodemopbouw onder funderingen.
- c. Kwantificering van de factoren die bijdragen aan de bewegingen.
- d. Kwantificering van de kans op schade.
- e. Vergelijking met aantal schademeldingen per gebied (op basis van informatie RCE).

Als derde stap in lijn 1 is voorzien om een specifieke analyse te maken van enkele typen monumenten. Omdat niet al het gebouwde erfgoed op dezelfde wijze constructief en funderings-technisch is opgebouwd, wordt binnen deze activiteit onderscheid gemaakt naar de kwetsbaarheid van verschillende typen monumenten/erfgoed. De belangrijkste typen worden aangeleverd door RCE en ingedeeld aan de hand van constructieve en funderings-technische karakteristieken.

Lijn 2: Herstelmethode en herstelkosten

In lijn 1 zijn enkele algemene kengetallen gegeven voor de herstelkosten.

In lijn 2 wordt onderzoek gedaan naar literatuur met betrekking tot herstelmethoden en herstelkosten specifiek voor gebouwd erfgoed. Hiervoor is ook de bouwkundige inbreng van derden nodig.

A Relevante beschikbare literatuur

Gekozen is voor een selectie van literatuur die in zichzelf vaak al een overzicht geeft van de problematiek. Onderstaande publicaties zijn als basis genomen voor deze rapportage voor lijn 1 gericht op bodemdaling en bodemstijging.

Bijnagte J.L., Van Tol A.F., Elprama R. (2006) Het effect van grondwaterstijging op funderingen op staal. Geotechniek, April 2006.

Boscardin & Cording (1989). Building response to excavation-induced settlement. Journal of Geotechnical Engineering, 115(1), pp. 1-21.

Bult (1991) https://www.delfia-batavorum.nl/uploads/Afbeeldingen/jaarboeken/1991-artikelen/Delfia_Batavorum_1991-10-EpkoJBult.pdf

Burland, J. B., & Wroth, C. P. (1974). Settlement of buildings and associated damage. Settlement of Structures, Proceedings of the Conference of the British Geotechnical Society, (January 1975), 611–764.

Commissie Bodemdaling door Aardgaswinning (Maart 1987). Studieresultaten betreffende ongelijkmatige zakkingen in verband met aardgaswinning in de Provincie Groningen.

Deakin, N. (2005) Repair of subsidence damage: An insurer's perspective. J. Building Appraisal 1 (3), 225-243

Deltares. (augustus 2009). Toelaatbaarheid 50 mm relatieve peilverlaging. Kenmerk 414943, versie 2.

Deltares (2009) Rapport funderingsherstel Schiedam. Kenmerk 1001569-001-geo-00001

Deltares (2011). Gebouwschade Loppersum. Rapportnr. 1202097.

Deltares (augustus 2017). Quick scan MKBA bodemdaling binnenstad Gouda Een eerste verkenning naar de kosten en baten van handelingsperspectieven voor bodemdaling, Sien Kok, Saskia Hommes, 2017, 1230530-002-BGS-0005

Deltares (Oktober 2018). Invloed van bodemdaling door zoutwinning Nedmag op bebouwing en infrastructuur. Kenmerk 11203195-000-GEO-0002

Deltares (Augustus 2019). Literatuuronderzoek naar relatie tussen peilverlaging en gebouwschade. Kenmerk 11203367-002-GEO-0001.

Deltares (september 2020). Impact droogte op funderingen. Kenmerk 11205062-002.

Deltares (augustus 2021). Indirecte schade-effecten van diepe bodemdaling en -stijging bij het Groningen gasveld en gasopslag Norg. Kenmerk 11207096-002-BGS-0001.

Deltares. (september 2021). Verdiepend schade-onderzoek kanaal Almelo – de Haandrik. Kenmerk 11207155-011-GEO-0001, versie 3.0.

Maandblad van de Dienst der publieke werken van Amsterdam (1975), Amsterdam op palen – de geschiedenis van het funderen jaargang 25.

Erkens, G., Van der Meulen, M. J., and Middelkoop, H. (2016): Double trouble: Subsidence and CO₂ respiration due to 1,000 years of Dutch coastal peatland cultivation, *Hydrogeol. J.*, 24, 551–568, 2016.

Erkens, G., Stafleu, J., and Van den Akker, J. J. H. (2017): Bodemdaling-voorspellingskaarten van Nederland, versie 2017, Deltares rapport.

Fityus, S.G., Smith, D.W., Allman, M.A., (2004). Expansive soil test site near Newcastle. *Journal of Geotechnical and geo-environmental engineering* 130, 686-695.

F530 (2016). Aanbevelingen voor het ontwerp van bouwkuipen in stedelijke omgeving. COB – Nederlands kenniscentrum voor ondergronds bouwen en ondergronds ruimtegebruik. ISBNnummer 9789077374306.

F₃O (2014) Richtlijn Onderzoek en beoordeling van fundering op staal (ondiepe funderingen).

F₃O (2016) Richtlijn Houten paalfunderingen onder gebouwen.

Groenendijk, M. J. (n.d.) (2017). Vervolgonderzoek funderingen Gouda: geactualiseerde Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG). Gouda.

