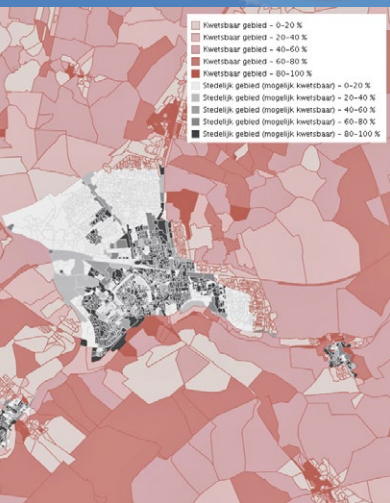


Stedelijke ontwikkeling en bodemdaling in en rondom Gouda

Een synthese van drie onderzoeken naar de relatie tussen (stedelijke) ontwikkelingen en bodemdaling



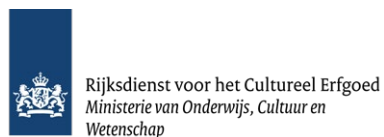
Nico W. Willemse

Stedelijke ontwikkeling en bodemdaling in en rondom Gouda

Een synthese van drie onderzoeken naar de relatie tussen (stedelijke) ontwikkelingen en bodemdaling

Nico W. Willemse

21-12-2017



Colofon

Deze publicatie is tot stand gekomen door samenwerking van de Coalitie Sterke Stad op Slappe Bodem, de gemeente Gouda en de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed.

Auteur	Nico W. Willemse (RAAP)
Documentatie	Gemeente Gouda
Inhoudelijke begeleiding	<i>Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed:</i> Gabór Kozijn, Ellen Vreenegoor <i>Coalitie Sterke Stad op Slappe Bodem /</i> <i>Gemeente Gouda:</i> Maarten Groenendijk
Lay-out en vormgeving	Olav Odé (RAAP)
Publicatiedatum	maart 2018
Citeren als	Willemse, N.W., 2018. Stedelijke ontwikkeling en bodemdaling in en rondom Gouda. Een synthese van drie onderzoeken naar de relatie tussen (stedelijke) ontwikkelingen en bodemdaling. Publicatie in opdracht van de Coalitie Sterke Stad op Slappe Bodem en de Rijksdienst voor het cultureel erfgoed.
ISBN/EAN	978-90-5372-116-2

Copyright © 2018 Coalitie Sterke Stad op Slappe Bodem. *De informatie ontsloten in deze publicatie mag worden bekeken op een scherm, gedownload worden op een hard-disk, of geprint worden, mits dit geschied voor persoonlijk, informatief gebruik. Je bent vrij om de publicatie in ongewijzigde vorm te delen, te kopiëren, te verspreiden en door te geven via elk medium of bestandsformaat. Commercieel gebruik door het veelevoudigen op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën van het materiaal is niet toegestaan. Overnemen van informatie, beeld en tekst uit deze publicatie voor niet-commercieel gebruik in een ander werk of publicatie mag alleen met bronvermelding (zie citatierichtlijn).*

Ten geleide

Ongeveer een kwart van Zuid-Holland bestaat uit veengronden. Deze veengronden hebben een dikte variërend van 0,4 m tot meer dan 8 m en als gevolg van landgebruik en -beheer daalt het maaiveld al eeuwen tussen de 0,5 en 2 cm per jaar. In het stedelijk gebied verzakt de veenbodem door het samendrukken van de slappe ondergrond onder de last van bebouwing en ophogingspakketten. Dit heeft wateroverlast en structurele schade en hoge onderhoudskosten aan wegen, spoorwegen, dijken, waterleidingen, rioleringen, funderingen en gebouwen tot gevolg. In het landelijk gebied is deze bodemdaling nauw verweven met de verlaging van de grondwaterstand ten behoeve van de landbouw, en vooral de melkveehouderij en de aanleg van nieuwbouwwijken en/of industriegebieden waarvoor zandpakketten worden opgespoten en het grondwaterpeil wordt aangepast. De veengrond boven de grondwaterspiegel daalt door inklinking van de bodem, veroorzaakt door de vertering van de plantenresten. Door bodemdaling moet het waterpeil met enige regelmaat worden verlaagd. Daarbij worden ook nog eens veel broeikasgassen uitgestoten. Bij continuering van dit beleid zullen de ontwaterde veenbodems dus blijven dalen en broeikasgassen blijven uitstoten totdat alle veen in de ondergrond verdwenen is.

Veel van deze problemen zijn in theorie technisch oplosbaar en er worden vaak ad hoc maatregelen getroffen waardoor het probleem tijdelijk wordt verholpen. In de praktijk, zeker in oudere historische kernen, is de situatie echter zeer complex en het reguleren van het grondwaterpeil of van de maaiveldhoogte blijkt grenzen te hebben. Er is weinig inzicht in het samenspel van de factoren en activiteiten die in het heden en verleden, in zowel het landelijk als stedelijk gebied, invloed hebben gehad op de snelheid van bodemdaling. Het probleem van bodemdaling in Gouda, een stad met een historische kern, wordt daarom als een 'gordiaanse knoop' beschouwd.¹ Toch moeten er op een bepaald moment beslissingen genomen worden over hoe het knelpunt van de bodemdaling wordt opgepakt.

In de zoektocht naar oplossingsrichtingen is door de gemeente Gouda samen met de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed een project uitgevoerd met als doel om historische verbanden te (onder)zoeken tussen stedelijke ontwikkeling en bodemdaling. Dit onderzoek heeft zich gericht op a) de invloed van stadsuitbreidingen op het waterbeheer door de eeuwen heen, b) op de historische effecten van de extra draaglast van de stadsbebouwing op de stadsondergrond (de bodem) en de stadswaterhuishouding en c) op de rol die de verstening van de stad heeft gespeeld bij de wijze waarop woningen gefundeerd werden. Verder is – zij het in beperkte mate - onderzoek gedaan naar meetgegevens in historische bronnen die een bijdrage kunnen leveren bij de beschrijving van het complexe bodemdalingssysteem van de stadsondergrond. De belangrijkste resultaten en inzichten die deze inspanningen hebben opgeleverd leest U in deze synthese.

1. Born et al. 2016, 68.



INHOUDSOPGAVE

Gouda: stevige stad op slappe bodem	7
1.1 Inleiding	7
1.2 Dilemma's	9
1.3 Project 'stevige stad op slappe bodem'.....	11
1.4 Over deze synthese/leeswijzer.....	13
Kennis van het verleden. Bouwstenen voor de toekomst?	20
2.1. Stadsontwikkeling, bodem en funderingsgebruik.....	20
2.1.1 Waterpeil en funderingen.....	20
2.1.2 Project 'De historische binnenstad van Gouda.'.....	20
2.2 Stadsbebouwing.....	21
2.2.1 Stadsontwikkeling.....	21
2.2.2 Bouwjaar van panden in de binnenstad.....	30
2.3 Ondergrond en bodemdaling	34
2.3.1 Inleiding.....	34
2.3.2 Gegevens	34
2.3.3 Ontstaan van het landschap.....	36
2.3.4 Bodemopbouw onder de binnenstad	38
2.3.5 Veendek, zettinggevoeligheid en ophogingen	40
2.4 Welke funderingen dragen de stad?.....	43
2.4.1 Voorspellingsmodellen voor funderingen	43
2.4.2 Bronnen over stadsbebouwing en funderingsgebruik.....	43
2.4.3 Funderingsgeschiedenis van Gouda	46
2.4.4 Funderingsperiodiseringskaart.....	49
2.5 Wat heeft het onderzoek naar het verleden van Gouda ons geleerd?	51
2.5.1 Stadsondergrond en zetting	51
2.5.2 Funderingen onder de stad.....	53
Bodemdalingscomponenten en tijdreeksanalyse	58
3.1 Meten is weten?	58
3.2 Maaiveldhoogten en -zakkingen.....	60
3.2.1 Hoogtegegevens	60
3.2.2 Eerste resultaten.....	61
3.2.3 Aanvullend onderzoek.....	65
3.3 Peilbesluiten.....	66
3.3.1 Peilindexatie	66
3.3.2 Archiefonderzoek.....	67
3.3.3 Resultaten en kanttekeningen.....	67
3.4 Waterhuishouding.....	70
3.4.1 Inleiding.....	70
3.4.2 Gegevens	71
3.4.3 Afwatering in het verleden	71
3.4.4 Oppervlaktewatersysteem.....	73



3.4.5 Rioleringsstelsel	77
3.4.6 Grondwatersysteem	78
3.5 Wat heeft het civieltechnisch onderzoek ons geleerd	85
Vragen en antwoorden	89
4.1 Onderzoekresultaten	89
4.2 Valorisatie van kennis.....	94
4.2.1 Funderingvoorspellingsmodel.....	94
4.2.2 Ondergrond en zettinggevoeligheid.....	95
4.2.3 Historische ontwikkelingen	97
4.2.4 Bredere lessen.....	99
4.3 Verder wegnemen van kennisleemten	100
4.4. Aanbevelingen	102
4.4.1 Communicatie en governance	102
4.4.2 Parate kennis.....	102
4.4.3 Maatregelen op korte en lange termijn	103
4.4.4 Monitoring en modellering.....	104
Bronnen	105





Gouda: stevige stad op slappe bodem

1.1 Inleiding

Jaarlijks zakt de oude binnenstad van Gouda door de inklinkende zachte veenbodem. Omdat de meeste historische woningen en gebouwen uit de 16de tot de 20ste eeuw los op deze ondergrond gefundeerd zijn en dus mee zakken, is het waterpeil in de afgelopen eeuwen al een halve meter verlaagd. Het verder verlagen van het waterpeil geeft risico's voor schade aan panden of infrastructuur die wel op palen staan. Deze zijn meestal van hout en houten paalkoppen kunnen droog komen te staan wat funderingsschade tot gevolg kan hebben. Ook archeologische resten van hout, textiel/leer, metaal, glas, bot en zaden, kunnen door toetreding van zuurstof sterk achteruitgaan.² Naast de directe schade die aan woningen of archeologische resten kan optreden neemt het aantal locaties waar wateroverlast voorkomt - door inundatie vanuit het oppervlaktewater en opstuwung in de riolering - toe, omdat het verschil tussen de maaiveldhoogte en het waterpeil steeds kleiner wordt (afb. 1.1). Om te voorkomen dat dit op langere termijn tot problemen leid, moeten passende keuzes worden gemaakt, bijvoorbeeld in de aanleg en het beheer van infrastructuur en riolering, het waterbeheer, maar ook in de ruimtelijke ordening van de binnenstad.

Samenwerking

In 2014 heeft een aantal partijen de handen ineen geslagen om oplossingsrichtingen te verkennen.³ Naast de gemeente Gouda bestaat deze coalitie 'Stevige stad op slappe bodem' uit het Hoogheemraadschap van Rijnland, Deltares, Rijkswaterstaat (directie Water Verkeer en Leefomgeving), KCAF (Kenniscentrum Aanpak Funderingsproblematiek), Coalitie Sterke Stad op Slappe Bodem, de Technische Universiteit Delft, Stichting Rioned en STOWA (Kenniscentrum van de waterschappen). De kern van de samenwerking is dat partijen samen de technische oplossingsrichtingen van een toekomstbestendige binnenstad van Gouda onderzoeken en uitwerken, en die mogelijk ook voor andere historische binnensteden bruikbaar zijn.⁴ Daarbij is meteen als uitgangspunt benoemd om bewoners, gebruikers en mensen die kennis willen en kunnen inbrengen te betrekken. Vooral bewoners zijn zich nog nauwelijks bewust van de vraagstukken rondom bodemdaling.⁵ Daarom is in 2016 gestart met een 'Living lab' in het centrum van Gouda, waar door bewoners diverse metingen kunnen worden verricht. Het project heeft inmiddels ook andere partijen aangetrokken zoals de Provincie Zuid-Holland, de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed en het Gouds bedrijfsleven. Ook een aantal bewoners denkt en doet actief mee.

2. Pieterse et al. 2015; Born et al. 2016; Dosker 2017.

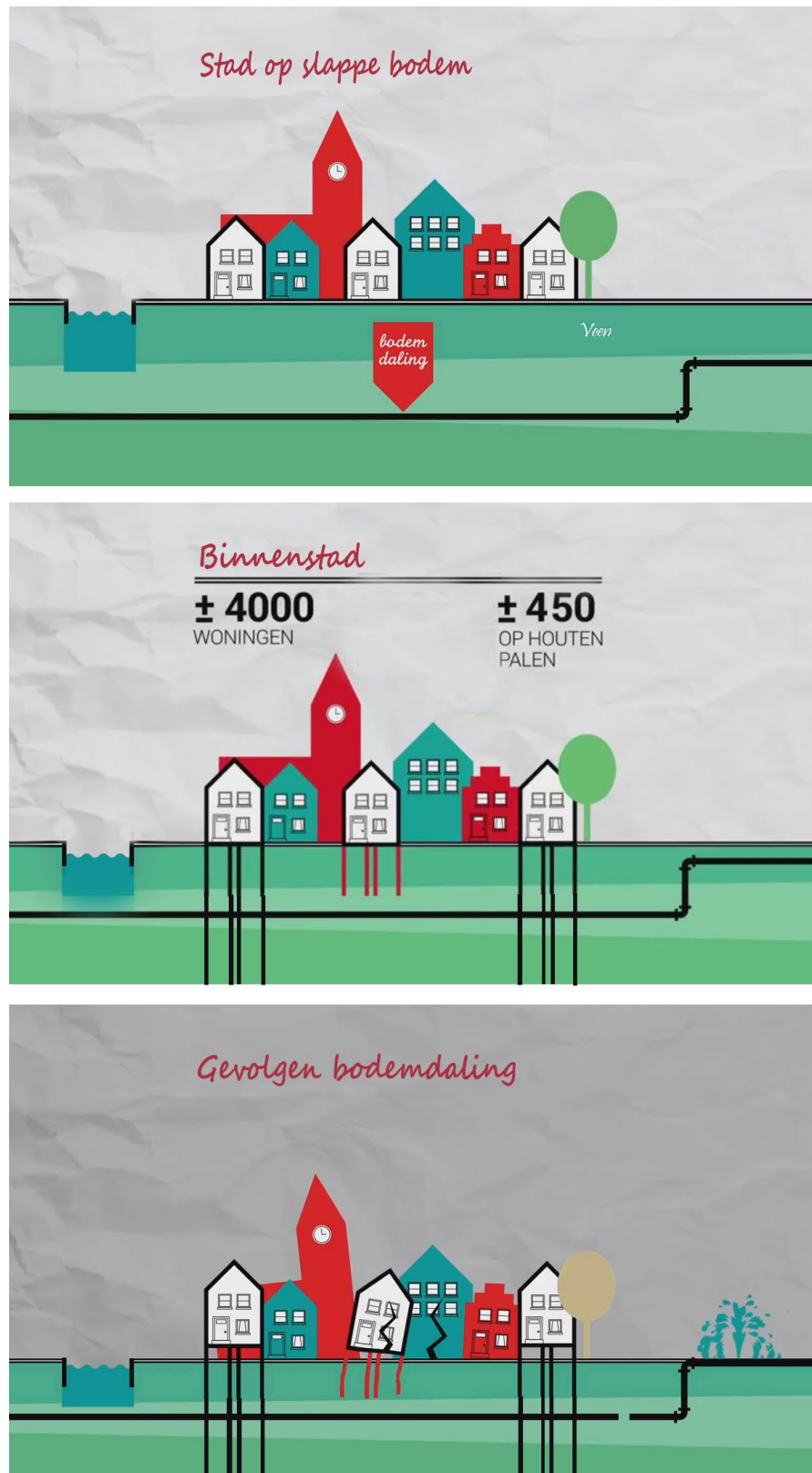
3. Fijan, Kern & van Cleef 2014.

4. Projectplan coalitie 'Stevige stad op slappe Bodem' 2015.

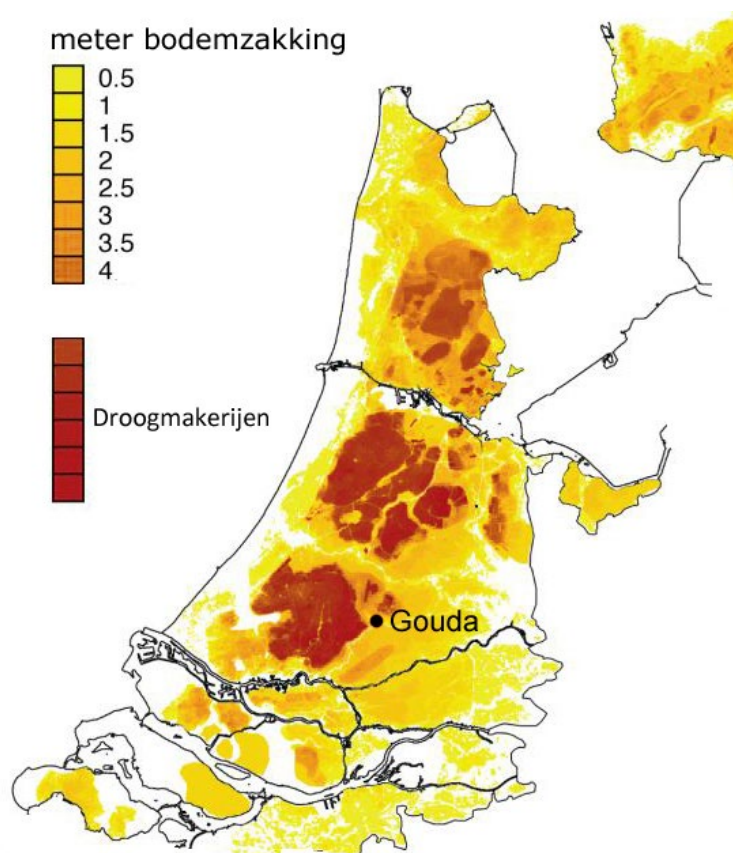
5. Graafland 2016.



Afbeelding 1.1.
Bron: YouTube
(‘blauwekamer’ 24 februari
2017, aangepast naar
Groenendijk 2017b).



Afbeelding 1.2.
 Bodemdaling in
 veengebieden over de
 afgelopen duizend jaar
 (bron: Deltares).



1.2 Dilemma's

Buitengebied

Vanaf de elfde eeuw werd het Hollands-Utrechtse veengebied op grote schaal ontgonnen op initiatief van de bisschoppen van Utrecht en later ook de graven van Holland.⁶ Door het graven van sloten werd het veen enigszins ontwaterd en verdroogde de bovenzijde van het veen. Hierdoor bleek het zelfs mogelijk enige tijd akkerbouw te bedrijven op de relatief hooggelegen veengebieden. Door de ontwatering trad echter al snel inklinking en oxidatie van het veen op, waardoor het grondwaterpeil relatief steeg. Op den duur was het niet meer mogelijk het grondwaterpeil voldoende te verlagen, zodat het gebied te nat werd voor akkerbouw en overgeschakeld moest worden op veeteelt. Soms werden dieper in het veengebied nieuwe akkers aangelegd, dat tot nieuwe bodemdaling leidde. Tegenwoordig is de drooglegging in het buitengebied vrijwel overal afgestemd op intensief landbouwkundig gebruik.⁷ Omdat dit tot bodemdaling leidt is een periodieke verlaging van het slootpeil noodzakelijk wat tot hernieuwde bodemdaling leidt.⁸ Op veel plaatsen is het maaiveld sinds de volle middeleeuwen 2 à 3 meter gedaald (afb. 1.2).⁹

6. Van de Ven 2001, 2003; Abels et al., 2002.

7. Van den Akker 2007; Jansen, Querner & Kwakernaak 2008.

8. Bosch et al. 2008.

9. Stouthamer, Cohen & Hoek 2015.

Afbeelding 1.3.
Bron: YouTube
('blauwekamer' 24 februari
2017).



De stad

Sinds het ontstaan van Gouda in de twaalfde eeuw zakt ook de bodem in de stad gestaag door de inklinkende 5 tot 8 m dikke veenondergrond, met wateroverlast vanuit de grachten tot gevolg. Vroeger loste men dat vooral op met het ophogen van huizen en straten en het verlagen van het waterpeil in de stad. De binnenstad heeft namelijk een eigen waterpeil, de zogenaamde stadsboezem. De meeste woningen in de binnenstad zijn niet voorzien van een paalfundering en zakken daardoor mee met de bodem. Maar her en der verspreid staan er huizen tussen die wél zijn gefundeerd en dus niet mee zakken (afb. 1.1). Vanaf de negentiende eeuw tot zelfs na de Tweede Wereldoorlog deed men dat met houten palen. Om paalrot te voorkomen moeten die houten palen constant onder water staan. Het grondwaterniveau moet daarvoor hoog genoeg blijven. Dit laatste zorgt voor een dilemma. Peilverlaging is dus niet zondermeer mogelijk. De paalfunderingen moeten onder water blijven, maar voor bebouwing zonder fundering die dus mee zakt met de bodem, is verlagen van het boezempeil op termijn wel wenselijk om wateroverlast te voorkomen¹⁰

Gevoel van urgentie

Het probleem is nu nog niet acuut maar over 10 à 20 jaar wel en op termijn zal er in de lagere delen van de stad mogelijk weer een peilverlaging nodig zijn. In de historische binnenstad speelt vooral de problematiek van paalrot, ongelijkheid in zettingen en wateroverlast. In de jongere wijken gaat het vooral om het wegzakken en frequente herstel van de infrastructuur, en van tuinen en paden.¹¹ Deze problemen zijn op de lange termijn niet met de conventionele maatregelen en de traditionele rol en taakverdeling op te lossen. Het verlagen van het waterpeil kan niet los van andere maatregelen worden gezien en er wordt nagedacht over zaken als het bergen van regenwater in de stad en het aanleggen van infiltratieleidingen om dit water waar nodig vast te houden. Maar ook over aanpassingen aan wegen en woningen en het toepassen van nieuwe technieken ter ondersteuning van funderingen of het beperken van wateroverlast denkt men na.¹² (afb. 1.3)

10. Dit dilemma werd in 2015 treffend geschetst in de Nieuwsbrief Monumentenzorg en Archeologie (Gemeente Gouda 2015).

11. Born et al. 2016.

12. Gemeente Gouda 2015.

Problemen van de binnenstad volgens betrokken deskundigen¹³

Geldof 2015, 11: '....Bodemdaling op zich lijkt niet het echte probleem te zijn. Het gaat meer om de ongelijkheid in zettingen. Het ene pand staat los op de ondergrond en zakt, het andere rust op houten of betonnen palen en zakt vrijwel niet. Ten opzichte van het maaiveld komen woningen op palen als het ware omhoog. Als alle panden los op de ondergrond ('op staal') gefundeerd waren, ontstaan er ook op de langere termijn minder problemen. Maar als het maaiveld zakt en de peilen mee zakken, komen de houten palen droog te staan. Dat kan resulteren in funderingsschade. Het tweede probleem betreft de waterhuishouding. Het niveauverschil tussen het waterpeil in de grachten en de (onder)dorpels van woningen is vaak niet meer dan twintig centimeter. Dat betekent dat er te weinig ruimte is voor het goed managen van grondwater, regenwater en afvalwater. Het is dan ook moeilijk om bomen en oppervlaktewater gezond te houden en de straten in goede conditie te houden. En het besef dringt door dat het onmogelijk is maatregelen te bedenken die voor iedereen goed uitpakken...'

1.3 Project 'stevige stad op slappe bodem'

In de zoektocht naar oplossingsrichtingen is door de gemeente Gouda samen met de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed een project uitgevoerd met als doel om historische verbanden te (onder)zoeken tussen stedelijke ontwikkeling en bodemdaling, zoals de invloed van stadsuitbreidingen op het waterbeheer door de eeuwen heen, de rol van de verstening van de stad in relatie tot de wijze waarop woningen gefundeerd zijn en de mate van 'belasting' door intensievere bewoning van de stad.¹⁴ Doel van deze studies is om deze informatie te gebruiken in een visie op de stad vanuit de wens om bodemdaling als gevolg van bebouwing, landgebruik en peilbeheer te beperken en een duurzame toekomst voor het boven- en ondergrondse erfgoed te bevorderen. De Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed wil deze informatie onder andere gebruiken voor de nieuwe Omgevingsvisie (NOVI).

Onderzoeksporen en doelstelling

Om grip te krijgen op de vraag welke funderingsschade op welke plek te verwachten is, heeft Gouda geprobeerd methoden te ontwikkelen waarmee alle mogelijke informatie over de gebruikte funderingstypen in de historische binnenstad achterhaald kan worden.¹⁵ Zo is in 2014 door Flexus BV en Archeomedia BV onderzoek in gang gezet naar de typen funderingen die door de eeuwen heen in de steden van West-Nederland en Gouda zijn gebruikt.¹⁶ Op basis van de resultaten van archeologische opgravingen, geotechnisch onderzoek en bouwhistorische informatie is onderzocht welke funderingstypen in de stad voorkomen, uit welke periodes ze dateren, en op welke diepte deze funderingen zich op dit moment bevinden. Doel is

13. Deze 'problemen van de binnenstad' werden door betrokken deskundigen besproken op 7 februari 2015 tijdens de start van de 'Werkplaats Gouda' (Geldof 2015).
14. Coalitie 'Stevige stad op slappe Bodem' 2015; Groenendijk 2016a en b, 2017.
15. Gemeente Gouda 2015; Groenendijk 2016a en b, 2017.
16. Van Winsen et al. 2015.



om beter inzicht te krijgen wanneer welk deel van de stad is gebouwd en wat dat zegt over de mogelijke toegepaste funderingstechnieken. Deze gegevens zijn vervolgens gekoppeld aan een het bijgewerkte BAG-bestand: een kaart met de bouwjaren van individuele panden in de binnenstad.¹⁷ Daarnaast is onderzoek gedaan naar de morfogenese van de stad in relatie tot de opbouw van de stadsbodem, de geologische ondergrond en de latere verzakking. De ingezette methoden moeten leiden tot een beter beeld van de probleemgebieden in Gouda, waarna met gericht vervolgonderzoek aan een oplossing kan worden gewerkt.

Een tweede spoor dat is gevolgd om beter inzicht te krijgen in de problematiek van de binnenstad is om te onderzoeken hoe het hele systeem van bodemdaling 'werkt'. Op welke wijze beïnvloeden de bodemdalingscomponenten druklast, waterhuishouding en ondergrond elkaar en aan welke knoppen we kunnen draaien om de problemen te beperken? Om die vraag te beantwoorden is geen nieuw geotechnisch onderzoek gedaan. Dit spoor heeft zich vooral gericht op het opbouwen van historische tijdreeksen met betrekking tot veranderingen in maaiveldhoogten, grondwater- en oppervlaktewaterstanden, peilbesluiten en de aanleg- en ophooggeschiedenis van de stad.¹⁸ Het belangrijkste doel is om de mogelijkheden en beperkingen van zulke tijdreeksen te verkennen voor oorzaak-gevolg analyses.

Fasering

Het project bestaat uit drie deelonderzoeken. Allereerst zijn als vervolg op het onderzoek van FlexusAWC/Archeomedia uit 2015¹⁹ de gegevens uit de 'basisregistratie adressen en gebouwen' (BAG) van de gemeente Gouda gecontroleerd en aan de hand van historische gegevens geactualiseerd (project 1).²⁰ Gelijktijdig is (historische) informatie over de stadsontwikkeling, het waterbeheer, maaiveldhoogten en zakkingen in een GIS-database verzameld en op kaart gezet, samen met een analyse van de stadsbodem en geologische ondergrond en het funderinggebruik door de tijd heen (project 2). De insteek van deze gegevensinventarisatie was om zoveel mogelijk data te verzamelen op het gebied van waterpeilen, bodemdaling, (bouw) ontwikkelingen en ondergrond-gegevens in de hoop dat uit de combinatie van de data patronen en verbanden zichtbaar zouden worden tussen allerlei historische ontwikkelingen en de snelheid en het patroon van bodemdaling (project 3). Door de weerbarstigheid van de verzamelde historische gegevens (§3.6) is die specifieke analyse in de loop van het onderzoek wat op de achtergrond geraakt, maar het loont de moeite daar in een later stadium nog eens verder naar te kijken.

17. BAG: de 'basisregistratie adressen en gebouwen' van alle Nederlandse gemeenten. Van Winsen et al. 2015; Van Velzen & Van Winsen 2016.

18. De reden is het ontbreken van een langjarig meetnetwerk dat toegespitst is op bodemdaling.

19. Van Winsen et al. 2015. Deze controleslag van de BAG betrof alleen de oostelijke binnenstad.

20. Van Velzen & Van Winsen 2016.



1.4 Over deze synthese/leeswijzer

Deze synthese gaat in op de bredere lessen die zijn te trekken uit de deelprojecten en gevolgde methoden voor soortgelijke stedelijke en nabijgelegen buitengebieden (projectfase 4). Welke verbanden bestaan tussen de snelheid van bodemdalingen en allerlei externe factoren, zoals activiteiten op grote schaal (ontginnen, aanleg nieuwbouwwijken, etc.) als op kleine schaal (nieuwbouw op inbreidingslocaties, dichtmaken van watergangen etc.). Deze vraag wordt uitgesplitst in kleinere onderdelen:²¹

- Wat zijn de processen die maaiveldddaling veroorzaken?
- In hoeverre speelt het type ondergrond een rol bij het proces van maaiveldddaling?
- Op welke wijze wordt maaiveldddaling beïnvloed door het water(peil) beheer;
- wat is de invloed van activiteiten in het buitengebied op bodemdaling in het buitengebied?
- wat is de invloed van activiteiten in de binnenstad op bodemdaling in de binnenstad?
- wat is de invloed van activiteiten in het buitengebied op bodemdaling in de binnenstad?
- Welke (waterbeheer)maatregelen kunnen worden genomen om maaiveldddaling te stoppen / te vertragen;
- Welke kennisleemten zijn er nog aan te wijzen om een afgewogen besluit te nemen over waterbeheersmaatregelen in relatie tot de maaiveldddaling;
- Op welke wijze kunnen deze kennisleemten (deels) worden weggenomen?

Een andere belangrijke vraag is welke effecten waterpeilverlaging of bodemdaling hebben op de funderingen van de gebouwen in de historische binnenstad en waar.²² Om die vraag te kunnen beantwoorden zijn gegevens met betrekking tot de toegepaste (historische) funderingstechnieken gecombineerd met gegevens over de ouderdom van de stadsbebouwing, ondergrondgegevens en zettingswaarnemingen. Een ruimtelijk beeld van de toegepaste funderingstechnieken kan helpen bij het beter identificeren van probleemgebieden in de stad:

- Welke funderingstechnieken zijn toegepast in Gouda?
- Waar in de stad zijn houten paalfunderingen of houten roosterfunderingen in de bodem aanwezig?
- Hoe diep liggen de houten funderingen en kunnen die droog komen te staan?
- Welke panden in de stad staan níet op een paalfundering en zakken met het maaiveld mee?

21. Groenendijk 2017b.

22. Coalitie 'Stevige stad op slappe Bodem' 2015.



De laatste vragen betreffen de onderzoeksinspanning zelf: Welke methoden werken? En welke werken minder goed? Welke methoden moeten nog verder onderzocht worden en welke mogelijke resultaten zouden hier uit kunnen komen?²³

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 *'Kennis van het verleden, bouwstenen voor de toekomst?'* omschrijft de belangrijkste resultaten van het project 'De historische binnenstad van Gouda. Stevige stad op slappe bodem'. Het betreft de volgende deelonderzoeken: historische stadsontwikkeling en stadsbebouwing, de opbouw van de bodem onder de binnenstad en de funderingsgeschiedenis van (en het funderingsgebruik in) de binnenstad. Het hoofdstuk sluit af met een beknopte samenvatting en een valorisatie van deze kennis voor het maatschappelijk vraagstuk van bodemdaling (§2.5): Wat hebben we binnen dit onderzoekspoor op hoofdlijnen geleerd over de oorzaken, knelpunten en eventuele oplossingsrichtingen met betrekking tot bodemdaling in Gouda? Welke onderdelen van deze methodiek zijn bruikbaar? En welke zijn minder bruikbaar?

Hoofdstuk 3 *'Bodemdalingscomponenten en tijdreeksanalyse'* beschrijft de relatie tussen maaiveldzakkingen, bodemgesteldheid, grondwater, oppervlaktewater, peilbeheer en de aanleg- en ophooggeschiedenis van de stad. Het idee is om de verbanden tussen menselijke activiteiten enerzijds en de snelheid van bodemdaling anderzijds te kunnen duiden, in de verwachting dat dit bijdraagt aan het vinden van mogelijke oplossingsrichtingen voor het stoppen of vertragen van bodemdaling. Om oorzaken en gevolgen scherper in beeld te krijgen is allereerst gezocht naar historische informatie over de ontwikkelingen van het maaiveld en de maaiveldzakkingen in Gouda, de ontwikkeling van de waterhuishouding bovengronds en ondergronds (afwatering, oppervlaktewater, grondwater, riolering) en het (historisch) waterbeheer in de polders en in de diverse peilvakken (peilbesluiten, peilen). Ook dit onderzoekspoor wordt afgesloten door een kort resumé en een kennisvalorisatie.

Het afsluitende hoofdstuk 4 *'Vragen en antwoorden'* gaat aan de hand van concrete vragen in op de (bredere) lessen die zijn te trekken uit de deelprojecten. Verder geeft het concrete antwoorden op de bruikbaarheid en benuttingsmogelijkheden van de gevolgde onderzoeksporen en -methoden voor soortgelijke stedelijke en nabijgelegen buitengebieden. Welke methoden of onderdelen van methoden werken goed? En welke methoden of onderdelen van methoden werken minder goed? De synthese sluit af met een aantal aanbevelingen die betrekking hebben op de problematiek van zakkende binnensteden en het materiële erfgoed.

23. Coalitie 'Stevige stad op slappe Bodem' 2015: projectplan.



A map of Gouda, Netherlands, showing land subsidence. The map is color-coded with a gradient from green (low subsidence) to red (high subsidence). The city is surrounded by water, and the map shows the layout of streets and canals. The title 'Verdieping bodemdaling' is overlaid on the map in large white text.

Verdieping bodemdaling

1 Wat is bodemdaling?

Bodemdaling is de daling van het grondoppervlak door geologische processen of door zakking.²⁴ Geologische bepaalde bodemdaling is het gevolg van zowel het afsmelten van het landijs sinds de laatste ijstijd (isostasie) als door bewegingen van de aardkorst langs breuken (tektoniek). Deze vormen van bodemdaling spelen een rol op langere geologische tijdschalen (duizenden jaren) en grote ruimtelijke schalen (meerdere provincies of groter).²⁵ Zakking is de bodemdaling die optreedt als gevolg van de factoren: oxidatie, zetting, inklinking en krimp en speelt een rol op kortere tijdschalen (1-1000 jaar) en kleinere ruimteschalen, zoals bijvoorbeeld een polder of een stadsdeel.²⁶ Meestal bedoelen we met bodemdaling dus eigenlijk zakking.

2 Wat veroorzaakt bodemdaling?

Oxidatie

Structurele wateronttrekking, vooral verlaging van het grondwaterpeil, heeft tot gevolg dat het veen in de bovenste bodemlagen sneller verteerd (oxideert) dan wanneer het nat is. Het aan zuurstof blootgestelde organisch materiaal wordt afgebroken en verdwijnt als CO₂ de lucht in.²⁷ Daardoor verliest het veen onomkeerbaar aan volume. Het grootste deel (60-65%) van de veenbodemdaling is, vooral in het landelijk gebied, het gevolg van oxidatie en wordt in belangrijke mate beïnvloed door een lage grondwaterstand in de zomer wanneer de aanvoer van water vanuit de sloten naar de percelen tekort schiet.²⁸ Slechts als de grondwaterstand niet dieper reikt dan 25 cm onder maaiveld (cm - mv) wordt de oxidatie geremd.²⁹

Voor de landbouw heeft profijt van een matige tot diepe drooglegging (60 cm - mv of meer). Die biedt een sterk verbeterde draagkracht voor machines en leidt tot minder vertrappingsschade. De mineralisatie als gevolg van oxidatie levert bovendien extra stikstof. Oxidatie vindt namelijk voornamelijk plaats in de bovenste 25-30 cm van het bodemprofiel. Op lange termijn, als enkel nog moeilijk afbreekbaar organisch materiaal resteert, is de drooglegging nauwelijks van invloed op de oxidatie.

Zetting

Bodemdaling in de bebouwde omgeving is vooral het gevolg van 'zetting'. Zetting is het onder druk wegpressen en daarmee samendrukken van de bodem als gevolg van bijvoorbeeld het gewicht van een kleilaag, door ophogingen met zand ten behoeve van nieuwbouw, de aanleg van wegen of door belasting van de bodem met zware landbouwmachines.³⁰ Veen is een natte en slappe grondsoort die grotendeels bestaat uit plantenresten en water en is dus zeer samendrukbaar. De zetting wordt mede beïnvloed door het beheer van het grondwaterpeil (met name de stijghoogte) omdat (het gewicht van) grondwater zorgt voor extra druk.³¹ Drooggevallen veenbodems zorgen voor verminderde druklast en grotere stijghoogten.

24. Stouthamer et al. 2008; Minderhoud et al. 2015.

25. Kooi et al., 1989. De bodemdalingsnelheden als gevolg van geologische processen bedragen in Nederland 0,01 mm per jaar (zuidoosten) tot 0.06 mm per jaar (noordwesten).

26. Schothorst, 1967a.

27. Volgens Van den Akker (2007) bedraagt de CO₂ emissie van oxiderend veen bij aan 2,6% van de jaaremissie van dit broeikasgas door Nederland in 1990, vergelijkbaar met 1,7 miljoen auto's.

28. Van den Akker 2007.

29. Van Hardeveld et al. 2003.

30. Bijv. Wolters et al. 2011.

31. Zaadnoordijk & Wonink 1995



Inklinking

Inklinking is het gevolg van wateronttrekking door bijvoorbeeld het afvoeren van oppervlaktewater of door verlaging van het grondwaterpeil. Door de wateronttrekking vermindert de opwaartse druk in de bovenste bodemlagen, waardoor onder invloed van het eigen gewicht de bodem in elkaar wordt gedrukt. Inklinking is nauw verwant aan zetting en beiden dragen meestal voor ongeveer 20-30% bij aan de bodemdaling.³²

Krimpen van bodems

Het inkrimpen van de bodem ontstaat doordat organisch materiaal als gevolg van ontwatering boven het grondwaterpeil komt te liggen uitdroogt en volume verliest. Krimp is grotendeels een seizoensgebonden proces. In de winter wordt krimp weer teniet gedaan door zwellen. Een deel van de krimp is echter onomkeerbaar.³³ Het aandeel hiervan op de bodemdaling bedraagt gemiddeld 15-20%.

Een combinatie van factoren

Deze vier factoren die van invloed zijn op de zinking zijn niet strikt te scheiden.³⁴ Zo zal door een verlaging van de grondwaterspiegel niet alleen oxidatie, maar ook krimp en inklinking optreden.³⁵ Verder verlopen klink-, krimp- en oxidatieprocessen binnen een gebied niet overal even snel. Dit heeft niet alleen te maken met de wisselende samenstelling van de grond, ondergrond en dikte van het veenpakket, maar ook met het feit dat door verschillend gebruik de diverse percelen binnen een veenpolder uiteenlopende eisen aan de waterstand stellen. Verder geldt dat voor gronden met een dik kleidek vooral oxidatie in combinatie met inklinking/zetting verantwoordelijk is voor de totale bodemdaling.

3 Hoe snel gaat bodemdaling?

De hoeveelheid bodemdaling die optreedt als gevolg van oxidatie, zetting, inklinking en krimp varieert. De totale zinking bedraagt in de West-Nederlandse veengebieden vaak meer dan 2 meter over een tijdschaal van enkele honderden jaren (ongeveer 5 mm/jaar).³⁶ In Noord-Holland komen zelfs waarden tot 3,5 meter voor. Eind jaren zestig van de vorige eeuw zijn in veel veenweidegebieden de slootpeilen verlaagd; in de veenweiden van West-Nederland tot ongeveer 60 cm beneden het maaiveld en in de Friese veenweiden tot 100-150 cm. Daardoor zijn de maaiveldalingsdalingen meer dan verdubbeld; in het Groene Hart tot gemiddeld 13 mm per jaar³⁷; in Friesland tot 24 mm per jaar.³⁸ In de Polder Mastenbroek (gemeente Kampen) bleek een grondwaterstands daling van 40 cm binnen 50 jaar te leiden tot een totale zinking van 20 cm (4 mm/jaar).³⁹ In steden met wijken op veen komen bodemdalingen door zetting van 2 mm per jaar tot meer dan 10 mm per jaar veel voor.⁴⁰

De slappe bodem zorgt dus voor bodemdaling variërend tussen 0,5 en 2,0 cm per jaar⁴¹ en door klimaatverandering neemt de maaiveld daling in het westelijke veenweidegebied tot 2050 met 0,3 tot 0,7 cm per jaar toe (afb. I).⁴² Ter vergelijking, de huidige zeespiegelstijging bedraagt voor de Nederlandse kust ongeveer 0,2 cm per jaar. Voor de nabije toekomst wordt rekening gehouden met een zeespiegelstijging van 0,35 tot 1,0 cm per jaar. Bodemdaling gaat dus op sommige locaties een factor 10 sneller dan zeespiegelstijging. Toch blijft bodemdaling een wat onderbelicht onderwerp, terwijl dit een groter effect kan hebben op onze veiligheid en leefomgeving.⁴³

32. Schothorst 1967b.

33. Van den Akker 2005.

34. Zie ook: Van Laarhoven 2017, 14.

35. Stouthamer 2008.

36. Schothorst 1977.

37. Van den Akker et al. 2007a; Beuving & Van den Akker 1996.

38. Borger 1975, 1977.

39. Schothorst, 1967a.

40. Bosch et al. 2011; zie ook Den Nijs 2015.

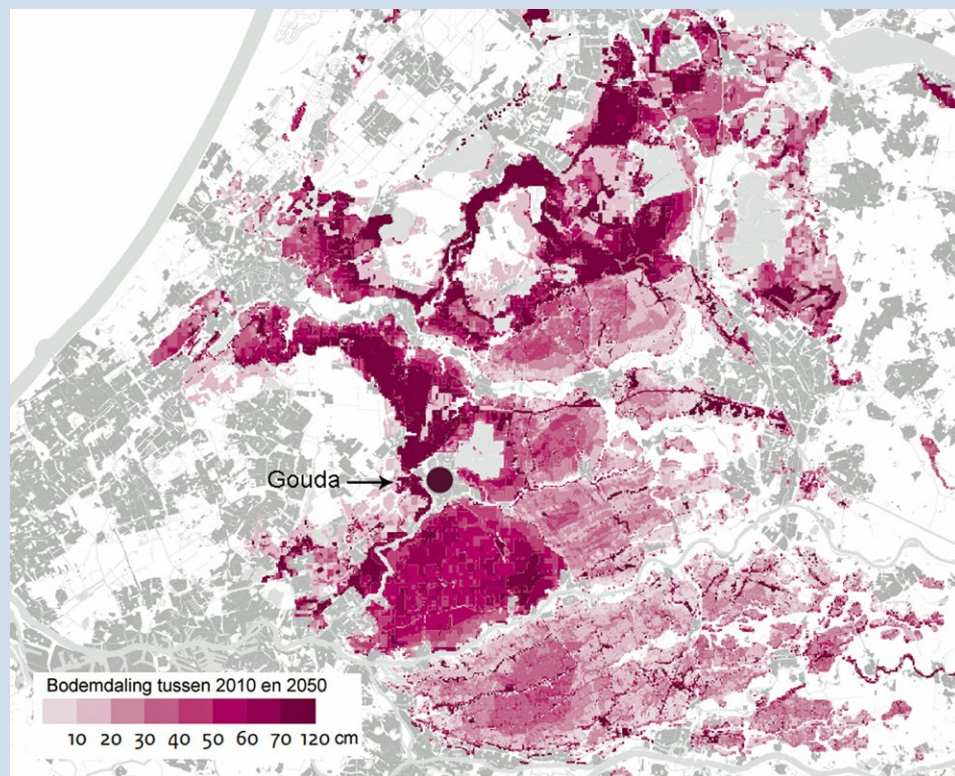
41. Van den Akker et al. 2007; Querner, Jansen, & Kwakernaak 2012.

42. Born et al. 2016.

43. Graafland 2016; Born et al. 2016.



Afbeelding 1.
Bodemdaling in het
landelijk gebied tot 2050
(bron: Pieterse et al. 2015).



4 Gevolgen van bodemdaling

Gevolgen voor landbouw

Veel gebieden die gevoelig zijn voor bodemdaling worden tegenwoordig vrijwel alleen nog gebruikt voor de melkveehouderij. Voor de melkveehouderij in het veenweidegebied is het huidige peilbeheer van belang om zonder aanpassingen te kunnen functioneren. Het huidige peilbeheer (drooglegging) veroorzaakt echter de bodemdaling, emissie van broeikasgassen en verslechtering van de waterkwaliteit door mineralisatie van het veen.

Gevolgen voor de gebouwde omgeving

Het effect van bodemdaling door zetting is dat huizen en infrastructuur onder hun eigen gewicht wegzakken als zij niet stevig of duurzaam genoeg in een stabiele (zand)laag in de ondergrond zijn verankerd. Daar waar die verankering niet stevig of duurzaam genoeg is, is gericht grondwaterbeheer nodig. Vooral in Laag-Nederland is in vooroorlogse wijken gebruik gemaakt van houten paalfunderingen. Door het dalen van de grondwaterstand kunnen de palen deels droog komen te staan, waardoor houten paalkoppen aangetast worden. Op dat moment worden de palen door oxidatie en mogelijk schimmels aangetast. Bij herhaalde droogstand kunnen de palen dusdanig worden aangetast dat de fundering vervangen moet worden. Dit probleem kan ondermeer beperkt worden door het vasthouden van water in het gebied en het handhaven van een voldoende hoog grondwaterpeil. De steeds dieper wordende polders worden ook steeds onveiliger voor overstrooming, temeer daar een deel van de bedijking bestaat uit veenkaden, die weinig stabiel zijn en ook oxideren.⁴⁴

44. Born et al. 2016.

Gevolgen voor de waterhuishouding en waterkwaliteit

Door zakking van maaiveld en veendijken neemt de kans op overstromingen flink toe. Verder houdt het gewicht van alle lagen boven het eerste watervoerende pakket de overdruk van de stijghoogte ten opzichte van het ontwateringspeil in evenwicht. Door bodemdaling en geleidelijke verlaging van het grondwaterpeil verandert deze balans met als gevolg een toename van de stijghoogte en kwel.⁴⁵ Als deze kwel brak of zout water bevat, kan er verzilting van het grond- en oppervlaktewater optreden. Ook kan door de toegenomen waterdruk de bodem opbarsten, een proces waarbij de bodemlaag open breekt. Verder komen door veenoxidatie grote hoeveelheden voedingstoffen vrij, die zowel het grond- als oppervlaktewatersysteem belasten. Hierdoor is het moeilijk om aan de Europese doelstellingen voor waterkwaliteit te voldoen.

Gevolgen voor erfgoed

Door bodemdaling en door aanpassingen in het peilbeheer verandert of verdwijnt de conserverende werking van de bodem en worden archeologische resten blootgesteld aan zuurstof met een versnelde degradatie van sporen en objecten tot gevolg.⁴⁶ Veel gebouwde rijksmonumenten staan vaak op een houten fundering. Om paalrot en gebouwschade te voorkomen moeten die houten funderingen constant onder water staan. Door bodemdaling en door aanpassingen in het peilbeheer is het dus steeds moeilijker om aan de uitgangspunten van de archeologische monumentenzorg - behoud van het ondergrondse cultureel erfgoed - en de instandhoudingsplicht van rijksmonumenten (Erfgoedwet) te voldoen.

Gevolgen voor klimaat

Door veenoxidatieproces komen broeikasgassen vrij, met name koolstof dioxide (CO₂) en distikstofmonoxide (N₂O). Deze uitstoot aan broeikasgassen door veenoxidatie in Nederland is 25% van de totale uitstoot aan broeikasgassen door auto's in Nederland en bedroeg in 1990 ruim 2,5% van de jaaremissie van CO₂.⁴⁷

5 Kosten van bodemdaling

Schade door bodemdaling kan omvangrijk zijn, omdat buizen, riolering en afvoeren niet meer passen en, kabels en leidingen verzakken en moeten worden vervangen. Wegen, pleinen, parken en ook particuliere tuinen, opritten en parkeerplaatsen moeten door de verzakking worden opgehoogd.⁴⁸ Dat maakt het beheer van bijvoorbeeld openbare ruimtes op slappe bodem vier keer duurder dan op stevige grond. Verder is er ook schade aan gebouwen door het scheefzakken van de funderingen. Het Planbureau voor de Leefomgeving berekende in 2016 de extra kosten tot 2050 voor funderingsherstel op minimaal 16 miljard euro en voor het onderhouden van infrastructuur op minimaal 5 miljard euro.⁴⁹ In het landelijk gebied liggen deze kosten aanmerkelijk lager (afb. II).

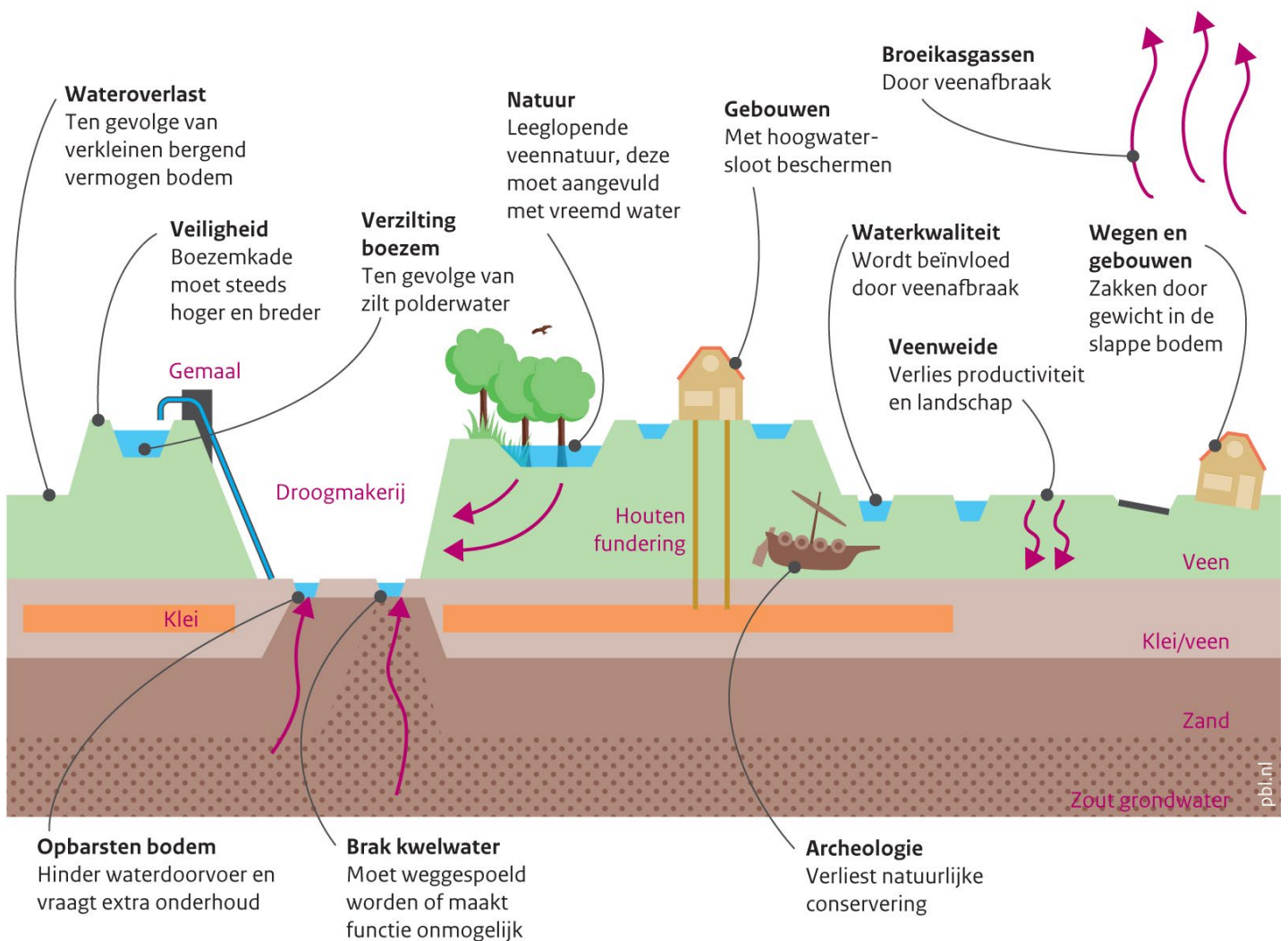
45. De Lange & Peereboom 2006.

46. Pieterse et al. 2015.

47. Van den Akker 2007, 2; Born et al. 2016.

48. Bosch et al. 2011; Born et al. 2016.

49. Born et al. 2016.



Afbeelding II.
Effecten van bodemdaling
(bron: Born et al. 2016).





Kennis van het verleden. Bouwstenen voor de toekomst?

2.1. Stadsontwikkeling, bodem en funderingsgebruik

2.1.1 Waterpeil en funderingen

Omdat de meeste historische panden in Gouda niet op palen gefundeerd staan - en dus met de maaiveld daling mee zakken - is het waterpeil in de afgelopen eeuwen al een halve meter verlaagd om wateroverlast te voorkomen. Een probleem van meezakkende huizen is echter dat de rioolaansluiting na verloop van tijd lager komt te liggen dan het riool onder de straten. Wanneer huizen wél stevig gefundeerd zijn op een vaste laag kan bodemdaling, wanneer het grondwaterpeil meezakt met de bodem, ertoe leiden dat huizen boven het maaiveld gaan uitsteken. Daarbij komen ook de houten funderingen boven water, met paalrot als gevolg. Verdere bodemdaling leidt dus tot toenemende risico's voor alle panden. Maar hoe kan worden voorkomen dat meezakkende huizen in de toekomst onder water komen te staan, terwijl er tegelijkertijd voor gezorgd wordt dat de fundering van huizen op houten heipalen niet aangetast wordt door droogstaan?

Om op een verstandige manier met dit dilemma om te gaan is het zaak om allereerst de probleemgebieden in de stad te identificeren. Deze probleemgebieden zijn anders van aard in historische kernen dan in de meeste naoorlogse wijken omdat de problematiek van bodemdaling sterk is verweven met de leeftijd van de bebouwing en de wijze van funderen. Verder speelt de wisselende draagkracht van de bodem een rol. Kennis over het funderingsgebruik door de tijd heen in relatie tot het voorkomen van meer- of minder dragende bodemlagen in de ondergrond en de waterhuishouding in de stad zijn dus cruciaal.⁵⁰

2.1.2 Project 'De historische binnenstad van Gouda. Stevige stad op slappe bodem'

Een van de belangrijke vragen bij het bepalen of waterpeilverlaging of bodemdaling een probleem is of niet, is welke funderingstechnieken zijn toegepast in Gouda? Waar in de stad zijn houten paalfunderingen of houten roosterfunderingen in de bodem aanwezig? Hoe diep liggen deze funderingen en kunnen die droog komen te staan? Welke panden in de stad staan niet op een paalfundering en zakken met het maaiveld mee?

Om deze vragen te beantwoorden is in 2014 door FlexusAWC en Archeomedia uitgebreid onderzoek gedaan naar het proces van het ontstaan van de stad Gouda (§ 2.2), de bodemgesteldheid in de stad (§ 2.3) en naar de ontwikkeling van funderingstechnieken (§ 2.4).⁵¹ Het idee is namelijk dat we onze huidige kennis over de toepassing van funderingstechnieken door de tijd heen kunnen koppelen aan de BAG, waar op pandniveau is aangegeven wanneer een pand is gebouwd en op welke ondergrond (§ 2.2.6).

50. Projectplan 'Stevige stad op slappe Bodem' (coalitie 'Stevige stad op slappe Bodem' 2015).

51. Van Winsen et al. 2015.



Zo ontstaat - met enige armslag - een soort van voorspellingsmodel voor de funderingstypen onder de bestaande bebouwing (§ 2.2.7) en krijgen we wellicht beter zicht op de probleemgebieden.

2.2 Stadsbebouwing

2.2.1 Stadsontwikkeling

Prestedelijke kern

Gouda ligt in het Hollands-Utrechtse veengebied, waar de Hollandsche IJssel als grootste rivier doorheen loopt. De stad ontstond bij de uitmonding van de Gouwe, een van de vele veenriviertjes die het overtollige regenwater uit het veen afvoerden naar de Hollandsche IJssel (§ 2.3). Dit uitgestrekte veenmoeras van Midden-Holland was tot in de vroege middeleeuwen een vrijwel onbewoond gebied. Alleen op de kleiige oevers van de toenmalige rijntakken kwam verspreide bewoning voor. Echte bewoningskernen bevonden zich alleen langs de kust, nabij de Rijnmond en Maasmond, en in het achterland, in het Kromme Rijngebied.⁵²

In het jaar 944 wordt het veengebied waar nu Gouda ligt voor het eerst genoemd in een oorkonde waarin keizer Otto I goederen 'gelegen in de Frankische gouw Lek en IJssel' schenkt aan de Utrechtse kapittels Dom en Oudmunster. Enkele decennia later kwam een grootschalige ontginning van dit veengebied op gang. Initiatiefnemers voor deze 'Grote Ontginning' waren

Afbeelding 2.1.
Vroege polders,
ontginningsbases en
ontginningsrichtingen (bron:
keunen 2016a).



52. Bazelmans, Dijkstra & de Koning
2002.

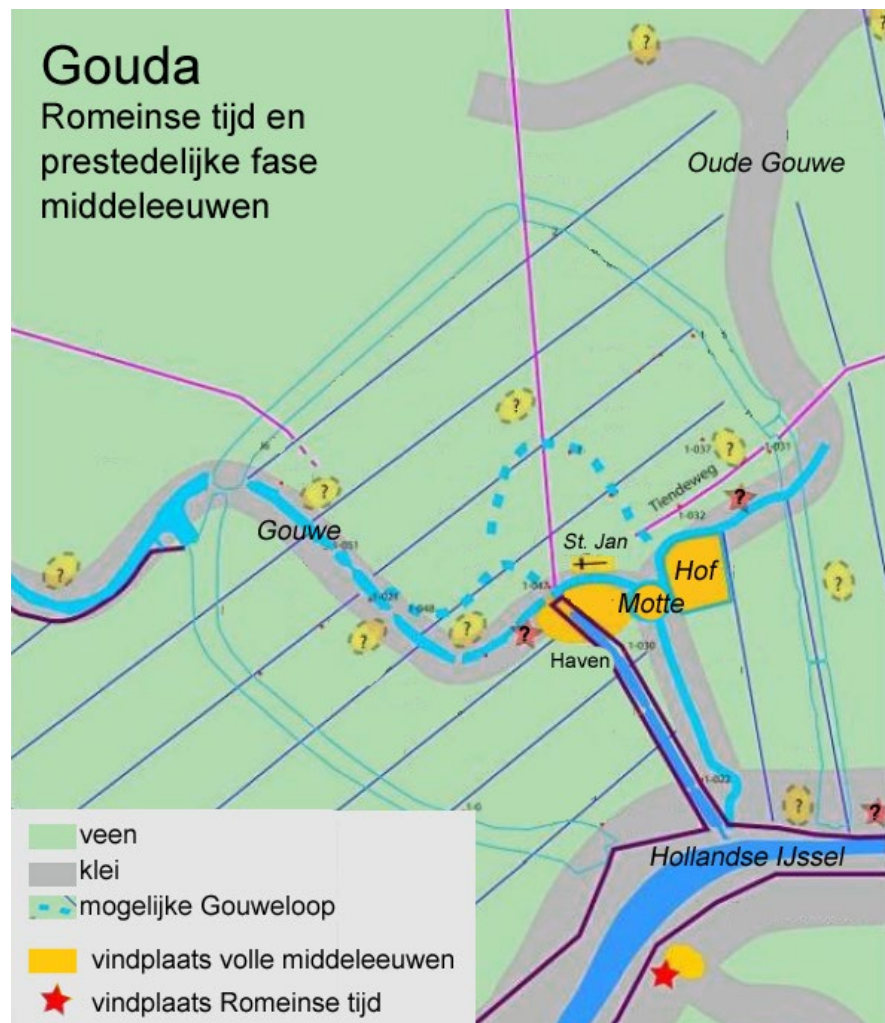


de bisschoppen van Utrecht en later ook de graven van Holland. De oudste ontginningen hadden de rivieren als basis.⁵³ Loodrecht op de Hollandsche IJssel en de Gouwe werden sloten gegraven waardoor het veen werd ontwaterd (afb. 2.1). In 1139 worden in een oorkonde van de bisschop van Utrecht de 'nieuwe ontginningen aan de Gouwe' (*nove culture juxta Goldam*) genoemd en er bestonden toen vermoedelijk al enkele tientallen veenontginningsboerderijen. Een 'prestedelijke kern' van de latere stad Gouda werd in die tijd gevormd door het adellijke hof van de Heren Van der Goude, die optraden als leiders van de ontginningen.

Stadsontwikkelingen tussen 1250-1350

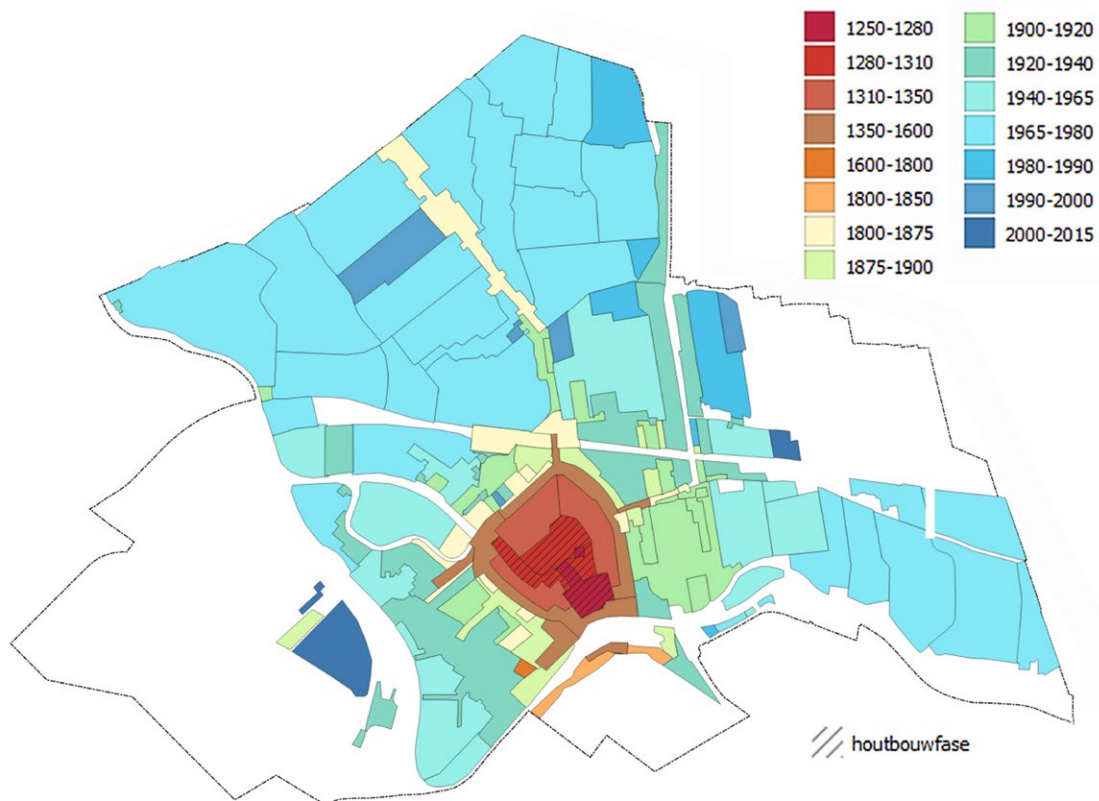
Rond het jaar 1225 werd de Gouwe verbonden met de Oude Rijn, waarmee het riviertje een belangrijke verbinding werd tussen de Oude Rijn en de Hollandsche IJssel. Na het aanleggen van een havengeul rond 1250 verschoof de locatie waar schepen konden afmeren van de natuurlijke Gouwemonding naar de toenmalige kern van de nederzetting (afb. 2.2).⁵⁴

Afbeelding 2.2.
Prestedelijk landschap (naar:
Dasselaar 2013).



53. De ontginningen Land van Stein en Willens vond plaats vóór 1050 vanuit het oosten. De ontginningen van Oude Gouwe in de elfde eeuw en Broekhuizen (vóór 1100) hadden eveneens langgerekte percelen haaks op de rivier.

54. Arends 2007, 7.



Afbeelding 2.3.
Stadsuitbreidingen sinds Ad
1250 (naar: Keunen 2016a).

Deze langgerekte haven was een afsnijding van de Gouwe en stond in open verbinding met de Hollandsche IJssel. Het was lange tijd een getijdhaven: bij vloed liep de haven vol met rivierwater en konden schepen binnenvaren.⁵⁵ Aan het begin van de haven werd omstreeks 1300 eerst een dam in de Hollandsche IJssel gelegd en later een sluis gebouwd. Deze keersluis beschermde Gouda tegen hoog water en kon geopend worden waardoor scheepvaart door de binnenstad mogelijk werd.

De fasegewijze uitbreiding van de stad van 1250 tot heden is in afbeelding 2.3 verbeeld in vijftien fasen. In 1272, het jaar van de stadsrechtverlening door graaf Floris V, werden aan beide zijden van de Haven bouwpercelen uitgegeven, kort daarna gevolgd door bouwpercelen achter de huizen van de Haven, de Spieringstraat en Peperstraat (afb. 2.3). Ten noorden van de Sint-Janskerk vond de volgende stadsuitbreiding plaats, met de aanleg van de grachten langs de Zeugstraat en de Turfsingel. In 1335 wordt aan de westzijde van de stad de Raamgracht genoemd, en worden de percelen langs de Keizerstraat ter bebouwing uitgegeven. In diezelfde tijd is de bebouwing naar het noorden opgeschoven. De echte begrenzing van de stad volgde in 1350, toen de stadsgrachten (de huidige singels) werden aangelegd: de Turfsingel, Kattensingel, Blekerssingel en de Fluwelensingel. Binnen deze vestinggrachten werden rond 1360 de stadsmuren en -poorten gebouwd ter verdediging van de stad.

55. Visser (1994) onderscheidt daarna drie bouwperiodes in de stadsontwikkeling (1250-1280, 1280-1310 en 1310-1350). Zie aanpassingen in Van Winsen et al. 2015, 16-17.

Grote uitbreidingen vonden na 1350 niet meer plaats en de omwalling met grachten en muren vormde tot in de negentiende eeuw de grens van de stad. Dit gebied binnen de singels was in 1350 zo ruim opgezet dat er eeuwenlang plaats genoeg was om de bevolkingsgroei en de toename van bedrijven op te vangen.⁵⁶ Omstreeks het jaar 1500 was Gouda de zesde stad van Holland.⁵⁷ De bierbrouwerij vormde een belangrijke industrie en binnen de stad lagen tot aan de Reformatie tien kloosters en verschillende kapellen.

Geleidelijke groei?

Verdichting van de bebouwing vond vanaf de middeleeuwen geleidelijk plaats door de aanleg van zijstraten met bebouwing vanuit 'hoofdstraten'. Deze fasen van groei werden beïnvloed door natuurlijke grenzen zoals waterlopen en bestaande oude verkavelingspatronen. Grootschalige gebeurtenissen zoals stadsbranden of overstromingen doorbraken echter dit model van een geleidelijke uitleg. Zo zijn er verschillende stadsbranden geweest waarbij hele delen van de stad opnieuw werden opgebouwd, wellicht met een ander funderingstype.

In de Goudse stadsgeschiedenis zijn twee grote stadbranden bekend en één kleinere, in een deel van de stad.⁵⁸ In 1361 brandde de stad volledig af, waarna hij met hulp van de toenmalige stadsheer Jan van Blois weer werd opgebouwd. De tweede grote stadsbrand vond plaats in 1438 waarbij slechts vijf huizen in de stad gespaard bleven. Ook de Sint- Janskerk en het oudste stadhuis van Gouda brandde toen volledig af. De Markt werd na deze brand opgehoogd met het puin uit de stad. Een kleinere brand vond plaats in 1527 en omvatte de westzijde van de Markt met delen van de Naaiersstraat en de (huidige) Blauwstraat. Aanwijzingen dat door de stadsbranden delen van de stad een nieuwe opzet kregen zijn er niet. De stad werd op de zelfde grondslag herbouwd. Wel kan een stadsbrand de aanleiding zijn voor een gezamenlijke ophoging van het terrein, voorafgaand aan de herbouwfase, zoals op de Markt en Westhaven, en een mogelijke verstening van de huizen, die eerder waarschijnlijk grotendeels van hout waren.⁵⁹

Stadsbouwprojecten en lokale herbouw

Binnen de stad zijn verschillende middeleeuwse bouwprojecten geweest, die van invloed waren op de latere inrichting van de stad. Tussen 1360 en 1385 werd door de toenmalige stadsheren een nieuw kasteel langs de Hollandsche IJssel gebouwd, op de plek van de Punt en het huidige Houtmansplantsoen. Verder kreeg de stad in 1395 het Markt(veld) in eigendom met het recht om jaarlijks meerdere markten te houden. In 1450 werd het Stadhuis op de Markt gebouwd. Ook de kaaswaag kreeg toen hier een plek.

Vooral voor de bouw van deze grotere gebouwen werd op kleef gefundeerd (zie kadertekst in § 2.4.1) door het heien van korte palen (slieten) in houten roosterfunderingen (afb. 2.4).⁶⁰ De overige stadsbebouwing werd 'op staal' gezet, dat wil zeggen op een of andere horizontale constructie direct op de

56. De bloeitijd van Gouda was tussen 1350 en 1475 toen talrijke immigranten, religieuze instellingen en de nieuwe zetels van de macht een plek binnen de veste moesten krijgen.

57. Na Dordrecht, Leiden, Haarlem, Delft en Amsterdam.

58. Abels et al. 2002.

59. Van Dasselaar 2013, 34-39.

60. Van Winsen et al. 2015, 43 e. v.



Afbeelding 2.4.
Roosterfunderingen onder
het Clarissenklooster (uit:
Van Winsen et al. 2015).



ondergrond. 'Lokale herbouw' vond vooral plaats binnen de grote



Afbeelding 2.5.
De kaart van Braun uit 1585.

kloostercomplexen. Zo werden 'het Grote Huis' langs de Nieuwehaven en de Rafter van het Clarissenklooster opgedeeld in woonhuizen en werd de kapel van dat klooster in gebruik genomen als stadstimmerwerf.⁶¹

Nieuwe tijd

De stadsuitleg in het midden van de zestiende eeuw kan worden gereconstrueerd op basis van de kaart van Jacob van Deventer uit 1562. Het stratenpatroon in de binnenstad zoals dat werd vastgelegd in 1562 is tot nu toe in grote lijnen hetzelfde gebleven.⁶² Kort na 1562 verscheen in 1585 de kaart van Braun en Hogenberg (afb. 2.5). Een aantal kloostergebouwen blijkt dan te zijn afgebroken net als het grootste deel van het kasteel aan de IJssel. Ook andere bebouwing rondom de binnenstad is op deze kaart verdwenen. De aanpassingen hielden verband met de oorlogsdreiging tijdens de Tachtigjarige oorlog. De scheepvaart kwam bij het uitbreken van de oorlog ten dele stil te liggen en de belangrijke afzetmarkt in het Spaansgezinde Vlaanderen kon niet meer worden gebruikt.

Na een periode van opleving in de Gouden Eeuw ondervond Gouda in de tweede helft van de achttiende eeuw weer een economische teruggang. Voor de bebouwing van de stad betekende de malaise dat er weinig grote

- 61. Denstagen 2001, 330-341.
- 62. Dat geldt overigens niet voor het middeleeuwse landschap buiten de singels, want dit is door latere stadsuitbreidingen bijna geheel verdwenen en alleen op basis van kaartvergelijking te reconstrueren.

Stadsontwikkelingskaarten

Voor het project 'stadsontwikkeling' is in 2016 door Luuk Keunen en Steven van der Veen (RAAP) op basis van aanvullend archiefonderzoek een GIS-database aangemaakt op basis waarvan - naast de kaart met de stedenbouwkundige uitbreiding van Gouda - een aanvullende serie thematische kaarten is vervaardigd:⁶⁴

- omvorming van hout- naar steenbouw;
- ontwikkeling van grote nieuwbouwprojecten in de binnenstad sinds 1970;
- ontginnings- en polderstructuur en richting van de prestedelijke ontginningen;
- historisch grondgebruik, vooral waar dat afwijkend was van de regel (grasland);
- historische ophogingen.

De kaartlaag over omvorming van hout- naar steenbouw betreft niet meer dan een contour om het deel van de binnenstad waarin omvorming plaatsvond. De kaartlaag 'grote nieuwbouwprojecten' is goeddeels gebaseerd op een analyse en bewerking van de Basisadministratie Adressen en Gebouwen (§ 2.2.2). Hierin zijn alle op heipalen (op stuit) gefundeerde betonnen bouwwerken in de binnenstad vanaf 1970 opgenomen (afb. 2.7). Verder is een kaartbeeld vervaardigd van de prestedelijke ontginningsseenheden / vroegere polders op het grondgebied van de gemeente Gouda (afb. 2.1). Daarbij zijn ook de ontginningsrichtingen en ontginningsbases, zijkades en achterkades in kaart gebracht om het totale systeem te begrijpen.

Afbeelding 2.7.
Nieuwbouwlocaties na
1970 in de binnenstad (uit:
Keunen 2016a).

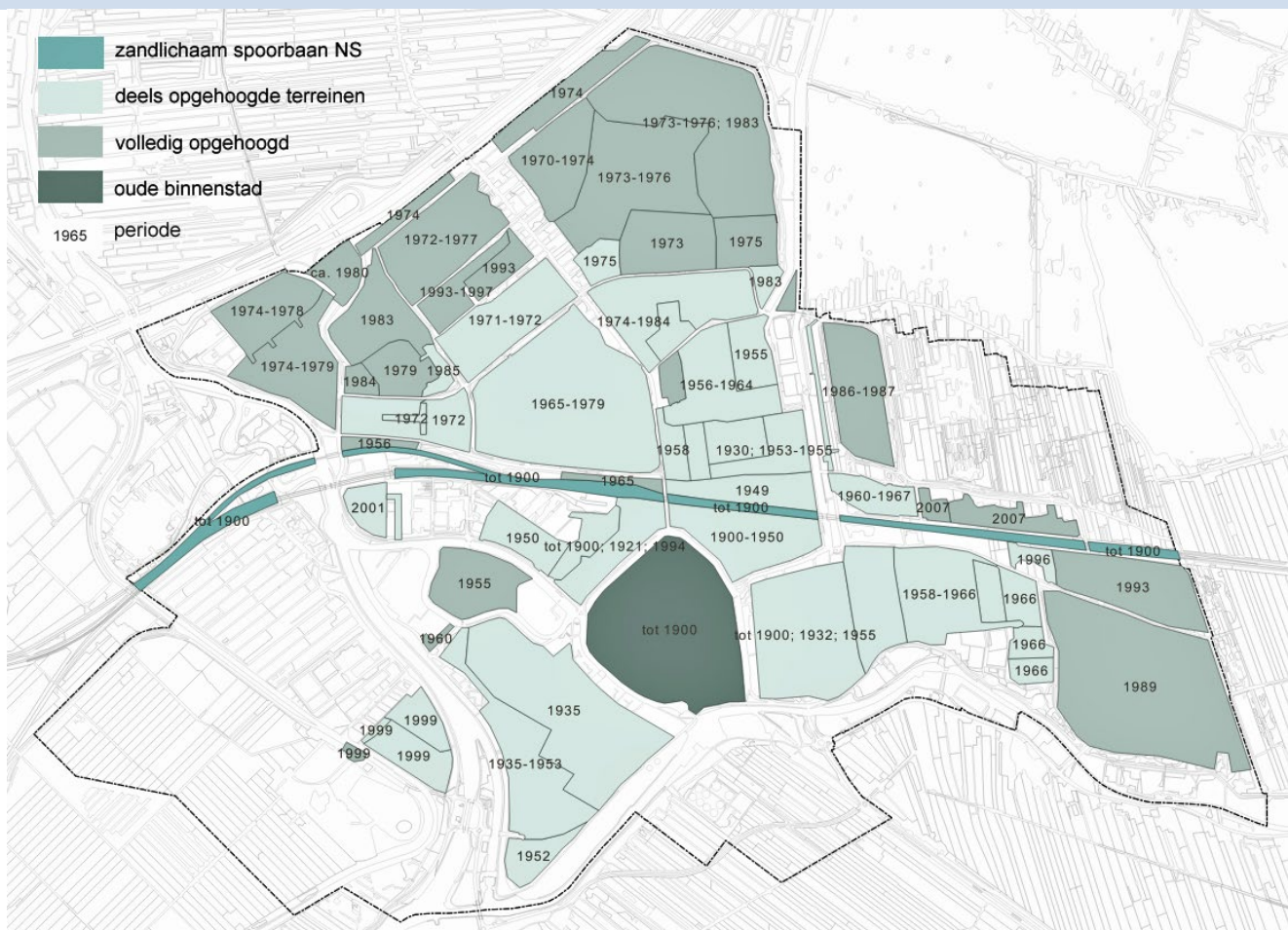


64. Groenendijk 2016c; Keunen 2016a, 2016b, 2016c. Daarbij werd gebruik gemaakt van reeds bestaande gegevens afkomstig uit de Cultuurhistorische Basiskaart van Gouda.

Voor het historisch grondgebruik is in kaart gebracht welke gebieden vanaf 1850 van grasland afwijkend grondgebruik hebben gekend, zoals bebouwing, akker- of tuinbouw, boomgaard of bos. De gedachte daarbij is dat wanneer percelen langdurig als grasland in gebruik zijn, zowel zetting als drooglegging relatief gering zullen zijn geweest. Gebieden die sinds 1900 werden opgehoogd als onderdeel van de stedelijke uitbreiding - met een mogelijk versnelde zetting als gevolg - zijn eveneens in kaart gebracht (afb. 2.8). Daarnaast hebben we data over maaiveldophogingen in het GIS geïntegreerd. Het betreft zowel indicaties van de periode en de aard (partieel, geheel) als schattingen van de dikte van het ophogingspakket (afb. 2.6).

Vooraf ten noorden en noordoosten van de binnenstad van Gouda wordt grasland al in de tweede helft van de negentiende eeuw gebruikt voor een andere vorm van grondgebruik, zoals in het Boerhaavekwartier en in mindere mate de Ouwe Gouwe en Gaardenbuurt/Heesterbuurt. In alle gevallen neemt hier de stedelijke bedrijvigheid toe. In de afgelopen decennia kwam daar de Goudse Hout bij.

*Afbeelding 2.8.
Opgehoogde en deels-
opgehoogde woonwijken
en terreinen rondom de
binnenstad met fasering
(bron: Keunen 2016b).*



2.2.2 Bouwjaar van panden in de binnenstad

Basisregistratie Adressen en Gebouwen

Informatie over het bouwjaar van individuele panden in de binnenstad van Gouda bevindt zich sinds 2009, net als in de rest van Nederland, in de zogenaamde Basisregistratie Adressen en Gebouwen of BAG (afb. 2.9).⁶⁵ Het ligt daarom voor de hand de BAG-gegevens te gebruiken voor een pandspecifieke voorspelling van toegepaste funderingstechnieken. Helaas betreft het BAG-bouwjaar van oudere panden vaak slechts een schatting van de ouderdom. In de eerste plaats komt dat omdat bij het opstellen van de BAG uit is gegaan van de toen beschikbare WOZ-gegevens.⁶⁶ Deze zijn in Gouda vastgelegd vanaf het jaar 1900 en alle oudere panden zijn toen in de WOZ-registers opgenomen met als bouwjaar '1900'. Een meer preciezer ouderdom kan worden gegeven voor de talrijke gemeentelijke en rijksmonumenten in de stad omdat in de 'redengevende omschrijvingen' voor de monumentale status van de betreffende panden ook bouwjaren worden vermeld. Ook deze kunnen misleidend zijn omdat verschillende

*Afbeelding 2.9.
Niet-gecorrigeerde
bouwjaren van panden in
de binnenstad volgens de
BAG (uit: Van Winsen et al.
2015).*



65. www.kadaster.nl/bag.

66. WOZ: waardering onroerende zaken.
Zie verder Van Winsen et al. 2015,
65

onderdelen van een gebouw uit verschillende perioden kunnen dateren. Soms is hierin alleen sprake van een globale periodisering ('eind achttiende eeuw'). Voor andere monumentale panden is alleen een (globale) geveldatum bekend, waarbij achterliggende delen van het gebouw veel ouder kunnen zijn.

Correctie op basis van historische gegevens

Van een nauwkeurige ouderdomsbepaling van individuele panden op basis van BAG-gegevens kan dus geen sprake kan zijn zonder nader onderzoek.⁶⁷ Het Goudse bouwarchief bevat echter alleen bouwtekeningen vanaf het jaar 1879 en deze werkwijze voor het nalopen van alle panden in de Goudse binnenstad is zeer arbeidsintensief. Om - binnen beperkte tijd - toch een precieze uitspraak te doen over de ouderdom van panden (en hun funderingen) is een methode van historische kaartenanalyse gecombineerd met een visuele toetsing per pand met behulp van Google Streetview (gevels) en Microsoft Bing Maps (3D-luchtfoto's).⁶⁸

Een van de belangrijkste kaartbronnen vormen de kadastrale minuutplannen van 1828 en 1874. Deze kadastrale kaarten vormen de enige twee duidelijke en volledige plattegronden uit de negentiende eeuw die van de binnenstad van Gouda tot op perceels- en pandniveau getekend en beschikbaar zijn. Door kaartvergelijk is het mogelijk om de locaties van panden die in de periode 1828-1874 gebouwd zijn te lokaliseren. Verder is het mogelijk om te bepalen of de casco's van panden mogelijk uit de periode vóór 1828 dateren of uit de periode ná 1874. Zeker het laatste jaartal is van belang omdat de bouwverordening uit 1879 eisen stelt aan de diepteligging van het hout van funderingen: namelijk minimaal 1,1 meter beneden NAP (m - NAP).

Met behulp van Google Streetview en Microsoft Bing maps kan worden bepaald of en (soms) wanneer voorgevels vervangen zijn en of er misschien verschillende gebouwen/casco's achter de huidige gevel voorkomen. Verder kan uit de vormgeving van kap en gevels beoordeeld worden of het pand als geheel één stijlperiode en hiermee één totstandkomingsperiode vertegenwoordigt.

Testgebied

Deze methode is in eerste instantie getest binnen het zuidoostelijke deel van de binnenstad. Hier is namelijk zowel sprake van het hooggelegen stadsgedeelte aan de Oosthaven (afb. 2.10, hoger dan 2 m NAP) als het ten oosten hiervan gelegen lagere gebied rond de Groeneweg/Tuinstraat (1 tot 0 m - NAP). Bovendien is dit het oudste gedeelte van de binnenstad waar de dikte van het archeologisch ophogingspakket sterk wisselt (§ 2.3.5, afb. 2.16).

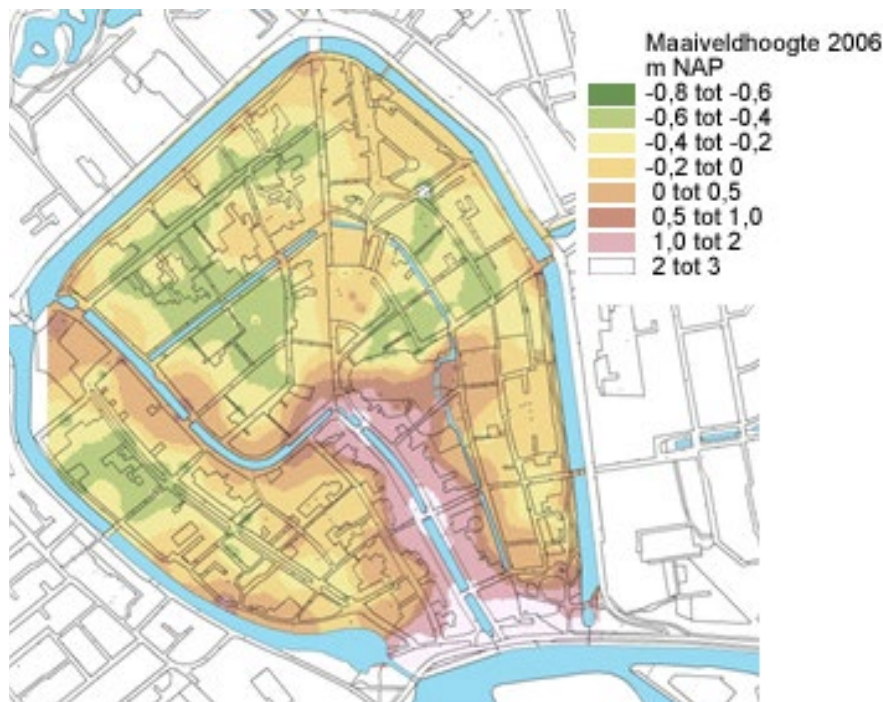
Op de samenvattingskaart (afb. 2.11) is de conclusie 'bouwjaar BAG waarschijnlijk onjuist' in het overgrote deel van de gevallen het resultaat van de kaartanalyse. Het pand is dan meestal al op een van de kadastrale

67. Van Winsen et al. 2015, 65.

68. Ibid. Een vergelijkbare methode is ook toegepast voor de binnenstad van Deventer (Willemsse et al. 2013).



Afbeelding 2.10.
Maaiveldhoogten in de binnenstad in 2006 (overgenomen uit het projectplan 'stevige stad op slappe bodem' 2015).



minuten aanwezig, terwijl in BAG een meer recent bouwjaar aangegeven is. Bij de conclusie 'bouwjaar BAG waarschijnlijk juist' komen de kaartanalyse en het in BAG-bouwjaar wel overeen, maar is er na controle van de gevels en de vorm van het object toch twijfel. De panden die ten tijde van het onderzoek niet in Streetview opgenomen waren zijn, als laatste, met een gele kleur op de kaarten gezet ('geen oordeel mogelijk'). Op basis van de gecorrigeerde BAG is op de samenvattingskaart ook een uitspraak gedaan, per pand, over de diepteligging van de funderingen. Dit wordt besproken in paragraaf 2.4.4.

Binnenstad

In 2016 is het testgebied door Flexus AWC uitgebreid naar de rest van de binnenstad.⁶⁹ Tijdens dit onderzoek zijn alle BAG-panden in de Goudse binnenstad nagelopen en waar nodig gecorrigeerd. Hierbij is een zekere marge van nauwkeurigheid aangehouden omdat niet het exacte bouwjaar bepaald moest worden maar vooral de 'funderingsperiode' (§ 2.4.3) waarin het casco van het pand tot stand kwam.⁷⁰ De gehanteerde werkwijze borduurde voort op de werkwijze zoals beschreven in Van Winsen et al 2015.⁷¹

Het onderzoek heeft geresulteerd in een lijst van 120 panden waar, na kaartvergelijking en controle middels Google Streetview en Microsoft Bing Maps, een afwijking van het in de BAG opgenomen jaartal werd vastgesteld. Deze lijst is binnen de gemeente Gouda nagelopen door R. Hofman (Senior Beleidsadviseur Cultuurhistorie) en M. Groenendijk (gemeentelijk archeoloog/

69. Groenendijk 2016a.

70. Groenendijk 2017b.

71. Van Winsen et al 2015, 63-72 en bijlage 2.



Afbeelding 2.11. Samenvattingskaart voor de funderingsperiodes (naar: Van Winsen et al. 2015).

projectleider zakkende bodem). Het grootste deel van de voorgestelde wijzigingen is overgenomen, al dan niet met kleine aanpassingen., waarmee de BAG van de binnenstad van Gouda nu zo nauwkeurig is als redelijkerwijs haalbaar met de toegepaste GIS-methodiek. Omdat de BAG uitgaat van de invoer van één jaartal, en dus niet van de funderingsperiodes zoals vastgesteld door Winsen et al. (2015), zijn de 'BAG-bouwjaar' aangepast aan de gehanteerde funderingsperiodes en in juli 2017 in de BAG verwerkt:⁷²

- een pand uit de funderingsperiode vóór 1828 kreeg BAG-bouwjaar 1800;
- funderingsperiode 1828-1878: BAG-bouwjaar 1850;
- funderingsperiode 1879-1902: BAG-bouwjaar 1890;
- funderingsperiode 1903-1927: BAG-bouwjaar 1920;
- funderingsperiode 1928-1949: BAG-bouwjaar 1940;
- na 1950: BAG-bouwjaar 1960.

72. Peters 2017; Groenendijk 2017b.



2.3 Ondergrond en bodemdaling

2.3.1 Inleiding

De ondergrond van de meeste historische binnensteden in West-Nederland is nogal complex. Dragende en minder dragende bodemlagen wisselen elkaar sterk af en er is eeuwen lang op dezelfde plaats geleefd. Huizen zijn gebouwd, verbouwd, uitgebreid, onderkelderd, gesloopt; terreinen en wegen werden afgegraven en opgehoogd. Al deze veranderingen hebben hun weerslag gehad op de bodem en op de zakkingen in de stad.

De verschillen in de natuurlijke ondergrond zijn verder erg bepalend voor de locatiekeuzen die in het verleden werden gemaakt. Vooral de van nature voorkomende hoogteverschillen in het landschap speelden een rol. In steden die net als Gouda in een veengebied zijn ontstaan waren de kleiige oevers van de rivieren minder gevoelig voor inklinking dan de daarnaast gelegen veengebieden en vormden de eerste bewoonbare ruggen.

Om de Goudse problematiek goed te begrijpen is eveneens gekeken naar de ruimtelijke ontwikkeling van de stad in relatie tot de geologische ondergrond. Geologische en archeologische gegevens kunnen óók veel vertellen over de funderingstechnieken die in de verschillende perioden in de stad werden toegepast. De wijze van bouwen wordt op hoofdlijnen namelijk vooral bepaald door de bouwtypologie én de draagkracht van de verschillende bodemlagen. Verder is de ondergrond van invloed op de waterhuishouding in de stad, niet in de laatste plaats op de grondwaterstromen. Een goed begrip van de ondergrond kan dus een wezenlijke bijdrage leveren aan de vraagstukken die betrekking hebben op de waterpeilen, funderingen en bodemdalingen in de binnenstad van Gouda. Centrale vragen zijn:⁷³

- Wat is bekend over de meer- of minder dragende bodemlagen onder de stad?
- Wat zijn de kwetsbaarheden van de binnenstad in relatie tot de ondergrond?
- Welke kansen en oplossingen zijn er voor de problematiek van de binnenstad van Gouda gezien vanuit de bodemmorfologie?
- Welke kennis ontbreekt nog en wat moet er gebeuren om kennisleemten weg te nemen?

2.3.2 Gegevens

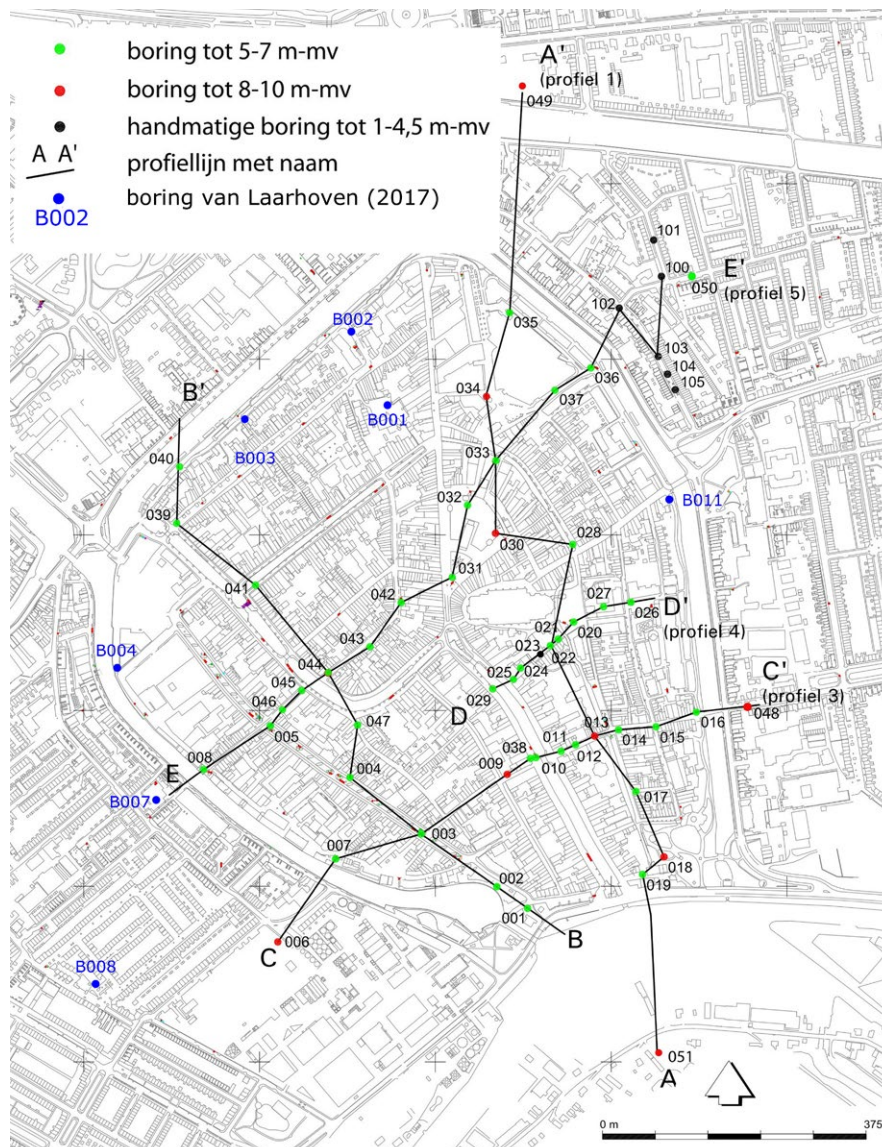
Onder stadskernen is de bodem in het verleden niet door geologen of bodemkundigen gekarteerd. Gegevens over de opbouw van de stadsbodem zijn echter wel voorhanden uit de resultaten van stadsopgravingen en de resultaten van geotechnisch onderzoek naar de draagkracht en waterhuishouding van de stadsbodem.⁷⁴ In de Goudse binnenstad is verder in 2012/2013, voorafgaand aan de aanleg van ondergrondse vuilcontainers,

73. Coalitie 'Stevige stad op slappe Bodem' 2015.

74. Bijvoorbeeld Den Nijs 2015.



Afbeelding 2.12. Overzicht van de boringen behorende bij de uitgewerkte boorprofielen in de binnenstad (uit: Van Dasselaar 2013 aangevuld met Van Laarhoven 2017, fig. 17).



door Archeomedia BV een uitgebreid booronderzoek uitgevoerd.⁷⁵ Toentertijd zijn aan de hand van de gegevens van mechanisch gestoken boringen vijf doorsneden gemaakt door de ondiepe ondergrond (tot ca. 9 m - NAP) van de Goudse binnenstad (afb. 2.12). In 2017 is deze studie aangevuld met een pilotonderzoek naar de zettingsgevoeligheid van de ondergrond in de Goudse binnenstad en in de wijk Korte Akkeren en het landelijk gebied ten westen daarvan, door de Universiteit Utrecht en Deltares in samenwerking met de gemeente Gouda.⁷⁶ Dit betreft in de ontwikkelingsgeschiedenis van Gouda drie contrasterende gebieden:

75. Van Dasselaar 2013.

76. Van Laarhoven 2017.

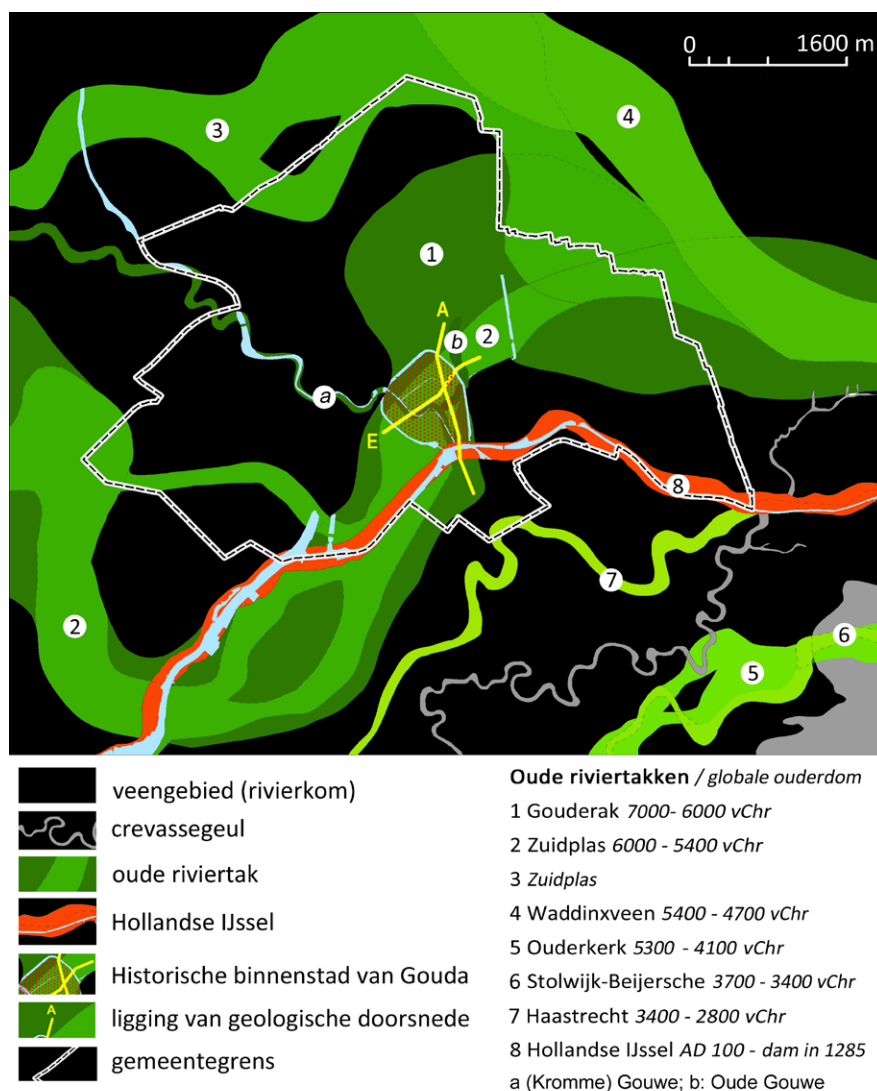
1. De middeleeuwse binnenstad met een 750 jarige geschiedenis van bouwen en ophogen;
2. De wijk Korte Akkeren waar de stadsbebouwing pas omstreeks 1860 tot stand kwam;
3. De tot dusverre onbebouwd gebleven IJsselweide ten westen van de Voorhaven (zie afb. 3.3 in § 3.2).

Voor dit onderzoek is een 3D ondergrondmodel van het pilotgebied gecombineerd met de bestaande hydrologische, geotechnische, geologische en bodemkundige gegevens.

2.3.3 Ontstaan van het landschap

Omstreeks 8500 jaar geleden was onder het zuidoostelijke deel van de binnenstad van Gouda een brede rivier actief, de zogenaamde Gouderak stroomgordel (afb. 2.13).⁷⁷ Iets ten noorden van het centrum ontstond enkele

Afbeelding 2.13.
Paleogeografische kaart van fossiele riviertakken en hun ouderdommen in de gemeente Gouda met de ligging van de binnenstad en de getoonde boorraaien.



77. Cohen et al. 2012; Zie ook Van Laarhoven 2017, § 2.2.

eeuwen later de Zuidplas stroomgordel. Beide riviertakken vormden toen de hoofdafvoer van het Rijnwater en mondden uit in zee nabij de huidige Maasmonding.⁷⁸ Toen deze riviermonding dichtslibde verplaatste de hoofdafvoer van het Rijnwater zich rond 5400 v.Chr. in noordelijker richting en ontstond de Waddinxveen stroomgordel. Pas veel later, rond 4400 v.Chr. ontstond de Oude Rijn. Gouda lag toen precies op de grens van een open waddengebied, waarvan de afzettingen nu aan het oppervlak liggen in de Zuidplaspolder.

Hollandveen

Door de vorming van strandwallen raakte dit getijdegebied afgegrensd van de zee en rond 3000 v.Chr. was de kustlijn gesloten. In de lagunes achter de strandwallen was een overvloed aan zoet rivier- en regenwater en hier ontstonden uitgestrekte rietveenmoerassen en moerasbossen. Vanaf die tijd veranderde Midden-Holland in één groot veengebied, het 'Hollandveen' genoemd. Kleine veenriviertjes voerden het overtollige regenwater uit het veen af en her en der kwamen meertjes voor. Door stijging van de grondwaterspiegel - opgestuwd door een steeds hogere zeespiegel - en het langzaam meegroeien van het plantendek ontstond uit de voortdurende opeenstapeling van afstervende planten en bomen een dik veenpakket.

Hollandsche IJssel

Het uitgestrekte veenmoeras kwam pas rond het begin van de jaartelling weer onder directe invloed van een rivier te staan, toen de Hollandsche IJssel ontstond als aftakking van de Oude Rijn. Vanaf dat moment werd er weer zand en klei op het veen afgezet en kwam kleirijk IJsselwater in de veenriviertjes terecht.⁷⁹ Koolstofonderzoek aan een wortel afkomstig van een boom die in het veen groeide wees echter uit dat het veen rondom Gouda nog tot in de vierde eeuw aangroeide.⁸⁰

De eerste nederzetting ontstond bij de uitmonding van twee van deze veenriviertjes in de Hollandsche IJssel, de Gouwe en de Oude Gouwe. De natuurlijke bodem in de Goudse binnenstad bestaat dan ook uit een dik veenpakket met daarover heen een dun kleidek in een strook van ongeveer 500 m breed. Waar ooit de Gouwe en 'de Oude Gouwe' stroomden is vanuit de IJssel een dikkere kleilaag afgezet (§ 2.3.4).

Reliëfomkering

Veen dat wordt gedraineerd verliest volume en gaat bovendien, als gevolg van de blootstelling aan de lucht, oxideren.⁸¹ Vanaf de ontginningen van het veengebied in de volle middeleeuwen is de veenbovengrond gaan zakken, terwijl de kleiige oevers van de IJssel, Gouwe en Oude Gouwe nauwelijks inklonken. De oorspronkelijk hooggelegen delen van het veen zijn hierdoor lager komen te liggen dan de geul- en oeverafzettingen van de riviertjes, welke zich als hogere kleiruggen manifesteren. In de binnenstad is dit proces van 'inversie' enorm versterkt door zetting. Om de bodemdaling van het veen tegen te gaan werd het maaiveld namelijk periodiek opgehoogd, wat

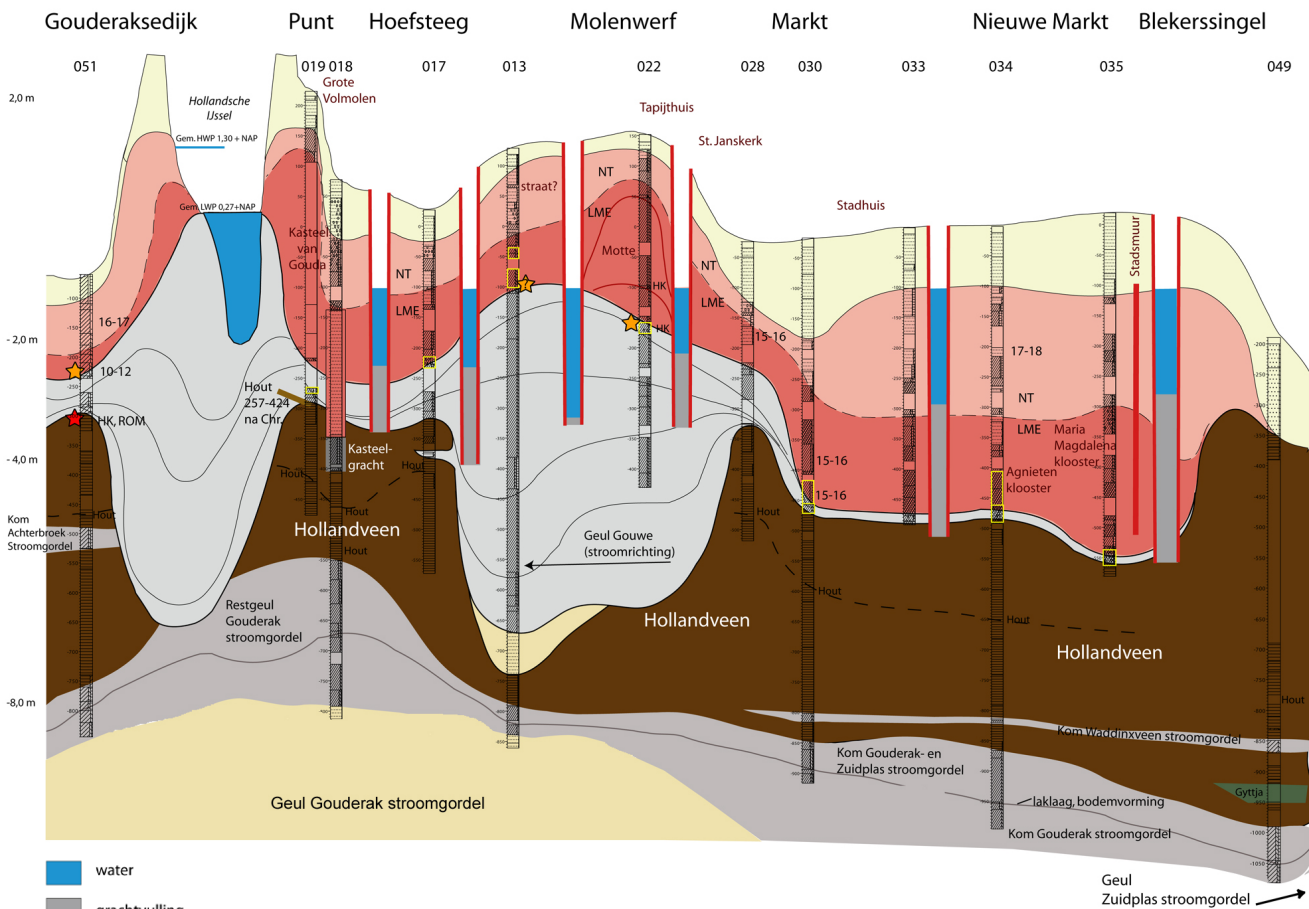
78. Ibid.

79. Van Dasselaar 2013.

80. Ibid., 1.

81. Zie 'Verdieping bodemdaling'.





*Afbeelding 2.13.
Paleogeografische kaart van
fossiele riviertakken en hun
ouderdommen in de gemeente
Gouda met de ligging van de
binnenstad en de getoonde
boorraaien.*

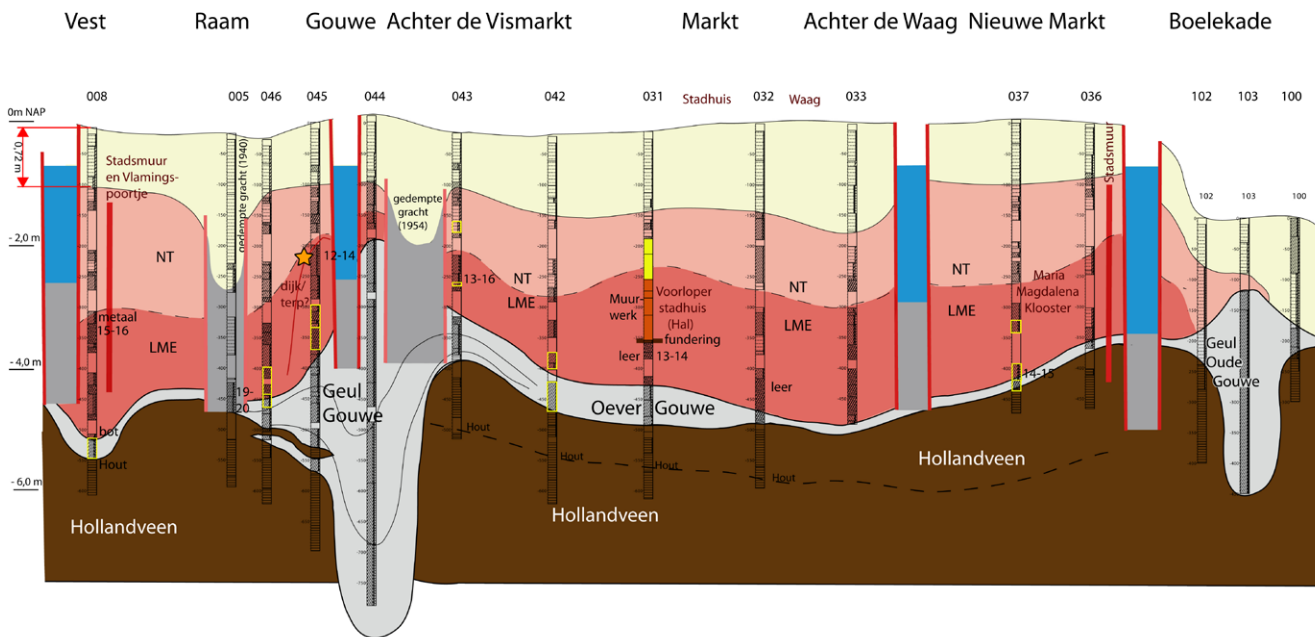
de bodemdaling door het samendrukken van het veen juist versterkte. In de veengebieden is hierdoor een metersdik archeologisch pakket ontstaan, terwijl op de kleiruggen een minder dik ophogingspakket nodig was om de stad op het zelfde peil te houden (§ 2.3.5).

2.3.4 Bodemopbouw onder de binnenstad

De stad Gouda ontstond bij de uitmonding van de Gouwe in de Hollandsche IJssel, toen nog een stromende Rijntak (afb. 2.2). De Gouwe was een van de vele veenriviertjes die het overtollige regenwater uit het Hollands-Utrechtse veengebied afvoerden naar de Hollandsche IJssel en vloede nabij de uitmonding samen met een ander veenriviertje, de 'Oude Gouwe'. Deze veenriviertjes vervoerden geen klei; dat kwam alleen in de riviertjes terecht tijdens overstromingen vanuit de Hollandsche IJssel. Het hele gebied betrof vermoedelijk een soort delta met een benedenloop op de plek van de huidige Spieringstraat maar de natuurlijke loop van de veenriviertjes is moeilijk te reconstrueren in het gebied van de huidige binnenstad.

Doorsneden door de stad

Twee profielen uit Van Dasselaar (2013) worden hier besproken. Profiel A (afb. 2.14) loopt van de zuidelijke oever van de Hollandsche IJssel door het



Afbeelding 2.15.
Dwarsdoorsnede door de binnenstad: profiel E (uit: Van Dasselaar 2013).

oosten van de binnenstad tot net boven de spoorlijn. In dit profiel zijn ook de diepste geologische afzettingen te zien, de (rest)geulafzettingen van de Gouderakstroomgordel. De Pleistocene zandlaag ligt echter rond de 13 tot 15 m - NAP⁸² en is met de boringen nergens bereikt. Tien diepe boringen tot gemiddeld 9 m beneden maaiveld (m - mv) geven een goed beeld van de loop en diepte van de oudste riviertak onder de stad - de Gouderak stroomgordel - onder het zuidoostelijk deel van de binnenstad. Het vaste rivierzand is aangetroffen op een diepte van 8,0 m tot 8,5 m - NAP. De donkerste rode laag in profiel A zijn de ophogingen uit de middeleeuwen, de lichtere laag daarboven ophogingen uit de zestiende eeuw en jonger. De gele zandlaag dateert uit de negentiende en twintigste eeuw. Profiel E (afb. 2.15) loopt van (zuid)west naar noordoost door de stad van de Vest bij het Vlamingspoortje naar de Boeiekade. Hierin zijn vooral de diepteligging van het veen en de smalle geul- en oeverafzettingen van de Gouwe en de Oude Gouwe te zien. De oeverafzettingen van de IJssel lijken vrij beperkt te zijn of zijn op deze locatie vergraven in de middeleeuwen. Van de Gouwe en Oude Gouwe zijn wel dikke geul- en oeverafzettingen teruggevonden. Deze vrij smalle geulafzettingen zijn door de daling van het veen als hogere kleiruggen in het landschap komen te liggen. Uit profiel A (afb. 2.14) blijkt dat in het zuidoostelijke deel ongeveer 2 tot 3 m van het oorspronkelijke 5 meter dikke veenpakket over is. In het noordwestelijke deel van de stad is de veenlaag tegenwoordig nog 3 tot meer dan 5 meter dik. Rond het begin van de jaartelling zal deze bijna 8 meter dik zijn geweest. Over de aard van dit veen onder de stad - en de kwetsbaarheid voor bodemdaling - weten we nog weinig.⁸³ In tabel 1 staan de gegevens over de veen en klei-op-veenbodems rondom Gouda weergegeven evenals de relatieve kwetsbaarheid van deze bodems voor bodemdaling door oxidatie van de veenbovengrond.⁸⁴ Overigens moet opgemerkt worden dat de veenlagen onder de stadsbebouwing het meest gevoelig zijn geweest voor zettingen (door ophogingen), niet voor veenoxidatie!

82. Van Laarhoven 2017, 153.

83. Stouthamer et al. 2008. Zie ook Koster et al. 2016 en Koster & Erkens 2017.

84. Zie 'Verdieping bodemdaling'.

Code	LetterCode	Grondwatertrap	Hoofdgroep	Subgroep	Indexwaarde
dVr-I	Vr	I	veengrond	vlierveengrond	1
Vc-II	Vc	II	veengrond	vlierveengrond	0,93
hVbF-II	hVb	II	veengrond	koopveengrond	0,86
hVb-II	hVb	II	veengrond	koopveengrond	0,86
ohVb-II	hVb	II	veengrond	koopveengrond	0,86
hVc-II	hVc	II	veengrond	koopveengrond	0,86
hVr-II/Vr-II	hVr	II	veengrond	koopveengrond	0,86
kVb-II	kVb	II	veengrond	waardveengrond	0,86
Vk-II	Vk	II	veengrond	vlierveengrond	0,86
hVk-II*	hVk	II*	veengrond	koopveengrond	0,6
hVr-I/Vr-I	hVr	I	veengrond	koopveengrond	0,6
dWol-II*	Wo	II*	moerige rivierkleigrond	plaseerdgrond	0,38
dWol-II*/pMo80I-II*	Wo/MO	II*	moerige rivierkleigrond	plaseerd-/nesvaaggrond	0,38/0,01
Wol-II*/pMo80I-II*/pMo80I-III*	Wo/MO	II*/III*	moerige rivierkleigrond	plaseerd-/nesvaaggrond	0,38/0,01
opVb-II	pVb	II	veengrond	weideveengrond	0,16
pVb-II	pVb	II	veengrond	weideveengrond	0,16
Rv01C-II	Rv	II	rivierkleigrond	drechtvaaggrond	0,06
pMo80I-III*	Mo	III*	zeekleigrond	tochteerdgrond	0,01
pMv81-II	Mv	II	zeekleigrond	Liedeerdgrond	0,01
Rd90A-VI	Rd	VI	rivierkleigrond	ooivaaggronden	0,01
pRn86G-V	Rn	V	rivierkleigrond	Leek-/woudeerdgrond	0,01
Rn95AG-III/Rd90A-VI	Rn	III	rivierkleigrond	poldervaaggrond	0,01
pRv81-II	Rv	II	rivierkleigrond	Kalkloze drechtvaaggronden	0,01

Tabel 1. Bodemsoorten in en direct rond Gouda volgens de Bodemkaart van Nederland 1:50.000. Indexwaarden voor kwetsbaarheid volgens Stouthamer e.a. 2008.

Hoogtekaart van de binnenstad

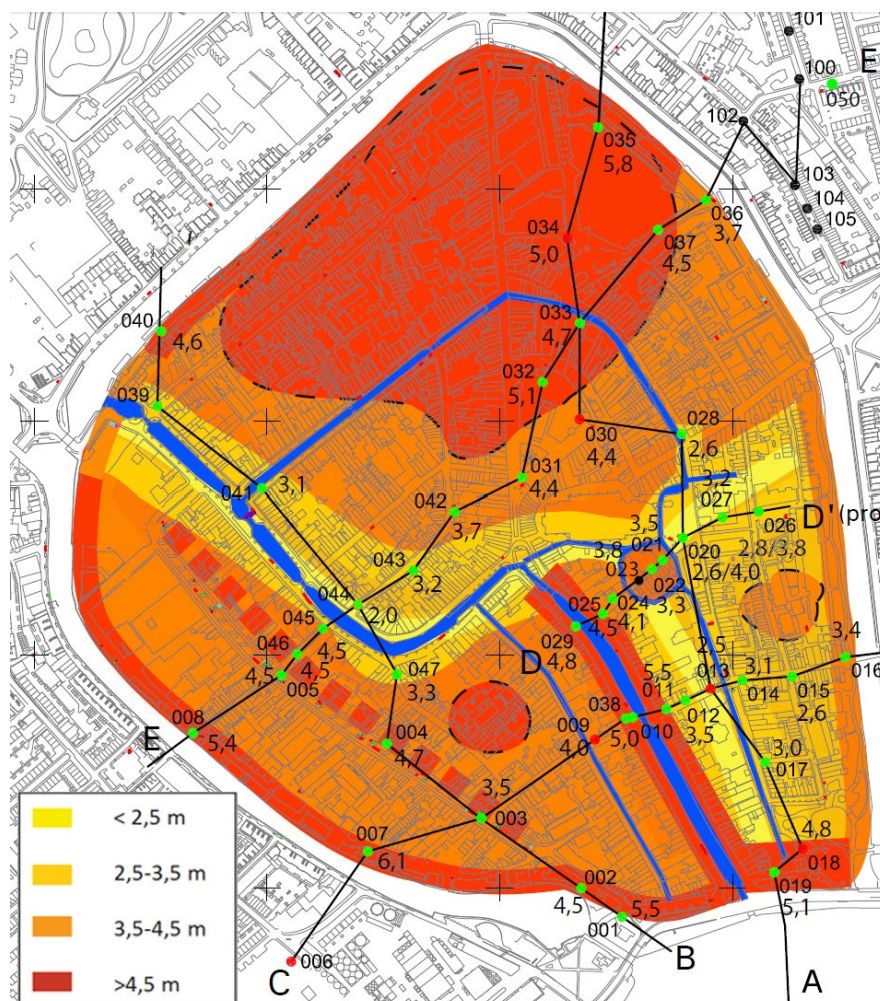
Op de hoogtekaart van de binnenstad (afb. 2.10) zijn de oevers van de Gouwe en de Oude Gouwe voor het geoefende oog als hogere delen van de stad te herkennen. Ook de verdedigingswerken langs de singels liggen nog steeds duidelijk hoger, vooral aan de Vest langs de Turfsingel. De meest opvallende hooggelegen zone op de hoogtekaart (en in de stad) is echter de Haven en de bebouwing erlangs. Op grond van de hoogteligging zijn daardoor vier delen van de binnenstad te onderscheiden: het hooggelegen centrale deel van de binnenstad gelegen op de oevers van de Hollandsche IJssel en de veenriviertjes (de oranje/rode gebieden in afb. 2.10) en drie lager gelegen delen (oranjegeel/groen) aan de randen van de binnenstad. Het hoogteverschil met de rondom de binnenstad gelegen wijken wordt voornamelijk gevormd door de ophoging van de stad sinds de late middeleeuwen.

2.3.5 Veendek, zettinggevoeligheid en ophogingen

Door ophogingen in de middeleeuwen en Nieuwe tijd en door de geologische structuur van de ondergrond zijn er grote verschillen ontstaan in de diepteligging van de oorspronkelijke natuurlijke ondergrond en de dikte van de stadsbodem (afb. 2.16). Vooral een stevigere ondergrond lijkt te resulteren in minder bodemdaling. Dat blijkt niet alleen uit 'moderne' waarnemingen van de bodemdalingen in de stad (hoofdstuk 3). Ook de



Afbeelding 2.16.
 Dikte van het archeologische pakket in de binnenstad met het boornummer (042) en de aangetroffen dikte in meter (3, 7) (uit: Van Dasselaar 2013, bijlage 6).

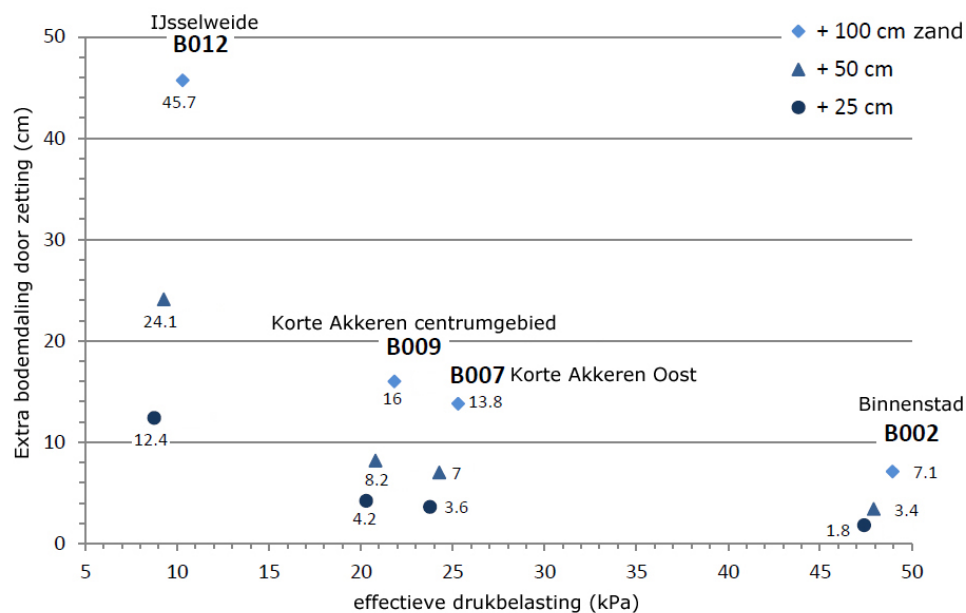


ophogingspakketten in de stad zijn gedeels in reactie op bodemdaling door zetting ontstaan en zijn op locaties met kleiruggen aanmerkelijk dunner.⁸⁵

Vanwege de Gouderak stroomrug onder het zuidoostelijke deel van de stad is het veenpakket hier bijvoorbeeld altijd dunner geweest dan het veenpakket in het noordwestelijke deel van de stad. Blijkbaar waren ophogingen in dit deel van de stad - bij vervanging van een woning en/of hergebruik van al bestaande funderingen - minder noodzakelijk. In de lagere delen van de stad, waar de bodemdaling sneller verliep, zal bij hergebruik van de oude fundering vaker sprake zijn geweest van een noodzaak tot ophogen. Vooral waar stadswallen en -muren op het veen 'staan' is een dik archeologisch pakket gevormd.

85. Van Dasselaar 2013; Van Laarhoven 2017, 49. Voor de binnenstad zijn drie datasets met boringen die inzicht geven in de verschillende ophogingspakketten in de binnenstad: Van Dasselaar 2013; de dataset opgenomen in Den Nijs 2015 en de dataset van Van Laarhoven (2017).

Afbeelding 2.17. Berekende zettingstoename van de veenondergrond als gevolg van een fictieve extra draaglast (gelijk aan een zandophoging van 25, 50 of 100 cm dik). De berekeningen zijn gebaseerd op de bodemeigenschappen van vier boorkernen B002 (binnenstad), B007 (Korte Akkeren Oost), B009 (Korte Akkeren centrumgebied) en B012 (IJsselweide/landelijk gebied) (bron: Van Laarhoven 2017, fig. 28; zie verder afb. 2.12).



Zettinggevoeligheid van de binnenstad, Korte Akkeren en de IJsselweide

Uit het pilotonderzoek van de Universiteit Utrecht/Deltares is gebleken dat zelfs bij de laagste grondwaterstanden (in de droge perioden) de top van het veenpakket in de binnenstad en de wijk Korte Akkeren nog altijd 0,65 m lager ligt dan de grondwaterspiegel.⁸⁶ Het veenpakket staat in deze twee stadsdelen dus altijd onder water en veenoxidatie speelt geen rol in het proces van bodemdaling.⁸⁷ Van de waargenomen zakkings tussen 2013 en 2016 (§ 3.2 en afb. 3.4) wordt meer dan 94% veroorzaakt door zetting als gevolg van het door ophogingen, gebouwen en infrastructuur toegevoegd gewicht op de veenbodem.⁸⁸ Uit de bodemsamenstelling van bestudeerde veenprofielen in de binnenstad, Korte Akkeren en de IJsselweide blijkt dat de mate waarin het veen reeds is samengeperst (de consolidatie) zowel tussen de gebieden als in de diepte sterk verschilt. De gemiddelde consolidatie van het veen in de binnenstad bedraagt bijna 60%; in de wijk Korte Akkeren tussen de 45% en 48% en in het landelijk gebied van de IJsselweide iets meer dan 28%.⁸⁹ De berekende schattingen voor de resterende zakking (door zetting van veenlagen) die de twee gebieden buiten de binnenstad nog kunnen doormaken⁹⁰ bedraagt ongeveer 3,5 m in de IJsselweide en 1,2 tot 0,9 m in Korte Akkeren.

In afbeelding 2.17 wordt weergegeven wat het zettingseffect in de drie gebieden zal zijn wanneer er een fictieve extra grondbelasting wordt aangebracht.⁹¹ Hieruit is af te leiden dat door de sterke mate van compactie van het veen een extra belasting in de binnenstad veel minder effect zal hebben dan in de jongere woonwijken en in het onbebouwd buitengebied, beide gelegen in de polders of in voormalige veenweidegebieden.

86. Van Laarhoven 2017, fig. 24.

87. Ibid.

88. Ibid., 44.

89. Ibid., 45.

90. Als ze net zo zwaar worden belast als de huidige veenbodem onder de binnenstad, het zijn dus relatieve cijfers.

91. Van Laarhoven 2017, 47.

2.4 Welke funderingen dragen de stad?

2.4.1 Voorspellingsmodellen voor funderingen

Een van de doelen van het onderzoek is om een gebiedsspecifieke, en waar mogelijk zelfs pandspecifieke, inschatting te kunnen maken van de aanwezige funderingen en de diepten van die funderingen in de stad.⁹² Welke funderingstypen zijn specifiek in Gouda gebruikt en waar? Waar in de stad zijn houten paalfunderingen of houten roosterfunderingen in de bodem aanwezig? Hoe diep en kunnen die droog komen te staan? Welke panden in de stad staan níet op een paalfundering en zakken met het maaiveld mee? Samen met ondergrondgegevens en zettingswaarnemingen (§ 3.2) kunnen aan de hand van deze gegevens mogelijke probleemgebieden beter worden geïdentificeerd.

Om zo'n voorspellingsmodel voor bestaande funderingen waar te kunnen maken is - naast het onderzoek naar de morfogenese van Gouda (§ 2.2) en de bodemgesteldheid van de stad (§ 2.3) ook een (beperkt) literatuuronderzoek naar funderingstechnieken door de tijd heen gedaan.⁹³ Met betrekking tot de funderingstechnieken in Gouda zijn historische keuren en bouwverordeningen bestudeerd, in samenhang met de resultaten van eerder uitgevoerd bouwhistorisch- en archeologisch onderzoek. De verzamelde gegevens en interpretaties zijn besproken met Goudse ervaringsdeskundigen en een expert van de TU Delft.⁹⁴

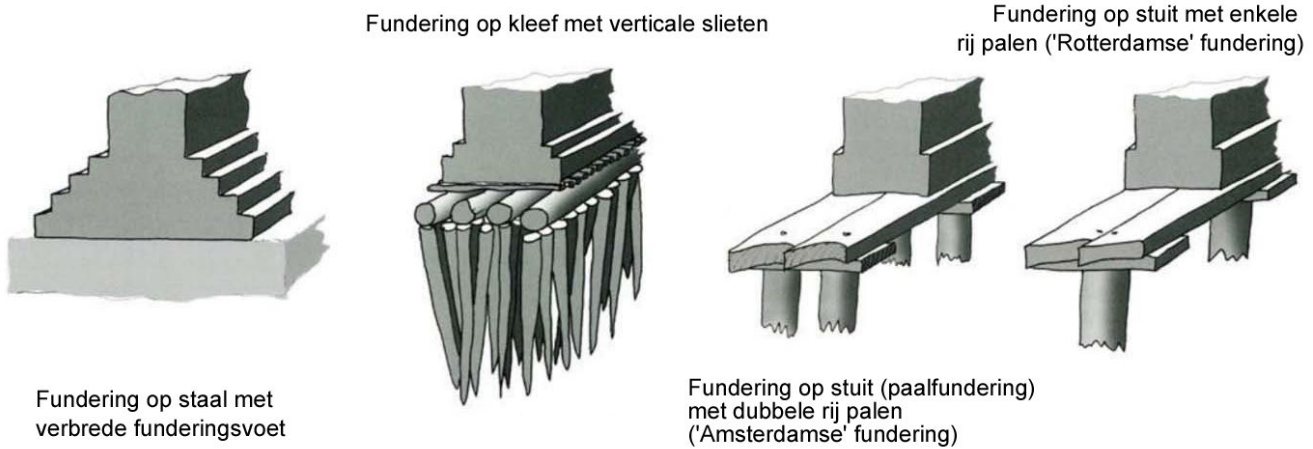
2.4.2 Bronnen over stadsbebouwing en funderinggebruik

Middeleeuwse bronnen

In 1992 werd door René Bollen de ontwikkeling van het Goudse woonhuis in de late middeleeuwen beschreven.⁹⁶ Deze studie werd in 1994 aangevuld door Bianca van den Berg en Ruud Meischke.⁹⁷ Door hen werd opgemerkt dat er in de binnenstad tot dan toe weinig panden daadwerkelijk archeologisch of bouwhistorisch onderzocht waren. Wel vermeldden ze enkele zeldzame stadskeuren, die als 'bouwvoorschriften' kunnen worden gelezen en meestal gericht waren op de brandveiligheid.⁹⁸ Zo werden hierin regels opgelegd voor rieten daken, stenen voorgevels, gezamenlijke bouwmuren en de lengte van verplichte brandladders. In geen van de keuren staan specifieke eisen met betrekking tot funderingen, maar het bestaan van doorlopende stenen zijmuren betekent dat de funderingen tenminste ook van bepaalde afmetingen moesten zijn, om de zwaardere stenen huizen te dragen. Een belangrijke andere middeleeuwse bron over de stadsbebouwing is het hofstedegeldregister van 1397, een belastingregister. Hieruit kan, in principe, de bebouwing van de stad aan het einde van de 14e eeuw worden gereconstrueerd.⁹⁹

92. Coalitie 'Stevige stad op slappe Bodem' 2015.
93. Gemeente Gouda 2015; Van Winsen et al. 2015.
94. prof. ir. A. F. van Tol, hoogleraar Funderingstechniek aan de TU Delft.
96. Bollen 1992.
97. Meischke & Van den Berg 1994.
98. Stadkeuren op 'bouwen' of 'funderen', zoals die in Amsterdam vanaf de zeventiende eeuw werden uitgevaardigd, zijn er in Gouda nauwelijks geweest.
99. Goudriaan, Ibelings & Visser 2000.





Afbeelding 2.18.
Funderingstechnieken (uit:
Verschure 2012).

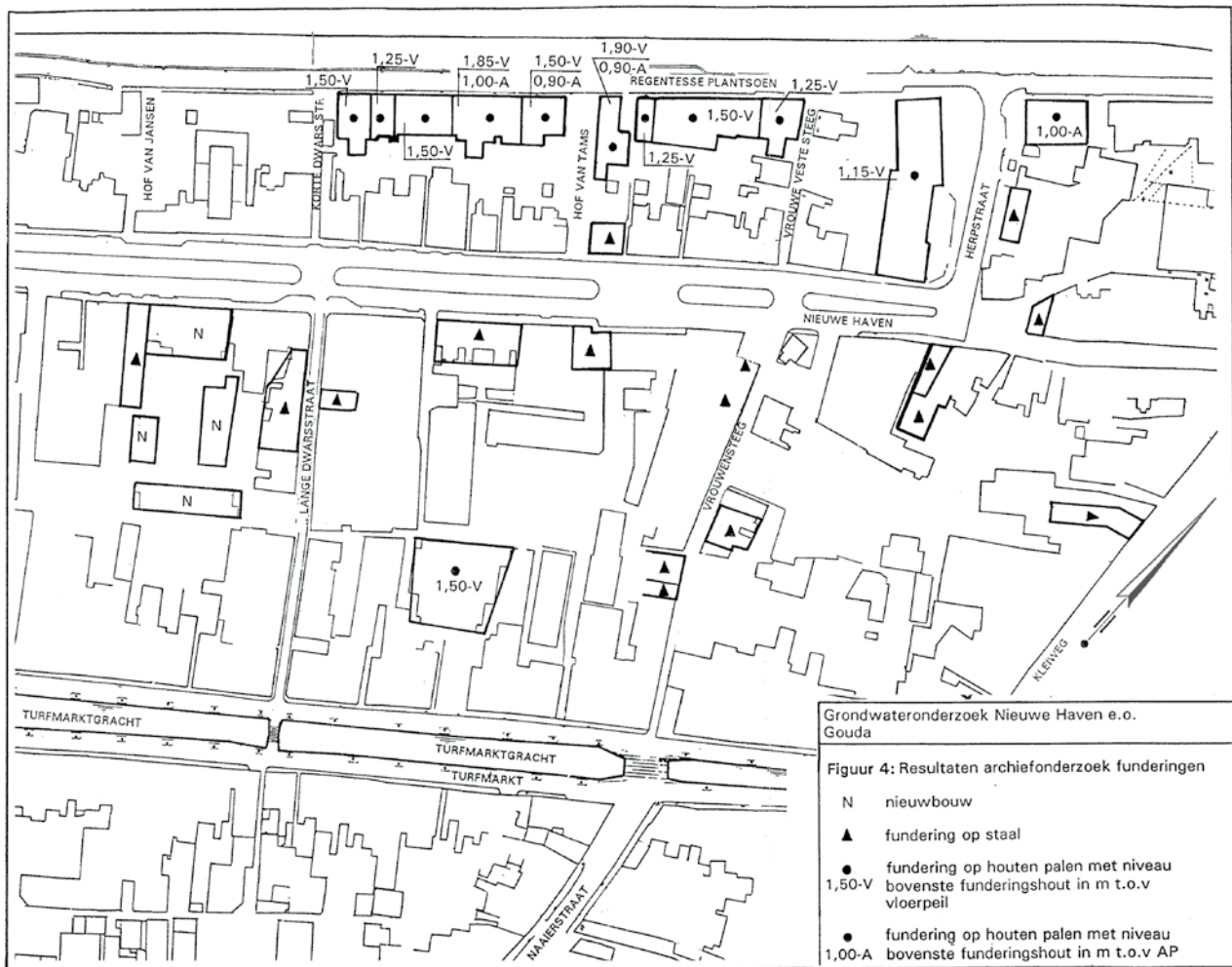
Funderingstypen

De fundering van een gebouw of constructie zorgt ervoor dat het gewicht wordt overgedragen op een draagkrachtige ondergrond. In hoofdlijnen zijn er drie funderingstypen die alle drie in Gouda zijn aangetroffen: op staal, op kleef of op stuit (afb. 2.18).⁹⁵ Funderingen 'op staal' maken gebruik van liggende houtconstructies (zoals roosterfunderingen), staan op elkaar (bouwen voort op eerdere constructies) of staan 'koud' op de grond. De oudste huizen in Gouda kennen geen fundering en staan op een laag zand. Funderingen 'op kleef' maken gebruik van ingeheide houtconstructies, korte slieten (allemaal kleine houten paaltjes) of heipalen tot ongeveer 5 m lang. De wrijving langs de paalschacht en/of de puntweerstand ('kleef') zorgen dan voor de draagkracht. Veen heeft een hogere 'kleefwaarde' dan klei (of zand) en deze vorm van funderen werd in Gouda vanaf het einde van de vijftiende eeuw gebruikt voor bijvoorbeeld zware kloostergebouwen vaak in combinatie met een vorm van roosterfundering ('slietenfundering'). Funderingen 'op stuit' staan op heipalen die lang genoeg zijn om de vaste zandlaag onder het veen (in Gouda op ongeveer 10 tot 13 m - NAP) te bereiken. Deze waren eerst van hout, vervolgens van beton en ijzer. Om de afstand tussen de houten paalkop in het grondwater en de fundering van de constructie te overbruggen zette men later op de houten paalkop een korte gewapende betonpaal, de oplanger.

Stadsrekeningen

In de middeleeuwse stadsrekeningen van Gouda wordt regelmatig melding gemaakt van de term 'heien'. De vroegste vermelding dateert uit 1477 maar over de lengte van de geheide palen staat in de stadsrekeningen niets vermeld. Verder werden de rekeningen van de 'bijzondere bouwprojecten', die in opdracht van de stad zijn gebouwd, opgenomen in de stadsrekeningen, of in afzonderlijke rekeningen van de gemeentelijke bouwfunctionarissen. Zo was er al in 1415 een stadstimmermeester die de bouwprojecten voor de stad uitvoerde en ook zorgde voor het onderhoud van de stedelijke eigendommen.

95. Verschure 2012.



Afbeelding 2.19. Resultaten van het archiefonderzoek naar funderingen ten behoeve van het grondwateronderzoek in het projectgebied 'Nieuwe haven en omstreken' 1993 (uit: Den Nijs 2015).

Vanaf het midden van de zestiende eeuw worden de 'bouwuitgaven' van de stad ook apart bijgehouden in de rekeningen van de 'Fabricagemeesters', een stadsraad waarin ook de stadsbouwmeester en de zogenaamde 'rooimeesters' deel uitmaakten. In 1815 werden de Fabricagemeesters opgevolgd door de 'Dienst Openbare Werken'.

Verordeningen en voorschriften

Een eerste beeld van de bouwregels in Gouda krijgen we pas vanaf het begin van de negentiende eeuw wanneer er in 1826, 1843, 1879 (en later in 1901, 1929 en 1968) bouwverordeningen worden vastgesteld. De verordening van 1826 lijkt nog het meeste op de middeleeuwse stadskeuren zoals die in Amsterdam werden verleend, maar bevat geen bepalingen over funderingen van de huizen. In 1843 worden meer regels gesteld aan het bouwen van een nieuwe woning. Zo wordt bepaald dat 'de muren moeten worden aangelegd minstens twee (hand)palmen (ongeveer 20 cm) beneden den begane buitengrond, tot ten minste zes palmen (ongeveer 60 cm) daarboven'. Pas

in 1879 worden meerdere voorschriften gegeven aan 'de wijze van bouwen' zoals een verplicht bouwpeil, een vermelding van funderingstypen, eisen aan breedte van de fundering bij verschillende ondergronden, en eisen aan funderingshout en de verplichte diepte.

Eerder geotechnisch onderzoek

Omstreeks 1995 werd voor het project 'vernieuwing riolering Nieuwe Haven Gouda' door Wareco archiefonderzoek gedaan naar de bebouwingsgeschiedenis en bodem in het gebied tussen het Regentesseplantsoen, de Nieuwe Haven en de Turfmarktsgracht (afb. 2.19).¹⁰⁰ Er bleek toentertijd zowel over de bebouwing langs de Nieuwe Haven, als over de bodemopbouw weinig informatie beschikbaar te zijn. Door middel van grondboringen en peilbuizen werden aanvullende gegevens verzameld. Steekproefsgewijs werden op enkele plaatsen funderingsinspecties uitgevoerd omdat het praktisch en financieel niet mogelijk was om de funderingen - en daarmee het risicoprofiel van de bebouwing in dit gebied - volledig te onderzoeken. De funderingsinspecties waren gericht op het bepalen van het funderingstype (op staal of houten palen), niet op de kwaliteit van de houten palen. Wel is bij alle panden een gevelschouw uitgevoerd en zijn de hoogten van de onderdorpels (van de deuren) van alle panden ingemeten.

2.4.3 Funderingsgeschiedenis van Gouda

Funderen tot en met de achttiende eeuw

Uit de verzamelde gegevens blijkt dat de toegepaste funderingen in Gouda - voor wat betreft de periode tot en met de zeventiende eeuw - overeen komen met hetgeen uit de literatuur over de bouwwijzen in steden in Nederland bekend is.¹⁰¹ Tot in de zeventiende eeuw werd voornamelijk een fundering op liggend hout ('op staal') toegepast.¹⁰² Deze conclusie wordt gestaafd door (vooral) archeologische opgravingsresultaten. Het algemene beeld lijkt hiermee het meest op Dordrecht, waar de funderingswijzen van woonhuizen ook bestaan uit liggende en geen staande constructies.¹⁰³ Ook blijkt vaak sprake van ophogingsfunderingen: funderingen die op oudere funderingen staan en die soms zeer diep liggen.¹⁰⁴ Van het type 'houten huis op kleef' is in de Goudse binnenstad evenwel óók een voorbeeld bekend, namelijk een op houten palen gebouwd veertiende eeuws houten woonhuis aan de Oosthaven 8.¹⁰⁵

Voor de grote gebouwen werden als eerste op kleef gebouwd, vooral de kloostergebouwen van bijvoorbeeld het Clarissenklooster en het klooster Sint Marie. Op het Bolwerk gebeurde dit vanaf het einde van de vijftiende eeuw. Funderen op kleef of stuit, zoals in Amsterdam na de zeventiende eeuw gebruikelijk werd¹⁰⁶, was een uitzondering. De oudste funderingen 'op stuit' (staand op een dragende ondergrond) die archeologisch zijn aangetroffen, dateren mogelijk uit de zeventiende eeuw (Hofje van Bosch 1649). Uit (bouw)historische bronnen weten we dat ook grote gebouwen

100. Onderzoek door Wareco, opnieuw gerapporteerd in Den Nijs 2015.

101. Zie overzicht in Verschure 2012.

102. Dordrecht: Sarfartij 2006, 2007; Amsterdam: Gawronski & Veerkamp 2003; Alkmaar: Aten et al. 2007.

103. Sarfartij 2006, 123.

104. Van Winsen et al. 2015, 54.

105. Ibid., 52.

106. Gawronski & Veerkamp 2003.



als de Waag (1668) en 'Arti Legi' (1854) op stuit staan. Verder wordt het gebruik van heipalen in middeleeuwse rekeningen vermeld zoals bij de bouw van het kasteel van Gouda en in de Goudse stadsrekeningen in de vijftiende en zestiende eeuw. Het gaat dan vooral om het heien van slieten in roosterfunderingen, niet het heien op stuit.

Funderingstechniek in Gouda

Het algemene beeld van de funderingstechniek in Gouda komt meer overeen met het beeld in Dordrecht (liggende funderingen, op staal) dan met het beeld in Amsterdam (vanaf de zeventiende eeuw op stuit).¹⁰⁷ De fundering op een puinlaag (puin van dakpannen/ daktegels) zoals in Gouda aangetroffen bij de opgraving Raam 9-23¹⁰⁸ is in beide steden minder bekend. 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.¹⁰⁹

Negentiende eeuw

Uitgaande van de bestudeerde bronnen is niet nauwkeurig te bepalen welke typen funderingen in de achttiende eeuw tot en met de late negentiende eeuw toegepast zijn. In 1828 werd weliswaar de eerste Goudse bouwverordening vastgesteld, maar deze stelde geen eisen aan funderingen. De funderingsoplossingen uit de voorgaande eeuwen zullen in deze periode vermoedelijk doorgezet zijn. Funderen op staal was (en is) de meest goedkope en praktische methode en het is dus zeer aannemelijk dat kleine panden nog steeds op deze wijze gefundeerd werden. Daarbij werd overigens vaak voortgebouwd op reeds bestaande funderingen. Alleen de grotere gebouwen zijn waarschijnlijk met houten palen op kleef of stuit gefundeerd. Ook voor de periode 1879-1902 en voor de periode 1903-1927 is niet exact te bepalen welke typen funderingen toegepast zijn. Kleine panden in de binnenstad blijken in geval van vervanging overeenkomstig de voorgaande eeuwen op staal of op oudere funderingen gebouwd te zijn.¹¹⁰ De complexiteit om op de kleine bouwlocaties in de binnenstad gebruik te maken van een heistelling zal hierbij een rol gespeeld hebben. De grotere gebouwen met ruimere bouwlocaties in de binnenstad zijn in deze periode waarschijnlijk wél met houten palen op kleef of stuit gefundeerd. De oudst bekende woonhuizen met een fundering op stuit zijn de huizen van Regentesseplantsoen 11-17 uit 1909 (zie afb. 2.19).

107. Sarfartij 2006, 2007; Gawronski, J. & J. Veerkamp 2003.

108. Archeologische dienst Gouda project ADG9907.

109. Zoals gevonden bij de opgravingen aan de Keizerstraat 69/71 en bij het voormalige Cellebroedersklooster.

110. Vaak bestaan ze uit gemetselde funderingen op staal al dan niet gebruik makend van zandaanplempingen of roosterwerken.



Bouwverordening van 1879

In het jaar 1879 stelt de Goudse Bouwverordening het indienen van onder andere funderingstekeningen verplicht. Ook staat in deze verordening de diepte van het funderingspeil genoemd waaronder de houten delen van de fundering (het vloerhout, roosterwerk en de paalkoppen) zich moeten bevinden. Uit interviews met funderingsdeskundigen blijkt dat men veiligheidshalve vaak ruimere marges aanhield voor de diepte van de funderingen onder het grondwaterpeil dan voorgeschreven. Dat het niet in alle gevallen zo werkte blijkt uit een deel van de bezwaarschriften tegen peilverlagingen van de polders in Schieland. Deze waren afkomstig van mensen waarvan de huizen paalkoppen hadden die tot wel 23 centimeter hoger lagen dan de bouwtekening aangaf.¹¹¹ Klaarblijkelijk werd ten tijde van de bouw lang niet altijd zorgvuldig met de voorschriften over de diepteligging van de paalkoppen omgesprongen. Voor de binnenstad worden in deze bouwverordening overigens geen verplichtingen opgelegd over het type van de houten fundering. Dit kan dus zowel een paalfundering zijn als een fundering van liggend hout. In de bouwverordening van 1879 wordt zelfs nog gesproken van 'roosterwerken'.

Twintigste eeuw

In 1903 wordt in de wijziging van de bouwverordening de diepte van het funderingspeil in de binnenstad naar boven toe bijgesteld (waarschijnlijk als gevolg van de voortgaande zetting) tot 100 cm - NAP en in 1929 tot 80 cm - NAP waarbij tevens verordonneerd wordt dat het peil van de fundering 20 cm 'onder het (langdurig) te verwachten grondwaterpeil' dient te liggen. In 1950 werd de diepteligging verlaagd naar 1,05 m - NAP, 33 centimeter onder het peil van de Stadsboezem uit 1943 (0,72 m - 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. Eenzelfde verschil in benadering tussen binnen- en buitenstad is ook te vinden in de bouwverordening van 1928 en tot aan 1968 zou dit zo blijven. Met de opkomst van nieuwe funderingstechnieken zullen tussen 1903 en 1927 steeds meer panden op een houten paalfundering gebouwd zijn. Ook kan rond 1915 gestart zijn met het toepassen van betonnen funderingsbalkenroosters in combinatie met palen. Waar dat plaatsvond en op welke schaal is moeilijk te achterhalen. Duidelijk is wel dat deze techniek op dat moment in de binnenstad toegepast is en dat men lang met deze bouwmethode doorging. Deze techniek van betonnen roosterwerken op houten palen werd nog in 1962 toegepast, onder andere bij de bouw van de Kleiwegbrug.

Ook voor de periode 1928-1948 is niet exact te benoemen welke typen funderingen zijn toegepast. Vermoedelijk werden de kleine panden met krappe bouwplaatsen nog steeds op staal gefundeerd, maar de grotere gebouwen met grotere bouwplaatsen zullen met grote waarschijnlijkheid op

111. HHR van Schieland en de Krimpenerwaard, archief HHR Schieland 1954-1995, inventarisnummer 2528.



stuit (houten palen) gefundeerd zijn. In veel gevallen is hierbij waarschijnlijk gebruik gemaakt van een betonnen funderingsbalkenrooster.

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 (zie kadertekst). Een van de respondenten in Gouda herinnerde zich voor de periode na de Tweede Wereldoorlog op een enkele uitzondering na geen gebouw dat nog op staal gefundeerd werd. De meeste gebouwen buiten de binnenstad werden na 1975 gebouwd op een geheel betonnen paalfundering, maar bekend is dat tot in de jaren negentig van de vorige eeuw ook nog gebruik is gemaakt van houten palen met oplangers.

Het inheien van houten (of betonnen) palen in de binnenstad vroeg tot ver in de jaren tachtig van de vorige eeuw om een ruime bouwplaats. Was deze niet aanwezig dan maakte men gebruik van stalen paaltjes. Pas in de jaren negentig van de vorige eeuw werd het voor krappe bouwlocaties mogelijk betonpalen te slaan. Bij een aantal monumentale panden in de binnenstad is een funderingsverbetering doorgevoerd met stalen palen of paalkopverlaging.

2.4.4 Funderingsperiodiseringskaart

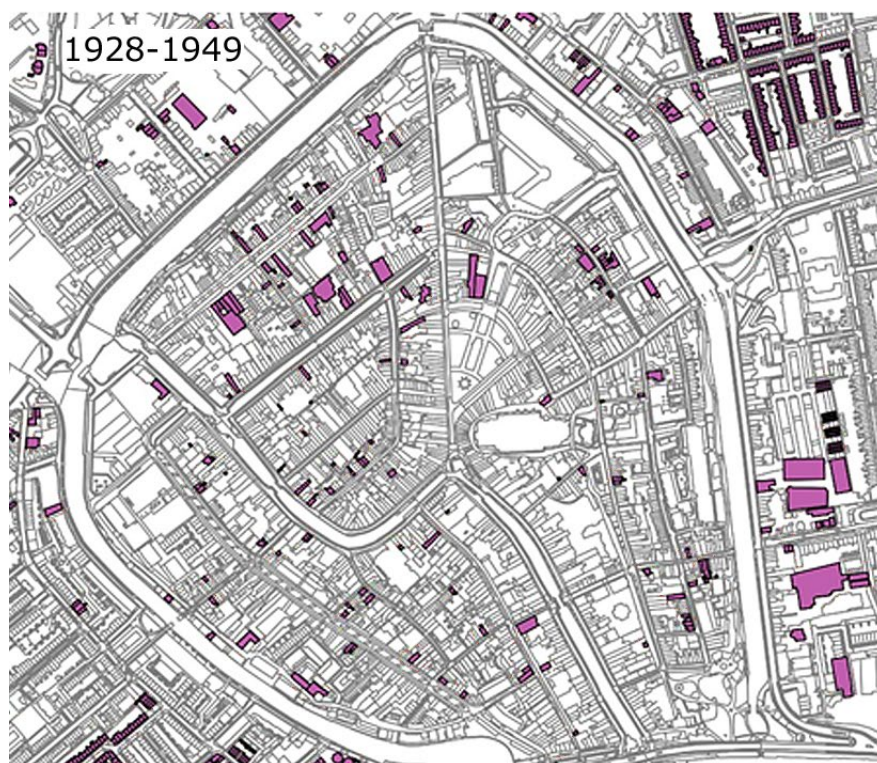
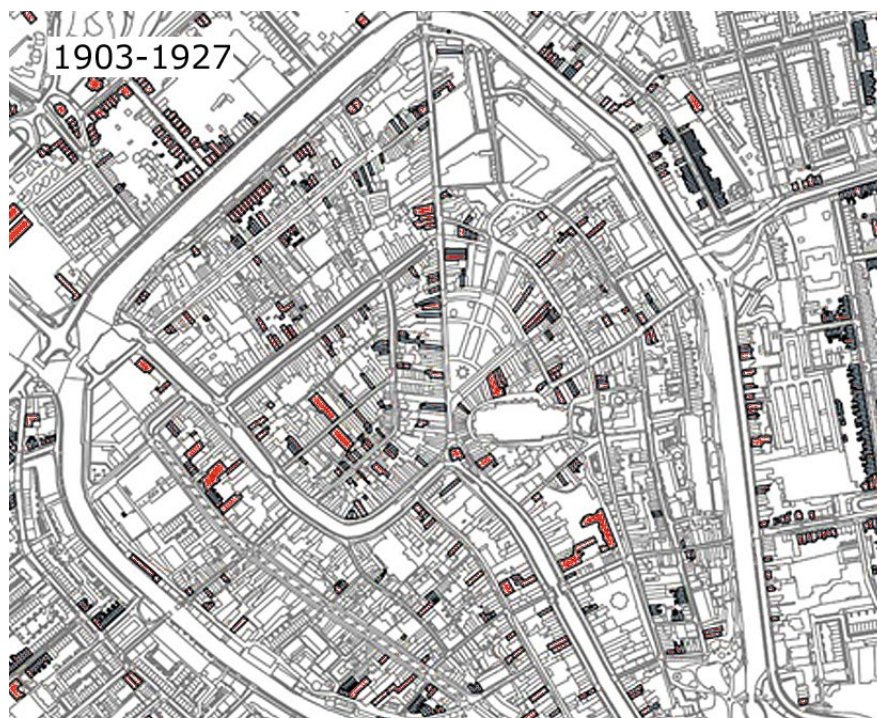
Het onderzoek naar de geschiedenis van de stadsbebouwing en haar funderingen heeft in 2015 geresulteerd in een funderingsperiodiseringskaart van de oostelijke 20% van de binnenstad (afb. 2.11). In deze kaart is de informatie over de toegepaste funderingsdiepten gekoppeld aan de bouwjaren van individuele panden op basis van de aangescherpte BAG (§ 2.2.2).¹¹² De funderingsperiodiseringskaart is van belang voor het bepalen van de locaties waar in eerste instantie problemen verwacht kunnen worden bij grondwaterstandverlaging. We weten immers dat - indien een juiste uitvoering plaatsgevonden heeft binnen de eisen van de bouwverordening c.q. de veilige marges na 1950 - dat globaal uitgegaan kan worden van de volgende gegevens met betrekking tot de diepteligging van de top van het funderingshout:

- vóór 1828: diepteligging niet bekend, veelvuldige toepassing van fundering op staal
- 1828 - 1878: diepteligging niet bekend, vermoedelijk veelvuldige toepassing van funderingen op staal
- 1879 - 1902: diepteligging op 1,1 m - NAP
- 1903 - 1927: diepteligging op 1,0 m - NAP
- 1928 - 1949: diepteligging op 0,8 m - NAP
- 1950 - heden: diepteligging op 1,05 m - NAP

112. Van Winsen et al. 2015; Van Velzen & Van Winsen 2016; Groenendijk 2017b.



Afbeelding 2.20.
Panden in de binnenstad
uit de periode 1903-1927
en 1928-1949 volgens de
gecorrigeerde BAG (uit: Van
Velzen & Van Winsen 2016).



De funderingsperiodiseringskaart toont aan dat er in de binnenstad een groot aantal panden uit de periode vóór 1828 (voor de eerste bouwverordening) voorkomt. Het lijkt aannemelijk dat de meeste van deze stadspanden op houten roosterfunderingen rusten of op oudere 'op staal' funderingen. Voor wat betreft de panden uit de funderingsperiode tussen 1828 en 1879 geldt dat detailuitspraken over de funderingswijze (op staal, kleef, stuit) vooral voor de kleinere panden niet goed mogelijk is, anders dan op basis van nader bouwhistorisch onderzoek of door middel van funderingsinspecties. Een verdere kanttekening is dat de onderscheiden funderingstypen en de periodisering van de funderingstechnieken specifiek gerelateerd zijn aan woonhuizen. Bijzondere, grote gebouwen hadden een eigen, op maat gemaakte manier van funderen die per gebouw anders kan zijn. Deze gebouwen zijn mogelijk (nog) niet in het kaartbeeld zichtbaar.

Tijdens het aanvullende onderzoek in 2016 zijn van alle panden in de binnenstad de BAG-bouwjaaren gecontroleerd en waar nodig aangepast (§ 2.2.2).¹¹³ Voor de periodes waarin houten palen werden toegepast, dat wil zeggen de funderingsperiodes 1903-1927 en 1928-1949 van Winsen et al. (2015), kunnen uit de bijhorende kaarten (afb. 2.20) het aantal panden worden geteld met (in potentie) houten heipalen. Het betreft dan grofweg 320 panden gebouwd tussen 1903 en 1927 en ongeveer 127 panden gebouwd tussen 1928 en 1950. In totaal zijn er dus ongeveer 447 panden in de binnenstad die op houten palen zouden kunnen staan. Een klein deel daarvan betreft schuurtjes of bergingen, maar het overgrote deel betreft woonhuizen. Wanneer dat wordt uitgesplitst naar de vier 'deelgebieden' in de binnenstad (§ 2.3.4) dan blijkt dat er in de laaggelegen delen van de Goudse binnenstad grofweg 300 panden met houten heipalen kunnen staan, en in het hoge gedeelte van de binnenstad ongeveer 150.¹¹⁴

2.5 Wat heeft het onderzoek naar het verleden van Gouda ons geleerd?

2.5.1 Stadsoudergrond en zetting

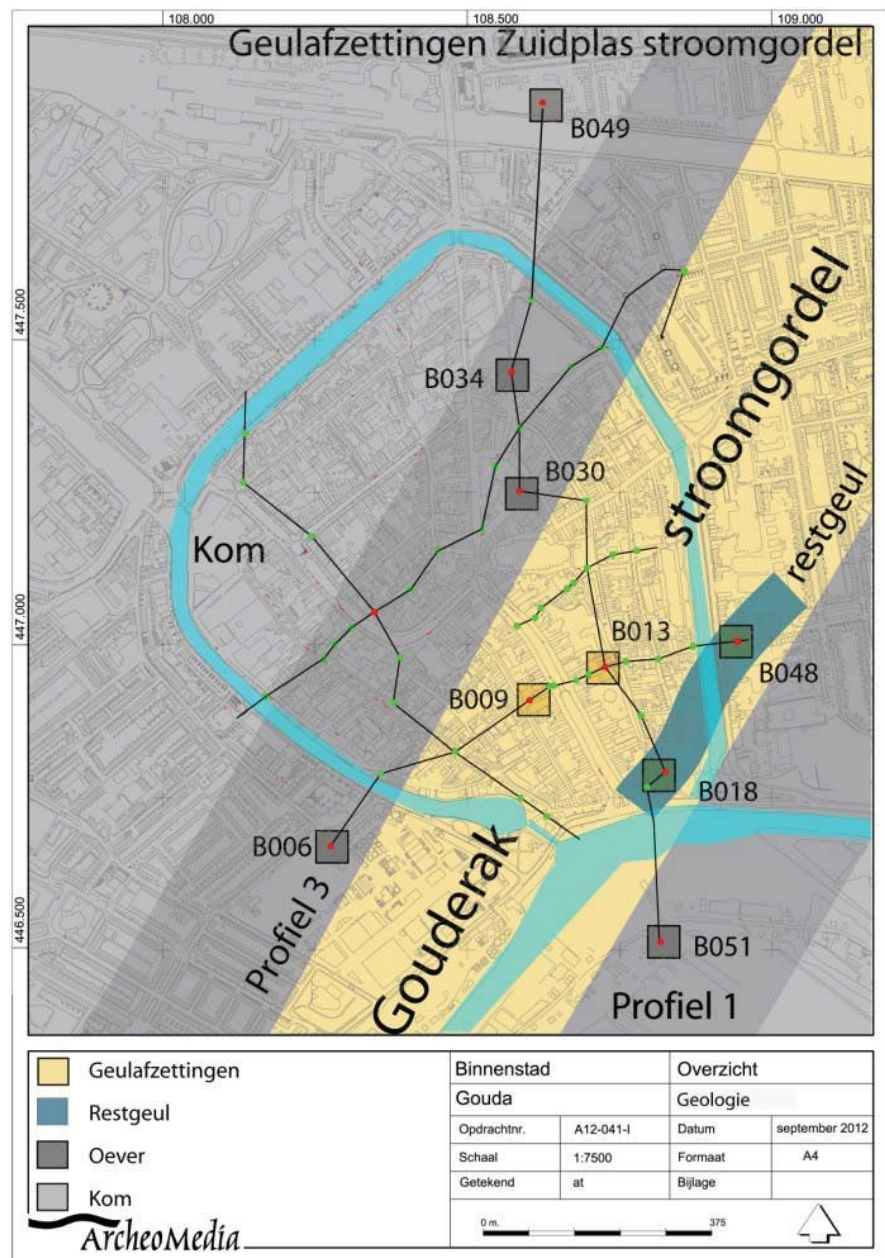
Uit de geologische informatie blijkt dat er onder de stad duidelijk verschillende ondergronden voorkomen die niet alleen de stadsontwikkeling hebben bepaald, maar ook van invloed zijn geweest op bodemdalingen en het funderinggebruik. Er is namelijk niet overal sprake van een even slappe bodem. Ten eerste is er een verschil tussen het noordwestelijk en zuidoostelijke deel van de stad. Dit wordt veroorzaakt door een brede rivierafzetting die hier onder het veen voorkomt en die een stevigere basis vormt (afb. 2.21). Daarnaast veroorzaken de smalle kleigeulen van de Gouwe, de Oude Gouwe en de Hollandsche IJssel door de inklinking van het veen markante kleiruggen in de stad waardoor er een verschil in veendikte is ontstaan met het veengebied daaromheen. Globaal zijn er hierdoor in de

113. Peters 2017; Groenendijk 2017b.

114. Groenendijk 2017b, 6.



Afbeelding 2.21.
 Verbreiding van het
 beddingzand en de
 kleioevers van de Gouderak
 stroomgordel volgens Van
 Winsen et al. 2015.



binnenstad vier gebieden te onderscheiden; een hoog gelegen deel centraal langs de Gouwe, de Oude Gouwe en het front van de Hollandsche IJssel, en drie laaggelegen delen langs de randen van de binnenstad (afb. 2.10). De meest dragende afzetting is echter de top van de pleistocene zand- en grindlagen die op ongeveer 9 tot 11 meter onder de stad beginnen en die tegenwoordig wordt opgezocht om de heipalen op te verankeren.

Zetting in het verleden

Er is dus niet overal sprake van een even slappe bodem. Bekijken we de

geologische structuur van de binnenstad en de wijze waarop de mens hiermee is omgegaan, dan kunnen we constateren dat de stevigere kleiondergrond met weinig veen in het hoge deel (afb. 2.10) heeft geresulteerd in minder bodemdaling. Het archeologische ophogingspakket is hier ook het minst dik (afb. 2.16). Bij vervanging van een woning en hergebruik van de reeds bestaande fundering is een ophoging blijkbaar minder noodzakelijk geweest. Delen met een dik veenpakket buiten de voormalige rivierlopen zijn altijd het gevoeligst geweest voor maaiveldzakkingen door ontginning en bemaling, waardoor hier meer opgehoogd moest worden. Veelal zal hier onder de bebouwing sprake zijn van 'opgehoogde' funderingen op staal en hier komen dan ook de dikste 'stadslagen' voor. Ook tegenwoordig zijn in de stadsdelen met een dikker veenpakket in de ondergrond meer onderhoud- en herstelwerkzaamheden noodzakelijk, zoals in de uitbreiding van de polder Bloemendaal. Door de drassige veenbodem zijn de kosten van de infrastructuur hier aanzienlijk hoger dan elders in de stad.

2.5.2 Funderingen onder de stad

Veel van de oudste bewoningssporen in de binnenstad zijn vermoedelijk ernstig beschadigd of verdwenen en van de vroegste funderingen resteren slechts enkele archeologisch resten.¹¹⁵ Vooral uit de late middeleeuwen zijn meer gebouwen en funderingen bewaard gebleven en onderzocht. Vanaf de zestiende eeuw volgen verschillende funderingstechnieken elkaar in de tijd op of worden door elkaar heen toegepast, deels als gevolg van verandering in de toegepaste bouwmethoden, deels als gevolg van vooruitgang van de funderingstechniek.

In algemene zin kan gesteld worden dat vanaf de periode van de middeleeuwen tot aan globaal het midden van de negentiende eeuw voor kleinere panden vooral gebruik gemaakt is van funderingen 'op staal', dat wil zeggen op een of andere horizontale constructie direct op de zakkende ondergrond of door voort te bouwen op eerdere funderingen. Om eerdere maaiveldzakkingen te compenseren werden de bouwlocaties opgehoogd en aangevuld, ongeacht de locatie in de stad. De funderingen vertellen voor wat betreft de ruimtelijke ontwikkeling van de stad in deze lange periode dus een eensluidend verhaal. Deze onderscheiden funderingstypen en periodisering zijn specifiek gerelateerd aan woonhuizen. Bijzondere, grote gebouwen hadden een eigen manier van funderen die per gebouw kan verschillen.

Binnen het hoogste deel van de binnenstad bevinden zich de oudste gebouwen met veelal houten roosterfunderingen. Vanaf de veertiende eeuw werd er ook al in de lagere delen van de stad gebouwd. Ook hier werden de panden op staal gezet. Uit enkele sporadische voorbeelden blijkt echter dat het heien van palen al vanaf de veertiende eeuw plaatsvond. Vooral bij

115. Voor zover bekend natuurlijk.



de grotere objecten (kloostergebouwen, kerken, stadsmuren) werd gebruik gemaakt van een slietenfundering 'op kleeft' voor zover dit vanuit constructief oogpunt nodig was. Het stadsbestuur of de stad had lange tijd geen regels voor het funderen van de stadsbebouwing: middeleeuwse stadskeuren die het funderen in Gouda reguleerden zijn niet aangetroffen. Pas in de tweede bouwverordening van 1879 wordt voor de eerste keer een eis gesteld aan de minimale diepte van funderingshout, namelijk 1,1 m - NAP. Ook werd in 1879 voor de eerste keer - naast het benoemen van funderingen op staal - gesproken van paalfunderingen. In de bouwverordeningen van later datum wordt stapsgewijs het funderingspeil verhoogd naar 1,0 m - NAP in 1903 en 0,8 m - NAP in 1929.

Stadsbodem en funderinggebruik

De geologische structuur van de binnenstad en het archeologisch ophogingspakket hebben vermoedelijk ook invloed gehad op de toegepaste funderingen, zeker na de introductie van de funderingseisen in de bouwverordeningen van ná 1878. Het plaatsen van een nieuwe houten (paal)fundering was in het hoger gelegen deel van de stad niet aantrekkelijk. Door de hoogteligging van het maaiveld (plaatselijk 2 m NAP) en het geldende funderingspeil van maximaal 1,1 m - NAP moesten de houten palen zeer diep worden geslagen of het funderingshout zeer laag worden aangebracht. Voortbouwen op de bestaande fundering of een alternatieve oplossing (op staal, een diepe kelder meebouwen, zeer lange betonnen oplangers) lag meer voor de hand, zeker ook omdat de ruimte voor een heistelling vaak beperkt was. In de lagere delen van de stad lag na 1879 de toepassing van een nieuwe houten paalfundering bij vervangingsbouw of bij nieuwbouw op grotere lege locaties meer voor de hand.

In beide gevallen moet hierbij de aantekening gemaakt worden dat heien bij een ruime bouwlocatie tot in de tweede helft van de jaren '80 van de twintigste eeuw meer voor de hand lag dan bij vervanging van een enkel pand in een doorgaande rij. Daar zal vermoedelijk hergebruik van de oude fundering - zolang de verordeningen dit toelieten - als uitgangspunt nog lange tijd gehanteerd zijn. Een van de respondenten in Gouda gaf aan zich in ieder geval uit de periode na de Tweede Wereldoorlog, op een enkele uitzondering na, geen gebouw te herinneren dat nog op staal gefundeerd is.

Funderingen voorspellen?

Is op grond van het bouwjaar, de locatie, de stand van het grondwater, de zakkingsnelheid en onze huidige kennis van funderingen in historische binnensteden te voorspellen wat de kwetsbaarheid is van de funderingen van woningen en andere panden? En kunnen nu de meest urgente probleemgebieden en probleemgevallen beter worden geïdentificeerd? Om deze vragen te kunnen beantwoorden is naast het onderzoek naar toegepaste funderingstechnieken door de tijd heen ook onderzoek gedaan naar de ouderdom van de stadsbebouwing. Daaruit is gebleken dat de BAG-bouwjaar



uit de gemeentelijke basisadministratie voor wat betreft de panden met een bouwjaarvermelding 'vóór 1900' niet betrouwbaar zijn. Een bezoek aan het bouwarchief om dit te corrigeren is echter geen optie omdat het archief alleen de bouwtekeningen vanaf het jaar 1879 bevat en deze werkwijze voor het nalopen van alle panden in de Goudse binnenstad zeer arbeidsintensief is. Daarom is er aan een methode gewerkt om de leeftijd van individuele panden (en hun funderingen) te corrigeren aan de hand van negentiende eeuwse kadasterkaarten en eenvoudig toegankelijke gebouwopnamen.¹¹⁶ De jaartallen van de historische kadasterkaarten (1828, 1874) sluiten enigszins aan bij de jaartallen waarop Goudse bouwverordeningen van kracht geworden zijn, namelijk de jaren 1826 en 1879. Zeker het laatste jaartal is van belang omdat de bouwverordening van dat jaar eisen stelt aan de diepteligging van het hout van funderingen.

Uit de toegepaste methode blijkt dat er binnen de binnenstad een groot aantal panden uit de periode vóór 1828 voorkomt. Het is aannemelijk dat de meeste van deze stadspanden op houten roosterfunderingen rusten of op oudere 'op staal' funderingen. Welk type fundering exact toegepast zijn is, kan slechts bij benadering aangegeven worden en alleen onderzoek per locatie door bodemonderzoek zal dit nader kunnen specificeren. Het kaartbeeld van mogelijke funderingstypen dat gemaakt is op basis van de stadsontwikkeling is dus niet 100% waterdicht, maar het geeft wel een goede indicatie. Op basis van de toegepaste methoden is wel een betrouwbare inschatting te maken van het aantal panden op houten palen in de Goudse binnenstad, namelijk grofweg 450. Dit is aanzienlijk hoger dan het aantal van tussen de 100 en 150 dat tot nog toe werd genoemd. Mogelijk betrof deze schatting alleen de panden met houten palen in het hoger gelegen deel van de stad want daarmee komt het aantal wel goed overeen. De nu bekende aantallen kunnen worden gezien als accuraat en zijn dus geschikt om te gebruiken in verdere analyses, onderzoeken en berekeningen.

Voor wat betreft de panden uit de funderingsperiode tussen 1828 en 1879 geldt dat detailuitspraken over de funderingswijze (op staal, kleef, stuit) vooral voor de kleinere panden niet goed mogelijk is, anders dan op basis van nader bouwhistorisch onderzoek of door middel van funderingsinspecties. Het is namelijk mogelijk dat na sloop een identiek bouwvolume op een nieuwe fundering teruggebouwd is. Dat valt niet uit de kaartvergelijkingen op te maken en dit zal in andere delen van de binnenstad vermoedelijk niet anders zijn. Of dat heel erg is, is de vraag omdat in het overgrote deel van de gevallen op de oude fundering voortgebouwd is. Een bouwjaar zegt dus niet alles over de fundering of funderingen onder een gebouw. Het Streekarchief Midden-Holland scant de bouwtekeningen (waarop ook funderingstekeningen) uit de periode 1879 - 1899 die via het internet ontsloten worden en gebruikt kunnen worden voor verder bureauonderzoek. Verder kunnen steekproefsgewijs funderingsinspecties (of archeologische opgravingen) worden uitgevoerd in probleemgebieden.

116. Project 1: Van Winsen et al. 2015;
Van Velzen & Van Winsen 2016.



Kwetsbare gebieden en gebouwen

Ondanks de beperkte detailinformatie die de onderzoeken hebben opgeleverd zijn er toch enkele belangrijke conclusies te trekken met betrekking tot de kwetsbare gebieden en gebouwen in de stad.

Een van de conclusies die getrokken kan worden is dat bij nieuwbouw van kleine panden op smalle percelen in de binnenstad hergebruik/voortbouwen op oude funderingen 'op staal' relatief vaak heeft plaatsgevonden. De panden uit de periode 1928-1949 verdienen daarbij aandacht. Het funderingshout uit deze periode komt hier namelijk in theorie het ondiepste voor (0,8 m - NAP). Het is onbekend hoe de overgang is gegaan van een toepassing met houten palen zónder betonnen oplangers naar de situatie mét betonnen oplangers. Een aanvullend (archieff-) onderzoek strekt tot aanbeveling om de overgang in toepassing van houten palen zonder oplangers naar de situatie met oplangers nader te preciseren.

Ook zouden in de gehele stad alle grote gebouwen uit de periode vóór 1879 in kaart moeten worden gebracht en zou bouwhistorisch onderzoek naar de funderingen plaats moeten vinden. Voor 1879 stelde de bouwverordening weliswaar geen eisen aan de funderingen, maar het ligt voor de hand dat houten palenfunderingen of slietenfunderingen zijn toegepast. De diepte van het funderingshout werd echter niet van overheidswege opgelegd en is daardoor onbekend.

Verder kan geconcludeerd worden dat de risico's voor grondwaterstandverlaging vooral in het hoogste gedeelte van de binnenstad het grootste zijn. Hier komen de oudste gebouwen voor en deze zullen zijn voorzien van een houten paal- of slietenfundering. Aanvullend vormen alle panden uit de periode 1900-1949 in ditzelfde gebied een risicocategorie. Een kanttekening is wel dat de gemeten grondwaterstanden in slecht waterdoorlatende bodems geen goede maat kunnen zijn voor het watergehalte van de bodemlagen. Zo bleek bijvoorbeeld tijdens bodemonderzoek aan de neolithische veenweg van Nieuw Dordrecht (Drenthe) - waar de grondwaterspiegel geregeld onder de houten wegresten staat - dat de venige bodem toch genoeg vocht vasthoudt om het hout van de weg in stand te houden.¹¹⁷

Toepassing

Duidelijk mag zijn dat een actualisatie/controle van de BAG niet alleen gewenst is, maar ook aanzienlijke verbeteringen heeft opgeleverd voor de Goudse situatie. Het kan dus ook voor andere steden in Nederland een geschikt middel kan zijn. Dat is niet alleen relevant voor dit onderzoek naar zakkende bodems en funderingen, maar ook voor alle andere zaken waar de BAG voor wordt gebruikt.

De methode voor de voorspelling van toegepaste funderingstechnieken is in principe ook bruikbaar voor andere steden, zij het dat de het model (nog) niet is gevalideerd (hoe goed is het model?). Om dat mogelijk te

117. Theunissen et al. 2006, 27 en 41.



maken had het projectgebied Regentesseplantsoen/Nieuwe Haven/Turfmarktgracht¹¹⁸ gebruikt kunnen worden waarvoor wél archiefgegevens werden bestudeerd en funderingsinspecties hebben plaatsgevonden (afb. 2.19). Archeologische waarnemingen (opgravingsgegevens) en de uitkomsten van funderingsinspecties kunnen ook worden gebruikt om het voorspellingsmodel te toetsen. Ondanks deze beperking lijkt het waarheidsgehalte van het model groot en bovendien lijkt het model ook verdiepende informatie te kunnen geven ten aanzien van een aantal risicoklassen.

Een belangrijke eerste vraag bij de toepassing in andere steden is dan wel welke geologische/geotechnische, archeologische en bouwhistorische gegevens al in kaart gebracht zijn. Verschillen in de natuurlijke ondergrond zijn vaak erg bepalend voor de ontstaansgeschiedenis van de stad. Hoogteverschillen spelen hierin ook vaak een rol. De beschikbaarheid en ontsluiting van historische keuren, bouwvergunningen en historische bouwtekeningen is vanzelfsprekend ook relevant. Verder moeten de BAG-bouwjaar gecontroleerd worden aan de hand van historische (archief) gegevens. De eerste kadastrakaarten (die voor alle binnensteden in Laag-Nederland voorhanden zijn) en de visuele inspectie middels het internet zijn een goede ingang tot precisering. In Gouda bleken de jaartallen van de eerste kadastrale opnamen van de binnenstad min of meer gelijk te vallen met de jaartallen van vastgestelde bouwverordeningen. Dit zal niet overal het geval zijn.





Bodemdalingscomponenten en tijdreeksanalyse

3.1 Meten is weten?

Een belangrijk tweede spoor om beter inzicht te krijgen in de problematiek van de binnenstad is om te bepalen hoe het hele systeem van bodemdaling 'werkt'. De druklast van de bovengrond op het slappe veen, de geologische structuur, het effect van eerdere zettingen op de draagkracht en doorlaatbaarheid van de ondergrond, grondwaterstromen, grondwaterdruk, het oppervlaktewater in de grachten en de riolering; het zijn allemaal sterk met elkaar verbonden componenten in het systeem van bodemdaling.¹¹⁹ Hoe de interactie tussen deze componenten werkt, bepaalt ook aan welke knoppen we kunnen draaien om de problemen te beperken. Hiervoor moeten we naast de langetermijnprocessen - de ontwikkelingsgeschiedenis van de stad en het omringende platteland - ook de mechanismen in het gebied beter begrijpen. Meten is weten is dan een veel aangehaald adagium.

Oorzakelijke verbanden

Toch is meten alleen vaak niet de oplossing. Wanneer je door middel van herhaalde metingen van de hoogteveranderingen in de stad een maaiveldaling kunt vaststellen, meet je een bodemdaling door alle mogelijke oorzaken tezamen. Het blijft dan lastig om de bijdragen van de componenten grondwater, grondbelasting, bodemgesteldheid etc. te achterhalen? Welke mechanismen treden op en wat is de oorzaak en wat is het gevolg? Het beantwoorden van moeilijke vragen op ingreepniveau zoals:¹²⁰ 'heeft het ophogen en ontwikkelen van buitengebieden een effect gehad op bodemdaling in de binnenstad?' of: 'heeft het dempen van grachten in de binnenstad een aantoonbaar effect gehad op de snelheid van bodemdaling?' blijkt dan ook niet eenvoudig.

Tijdreeksanalyse

Eén van de oplossingen voor het 'kip-en-eiprobleem' is het in samenhang analyseren van verschillende tijdreeksen. Oppervlaktewaterpeilen, grondwaterpeilen, aanleg- en ophogingsgeschiedenissen, maaiveldveranderingen; het zijn allemaal zaken die in de gemeente Gouda al decennia lang met enige regelmaat worden vastgelegd. Zo bestaat er al 20 jaar een systematisch grondwatermeetnet van over een groot gebied verspreide peilbuizen die regelmatig, soms tweewekelijks, worden bemeten. In de waterschapsarchieven kan een reeks peilbesluiten tot 1865 worden teruggevonden en ook over de aanleg- en ophogingsgeschiedenis is veel gearhiveerd. Verder wordt de hoogteligging van de wegen sinds 2000 elke twee jaar ingemeten door de gemeente en ook op basis van radarsatellietwaarnemingen kan vanaf 1992 bepaald worden hoeveel de bodemhoogte is afgenomen.¹²¹ Wanneer we de meetreeksen van deze bodemdalingscomponenten in de tijd en ruimte kunnen koppelen ontstaan, in theorie althans, langjarige trendcurven die samenhangen kunnen

119. Zie bijvoorbeeld het recente onderzoek van de Universiteit Utrecht/Deltares (Van Laarhoven 2017).

120. Groenendijk 2017a.

121. Bijvoorbeeld Den Besten, Maccabiani & Maljaars 2014; SkyGeo 2017.



Afbeelding 3.1.
Uitsnede van een kaart met dorpelhoogtemetingen in de binnenstad van Gouda, 1965-1980 (uit: Keunen 2016a).

Afbeelding 3.2.
Zettingsgraad berekend op basis van dorpelhoogtemetingen (uit: Marang 2015).



vertonen.¹²² Op deze wijze zijn uit langjarige meetnetwerken de oorzaak-gevolg relaties van diverse ingrepen in het bodemdalingssysteem beter te onderzoeken en wordt meten inderdaad weten.

Opbouwen van meetreeksen

Omdat er in Gouda geen langjarig meetnetwerk bestaat dat toegespitst is op bodemdaling is van elk van de componenten maaiveldhoogte, grondwater, oppervlaktewater, peilbesluiten en de aanleg- en ophooggeschiedenis onderzocht welke tijdreeksen op basis van bestaande informatie kunnen worden opgebouwd en wat de mogelijkheden en beperkingen van deze tijdreeksen zijn voor oorzaak-gevolg analyses.

3.2 Maaiveldhoogten en -zakkingen

3.2.1 Hoogtegegevens

Van de binnenstad van Gouda wordt sinds 2000 op verschillende locaties en op verschillende manieren de hoogteligging bepaald.¹²³ Daarbij gaat het om metingen van de hoogte van het maaiveld, van de hoogteligging van de onderdorpels van verschillende panden¹²⁴ en van het wegoppervlak. De tijdintervallen waarmee deze hoogtegegevens worden verzameld verschillen echter en de meetgegevens zelf kennen hun eigen afwijkingen.

Na 1927 is men in Gouda begonnen met het onderheien van nieuwe woningen buiten de binnenstad (§ 2.4.3). Oudere gebouwen in de binnenstad zijn veelal niet onderheid en staan 'op staal'. Van een deel van deze niet-onderheide woningen is de hoogte van de onderdorpels door de Dienst Openbare Werken ingemeten in 1972 en opnieuw in 2003. Van een aantal van deze woningen in het lagere deel van de binnenstad is in 2014 opnieuw de dorpelhoogte bepaald. Na verder archiefonderzoek bleken tevens metingen te zijn uitgevoerd in 1958, 1959, 1961, vermoedelijk 1966, en twee keer in 1971 (afb. 3.1).¹²⁵ Uit deze gegevens is af te leiden wat de zettingsgraad is van de betreffende gebouwen (afb. 3.2) zij het dat ook deze gegevens een verschillende mate van nauwkeurigheid en betrouwbaarheid kennen.

Ook de hoogteligging van de wegen wordt sinds 2000 elke twee jaar ingemeten door de gemeente. Verder zijn voor de binnenstad hoogtegegevens beschikbaar die sinds 1992 worden ingewonnen door radarsatellieten (InSAR¹²⁶). Deze zijn door de firma Hansje Brinker in 2011 gebruikt voor het bepalen van de zettingsgraad (afname maaiveldhoogte) tussen 1992 en 2003, en tussen 2003 en 2010.¹²⁷ Verder zijn de InSAR-gegevens van het grondgebied van de gemeente Gouda door het bedrijf SkyGeo uit Delft geanalyseerd voor de periode november 2013 en november 2016.¹²⁸

122. Van Geer 2012, 5.

123. Marang 2015.

124. Van de kozijnen van de buitendeuren.

125. Keunen 2016b.

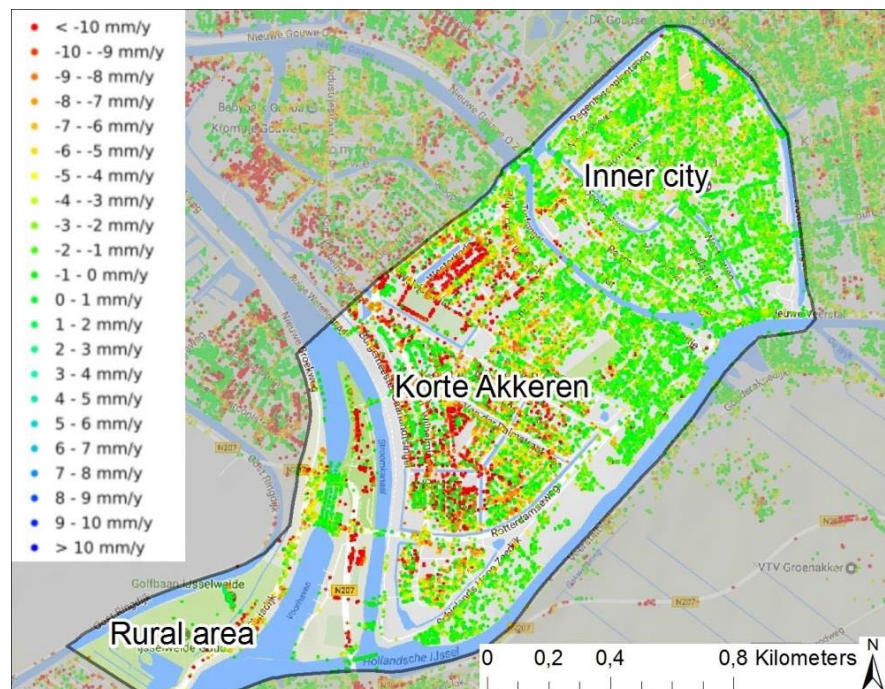
126. InSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar.

127. Hansje Brinker 2011.

128. SkyGeo 2017.



Afbeelding 3.3.
Met behulp van
radarsatellieten ingemeten
bodemdalingssnelheden
(mm per jaar) tussen
november 2013 en
november 2016 (TerraSAR-X
satelliet; bron: SKY GEO,
2017).



In 1998 werden de met vliegtuiglaseraltimetrie ingewonnen hoogtemetingen beschikbaar gesteld als het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) en zijn de mogelijkheden voor accurate maaiveldhoogtemetingen (en de mutaties) verder toegenomen.

Archiefgegevens

Voor 1992 moesten de metingen merendeels handmatig plaatsvinden, hetgeen maar in beperkte mate gebeurd is, bijvoorbeeld voor het vervaardigen van de Topografische kaart van Nederland. De gemeente Gouda wordt door drie topografische bladen (kaartschaal 1:25.000) afgedekt en uit polderarchieven weten we dat de hoogtecijfers op een deel van de kaartbladen tot 1958 of zelfs 1966 is bijgewerkt.¹²⁹ Verder blijkt uit archiefgegevens van de vroegere Topografische Dienst dat het topografische blad 38AN (Gouda) in 1934 werd verkend en in 1956 is herzien. In latere documenten van de verschillende polders (zoals kaarten bij de peilbesluiten) beroept men zich steeds weer op deze metingen (§ 3.5), een indicatie dat het inmeten relatief uniek moet zijn geweest. Nieuwe hoogtemetingen van het maaiveld zijn wel gedaan voor de peilbesluiten van de polder Bloemendaal - landelijk gebied (1991) en polder Willens-Goudse Hout (1998).¹³⁰

129. Keunen 2016b, HHR van Rijnland, archief Waterschap De Gouwelanden, inventarisnummer 275.

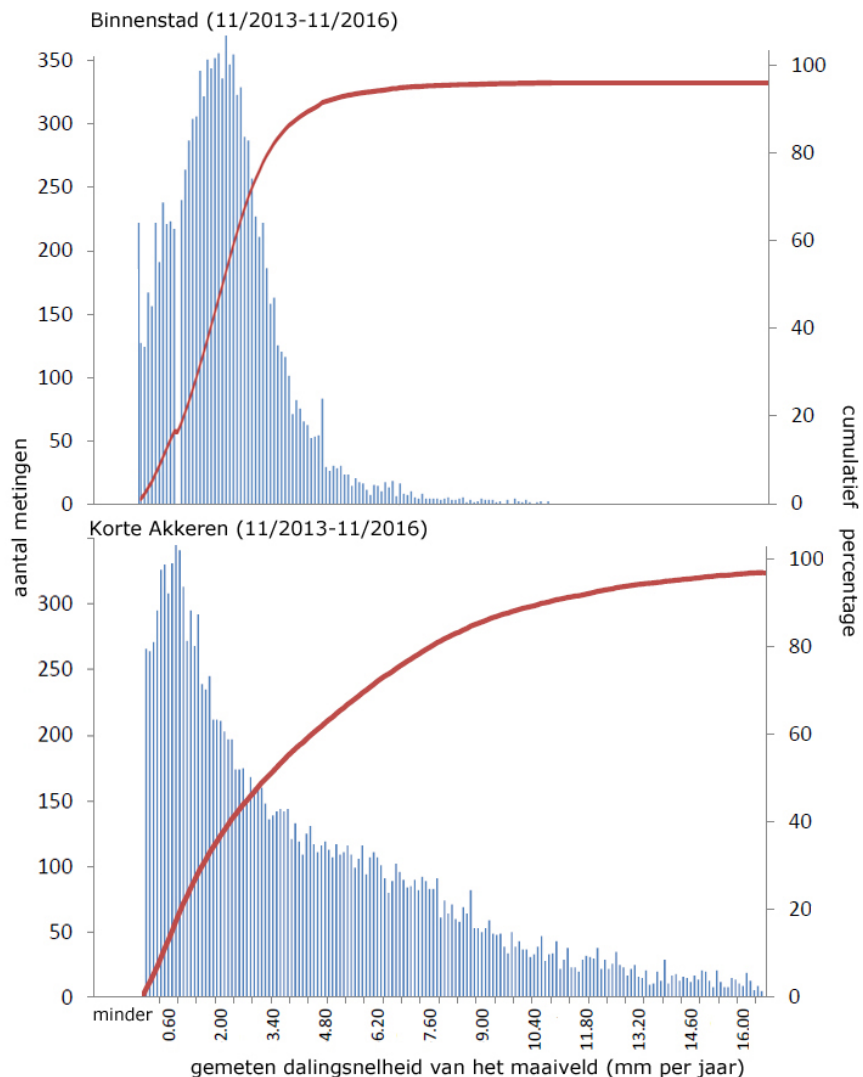
130. Keunen 2016b, HHR van Rijnland, archief Waterschap De Gouwelanden, inventarisnummer 263; HHR van Rijnland, archief Waterschap De Gouwelanden, inventarisnummer 276.

3.2.2 Eerste resultaten

Binnenstad

Op basis van de verzamelde hoogtegegevens (weghoogten, onderdorpels, remote sensing data) is door Royal HaskoningDHV in 2015 geconcludeerd

Afbeelding 3.4.
 Histogrammen met de frequentie van gemeten bodemzakkingen (InSAR-metingen) in de historische binnenstad en de wijk Korte Akkeren tussen november 2013 en november 2016 (naar: Van Laarhoven 2017, bijlage 1).



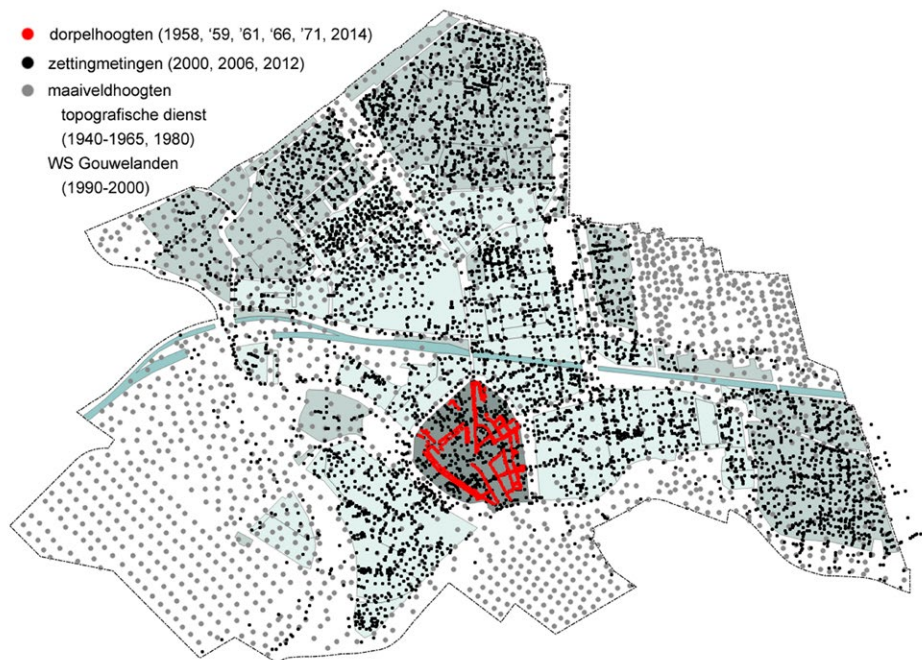
dat vrijwel overal in de binnenstad van Gouda sprake is van zetting van het maaiveld en zakking van woningen.¹³¹ De mate waarin dit gebeurt verschilt echter sterk per locatie (afb. 3.2 en 3.3). Op sommige plaatsen is deze verwaarloosbaar klein, op andere plaatsen kan dit oplopen tot 11 mm per jaar (afb. 3.4). Tijdens het geotechnisch onderzoek voor het project Nieuwe Haven werd verder duidelijk dat origineel op kleef gefundeerde bebouwing vanwege de ouderdom van de fundering inmiddels functioneert als een op staal gefundeerde constructie.¹³² Er bleken namelijk bij opmeting geen zakkingsverschillen te bestaan tussen panden op staal en panden op houten palen, een verschijnsel dat in oud stedelijk gebied vaker zal voorkomen. Om de zettingsbepalingen uit onderdorpelmetingen en wegmetingen onderling te kunnen vergelijken zijn de hoogtemetingen geëxtrapoleerd naar hoogtekaarten voor de gehele binnenstad. Daaruit blijkt dat het ruimtelijk beeld van zakkingen in de stad niet eenduidig is.¹³³ Waar dorpelhoogten

131. Marang 2015, 9.

132. Den Nijs 2015, 5.

133. Ibid.

Afbeelding 3.5.
 Overzicht van alle
 geïnventariseerde
 maaiveldhoogte- en
 dorpelhoogtepunten in het
 maaiveldhoogten-GIS van
 Keunen & Van der Veen
 (Keunen 2016a)



snel veranderen geven wegmetingen juist een vrij onveranderd beeld en omgekeerd. De oorzaak van dit verschil is niet duidelijk, ook omdat er toen onvoldoende gegevens waren. Wellicht komt het door de gevolgde meetwijze. Wat verder meespeelt is dat van veel hoogtemetingen onbekend is of ze op exact dezelfde plaats ingemeten zijn wat voor de waargenomen zettingssnelheden (0,2 tot 10 mm per jaar) cruciaal is.

Ook uit de satelliehoogtemetingen blijken verschillen te bestaan voor bodemzakkings in de binnenstad (afb. 3.3 en 3.4). In deze metingen voor de periode november 2013 tot november 2016 is het ruimtelijk patroon van de bodemdaling in de binnenstad minder divers dan in de veel jongere wijk Korte Akkeren (ca. 1890). In de historische binnenstad worden bodemdalingssnelheden berekend tussen 0 en 4 mm per jaar (ca. 90% van de metingen) met slechts enkele uitschieters van 15 mm per jaar (afb. 3.4).¹³⁴ In de wijk Korte Akkeren valt 90% van de gemeten bodemdalingssnelheid in de orde grootte 0 en 10,7 mm per jaar met een maximum van 41,1 mm per jaar (afb. 3.4). Het verschil in zakkingsnelheden en bodemdalingsspatronen tussen de eeuwenoude binnenstad en de veel jongere stadswijk direct ten westen daarvan kan verklaard worden door het grote tijdsverschil dat bestaat tussen de ophogingsfasen in de beide stadsdelen en de daarmee samenhangende verschillen in consolidatie van de veenondergrond. In de binnenstad heeft al veel langer bodemdaling door zetting plaatsgevonden dan in Korte Akkeren. Dit verklaart ook de relatief lagere zettingsnelheden in de binnenstad ten opzichte van de zettingssnelheden in Korte Akkeren waar het zettingsproces nog in volle gang is.¹³⁵ In het landelijke gebied van de IJsselweide speelt zetting veel minder een rol. Hier draait het proces vooral om veenoxidatie door het peilbeheer.

134. InSAR gegevens overgenomen uit Van Laarhoven 2017, gebaseerd op SkyGeo 2017.

135. Van Laarhoven 2017, 34. In volle gang is hier relatief bedoelt omdat ook deze wijk al uit de late negentiende eeuw dateert.

Landelijk gebied

Ook voor het buitengebied, of de voormalige buitengebieden, beschikken we over een dekkende GIS-bestand met de puntlocaties van maaiveldhoogten afkomstig van de topografische kaarten uit de periode 1940-1965 (afb. 3.5). Verder is er een schat aan meetgegevens uit de periode vanaf 2002 beschikbaar. Over de maaiveldhoogten en -dalingen tussen 1965 en 2002 is echter bijzonder weinig informatie beschikbaar.

Toen in de jaren tachtig en negentig van de vorige eeuw peilbesluiten moesten worden aangepast, constateerde men dit gebrek ook. Voor het peilbesluit voor de polder Stein in 1990 werden daarom de maaiveldcijfers op de hoogtekarten van de Topografische Dienst uit 1956 gehanteerd. Deze waren toen al 34 jaar oud en moesten dus worden gecorrigeerd voor de opgetreden maaiveldddaling. Deze bedroeg volgens de betrokken Landinrichtingsdienst 3,7 mm per jaar, een correctie van de maaiveldhoogte met -12 centimeter die voor verschillende delen van de polder Stein uniform werd toegepast, dus zonder opnieuw te meten.¹³⁶ Interessant is dat men een jaar eerder bij de Landinrichting 'Driebrugge' nog andere getallen aanhield. Men ging toen uit van de cijfers van Schothorst¹³⁷ die bij een drooglegging van 35 à 45 centimeter een daling van 3 mm per jaar voorspelde, een correctie ten opzichte van 1956 met -9 centimeter.¹³⁸ Voor het peilbesluit van de polder Willens ging men uit van een gemiddelde daling van 4 mm per jaar, maar waarop dat was gebaseerd is niet opgeschreven.¹³⁹

Meetwaarden in het landelijk gebied

Bij uitzondering gingen polders er toe over om zelf nieuwe metingen uit te voeren, zoals in 1991 de polder Bloemendaal (grenzend aan de binnenstad). Hieruit concludeerde men dat er sinds 1958 een gemiddelde maaiveldddaling van 17 centimeter had plaatsgevonden, een gemiddeld (hoge) dalingsnelheid van 5,2 mm per jaar.¹⁴⁰ Een tweede polder waar nieuwe hoogtemetingen plaatsvonden was de polder Willens (Goudse Hout) in 1998. Hier bleek sinds 1966 een lichte maaiveldstijging te hebben plaatsgevonden, mogelijk veroorzaakt door ophogingen tijdens de aanleg van een recreatiegebied.¹⁴¹ Uit de satelliethoogtemetingen (InSAR) over de periode november 2013 tot November 2016 blijken bodemdalingen in de IJsselweide van tussen de 0,1 en 1,3 mm per jaar voor te komen (afb. 3.3).

De spaarzame dalingscijfers die we nu hebben voor het landelijke gebied van Gouda vallen dus aan de hoge kant uit ten opzichte van de schattingen in het verleden, maar liggen binnen de prognoses van 2,5 tot 30 mm per jaar in het buitengebied, afhankelijk van de ondergrond.¹⁴² De gemeten waarden in de IJsselweide liggen beduidend lager. Een belangrijk factor voor de bodemdalingssnelheid in het landelijk gebied is echter de mate van drooglegging en de gerealiseerde grondwaterstandsverlaging.¹⁴³ Daarbij gaat het vooral om de grondwaterstanden aan het einde van de zomer, wanneer de grondwaterstanden het laagst zijn en de bodemtemperatuur het hoogst. Dit zijn de omstandigheden waarbij veenoxidatie het snelst gaat.

136. HHR van Rijnland, archief Waterschap De Gouwelanden, inventarisnummer 249.

137. Schothorst 1967a en b.

138. HHR van Rijnland, archief Waterschap De Gouwelanden, inventarisnummer 253.

139. HHR van Rijnland, archief Waterschap De Gouwelanden, inventarisnummer 275.

140. HHR van Rijnland, archief Waterschap De Gouwelanden, inventarisnummer 263.

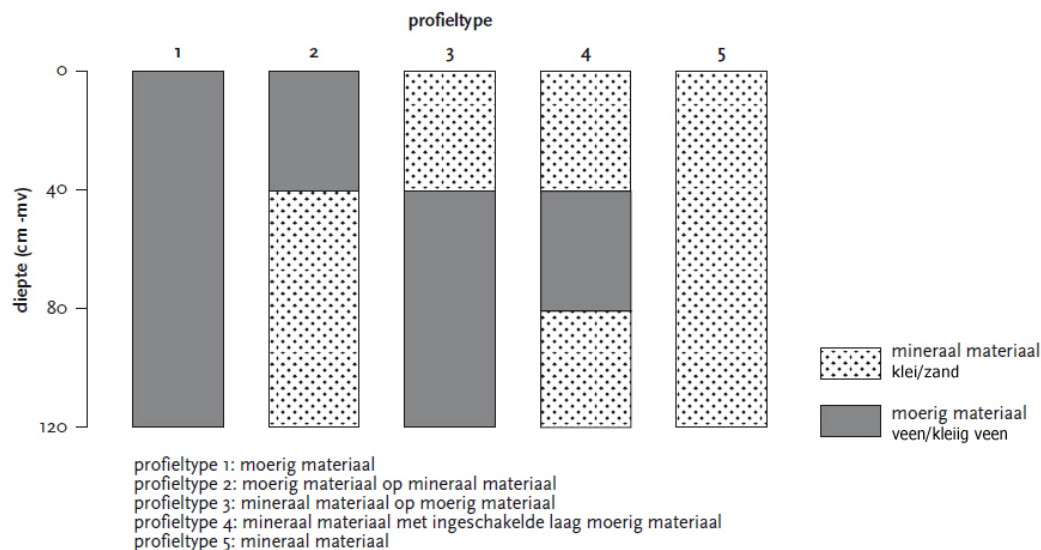
141. HHR van Rijnland, archief Waterschap De Gouwelanden, inventarisnummer 276.

142. Pieterse et al. 2015, 45; Born et al. (2016, 10) geeft een gemiddelde van 8 mm per jaar.

143. Van den Akker & Beuving 1997; Van den Akker 2005; Bosch et al. 2011.



Afbeelding 3.6.
 Veenprofieltypen en
 kwetsbaarheden voor
 veenoxidatie (naar:
 Stouthamer et al. 2008).



Profieltype	Kwetsbaarheid voor oxidatie
1	0,8
2	0,7
3	0,6
4	0,2
5	0

Uit onderzoek bij Zegveld (gemeente Woerden) tussen 1966 en 2003 bleek een maaiveldddaling van 12 mm per jaar op te treden bij een slootpeil van 60 cm - mv, en ongeveer 6 mm per jaar bij een slootpeil van 30 cm - mv.¹⁴⁴ Verder is de aanwezigheid van een afschermend kleidek van invloed (afb. 3.6). Verlaging van het slootpeil van 1 meter in veengronden zonder kleidek leidde tot een maaiveldddaling van 18-23 mm per jaar. Bij gronden met een kleidek was de maaiveldddaling 5-13 mm per jaar, een reductie van grofweg 50%.¹⁴⁵

3.2.3 Aanvullend onderzoek

In de waterschapsarchieven van Rijnland, Schieland en de Krimpenerwaard is helaas geen informatie over maaiveldhoogten aanwezig. Om het effect van zetting in de overbouwde gebieden van na 1956 (1934) te bepalen (dus na de eerste topografische opmetingen) is het waardevol om de gemeentelijke dossiers over de ophogingen door te nemen, eventueel in combinatie met dossiers over de aanleg van grote infrastructuur (weg, spoor) en het grondverzet dat daarmee gepaard ging (een eerste aanzet is verbeeld in afb. 2.8). Wellicht zijn toentertijd maaiveldmetingen uitgevoerd en dit maaiveldniveau direct voorafgaand aan de bouw kan nu op diezelfde locaties met boringen worden opgezocht en opnieuw worden ingemeten. In samenhang met de topografische hoogtecijfers kan daaruit zowel de bodemzakking als gevolg van (voornamelijk) veenoxidatie worden berekend, als de zettingsnelheid worden bepaald. Wel is het belangrijk om vooraf in te schatten welke nauwkeurigheden gewenst zijn en of die wel gehaald kunnen gaan worden.

144. Van den Akker 2005.

145. Van den Akker 2005.

Peilveranderingen hebben dus een aantoonbaar effect op bodemdaling

Naast het zoeken naar aanvullende maaiveldhoogtemetingen is het van belang dat er snel betere visualisaties gemaakt worden van het patroon van maaiveldvalingen in de gehele gemeente over de periode 2002 tot heden en over de periode daarvoor. Deze zijn op dit moment niet beschikbaar maar voor de periode sinds 1992 wel te vervaardigen op basis van de satelliethoogtemetingen. Juist omdat de tijdsintervallen in de meetreeksen van maaiveldhoogten vóór 1992 fors zijn (opmetingen voor de topografische kaarten zijn slechts enkele keren uitgevoerd) kan onderzoek naar de ruimtelijke patronen van de maaiveldvalingen licht werpen op de onderliggende mechanismen.

Zettingen in de toekomst?

Ondergrondgegevens die nu nog geen rol hebben gespeeld in het onderzoek naar de stadsondergrond, kunnen ook worden ingezet om de toekomst van de zetting van de veenondergrond te voorspellen. Zo worden er tienduizenden sonderingen per jaar uitgevoerd in Nederland, waarvan het grootste gedeelte nog altijd plaatsvindt in de veenrijke delta en kustvlakte. Sonderingen meten de draagkracht van de bodem door, onder andere, de indringingsweerstand en wrijvingsweerstand te bepalen en worden in de dagelijkse praktijk ingezet om de diepte van draagkrachtige lagen te bepalen die nodig zijn om funderingen te dragen.¹⁴⁶ Uit de weerstandsmetingen kan ook worden afgeleid hoeveel dikte een veenpakket door zetting momenteel al heeft verloren (hoeveel het al is samengeperst), en hoeveel het in de toekomst nog kan verliezen.¹⁴⁷ Deze nieuw ontwikkelde methode kwantificeert dus de bodemdaling die al heeft plaatsgevonden én de bodemdaling die mogelijk nog te verwachten is.¹⁴⁸ Kleibijmenging heeft echter ook invloed op de weerstanden. Dus ook de ruimtelijke samenstelling van de veenlagen dient bepaald te worden voordat de zettingsgevoeligheid van de stadsondergrond kan worden vastgesteld.¹⁴⁹ Wellicht dat hier nog aanvullende gegevens voor nodig zijn maar de methode biedt zeker potentie, temeer daar er vaak heel veel gegevens binnen de bebouwde kommen voorhanden zijn. Het eerste sondeerapparaat ter wereld werd overigens in 1932 door B. Barentsen ontwikkeld voor een weg in Gouda. Hij gebruikte zijn Barentsen-apparaat om de dikte van de slappe veenlagen in de Goudse ondergrond te peilen die makkelijk samendrukken als er direct op gebouwd wordt.

146. Tegenwoordig zijn veel van de bestaande sondeermetingen digitaal via het online dataportaal van TNO-Geologische Dienst Nederland toegankelijk gemaakt.

147. Koster et al. 2016; Koster & Erkens 2017.

148. Overigens wordt standaard voorafgaande aan het bouwrijp maken van een terrein uitgerekend wat de zetting zal zijn en wat de restzetting is die in de komende 30 jaar zal optreden om eventuele schade aan bijvoorbeeld huisaansluitingen te voorkomen.

149. Van Laarhoven 2017.

3.3 Peilbesluiten

3.3.1 Peilindexatie

Waterbeheer in het landelijk gebied valt grotendeels onder verantwoordelijkheid van de waterschappen. Het waterschap zorgt ervoor dat de veenweidegebieden zo min mogelijk droogteschade of natschade ondervinden. In de meeste veenweidegebieden is sprake van actief



peilbeheer zodat kan worden voldaan aan de afspraken met betrekking tot het (meestal agrarisch) landgebruik.¹⁵⁰ Onderdeel daarvan is peilindexatie. Dit betekent dat met een bepaalde regelmaat, meestal om de tien jaar, een nieuw peilbesluit wordt genomen over het polderpeil, met als uitgangspunt dat de afgesproken drooglegging behouden blijft. Peilbesluiten worden genomen per peilgebied of peilvak en zijn juridische documenten. Aanpassing van het polderpeil aan maaiveld dalingen gebeurt stapsgewijs.¹⁵¹ Nadat het maaiveld ongeveer 10 centimeter is gezakt wordt een aangepast peilbesluit genomen door het waterschap, waarna het polderpeil in 2 jaar met stappen van 5 cm 10 centimeter lager wordt ingesteld. Een stad als Gouda heeft voor de binnenstad een eigen peilvak, de Stadsboezem (§ 3.4.4), waardoor deze weinig effecten ondervinden van de keuzes die in de nabijgelegen polder worden genomen.

3.3.2 Archiefonderzoek

Om het effect van de opeenvolgende peilindexaties op de bodemdaling in Gouda te kunnen onderzoeken is door RAAP archiefonderzoek gedaan naar de begrenzingen van de peilvakken en de hoogte van de verschillende peilen door de jaren heen, en de dynamiek daarin.¹⁵² De (digitale) gegevens van de hoogheemraadschappen gaan namelijk over de bestaande peilbesluiten binnen de huidige peilvakken. Voor vroegere situaties zijn we dus op archiefgegevens aangewezen.

Van alle onderdelen heeft dit archiefonderzoek wel het meest opgeleverd¹⁵³, met name vanwege de informatie die is opgenomen in de zogenaamde Provinciale Almanak voor Zuid-Holland.¹⁵⁴ Hierin is voor elke polder vanaf 1890 jaarlijks het toen geldende peilbesluit gepubliceerd. Dat kon één peil zijn, maar vaak ook een zomer- en winterpeil, soms met een afzonderlijk schouwpeil, of zelfs een vierdeling van het jaar, waarbij dus viermaal het peil werd veranderd. Ook de splitsing of samenvoeging van de polders (de peilvakken) komt in de polderalmanakken naar voren. Deze leveren een beeld op van de peilen en peilvakken in 1909 en van de peilen en peilvakken tussen 1927 en 2003, dat wil zeggen een reeks van 76 jaar.¹⁵⁵ Tegelijk werden de dossiers over de peilbesluiten tussen 1974 en 1985 doorgenomen, waarin met name peilbesluiten, de bezwaren en de onderzoeken waren opgenomen. Verder maakten deze dossiers het mogelijk om de onderverdeling van polders in verschillende peilvakken (door ontpoldering en herpoldering van polders of de splitsing van polders) in beeld te krijgen.

3.3.3 Resultaten en kanttekeningen

De ontwikkeling van de verschillende polders of peilbesluitgebieden kon met de verzamelde gegevens redelijk sluitend in kaart worden gebracht. Verder kon ook de reeks verschillende peilbesluiten tot 1865 worden teruggevoerd (afb. 3.7). Deze gegevens zijn op een interactieve wijze gekoppeld aan een grote serie kaarten in een GIS waarin de historische begrenzing van polders,

150. Zie 'Verdieping bodemdaling'.

151. Bosch et al. 2011.

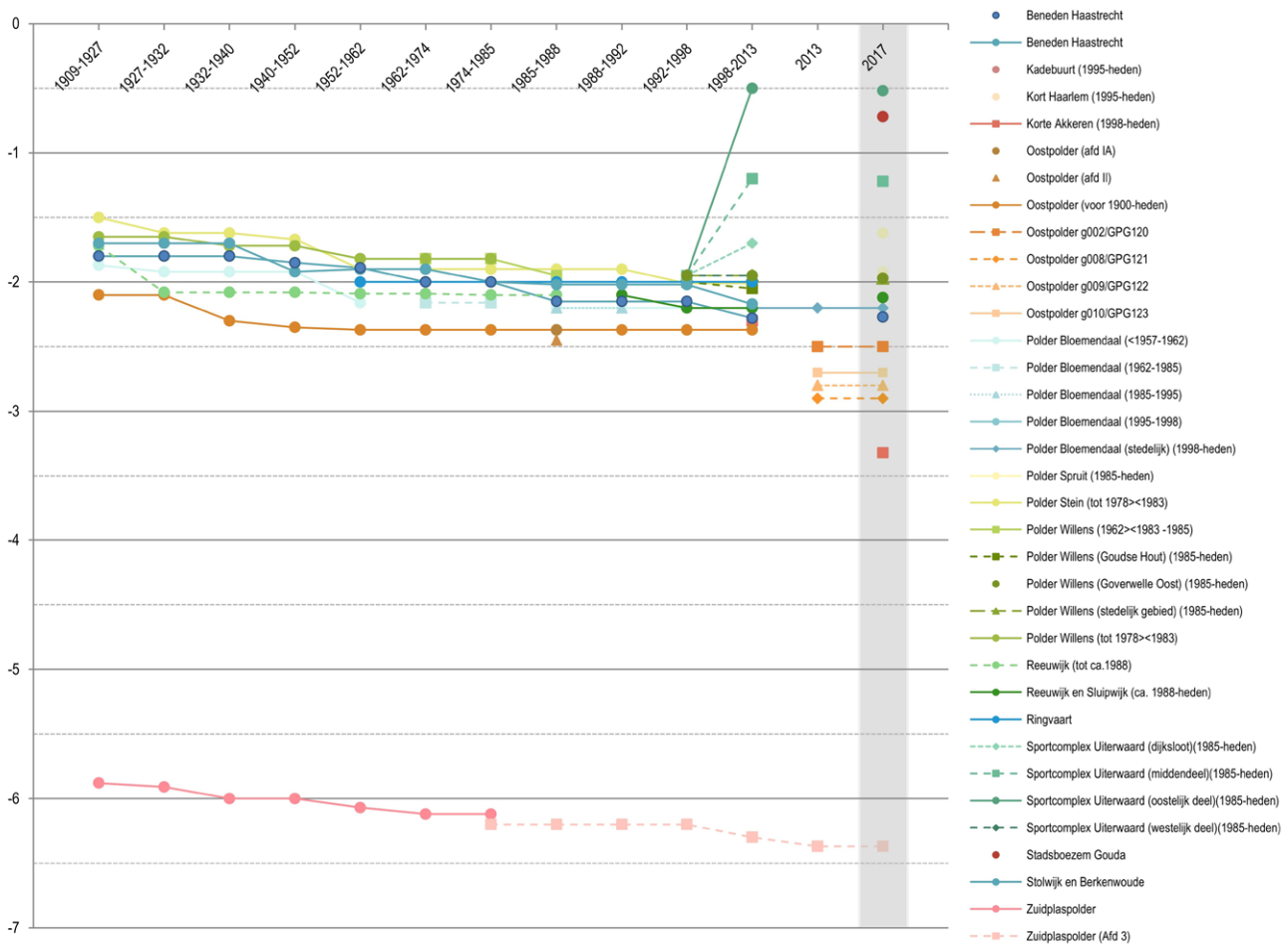
152. Keunen 2016a, 2016b en 2016c.

153. Keunen 2016c.

154. Deze is geraadpleegd bij het Hoogheemraadschap van Rijnland (Keunen 2016c).

155. De oudere almanakken tot 1890 ontbraken in de collectie van het archief, de jongere bevatten geen overzichten van polders meer.





*Afbeelding 3.7.
Grafiek met de peilbesluiten
sinds 1909 uitgesplitst naar
polder (bron: Keunen & Van
der Veen, in: Keunen 2016a).*

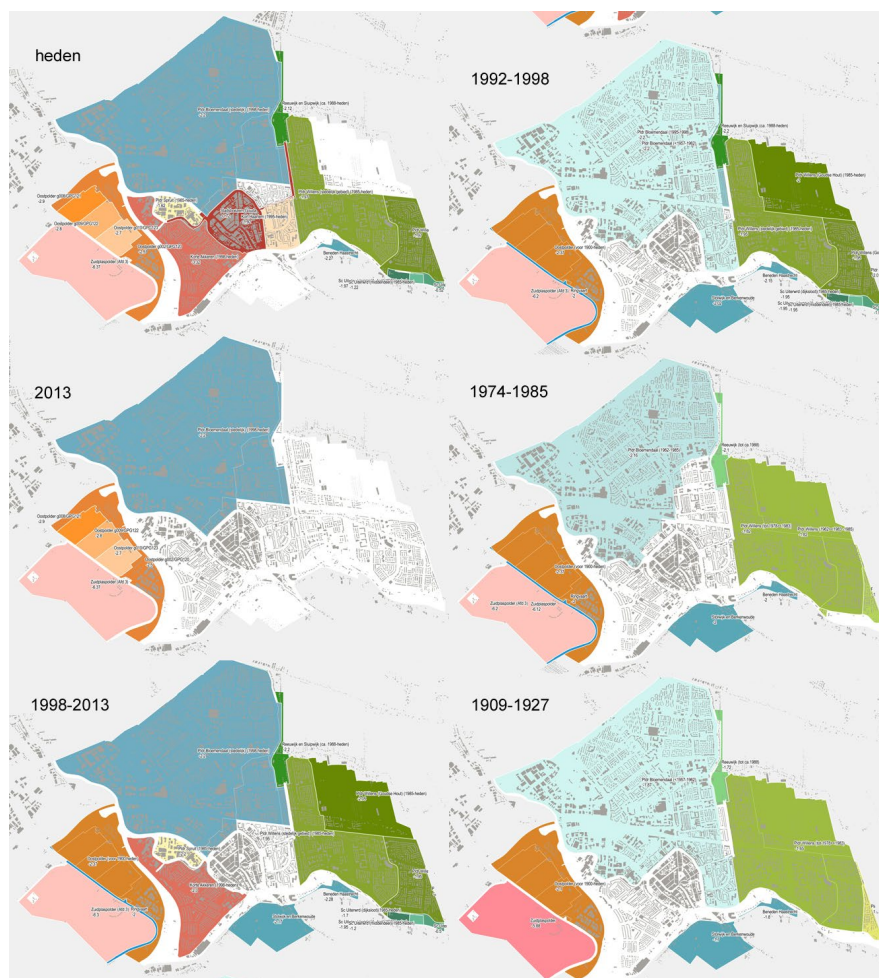
boezems en peilvakken tussen 1879 en 2013 zijn opgenomen. In de grafiek met de 'peilbesluiten' (afb. 3.7) is te zien hoe de gewenste grondwaterstand in één eeuw tijd ruim 50 centimeter is gedaald, en op welke momenten deze aanpassingen werden doorgevoerd. In afbeelding 3.4 is ook de opdeling herkenbaar van de Oostpolder in meerdere peilbesluitgebieden in 2013 (afb. 3.8). Het blijkt dat het tot in de jaren zestig van de vorige eeuw gebruikelijk is geweest om polders te ontpolderen als daar specifieke redenen voor bestonden, zoals woningbouw en opname in het stedelijk gebied, of om afzonderlijke 'stedelijke polders' te creëren zoals de polders Willens, Spruit en Bloemendaal in de jaren tachtig en negentig van de vorige eeuw. Later volgde zelfs ook nog het herpolderen van ooit ontpolderde gebieden, zoals Korte Akkeren en een gebied noordelijk van de Kadebuurt.

Tussen besluit en werkelijkheid

Uit de verzamelde gegevens blijkt dat er in de praktijk belangrijke afwijkingen bestonden tussen het vastgestelde peil en het daadwerkelijk gehanteerde peil. Zowel in de Schielandse als Rijnlandse polders werd



Afbeelding 3.8.
Gedeelte van de
kaartenreeks met
polderindelingen gemaakt
door Keunen & Van der Veen
(in: Keunen 2016a).



bijvoorbeeld op gezette tijden het peil (veel) lager gehouden dan door het polderbestuur vastgesteld was. Zo hanteerde men in de Zuidplaspolder in de winter van 1962 een peil rond 6,37 m - NAP, terwijl een winterpeil van 6,07 tot 6,22 - NAP was vastgesteld, dus 15 tot 30 cm hoger. In de Oostpolder gold in 1974 een peil van 2,37 m - NAP, terwijl in de maand september maar liefst 2,59 m - NAP werd gemeten, onder andere veroorzaakt door droogte. Maar er waren ook andere oorzaken voor een te laag peil, zoals verkeerd geplaatste peilschalen. Zo bleek in 1978 bij het gemaal van de Oostpolder de peilschaal al 30 jaar 6 cm te hoog te zijn geplaatst, waardoor het praktijkpeil dus 2,43 m - NAP in plaats van 2,37 m - NAP was. In de polder Bloemendaal constateerde men in 1944 dat er werd gemalen op een peil dat 15 centimeter lager was dan de keur aangaf.¹⁵⁶ Nader onderzoek zal moeten uitwijzen waarom er zo regelmatig en soms zoveel onder het vastgestelde peil gemalen werd. Voldeed het vastgestelde peil bijvoorbeeld niet meer door voortgaande bodemdaling?

156. Om deze afwijking op te heffen werd het peil aangepast aan de praktijksituatie (HHR van Rijnland, archief Polder Bloemendaal, inventarisnummer 246, d. d. 12-02-1944).

Gegevenslacunes

Een beperking voor het onderzoek was dat er in de archieven alleen informatie voorhanden was over polders die onder het gezag van de twee hoogheemraadschappen vielen. Peilbesluiten en andere gegevens over de stadsboezem van Gouda (§ 3.4.4) en de tijdelijk ontpolderde gebieden Korte Akkeren, Kort Haarlem en Kadebuurt waren hier niet aanwezig. Dit zijn voor de bodemdalingsproblematiek belangrijke stadsdelen. Een eerste quickscan in de archieven van het gemeentebestuur van Gouda heeft helaas nog geen aanknopingspunt opgeleverd waar deze gegevens (die er ongetwijfeld zijn) zich bevinden. Verder hebben er binnen polders meerdere peilvakken, bestaan, zoals in de Oostpolder die (nog) niet integraal zijn uitgewerkt.

Aanvullend onderzoek

Er heeft (nog) geen vergelijking plaatsgevonden tussen de reeks van peilbesluiten en de historische maaiveldontwikkelingen, mede omdat die laatste tijdreeks nog moet worden ontwikkeld (§ 3.2.3). Of historische peilbesluiten altijd de maaiveldontwikkelingen volgden (zoals vaak wordt aangenomen) of juist andersom, dat de maaiveldontwikkeling een gevolg was van een te haastig genomen peilbesluit is mogelijk ook vastgelegd in de dossiers van de verschillende polders.

3.4 Waterhuishouding

3.4.1 Inleiding

Het watersysteem van Gouda bestaat uit de historische binnenstad met een eigen stadsboezem omgeven door zeven polders (afb. 3.9).¹⁵⁷ Hiervan staan vijf polders in verbinding met de binnenstad. Het waterpeil verschilt per polder en ligt tussen 1,9 m - NAP en 2,3 m - NAP. In natte perioden wordt het overtollige water in de polders door tien pompstations geloosd op de Rijnlandse boezem en de Hollandsche IJssel.¹⁵⁸

In de historische binnenstad zelf bestaat in gemiddelde omstandigheden een kwetsbaar evenwicht tussen te natte en te droge omstandigheden. Enerzijds mag bij een regenbui geen wateroverlast ontstaan en anderzijds moet het grondwaterpeil hoog genoeg zijn om houten funderingen te conserveren en om extra zetting van de bodem te voorkomen. Dit uit zich in een relatief geringe drooglegging en weinig mogelijkheden voor peilfluctuaties (§ 3.3). Inlaat van water in de Goudse binnenstad is vanuit meerdere opzichten nodig en vindt plaats vanuit de Hollandsche IJssel of de Gouwe. Enerzijds wordt in tijden van neerslagtekort het oppervlaktewater op peil gehouden om zetting van de veenbodem te voorkomen. Anderzijds wordt water ingelaten om de grachten door te kunnen spoelen.¹⁵⁹

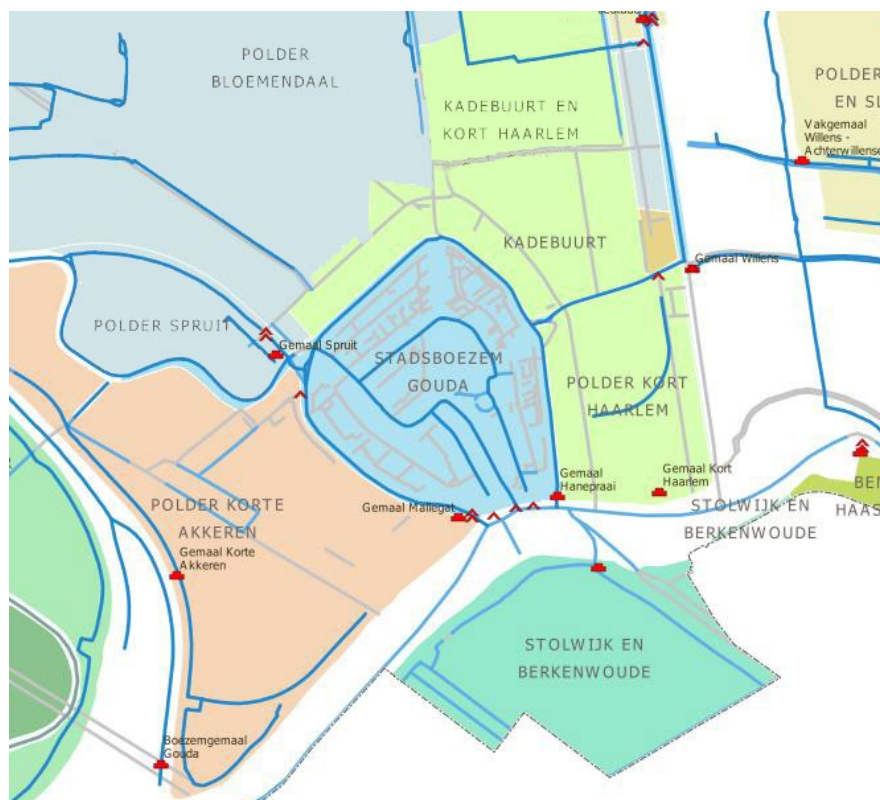
157. Tamboer 2007; Gemeente Gouda & HHR van Rijnland 2012; Keunen 2016a.

158. Gemeente Gouda et al. 2003; Tamboer 2007.

159. In totaal zijn er zijn er elf verschillende inlaatpunten voor oppervlaktewater.



Afbeelding 3.9.
Huidige waterstaatkundige
systeem (uit: Keunen 2016a).



3.4.2 Gegevens

In de binnenstad beïnvloeden het oppervlaktewater, het grondwater en het rioleringsstelsel elkaar en zijn daarmee belangrijke componenten van de waterhuishouding. Maar hoe verhouden ze zich tot elkaar en aan welke 'knoppen' kun je draaien om bij te dragen aan mogelijke oplossingen? Om dit inzichtelijk te maken is in 2016 gewerkt aan een zogenaamde 'hydrologische kaart van Gouda en grotere omgeving'.¹⁶⁰ Voor deze kaart is informatie verzameld over de actuele situatie en over de historische ontwikkeling van de waterlopen, inclusief afwateringsrichtingen en het moment waarop deze waterlopen werden aangepast of gedempt (afb. 3.10); pompgemalen en hun invloedsgebieden; diepe wateronttrekkingen /waterterugleveringen¹⁶¹, de vastgestelde grondwaterpeilen (voor hoge en lage grondwaterstanden)¹⁶² en de riolering in de binnenstad (§ 3.4.5).¹⁶³

3.4.3 Afwatering in het verleden

In het gebied waar later Gouda zou ontstaan werd de waterstaatkundige situatie in de tiende eeuw beheerst door de Hollandsche IJssel en de Lek, beide Rijntakken (§2.3.3). Deze rivieren voerden hun water naar de Maasmond af. Ter hoogte van het latere Gouda stroomde een klein veenriviertje, dat bij Boskoop ontsproot en in de Hollandsche IJssel

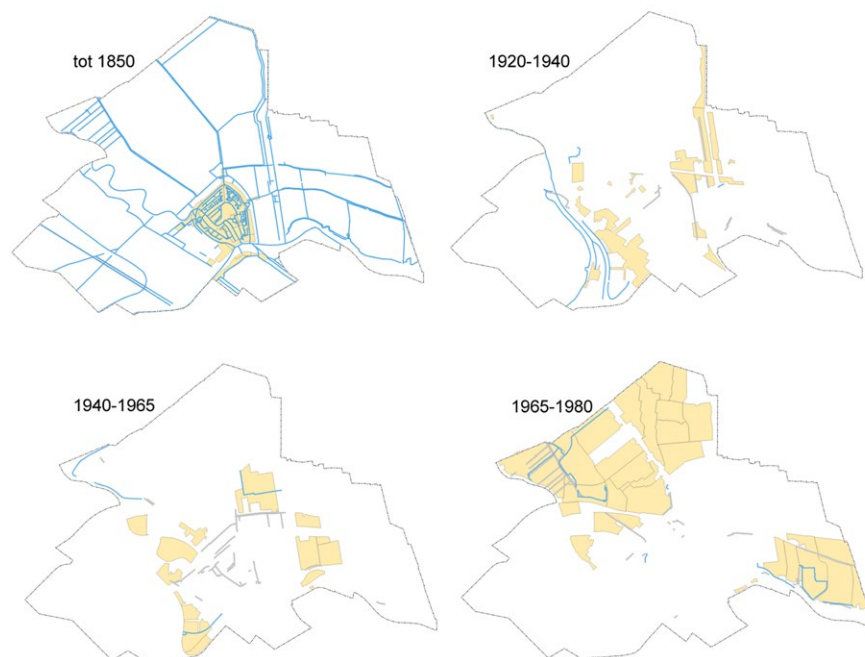
160. Groenendijk 2016c; Keunen 2016a, 2016b, 2016c.

161. Boleij 2013.

162. Gemeente Gouda & HHR van Rijnland 2012.

163. Schot 2011; Schot et al. 2015.

Afbeelding 3.10.
Kaartbeelden uit de tijdreeks van aangelegd en gedempt oppervlaktewater. In blauw: aangelegd oppervlaktewater, in grijs: gedempt oppervlaktewater. In oranje de stedenbouwkundige uitbreiding van die periode (naar: Keunen 2016a).



uitwaterde. Dat was de Gouwe, waarvan het oorspronkelijke rivierkarakter nog goed te herkennen valt in het bochtig verloop ervan ten zuiden van Boskoop.

De ontginningen van het veenmoeras vanaf de elfde eeuw onttrokken echter water aan het veen dat daardoor ging inklinken. Het maaiveld zakte tot onder het peil van de Hollandsche IJssel met wateroverlast als gevolg. Daarom moesten de ontginningen worden voorzien van lage dijkes, weteringen en uitwateringssluizen wat vervolgens weer leidde tot de vorming van polders.¹⁶⁴ Omdat elke polder een eigen afwatering op de Hollandsche IJssel kreeg, ontstond in de veertiende eeuw een bundel van weteringen aan weerszijden van Gouda.

De afwatering via de weteringen op de Hollandsche IJssel ging goed tot ongeveer 1450-1500. Daarna werd de afwatering problematischer door verlanding van de Hollandsche IJssel en een sterke bodemdaling. Daarom werden vanaf de zestiende eeuw windmolens met schepraderen ingezet voor het bemalen van de polders.¹⁶⁵ Met de introductie van de molenbemaling verloren de weteringen naar de Hollandsche IJssel hun betekenis en verdwenen geleidelijk.

Aan de bemaling door molens kwam in 1857 een einde met de bouw van een groot stoomgemaal op het uiteinde van de Fluwelensingel, dat in 1937 werd vervangen door een dieselmolen in het Stroomkanaal. Verder werd het inlaten van water noodzakelijk om de kwaliteit van het oppervlaktewater in Gouda te borgen. Om wateroverlast tegen te gaan werd Gouda een aparte boezem, dat gebeurde door de aanleg van een sluis in 1941 in de Nieuwe Gouwe.

164. Van de Ven 2001, 2003. De bedijking van de Hollandsche IJssel voltrok zich geleidelijk vanaf 1050. De voorkaden van de ontginningen langs de rivier werden aaneengesloten en verhoogd, bijvoorbeeld de Schielands Hoge Zeedijk in de dertiende eeuw.

165. Van de Ven 2001.



Afbeelding 3.11.
Deze foto uit de Goudse Courant eind 1960 toont de net droog gepompte Korte Raam waar rioleringswerkzaamheden worden uitgevoerd. In de verte de Baliebrug in de Peperstraat (bron: goudawaterstad.eu/historische-bruggen-2/baliebrug).



Dempen van grachten

Vanwege het negatieve effect van de vervuilde stadsgrachten op de volksgezondheid werd vanaf het midden van de negentiende eeuw een begin gemaakt met de riolering in de stad waardoor de open riolen ('zijlen') die vroeger in de stad voorkwamen (en op de grachten afwaterden) overbodig zouden worden (afb. 3.11). Daarna werden verschillende grachten gedempt. De eerste was in 1911 het Agnietenwatertje achter de Agnietenkapel. Ook alle andere grachtjes in de omgeving van de Nieuwe Markt werden gedempt. Het water van de Zeugstraat achter de Waag werd gedeeltelijk overkluisd. In 1930 werd de Verloren Kost gedempt. Daarna volgde de Nieuwehaven in 1940 en het gebied tussen de beide Veerstellen in 1953. Vrijwel meteen daarna, in 1954, werden ook de grachten langs de Naaiersstraat en de 'Achter de Vismarkt' gedempt, mede door de snelle opkomst van het autoverkeer. In 1961 volgde tenslotte de demping van de Raam en het Nonnenwater (afb. 3.13).¹⁶⁶

166. Bron:

goudsvirtueelsluizenmuseum.nl

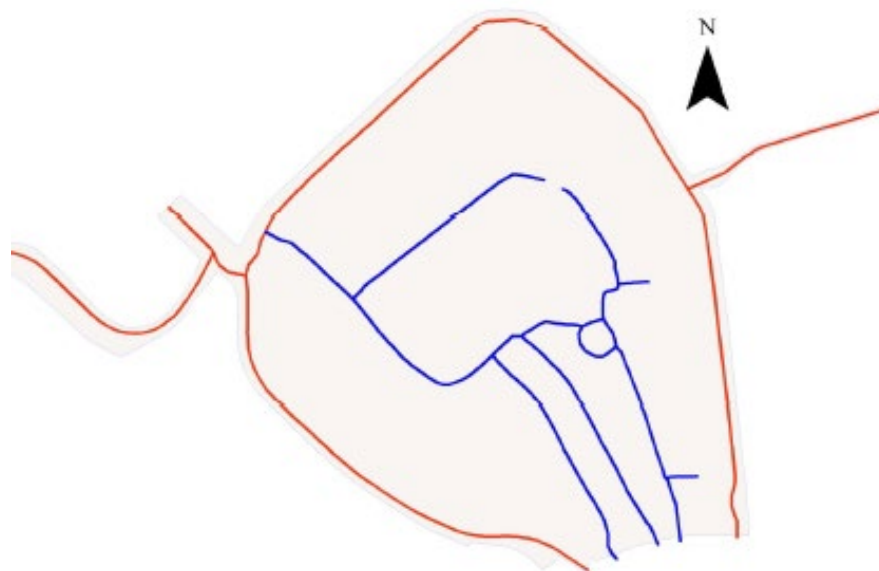
167. Boleij 2013, 9.

3.4.4 Oppervlaktewaterstelsel

In de gemeente varieert het oppervlaktewaterpeil van de polders tegenwoordig ongeveer tussen de 1,0 m - NAP en 2,3 m - NAP.¹⁶⁷ In de buurt

Afbeelding 3.12.
Oppervlaktewatersysteem
in de binnenstad (naar:
Tamboer 2007).

Twee oppervlaktewater systemen
in de binnenstad van Gouda: singels (rood)
en binnengrachten (blauw)



Korte Akkeren te Gouda bedraagt het oppervlaktewaterpeil 2,3 m - NAP. In de direct naastgelegen binnenstad is het stadsboezempeil een stuk hoger, namelijk rond de 0,7 m - NAP. Aan de zuidkant van de stad stroomt de Hollandse-IJssel. Het peilverschil tussen de stadsboezem en de Hollandsche IJssel fluctueert vanwege het getijdeverschil in de Hollandsche IJssel. Het waterpeil in de Hollandsche IJssel varieert tussen 0,85 m - NAP en 1,9 m NAP (gemiddeld 0,55 m NAP). Ten westen stroomt het Gouwe kanaal met een gemiddeld peil van 0,6 m - NAP. De Gouwe is onderdeel van de Rijnlandse boezem. De polder ten zuiden van Gouda heeft een peil tussen de 2,0 en 2,6 m - NAP. Ten westen van Gouda ligt de diep uitgeveende Zuidplaspolder met oppervlaktewater peilen tussen 5 en 7 m - NAP. Ten noordwesten van Gouda varieert het peil tussen de 2 en 3 m - NAP.

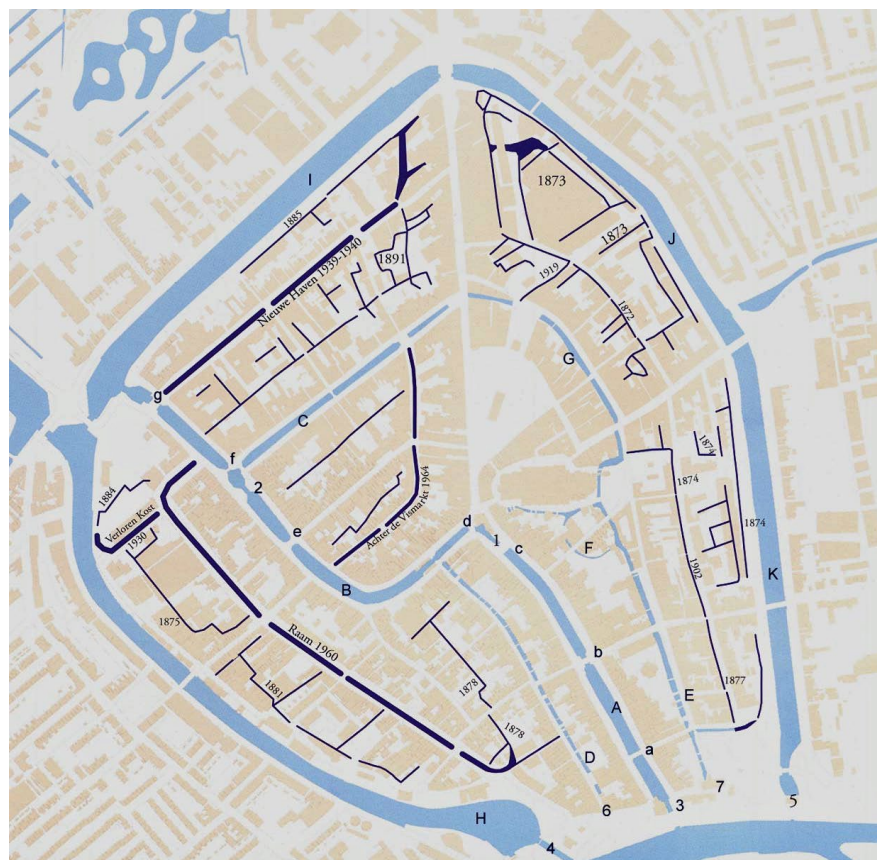
Stadsboezem Gouda

Het water in de Goudse binnenstad vormt een apart watersysteem, met een eigen waterpeil en wordt de Stadsboezem Gouda genoemd.¹⁶⁸ Tot de Tweede Wereldoorlog was deze boezem nog onderdeel van de Rijnlandse boezem. In 1943 is de Kock van Leeuwenduis aangelegd om deze verbinding te verbreken. Doel was onder andere om de binnenstad te beschermen tegen de grotere peilfluctuaties. Daarna is het peil in de Goudse stadsboezem met 10 cm verlaagd naar de huidige 0,72 m - NAP. Dit is 10 cm lager dan het peil van de Rijnlands boezem (0,6 m - NAP), waar ook de Gouwe deel van uitmaakt.¹⁶⁹

168. Tamboer 2007; Gemeente Gouda & HHR van Rijnland 2012.

169. Het peil van de Stadsboezem en de Gouwe wordt continue gemeten bij De Kock van Leeuwenduis.

Afbeelding 3.13.
Waterwegen in de
binnenstad (bron: Arends
2007).



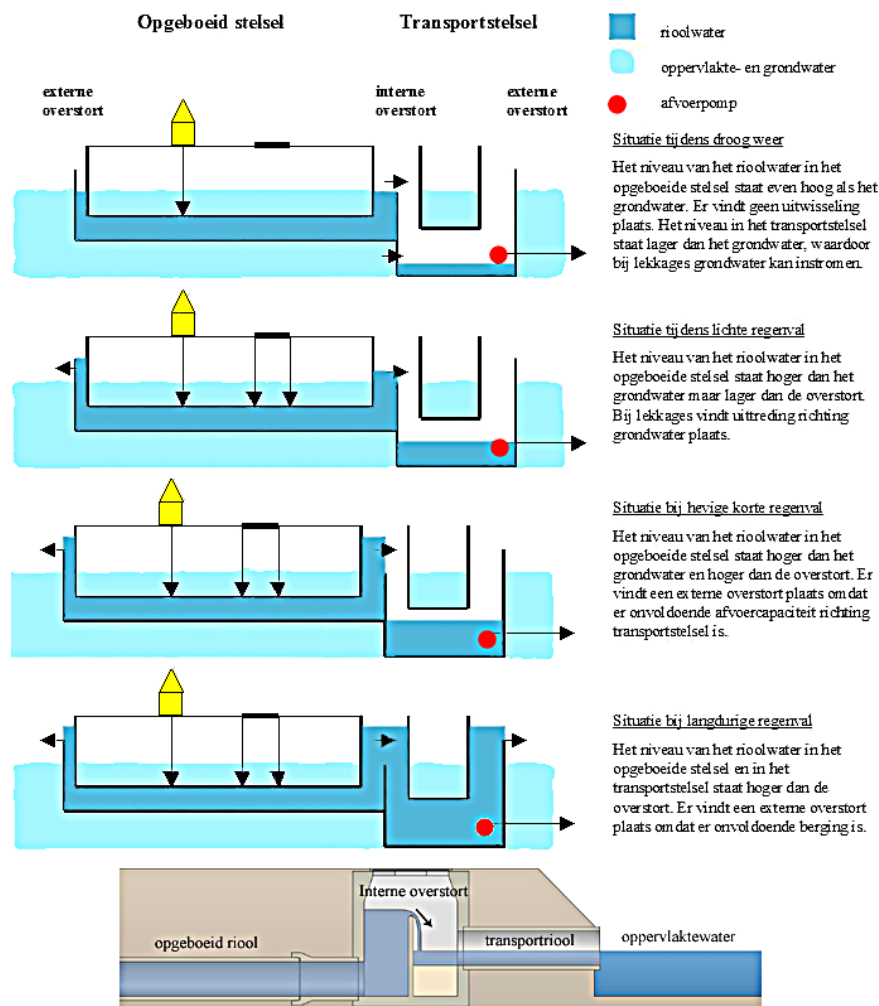
Sluizen	Waterwegen	Bruggen
1 = Donkere Sluis	A = Haven	a = Uiterste Brug
2 = Amsterdams Verlaat	B = (Binnen)Gouwe	b = Noodgodsbrug
3 = Havensluis	C = Turfmarkt	c = St. Jansbrug / Sluisbrug
4 = Mallegatsluis	D = Peperstraat	d = Hoornbrug
5 = Hanepraaisluis	E = Spieringstraat	e = St. Joostbrug
6 = Kleine Volmolen	F = Motte	f = Dirck Crabethbrug
7 = Grote Volmolen	G = Zeugstraat	g = St. Remeijnsbrug
	H = Turfsingel	
	I = Kattensingel	Gedempte grachten
	J = Bleekerssingel	1919 naam of jaartal demping
	K = Fluweelsingel	

De stadsboezem bestaat uit twee subsystemen die grotendeels naast elkaar functioneren (afb. 3.12). Dit zijn het watersysteem van de singels en dat van de binnengrachten (afb. 3.13). In de stadsboezem Gouda is maar een zeer beperkte fluctuatie in het waterpeil toegestaan, enerzijds ter bescherming van het funderingshout en mogelijke schade aan constructies (niet te laag), anderzijds om wateroverlast te voorkomen (niet te hoog).

Peilbeheer en wateroverlast

Om het waterpeil in de stadboezem en in de omliggende polders gedurende een droge periode te handhaven kan water worden ingelaten bij De Kock van Leeuwensluis. In een situatie met neerslag zullen de drie omliggende polders Spruit, Willens en Reeuwijk hun water uitslaan op de Stadsboezem

Afbeelding 3.14.
 Het opgeboeide rioolstelsel
 in Gouda (naar: Schot et al.
 2015, 25).



via de gemalen Spruit, Willens en Burgvlietkade. Het overtollige water in de Stadsboezem wordt vervolgens uitgemalen door de gemalen Hanepraai en Mallegat. Deze kunnen gemakkelijk een waterpiek opvangen door hun hoge maalcapaciteit en het relatief kleine achterliggende gebied dat bemalen wordt.

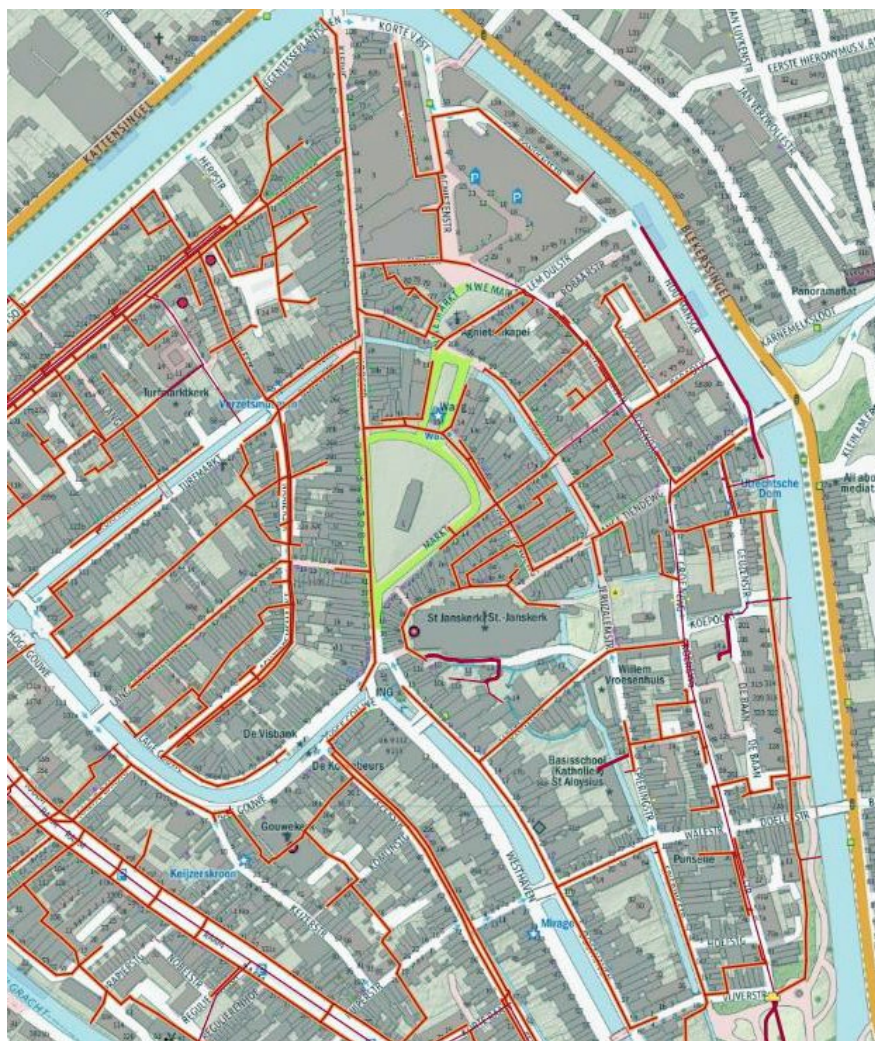
De binnenstad (ca. 75,2 hectare) bestaat voor bijna 46 hectare (61%) uit verhard oppervlak (gebouwen, wegen, parkeerterreinen e.d.) waarvan 82% is aangesloten op het riool. De overige 18% is niet aangesloten op het riool en hier stroomt bij een stevige regenbui het water direct de open watergangen in.¹⁷⁰ Wateroverlast in de binnenstad tijdens een stortbui wordt daarom voornamelijk veroorzaakt door geblokkeerde straatkolken en kolkleidingen en schuin aflopende straatniveaus.¹⁷¹ Door het steeds groter wordend oppervlak aan verhard terrein in de stad is er bij hevige regenval een toenemende kans op wateroverlast.¹⁷²

170. Het totale oppervlak open water in de binnenstad (inclusief de singels) is 14,2 hectare (18,9 % van het totaal).

171. Tamboer 2007; Gemeente Gouda 2004, 20; Schot et al. 2015.

172. Gemeente Gouda 2012.

Afbeelding 3.15.
Het rioleringsysteem in
de Goudse binnenstad (uit:
Keunen 2016a).



3.4.5 Rioleringsstelsel

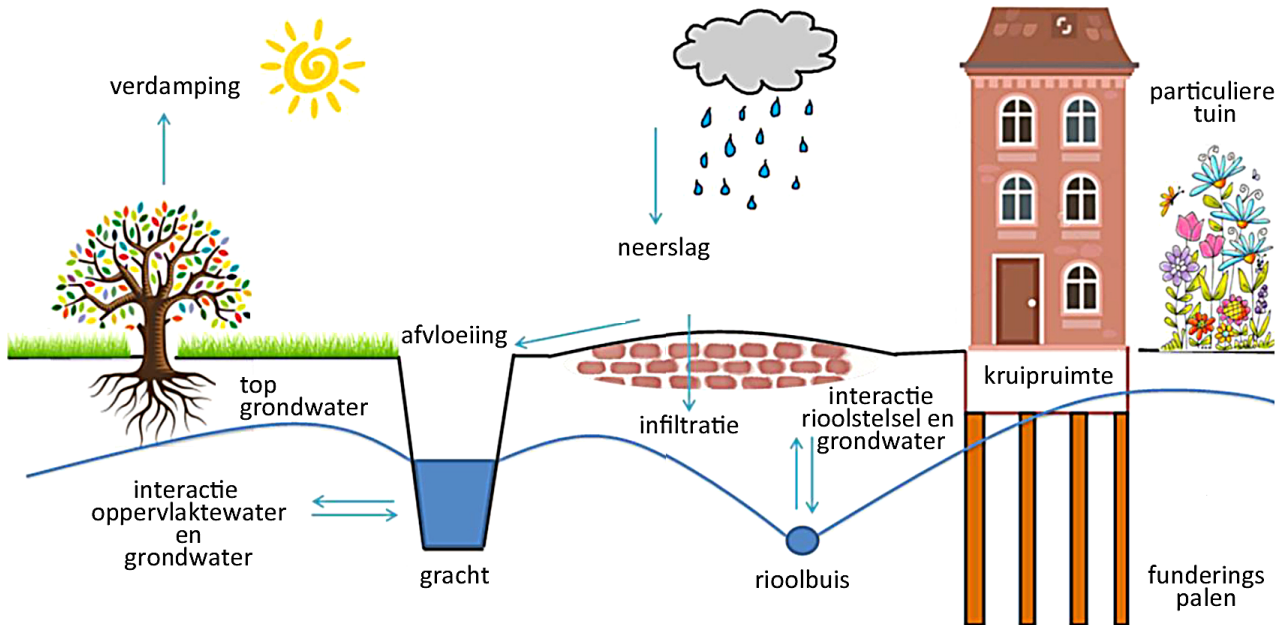
In de binnenstad van Gouda en de andere vooroorlogse wijken is het rioolstelsel gemengd. Er bestaat een opgeboeid stelsel en een bemalen rioolstelsel met transportriolen.¹⁷³ Een opgeboeid stelsel is een rioolstelsel dat altijd vol staat met rioolwater wat wordt afgevoerd via een interne overstort op een bemalen transportriool (afb. 3.14). Dit wordt gedaan om te voorkomen dat de grondwaterspiegel daalt omdat het grondwater wegstroomt via lekken en breuken in de riolering. Deze worden veroorzaakt door de zettingsgevoelige ondergrond, vooral bij aansluitpunten tussen bijvoorbeeld op stuit onderheide huizen en de niet-onderheide riolen. Of andersom, doordat de particuliere rioolaansluitingen niet onderheid zijn en het gemeentelijk deel wel. Afbeelding 3.15 geeft het rioolstelsel in een deel van de binnenstad weer.¹⁷⁴

Het infiltrerende water uit het riool beïnvloedt de grondwaterstand in de stad¹⁷⁵ die daardoor ongeveer op polderpeil blijft. Dat is noodzakelijk om

173. Tamboer 2007; Schot et al. 2015, 23 e.v., Wang 2016.

174. Een kaartlaag met de riolering van de binnenstad en de rioolgemalen zijn opgenomen in een GIS (zie afb. 3.15). Hierin staan zowel de persleidingen (drukleiding, pertransportleiding) als het rioolsysteem (opgeboeid, bemalen, regenwaterriool, spoelleiding) (Keunen 2016b).

175. Wang 2016.



Afbeelding 3.16.
Model voor het
grondwatersysteem in de
Goudse binnenstad (naar:
Wang 2016, 41).

bijvoorbeeld paalrot van de houten funderingen en het verzakken van huizen te voorkomen. Het nadeel is wel dat er geen waterberging in de gevulde rioleringsbuizen mogelijk is, waardoor een teveel aan water alleen door het wegpompen vanuit de overstort mogelijk is. Een ander nadeel is dat het afvalwater wordt gemengd met regenwater. Dit gemengde water wordt door één transportriool afgevoerd naar de afvalwaterzuiveringsinstallatie. Verder functioneert een deel van het rioolstelsel onbedoeld als drainagestelsel, met andere woorden er lekt onbedoeld rioolwater weg, waarbij met name de oudere rioolbuizen een lagere grondwaterstand realiseren dan bedoeld.¹⁷⁶

In de actualisatie van het Waterplan Gouda¹⁷⁷ is voorzien in het ombouwen van het bestaande opgeboeide gemengde rioolstelsel. Regenwater wordt via een regenwaterriool gescheiden afgevoerd naar het oppervlaktewater en met een infiltratie/drainagestelsel (onderwaterdrains) wordt de grondwaterstand op het gewenste peil gehouden, zodat houten funderingspalen (en andere kwetsbare materialen) beter geconserveerd blijven. De gebieden Kort Haarlem, Nieuwe Park en Korte Akkeren zijn reeds voorzien van onderwaterdrains. De werking wordt gemonitord door middel van peilbuizen. Uitgangspunt is dat de riolering in de vooroorlogse wijken - dus buiten de binnenstad - als eerste opgeknapt moeten zijn.¹⁷⁸ Volgens de huidige aanpak is dit in 2030 klaar.¹⁷⁹

3.4.6 Grondwatersysteem

Regenwater dat op een onverharde bodem valt, zakt voor een belangrijk deel in de bodem weg. Dit wordt infiltratie of wegzijging genoemd (afb. 3.16). Een kleiner deel verdamt of stroomt ondergronds naar het oppervlaktewater. Slechts een beperkt deel stroomt bovengronds af naar oppervlaktewater.

176. Ibid., 77.

177. Gemeente Gouda & HHR van
Rijnland 2012.

178. Ibid.

179. Schot et al. 2015, 71.

In verhard gebied is nauwelijks of geen infiltratie mogelijk. Vrijwel al het hemelwater stroomt hier direct af naar het oppervlaktewater (§ 3.4.4) of via regenkolken naar de riolering.¹⁸⁰

Bodemdaling in steden kan op verschillende manieren gerelateerd zijn aan grondwaterstanden.¹⁸¹ Daarom is gekeken in hoeverre bestaande grondwatergegevens uit de gemeente Gouda gebruikt kunnen worden in het onderzoek naar de mechanismen en oorzaken van bodemdaling. Hiervoor zijn onder andere de grondwaterstanden uit peilbuizen in de gemeente Gouda en directe omgeving verzameld en geanalyseerd. De peilbuisgegevens geven zowel het stijgvlooi van het ondiepe grondwater over de tijd weer, als (de overdruk) vanuit het diepere eerste watervoerende pakket.¹⁸²

Grondwaterdynamica

De gemeente Gouda heeft al ruim 25 jaar de beschikking over een systematisch grondwatermeetnet.¹⁸³ Dit meetnet bestaat uit tientallen over een groot gebied verspreide peilbuizen die regelmatig, soms tweewekelijks, worden bemeaten. Metingen uit ondiepe filters (in de regel enkele meters onder maaiveld) geven de feitelijke grondwaterstand. Metingen uit diepere filters (in Gouda van 10 tot ongeveer 60 m - mv) geven de stijghoogtes vanuit de watervoerende (zand)ondergrond.¹⁸⁴ Voor een eerste beschrijving van het vaak complexe(re) grondwatersysteem is dit belangrijk omdat wanneer de stijghoogte vanuit de diepere ondergrond tot (bijna) aan het maaiveld reikt het ondiepe grondwater hiermee wordt aangevuld. Dit wordt kwel genoemd.¹⁸⁵ Wanneer de stijghoogte niet zo hoog is werkt het andersom: dan kan het ondiepe grondwater weglekken naar diepere lagen (verticale wegzijging of infiltratie). Aan de oostkant van Polder Korte Akkeren vond in het recente verleden bijvoorbeeld een grote diepe industriële grondwateronttrekking plaats die – kort door de bocht gesteld - de stijghoogte in een groot gebied beïnvloedde en waardoor het grondwaterpeil 10 tot 20 cm lager bleef (afb. 3.17).¹⁸⁶

Door ophogingen, afgravingen, maar ook door peilvariatie van de grondwaterstand, treden veranderingen op in de druk tussen de bodemdeeltjes onderling (de korrelspanning genoemd) en in de waterdruk.¹⁸⁷ Water in de bodem 'drukt' de bodemdeeltjes iets uit elkaar en minder waterdruk leidt dus tot meer in elkaar gedrukte bodemdeeltjes. Hoe groter de druk op de bodemdeeltjes, hoe groter de zakking. Door een verlaging van de grondwaterstand kunnen er dus zakkings optreden en de stijghoogte vanuit de ondergrond kan toenemen. Neemt het gewicht toe, bijvoorbeeld door het ophogen van het maaiveld, dan neemt eveneens de korrelspanning in de bodem (aanzienlijk) toe, wat in samendrukbare grond zakking veroorzaakt. Dit zakkingsproces duurt daarna meestal een groot aantal jaren waarbij de zakkingsnelheid geleidelijk afneemt (afb. 3.3 en 3.4).¹⁸⁸

Hydrologie

In de wijk Kort Haarlem, direct ten oosten van de binnenstad, ligt de

180. Zie bijvoorbeeld: Wang 2016.

181. Van de Ven & Rijsberman 1999.

182. Zie bijvoorbeeld: Wang 2016.

183. Marang 2015.

184. Ritzema et al. 2012.

185. Dit wordt uiteraard bemoeilijkt door eventueel voorkomende ondoorlatende tussenlagen, zoals een continue en vette kleilaag.

186. Boleij 2013.

187. Leenen 1999.

188. In eerste instantie neemt ook de waterdruk toe (wateroverspanning) wat de zetting (in theorie) kan vertragen. Als deze wateroverspanning weg kan vloeien (door verticale of zijwaartse wegstroming van grondwater, wat meestal het geval is) dan is deze vertraging echter van tijdelijke aard, maar met name in slecht doorlatende bodems (klei, veen) kan de periode van wateroverspanning decennia lang duren.



Afbeelding 3.17.
Uitsnede van het kaartbeeld met vast stellen grondwatercriteria en invloedssferen van grondwateronttrekking door Croda (in rood) (uit: Keunen 2016a).



grondwaterstand rond de 1,8 m - NAP, ongeveer 0,2 tot 0,4 m - mv. In de wijk Plaswijck (noordoosten) ligt grondwaterstand rond 2,2 m - NAP (0,2 tot 0,6 m - mv). In de polders ten zuiden bedraagt de grondwaterstand ongeveer 2 m - NAP.¹⁸⁹ In de historische binnenstad ligt het gemiddelde grondwaterniveau tussen de 0,7 en 0,8 m - NAP.¹⁹⁰ Dat is op stadsboezempeil maar op diverse plaatsen

in de binnenstad van Gouda is soms sprake van overlast als gevolg van te hoge of te lage grondwaterstanden, vaak in dezelfde gebieden.¹⁹¹ Rond de Turfmarktgracht bedraagt de drooglegging bijvoorbeeld maar enkele centimeters (afb. 3.18). De stijghoogte van het grondwater in het eerste watervoerende pakket ligt in de binnenstad tussen NAP -3 m in het oosten en NAP -5 m in het westen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het grondwater naar beneden wegzijgt: het is een infiltratiegebied.¹⁹² Deze wegzijging wordt in het gemeentelijk rioleringsplan ingeschat tussen de 0,8 en 2,5 mm per dag.¹⁹³

Uit peilbuisgegevens blijkt dat de jaargemiddelde stijghoogte in Polder Korte Akkeren, ten zuidwesten van de binnenstad, ongeveer 2,5 m - NAP bedraagt, iets lager dan het oppervlaktewaterpeil van 2,32 m - NAP, dus ook hier is sprake van wegzijging.¹⁹⁴ Ook ten westen van het Gouwe kanaal en ten zuiden van de Hollandsche IJssel treedt wegzijging op (0,5 tot 2,0 mm per dag) zoals bij de Reeuwijkse plassen en nabij de grote rivieren.

189. Tamboer 2007; Boleij 2013, 6.

190. Tamboer 2007; Schot 2011.

191. Schot et al. 2015.

192. Tamboer 2007, 39.

193. Schot 2011; Schot et al. 2015.

194. Boleij 2013, 6.

Afbeelding 3.18.
De Turfmarkt (bron: Google Streetview).



In vrijwel geheel Gouda vindt dus wegzijging plaats van grondwater naar het eerste watervoerende pakket; van diepere kwel of nalevering aan het ondiepere grondwater is geen sprake.¹⁹⁵ Daarnaast stroomt grondwater weg in de richting van de Zuidplaspolder, waar het als kwel aan het oppervlak komt, dit ondanks de geringe stijghoogte in deze polder (6 m - NAP). De kwel (tenminste 0,25 tot maximaal 5 mm per dag) vindt plaats omdat dit een zeer diepgelegen polder is ten opzichte van de omliggende polders.

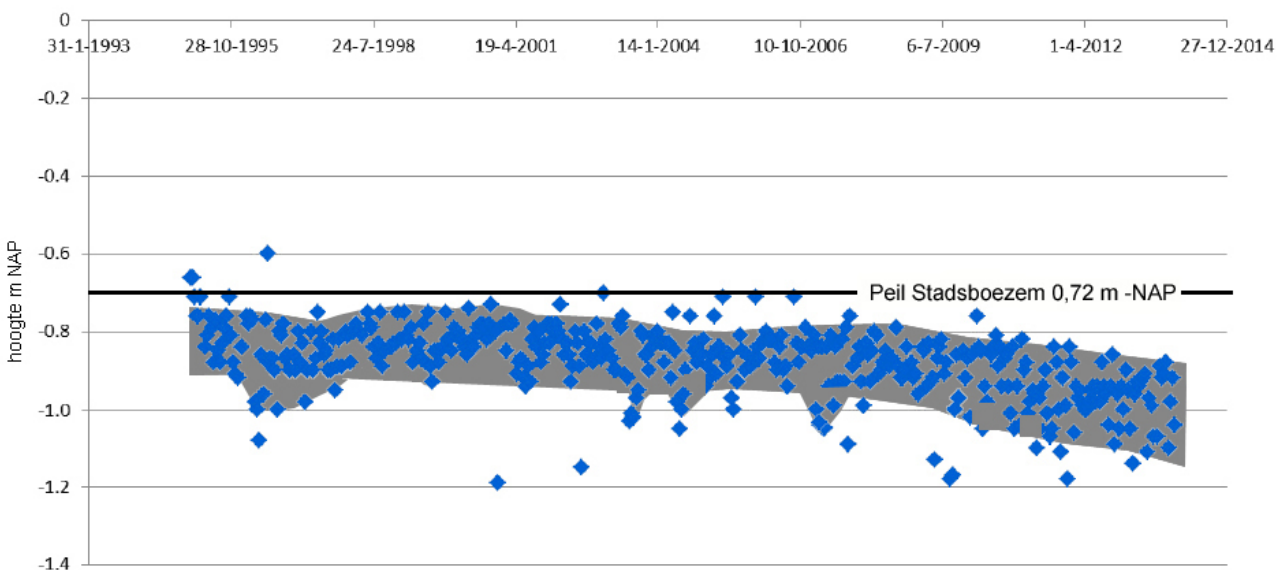
195. Tamboer 2007; Huisman 2017.

196. Marang 2015, fig. 3.9.

Grondwatertrends

In afbeelding 3.19 is een grafiek opgenomen met de grondwaterstand in een van de peilbuizen in de binnenstad tussen 1994 en 2014.¹⁹⁶ Zonder dat een uitgebreide statistische analyse heeft plaatsgevonden lijken de grondwaterspiegel fluctuaties - dat wil zeggen de grondwaterpeilen in droge en nattere perioden van het jaar - in de loop van de tijd iets toe te

Afbeelding 3.19. Verloop van de grondwaterstand in 'peilbuis 9' in de binnenstad tussen 1994 en 2014 (bron: Marang 2015, fig.3.9).



nemen.¹⁹⁷ Met name in de periode 1997-2001 is relatief weinig variatie in de grondwaterstanden te zien, tussen 0,75 en 0,9 m - mv. Verder is te zien dat - op deze peilbuislocatie - de gemiddelde grondwaterstand langzaam lager wordt, van ongeveer 0,8 naar 1,0 m - mv. Het boezempeil is in de meetjaren met 0,72 m - NAP echter gelijk gebleven. Het verschil tussen de grondwaterstand en het boezempeil is in de loop der jaren dus (ongewenst) toegenomen. Ook direct ten westen van de stad, in de wijk Mallegatswije is een afname te zien (afb. 3.21).

Voor een definitieve verklaring van de afname van de grondwaterstand in de peilbuis in de binnenstad tussen 1994 en 2014 zal aanvullend onderzoek uitgevoerd moeten worden, maar het kan verschillende oorzaken hebben. Wellicht dat dit samenhangt met een toename van de interne overstort in het rioolstelsel waardoor er toch een (ongewenste) vorm van drainage kan zijn ontstaan?¹⁹⁸ Uit het onderzoek voor het project Nieuwe Haven bleek bijvoorbeeld dat de invloed van het open water (lees: boezempeil) op de grondwaterstand gering kan zijn omdat de veelal oude riolering een lager grondwaterpeil realiseert onder de omliggende bebouwing.¹⁹⁹

Een andere mogelijkheid is een afname van de stijghoogte door industriële grondwateronttrekking direct ten zuiden van de binnenstad (Croda) waarvan de invloedssfeer op de stijghoogten 3,5 tot 4,5 km vanaf de winputten bedraagt.²⁰⁰ In de wijk Korte Akkeren en de Binnenstad (direct nabij de onttrekking) werd een lagere stijghoogte berekend van -1,7 meter, de stijghoogteverlaging op 50 meter afstand van de winning bedroeg ongeveer -1 m, en de stijghoogteverlaging aan de rand van deze wijken bedroeg minimaal -0,2 meter. Door Boleij (2013) werd berekend dat door het stopzetten van de grondwaterwinning een toegenomen stijghoogte zou leiden tot een grondwaterstandverhoging van maximaal 10 cm.

Voor een breder ruimtelijk beeld van de grondwatertrends in Gouda zijn door Hans Huisman (RCE) in 2017 de gegevens van 42 peilbuizen bekeken en gecontroleerd, waarna er 24 reeksen overbleven.²⁰¹ Deze vormen ruimtelijk helaas geen mooie dekking over de gemeente en meetreeksen van verschillende peilbuizen volgen elkaar in de tijd op. Daarom kunnen alleen enkele algemene trends in de peilbuisgegevens worden waargenomen.²⁰² Zoals eerder vermeld ligt de stijghoogte van het grondwater in de diepere watervoerende pakketten in het centrale deel van de gemeente vrij diep, 2 tot 6 m - mv. De ondiepe grondwaterstanden worden dus vooral gedomineerd door regenval, verdamping en interactie met het oppervlaktewater aan de ene kant, en wegzijging aan de andere. Opvallend aan de bestudeerde reeksen is dat het diepere grondwater in de periode 1960-1985 lagere stijghoogtes lijkt te hebben gehad dan daarvoor en daarna. Hier is mogelijk een van de effecten van de industriële onttrekking in te zien.²⁰³ Ook het ondiepe water lijkt vrij diep te staan en wordt sterk beïnvloed door de seizoenen. Van de ondiepe grondwaterstanden laten de meetreeksen in het oostelijke deel van de gemeente de duidelijkste variatie zien (afb. 3.20).

197. Marang 2015, 15.

198. Ibid.

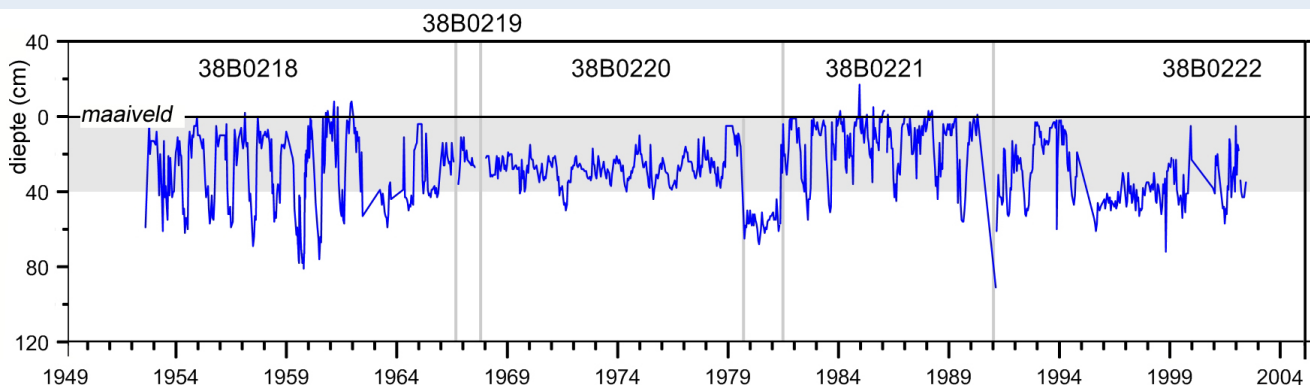
199. Den Nijs 2015, 5; Wang 2016.

200. Boleij 2013. Na 1994 is (tot op heden) gemiddeld 1,1 miljoen kubieke meter (m³) per jaar gewonnen, onderverdeeld over 0,45 miljoen m³ per jaar uit het tweede watervoerend pakket en 0,65 miljoen m³ per jaar uit het eerste watervoerend pakket.

201. Huisman 2017. Achttien vielen er af; sommigen lagen te ver buiten de gemeente, bij andere miste essentiële informatie, en in één geval waren er twijfels over de kwaliteit van de gegevens.

202. Huisman 2017, discussie.

203. Ibid. Boleij 2013, 4: In 1961 bedroeg de jaarlijkse onttrekking 0,5 miljoen kubieke meter (m³) per jaar, tot juni 1971 opgevoerd naar 4,5 miljoen m³ per jaar waarvan 2,9 miljoen m³ uit het eerste watervoerend pakket en 1,6 miljoen m³ uit het tweede watervoerende pakket. Van 1971 tot 1984 is gemiddeld 3,5 miljoen m³ per jaar onttrokken, waarvan 2,2 miljoen m³ per jaar uit het eerste en 1,3 miljoen m³ per jaar uit het tweede watervoerend pakket. Vanaf 1984 is de winning uit het tweede watervoerend pakket gestaakt.



Afbeelding 3.20. Verloop van de grondwaterstand in deelgebied oost tussen 1953 en 2003 samengesteld door Hans Huisman (Huisman 2017).

Trends in 'oost' (1953-2002)

Groep oost²⁰⁴ in afbeelding 3.20 bestaat uit de opeenvolgende meetreeksen van vijf ondiepe peilbuisputten in de wijk Kort Haarlem (putten 38B0218 t/m -222) en zijn door Hans Huisman (RCE) geanalyseerd. Deze meetreeksen betreft echter niet één vaste locatie; de vijf putten staan binnen een afstand van ongeveer 250 meter van elkaar.

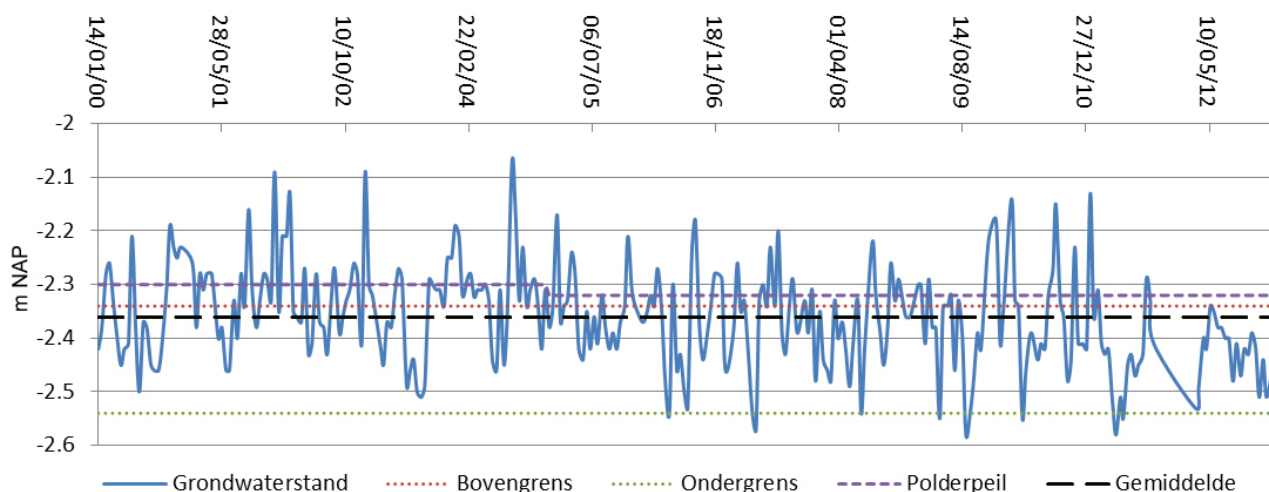
Huisman (2017): '...In de samengestelde tijdreeks valt allereerst de sterke seizoensgebonden grondwaterstandsfluctuatie voor 1962 op: van 0 tot 80 cm - mv. Deze begint rond 1962 af te nemen. In de periode tot 1968 stijgt de grondwaterstand licht en is daarna tot 1978 vrij stabiel tussen 15 en 30 cm - mv en komt slechts zelden dieper dan 40 cm - mv. De breuken in 1979 en 1981 (door nieuwe inmetingen en het vervangen van de put in 1981) verstoren het beeld, maar het lijkt er op dat er vanaf ongeveer 1979 een vernatting optreedt, waarbij het grondwater vaak vlak onder het maaiveld staat, met in de zomers kortdurende periodes waarin het niveau daalt tot 35 - 55 cm. Een volgende breuk door een nieuwe put in 1991 verstoort het beeld weer enigszins, maar er lijkt een periode met drogere omstandigheden op te treden na 1995 (wanneer de wijk Goverwelle is gebouwd, afb. 2.8), met laagste grondwaterstanden rond 60 cm - mv, gevolgd door een periode waarin het grondwater zich herstelt tot rond 2000 waarbij jaar het grondwater stijgt tot ongeveer 25 cm - mv. Daarna is de reeks incompleet; het lijkt er op dat nattere en drogere periodes elkaar op korte termijnen afwisselen...'

De vier putten met ondiepe filters die de Zuid-binnenstad groep vormen (Korte Akkeren) geven helaas slechts enkele korte meetreeksen, van 1959 tot 1965. In deze periode is een aanzienlijke seizoensfluctuatie te zien in de, met waterstanden tussen 1,8 m - mv in drogere zomers en 0,8 m - mv in natte winters. De stijgende trend in het ondiepe grondwater vanaf begin jaren negentig van één put²⁰⁵ - als dat geen mismeting is - kunnen samenhangen met geleidelijke veranderingen in waterbeheer of inrichting, of met bodemdaling. In al deze gevallen geldt echter dat het aantal meetpunten en het potentiële effect van meetfouten en aanpassingen aan de put het niet toelaat om nadere conclusies te trekken. Grondwatertrends in de door Boleij

204. Huisman 2017, 'Oost'.

205. Peilbuisnummer 38A0257.

Gemeten grondwaterstand in Korte Akkeren te Gouda in wijk Mallegatswije (peilbuis 2-1.10)



Afbeelding 3.21. Verloop van de grondwaterstand in peilbuis 2-1.10 (Mallegatswije) tussen 2000 en 2013 (bron: Boleij 2013).

(2013) geanalyseerde waterputten in hetzelfde gebied, nabij de Croda-grondwaterwinning en Mallegatswije (afb. 3.21), laten, samen met de enkele peilbuisreeks voor de binnenstad (afb. 3.19) eerder een licht dalende trend zien.

Conclusies en kanttekeningen

De peilbuisgegevens geven in algemene zin waardevolle informatie over de manier waarop het grondwatersysteem ter plaatse werkt.²⁰⁶ Ze zijn echter te schaars en te fragmentarisch (in ruimte en tijd) en bevatten te veel data-artefacten om op een zinvolle manier vergelijkingen te maken met bodemdalingen en bedreigingen voor erfgoed.²⁰⁷ Er is na het vergelijken van meerdere datasets wel enige lijn te zien in de grondwatertrends. Zo lijkt er een langjarige trend naar lagere gemiddelde grondwaterstanden op te treden, met name na 2005, in de binnenstad (tijdreeks 2004-2014) en direct ten zuiden en oosten daarvan. Het is echter te vroeg om de oorzaken en gevolgen te bepalen. Daarvoor is te weinig gekeken naar de representativiteit van deze reeksen en de wijze van grondwaterstandbepaling.²⁰⁸ De diepte van de grondwaterspiegel in de binnenstad vormt zeker geen continue lijn. Deze kan (gekoppeld aan de grote hoogteverschillen) lokaal zeer sterk verschillen en zou in kaart gebracht moeten worden ten behoeve van het inschatten van funderingsrisico's bij grondwaterstandverlaging.

De langste tijdreeks (1953-2002) die eventueel vergeleken kan worden met de informatie over de polderpeilen is die voor het oostelijke deel van de gemeente, maar dit is een samengestelde reeks. In alle bestudeerde reeksen zijn grote (afb. 3.20) verschillen te zien tussen droge en natte perioden (zomer- en winterpeil), ook in de binnenstad. Waar deze door worden veroorzaakt is niet duidelijk, maar het ligt voor de hand dat voor de kwetsbare funderingen de zomergrondwaterstand niet te diep moet wegzakken.

206. Van de Ven & Rijsberman 1999; Wang 2016.

207. Ritzema et al. 2012; Wang 2016; Huisman 2017, conclusie.

208. Ritzema et al. 2012.

3.5 Wat heeft het civieltechnisch onderzoek ons geleerd

Peilbeheer

De ontwikkeling van de verschillende polders of peilbesluitgebieden kon met de verzamelde gegevens redelijk sluitend in kaart worden gebracht. Daarmee werd de reeks verschillende peilbesluiten tot 1865 teruggevoerd (afb. 3.5), gekoppeld aan een grote serie kaarten in een GIS waarin de historische begrenzing van polders, boezems en peilvakken tussen 1879 en 2013 zijn opgenomen.

Uit de historische gegevens blijkt dat 'verlagen van het polderpeil' (peilindexatie) meestal volgt uit een daling van het maaiveld (afname van de drooglegging). Uit onderzoek blijkt dit echter averechts te werken omdat dit het proces van bodemdaling in stand houdt en soms zelfs versterkt,²⁰⁹ mede omdat blijkt dat er in de praktijk lagere peilen werden gehanteerd dan het vastgestelde peil. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen waarom er zo regelmatig en soms zoveel onder het vastgestelde peil gemalen werd. Voldeed het vastgestelde peil bijvoorbeeld niet meer door voortgaande bodemdaling?

Verder heeft waterpeilverlaging ook een effect op de diepe stijghoogte. Het drukverschil tussen de klei- en veenlagen (met water) en de vaste zandondergrond wordt kleiner met een grotere stijghoogte als gevolg, wat in kwelgebieden tot wellen en opbarsten van lagen kan leiden. In infiltratiegebieden (het grootste deel van Gouda) leidt verlaging van het (grond)waterpeil eveneens tot toename van de stijghoogte door een lagere drukbelasting. Industriële grondwateronttrekkingen verlaagt eveneens de stijghoogte, met een (potentiële) grondwaterdaling en extra zetting tot gevolg.

Een belangrijk terugkoppelingsmechanisme tussen grondwaterstanden en bodemdaling komt voort uit het ophogen en bebouwen van het maaiveld. Door een toename van het gewicht neemt de druklast van de deklaag op het watervoerende pakket toe wat tot hogere grondwaterspiegels kan leiden. Zetting wordt goeddeels veroorzaakt door het onder druk wegpersen van water (en lucht) en verhoging van de waterdruk kan, door de toename van de waterspanning, verminderde zetting van de ondergrond ten gevolge hebben.²¹⁰ Dit is een goede reden om de waterspiegels (lees: de grondwaterdruk) hoog te houden, naast de betere bewaarcondities die het biedt voor de houten funderingen, zij het dat het effect van een hoge waterdruk mettertijd minder zal worden door herstel van het evenwicht met de diepe stijgdruk.

Om dezelfde reden moeten peilfluctuaties worden tegen gegaan. Wegvallen van waterdruk leidt tot versnelde zetting, zeker wanneer de ondergrond nog

209. Jansen, Querner & Kwakernaak
2008.

210. Zaadnoordijk & Wonink 1995.



niet over-geconsolideerd is. Peilfluctuaties kunnen worden tegengegaan door drainage als er teveel water in de bodem komt (om wateroverlast, vochtotrekking e.d. tegen te gaan) en infiltratie (in de stad bijvoorbeeld een vorm van onderwaterdrainage) bij een watertekort. Het gebruik van deze laatste methodes om de bodemdaling af te remmen heeft wel een substantiële toename van de watervraag tot gevolg.

Een voor de hand liggende maatregel om de maaiveldddaling in het buitengebied te vertragen is, net als in de binnenstad al gebeurt, het verkleinen van de drooglegging. Veranderingen in het peilbeheer zouden hier gericht moeten zijn op een zo hoog mogelijke grondwaterstand in de zomer, omdat de gemiddeld laagste grondwaterstand bepalend is voor maaiveldddaling door veenoxidatie.²¹¹

Wateroverlast

Door het steeds groter wordend oppervlak aan verhard terrein (gebouwen, wegen, parkeerterreinen e.d.) en als gevolg van klimaatverandering is er bij hevige regenbuien meer kans op wateroverlast. Daarom is compensatie van waterberging nodig.²¹² Het verminderen van de afvoer naar de stadsboezem of het vergroten van gemaalcapaciteit zijn contraproductief waar het om het verminderen van bodemdalingen omdat je een deel van de druklast (gewicht) van het extra water op de bodem wegneemt.²¹³ Dit geldt ook voor het graven van extra watergangen (of het opnieuw opengraven van de gedempte grachten). Ook dan haal je een deel van het gewicht weg en verminder je de waterdruk in de slappe ondergrond. Verder heeft dit relatief weinig effect omdat dit door de toegestane peilstijgingen maar weinig extra berging oplevert. Opengraven van de gedempte grachten lost het probleem dus niet op. Verbeterde retentie van water dat tijdens piekneerslag moet worden opgevangen om wateroverlast te voorkomen kan beter gezocht worden in bovengrondse opslagbekkens.²¹⁴

Zakking

Met betrekking tot de bodemdaling in Gouda (en dat geldt voor veel andere binnensteden) zijn weinig gegevens beschikbaar.²¹⁵ In de binnenstad van Gouda is de schatting in de orde van enkele millimeters per jaar en kan voor ruim 95% worden verklaard uit zetting door het enorme gewicht van de stadslagen en gebouwen op het veen. In omliggend landelijk gebied zijn de zakkingen groter (§ 1.3.3). Deze absolute zakking werd in het verleden in het waterbeheer met peilaanpassingen en het voorafgaand aan nieuwbouw ophogen van het maaiveld bestreden. Wanneer hier zwaar materiaal voor is gebruikt, zoals zand, dan neemt de zakkingssnelheid in theorie toe. Als oplossing voor het afzwakken van bodemdaling werkt het in dat geval dus averechts. Met een ander beheer kan soms schade worden voorkomen of verminderd. Ook lokale infiltratie (verhogen van de waterdruk en verkleinen van de korrelspanning) kan bijdragen aan het beperken van schade. Door het gebruik van licht bouw materiaal zoals bims, flugsand, lava, geëxpandeerde

211. Jansen, Hendriks & Kwakernaak 2009; Bosch et al. 2011.

212. Gemeente Gouda & HHR van Rijnland 2012.

213. HHR van Rijnland 2009.

214. Bijvoorbeeld Van Dijk & Veul 2010.

215. Den Nijs 2015.



kleikorrels, schuimglas, tempex (EPS) en schuimbeton kan het wegzakken van de bodem door extra gewicht geminimaliseerd worden.

Zoals reeds in § 2.5 is aangegeven is de stadsondergrond nogal complex, deels door het voorkomen van verschillende kleiruggen in de ondergrond, en deels door de complexe ophooggeschiedenis van de meer dan 750 jaar oude stad. Voor een accurate weergave van deze ondergrond is een driedimensionaal ondergrond model vervaardigd die in de toekomst kan worden gebruikt in combinatie met geotechnische zettingsmodellen en hydrologische modellen. Deze kunnen samen met de verzamelde tijdreeksen en patronen van historische zakkingen, ophooggeschiedenissen en peilbeheer, bijdragen aan een betere fysisch beschrijving van de complexe interacties tussen de verschillende bodemdalingscomponenten en aan de oplossingsrichtingen voor een effectieve omgang met de bodemdalingsproblematiek.

Aanvullend onderzoek

Omdat er zo weinig gegevens over maaiveld dalingen door de tijd heen bestaan is het van belang dat er snel visualisaties worden gemaakt van het patroon van maaiveld dalingen over de periode 2002 tot heden en over de periode daarvoor. Juist omdat de tijdsintervallen in de reeksen voor 1992 fors zijn (opmetingen voor de topografische kaarten zijn slechts enkele keren uitgevoerd) kan juist het onderzoek naar de ruimtelijke patronen van de maaiveld dalingen licht werpen op de onderliggende mechanismen.²¹⁶ Ook moet verder gekeken worden naar de waarde van satellithoogtemetingen (InSAR, beschikbaar sinds 1992) voor onderzoek naar de ruimtelijke patronen van bodemdaling.²¹⁷ Door het verschil in zakking tussen de panden in de binnenstad scherper op kaartbeeld inzichtelijk te maken, is het bijvoorbeeld mogelijk het type fundering dat onder het pand aanwezig is nauwkeuriger te schatten. Een aanname daarbij is dat de zakking van panden met een stuitfundering met palen meetbaar minder is dan de zakking van de panden op staal of kleef of dan de zakking van het maaiveld. Funderingen op staal, kleef of op stuit komen door elkaar voor. Toch laten gebouwen op kleef of op staal weinig zakkingsverschillen zien. Oudere panden op staal en oudere panden op kleef lijken met eenzelfde snelheid met de maaiveld daling mee te zakken.²¹⁸

Verder lijkt het belangrijk dat er meer ondergrondgegevens worden verzameld omdat het aantal waarnemingslocaties (boringen) in het gebied nog altijd gering is. Mogelijk kunnen ondergrondgegevens die nu nog geen rol hebben gespeeld in het onderzoek naar de stadsondergrond, zoals sonderingen, ingezet worden om het model van de stadsondergrond te verfijnen en, eventueel, om de toekomst van de zetting van de veenondergrond te voorspellen. Uit de weerstandsmetingen van de sonderingen is af te leiden hoeveel dikte een veenpakket door zetting momenteel al heeft verloren (hoeveel het al is samengeperst), en hoeveel het in de toekomst nog kan verliezen.²¹⁹ Daarvoor is het van belang om eerst

216. Het Actueel Hoogtebestand Nederland is geïntroduceerd juist om het rekenen met gemiddelde bodemdalingen bij het nemen van peilbesluiten overbodig te maken.

217. Bijvoorbeeld Den Besten, Maccabiani & Maljaars 2014.

218. Den Nijs 2015.

219. Koster et al. 2016; Koster & Erkens 2017.



de ruimtelijke samenstelling van de veen- en kleilagen beter (fysisch) te beschrijven voordat de zettingsgevoeligheid van de stadsondergrond kan worden vastgesteld.²²⁰ Om hoeveel sonderingen het in de stad gaat, en welke daarvan voor deze toepassing geschikt zijn, moet nog nader onderzocht worden.

Ook moet de mogelijkheid worden onderzocht om het verfijnde 3D-ondergrondmodel van het pilotgebied uit te breiden naar de rest van Gouda en om dit model (die de ruimtelijke verbreiding van verschillende sedimentlagen veen, klei, en zand verbeeld) te koppelen aan bodemdalingsmodellen uit de geotechniek (zoals Phoenix)²²¹ en aan hydrologische modellen. Uit de combinatie zal een beter fysisch inzicht ontstaan in de interacties tussen de diverse bodemdalingscomponenten. Waar mogelijk kunnen de opgebouwde tijdreeksen van historische ontwikkelingen in de stadsuitleg, peilbeheer, maaiveldhoogten etc. zelfs worden gebruikt om deze modellen verder te ijken, om ze te valideren of om ze te gebruiken bij het modelleren van lange termijn bodemdaling (decennia). Mogelijk zijn we dan ook beter in staat om de effecten van beleid in het verleden te kunnen bepalen en de effecten van nog te nemen maatregelen.²²² Het veen onder de binnenstad is bijvoorbeeld sterk in elkaar gedrukt door meer dan 750 jaar ophogingen en lijkt minder gevoelig voor toekomstige (kleine) ophogingen. Maar hoeveel minder gevoelig? Buiten de historische binnenstad worden in de wijk Korte Akkeren grotere zakkingsverschillen gemeten die deels (theoretisch) verklaard kunnen worden door de relatief jonge druklast van deze wijk. Met welke zakkings moeten we hier in de toekomst nog rekening houden en hoe zijn de verschillen in deze wijk te verklaren? Het zijn vragen waar nog steeds geen duidelijke antwoorden voor zijn gevonden en waarin de huidige methoden tekortschieten.

220. Van Laarhoven 2017.

221. Van der Schans & Houhuessen 2011 en 2012; Geisler 2015.

222. De mogelijkheden zijn kort besproken door M. Groenendijk (Gouda), N. Willemse (RAAP) en G. Erkens (Deltares).





Vragen en antwoorden

Het project 'Stevige stad op slappe bodem' onderzoekt methoden om de meervoudige oorzaken van bodemdaling scherper in beeld te krijgen met als doel om vandaaruit oplossingsrichtingen te ontwikkelen - voor Gouda en soortgelijke stedelijke en nabijgelegen landelijke gebieden - om het proces van bodemdaling zo veel mogelijk tegen te gaan. De centrale vraag is: welke activiteiten in het heden en in het verleden zijn van invloed geweest op het proces van bodemdaling? Dit hoofdstuk van de synthese gaat aan de hand van concrete vragen in op de bredere lessen die zijn te trekken uit de resultaten van de deelprojecten:²²³

- Onderzoekresultaten;
- Praktische toepassingsmogelijkheden (kennisvalorisatie);
- Verder wegnemen van kennisleemten.

4.1 Onderzoekresultaten

■ *Wat zijn de verbanden tussen de deelprojecten?*

De verschillende onderdelen van het project 'De historische binnenstad van Gouda. Stevige stad op slappe bodem' hebben zich gericht op de problematiek van het wisselend funderinggebruik in de stad in relatie tot het voorkomen van meer- of minder dragende bodemlagen in de ondergrond en de waterhuishouding in de stad. De verschillende methodieken die zijn ontwikkeld en toegepast zijn bedoeld voor het in beeld krijgen van de ruimtelijke ontwikkeling van de stad (stadmorphogenese: § 2.2), de stadsondergrond en de zettingsgevoeligheid daarvan (§ 2.3) en de relatie tussen ondergrond, stadsontwikkeling en funderinggebruik/funderingstechnieken (§ 2.4). Daarnaast is gewerkt aan het samenstellen van tijdreeksen en kaarten die betrekking hebben op de ontwikkeling van maaiveldhoogten (§ 3.2), de historische peilen van het oppervlaktewater en het grondwater en de poldergeschiedenis (§3.3 en 3.4). Het idee daarachter is om de meetreeksen van de verschillende zogenaamde bodemdalingscomponenten (maaiveldaling, bodemgesteldheid, grondwater, oppervlaktewater, peilbeheer en de aanleg- en ophooggeschiedenis van de stad) in de tijd en ruimte te koppelen zodat, in theorie althans, langjarige trendcurven ontstaan die de samenhangen in het bodemdalingsmechanisme beter kunnen verklaren (§ 3.1).

223. Groenendijk 2017a.



■ *Welke (historische) factoren die effect kunnen hebben op bodemdaling zijn er onderzocht?*

Onderzocht zijn de factoren:

peilbeheer - de regulering van de drooglegging in de verschillende polders/peilvakken en het beleid daarachter alsmede de grondwaterpeilen zoals geregistreerd door het gemeentelijk grondwatermeetnetwerk;

ophoog- en aanleggeschiedenis van de stadsdelen - een belangrijk deel van de bodemdaling wordt veroorzaakt door zetting van de bodem onder de draaglast van ophoogpakketten, infrastructuur en gebouwen;

ondergrond: de samenstelling van de stadsondergrond is niet uniform maar vertoont in de ruimte en in de diepte grote verschillen. Er is zeker niet overal sprake van even slappe bodems. Deze heterogene ondergrond kan enerzijds worden verklaard vanuit de wordingsgeschiedenis van het landschap (geogenese) en anderzijds vanuit de ontginnings- en occupatiegeschiedenis (historische geografie en stadsmorfogenese) en het effect van zakkingen in het verleden (zettingsgeschiedenis). Kennis van deze heterogene ondergrond draagt bij aan het algemene inzicht in de mechanismen, timing en patronen van bodemzakkingen in de stad.

funderinggebruik - de bodemdaling werd in het verleden niet alléén door peilaanpassingen bestreden. Het is eeuwenlang gebruik geweest om voorafgaand aan nieuwbouw het maaiveld op te hogen en de panden 'op staal' te bouwen, dat wil zeggen direct op een opnieuw opgehoogde ondergrond of op de (funderings)resten van eerdere gebouwen. Deze wijze van funderen heeft in belangrijke mate bijgedragen aan de dikte van de stadslagen en aan het proces van zetting door compactie van de veenondergrond. Het funderinggebruik is een belangrijke historische factor achter de bodemdalingen in Gouda.

■ *Welke invloed heeft de bodemopbouw op de bodemdaling in Gouda?*

De ondergrond van Gouda bestaat voor een belangrijk deel uit organische afzettingen, dat wil zeggen dikke pakketten met afgestorven en in meer of mindere mate verteerde plantenresten. Deze afzettingen zijn zeer samendrukbaar, dat wil zeggen dat ze onder druk (lees: gewicht) een groot deel van hun volume kunnen verliezen. De dikte van deze afzettingen in Gouda wisselt, enerzijds vanwege de landschappelijke vormingsprocessen in het verleden (de geologische situatie: in de ondergrond komen 'klei- en zandruggen' van oude rivieren voor), anderzijds door de lange occupatiegeschiedenis, het veranderend grondgebruik en het huidige peilbeheer. Er is dus zeker niet overal sprake van even slappe bodems.

Naast de generieke zettinggevoeligheid van een veenbodem blijkt dat vooral de mate waarin de veen- en kleiafzettingen reeds zijn samengedrukt een



'bodemfactor' van belang. Er bestaan namelijk aantoonbare verschillen in compactie tussen de historische binnenstad (met zijn eeuwenlange traditie van ophogen en voortbouwen) en de jongere wijken daaromheen. De veenondergrond in de binnenstad is in hoge mate gecompacteerd, wat zich uit in de huidige lagere zakkingsnelheden ten opzichte van bijvoorbeeld een wijk als Korte Akkeren (afb. 3.3 en 3.4). Bodemzakking door zetting is geen eindeloos voortdurend proces maar kent trends die uiteindelijk leiden tot een min of meer stabiele evenwichtssituatie, zij het dat dit vele tientallen jaren tot zelfs eeuwen kan duren.

■ *Welke (historische) factoren hebben aantoonbaar effect of effect gehad op de bodemdaling?*

Er zijn twee belangrijke factoren te noemen. De eerste is het peilbeheer. Meer dan 60% van de bodemdaling in het landelijk veenweidegebied komt voort uit de verdroging van de veenbodems. Veenbodems oxideren door drooglegging wat tot een vermindering van het volume van het veenpakket leidt. Dit proces is onomkeerbaar. De tweede factor is zetting, dat wil zeggen het onder het gewicht van ophogingen, infrastructuur en gebouwen samendrukken van de ondergrond. In de praktijk komt het neer op het verminderen van de open ruimte tussen bodemdeeltjes (poriënvolume) door toename van het gewicht en/of door afname van de waterspanning in de bodem, waardoor de bodem inzakt. Voor Gouda is vastgesteld dat het proces van zetting in de verschillende bebouwde stadsdelen voor meer dan 94% bijdraagt aan de totale bodemdaling. De rest wordt veroorzaakt door zakkings als gevolg van geologische processen (zie: Verdieping Bodemdaling, onder 1).

■ *Hebben peilveranderingen aantoonbaar een effect gehad op bodemdaling?*

Voor Gouda is dat nog niet 'wetenschappelijk' vastgesteld maar uit meerjarig onderzoek in de provincie Utrecht (te Zegveld) en uit monitoringstudies van de maaiveldontwikkeling in veenweidegebieden elders in Nederland, blijkt dat er een directe en bijna voorspelbare mate van bodemdaling optreedt bij verlaging van het polderpeil. Peilveranderingen hebben dus een aantoonbaar effect op (veen)bodemdaling (zie: Verdieping Bodemdaling).

■ *Volgen peilbesluiten op maaiveldontwikkelingen of andersom?*

In de bekende gevallen heeft men de peilen in de verschillende peilvakken aangepast aan de gewenste mate van ontwatering. De diverse belanghebbenden (meestal de agrarische sector en de hoogheemraadschappen) bekijken regelmatig welke mate van ontwatering gewenst is, of gehanteerd moet worden, en hoe dit zich vertaalt naar het peilbeheer. Grofweg eens in de tien jaar kan dat leiden tot een aangepast peilbesluit. Gezien de mate van bodemdaling over de afgelopen tien eeuwen (afb. 1.2) zal dat in het verleden niet anders zijn geweest.



■ *Wordt altijd de 'logische' weg van bodemdaling → peilverlaging gevolgd?*

Peilverlaging heeft een grotere ontwatering van de veenbodem (of veenondergrond) tot gevolg, wat tot betere mogelijkheden voor landbouwkundig gebruik leidt. De eisen die aan het landbouwkundig gebruik gesteld worden zijn door de eeuwen heen wel veranderd; waar het in eerste instantie waarschijnlijk puur ging om het verlagen van de grondwaterstand, kwam men er later achter dat ook de voedingswaarde van de bodem door bemaling of grondwaterstandverlaging kon worden verbeterd: er komen voedingsstoffen vrij door oxidatie van de veenbodem. Verder biedt een zekere mate van ontwatering een sterk verbeterde draagkracht voor machines wat leidt tot minder vertrappingschade. Peilverlaging zal dus niet in alle gevallen een reactie zijn geweest op alleen bodemdaling; ook andere motieven (meestal een keuze voor 'optimalisatie') zullen een rol hebben gespeeld. Het is daarbij opvallend dat het feitelijke peil aantoonbaar kan afwijken van het vastgestelde peil.

■ *Heeft het ophogen en ontwikkelen van buitengebieden een effect gehad op bodemdaling in die buitengebieden?*

Uit de verzamelde historische gegevens is dit niet evident naar voren gekomen, maar wel uit de (beperkte) analyse van de satelliethoogtemetingen (afb. 3.3 en 3.4). Los van de theorie en algemene geotechnische kennis (bodemdaling door zetting als gevolg van een toename van het gewicht van de bovengrond) is de wijze waarop dit in de praktijk 'werkt' zichtbaar in tijdreeksen en patronen van bodemdaling. Op dit moment komen de beschikbare gegevens vooral voort uit (historische) satelliethoogtemetingen. Er is in deze gegevens een aantoonbaar verschil in zakkingen tussen verschillende stadsdelen te zien, die gekoppeld kunnen worden aan de mate van compactie van de ondergrond en de ouderdom van de ophooglagen. Verder is ook de zettinggevoeligheid uit te rekenen van de veenbodems in enerzijds het bebouwd gebied, en anderzijds in het landelijk gebied. Deze zettinggevoeligheid kan inzichtelijk worden gemaakt door het effect uit te rekenen van een (fictief) extra gewicht op de bestaande veenondergrond (afb. 2.17). Uit deze gegevens komen de effecten van grondbelasting en de mate van reeds gerealiseerde compactie duidelijk naar voren.

■ *Heeft het ophogen en ontwikkelen van buitengebieden een effect gehad op bodemdaling in de binnenstad?*

Dit kan vooralsnog niet worden aangetoond, maar er is wel een theoretisch effect. Compactie van de ondergrond (het dichter op elkaar drukken van bodemdeeltjes) is mede van invloed op de waterdoorlatendheid van de toch al relatief moeilijk waterdoorlatende klei- en veenpakketten. Het wegvloeien van de overdruk door het toegenomen gewicht (wateroverspanning) door zijwaartse of neerwaartse afstroming van grondwater wordt moeilijker wanneer de compactie rondom bijvoorbeeld de binnenstad toeneemt. Dit zal, in theorie althans, het proces van zetting beïnvloeden. Hoe groot zo'n effect is en waar dit zal optreden is vooralsnog niet te bepalen. Om dit aan



te tonen is een langjarig meetnetwerk nodig waarbij geohydrologische gegevens gekoppeld worden aan de ontwikkeling van bodemeigenschappen (compactie etc.) en metingen van bodemdaling. Het effect kan eventueel gemodelleerd worden, maar dan moeten eerst de bestaande hydrologische en ondergrondmodellen (verder) geïntegreerd worden met de bodemdalingsmodellen uit de geotechniek.

■ *Hebben kleinere ontwikkelingen in de binnenstad (bijvoorbeeld verdichting) een effect gehad op de directe omgeving?*

Het is op ingreepniveau lastig om oorzaak-gevolg-relaties aan te geven. Extra belasting (lees: extra gewicht) en ingrepen in het grondwatersysteem hebben een theoretisch effect op de bodem direct onder en naast de ingreep; in de geotechniek wordt gesproken over de zogenaamde omgevingsbeïnvloeding. Het meeste geotechnische onderzoek wordt in de praktijk uitgevoerd juist om die effecten te kunnen berekenen en om beheermaatregelen in te stellen.²²⁴ Dat is al decennia de standaardpraktijk bij civieltechnische ingrepen. Toch worden met name de grondverzakkingen die ontstaan bij de voorbereidende werkzaamheden, zoals het weghalen van kademuren van eerder gedempte grachten of oude fundamenten worden, nog steeds onderschat.²²⁵ Hoeveel verzakkingen er optreden hangt af van de lokale ondergrond, maar ook van de aard van de fundering en de ophoogpakketten. In hoeverre verdichting een rol speelt als factor in de omgevingsbeïnvloeding is alleen te achterhalen door onderzoek te doen naar de documenten ter voorbereiding op, en tijdens, de bouwwerkzaamheden (schaderapporten, geotechnische ontwerpen etc.). Daar is in het kader van dit onderzoek geen aandacht aan besteed.

■ *Heeft het dempen van grachten (Raam, Nieuwehaven) een aantoonbaar effect gehad op de snelheid van bodemdaling?*

Zie vorige vraag.

■ *Hebben veranderende bouwmaterialen (verstening) of vergroting van het bouwvolumes een aantoonbare invloed gehad op bodemdaling?*

Extra druk op de ondergrond door het vergroten van de draaglast is een van de belangrijkste factoren (samen met de waterspanning) in het proces van zetting (zie afb. 2.17). Zetting draagt voor 94% bij aan de totale bodemdaling in Gouda. Dit effect speelt niet alleen op de schaal van bouwblokken of stadsdelen, het speelt vooral ook op het niveau van inbreidingen en kleinere ontwikkelingen. Dit komt omdat de extra druk met name in de directe omgeving van, bijvoorbeeld, het gebouw door de bodem wordt 'opgevangen'.²²⁶ Verstening en andere vormen van materialisatie hebben dus weldegelijk invloed op bodemdaling.

224. Korff 2013; Korff & Roggeveld 2012.

225. Ibid. Dit bleek bijvoorbeeld bij de aanleg van de Noord-Zuidlijn in Amsterdam, onder andere bij de Vijzelgracht.

226. Korff & Roggeveld 2012.



4.2 Valorisatie van kennis

4.2.1 Funderingvoorspellingsmodel

■ *Uit welke onderdelen bestond de gebruikte methode? Welke onderdelen van de methodiek zijn bruikbaar? En welke zijn minder bruikbaar?*

Het onderzoek van Archeomedia en FlexusAWC betreft een combinatie van methodes. Op basis van een literatuurstudie is allereerst bekeken welke funderingstypen er in heel Nederland gebruikelijk zijn. Vervolgens is dit vergeleken met archeologische opgravingsgegevens uit Gouda om te bepalen of het Goudse beeld afwijkt van het landelijke beeld. Daarnaast is op basis van bouwkeuren en voorschriften, archiefbronnen en interviews met constructeurs en experts bekeken in welke periode welk funderingstype werd gebruikt. Al deze informatie is vervolgens gecombineerd met een onderzoek naar de morfogenese van de Goudse binnenstad en een onderzoek naar de bodemopbouw in die binnenstad. Tot slot zijn alle gegevens gekoppeld aan de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (verder BAG), zodat een kaartbeeld kon worden gecreëerd. De BAG-viewer blijkt, zeker wat betreft de 'bouwjaren' voor de periode vóór 1900, aantoonbaar onnauwkeurig. Panden hebben bijvoorbeeld bij gebrek aan exacte informatie alleen een globale datering gekregen, of jaartallen van verbouwingen zijn gehanteerd als bouwjaar terwijl het casco intact is gebleven. Om de BAG op dit punt te corrigeren is een desktop GIS-methode ontwikkeld, die kaartvergelijking (van historische kaarten) koppelt aan de mogelijkheden die Google Streetview en Microsoft Bingmaps biedt om panden te evalueren. Dit blijkt een betrouwbare en efficiënte methode en de voorgelegde correcties zijn reeds doorgevoerd in de Goudse BAG.²²⁷

■ *Hoe zou de methode verfijnd kunnen worden om deze beter bruikbaar te maken?*

De onderscheiden funderingstypen en periodisering zijn met behulp van de gecorrigeerde BAG-bouwjaren gerelateerd aan specifieke woonhuizen. Bijzondere, grote gebouwen hadden een eigen, specifiek voor die plek ontwikkelde manier van funderen, die per gebouw anders kan zijn. Deze gebouwen zijn mogelijk (nog) niet in het kaartbeeld zichtbaar. Ook het daadwerkelijk voorkomen van het verwachte funderingstype moet nog in de praktijk worden getest (modelvalidatie). Dit kan aan de hand van bestaande funderingsinspecties, of, voor panden die na 1879 gebouwd zijn, door het raadplegen van het Goudse bouwarchief.

■ *Welke informatie mist er nog om de methode beter bruikbaar te maken maar die lastig te achterhalen is?*

Naar verwachting ligt er in het bouwarchief een schat aan informatie over de toegepaste funderingen van de gebouwen die na 1879 gebouwd zijn (in 1879 werden er voor het eerst eisen aan de funderingen en funderingshoogten gesteld). Hieronder zijn ook panden die in de zogenaamde risicocategorieën

227. Peters 2017.



vallen: panden die op houten palen gefundeerd staan maar waarvan de houten paalkop (of het houten roosterwerk) mogelijk al langere tijd boven het huidige gehanteerde peil uitsteekt. Deze wijze van informatievergaring is niet lastig, eerder tijdrovend. Voor wat betreft de oudere panden (gebouwd voor 1879) staan funderingsinspecties ter beschikking maar ook archeologische gegevens kunnen voor de validatie van de modeluitspraken (hoe goed voorspelt het model?) gebruikt worden.

■ *Op welke wijze kan deze methodiek, of delen daarvan (vanuit maatwerk), ook bruikbaar zijn voor andere gebieden in laag Nederland?*

Duidelijk mag zijn dat een actualisatie/controle van de BAG niet alleen gewenst is, maar ook aanzienlijke verbeteringen heeft opgeleverd voor de Goudse situatie. Het kan dus ook voor andere steden in Nederland een geschikt middel zijn, zij het dat de het Goudse model (nog) niet is gevalideerd. Verder bleken in Gouda de jaartallen van de eerste kadastrale opnamen van de binnenstad (1828 en 1874) min of meer gelijk te vallen met de jaartallen van vastgestelde bouwverordeningen (1828 en 1879). Dit zal niet overal het geval zijn.

Ondanks de beperking van modelvalidatie lijkt het waarheidsgehalte van het model groot en bovendien lijkt het model ook verdiepende informatie te kunnen geven ten aanzien van een aantal risicoklassen. Een belangrijke eerste vraag bij de toepassing in andere steden is dan wel welke geologische/geotechnische, archeologische en bouwhistorische gegevens al in kaart gebracht zijn. Verschillen in de natuurlijke ondergrond zijn vaak erg bepalend voor de ontstaansgeschiedenis van de stad. Hoogteverschillen spelen hierin ook vaak een rol. De beschikbaarheid en ontsluiting van historische keuren, bouwvergunningen en historische bouwtekeningen is vanzelfsprekend ook relevant. Een goede aanvulling zou zijn om het voorspellingsmodel (op basis van historische gegevens) te koppelen aan de gemeten zakkingen (bijvoorbeeld uit InSAR-gegevens) om op pandniveau (waar mogelijk) de resultaten uit beide gegevensbronnen te vergelijken.

4.2.2 Ondergrond en zettinggevoeligheid

■ *Uit welke onderdelen bestond de gebruikte methode? Welke onderdelen van de methodiek zijn bruikbaar? En welke zijn minder bruikbaar*

Voor de Goudse stadsbodem is een beperkte dataset aan ondergrondgegevens beschikbaar. Op dit moment bestaat die dataset vooral uit boorgegevens. Op basis van deze gegevens is een verfijnd 3D-model van de ondergrond vervaardigd dat, ondanks de beperkingen van ruimtelijke resolutie, heeft geresulteerd in een belangrijke verbetering van het ondergrondmodel ten opzichte van het bestaande landelijke 3D-model ('GeoTop'). Het model geeft aan de ene kant de verbreiding en dikte van slappe lagen (veen, kleiig veen, venige klei) en minder slappe lagen (zand, compacte klei) weer. Aan de andere kant maakt het inzichtelijk hoe dik de huidige 'archeologische stadslagen' zijn en hoe deze 'stadslagen'



zich verhouden tot de natuurlijke ondergrond. Belangrijk winstpunt is dat hiermee ook de zettinggevoeligheid in kaart kan worden gebracht, omdat naast het opstellen van een 3D-model ook is begonnen met het vaststellen van de mate van compactie (de reeds gerealiseerde samenpersing) van de stadsondergrond. Hieruit blijken belangrijke verschillen wat in belangrijke mate bijdraagt aan het inzichtelijk maken van de problematiek.

■ *Hoe zou de methode verfijnd kunnen worden om deze beter bruikbaar te maken?*

Het ondergrondmodel van de verschillende afzettingen onder de stad kan in de nabije toekomst worden gekoppeld aan een hydrologisch model (grondwatermodel) en aan bodemdalingsmodellen uit de geotechniek (bijvoorbeeld Phoenix). Op deze manier kunnen er hardere, en ruimtelijk beter gedefinieerde, uitspraken worden gedaan over de te verwachten zettingen en de zettinggevoeligheid voor bepaalde typen ingrepen en beheermaatregelen. Maar zover is het nu nog niet. Langjarige bodemdalingmodellen zijn nog in ontwikkeling en de ruimtelijke resolutie van inputgegevens (het aantal boringen) dient verbeterd te worden. Ook de beschikbaarheid en toepassingsmogelijkheden van potentieel zeer waardevolle andere gegevens (zoals sonderingsgegevens) moet nog worden onderzocht. In de tussentijd kan een model 'op hoofdlijnen' worden gemaakt waaruit, onder andere, kan blijken welke kennis (modelkennis, gegevensleemten) nog ontbreekt. Vervolgens kunnen er strategisch aanvullende gegevens verzameld worden, bijvoorbeeld in het kader van een rioleringsopgave, bij het vervangen van kabels/leidingen, peilbuizen, grondsanering, en andere activiteiten waarbij bodemgegevens verzameld kunnen worden.

■ *Welke informatie mist er nog om de methode beter bruikbaar te maken maar die lastig te achterhalen is?*

Er moet nog onderzoek worden gedaan naar de toepassingsmogelijkheden van sondeergegevens (en andere gegevens die voortkomen uit geotechnisch onderzoek). Zie § 3.5.

■ *Op welke wijze kan deze methodiek, of delen daarvan (vanuit maatwerk), ook bruikbaar zijn voor andere gebieden in laag Nederland?*

De gehanteerde methode om ondergrondgegevens te gebruiken in de modellering van de ondergrond en de mogelijkheid om het ondergrondmodel te koppelen aan andere modellen die gebruikt worden om het bodemdalingsmechanisme te ontrafelen is 'state-of-the-art'. Dat betekent meteen dat ze nog niet algemeen toegepast worden en er is weinig praktische ervaring. Er zijn wel duidelijk positieve ontwikkelingen gaande.

Het strekt tot aanbeveling om vooral op zoek te gaan naar datasets die kunnen worden gebruikt om de modellen te voeden en te valideren. Elk model levert uitkomsten op, maar in hoeverre die uitkomsten matchen

met bestaande waarnemingen is bepalend voor de bruikbaarheid van die modellen. Zowel gegevens uit historische bron, als meer recente 'harde' metingen kunnen daar in principe voor gebruikt worden.

4.2.3 Historische ontwikkelingen

■ *Uit welke onderdelen bestond de gebruikte methode? Welke onderdelen van de methodiek zijn bruikbaar? En welke zijn minder bruikbaar?*

Voor de methoden die zijn toegepast om onderzoek te doen naar de funderingsproblematiek, zie § 4.2.1. Het overige onderzoek aan historische bronnen heeft vooral tot doel gehad om de (complexe) interactie tussen de verschillende bodemdalingscomponenten (bodem, waterhuishouding, peilbeheer, grondwater, ophoog- en aanleggeschiedenis, zettingsgeschiedenis, etc.) beter inzichtelijk te maken (§ 3.1). Verder heeft het onderzoek tot doel gehad om de mogelijkheden te verkennen om al deze historische ontwikkelingen in de tijd en ruimte aan elkaar te koppelen, in de hoop dat langjarige trends in de ontwikkeling van deze bodemdalingscomponenten samenhangen gaan vertonen. Op deze wijze zijn uit langjarige trends de oorzaken-en -gevolgen van diverse ingrepen in het bodemdalingssysteem beter aan te wijzen.

Van veel van de bodemdalingscomponenten is onderzocht welke historische gegevens er beschikbaar zijn en welke tekortkomingen er zijn. Dat heeft zich, gegeven de middelen, beperkt tot het 'laaghangend fruit', dat wil zeggen dat eerst en vooral de meer evidente bronnen zijn geraadpleegd. Met betrekking tot peilbesluiten in en rondom Gouda kan nu een overzicht worden gepresenteerd dat tot in de negentiende eeuw teruggaat (afb. 3.7). De tekortkoming daarvan is echter dat er in de daadwerkelijk gehanteerde peilen zelf belangrijke andere keuzes konden worden gemaakt. Dit maakt de reeks met peilbesluiten voor het onderzoek naar oorzaak-gevolg-relaties minder bruikbaar. Verder is de poldergeschiedenis van Gouda nogal complex; polders werden opgedeeld, heringedeeld, ontpolderd en herpolderd, wat de bruikbaarheid van de peilreeksen (per individueel peilvak) nogal fragmenteert.

Uit de analyse van grondwatertrends op basis van peilbuismetingen is geconcludeerd dat de meetreeksen in de gemeente Gouda en omgeving in algemene zin waardevolle informatie geven over de manier waarop het grondwatersysteem ter plaatse werkt, maar dat de gegevens vooralsnog te fragmentarisch zijn, en te veel data-artefacten bevatten, om op een zinvolle manier vergelijkingen te maken met bodemdalingen en bedreigingen voor het erfgoed. Ook hier is gebruik gemaakt van een eerste en meer evidente bron voor peilbuisgegevens: het zogenaamde *DINO*loket met ondergrondgegevens van TNO/Geologische Dienst Nederland.

Het onderzoek naar de aanleg- en ophooggeschiedenis heeft zeker potentie, omdat het voor rekenkundige modellen belangrijk is om over betrouwbare



schattingen van de druklast te beschikken. Wel is er nog meer precieze informatie aanwezig in de dossiers over de planvorming van de wijken en is de nu opgehaalde informatie (afb. 2.8) zeer globaal van aard. Idealiter wordt dit onderzoek gekoppeld aan de gegevens over de mate van maaiveldzakking (een voorbeeld wordt gegeven in § 3.2.3) en de compactiegraad van de ondergrond (cf. lopend onderzoek Universiteit Utrecht/Deltares). Tot dusverre heeft een analyse van de verzamelde gegevens nog niet plaatsgevonden.

Er zijn verschillende historische bronnen geraadpleegd en onderzocht die betrekking hebben op maaiveldhoogten en maaiveldhoogteontwikkelingen. Aan de ene kant zijn dit de directe maaiveldhoogtemetingen uitgevoerd door o.a. de Topografische Dienst en door de waterschappen in de tweede helft van de vorige eeuw; de metingen aan de hoogten van het wegoppervlak in de stad door de gemeente Gouda én de metingen van de hoogten van de onderdorpels van historische panden in de binnenstad. Aan de andere kant beschikken we sinds enkele decennia over de zogenaamde 'remote sensing' meetgegevens, zoals de satelliethoogtemetingen (InSAR radarsatellieten, sinds 1992) en gegevens verzameld door middel van vliegtuiglaseraltimetrie (actueel hoogtebestand Nederland, sinds 1998). De waarde van het onderzoek naar historische maaiveldhoogten en maaiveldhoogteontwikkelingen is evident; er bestaan nog geen modellen en visualisaties van de daadwerkelijke maaiveldaleningen op de middellange termijn (decennia) voor het grondgebied van Gouda. Het merendeel van de huidige inzichten komt voort uit geotechnische (korte termijn) berekeningen en uit geologische gegevens.

Hoe zou de methode verfijnd kunnen worden om deze beter bruikbaar te maken? Welke informatie mist er nog om de methode beter bruikbaar te maken maar die lastig te achterhalen is?

Op de eerste plaats moeten de nu beschikbaar gekomen gegevens over, met name, de maaiveldontwikkelingen worden geanalyseerd en (vooral) gevisualiseerd. Zie daartoe § 3.5. Verder kan onderzoek gedaan worden naar de dossiers rondom peilbesluiten voor de polders onder Rijnland, om de dagelijkse praktijk te vergelijken met de administratieve peilbesluiten. Ook kan meer energie gestoken worden in het verwerven van informatie over maaiveldophogingen onder stedelijk gebied, aangezien die informatie oppervlakkig is verzameld. Dat kan door meer in concreto de beschikbare dossiers rondom planvorming nader te bestuderen. Daarnaast zijn er wellicht toch meer maaiveldhoogtekaarten te traceren uit de periode 1980-1992 dan thans geïnventariseerd. Ten slotte zouden idealiter de historische gegevens een rol moeten gaan spelen bij de ontwikkeling van langjarige bodemdalingmodellen, zij het dat deze modellen nog in de kinderschoenen staan.

Op welke wijze kan deze methodiek, of delen daarvan (vanuit maatwerk), ook bruikbaar zijn voor andere gebieden in laag Nederland?



Historische informatie kan, mits resulterend in tijdreeksen en voorzien van voldoende metadata²²⁸, resulteren in inzichten in de historische ontwikkeling van verschillende onderdelen van het bodemdalingssysteem. Met name maaiveldhoogtemetingen en reeksen van oppervlaktewater- en grondwaterpeilmetingen kunnen bijdragen aan een beter inzicht in de werking van de onderliggende mechanismen. Veel van deze informatie ligt gearchiveerd in waterschapsarchieven en in de archieven van de Topografische Dienst (tegenwoordig: het Kadaster) maar vormen ook onderdeel van de documentatie van landinrichtingsprojecten (ruilverkavelingen e.d.). Deze informatie wordt des te bruikbaar wanneer ze gebruikt kunnen worden in de modelontwikkeling van langjarige bodemdalingmodellen. De toepassingsmogelijkheden van hoogtemetingen verkregen uit 'remote sensing' (radarsatellieten/InSAR, vliegtuiglaseraltimetrie/LIDAR) zijn natuurlijk evident maar ook op dit vlak kan nog een verdere gegevensinventarisatieslag plaatsvinden (welke gegevens zijn beschikbaar qua periode/ruimtebeslag?). De getoonde voorbeelden zijn overgenomen uit andersoortige projecten en er zijn nog verschillende andere toepassingen denkbaar, zoals ten behoeve van het onderzoek naar historische funderingen.

4.2.4 Bredere lessen

■ *Welke aanbeveling zijn te maken om bij te dragen aan het behoud van het cultureel erfgoed in de onderzochte gebieden van Gouda?*

De belangrijkste factor die bijdraagt aan bodemdaling is zetting. 94% van alle bodemdaling is het gevolg van het gewicht van de stadsbovengrond. Zetting is het gevolg van een toenemende druk op bodemdeeltjes, onder andere door een veranderende waterdruk. Het handhaven van een zekere waterdruk in de bodem zal het proces vertragen. Daar kan op worden ingezet. Om wateroverlast te voorkomen moet gedacht worden aan slimmere vormen van waterretentie in de stad. Het vergroten van het oppervlak aan water (of een andere vorm van bemalen) zal daar weinig aan kunnen bijdragen omdat de peilfluctuaties zo klein mogelijk moeten blijven. Om ook het grondwaterpeil beter te kunnen beheren is het nodig om het rioleringsstelsel meer 'dalingproof' te maken en lekkages te voorkomen (lekkages fungeren als een ongewenste vorm van drainage), o.a. door het aanbrengen van flexibelere aansluitingen. Verder strekt het tot aanbeveling om in de stad een echt bodemdalingmeetnetwerk aan te brengen, gericht op het langjarig monitoren van de ontwikkeling in de belangrijkste bodemdalingscomponenten.

■ *Welke bredere lessen zijn te trekken uit de deelprojecten voor soortgelijke stedelijke en nabijgelegen buitengebieden?*

Het onderzoek en de methodeontwikkeling is vooral inventariserend van aard geweest, en deels ook gebleven. Het bijeenbrengen van potentieel waardevolle gegevens vraagt om een multidisciplinaire aanpak en een

228. Het gaat hier om gegevens betreffende de gegevens. Metadata kunnen bijvoorbeeld bestaan uit een omschrijving van het doel van verwerving, de wijze van verwerving, het project waarvoor de gegevens verzameld zijn, de omstandigheden tijdens de verwerving, de rapportage waarin de gegevens verwerkt zijn, etc.



zekere mate van out-of-the-box-denken. Verschillende vakdisciplines dragen andersoortige informatie aan, die, wanneer ze in samenhang bij elkaar worden gebracht, toch waardevol blijken. Een belangrijke les is dus dat er met een ruime blik naar de materie vanuit verschillende vakdisciplines moet worden gekeken. Wat dat betreft is een inventarisatiefase waarin diverse deeldisciplines en experts betrokken zijn (dus geologen, geohydrologen, geotechnici, funderingspecialisten, archeologen, historici) een belangrijke eerste stap. Maar daar moet het niet bij blijven. Historische gegevens waarop bijvoorbeeld deze studie rust (in bredere zin en in engere zin, van polderindelingen tot remote-sensing metingen) zijn uiteindelijk alleen bruikbaar wanneer hetzelfde multidisciplinaire team aan een waarde-toekenning toekomt. Hoe en in welke vorm zijn de gegevens bruikbaar? Het opstellen en verfijnen van het funderingsvoorspellingsmodel zal navolging kunnen krijgen in andere historische steden, zij het dat de kracht van dit model (de werkelijk voorspellende waarde) nog moet worden aangetoond. Duidelijk is geworden dat een actualisatie van de BAG aanzienlijke verbeteringen kan opleveren en dus ook voor andere steden in Nederland een geschikt middel kan zijn. Dat is niet alleen relevant voor dit onderzoek naar zakkende bodems en funderingen, maar ook voor alle andere zaken waar de BAG voor wordt gebruikt. Ook blijken er nog tal van bronnen te bestaan voor het bepalen van maaiveldhoogten in het verleden. Het detailniveau daarvan wordt met de snelle opkomst van ICT-toepassingen steeds fijner maar ook uit de decennia vóór de ICT-revolutie (ontstaan in de loop van de jaren tachtig van de twintigste eeuw) zijn bruikbare gegevens voorhanden.

4.3 Verder wegnemen van kennisleemten

Zou het naar aanleiding van de opgehaalde resultaten verstandig zijn vervolgonderzoek te doen naar de effecten van peilverhoging in de veenbuitengebieden in de directe omgeving van Gouda?

Deze vraag raakt natuurlijk ook aan de economische draagkracht van het veenweidegebied. Deze wordt in onze huidige tijd vooral bepaald door de intensieve veehouderij. Het peilbeheer (lees: de drooglegging) is hier op afgestemd en om dat mogelijk te maken is periodieke verlaging van de grondwaterstand noodzakelijk. Voor het wegnemen van de oorzaken van veenbodemdaling zou het peilbeheer gericht moeten zijn op een zo hoog mogelijk grondwaterstand, vooral in de zomer.²²⁹ Dat vraagt wellicht om een andere vorm van landgebruik, of een vorm van meervoudig landgebruik (natte natuur naast meer extensieve vormen van veehouderij). In hoeverre peilverhoging de afbraak of verdere zetting van veenbodems kan vertragen wordt en is al in verschillende projecten onderzocht. Dát het effect zal hebben op het vertragen van de veenafbraak is al wel duidelijk. Verder lijkt het toepassen van technische oplossingen als onderwaterdrainages een belangrijk vertragend effect te hebben. Of daarmee voldoende tijd wordt gewonnen valt te bezien (er ontstaat voorlopig geen nieuw en compenserend

229. Omdat de gemiddeld laagste grondwaterstand bepalend is voor maaiveldvaling door veenoxidatie (Jansen, Hendriks & Kwakernaak 2009; Bosch et al. 2011).



veendek in het veenweidegebied), maar wellicht dat er in de toekomst meer passende vormen van agrarisch landgebruik ontwikkeld zijn die een aangepast gebruik toelaten.

Zou het naar aanleiding van de opgehaalde resultaten verstandig zijn vervolgonderzoek te doen naar gesloten watercircuits gekoppeld aan de ondergrond?

Doel van gesloten watercircuits kan zijn om in, bijvoorbeeld, de historische binnenstad, verschillende peilvakken te realiseren, afhankelijk van de verschillen in ondergrond (kleiruggen, veenkommen). Daarmee kunnen bijvoorbeeld grondwaterpeilen worden gerealiseerd die beter passen bij de gewenste conserveringsomstandigheden van de bestaande funderingen. In welke vorm dat haalbaar is, of in welke vorm dat gerealiseerd kan worden, is een valide vraag. Het zou in eerste instantie in de vorm van een ontwerpvragestuk aan opleidingen kunnen worden meegegeven, gelijk aan het onderzoek naar een meer inventieve vorm van waterretentie.

Zou het naar aanleiding van de opgehaalde resultaten verstandig zijn vervolgonderzoek te doen naar de dikte van het veenpakket in de historische binnenstad en de daaruit voortkomende verwachting van bodemdaling op deze locaties?

Reeds afgelopen zomer is een pilotonderzoek uitgevoerd door de Universiteit van Utrecht/Deltares naar de zettinggevoeligheid van de veenpakketten onder de ondergrond.²³⁰ Daaruit blijkt dat de veenondergrond op de onderzochte locaties in de binnenstad (tot dusverre zijn dat er overigens slechts enkele) reeds in zeer sterke mate gecompacteerd is, goeddeels als gevolg van de mate van ophoging (het totale gewicht) en de lange tijdspanne waarin zettingen hun beslag hebben kunnen krijgen. Toch is er nog steeds sprake van een zekere mate van zetting (afb. 3.4). Het proces gaat dus onverminderd door en wijst op het belang van beheersmaatregelen. Waarom sommige gebieden sneller zakken dan andere is echter nog niet opgehelderd. Binnen deze gebieden zou specifiek nog vergelijkbaar zettingsonderzoek gedaan kunnen worden, in combinatie met bestaande meetreeksen van nauwkeurige maaiveldhoogten (zoals de InSAR-data). Verder lijkt het zinvol om onderzoek te doen naar de bruikbaarheid van sondeergegevens voor zettingsvoorspellingen (§ 3.2.3), niet alleen voor het gebied in de historische binnenstad, maar ook daarbuiten. Ook dient onderzocht te worden in hoeverre het 3D-ondergrondmodel gekoppeld kan worden aan een bodemdalingsmodel uit de geotechniek en een hydrologisch model. Doel daarvan is om beter inzicht te krijgen in de diverse interacties tussen de verschillende bodemdalingcomponenten.



4.4. Aanbevelingen

4.4.1 Communicatie en governance

De bodemdalingsproblematiek is niet alleen een geotechnisch vraagstuk, of een erfgoedprobleem, het is ook een communicatievraagstuk en een vraagstuk rondom governance. Nog niet zo heel lang geleden bleken vooral bewoners zich nog nauwelijks bewust van de vraagstukken rondom bodemdaling. Het is belangrijk dat alle stakeholders geïnformeerd worden over de oorzaken en gevolgen van bodemdaling en over de mogelijk te nemen maatregelen en oplossingsrichtingen om bodemdaling beheersbaar te houden (op korte en langere termijn). Zo ontstaat meer transparantie, het vergroot het bewustzijn van de verschillende aspecten van bodemdaling bij de bewoners/gebruikers/bestuurders en het vergroot het belang dat bewoners/gebruikers/bestuurders aan deze onderwerpen hechten. Daarmee wordt ook de bereidheid om te participeren vergroot en de acceptatie van het handelingsperspectief.

Wat op korte termijn dus belangrijk is, is kennisoverdracht, niet alleen naar de 'deskundigen' die aan de knoppen draaien maar ook naar de bestuurders die de beslissingen nemen, de bewoners van de stad en alle andere gebruikers.²³¹

4.4.2 Parate kennis

Welke kennis zou elke gemeente in de veenweidegebieden eigenlijk paraat moeten hebben om het probleem van bodemdaling (inzake het materiele erfgoed) scherper op het netvlies te krijgen?

Op de eerste plaats is het noodzakelijk om de aard en omvang van de problematiek scherp te krijgen. Het is opvallend dat er nog een belangrijke stap gezet kon worden om een (voor Gouda) betrouwbaarder beeld te genereren van de ouderdom van de individuele panden in de historische binnenstad. Door kaartanalyse en het vergelijken van verschillende (historische) registratiesystemen is die verbetering gemaakt en doorgevoerd. Met behulp van deze gegevens kon vervolgens, in combinatie met bouwhistorisch onderzoek naar de funderingsgeschiedenis, archeologische gegevens en eerdere geotechnische gegevens, een pandspecifiek verwachtingsmodel worden opgesteld voor de funderingen. Op deze wijze is er voor Gouda een aangescherpt beeld ontstaan van de omvang van het probleem van een 'stad op houten palen'. Het blijkt dus goed mogelijk om risicogebieden voor funderingsproblemen te definiëren en in kaart te brengen, dusdanig dat er enorme verbeteringen ten opzichte van eerdere uitgangspunten kunnen worden aangebracht.

In het verlengde daarvan is het tevens gewenst dat iedere stad over een betrouwbaar of verder verfijnd 3D ondergrondmodel beschikt. In veel steden in het veenweidegebied ontbreken dergelijke modellen alhoewel er de laatste jaren wel meer aandacht voor gekomen is. Dergelijke gegevens

231. Graafstal 2016.

over de opbouw van de stadsondergrond spelen namelijk een grote rol bij het modelleren van belangrijke bodemdalingcomponenten zoals grondwaterstromen, zettinggevoeligheden, mate van consolidatie enz. Weten waar de voor bodemdaling meest kwetsbare delen van de stad voorkomen kan het eenvoudiger maken om prioriteiten te benoemen en te onderbouwen, zeker in combinatie met kaarten waarop de ouderdom en funderingswijze van historische (veelal monumentale) stadspanden staan. Het is overigens lang niet altijd nodig om daartoe heel veel extra onderzoek te doen. Vrijwel elke stad beschikt over een aanzienlijke hoeveelheid ondergrondgegevens, zoals sonderinggegevens en andere geotechnische gegevens, en bodemdata uit, bijvoorbeeld, archeologisch onderzoek.

Verder strekt het tot aanbeveling om historische meetreeksen in te zamelen en achter de hand te houden van bodemdalingen. Uit de inventarisaties voor Gouda doemt het beeld op dat er reeds veelsoortige vormen van 'harde data' bestaan (uit topografische bron, ingemeten via remote sensing technieken, uit monitoring) die inzichtelijk maken waar de problematiek van bodemdaling in absolute zin het meest speelt of speelde. Door middel van patroonanalyse en in combinatie met ondergrondgegevens en bouwhistorische gegevens kan beter geanalyseerd worden welke oorzakelijke verbanden er bestaan tussen bodemdaling enerzijds en stadsontwikkeling anderzijds. Door geologische en civieltechnische werelden bij elkaar te brengen ontstaan ideeën om het zettingsgedrag van historische binnensteden voorspelbaarder te maken. En wellicht dat hier ook nieuwe oplossingsrichtingen uit gaan ontstaan.

4.4.3 Maatregelen op korte en lange termijn

Er zijn allerlei ontwikkelingen aanwijsbaar die op de kort en middellange termijn kunnen leiden tot een zorgvuldiger omgang met gebouwd erfgoed in de zakkende binnensteden van Laag-Nederland. In de historische binnenstad komt het omgaan met bodemzetting neer op een combinatie van technische, waterbeheer- en bouwkundige maatregelen.²³² Op ontwerpniveau wordt- mede onder druk van de verwachte klimaatproblemen - nagedacht over slimmere stadsontwerpen die bijdragen aan een betere retentie van (met name) hemelwater. Peilbeheer in een binnenstad krijgt hiermee een nieuwe dimensie waardoor voorheen problematische keuzes toch beheersbaar blijken. Plannen hiervoor zullen gekoppeld moeten worden aan het rioleringsplan omdat het oppervlaktewatersysteem, het rioleringsstelsel en het grondwatersysteem in de binnenstad nauw met elkaar zijn verbonden en niet gescheiden van elkaar kunnen functioneren.²³³ Civieltechnisch wordt er echter uitgebreid onderzoek gedaan naar de zogenaamde 'omgevingsbeïnvloeding' van ingrepen in de stad, of het nu gaat om aanpassen van het rioleringsstelsel, het uitgraven of dempen van watergangen, of het werken met andere (lichtere) materiaalsoorten.

232. Bijvoorbeeld Buma 2009, Van Dijk & Veul 2010.

233. Wang 2016.

Op middellange en lange termijn zijn een geleidelijke vernatting en onderwaterdrainage maatregelen die de veenbodemdaling in het landelijk



gebied afremmen. Een overstap in het landgebruik van de huidige landbouw naar natuur of natte landbouw kan de bodemdaling stoppen. Deze maatregelen leiden tevens tot lagere emissies van broeikasgassen doordat de oxidatie van het veen wordt afgeremd.

4.4.4 Monitoring en modellering

Een les is dat het eigenlijk ontbreekt aan een goed bodemdalingmeetnetwerk, bijvoorbeeld gericht op het monitoren van de veranderingen in grondwaterdruk, draaglast en de resulterende zetting van de stadsondergrond. En dat terwijl er (in Gouda) al vele decennia over deze problematiek wordt gesproken.²³⁴ De gegevens die dit oplevert zijn pas optimaal bruikbaar nadat meerdere jaren continu gemeten is. Omdat naar schatting de problemen over 10 à 20 jaar pas echt acuut zijn is het nog niet te laat om er nu mee te beginnen. Daar er in veel steden geen langjarige meetnetwerken bestaan die toegespitst zijn op bodemdaling strekt het tot aanbeveling om te onderzoeken uit welke componenten dat meetnetwerk moet bestaan en in hoeverre dit realiseerbaar (en wenselijk) is. Verder verdient het pilotonderzoek naar de compactiegraad van de stadsondergrond navolging, temeer daar het wellicht mogelijk wordt om op basis van reeds beschikbare gegevens (boordata, weerstandmetingen etc.) ook toekomstige zettingen te voorspellen. Sowieso strekt het tot aanbeveling om de focus te houden op de verschillende bodemdalingscomponenten en hun interacties, zowel op stadsdeelniveau als op ingreepniveau. Veel gemeentelijke meetnetwerken zijn gericht op specifieke deelaspecten (kwaliteitsaspecten, veiligheidsaspecten) maar er bestaat geen geïntegreerd meetnetwerk dat zich specifiek richt op de bodemdaling problematiek.

Op het vlak van modelontwikkeling wordt er belangrijke vooruitgang geboekt, zij het dat veel modellen nog niet in staat zijn om belangrijke oplossingsrichtingen te beoordelen op hun uitwerking. Verder staan veel modellen op zich - er bestaan nog geen geïntegreerde modellen die zowel de hydrologische component als de geologische component in één model koppelen aan een in wezen geotechnisch vraagstuk. Integratie is hierbij het toverwoord.

234. De Jong 1949; Kuipéri 1955. Lees ook de kritische passage in Wang (2016, §4.3.3).





Bronnen

- Abels, Ph.A.M., K. Goudriaan, N.D.B. Habermehl & J.H. Kompagnie (red), 2002: 1000 jaar Gouda, een stads-geschiedenis. Historische vereniging Die Goude/Uitgeverij Verloren, Hilversum.
- Akker, J.J.H. van den, 2007: Maaiveld daling en verdwijnende veengronden. Publicatie Alterra Wageningen-UR, Wageningen.
- Akker, J.J.H. van den, R. Hendriks, I. Hoving & M. Pleijter, 2010: Toepassing van onderwaterdrains in veenweidegebieden. Effecten op maaiveld daling, broeikasgasemissies en het water. *Landschap* 27 (3), 136-149.
- Akker, J.J.H. van den & J. Beuving, 1997: Vijfentwintig jaar peilverlaging versus polderpeil. Maaiveld daling van veengrasland bij twee slootpeilen in de polder Zegveldbroek. *Landinrichting* 37 (3), 15-20.
- Akker, J.J.H. van den, 2005: Maaiveld daling en verdwijnende veengronden. In: W. Rienks & A. Gerritsen (2005), *Veenweide 25x belicht*. Alterra.
- Akker, J.J.H. van den, J. Beuving, R.F.A. Hendriks & R.J. Wolleswinkel, 2007: Maaiveld daling, afbraak en CO₂-emissie van Nederlandse veenweidegebieden. Leidraad Bodembescherming aflevering 83. Staatsdrukkerij, Den Haag.
- Arends, G.J., 2007: Schutten, schuren en overbruggen; cultuurhistorische analyse van de oude scheepvaartroute door Gouda en het Goudse waterverversingssysteem. Technische Universiteit Delft, Delft.
- Aten, D., J. Drewes, J. Kila & H. de Raad (red.), 2007: *Geschiedenis van Alkmaar*. Waanders, Zwolle.
- Bazelmans, J., M. Dijkstra & J. de Koning, 2002: Voorspel, Holland in het eerste millennium. In: Th. de Nijs & E. Beukers (red), *Geschiedenis van Holland deel 1*, 22-68. Uitgeverij Verloren, Hilversum.
- Bennema, J. 1955: Geologische opbouw en bodemgesteldheid rond Gouda. *Waterschapsbelangen* 40 (5), 97-102.
- Besten, J. den, J. Maccabiani & H. Maljaars, 2014: Correlatie tussen leidingbreuk en satellietmetingen van bodemdaling. H2O-online, 12 oktober 2014 (h2owaternetwerk.nl/vakartikelen).
- Beuving, J. & J.J.H. van den Akker, 1996: Maaiveld daling van veengrasland bij twee slootpeilen in de polder Zegveldbroek. Vijfentwintig jaar zakkingsmetingen op het ROC Zegveld. Wageningen. DLO-Staring Centrum. Rapport 377.
- Boleij, J., 2013: Grondwaterwinning Croda. Onderzoek primaire- en omgevingseffecten stopzetten grondwaterwinning. RoyalhaskoningDHV conceptrapport versie 3 (17 juli 2013), RoyalhaskoningDHV, Rotterdam.
- Bollen, R.W.L., 1992: De ruimtelijke ontwikkeling van het Goudse woonhuis in de late middeleeuwen (1300-1600), in: Habermehl et al. 1992.
- Borger, G.J., 1975: De Veenhoop. Een historisch-geografisch onderzoek naar het verdwijnen van het veendeck in een deel van West-Friesland. Buijten en Schipperheijn, Repro Holland Amsterdam, 242 p.
- Borger, G.J., 1977: De ontwatering van het veen: een hoofdlijn in de historische nederzettingen-geografie. *Geografisch Tijdschrift, Nieuwe Reeks* 11, 377-387.
- Born, G.J. van den, F. Kragt, D. Henkens, B. Rijken, B. van Bommel & S. van der Sluis, 2016: Dalende bodems, stijgende kosten. Mogelijke maatregelen tegen veenbodemdaling in het landelijk en stedelijk gebied. PBL-publicatienummer 1064. Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag.
- Bosch, P.R., M. Hoogvliet, H. Goosen & F. van der Hoeven 2011: Fysieke bouwstenen voor de knelpuntanalyse nieuwbouw en herstructurering. TNO-060-UT-2011-01826 (19 oktober 2011: Climate Proof Cities Consortium, Utrecht.
- Buma, J., 2009. Grondwater in stedelijk gebied. Praktijkvoorbeelden van kansen creëren en omgaan met knelpunten. Stowa-rapport 2009-18. Stowa i. s. m. deltares, Delft cluster en Rijkswaterstaat, Utrecht.



- Coalitie 'Stevige stad op slappe Bodem' 2015. 'Stevige stad op slappe bodem'. Startpunt voor het realiseren van een -vanuit water en ondergrond beschouwd - robuust lange termijn perspectief voor de binnenstad. Projectplan voor de historische binnenstad van Gouda oktober 2014 - juni 2015.
- Cohen, K M., E. Stouthamer, H. J. Pierik & A. H. Geurts, 2012. Rhine-Meuse Delta Studies' Digital Basemap for Delta Evolution and Palaeogeography. Departement Fysische Geografie, Universiteit Utrecht.
- Dasselaar, M. van, 2013. Archeologisch onderzoek met macrocore boringen in de binnenstad van Gouda. ArcheoMedia-rapport A12-041-I. Archeomedia, Capelle aan den IJssel.
- Deltalife 2015: Dossier bodemdaling in veengebieden, februari 2015. Deltares, Delft.
- Denslagen, W., 2001: Gouda. Waanders / Rijksdienst voor de Monumentenzorg, Zwolle/Zeist.
- Die Goude, 2012-2014. Stad van de Gouwenaars: een beschrijving van de Goudse wijken, straten, bruggen en waterlopen. Vier delen, Gouda 2012-2014.
- Dijk, P. van & J. Veul, 2010. Water-ways to climate adaptation. A landscape-based design approach for sustainable urban water systems. Master Thesis Landscape Architecture Wageningen University, Wageningen.
- Dosker, M.C.M.V., 2017: Veenbehoud en cultuurhistorie. Welke mogelijkheden zijn er voor duurzaam beheer van veenweiden als waardevol cultuurlandschap? Natuurlijke Zaken-rapport 17-003 (28-04-2017). Natuurlijke Zaken, Landschap Noord-Holland.
- Fijan, A., D. Kern & R. van Cleef, 2014: Intentieverklaring historische binnenstad van Gouda 'Stevige stad op slappe bodem' (9 oktober 2014).
- Gawronski, J. & J. Veerkamp, 2003: Over staal, kleef en stuit. Funderingen in Amsterdam. In: J. Gawronski, F. Schmidt & M.-Th. Van Thoor (red.), Amsterdam Monumenten & Archeologie 2, 11-23. Uitgeverij Bas Lubberhuizen, Amsterdam.
- Geer, F. van, 2012. Tijdreeksanalyse: Introductie en aandachtspunten. Stromingen 18 (nummer 2), 5-14.
- Geisler, L., 2015: Improving the land subsidence model Phoenix. Master thesis Water Science and Management, Universiteit Utrecht
- Geldof, G., 2015: Bodemdaling Binnenstad Gouda. Een groeinarratief waaruit geleidelijk een strategie emergeert rond de problemen die ontstaan rond de zakkende binnenstad (versie 3, 20 april 2015). Werkplaats Gouda, Gouda.
- Gemeente Gouda & Hoogheemraadschap Van Rijnland, 2012: Actualisatie Waterplan Gouda 2011-2015. Ambities en onderzoeksagenda. Gouda.
- Gemeente Gouda, Hoogheemraadschap Van Rijnland, Hoogheemraadschap Van Schieland, Waterschap Wilck&Wiericke & Ingenieursbureau Witteveen +Bos, 2003. Waterplan Gouda. Gouda.
- Gemeente Gouda 2004: Ontwerp gemeentelijk rioleringsplan Gouda 2004-2008, deel 2. Gemeente Gouda.
- Gemeente Gouda 2015: Waterpeil en funderingen: de dilemma's van de Goudse binnenstad. Monumentenzorg en archeologie, nieuwsbrief 45 (juni 2015).
- Gemeente Gouda 2016: Memo Stand van zaken Stevige Stad op Slappe Bodem, november 2016. Gemeente Gouda.
- Gemeente Gouda, 2009: Gouda op de kaart. Erfgoud, derde editie (2009). Uitgave gemeente Gouda.
- Goudriaan, K., B.J. Ibelings & J. C. Visser, 2000: Het hofstedengeldregister van circa 1397 en andere bronnen voor de vroege stadsontwikkeling van Gouda (Apparaat voor de Geschiedenis van Holland 14). Uitgeverij Verloren/Historische Vereniging Holland. Hilversum/Haarlem.
- Graafland, M., 2016: Van communicatie naar participatie. Hoe communiceren gemeentes effectief over bodemdaling. Een verkenning en analyse. Masterthesis Universiteit Utrecht 19-07-2016. Vakgroep Geo-communicatie, Faculteit Geowetenschappen, Universiteit Utrecht i. s. m. Gemeente Gouda.
- Groenendijk, M.J., 2016a: Programma van Eisen Stevige stad op slappe bodem, project 1: Actualisatie BAG-bestand Gouda.



- Groenendijk, M.J., 2016b: Oplegnotitie rapport Archeologisch en bouwhistorisch bureauonderzoek van de historische binnenstad van Gouda. In het kader van het projectplan 'Stevige stad op slappe bodem'. Gemeente Gouda.
- Groenendijk, M.J., 2016c: Plan van aanpak project: Stevige stad op slappe bodem. Deelproject 2: Opstellen Themakaarten water en bodem. Conceptversie 06-04-2016. Gemeente Gouda.
- Groenendijk, M.J., 2017a: Plan van aanpak project: Stevige stad op slappe bodem. Project 4: Synthese. Conceptversie maart 2017. Gemeente Gouda.
- Groenendijk, M.J., 2017b: Oplegnotitie d.d. 25-08-2017 'vervolg onderzoek funderingen Gouda: geactualiseerde Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG)'. Gemeente Gouda.
- Habermehl, N., P.H.A.M. Abels, H.A. van Dolder-de Wit & L.B. Korstanje (eds), 1992. In de stad van die Goude. Uitgave ter gelegenheid van het zestigjarig bestaan van de Oudheidkundige Kring Die Goude op 7 oktober 1992. Uitgeverij Eburon, Delft.
- Ham, W. van de, 2003: De Grote Waard, geschiedenis van een Hollands Landschap. Uitgeverij 010, Rotterdam.
- Hansje Brinker 2011: Historische deformatiemetingen gemeente Gouda d.m.v. radar en interferometrie. Rapport Hansje Brinker 18 november 2011. Hansje Brinker Infrastructuur en Monitoring, Delft.
- Hardeveld, H. van, M. van der Lee, J. Strijker, A. van Bokhoven & H. de Jong, 2014: Toekomstverkenning Bodemdaling. Eindrapport fase (Definitief, 8 september 2014).
- Hardeveld, H.A. van, F.H. van Schaik, F.A.A. Kramer, E. Oomen & M. Dijkstra, 2003: Peilbeheer in veenweidegebied. Een literatuurstudie. Leiden: Hoogheemraadschap Rijnland.
- Hoogheemraadschap van Rijnland, 2009: Regionale aan-en afvoerstudie Gouda en omgeving. Rapport Hoogheemraadschap van Rijnland, augustus 2009, Leiden.
- Huisman, H. 2017: Bodemdaling Gouda en grondwaterstanden. RCE intern rapport 24 mei 2017. Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Amersfoort.
- Jansen, P.C. & E.P. Querner, 2010: Behoud veenweiden door aangepast peilbeheer. Landschap, tijdschrift voor landschapsecologie en milieukunde 27 (3), 128-135.
- Jansen, P.C., E.P. Querner & J.J.H. van den Akker, 2009: Onderwaterdrains in het veenweidegebied. De gevolgen voor de inlaatbehoefte, de afvoer van oppervlaktewater en voor maaiveld daling. Alterra-rapport 1872. Alterra, Wageningen.
- Jansen, P.C., E.P. Querner & C. Kwakernaak, 2007: Effecten van waterpeilstrategieën in veenweidegebieden. Een scenariostudie in het gebied rond Zegveld. Alterra-rapport 1516. Alterra, Wageningen.
- Jansen, P.C., E.P. Querner & C. Kwakernaak, 2008: Effecten van waterpeilstrategieën in veenweidegebieden. Een scenariostudie in een gebied met klei-op-veen rond. Alterra-rapport 1666. Alterra, Wageningen.
- Jansen, P.C., E.P. Querner & C. Kwakernaak, 2008: Nieuw peilbeheer in de veenweiden? H2O 2008 (1), 31-33
- Jansen, P.C., R.F.A. Hendriks & C. Kwakernaak, 2009: Behoud van veenbodems door ander peilbeheer: maatregelen voor een robuuste inrichting van het westelijk veenweidegebied. Alterra-rapport 2009. Alterra, Wageningen.
- Jong, D.L. de, 1949: De bodem van Gouda. Die Goude 1949, 123-128.
- Kempens, B., F. Brouwer, D.J. Brus, M. Pleijter & F. de Vries, 2011: Validatie Bodemkaart Veengebieden provincie Utrecht, schaal 1: 25 000. Alterra-rapport 2252, Alterra, Wageningen
- Keunen, L.J., 2016a: Beknopte samenvatting van werkzaamheden en resultaten 'Stevige stad op slappe bodem', project 2: themakaarten water en bodem. RAAP intern document 4 oktober 2016. RAAP archeologisch adviesbureau b. v., Weesp.
- Keunen, L.J., 2016b: Gouda, stevige stad op slappe bodem; Project 2: toelichting op de themakaarten voor



- water en bodem. RAAP-notitie 5671. RAAP archeologisch adviesbureau b. v., Weesp.
- Keunen, L.J., 2016c: Verslag archiefonderzoek peilbesluiten en maaiveldhoogtes, gemeente Gouda op 8 juli 2016. RAAP intern document. RAAP archeologisch adviesbureau b. v., Weesp.
- Klein, J-W, 1998. Het project stadsgeschiedenis Gouda: een eerste inhoudelijk resumé. *Tidinghe van die Goude* 1998 (4), 150-155.
- Kok, R., 2004: Achter de limes: Romeinse vondsten uit Gouda en omgeving. *Tidinge van Die Goude* 2004 (2), 48-63.
- Korff, M., 2013: Response of piled buildings to the construction of deep excavations. Academisch proefschrift University of Cambridge/Jesus College, Cambridge UK.
- Korff, M. & R.P. Roggeveld (red.), 2012: Aanbevelingen voor het ontwerp van bouwkuipen in stedelijke omgeving. COB-rapport F530-ER-12-49785 (eindrapport). Stichting COB - Nederlands kenniscentrum voor ondergronds bouwen en ondergronds ruimtegebruik, Gouda.
- Koster, K., & G. Erkens, 2017: Sonderingen en bodemdaling in venige delta's en kustgebieden. *Geo.brief* 42 (4, juni 2017), 9-11.
- Koster, K., Erkens, G. & C. Zwanenburg, 2016: A new soil mechanics approach to quantify and predict land subsidence by peat compression. *Geophysical Research Letters* 43(20), 10792-10799.
- Kuipéri, H.G., 1955: Cultuurtechnische problemen voor Gouda en omgeving. *Waterschapsbelangen* 40 (5), 113-117.
- Laarhoven, S. van, 2017: Influence of loading history on subsurface architecture and subsidence potential for the historical city of Gouda, the Netherlands. Master Thesis, Universiteit van Utrecht (final version, July 1, 2017), Utrecht.
- Lange, W.J. de & I.O. Peereboom, 2006: Een methode voor landsdekkende berekening van gevolgen door maaiveld daling veroorzaakt door veenoxidatie. *Stromingen* 12 (4), 15-21.
- Leenen, H., 1999: Modelleren van niet-stationaire grondwaterstroming, vergeten we iets? *Stromingen* 5 (nummer 4), 13-19.
- Lorenz, G.K., W. Groenewoud, F. Schokking, M.W. van den Berg, J. Wiersma, F.J.J. Brouwer & S. Jelgersma, 1991: Heden en verleden, Nederland naar beneden? Interim-rapport over het onderzoek naar bodembeweging in Nederland. Rijkswaterstaat, Rijks Geologische Dienst.
- Marang, J., 2015: Zettingen binnenstad Gouda. Rapport Royal HaskoningDHV WATBD1380-101-R003-UW (definitief, 4 september 2015). Royal HaskoningDHV Nederland, Goes.
- Meischke & Van den Berg 1994. Referentie in Van Winsen et al. 2015
- Mekenkamp, J., 2008: Gemeenten met slappe bodem werken aan nieuwe ambities. *Civiele techniek* Volume 63 (7), 17-18.
- Minderhoud, P.S. J., G. Erkens, V.H. Pham, B.T. Vuong & E. Stouthamer, 2015: Assessing the potential of the multi-aquifer subsurface of the Mekong Delta (Vietnam) for land subsidence due to groundwater extraction. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 372, 73-76.
- Mulder, J.R., 1986: De bodemkaart van de Krimpenerwaard, schaal 1:25000. Bodem en landschap vroeger en nu. In: *Historische Encyclopedie Krimpenerwaard*, 11de jaargang, nummer. 3-4, 61-100.
- Nijs, P.J.M. den, 2015: Notitie (definitief) 'Toekomstbestendigheid historische binnenstad Gouda'. Wareco-notitie 20151105 (definitief, 19 november 2015). Wareco b. v., Amsterdam.
- Peeters, J., E. Stouthamer & M. Bouman, 2009: Nieuwe bodemkaart veengebieden provincie Utrecht, schaal 1:25.000. *Grondboor & Hamer* 3/4, 62-67.
- Peters, M.H., 2017: Verklaring mutatie ten behoeve van goede registratie Wet BAG, BAG-registernummer BAGSV1600. Gemeente Gouda
- Pieterse, N., L. van den Broek, L. Pols & H. Huitzing, 2015: Het Groene Hart in beeld. Een uniek veengebied midden in de Randstad. PBL-publicatienummer 1351. Planbureau voor de leefomgeving, Den Haag.



- Raaijmakers, S. 2014: Factsheet bodemdaling door veenoxidatie. Publicatie Natuur en Milieufederatie, Den Haag.
- RAAP, 2017: Interactieve webkaart cultuurhistorie Gemeente Gouda. RAAP archeologisch adviesbureau b. v., Weesp.
- Ritzema, H.P., G.B.M. Heuvelink, M. Heinen, P.W. Bogaart, F.J.E. van der Bolt, M.J.D. Hackten Broeke, T. Hoogland, M. Knotters, H.T.L. Massop & H.R.J. Vroon, 2012: Meten en interpreteren van grondwaterstanden Analyse van methodieken en nauwkeurigheid. Alterra-rapport 2345. Alterra, Wageningen.
- Sarfatij, H., 2006: Dordracum excavatum: Opgravingen in Dordrecht, archeologie van een deltastad. Proefschrift Universiteit van Amsterdam, Amsterdam.
- Sarfatij, H., 2007: Archeologie van een deltastad: opgravingen in de binnenstad van Dordrecht. Stichting Matrijs, Utrecht.
- Schans, M. van der & Y. Houhuessen 2011: Phoenix 1.0: Deelrapport 1: Onderbouwing rekenregels regionale bodemdalingsapplicatie. Grontmij Nederland BV, Houten.
- Schans, M. van der & Y. Houhuessen 2012: Phoenix 1.0: Deelrapport 3: Vervaardiging en evaluatie regionale bodemdalingsapplicatie westelijk deel Provincie Utrecht/HDSR. Grontmij Nederland BV, De Bilt.
- Schokker, J., S. van Gessel & G. de Lange, 2006: Bodemdalingsgevoeligheid Zuid-Holland in kaart. Informatie over bodem en water. TNO, Utrecht.
- Schot, E., 2011. Binnenstad Gouda. Verbreed basisrioleringsplan. Royal Haskoning definitief rapport (15 februari 2011). Royal Haskoning b. v., Goes.
- Schot, E., A. 't Jong, A. Fijan, P. de Ridder, P.C. Schraven & R. Swets, 2015: Gemeentelijk Rioleringsplan 2014-2018. Rapport HaskoningDHW Nederland i.s.m. Gemeente Gouda (versie 1 mei 2015)
- Schothorst, C.J., 1967a: Klink van veengrond na diepere ontwatering. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
- Schothorst, C.J., 1967b: Bepaling van de componenten van de zakking na grondwaterstands daling. Landbouwkundig Tijdschrift 79 (11), 402-411.
- Schothorst, C.J., 1977: Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands. Geoderma 17, 265-291.
- SkyGeo 2017: InSAR measurements Gouda. SkyGeo, Delft (overgenomen uit: Van Laarhoven 2017).
- Stavenuiter, A., 2015: Bouwsteen H. 'Bodemdaling in veenweiden' Uitgave Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.
- Stouthamer, E, K.M. Cohen & W.Z. Hoek, 2015. De vorming van het land. Perspectief uitgevers, Utrecht
- Stouthamer, E., H. Berendsen, J. Peeters & M. Bouman, 2008: Toelichting Bodemkaart Veengebieden provincie Utrecht, schaal 1:25000. Departement Fysische Geografie, Universiteit Utrecht/Tauw b.v. in opdracht van de Provincie Utrecht, afdeling Groen.
- Tamboer, J. 2007. Watersysteembeschrijving en knelpunten stadsboezem Gouda. Technisch rapport (eindrapport april 2007). Hoogheemraadschap van Rijnland, Leiden.
- Theunissen, E.M., D.J. Huisman, A. Smit & F. van der Heijden, 2006: Kijkoperatie in het veen. Kwaliteitsbepalend onderzoek naar de neolithische veenweg in Nieuw-Dordrecht (gemeente Emmen). Rapportages archeologische monumentenzorg 130. Rijksdienst voor het oudheidkundig bodemonderzoek, Amersfoort.
- Velzen, H.J. van & M.R. van Winsen, 2016: Actualisatie BAG historische binnenstad van Gouda in het kader van het projectplan 'Stevige stad op slappe bodem'. Rapport FlexusAWC (projectcode 160331). FlexusAWC, Rotterdam.
- Ven, G.P. van de, 2001: Waterstaat. In: W. Denslagen, Gouda. Waanders / Rijksdienst voor de Monumentenzorg, Zwolle/Zeist.



- Ven, G.P. van de, 2003: Leefbaar laagland. Geschiedenis van de waterbeheersing en Landaanwinning in Nederland. Stichting Matrijs, Utrecht.
- Van de Ven, F.H.M. & Rijsberman, M., 1999: Impact of groundwater on urban development in The Netherlands. In J.B. Ellis (red), impacts of urban growth on surface water and groundwater quality. Proceedings of the IUGG 99, the XXII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics at Birmingham, UK, 18-30 July 1999. IAHS Press publication 259, 13-21.
- Verschure, M.H. 2012. In Holland stond een huis. De ontwikkeling van funderingstechnieken in stedelijke context tijdens de middeleeuwen in West- Nederland. Bachelor scriptie Faculteit der Archeologie, Universiteit Leiden, 29 juni 2012.
- Visser, J.C., 1994: Gouda, de wording van een polderstad., Historisch geografisch tijdschrift 12 (2), 37-52.
- Wang, H., 2016. Control urban groundwater in delta areas. A case study in Turfmarkt, Gouda, the Netherlands. Master Thesis Delft University of Technology (10 november 2016).
- Willemse, N.W., L.J. Keunen, L.M.P. van Meijel & T. Bouma, 2013: "... Die plaatsen, welke in de Douwelerkolk verdronken zijn...": fysisch- en historisch-geografische bouwstenen voor een archeologische verwachtingskaart van de gemeente Deventer. RAAP-rapport 2571. RAAP archeologisch adviesbureau, Weesp.
- Willet, J.R., 1964: Zettingsberekening in de cultuurtechniek. Tijdschrift Koninklijke Nederlandse Heide Maatschappij 75, (6) p. 309-314.
- Winsen, M.R. van, H. van Velzen, M. van Dasselaar & A. van der Mark, 2015: Archeologisch en bouwhistorisch bureauonderzoek van de historische binnenstad van Gouda. In het kader van het projectplan 'Stevige stad op slappe bodem' FlexusAWC/Archeomedia projectcode A15-032F.
- Wolters, A., J. Hoekstra & M. Boerefij, 2011: Kockengen Waterproof: Inventarisatie bodemdaling en invulling zorgplicht Grondwater. Tauw b. v., Utrecht.
- Zaadnoordijk W.J. & P. Wonink, 1995: Zettingen bij grootschalige ingrepen in de grondwaterstroming. Stromingen 1, 17-27.
- Zijlstra, K.C., 1955: Enkele hydrologische beschouwingen over de bodem rond Gouda. Waterschapsbelangen 40(5), 105-108.