Hattinga Verschure 2012 In Holland stond een huis - De ontwikkeling van funderingstechnieken in stedelijke context tijdens de middeleeuwen in West-Nederland <https://studenttheses.universiteitleiden.nl/access/item%3A2604993/view>

Jones, L.D., Jefferson, I., (2012). Expansive soils. in: ICE manual of geotechnical engineering, volume 1, geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation. Chapter 5.

KCAF (2016). Juridische handleiding voor problemen bij funderingsherstel.

Korff, M. (2013) Response of piled buildings to the construction of deep excavations' PhD thesis Cambridge University

René K.W.M. Klaassen, Jos G.M. Creemers, Wooden foundation piles and its underestimated relevance for cultural heritage, *Journal of Cultural Heritage*, Volume 13, Issue 3, Supplement, 2012, S123-S128, ISSN 1296-2074, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.02.014>

Klimaat-effectatlas (2020). www.klimaat-effectatlas.nl

Kok, S. en Costa, A.L. (2021) Framework for economic cost assessment of land subsidence. *Natural Hazards* (2021) 106:1931–1949 <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04520-31>

KPMG/Grontmij (2001) Grondwateroverlast in het stedelijk gebied - Een bestuurlijk-juridische en technische analyse als basis voor een structurele aanpak van een al jaren spelend vraagstuk

Monumentenwacht (2020) Onderhoudswijzer vochtbelasting in buitenmuren. Geraadpleegd op <https://www.monumenten.nl/files/2020-08/Onderhoudswijzer%20Vochtbelasting%20in%20buitenmuren.pdf> d.d. 20-7-2022

NAM (2020) Seismic Hazard and Risk Assessment Groningen Field update for Production Profile GTS - raming 2020.

NAM (2019)-Nationaal Kennis- en innovatieprogramma Water en Klimaat (NKWK). Klimaatbestendige stad. Schade aan funderingen door droogte. Klimaatschadeschatter. report EP202003201727D.

NEN 8707 (2018). Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeur -Geotechnische constructies

Netzel, H.D. (2009). Building response due to ground movements, Doctoral thesis, Technische Universiteit Delft, Delft.

Nicodemo, G., Peduto, D., Korff, M., Ferlisi, S. (2020). Multi-parameter Vulnerability Analysis of Settlement-Affected Masonry Buildings with Shallow/Piled Foundations: Case Studies in The Netherlands. In: Calvetti, F., Cotecchia, F., Galli, A., Jommi, C. (eds) Geotechnical Research for Land Protection and Development. CNRIG 2019. Lecture Notes in Civil Engineering vol 40. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21359-6_5

Onderzoekscommissie bodemdaling Friesland (1989). Bodemdaling in Friesland.

Peduto D, Korff M, Nicodemo G, Marchese A, Ferlisi S (2019) Empirical fragility curves for settlement-affected buildings: analysis of different intensity parameters for seven hundred masonry buildings in The Netherlands. In press on Soils Found.

PBL (2016). Van den Born, G. J., Kragt, F., Henkens, D., Rijken, B., Van Bommel, B., and Van der Sluis, S.: Dalende bodems, Stijgende kosten, Report Planning Agency for the Environment (PBL), report nr. 1064, 93 pp., 2016.

[Provincie Fryslan, 2008] Funderingsproblematiek Fries veenweidegebied; een verkenning naar aard en omvang en de mogelijkheden voor een aanpak.

Regiodeal bodemdaling Groene Hart. Bodemdalingdebaas.nl.

Sarfatij, H. (2007) Archeologie van een deltastad, Opgravingen in de binnenstad van Dordrecht. Stichting Matrijs, Utrecht, ISBN 9789053453247

TNO (2021). Schade aan gebouwen door diepe bodemdaling en stijging, TNO 2021 R10325B.

TUD (2018). Onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen; methodologie en case studies ter duiding van de oorzaken. Rapport nummer: CM-2018-01.

Van Stigt, Prof. J., (1995), Renovatie en Onderhoudstechnieken, collegedictaat TU Delft, hoofdstuk 4.

Van Laarhoven S. (2017). Influence of loading history on subsurface architecture and subsidence potential for the historical city of Gouda, The Netherlands.

Van Tol, Prof. F. (1994) Hoe betrouwbaar is de paalfundering? Intreerede TU Delft, 3 juni 1994.

Veldkamp, T.I.E. (2012) Pole-faults Developing a methodology for the risk assessment of wooden pile foundation problems in urban areas caused by periods of cumulative drought under climate change, MSc Thesis VU Amsterdam

Verkenning Bodemdaling (STRONG) (2017). Versterking bestaande aanpak; 1-10-2017.

Verruijt, Prof. A. (2000). Schade bij gelijkmatige bodemdaling. Geotechniek januari 2000.

Winsen, M. R., Velzen, H. J., Dasselaar, M., & van der Mark, A. J. (2015). Archeologisch en bouwhistorisch bureauonderzoek van de historische binnenstad van Gouda - In het kader van het projectplan "stevige stad op slappe bodem." Gouda.

Xu, J, Franza, A., Marshall, A., Losacco, N. en Boldini, D. (2021). Tunnel-framed building interaction: Comparison between raft and separate footing foundations. *Géotechnique*. 71. 631-644. 10.1680/jgeot.19.P.393.

Yasuhar, K., Murakami, S. en Mitsuyama, S. (2003). Instability of foundations undergoing rise in groundwater level. *Groundwater Engineering*. ISBN 905809 3859.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares