



Delft University of Technology

Onderzoek naar zettingen in de gemeente Zevenaar

de Lange, Ger; van der Velden, WHJ; Kopinga, J; Hanssen, Ramon; Marinkovic, P; Buma, J.T.; Goorden, N; Bakker, MAJ

Publication date

2009

Document Version

Final published version

Citation (APA)

de Lange, G., van der Velden, W. H. J., Kopinga, J., Hanssen, R., Marinkovic, P., Buma, J. T., ... Bakker, M. A. J. (2009). Onderzoek naar zettingen in de gemeente Zevenaar. Deltares.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Onderzoek naar zettingen in de gemeente Zevenaar

2009-U-R79206

G. de Lange, Deltares
W.H.J. van der Velden, Fugro
J. Kopinga, Alterra
R.F. Hanssen, TU Delft
P. Marinkovic, TU Delft
J.T. Buma, Deltares
N. Goorden, Deltares
M.A.J. Bakker, Deltares

Titel
Onderzoek naar zettingen in de gemeente Zevenaar

Opdrachtgever	Kenmerk	Pagina's
Gemeente Zevenaar	0904-0008	110 met bijlagen

Projectnummer
092.79206

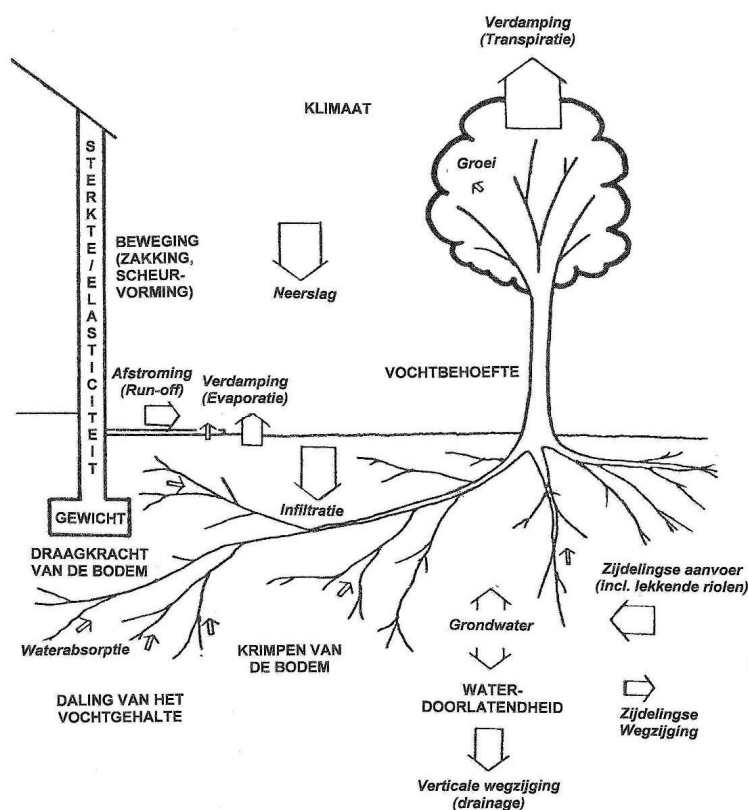
Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	2009-04-06	Ger de Lange		Frans van de Ven		Hans Gehrels	

Status
definitief

0 Samenvatting

0.1 Droogte en verzakkingen

In de droge zomer van 2006 werden in de gemeente Zevenaar diverse meldingen van schade door verzakking van huizen gemeld. Omdat in het verleden bij grote droogte, met name in de zomer van 1997, al eerder zettingschade was opgetreden heeft de gemeente direct Fugro een eerste onderzoek laten doen naar de mogelijke oorzaken. Een eenduidige oorzaak kon toen nog niet worden aangewezen. Hoewel krimp door uitdroging van de ondiepe kleilaag als voor de hand liggende oorzaak van de extra zetting van ondiep gefundeerde huizen werd aangemerkt, kon niet eenduidig worden vastgesteld wat op zijn beurt de uitdroging had veroorzaakt. Was het een verlaging van de stijghoogte van het grondwater in de onder de kleilaag liggende zandlaag, waren het de bomen, die in de droge zomermaand alle bodemvocht opeisten of zorgde drainage voor de droge grondslag. De stijghoogte in de watervoerende zandlaag kon bovendien door een aantal oorzaken worden verlaagd. Ook was het niet zeker of droogte in de toekomst een probleem voor alle ondiep gefundeerde huizen zou worden. Bovendien was niet duidelijk in hoeverre de zetting ook nog andere oorzaken kon hebben. Een illustratie van de complexe situatie is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 0.1: Diagram (niet op schaal) met daarin de voornaamste waterbewegingen in de bodem (schuinschrift) en factoren die in ogenschouw dienen te worden genomen bij onderzoek naar de bijdragen tot zetting van funderingen

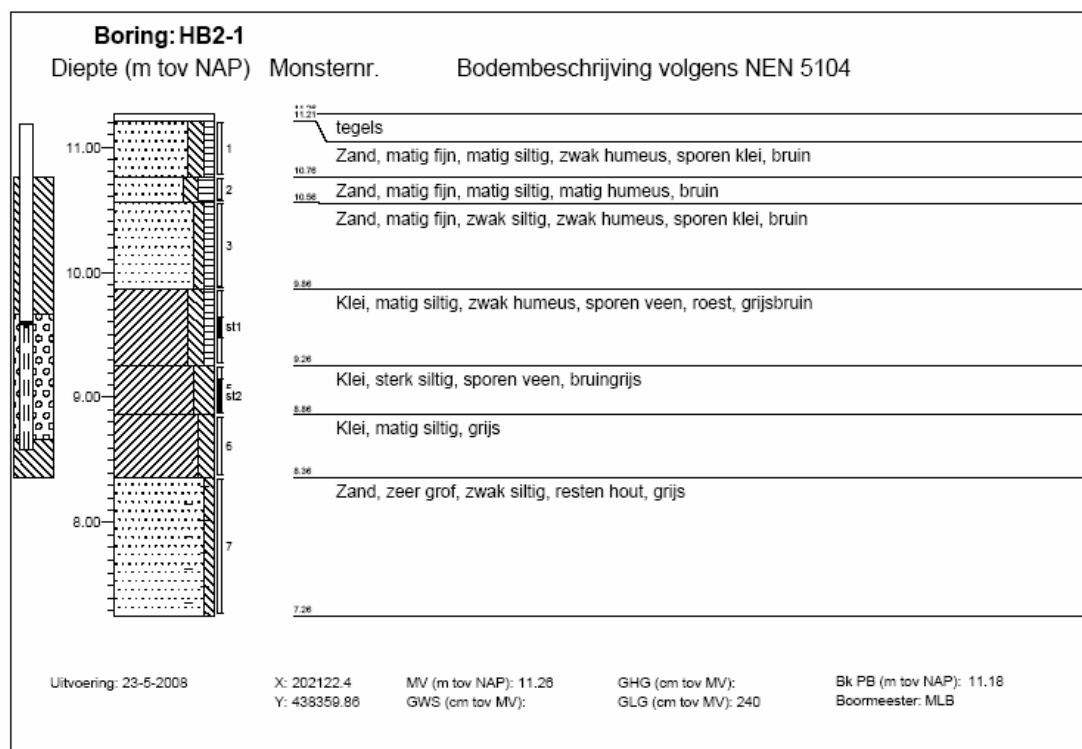
0.2 Grondwatermodellen

Na overleg van de gemeente Zevenaar met Professor Molenkamp van de TU Delft en deskundigen van Alterra, Deltares en Fugro, werd geconcludeerd dat nader onderzoek nodig was om deze oorzaken beter in kaart te brengen. Deze opdracht werd gegeven aan een consortium, bestaande uit Alterra, Deltares, Fugro en de TUDelft.

Onder regie van Deltares zijn vervolgens de verschillende mogelijke oorzaken aangepakt. Alterra heeft eerst alle kennis over de invloed van bomen en struiken op het bodemvocht samengevat.

0.3 Veldwerk

Om de toestand van de bodem, het grondwater en de constructie van de huizen en funderingen te onderzoeken zijn in overleg met de gemeente een aantal locaties waar schade was opgetreden in detail bekeken. Fugro heeft hiervoor sonderingen en boringen in twee profielen in de Julianalaan en één in de wijk Zonegge uitgevoerd.



Figuur 0.2 Bodemprofiel Julianalaan

In de boringen zijn grondmonsters genomen voor laboratoriumonderzoek en zijn peilbuizen geplaatst om de grondwaterstanden in en onder de kleilaag te registreren. Ook werden vochtmeters in de grond ingegraven, om de invloed van de bomen en struiken te kunnen waarnemen.



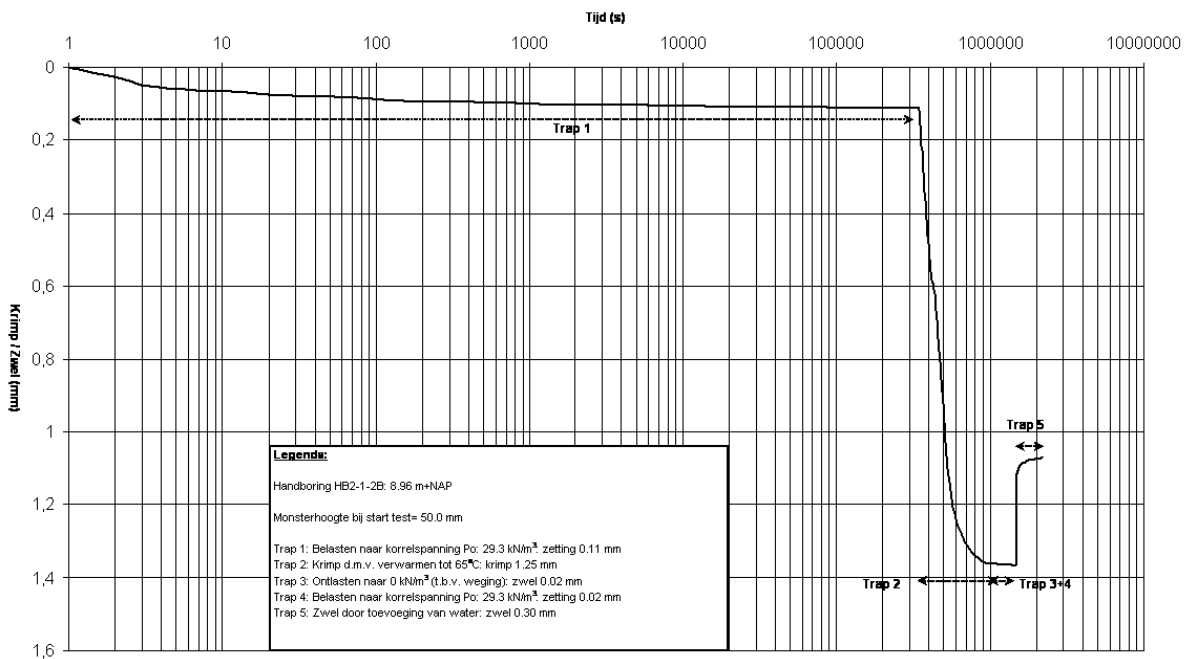
Figuur 0.3 Plaatsing van een vochtmeter.

Ook zijn bij het zwembad een regenmeter en een temperatuursensor geplaatst die als referentie dienen voor de metingen in de straten.

Het grondonderzoek toonde aan dat op de gekozen locaties de grondopbouw niet afwijkt van de rest van de gemeente: onder een dunne zandlaag ligt een kleilaag van ongeveer 1,5 tot 2 meter dik en deze ligt weer op een dikke laag grof zand. Uit de bouwtekeningen was bekend dat de ondiep gefundeerde huizen op de kleilaag staan.

0.4 Laboratoriumproeven

Omdat de zandlagen in vergelijking met de kleilaag praktisch ongevoelig zijn voor verandering van bovenbelasting en vochtgehalte zijn in het laboratorium van Fugro in Arnhem de kleimonsters verder beproefd. Twee zaken zijn dan vooral belangrijk, namelijk de sterkte van de kleilaag, de mate van samendrukking onder het gewicht van de huizen, maar bovenal het gedrag de klei droog wordt.



Verzakte woningen te Zevenaar (definitief onderzoek)
Krimp- / Zwelltest

Opdrachtnummer: 6006-0521-001

Bijlage:

Figuur 0.4 resultaat krimpproef

Als bepaald kan worden hoe droog de klei bij de huizen in de realiteit wordt kan met de uitkomsten uit het laboratorium ingeschat worden hoeveel verzakking er op kan treden.

0.5 Klimaat- , begroeiing - en grondwateraspecten

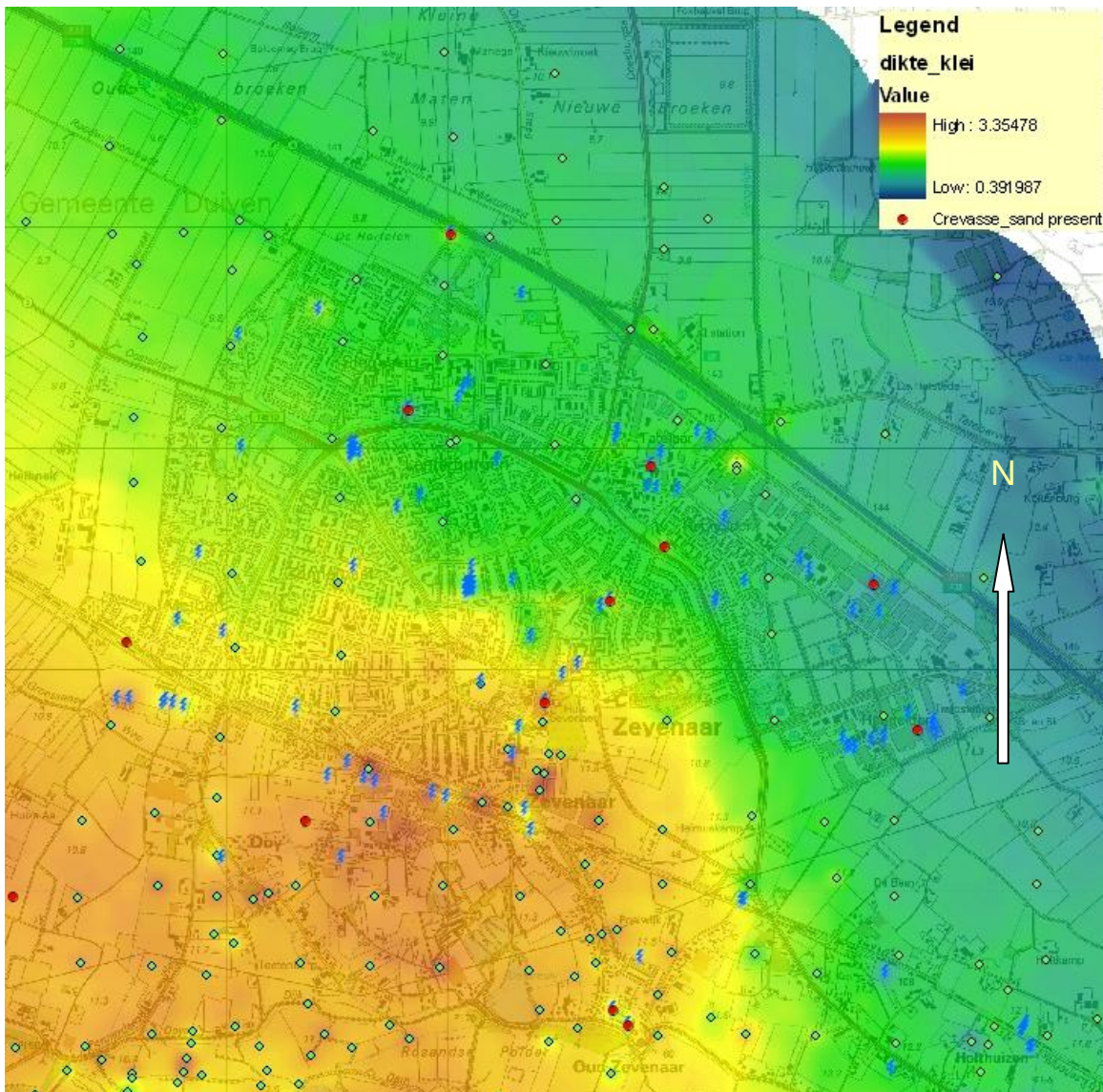
Waarom stak de verzakkingsproblematiek in 2006 (weer) de kop op? Het gerapporteerde onderzoek toont aan dat juli 2006 meteorologisch bijzondere maand was omdat de verdamping extreem hoog was, samenvallend met reeds lage grondwaterstanden aan het begin van de droogteperiode, en ook een zeer droge juni maand. Dit betekent: weinig water in de klei beschikbaar, maar ook weinig aanvoermogelijkheden van elders. Bovendien is duidelijk geworden dat dit soort situaties ook in de toekomst zullen kunnen optreden. Het is daarom waarschijnlijk dat effecten van droogte als in 2006 in de toekomst weer zullen optreden.

De invloed van het grondwater op de verzakkingsproblemen is verder onderzocht. Krimp treedt op bij te lage vochtgehalten. Uit vochtmetingen in de Julianalaan en de Zonegge blijkt dat de kleilaag in directe verbinding staat met het onderliggende zandpakket. De druk van het grondwater in dit zandpakket (de stijghoogte) is daardoor van directe invloed op de vochtgehalten in de klei.

Dit wordt ondersteund door berekeningen met een zogenaamd straatmodel. In dit straatmodel zijn de dikte van de bodemlagen, de ligging van de straat en de plaats van de bomen ten opzichte van de huizen nagebootst. Hiervoor is met alle in Zevenaar beschikbare sonderingen en boringen een nieuw ruimtelijk model van de kleilaag gemaakt. Door factoren als de hoeveelheid regen, verdamping, grondwaterstand en vochtname van bomen in te schatten wordt daarmee de verdroging van de klei voorspeld.



Figuur 0.5 Straatmodel geprojecteerd op Google Maps

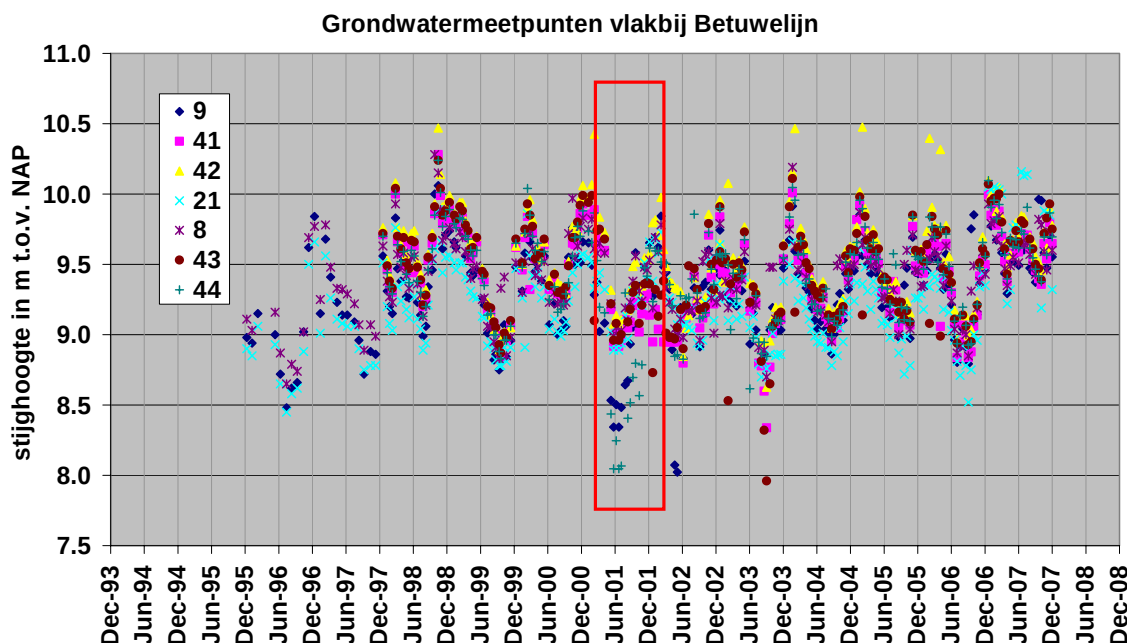


Figuur 0.6 Dikte klei in de omgeving van Zevenaar. De dikte neemt af van ruim 3 meter in het zuidwesten tot nul in het noordoosten.

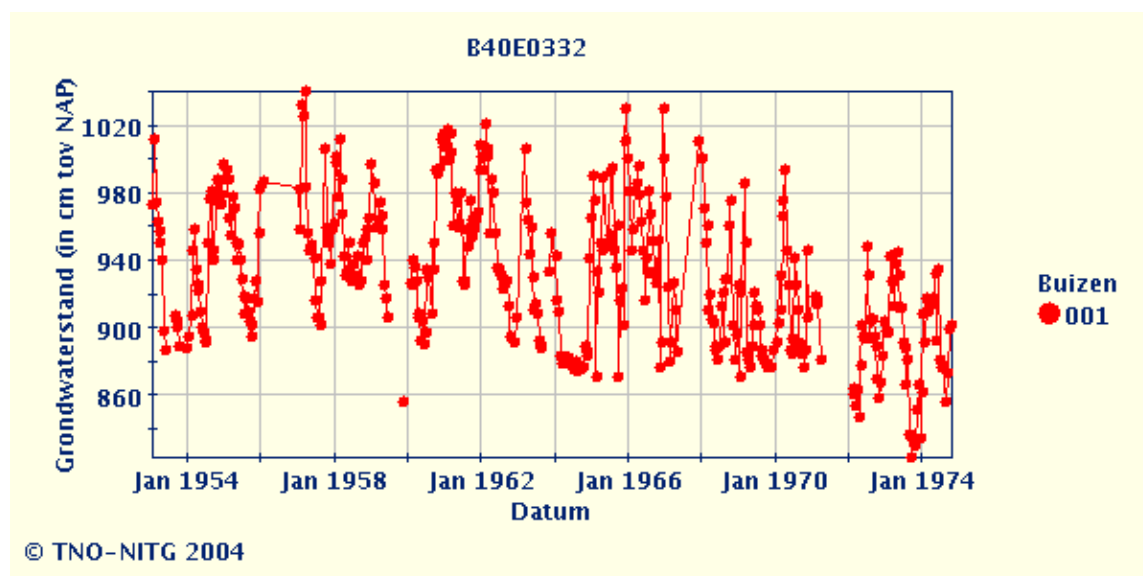
Ook de modelberekeningen laten zien dat de meteorologische condities invloed hebben op de vochtgehalten. Begroeiing maakt alleen verschil als de droogte niet te lang duurt. Bij langdurige droogte zal de klei vroeger of later toch overal kunnen uildrogen.

De stijghoogte in het zandpakket is dus van belang voor de verzakkingsproblematiek. Welke zaken beïnvloeden dan deze stijghoogte? Op basis van de beschikbare informatie kan van een aantal zaken worden geconcludeerd dat ze *geen* invloed van betekenis hebben op de stijghoogte. Het betreft de aanwezigheid van de tunnelbak in de Betuweroute (figuur 0.7), lokale waterlopen in Zevenaar, oude tankgrachten uit WOII, en grondwateronttrekkingen, ook voor beregening van het land in de zomer. De waterstand in de Rijn heeft wel invloed op de grondwaterstroming, maar het is niet zo dat lage rivierstanden altijd lage stijghoogten van het grondwater in Zevenaar tot gevolg hebben. Er is wel een relatie tussen het voorkomen van droge zomers en met lage stijghoogten. Het is hierbij belangrijk te bedenken dat een extreem lage stijghoogte weliswaar kan optreden tijdens een zeer droge zomer, maar het bereiken van zo'n laagterecord is misschien al voorafgegaan door een structurele verlaging

door andere oorzaken. Zo is de stijghoogte in en rond Zevenaar op veel plaatsen met enkele decimeters gedaald tussen 1965 en 1975 (figuur 0.8). In deze periode zijn grootschalige ingrepen gepleegd in de waterhuishouding rond Zevenaar, zoals peilverlagingen, rivierafsluitingen, ruilverkavelingen en de bouw van nieuwe gemalen.



Figuur 0.7 Na de aanleg van de tunnel in de Betuweroute (1999-2001, rode rechthoek), is de stijghoogte in Zevenaar niet blijvend gedaald.



Figuur 0.8 De enige beschikbare lange meetreeks van de stijghoogte in Zevenaar (Methen). Na 1970 is er sprake van een daling. Helaas stopt de reeks in 1975. In andere reeksen in de omgeving zijn duidelijkere en blijvende dalingen in deze periode te zien.

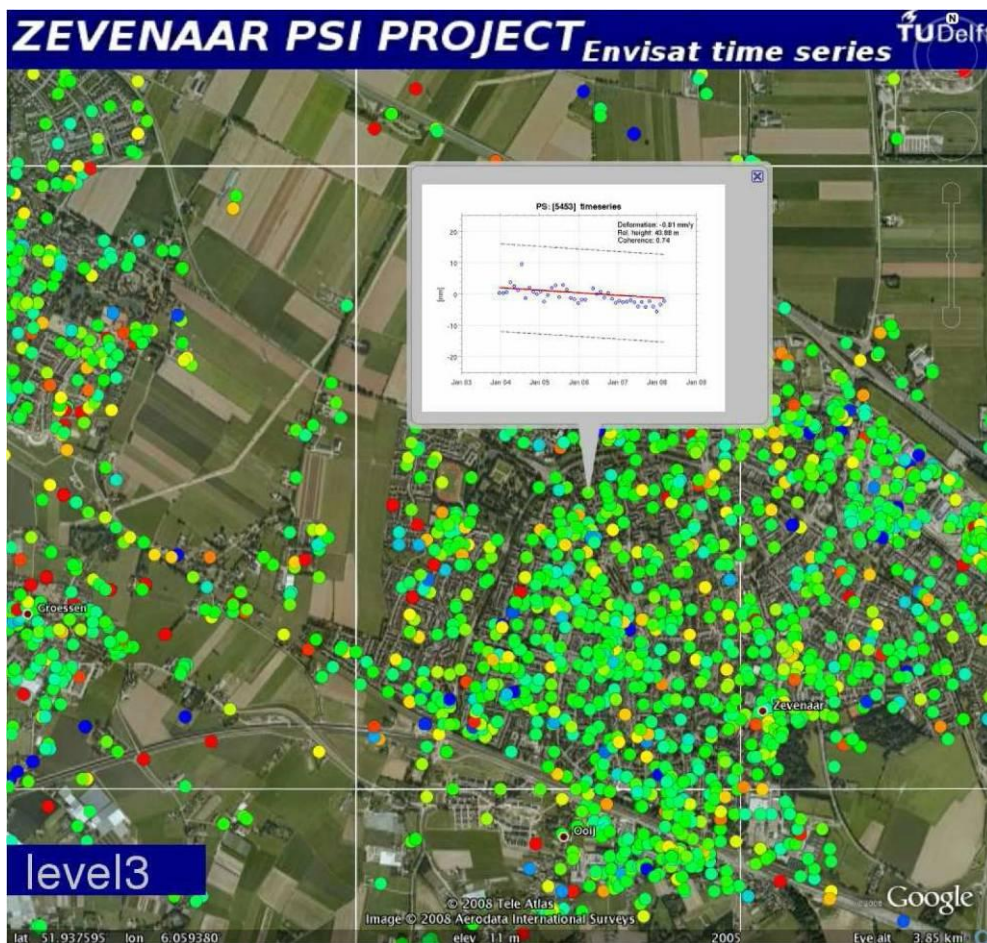
0.6 Bouwkundig onderzoek

Door Fugro is een inspectie van de huizen zelf en de funderingen uitgevoerd. Daarmee is vastgesteld hoeveel zakking er is opgetreden tussen voor- en achterkant en linker -en rechterkant van de huizen. Op een aantal plaatsen is de fundering blootgelegd om te zien of deze volgens de bouwtekeningen was uitgevoerd, anders zou het onderzoek wat dat betreft niet representatief kunnen zijn voor de rest van ondiep gefundeerd Zevenaar.

Er is een directe relatie tussen scheefstand en schade gevonden, maar krimp kan slechts een deel van de gevonden scheefstand verklaren. De zettingsberekeningen tonen aan dat de funderingen op staal in de loop der jaren enkele centimeters kunnen scheefzakken ten gevolge van de verschillende drukken van de muren op de grond. De verschillen in druk zijn vooral aanwezig als er sprake is van kelderconstructies. Het optreden van schade lijkt daarom het gevolg van een combinatie van deze effecten te zijn.

0.7 Zetting bekeken vanuit de ruimte

Een primeur voor Nederland was het onderzoek dat de TU Delft heeft uitgevoerd. Professor Hanssen van de sectie Mathematische Geodesie en Puntbepaling van de faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek heeft met behulp van waarnemingen met radar aan boord van satellieten de beweging van een zeer groot aantal objecten afgeleid. Deze satelliet vliegt ongeveer iedere maand over hetzelfde punt. De radar stralen weerkaatsen op harde oppervlakken, zoals dakpannen, muren en dergelijke.



Figuur 0.9 Punten die gedurende langere tijd de radarstralen op vergelijkbare wijze terugkaatsen. De gehele gemeente Zevenaar geeft ongeveer hetzelfde beeld.

Door de radarbeelden met elkaar te vergelijken kunnen verticale bewegingen van reflectoren in de tijd gevolgd worden. Deze radarbeelden worden sinds 1992 tot op heden gemaakt. Eerder is deze techniek al gebruikt om de bewegingen van aardbevingen zichtbaar te maken, maar dit is de eerste keer dat dit in Nederland is gebruikt om in een hele gemeente naar bodembewegingen te zoeken.

Het blijkt dat de gemiddelde beweging van de reflectoren over de gehele gemeente Zevenaar en de directe omgeving gelijk is. Er is geen verschil te maken tussen de wijken die op staal of op palen zijn gefundeerd.

0.8 Conclusies

Alle resultaten wijzen erop dat de zakking een lokaal verschijnsel is. Er zijn geen aanwijzingen dat een groot deel van Zevenaar langzaam verzakt. Wel kon worden berekend dat in de zomer van 2006 het vochtgehalte in de klei zo laag kon worden, dat er krimp optrad wat een bijdrage aan zetting en schade kon leveren. Grote bomen of struiken dragen bij aan het verdrogen, maar bij langdurige droogte zal door de verdamping toch ook elders krimp optreden, zeker als de stijghoogte onder de kleilaag valt. Krimp verklaart niet in alle gevallen volledig de waargenomen scheefstand. De verschillende gewichten van de muren kunnen bij ondiepe funderingen op den duur ook verschilzettingen veroorzaken. Krimp kan in de toekomst nog wel eens voorkomen, als de klimaatrecords weer gebroken worden. Maatregelen in het waterbeheer kunnen dit slechts in beperkte mate voorkomen. Lokale

maatregelen om het vochtgehalte onder woningen hoog te houden en het wortelstelsel buiten te houden, hebben in ieder geval op korte termijn een grotere kans van slagen. Uiteraard zal het aanbrengen van paalfunderingen in het pleistocene zand het zettingsprobleem van huizen, mits die daarvoor geschikt blijken grotendeels elimineren.

Inhoud

0 Samenvatting	i
0.1 Droogte en verzakkingen	i
0.2 Grondwatermodellen	ii
0.3 Veldwerk	ii
0.4 Laboratoriumproeven	iii
0.5 Klimaat-, begroeiing- en grondwateraspecten	iv
0.6 Bouwkundig onderzoek	viii
0.7 Zetting bekeken vanuit de ruimte	viii
0.8 Conclusies	ix
1 Inleiding	19
1.1 Aanleiding tot het onderzoek	19
1.2 Probleemschets en doelstelling	19
1.3 Aanpak	21
1.4 Opbouw rapport	21
2 Historisch onderzoek en locatiekeuze	23
3 Geologie	27
3.1 Geologie van het centrale rivierengebied; het Holoceen en Pleistoceen	27
3.1.1 Inleiding	27
3.1.2 Pleistoceen	27
3.1.3 Holoceen	28
3.2 Topografie van Zevenaar en omgeving	29
3.3 Lithologische samenstelling van de ondiepe ondergrond te Zevenaar	29
3.4 Modellering kleilaag	30
3.5 Geometrie van de kleilaag	31
4 Veldwerk	33
4.1 Inleiding	33
4.2 Onderzoek	33
4.2.1 Onderzoeksraaien	33
4.2.2 Sonderen	36
4.2.3 Boren	36
4.2.4 Uitzetten en waterpassen	37
4.2.5 Laboratoriumonderzoek	37
4.2.6 Lintvoeg- en deformatiemetingen	37
4.2.7 Bouwtechnisch onderzoek	38
4.2.8 Monitoring peilbuizen	38
4.2.9 Monitoring vochtgehalte, neerslag en temperatuur	38
4.3 Onderzoeksresultaten	38
4.3.1 Terrein- en bodemgesteldheid	38
4.3.2 Geohydrologische aspecten	40
4.3.3 Grondparameters	41
4.3.4 Lintvoeg- en deformatiemetingen	42
4.3.5 Bouwtechnisch onderzoek	42
4.3.6 Vochtgehalte, neerslag en temperatuur	43

4.4	Geotechnische analyses	43
4.4.1	Inleiding	43
4.4.2	Krimp	44
4.4.3	Restzetting terrein	45
4.4.4	Zetting t.g.v. funderingsdruk	45
4.4.5	Draagvermogen van de funderingen	45
4.4.6	Zetting t.g.v. grondwaterstandsverlaging	46
4.4.7	Toelichting zettingsberekeningen	46
4.5	Conclusie	47
5	Zetting bekeken vanuit de ruimte	49
5.1	Satellietgegevens	49
5.1.1	Satellietgegevens	49
5.1.2	Dataverwerkingsmethode: InSAR en PSI	51
5.1.3	Resultaten: interpretatie	51
5.1.4	Resultaten: overzicht	52
5.2	Resultaten in Google Earth	54
5.3	Tijdseries van Julianalaan en Zonegge	57
5.4	Interpretaties en conclusies	63
6	Vertaling van de verdamping van bomen naar de vochtonttrekking aan de bodem op locaties Julianalaan en Zonegge te Zevenaar, 2008	65
6.1	Doorworteld bodemvolume	65
6.2	Verdamping	66
6.3	Effectieve neerslag	67
6.4	Voorbeeldberekening Julianalaan	68
6.5	Discussie	69
6.6	Conclusies	70
7	Grondwateraspecten	73
7.1	Overzicht	73
7.2	Hydrologische systeemanalyse (Julianalaan en Zonegge)	73
7.2.1	Bodemopbouw	73
7.2.2	Grondwaterstanden	74
7.2.3	Vochtmetingen	75
7.3	Berekeningen met straatmodel	78
7.3.1	Algemeen	78
7.3.2	Parameterisatie	79
7.3.3	Resultaten	81
7.4	Conclusies t.a.v. de grondwatersituatie op de onderzoekslocaties	83
7.5	Bovenlokale / regionale watersysteemanalyse	84
7.5.1	Meteorologie	84
7.5.2	Stijghoogten (algemeen)	85
7.5.3	Historische ontwikkeling van de stijghoogte in de omgeving van Zevenaar	87
7.5.4	Invloed lokaal oppervlaktewater op stijghoogte	91
7.5.5	Invloed Rijnwaterstanden op de stijghoogte	93
7.5.6	Invloed tankgrachten op de stijghoogte	94
7.6	Berekeningen met regionaal model	95
7.6.1	Algemeen	95
7.6.2	Modelinvoer	96
7.6.3	Resultaten huidige situatie	97

7.6.4	Scenario's	98
7.7	Conclusies bovenlokale / regionale systeemanalyse	104
8	Synthese en conclusies	107
8.1	Diagnose	107
8.2	Effectiviteit van maatregelen:	108
9	Literatuur	111
 Bijlage(n)		
A	Bijlage: Fugro rapport 6006-0521-001 met bijlagen	113
B	Bijlage: Literatuuronderzoek Alterra	115
C	Bijlage: Tabellen en figuren vegetatieaspecten	149
D	Bijlage: Figuren Grondwateraspecten	157
 Lijst van Figuren		
Figuur 1.1	Gemelde schadegevallen categorie 1 en 2 (zichtbare scheurvorming en constructieve schade) (bron: Gemeente Zevenaar, in Fugro rapport 6006-0521-000)	20
Figuur 2.1	Kadasterkaart 19e eeuw. De toekomstige Julianalaan is gesitueerd in de weilanden van De Zon Egines. Zonегge 19 bevindt zich op de plaats die destijds Boterhek werd genoemd.	23
Figuur 2.2	De locatie van de panden aan de Julianalaan (met stippen aangegeven) in relatie tot de indeling van het weiland en de loopgraven.	24
Figuur 2.3	Zonегge 19 in relatie tot de ligging van de weilanden en de loopgraven. Op de onderste foto is de herinrichting na de oorlog te zien. Er is een weg ten noorden van de toekomstige panden aangelegd.	26
Figuur 3.1	Schematisch model van de opbouw van het rivierengebied. De onderste laag (in paars) vertegenwoordigt de pleistocene ondergrond. Daarbovenop zijn de oudere en recente riviergeulen met hun zandige afzettingen zichtbaar (lichtblauw en lichtgroen). In de overloopgebieden tussen de riviergeulen zijn klei- (groen) en veen- (bruin) pakketten afgezet. In de ondergrond is een begraven oud rivierduin zichtbaar (in geel).	28
Figuur 3.2	Weergave van de hoogteligging (reliëf) volgens het AHN (www.ahn.nl). Rood is hoog, blauw is laag.	29
Figuur 3.3	Basis van de kleilaag in m boven NAP.	31
Figuur 3.4	Dikte van de kleilaag in m.	32
Figuur 4.1	Locaties grondonderzoek en monitoring in de Julianalaan	34
Figuur 4.2	Locaties grondonderzoek en monitoring in Zonегge 19	35
Figuur 4.3	Situatietekeningen referentiestation Zwembad	36
Figuur 4.4	Resultaat krimpproef.	44
Figuur 5.1	Ligging van het radarbeeld van strook 380, beeld 2550 en van het beeld van strook 151 en beeld 2548. en de 'Area Of Interest' (AOI). Alhoewel dit gebied in beide beelden ligt, is gekozen voor de eerste optie (380/2550), zoals aangegeven in blauw (Envisat) en rood (ERS-1/2). Voor het andere beeld is Zevenaar in 40% van de beschikbare beelden niet zichtbaar. Toch is ook deze dataset verwerkt.	50
Figuur 5.2	Data beschikbaarheid en temporeel bereik van de verschillende datasets. Er zijn 82 ERS1/2 beelden beschikbaar voor strook/beeld 151/2548 (groen); 44 ERS1/2	

beelden voor strook/beeld 380/2250 (rood); and 44 Envisat (ASAR) beelden voor strook/beeld 380/2250 (blauw). Duidelijk zichtbaar zijn de intervallen 1994-1995 en 2001/2004, waarbij geen data door de satellieten zijn opgenomen.	50
Figuur 5.3 Incoherent gemiddeld radar amplitudebeeld, met daarin de geanalyseerde gebieden.	51
Figuur 5.4 Geschatte residuele topografie voor het totale gebied in meters, relatief tot aan het referentiepunt. 43 interferogrammen zijn gebruikt voor deze analyse tussen 21.12.2003 en 709.03.2008.	52
Figuur 5.5 Geschatte lineaire snelheid in meters per jaar voor het totale gebied relatief aan het referentiepunt. 43 interferogrammen bestrijken het interval 21.12.2003 - 09.03.2008.	52
Figuur 5.6 Geschatte residuele topografie (in meters) voor het totale gebied relatief tot het referentiepunt. 83 interferogrammen zijn gebruikt in de analyse tussen 16.07.1995 - 15.01.2000.	53
Figuur 5.7 Schattingen voor lineaire snelheid in meters per jaar, relatief aan het referentiepunt. 83 verwerkte interferogrammen bestrijken de periode 16.07.1995 - 15.01.2000.	53
Figuur 5.8 Schatting van de lineaire snelheid van het gebied rond Zevenaar, in meters per jaar Slechts 21 beelden konden worden gebruikt tussen 08.09.1995 - 15.12.2000. Doordat het gebied op de rand van de beelden ligt is alleen het gebied van Duiven, Zevenaar en Didam verwerkt.	54
Figuur 5.9 Voorbeeld van de PSI resultaten van de ERS satellieten in Google Earth. Afhankelijk van het gekozen schaalniveau (in/uitzoomen) worden meer of minder punten getoond.	55
Figuur 5.10 Voorbeeld van de PSI resultaten van de Envisat satelliet in Google Earth. In dit voorbeeld is geen filtering en 'outlier' detection toegepast, waardoor enkele punten een onjuist deformatiepatroon zullen vertonen.	56
Figuur 5.11 Voorbeeld van een aangeklikt punt en de getoonde tijdserie van dat punt. Alle schattingen zijn relatief tot een referentiepunt, dat met een special symbool is aangeduid in de kaart. Alle eenheden zijn in meters per jaar De localisering van de punten heeft een precisie van ca 50 meter.	57
Figuur 5.12 Selectie van PS reflecties in de wijk Zonegge De blauwe polygon geeft het in detail geanalyseerde gebied aan.	58
Figuur 5.13 Tijdseries van de PS reflecties in Zonegge van december 2003 tot maart 2008.	59
Figuur 5.14 Selectie van PS reflecties in de wijk Julianalaan. De blauwe polygon geeft het in detail geanalyseerde gebied aan.	60
Figuur 5.15 Julianalaan (zoom in) De blauwe polygon omvat de PS punten in het gebied Julianalaan. In Figuur 5.16 de tijdseries van deze specifieke punten.	61
Figuur 5.16 Tijdseries van de PS reflecties in de Julianalaan van december 2003 tot maart 2008.	62
Figuur 5.17 Locatie van het referentiepunt in Didam	63
Figuur 6.1 Relatie tussen effectieve neerslag en infiltratiesnelheid	68
Figuur 7.1 Grondwaterstanden in kleilaag, Julianalaan 28, 32 en Zonegge	19.75
Figuur 7.2 Vochtgehalten, grondwaterstanden (klei = hoog) en stijghoogten (zand = laag), Julianalaan 28, 32 en Zonegge	19. 76
Figuur 7.3 Foto's kleilaag, ontgraving bouwplaats Masiusplein, Zevenaar. ..	77

Figuur 7.4	Modelconcept Metaswap zoals toegepast in Zevenaar.	79
Figuur 7.5	Grondgebruik zoals ingevoerd in het straatmodel, op basis van Google Maps Julianalaan 28-32 en omgeving.	80
Figuur 7.6	Berekende verzadigingsgraad, uitgangssituatie en hogere grondwaterstand.	82
Figuur 7.7	Berekende verzadigingsgraad, 2003 versus 2006.	82
Figuur 7.8	Berekende verzadigingsgraad, invloed begroeiing.	83
Figuur 7.9	Doorlopend potentieel neerslagtekort 2003 en 2006, landelijk gemiddelde over 13 stations (bron: KNMI, www.knmi.nl/klimatologie).	84
Figuur 7.10	Peilbuizen gemeentelijk grondwatermeetnet in aandachtsgebied. De onderzoeklocaties Julianalaan en Zonnegge zijn omcirkeld in rood.	85
Figuur 7.11	Selectie DINO-boringen Zevenaar.	86
Figuur 7.12	Tijdreeks stijghoogte, meetpunt 13.	87
Figuur 7.13	Tijdreeks stijghoogte, meetpunt 25. OW = oppervlakte water.	87
Figuur 7.14	Meetreeks DINOLoket, put B40E0332, Methen, Zevenaar.	88
Figuur 7.15	Meetreeks DINOLoket, put B40E0080, ten noordwesten van Didam. Rond 1970 daalt de stijghoogte ruim 50 cm.	89
Figuur 7.16	Meetreeks DINOLoket, put B40D0316, ten noorden van Pannerden. Ook hier lijkt sprake van een daling rond 1970 met enkele decimeters.	89
Figuur 7.17	Stijghoogteverloop 1996-2008. Aanleg tunnelbak Betuweroute (1999-2001) is met de rode rechthoek weergegeven. Voor ligging meetpunten zie figuur 7.10.	91
Figuur 7.18	Doorsnijding van de kleilaag door watergangen in Zevenaar. Als waterbodemhoogte is het gemiddelde genomen van de benedenstroomse en bovenstroomse waterhoogte per waterloopsegment.	92
Figuur 7.19	Stijghoogtedynamiek in relatie tot afstand tot dichtstbijzijnde watergang. Dynamiek is gedefinieerd als het gemiddelde van de verschillen tussen de hoogste en laagste gemeten stijghoogte (m t.o.v. NAP) in elk jaar. Op basis van meetpunten 1,2,12,13,23,25-28 en 30.	93
Figuur 7.20	Gemiddelde stijghoogte 1996-2004 en maaiveldhoogte (bovenkant schaal, t.o.v. NAP) in relatie tot afstand tot dichtstbijzijnde watergang. Op basis van meetpunten 1,2,12,13,23,25-28 en 30.	93
Figuur 7.21	Waterstanden Pannerdense Kop en stijghoogte meetpunt 1 Zevenaar.	94
Figuur 7.22	Stijghoogtedynamiek in relatie tot afstand tot tankgracht.	95
Figuur 7.23	Gemiddelde stijghoogte in relatie tot afstand tot tankgracht.	95
Figuur 7.24	Modelgrens regionaal grondwatermodel Zevenaar. Zevenaar is omcirkeld in groen.	96
Figuur 7.25	Verschillen tussen gemeten en berekende stijghoogten in Zevenaar. De locaties waarvoor de modelreeksen worden getoond, liggen steeds tussen de beide peilbuizen in.	98
Figuur 7.26	Locaties waarvoor tijdreeksen van de scenario-resultaten zijn weergegeven.	99
Figuur 7.27	Toename van de stijghoogte na uitschakeling van de aangegeven onttrekkingen. Zevenaar ligt in de groene ellips.	100
Figuur 7.28	Vergunde beregeningslocaties rond Zevenaar, volgens informatie van de provincie Gelderland.	100
Figuur 7.29	Toename van de stijghoogte na uitschakeling van de in figuur 7.28 aangegeven beregeningssputten. Zevenaar ligt in de groene ellips.	101

Figuur 7.30	Watergangen rond Zevenaar.	102
Figuur 7.31	Toename stijghoogte als de peilen van alle watergangen in Zevenaar en wijde omgeving met 40 cm zouden worden verhoogd.	102
Figuur 7.32	Tijdreeksen van de berekende stijghoogte, huidige situatie (blauw) en met 40 cm hogere peilen (blauwgroen) op de onderzoekslocatie Julianalaan.	102
Figuur 7.33	Peilverhogingen Rijnstrangengebied, volgens bijlagennotitie GGOR Rijnstrangen (WRIJ, 2007).	104
Figuur 7.34	Toename stijghoogte bij peilverhoging Rijnstrangengebied conform GGOR-notitie. Zevenaar is groen omcirkeld.....	104

1 Inleiding

1.1 Aanleiding tot het onderzoek

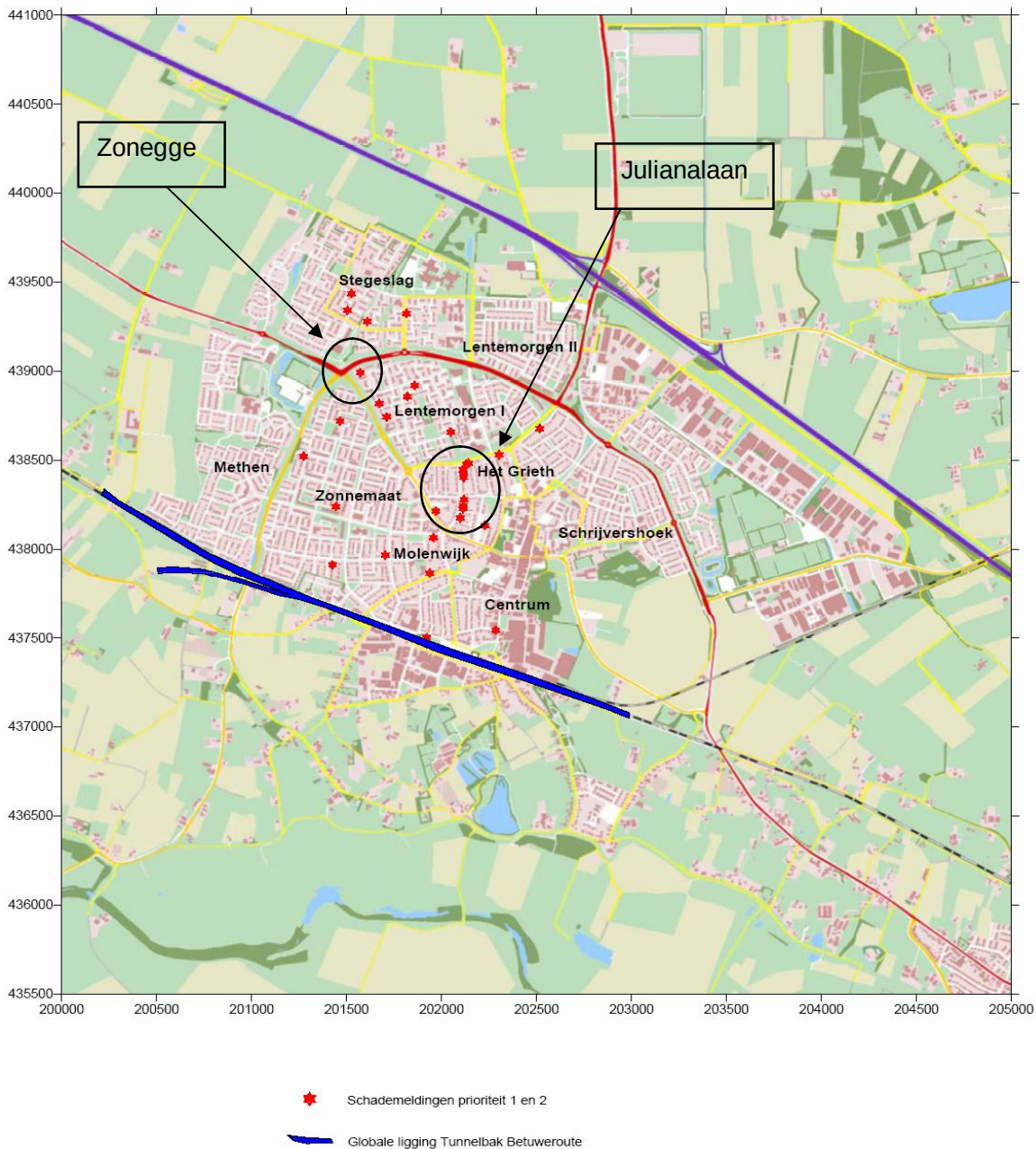
In de hete en droge zomer van 2006 vertoonden een aantal panden in de gemeente Zevenaar in meer of mindere mate schade die het gevolg zou kunnen zijn van zetting en daardoor veroorzaakte schade. In enkele gevallen was deze schade zodanig dat een ingrijpende reparatie nodig was. B&W van Zevenaar gaven kort hierop Fugro de opdracht een onderzoek uit te voeren naar de mogelijke oorzaken van de zetting. Een aantal mogelijke oorzaken werden in het door Fugro uitgebrachte rapport (ref. Fugro rapport 6006-0521-000) opgesomd. In dit rapport werd aanbevolen de verschillende oorzaken met onderzoek ter plaatse nader te kwantificeren. De mogelijke bijdrage van de vochtonttrekking van bomen en struiken is eerst onderzocht in een literatuurstudie door Alterra (Bijlage B).

Uit de beide rapporten kwam naar voren dat krimp van de kleilaag, waarop een deel van het woningbestand van Zevenaar is gebouwd tot additionele zetting kan leiden, bovenop de restzettingen die ondiepe funderingen in de loop der tijd ondergaan. Naar aanleiding van vragen uit de gemeente, van Prof. Molenkamp, TUDelft en TNO heeft de gemeente besloten de oorzaken van de zetting nader te laten onderzoeken. De gemeente Zevenaar heeft hierna Deltares (waarin het onderdeel Bodem- en Grondwatersystemen van TNO is opgegaan), Alterra en Fugro uitgenodigd om een onderzoeksplan voor te stellen, met als doel inzicht te krijgen in de verbreiding van de zakking, de relatie tussen bodemvocht en het grond- en oppervlaktewatersysteem en de mogelijkheden om verzakkingen in de toekomst te voorkomen.

Op 8 mei 2007 heeft een bespreking plaatsgevonden in het gemeentehuis van Zevenaar waarbij het plan van aanpak is vastgesteld.

1.2 Probleemschets en doelstelling

In de gemeente Zevenaar is een aantal huizen in meer of mindere mate verzakt. Bij sommige huizen is deze verzakking dermate ernstig dat hierdoor schade is ontstaan aan het huis en er bouwkundige maatregelen nodig waren. Naar het zich laat aanzien zijn er in de zomer van 2006 versnelde zakkingen opgetreden. Hoewel bekend is dat er in het verleden in droge zomers ook verzakkingen waren, is de omvang hiervan onbekend. Pas na de meldingen in 2006 is hiervan een archief aangelegd.



Figuur 1.1 Gemelde schadegevallen categorie 1 en 2 (zichtbare scheurvorming en constructieve schade) (bron: Gemeente Zevenaar, in Fugro rapport 6006-0521-000)

De verzakkingen worden in verband gebracht met het inklinken van de in de ondiepe ondergrond aanwezige kleilaag door uitdroging. Veel huizen in Zevenaar zijn aangelegd op een fundering “op staal”, dat wil zeggen dat de funderingen direct rusten op deze ondiepe laag. De doelstelling van het onderzoek was de verschillende oorzaken van het ontstaan van zettingschade in kaart te brengen en waar mogelijk te kwantificeren, waarbij zowel de externe factoren als de interne bouwkundige factoren worden behandeld. Onder de externe factoren worden onder meer begrepen de waterhuishouding, klimaat, beplanting, geologische opbouw, zettingsgevoeligheid van de funderingslaag, de constructie en menselijk handelen. Ook de effectiviteit van mogelijke maatregelen om extra zettingen tegen te gaan worden onderzocht.

Het plan van aanpak wordt hieronder uiteengezet.

1.3 Aanpak

De mogelijke oorzaken voor zettingsschade kunnen een lokaal en een regionaal karakter hebben. Het onderzoek is toe gespitst op pandenparen (raaien) op drie locaties: een pand met schade en een pand zonder schade, beide van een gelijksoortig type en in een oppervlakkig gezien gelijksoortige ligging. Het doel hiervan is te trachten het verschillende zettingsgedrag te verklaren uit verschillen in de ondergrond, geohydrologie of bouwkundige toestand. Op basis van de schade-inventarisatie van de gemeente en historisch onderzoek van de locaties zijn 2 raaien in de Julianalaan en 1 in de wijk Zonnegge gekozen en onderzocht. Het betrof inspectie van de constructie, grondonderzoek ter plaatse en in het laboratorium en monitoring van waterstanden en vochtgehalte van de bodem.

Om de op locatie aangetroffen situatie geohydrologisch te kunnen verklaren is de historische ontwikkeling van het grond- en oppervlaktewatersysteem geïnventariseerd. Gebruik makend van de resultaten van het grond- en grondwateronderzoek is vervolgens een geohydrologisch model opgesteld van de lokale situatie waarmee de samenhang tussen de verschillende externe invloeden en gevolgen voor de vochthuishouding in de grond zijn gekwantificeerd. Met dit model is tevens de effectiviteit van mitigerende maatregelen (maatregelen die het ontstaan van schade tegenwerken) getoetst.

Een voor Nederland nieuw type onderzoek is de analyse van de historische ontwikkeling van de beweging van panden in de gemeente Zevenaar met behulp van de INSAR-techniek. Deze techniek maakt gebruik van door satellieten opgenomen reflecties van radar-golven die terugkaatsen op steeds hetzelfde verharde oppervlak van een object op de aarde. Deze opnames vinden sinds ca. 1992 maandelijks landsdekkend plaats, zodat van geschikte objecten tijdreeksen van de relatieve beweging op te stellen zijn.

Aansluitend op het onderzoek en de analyse van de resultaten zijn voorstellen voor mitigerende, herstel en beheersmaatregelen gedaan.

Het onderzoek is in een consortium uitgevoerd door Deltares, Fugro en Alterra, gecoördineerd door Deltares.

De specifieke werkzaamheden van Deltares betroffen onderzoek naar de geohydrologische situatie. De INSAR analyse naar de historische zakking van huizen is uitgevoerd door specialisten van de Faculteit Lucht-en Ruimtevaart van de TU Delft. De werkzaamheden van Fugro betroffen de uitvoering van grond- en grondwateronderzoek ter plaatse, bouwtechnische opname, en de geotechnische analyse.

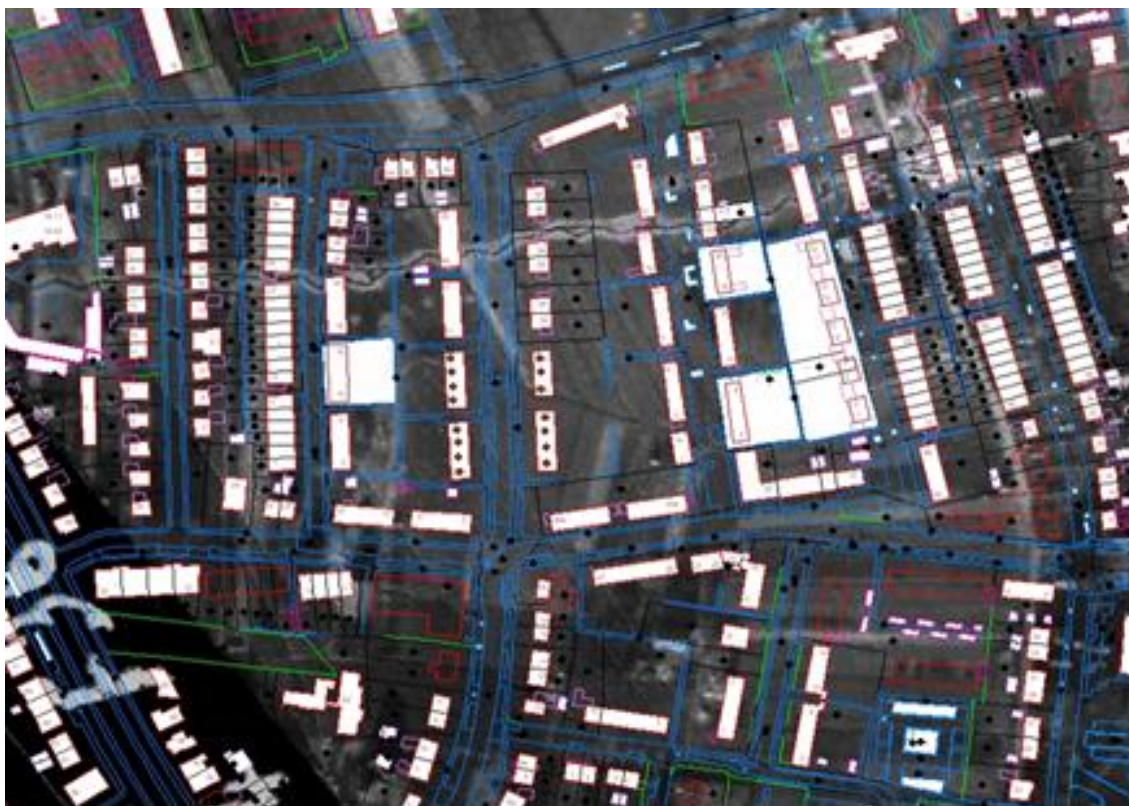
De werkzaamheden van Alterra bestonden uit de analyse van de relatie ter plaatse tussen de vegetatie en de bodemvochthuishouding.

Zowel het plan van aanpak als de bevindingen zijn uitvoerig met Prof. Molenkamp besproken en waar noodzakelijk aangevuld.

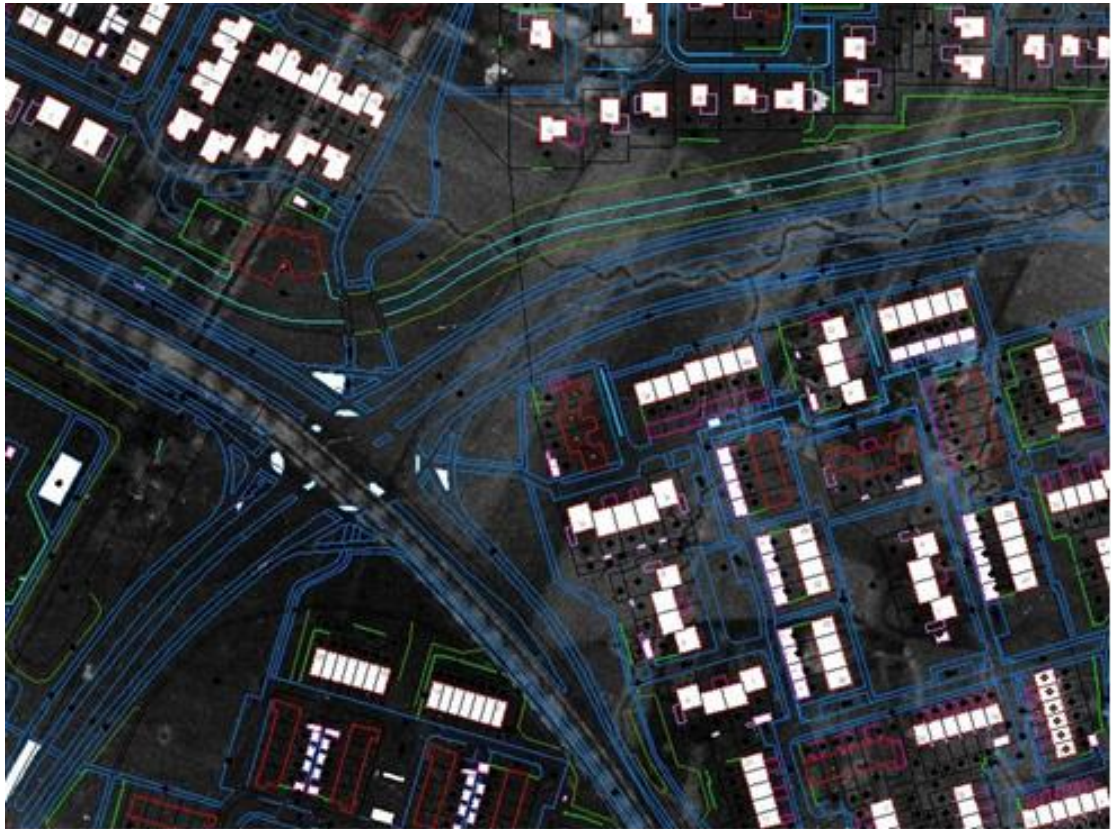
1.4 Opbouw rapport

De hierboven genoemde deelonderzoeken worden behandeld in afzonderlijke hoofdstukken. De locatiekeuze wordt behandeld in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt de geologische opbouw van de ondergrond beschreven. Hoofdstuk 4 beschrijft het veldwerk ter plaatse van de gekozen locaties, de waarnemingen van grondwaterstanden en de geotechnische analyses van de zettingen. Ook het bouwkundig onderzoek wordt hierin gerapporteerd. De satellietwaarnemingen worden beschreven in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 worden de bevindingen omtrent de invloed van bomen en struiken beschreven. Hoofdstuk 7 behandelt

de grondwateraspecten die kunnen leiden tot verdroging. Hoofdstuk 8 vat alle bevindingen samen en geeft ook de conclusies van het onderzoek.



Figuur 2.2 De locatie van de panden aan de Julianalaan (met stippen aangegeven) in relatie tot de indeling van het weiland en de loopgraven.





Figuur 2.3 Zonegge 19 in relatie tot de ligging van de weilanden en de loopgraven. Op de onderste foto is de herinrichting na de oorlog te zien. Er is een weg ten noorden van de toekomstige panden aangelegd

In de rapportage van Fugro (rapport 6006-0521-000, 2006) werd reeds geconcludeerd dat de panden in ontwerp voldoende draagkracht aan de kleilaag kunnen ontleen en dat eventuele zetting onmiddellijk na de bouw zal zijn opgetreden. Verder is toen geconcludeerd dat locatiespecifiek onderzoek naar de fundering en de ondergrond zou moeten uitwijzen of de ontwerpaannames correct waren. In het huidige onderzoek is daarom bij de panden in het constructieve onderzoek ook een inspectie van de fundering gedaan.

Op de historische beelden is te zien dat er geen intensief drainagepatroon aanwezig was. De invloed van een drainagepatroon op de grondwaterhuishouding is in de modelstudie onderzocht (zie hoofdstuk 7).

3 Geologie

Marcel Bakker en Ger de Lange, Deltares

3.1 Geologie van het centrale rivierengebied; het Holocene en Pleistoceen

3.1.1 Inleiding

Deze paragraaf is aan de rapportage toegevoegd als aanvulling op de beschrijving van de grondopbouw in de gemeente Zevenaar en bevat een korte beschrijving van de geologische geschiedenis van de periode waarin de bodemlagen in de directe ondergrond neergelegd zijn. Onder holocene sedimenten wordt het deel van de ondergrond verstaan dat gevormd is tijdens het jongste tijdvak, het Holocene, de periode vanaf ca. 10.000 jaar geleden tot heden. Holocene zand-, klei- en veenlagen komen voor in het noordelijke, westelijke en zuidwestelijke kustgebied van ons land en in het rivierengebied van de Rijn en Maas, evenals in een groot deel van de IJsselmeerpolders. Langs de kust kan het totale holocene pakket plaatselijk oplopen tot meer dan 40 meter. Landinwaarts wordt het holocene pakket steeds dunner of is zelfs afwezig. Daar liggen oudere pakketten direct aan het oppervlak. Dit oudere pakket is afgezet gedurende het Pleistoceen, de voorlaatste geologische periode, die meer dan 2 miljoen jaar duurde en omstreeks 10.000 jaar geleden eindigde. Pleistocene afzettingen bestaan uit pakketten grind, zand en klei welke honderden meters dik kunnen zijn. Het bovenste gedeelte hiervan bestaat in het algemeen uit zand, waarop de holocene afzettingen liggen.

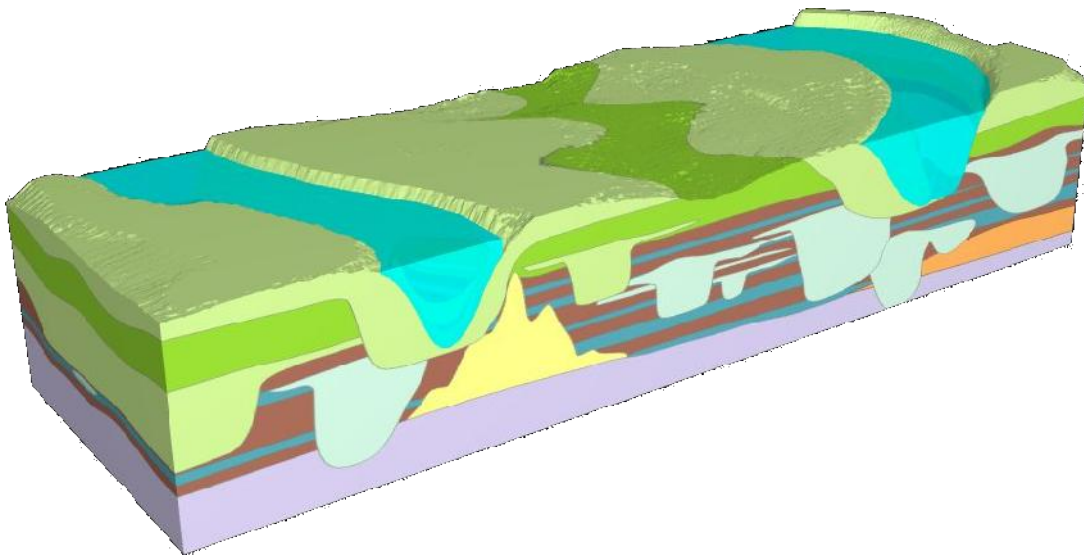
3.1.2 Pleistoceen

Het pleistocene tijdvak wordt gekenmerkt door een afwisseling van koude (ijstijden) en warme perioden (tussen-ijstijden). Gedurende de ijstijden werden met name in de poolstreken grote massa's landijs gevormd, waardoor de zeespiegelstand wereldwijd daalde. Met het smelten van het ijs in de tussen-ijstijden steeg de zeespiegel weer. Het landijs dat Noord-Europa tijdens koude perioden bedekte heeft het noordelijk deel van ons land twee keer bereikt. Dit was onder andere het geval in de voorlaatste ijstijd, het Saalien (ca. 280.000 - 130.000 jaar geleden). Hierbij werden oudere pakketten zand en klei door het ijs meegenomen en omhooggestuwd tot 'stuwwallen' waarvan de heuvels van de Veluwe en het Montferland bekende voorbeelden zijn.

Na een warme periode, het Eemien, werd het opnieuw koud. In de laatste ijstijd, het Weichselien (ca. 115.000 - 10.000 jaar geleden), bereikte het landijs Nederland niet, maar de zeespiegel daalde weer sterk, waardoor de Noordzee tussen Nederland en Engeland droog kwam te liggen. De vegetatie was schaars en daardoor zag de wind kans om grote hoeveelheden zand uit te blazen en elders in de vorm van een laag 'dekzand' weer af te zetten. Deze dekzanden, behorend tot de **Formatie van Boxtel**, vormen een pakket leemarm, fijn zand van enkele meters dik en dekt in grote delen van Nederland de oudere afzettingen uit het Pleistoceen af. In het centrale rivierengebied en ook in de omgeving van Zevenaar, bleef de invloed van de rivieren echter groot. De Rijn en Maas hadden een vlechtend rivierpatroon met talrijke geulen en zandbanken, die bij hoog water verdwenen en plaats maakten voor nieuwe geulstelsels. Hier werden in een grote riviervlakte dikke pakketten grof zand en grind neergelegd, die gerekend worden tot de **Formatie van Kreftenheye**.

3.1.3 Holocene

Het Holocene is een relatief warme periode waarin het landijs smolt en de zeespiegel steeg. Het rivierpatroon van Rijn en Maas veranderde van een vlechtend in een meanderend patroon. Een meanderende rivier is een kronkelende rivier met een bedding, die langzaam en geleidelijk van plaats verandert door erosie (oeverafslag) in de buitenbochten en sedimentatie (neerleggen van zand) in de binnenbochten. In de stroomgordels van de rivieren werden door de zich verplaatsende geulen brede zandlichamen gevormd (fig. 1).



Figuur 3.1 Schematisch model van de opbouw van het rivierengebied. De onderste laag (in paars) vertegenwoordigt de pleistocene ondergrond. Daarbovenop zijn de oudere en recente riviergeulen met hun zandige afzettingen zichtbaar (lichtblauw en lichtgroen). In de overloopgebieden tussen de riviergeulen zijn klei- (groen) en veen- (bruin) pakketten afgezet. In de ondergrond is een begraven oud rivierduin zichtbaar (in geel).

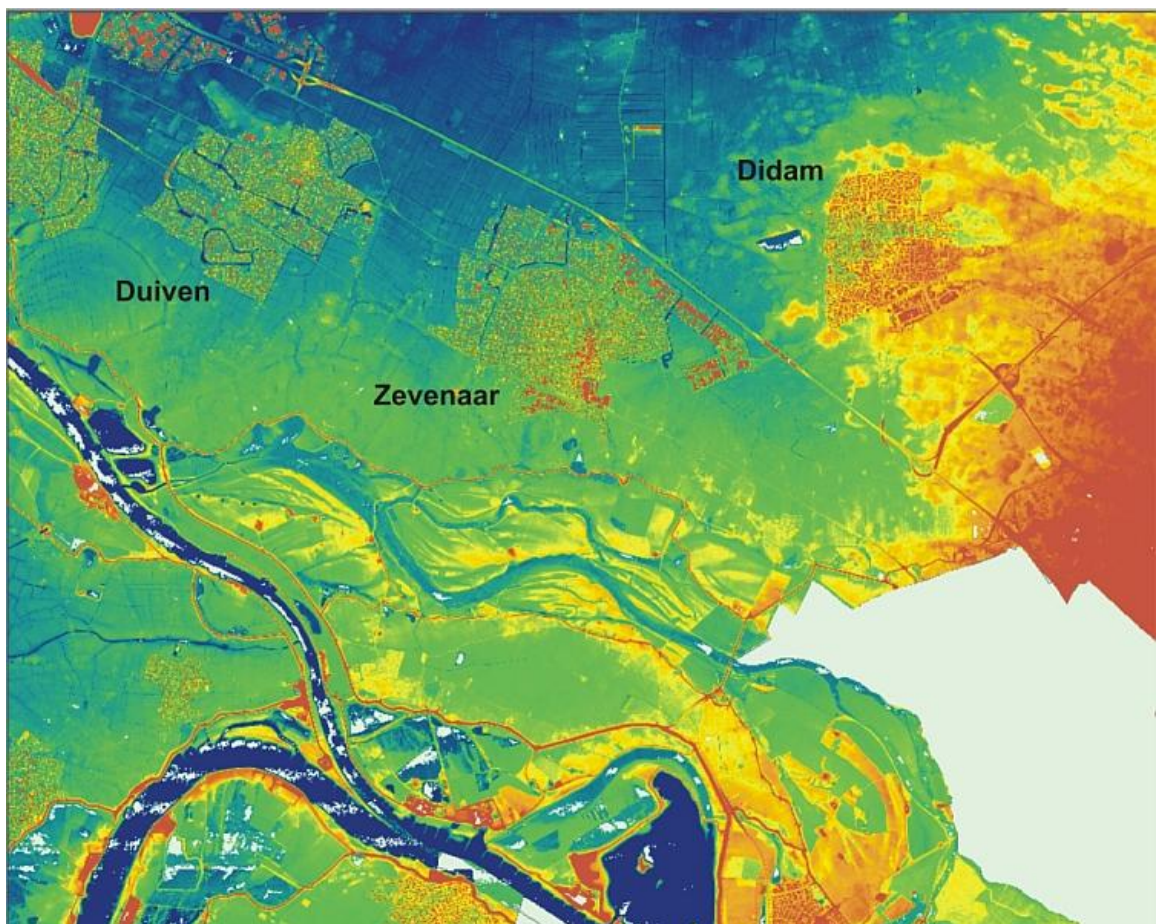
Direct langs de rivier werd het grovere, zwaardere materiaal (vooral zand) neergelegd en werden oeverwallen gevormd. Tijdens hoogwater trad de rivier buiten zijn oevers en werden de gebieden tussen de rivieren overstroomd. Dichtbij de rivier werden zandige, slecht gesorteerde crevasse afzettingen neergelegd. Verder van de rivier af bezonk het fijnere materiaal (klei) in laaggelegen vlaktes, de kommen. Dit fijne materiaal wordt komklei genoemd. In de kommen vond soms ook veenvorming plaats, evenals in de restgeulen van afgesneden meanderbochten. In de loop van de tijd hebben de meanderende rivieren verschillende keren hun gehele loop verlegd (stroomgordelverlegging of avulsies genoemd), waardoor meerdere zandlichamen het rivierengebied van oost naar west doorkruisen.

Vanaf de Vroege Middeleeuwen heeft de mens een grote rol gespeeld in de ontwikkeling van het rivierlandschap. Zo werd vanaf ca. 1100 na Chr. met het bedijken van de rivieren begonnen. Hierdoor kwam een einde aan de natuurlijke sedimentatie van de rivieren en aan de vorming van veen. Toch liepen de polders nog regelmatig onder als gevolg van dijkdoorbraken. Bij deze doorbraken werden diepe gaten (wielen) gevormd, waaruit sediment werd weggeruimd, dat in de vorm van een waaier achter het gat weer werd afgezet. Dit soort afzettingen worden dijkdoorbraakafzettingen genoemd. Ook werd een aantal rivieren afgedamd. Hierdoor werden de Lek en de Waal de belangrijkste Rijntakken in het centrale rivierengebied. Met de aanleg van het Pannerdens Kanaal in 1707 werd de Oude Rijn, welke

direct ten zuiden van Zevenaar liep, afgedamd. De zogenaamde strangen, welke door het landschap slingeren, zijn nog duidelijk zichtbaar (figuur 3.2). Ze zijn nu voor een groot deel opgevuld met klei en veen.

3.2 Topografie van Zevenaar en omgeving

Figuur 3.2 geeft een beeld van de hoogteligging van de omgeving van Zevenaar aan de hand van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Het centrum van Zevenaar ligt iets verhoogd ten opzichte van de omgeving. Ten zuiden en zuidwesten van Zevenaar bevinden zich stroomgordels en de bijbehorende afzettingen van de Oude Rijn, ten noordoosten bevinden zich de hogere Pleistocene zandgronden. Tussen deze twee gebieden bevindt zich een Holocene komleipakket nabij of aan het maaiveld. Dit is het pakket waarop de bebouwing in de gemeente Zevenaar is gefundeerd.



Figuur 3.2 Weergave van de hoogteligging (reliëf) volgens het AHN (www.ahn.nl). Rood is hoog, blauw is laag.

3.3 Lithologische samenstelling van de ondiepe ondergrond te Zevenaar

Het kleipakket is afgezet door de Rijn gedurende het Holocene, en wel jonger dan 5000 yr BP. Het betreft zogenaamde komkleien en oeverafzettingen, beide behorende tot de **Formatie van Echteld** (de Mulder *et al.*, 2003). De komafzettingen bestaan uit klei, zwak tot matig siltig, zwak tot sterk humeus, over het algemeen kalkloos, grijs tot bruin. De klei is massief en bevat plantenresten van riet en hout. De oeverafzettingen bestaan uit klei (zandig

en uiterst tot matig siltig, soms gelaagd met uiterst fijn tot zeer fijn zand ($63 - 150 \mu\text{m}$), kalkhoudend tot kalkloos, grijs tot bruin) en zand (uiterst fijn tot zeer fijn ($63 - 150 \mu\text{m}$), soms kleiig, kalkhoudend tot kalkloos, grijs tot bruin). Het sediment wordt kalkhoudend afgezet en bevat resten van zoetwaterschelpen. Veelal is het sediment horizontaal gelaagd in mm tot cm dikke lagen.

Ingeschakeld in het kleipakket komen soms lagen voor met een heterogeen karakter. Deze doorbraak afzettingen bestaan uit klei (zandig en uiterst tot zwak siltig, veelal gelaagd met uiterst fijn tot matig grof zand ($63 - 300 \mu\text{m}$), kalkhoudend tot kalkloos, grijs tot bruin) tot zand (uiterst fijn tot uiterst grof ($63 - 2000 \mu\text{m}$), kalkhoudend tot kalkloos, grijs tot bruin). Kenmerkend is de grote lithologische variatie over korte afstanden, zowel verticaal als horizontaal. Het sediment wordt over het algemeen kalkhoudend afgezet.

Aan de basis van deze afzettingen komt soms veen voor. De klei ligt overigens op dikke zandpakketten van de onderliggende Kreftenheye Formatie, welke grof en grindhoudend zijn. Lokaal ligt de klei op goed gesorteerd dekzand van de Formatie van Bortel, met name direct ten zuidwesten van Zevenaar en ten noordoosten van de snelweg A12 is dit het geval.

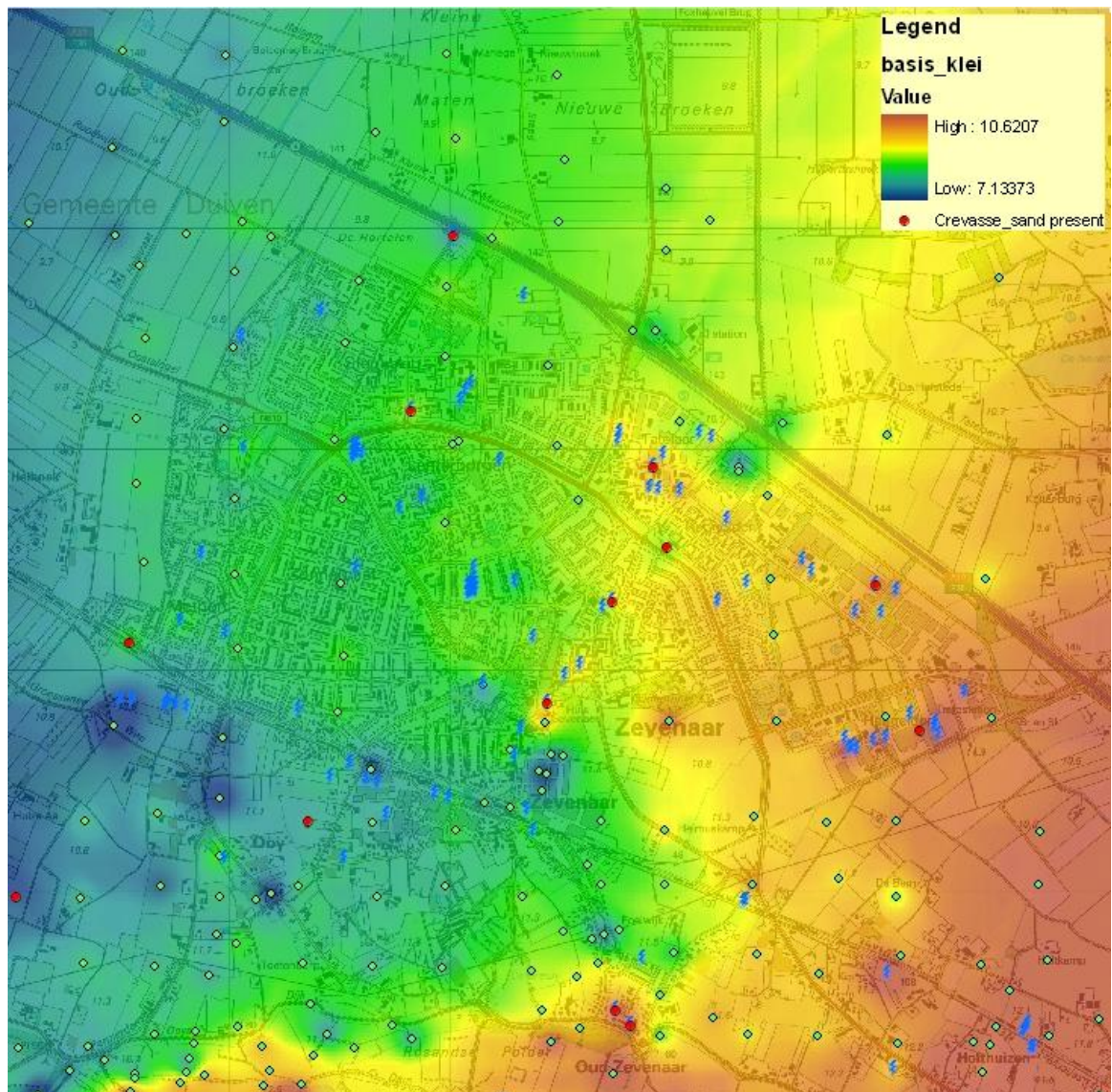
3.4 Modellerings kleilaag

Figuur 3.3 en *Figuur 3.4* geven respectievelijk de basis van de klei (in m tov NAP) en de dikte van het kleipakket (in m) weer. Deze gebiedsdekkende grids zijn bepaald op basis van 181 boringen en 112 sonderingen en een geostatistische analyse. De boringen betreffen meestal handboringen. Alle meegenomen boringen en sonderingen hebben de basis van de kleilaag bereikt.

Omdat er een duidelijke trend in zowel de basis als de dikte van de kleilaag waarneembaar is (in het oosten ligt de basis van de kleilaag hoger en is de dikte geringer dan in het (zuid)westen) is eerst een trend gemodelleerd en zijn vervolgens de residuen van deze trend geïnterpoleerd en bij de trend opgeteld. Door deze werkwijze worden vooral lokale variaties optimaal gemodelleerd. De trend is berekend op basis van de (x en y) coördinaten als onafhankelijke variabele en de ligging van de basis - respectievelijk de dikte - als afhankelijke variabele.

De residuen van de ligging van de basis van de kleilaag vertonen een ruimtelijke correlatie van 200 meter, terwijl de ruimtelijke correlatie van de residuen van de dikte van de kleilaag 100 meter bedraagt.

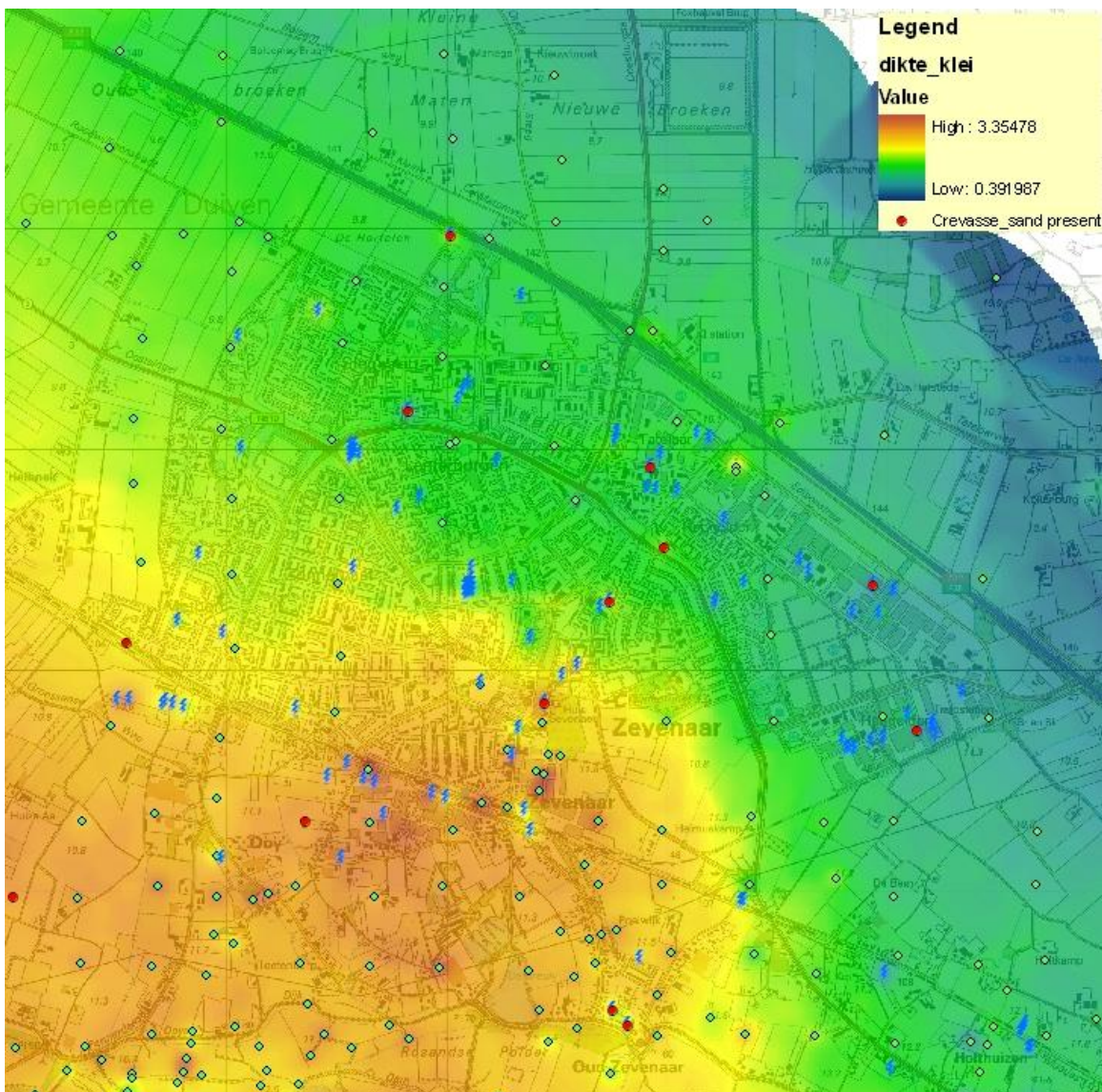
Het vlak dat de basis van de kleilaag weergeeft is gemodelleerd aan de hand van de trendfunctie (x,y coördinaat), waar vervolgens de geïnterpoleerde residuen bij op zijn geteld. Dit geldt tevens voor de dikte van de kleilaag. De kriging interpolatie routine is gebruikt voor de berekening van de residuen.



Figuur 3.3 Basis van de kleilaag in m boven NAP.

3.5 Geometrie van de kleilaag

Het enigszins pokdalige karakter van de basis van de klei (Figuur 3.3) heeft twee oorzaken. Enerzijds betreft dit het natuurlijke karakter van de ondiepe ondergrond; de klei heeft het natuurlijke reliëf van de bovenzijde van het onderliggende zand - waarin soms laagtes en verhogingen voorkwamen - bedekt. Anderzijds spelen onnauwkeurigheden in de dataset een rol; bij diepe mechanische boringen is de onderzijde van de klei minder nauwkeurig vastgesteld. Onbetrouwbare en sterk afwijkende waarnemingen zijn uit de dataset verwijderd. De dikte van het kleipakket is in het zuiden en zuidwesten het grootst (~3 - 3.5 m) en neemt in noordoostelijke richting af (naderend tot nul richting Didam). De basis van het kleipakket ligt bij Zonegge op 8.35 m + NAP en te Julianalaan rond 8.50 m + NAP.



Figuur 3.4 Dikte van de kleilaag in m.

Aan de dikte variabiliteit liggen de zelfde oorzaken ten grondslag als bij de basis van de klei; daarbij is de bovenzijde van het kleipakket vaak door de mens verstoord of afgegraven. Ter plaatse van de Zonegge is het kleipakket 1.70-1.85 m dik, op de Julianalaan loopt de dikte op van 1.80m in het noorden tot 2.30 m in het zuiden.

De klei wordt afgedekt door een laag matig fijn zand van 1 tot 1,5 meter dik, bestaande uit deels bouwvoor en deels opgebrachte grond.

De relatie tussen de grondwaterstanden en de ligging van de kleilaag wordt verder behandeld in hoofdstuk 7.

4 Veldwerk

Ir. W.H.J. van der Velden
Hoofd Regio Oost, Fugro Ingenieursbureau BV

4.1 Inleiding

In 2006 is door Fugro onder opdracht nummer 6006-0521-000 een onderzoek gepresenteerd op basis van literatuurgegevens, lokaal grondonderzoek, archiefgegevens van Fugro en de gemeente en peilbuisdata van de gemeente.

In voornoemde rapportage zijn conclusies gedaan, waarbij aangegeven is dat de oorzaken van de zakkingen gerelateerd zijn aan:

- De bodemopbouw (dunne kleilagen);
- De bouw- en funderingswijze;
- De vochtwaterhuishouding in de kleilagen;
- Krimp in kleilagen in relatie tot droogte en vochtbehoefte van vegetatie.

Om deze verschillende aspecten met waarnemingen te toetsen is in overleg met de gemeente besloten om op 3 proeflocaties, waar in 2006 schademeldingen zijn geweest, namelijk aan de Julianalaan en aan de Zonegge een locatiegebonden onderzoek uit te voeren. Dit onderzoek is uitgevoerd door Fugro. Het onderzoek bestaat de volgende thema's:

- Veld- en laboratoriumonderzoek naar het zettings- en krimp/zwelgedrag van de ondergrond;
- Monitoring van deformaties middels plaatsen van meetbouten en uitvoeren van lintvoegmetingen;
- Funderingsonderzoek en bouwkundige opname (in samenwerking met Triops Advies te Huissen);
- Monitoring van het verloop van het vochtgehalte in de tijd in de ondergrond en monitoring van waterstanden in peilbuizen (in samenwerking met Gemeente Zevenaar);
- Analyse van meetgegevens en presenteren van berekeningen aangaande het zettingsgedrag van de ondergrond.

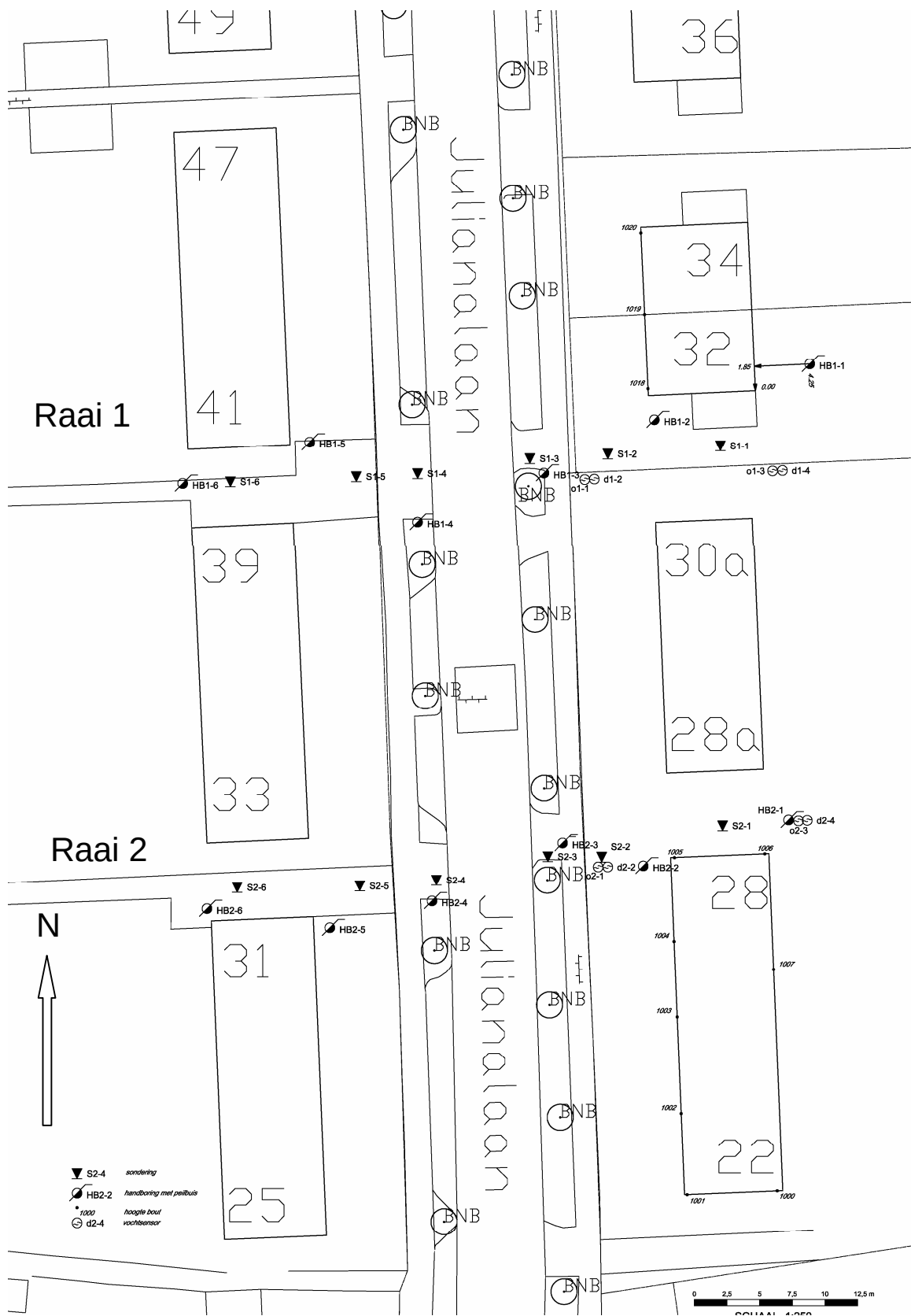
Het volledige rapport is aanwezig in de Bijlage "Fugro Rapport 6006-0521-001", waarin ook de in de tekst genoemde figuren zijn opgenomen.

4.2 Onderzoek

4.2.1 Onderzoeksraaien

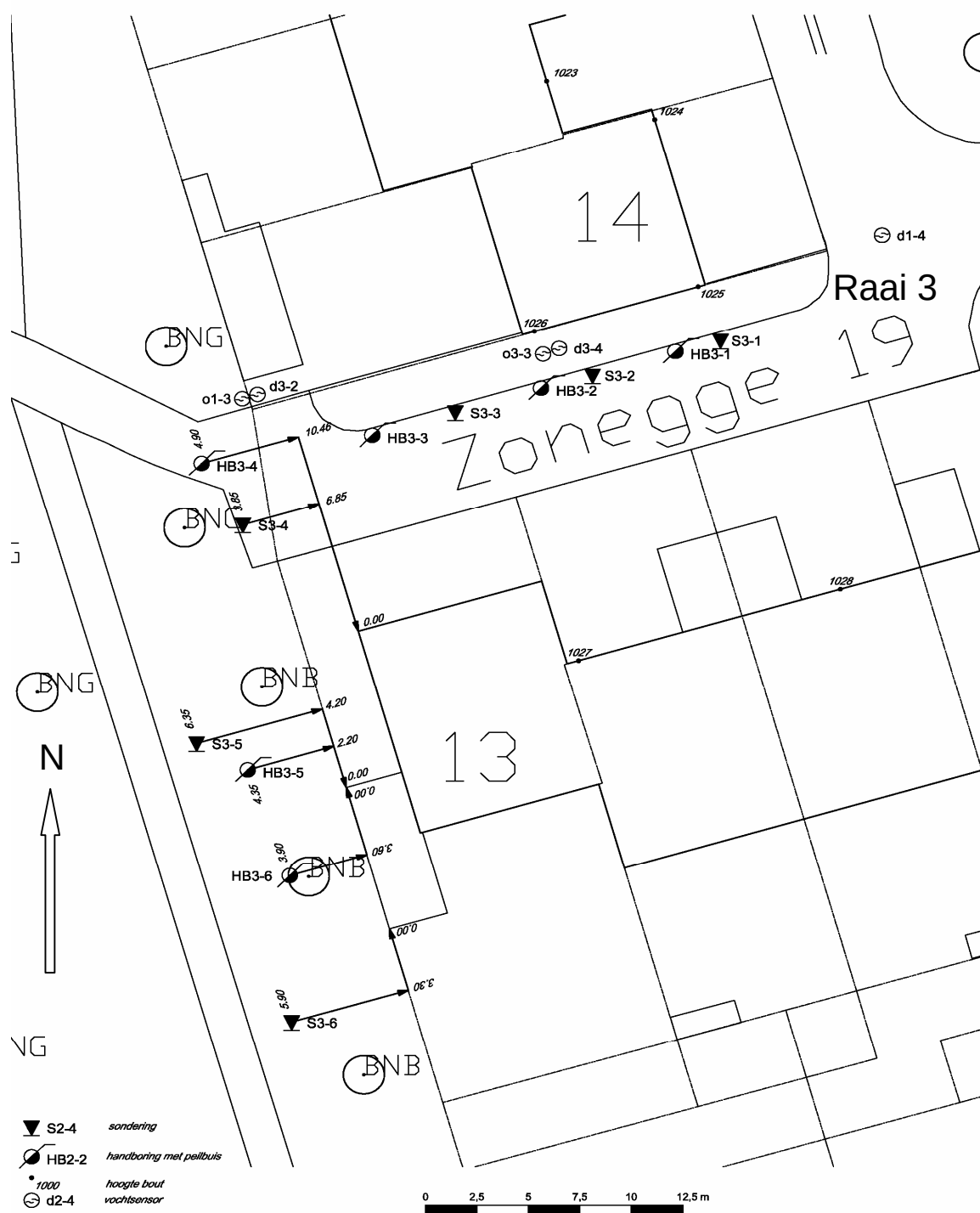
In overleg tussen de betrokken partijen is besloten om op een viertal locaties binnen de gemeente Zevenaar onderzoek te verrichten.

Het betreft hier een referentielocatie op het terrein van het zwembad nabij de Ringbaan-Noord. Hier is een handboring uitgevoerd en zijn twee peilbuizen geplaatst. Tevens worden hier temperatuur en neerslag gemonitord.



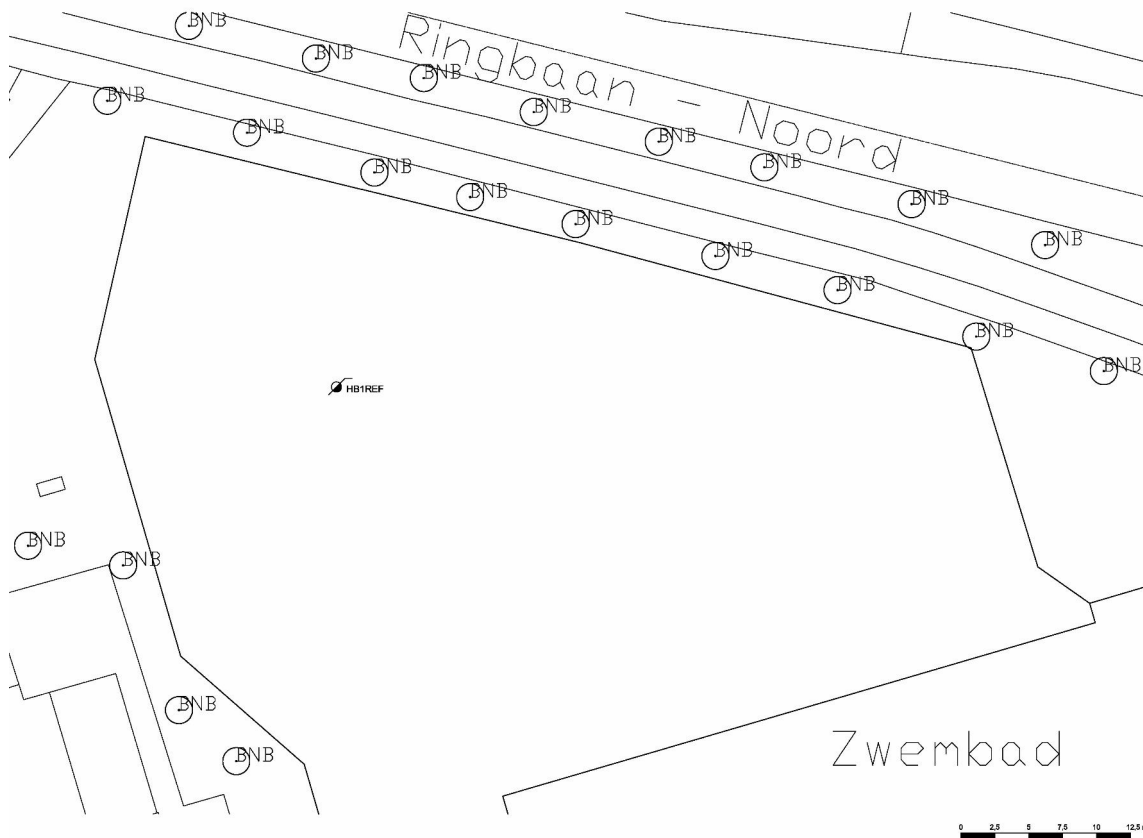
Figuur 4.1 Locaties grondonderzoek en monitoring in de Julianalaan

Ter plaatse van de Julianalaan en de Zonegge zijn respectievelijk twee meetraaien en één meetraai ingericht. Hier zijn sonderingen en handboringen uitgevoerd en zijn peilbuizen geplaatst. De bebouwing is voorzien van meetboutjes en er zijn lintvoegmetingen uitgevoerd. De constructie en de fundering van een aantal panden zijn geïnspecteerd. In de ondergrond zijn vochtsensoren geplaatst, welke continue worden gemonitord.



Figuur 4.2

Locaties grondonderzoek en monitoring in Zonegge 19



Figuur 4.3 Situatietekeningen referentiestation Zwembad

4.2.2 Sonderen

De sonderingen zijn uitgevoerd met de elektrische Fugro-kleefmantelconus conform norm NEN 5140, klasse 2. Een beschrijving van de gevolgde meet- en registratiemethode is gegeven in de bijlage "Continu Elektrisch Sonderen". De conus is voorzien van een hellingmeter. In de sondeergrafieken is de diepte gecorrigeerd voor de gemeten afwijking van de verticaal.

De resultaten van de sonderingen zijn getekend op de grafieken S1-1 t/m S3-6 in bijlage A, waarop de diepte is uitgezet in meters ten opzichte van NAP.

Op de grafieken van de sonderingen, waarbij ook de plaatselijke mantelwrijving is gemeten, is het wrijvingsgetal weergegeven. Dit is de verhouding tussen de plaatselijke wrijvingsweerstand en de conusweerstand. Empirisch is vastgesteld dat het wrijvingsgetal een nauwe relatie heeft met de grondsoort, zodat een goede indicatie van de laagopbouw is verkregen.

4.2.3 Boren

De handboringen zijn uitgevoerd op dezelfde raaien als voornoemde sonderingen. Het opgeboorde materiaal is geclassificeerd volgens NEN 5104.

Op aan de hand van sondeerresultaten bepaalde diepten zijn ongeroerde monsters genomen. De ongeroerde monsternamen heeft plaatsgevonden door met een slaghamer (Ackermann) een steekbus te slaan. De steekbussen zijn dunwandige metalen bussen met een diameter van 70 mm en een lengte van 400 mm.

De resultaten van boringen zijn weergegeven op de boorstaten HB1 t/m HB3-6 in bijlage A, waarbij de diepte is uitgezet ten opzichte van NAP. Tevens zijn op de boorstaten de diepten van de ongeroerde monsters en de actuele grondwaterstanden gegeven.

In de boorgaten zijn peilbuizen geplaatst conform NEN 5120. De peilbuizen zijn ingetekend op de betreffende boorstaten en de locatie ervan is aangegeven op de situatietekening.

4.2.4 Uitzetten en waterpassen

De onderzoekslocaties zijn door Fugro Inpark uitgezet en gewaterpast (ten opzichte van NAP) en zijn aangegeven op de situatietekening in bijlage A, sub 1 t/m 4. Hierbij heeft de door de opdrachtgever verstrekte tekening als basis gediend.

De hoogtebepaling van de onderzoekslocaties in het terrein is uitgevoerd met als doel de bodemopbouw te refereren aan een vaste referentiehoogte. De gerapporteerde hoogtes zijn niet geschikt voor andere doeleinden dan dit onderzoek.

Voor een verklaring van de op de situatietekening gebruikte tekens en symbolen wordt verwezen naar de bijlage "Legenda Terreinproeven en Grondsoorten".

4.2.5 Laboratoriumonderzoek

De classificatie van alle geroerde en ongeroerde monsters staat vermeld op de eerder genoemde boorstaten HB1 t/m HB3-6 in bijlage A.

Alle ongeroerde monsters werden aan een nadere analyse onderworpen, waarbij van relevante monsters het volumiek gewicht en het watergehalte zijn bepaald.

Van een zestal cohesieve monsters zijn de Atterbergse grenzen en de waterdoorlatendheid volgens de Falling Head methode bepaald. De resultaten hiervan zijn gegeven in bijlage A.

Ten behoeve van een nauwkeuriger classificatie is van een zestal geselecteerde monsters de korrelverdeling bepaald. Een toelichting is gegeven op de "Verklaring Parameters uit Korrelverdeling" in bijlage A.

Voor de bepaling van de samendrukkingseigenschappen (stijfheid van de grond) zijn op een aantal geselecteerde monsters samendrukkingproeven, inclusief het bepalen van de consolidatie-coëfficiënt uitgevoerd. Op deze monsters zijn tevens krimp-zweltsen uitgevoerd. Voor een beknopte beschrijving van de bovengenoemde proeven en de verwijzing naar normen of voorschriften waaronder de proeven zijn uitgevoerd wordt verwezen naar de algemene bijlage "Toelichting Geotechnische Laboratoriumproeven".

4.2.6 Lintvoeg- en deformatiemetingen

Op een aantal panden in de Julianalaan en aan de Zonégge zijn meetboutjes geplaatst, welke na de nulmeting een vijftal keer zijn ingemeten. Tevens zijn lintvoegmetingen

uitgevoerd ten tijde van de nulmeting, waarbij de aanwezige situatie is vastgelegd en waaruit kan worden afgelezen op welke delen van het pand zakkingen hebben plaatsgevonden.

4.2.7 Bouwtechnisch onderzoek

Het bouwtechnisch en funderingsonderzoek is in samenwerking met Triops Advies te Huissen uitgevoerd. Het volledige rapport van Triops Advies is opgenomen in bijlage A.

4.2.8 Monitoring peilbuizen

De door Fugro geplaatste peilbuizen worden door de gemeente Zevenaar een maal per week gemonitord. De resultaten van de metingen tot eind november 2008 zijn opgenomen in bijlagen A.

4.2.9 Monitoring vochtgehalte, neerslag en temperatuur

Ter plaatse van de percelen in de Julianalaan en aan de Zonégge zijn vochtsensoren geplaatst op 2 locaties en op 2 diepten per raai. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in bijlage A.

De vochtsensoren zijn aangebracht vanuit een middels een handboor verkregen boorgat. De sensor, bestaande uit onder andere twee stalen elementen met een lengte van 0,3 m, zijn weggedrukt vanaf onderzijde boorgat. De sensoren meten het volumetrisch watergehalte in de poreuze ondergrond. Door de sensoren te koppelen aan een datalogger worden de meetgegevens continue waargenomen en opgeslagen.

Op de referentielocatie (zwembad) worden continue de hoeveelheid neerslag en de temperatuur geregistreerd.

4.3 Onderzoekresultaten

4.3.1 Terrein- en bodemgesteldheid

Op de referentielocatie (terrein zwembad) is een handboring uitgevoerd. De maaiveldhoogte op deze onderzoekslocatie bedroeg tijdens het onderzoek NAP + 10,8 m. Op basis van het onderzoek kan de bodemgesteldheid globaal als volgt worden geschematiseerd.

Tabel 4.1 Globale bodemgesteldheid (referentielocatie)

Diepte bovenkant laag in m t.o.v. NAP	Bodembeschrijving
10,8	ZAND matig fijn, sterk tot matig siltig, zwak tot matig humeus
10,0	KLEI matig siltig
8,5	ZAND matig grof tot uiterst fijn, matig siltig, resten klei
6,8	maximaal verkende diepte

De maaiveldniveaus ter plaatse van de onderzoekslocaties op raai 1 (Julianalaan 32/41) varieerden ten tijde van het onderzoek van NAP + 11,0 m tot NAP + 11,2 m. Op basis van

het grondonderzoek kan de bodemgesteldheid globaal worden geschematiseerd zoals in tabel 3-2 is weergegeven.

Tabel 4.2 Globale bodemgesteldheid raai 1 (Julianalaan 32/41)

Diepte bovenkant laag in m t.o.v. NAP			Bodembeschrijving	
11,2	à	11,0	ZAND	matig fijn, matig tot sterk siltig, zwak humeus
10,8	à	10,7	KLEI	(niet op alle locaties aanwezig)
10,4	à	10,3	ZAND	matig fijn, zwak tot sterk siltig
10,6	à	9,7	KLEI	matig siltig
8,6	à	8,3	ZAND	zeer grof, zwak siltig
7,6	à	6,0	maximaal verkende diepte	

De onderzijde van de kleilaag is over de raai vrij uniform op een niveau van circa NAP + 8,4 m gesitueerd. De bodemopbouw is op de gehele raai vergelijkbaar, waarbij de opdeling van de kleilaag in twee sublagen met een tussenlaag (zand) aan een zijde van de straat wordt aangetroffen. De dikte van het kleipakket varieert tussen 1,2 en 2,1 m.

De maaiveldniveaus ter plaatse van de onderzoekslocaties op raai 2 (Julianalaan 28/31) varieerden ten tijde van het onderzoek van NAP + 11,1 m tot NAP + 11,3 m. Op basis van het grondonderzoek kan de bodemgesteldheid globaal worden geschematiseerd zoals in tabel 3-3 is weergegeven.

Tabel 4.3 Globale bodemgesteldheid raai 2 (Julianalaan 28/31)

Diepte bovenkant laag in m t.o.v. NAP			Bodembeschrijving	
11,3	à	11,1	ZAND	matig fijn, matig siltig, matig tot zwak humeus
10,5	à	9,7	KLEI	matig tot sterk siltig
8,5	à	8,4	ZAND	zeer grof, zwak tot matig grindig
6,8	à	6,0	maximaal verkende diepte	

Raai 2 is vrij uniform qua bodemopbouw. De onderzijde van de kleilaag bevindt zich op circa NAP + 8,4 m en de dikte van deze laag varieert tussen 1,3 en 1,5 m. Op een locatie is een laagdikte van 2,1 m aangetroffen.

De maaiveldniveaus ter plaatse van de onderzoekslocaties op raai 3 (Zonegge 19 – 13/14) varieerden ten tijde van het onderzoek van NAP + 10,3 m tot NAP + 10,7 m. Op basis van het grondonderzoek kan de bodemgesteldheid globaal worden geschematiseerd zoals in tabel 3-4 is weergegeven.

Tabel 4.4 Globale bodemgesteldheid raai 3 (Zonegge 19 – 13/14)

Diepte bovenkant laag in m t.o.v. NAP			Bodembeschrijving	
10,7	à	10,3	ZAND	matig fijn tot matig grof,
10,4	à	9,7	KLEI	matig tot sterk siltig
8,4	à	8,3	ZAND	matig tot zeer grof, sterk tot zwak siltig
7,4	à	5,1	maximaal verkende diepte	

Ook deze derde raai is vrij uniform qua bodemopbouw. De onderzijde van de kleilaag bevindt zich op circa NAP + 8,4 m en de dikte van deze laag varieert tussen 1,4 m (huisnummer 19-14) en 2,0 tot 2,4 m (huisnummer 19-13).

Op basis van de uitgevoerde sonderingen en handboringen wordt geconcludeerd dat de bodemopbouw op de vier locaties, zijnde de referentielocatie en de drie raaien, vergelijkbaar is. De onderzijde van de kleilaag bevindt zich op circa NAP + 8,4 m en de dikte van deze laag varieert tussen 1,2 en 2,4 m.

4.3.2 Geohydrologische aspecten

Op de verschillende locaties zijn zowel ondiepe als diepe peilbuizen geplaatst om respectievelijk de grondwaterstand en de stijghoogte te kunnen bepalen. De geplaatste peilbuizen zijn gemonitord in de periode april tot en met december 2008.

Op de referentielocatie, waar zowel een ondiepe als een diepe peilbuis zijn geplaatst, is gedurende de meetperiode een minimale grondwaterstand van NAP + 9,0 m waargenomen. Het betreft hier tevens het onderkant van het filter, zodat een lagere waarde niet meetbaar is. De maximaal gemeten waarde bedroeg NAP + 9,1 m. De stijghoogte varieerde in de meetperiode tussen NAP + 8,7 en NAP + 9,1 m.

Op raai 1 zijn zes ondiepe en is een diepe peilbuis geplaatst. De standen in de ondiepe peilbuizen aan de zijde van huisnummer 32 fluctueren gedurende de meetperiode tussen NAP + 9,1 en NAP + 9,6 m. Aan de zijde van Julianalaan 41 bedragen deze waarden NAP + 8,8 m en NAP + 9,5 m. De diepe peilbuis geeft een fluctuatie gedurende de meetperiode tussen NAP + 8,7 en NAP + 9,4 m.

Op raai 2 (Julianalaan 28/31) zijn eveneens zes ondiepe en een diepe peilbuis geplaatst. De peilbuizen 1 tot en met 3 zijn geplaatst aan de zijde van huisnummer 28. De waterstanden in deze ondiepe peilbuizen variëren tussen NAP + 8,8 en NAP + 9,6 m. De waterstanden in de peilbuizen aan de andere zijde van de straat variëren tussen NAP + 8,9 en NAP + 9,6 m. De diepe peilbuis geeft een fluctuatie gedurende de meetperiode tussen NAP + 8,7 en NAP + 9,5 m.

De grondwaterstanden en stijghoogten ter plaatse van de peilbuizen welke zijn geplaatst op de Zonegge (raai 3) zijn ietwat lager in vergelijking met de waarden ter plaatse van de Julianalaan. De grondwaterstanden in de ondiepe peilbuizen variëren gedurende de meetperiode tussen NAP + 8,7 m en NAP + 9,1 m. De stijghoogte in de diepere peilbuis geeft een fluctuatie van NAP + 8,7 m tot NAP + 9,1 m.

In algemene zin wordt opgemerkt dat de fluctuatie in de grondwaterstanden in de tijd beperkt is.

4.3.3 Grondparameters

Op basis van de resultaten van het laboratoriumonderzoek zijn in onderstaande tabellen de eigenschappen samengevat. Het betreft hier de monsters welke uitvoerig zijn geanalyseerd. De overige proefresultaten zijn opgenomen in de bijlagen. Een voorbeeld van de krimpproef is hieronder weergegeven.

Tabel 4.5 Resultaten laboratoriumonderzoek

Boring		niveau [m+NAP]	classificatie	γ_{sat} [kN/m ³]	w [%]	I_p [-]	<0,063 mm [%]
HB 1-2	1A	9,7	Klei, sterk siltig	18,4	33,3	35	89
	1B	9,7		17,8	38,5		
HB 1-2	2A	9,1	Klei, matig siltig, zwak humeus	16,4	54,7	57	96
	2B	9,1		16,5	49,9		
HB 2-1	2A	9,0	Klei, sterk siltig	17,0	46,5	40	93
	2B	9,0		17,5	38,8		
HB 2-6	1A	9,4	Klei, matig siltig, zwak humeus	16,3	52,4	46	98
	1B	9,3		17,4	43,5		
HB 3-1	1A	9,0	Klei, matig siltig	17,5	44,6	54	95
	1B	8,9		16,8	51,0		
HB 3-6	1A	9,2	Klei, matig siltig	17,7	40,5	53	96
	1B	9,1		17,8	40,1		

Tabel 4.6 Resultaten laboratoriumonderzoek

Boring		niveau [m+NAP]	classificatie	C' [-]	c_v [m ² /s]	krimp [%]	k [m/s]
HB 1-2	1A	9,7	Klei, sterk siltig	33,4	$2,9 \cdot 10^{-8}$	1,1	$2,7 \cdot 10^{-10}$
	1B	9,7					
HB 1-2	2A	9,1	Klei, matig siltig, zwak humeus	29,7	$2,2 \cdot 10^{-7}$	3,6	$3,2 \cdot 10^{-10}$
	2B	9,1					
HB 2-1	2A	9,0	Klei, sterk siltig	35,7	$3,9 \cdot 10^{-7}$	2,5	$2,3 \cdot 10^{-10}$
	2B	9,0					
HB 2-6	1A	9,4	Klei, matig siltig, zwak humeus	24,5	$3,2 \cdot 10^{-8}$	3,2	$1,7 \cdot 10^{-10}$
	1B	9,3					
HB 3-1	1A	9,0	Klei, matig siltig	50,3	$3,8 \cdot 10^{-7}$	3,8	$8,5 \cdot 10^{-11}$
	1B	8,9					
HB 3-6	1A	9,2	Klei, matig siltig	66,1	$4,4 \cdot 10^{-7}$	3,0	$4,3 \cdot 10^{-11}$
	1B	9,1					

De in het laboratorium bepaalde waarden voor de diverse parameters variëren in geringe mate over de verschillende locaties. Voor wat betreft de samendrukkingseigenschappen

geldt dat de samendrukbaarheid en de doorlatendheid van de kleilaag op de Zonegge kleiner is in vergelijking met de Julianalaan. De klei zoals aangetroffen ter plaatse van handboring HB 1-2 monster 1 krimpt minder (krimpt bedraagt circa 1%) in vergelijking met de overige monsters (gemiddeld circa 3,2%). Ook het watergehalte en de plasticiteitsindex zijn voor dit monster afwijkend ten opzichte van de overige monsters.

4.3.4 Lintvoeg- en deformatiemetingen

In de Julianalaan zijn ter plaatse van drie bouwblokken lintvoegmetingen verricht. Het blok Julianalaan 22-28 is rondom gemeten, waarbij een maximaal hoogteverschil over beide korte zijden van 0,07 m is waargenomen. De straatzijde ligt lager in vergelijking met de achterzijde van het blok. Over de lange zijden bedraagt het hoogteverschil 0,02 à 0,06 m.

Julianalaan 25-31 is eveneens gemeten. Hierbij zijn de gevonden hoogteverschillen over de korte zijden 0,02 à 0,03 m en over de lange zijden 0,01 à 0,02 m. Het blok Julianalaan 41-47 is niet aan de achterzijde gemeten. De overige zijden geven een hoogteverschil van 0,01 m.

Op de Zonegge zijn twee blokken aan de voorzijde gemeten. Het betreft hier Zonegge 19 - 9 t/m 12 en Zonegge 19 - 14 t/m 17. Het maximaal gevonden hoogteverschil tijdens de uitvoering van de lintvoegmeting bedragen 0,01 m.

Tijdens het uitvoeren van de lintvoegmetingen begin 2008 zijn tevens meetboutjes op de diverse panden aangebracht en na de nulmeting vijf keer ingemeten in een periode van 10 maanden. De vervormingen in de meetperiode bedragen enkele millimeters. In de meetwaarden is geen trend aanwezig.

4.3.5 Bouwtechnisch onderzoek

In onderstaande zijn de conclusies betreffende het onderzoek van Triops Advies weergegeven.

Julianalaan 28

Bij het pand Julianalaan 28 is aan de buitenzijde aanzienlijke schade aangetroffen. Door de getrapte vorm van de meeste scheuren is af te leiden dat deze zijn veroorzaakt door zettingsverschillen. Ook de meting van de scheefstand van de woning en de uitgevoerde lintvoegwaterpassing bevestigen dit.

De funderingsplaat onder de kelderkast vormt blijkbaar een stijver onderdeel in de funderingsstrook onder de kopgevel, waardoor de zetting van de fundering niet rechtlijnig, maar geknikt verloopt. Hierdoor is de scheurvorming rondom het kozijn in de kopgevel te verklaren.

Boven de kozijnen zijn geen of minimale lateien aanwezig, waardoor in het bovenliggende metselwerk trekspanningen ontstaan, die tot scheurvorming kunnen leiden of scheurinleidend werken.

Aangenomen mag worden dat na het aanbrengen van de stuc laag tegen de achtergevel geen verdere toename van de scheurvorming heeft plaatsgevonden. Deze stuc laag is namelijk zeer scheurgevoelig en zou zeker gescheurd zijn.

Volgens het Bouwbesluit (NEN 6702 art. 10.4.4. en NEN 6740 art. 5.3) zou de horizontale verplaatsing niet groter dan 0,05 m en de scheefstand niet groter dan 1:300 mogen zijn. De waargenomen horizontale verplaatsing bedraagt circa 70 mm. De scheefstand bedraagt circa 1:80. De waargenomen horizontale verplaatsing en scheefstand zijn groter dan voorgeschreven in het Bouwbesluit.

Zonegge 19-17

In een van de slaapkamers is in de binnenwand een verticale haarscheur aangetroffen. Het betreft hier waarschijnlijk een krimpscheur en is daarom niet constructief.

De scheur tussen woning en garage/berging lijkt een zettingsscheur, doordat deze getrapt is. Mogelijk dat de funderingsstrook onder de kopgevel, ter plaatse van de overgang van woning naar garage/berging, door het verschil in funderingsdruk enigszins ongelijkmatig is gezakt. Definitief uitsluitsel over de oorzaak is met de huidige bevindingen niet te geven.

4.3.6 Vochtgehalte, neerslag en temperatuur

Ter plaatse van de drie raaien is op twee locaties en twee niveaus per locatie het vochtgehalte gemonitord. De locaties betreffen op iedere raai een waarneming op een ondiep en een diep niveau nabij de woning en een waarneming op beide niveaus nabij de straat. Grafieken van deze metingen zijn in de bijlagen opgenomen. Vrijwel alles vochtsensoren vertonen hetzelfde beeld (zie Bijlage A en Figuur 7.2), waarbij het vochtgehalte licht toeneemt tot augustus / september 2008 en daarna weer licht afneemt. De resultaten van de metingen van de vochtsensoren op de proeflocaties geven alle slechts geringe fluctuaties over het groeiseizoen.

Tabel 4.7

Minimaal en maximaal gemeten volumieke vochtgehalte: volume van water in % van het volume van de vaste stof

	straat ondiep	straat diep	huis ondiep	huis diep
Julianalaan 32	37 / 44	54 / 57	46 / 52	50 / 53
Julianalaan 28	49 / 57	52 / 55	53 / 58	49 / 52
Zonegge	53 / 57	45 / 47	53 / 57	53 / 55

Op de referentielocatie is gedurende de meetperiode tevens het temperatuursverloop en de hoeveelheid neerslag continue gemonitord. De meetresultaten zijn in de bijlagen opgenomen.

4.4 Geotechnische analyses

4.4.1 Inleiding

De kleilaag onder de woningen is aan verschillende processen onderhevig:

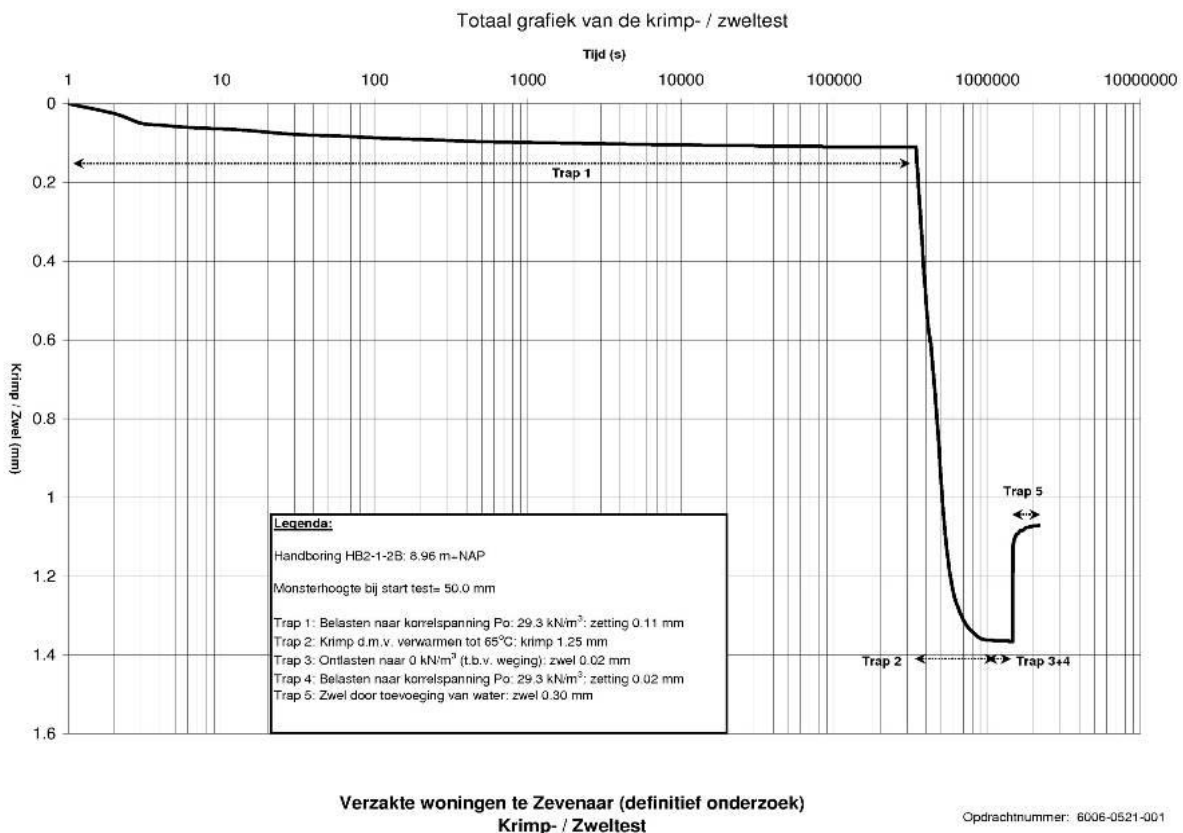
- krimp ten gevolge van uitdroging;
- restzettingen van het terrein;
- zettingen ten gevolge van aanbrengen funderingsdruk;
- zettingen ten gevolge van verlagen grondwaterstand.

Op basis van de gegevens uit het laboratoriumonderzoek en de constructieve beschouwing worden in dit hoofdstuk indicatieve waarden gegeven voor de vervorming behorende bij deze processen. Dit is uitgevoerd voor twee profielen: Julianalaan 28 en Zonegge.

4.4.2 Krimp

In onderstaande wordt ingegaan op het krimppotentiaal van de kleilagen onder de fundering ter plaatse van de onderzochte raaien.

Een voorbeeld van een krimpproef is te zien in Figuur 4.4 (monster 2b uit boring HB2-1). Deze proef resulteert in de maximale krimp bij volledige uitdroging, door het monster eerst enkele dagen te belasten met de spanning waaronder het zich in de grond bevindt en daarna ongeveer 15 dagen te drogen bij 65° C. Daarna wordt weer water toegevoegd. Het grondmonster zwelt dan weer op, maar dit is beperkt tot slechts 10% van de eerdere krimp.



Figuur 4.4 Resultaat krimpproef.

In het laboratorium zijn krimp-zwel testen uitgevoerd. In onderstaande tabel zijn de gemeten krimp behorende bij een monster met een hoogte van 50 mm en de geëxtrapoleerde krimp behorende bij een hoogte van een meter klei aangegeven uitgaande van volledige uitdroging. Daarbij is uitgegaan van constante eigenschappen over de hoogte van de kleilaag.

Tabel 4.8 Krimppotentiaal

boring		niveau [m+NAP]	classificatie	Krimp per 50 mm [mm]	Krimp per m [mm]
HB 1-2	1A	9,7	Klei, sterk siltig	0,54	11
HB 1-2	2A	9,1	Klei, matig siltig, zwak humeus	1,80	36
HB 2-1	2A	9,0	Klei, sterk siltig	1,25	25
HB 2-6	1A	9,4	Klei, matig siltig, zwak humeus	1,58	32
HB 3-1	1A	9,0	Klei, matig siltig	1,91	38
HB 3-6	1A	9,2	Klei, matig siltig	1,49	30

Ter plaatse van Julianalaan 28 (raai 2) is een funderingsonderzoek uitgevoerd. De onderzijde van de fundering is aangetroffen op 0,78 m onder maaiveldniveau, de bovenzijde van de kleilaag op 1,35 m onder maaiveldniveau. Uit het grondonderzoek blijkt dat de onderzijde van de kleilaag zich op circa 2,80 m onder maaiveldniveau bevindt. Uitgaande van volledige uitdroging zal over een hoogte van 1,45 m een krimp optreden van 35 à 45 mm.

Ter plaatse van Zonegge 19-17 (raai 3) is een funderingsonderzoek uitgevoerd. De onderzijde van de fundering is aangetroffen op 0,79 m onder maaiveldniveau, de bovenzijde van de kleilaag op 0,99 m onder maaiveldniveau. Uit het grondonderzoek blijkt dat de onderzijde van de kleilaag zich op circa 2,00 m onder maaiveldniveau bevindt. Uitgaande van volledige uitdroging zal over een hoogte van 1,0 m een krimp optreden van 30 à 40 mm.

4.4.3 Restzetting terrein

De restzetting van het terrein is in een eerdere fase door Fugro bepaald op 5 à 10 mm in een periode van 30 jaar (Fugro Rapport 6006-0521-000, 2006). Deze zetting treedt vrij gelijkmatig over een perceel op. Het gaat hier om zogenaamde kruipzettingen, waarvan de zettingssnelheid in de loop van de tijd af neemt.

4.4.4 Zetting t.g.v. funderingsdruk

Vanuit de analyse van Triops Advies zijn de minimale en maximale funderingsdruk per pand gehanteerd ter bepaling van de zetting van de kleilaag onder de fundering. Er is rekening gehouden met een spreiding van de belasting in de zandlaag direct onder de fundering. Het zand is als onsamendrukbaar gemodelleerd ofwel als zijnde goed verdicht.

4.4.5 Draagvermogen van de funderingen

Het draagvermogen van de klei onder de funderingen is evenredig met 5,14 maal de ongedraineerde schuifsterkte van de kleilaag. Deze kan afgeleid worden uit de sondeerwaarden. Een ongunstige schatting van de ongedraineerde schuifsterkte wordt verkregen door de sondeerweerstand door 20 te delen. De gemiddeld aangetroffen waarde van de ongedraineerde schuifsterkte in de onderzochte raaien is 25 kN/m^2 . Het draagvermogen van de kleilaag zou dan uitkomen op $128,5 \text{ kN/m}^2$. Wanneer de funderingsdruk gespreid wordt door de tussen de fundering en de klei gelegen zandlaag is dit ruim voldoende om de fundering te dragen. De kans dat kleilaag doorponst is en het gewicht niet gespreid wordt is uiterst klein, omdat de onder de kleilaag liggende zandlaag een hoge weerstand heeft.

Tabel 4.9 Indicatieve zettingsanalyse, zetting ten gevolge van aanbrengen funderingsdruk

locatie	C' [-]	funderingsdruk [kN/m ²]	zetting [mm]
Julianalaan 28	24,5	53	20
Julianalaan 28	24,5	162	40
Julianalaan 28	35,7	53	15
Julianalaan 28	35,7	162	25
Zonegge	50,3	16	5
Zonegge	50,3	102	20
Zonegge	66,1	16	5
Zonegge	66,1	102	15

4.4.6 Zetting t.g.v. grondwaterstandsverlaging

In een eerdere fase is door Fugro de zetting ten gevolge van een grondwaterstandsvaling van 0,5 m berekend. In onderstaande tabel is de zetting behorende bij een grondwaterstandsverlaging van 0,5 en van 1,0 m gegeven.

Tabel 4.10 Indicatieve zettingsanalyse, zetting ten gevolge van grondwaterstandsverlaging

locatie	C' [-]	verlaging [m]	zetting [mm]
Julianalaan 28	24,5	0,5 à 1,0	10 à 20
Julianalaan 28	35,7	0,5 à 1,0	5 à 15
Zonegge	50,3	0,5 à 1,0	5 à 10
Zonegge	66,1	0,5 à 1,0	5 à 10

4.4.7 Toelichting zettingsberekeningen

Door het aanbrengen van belastingen of het veranderen van de grondwaterstand zal een zettingsproces op gang worden gebracht. De zettingen worden veroorzaakt door verhogingen van de korrelspanningen. De zettingen treden tijdsafhankelijk op. Enerzijds is sprake van het uitdrijven van water (consolidatie gedurende de hydrodynamische periode), anderzijds treedt kruip op (ook secundaire zakking genoemd). De berekende zettingen betreffen theoretische eindzettingen en zullen pas na geruime tijd worden bereikt. Hiervoor is een periode van 30 jaar in acht genomen.

De zettingen zijn berekend met de formule van Koppejan (gecombineerde formule Terzaghi-Buisman), die in grote lijnen als volgt kan worden geschreven:

$$z = h \cdot \left(\frac{1}{C_p} + \frac{\log t}{C_s} \right) \cdot \ln \left(\frac{\sigma'_{v;z} + \Delta \sigma'_{v;z}}{\sigma'_{v;z}} \right) \quad \text{vgl. 4-1}$$

waarin: z = samendrukking in m
 h = laagdikte in m
 C_p = primaire samendrukkingscoëfficiënt
 C_s = secundaire samendrukkingscoëfficiënt

t = tijd in dagen; voor 30 jaar, $\log t = \text{circa } 4$, $t = \text{circa } 10.000$

$\sigma'_{v,z}$ = oorspronkelijke verticale korrelspanning in kN/m^2

$\Delta\sigma'_{v,z}$ = verticale korrelspanningsverhoging in kN/m^2

$$\frac{1}{C'} = \left(\frac{1}{C_p} + \frac{\log 10.000}{C_s} \right)$$

De stijfheidseigenschappen van de bodem zijn bepaald aan de hand van een interpretatie van het uitgevoerde grond- en laboratoriumonderzoek alsmede op basis van ervaring. De onnauwkeurigheid in de berekende zetting bedraagt circa 30%.

4.5 Conclusie

Zowel in-situ als in het laboratorium zijn metingen verricht ter bepaling van de eigenschappen van de kleilaag. Het betreft hier naast een aantal meer algemene parameters de samendrukbaarheid en krimpgevoeligheid. Het verloop van het vochtgehalte in de kleilaag is tezamen met de hoeveelheid neerslag en de temperatuur gemonitord. Tevens is de constructie inclusief fundering beschouwd en geanalyseerd en is middels lintvoegmetingen de stand van de panden vastgelegd. Dit alles is gedaan op een drietal onderzoeksraaien in de gemeente Zevenaar, waarbij twee panden nader zijn bekeken.

Het onderzoek laat zien dat de bodemopbouw op de vier locaties, zijnde de referentielocatie en de drie onderzoeksraaien, redelijk gelijk zijn. De onderzijde van de kleilaag bevindt zich op circa NAP + 8,4 m, en de dikte van deze laag bedraagt 1,2 à 2,4 m. Voor wat betreft de samendrukkingseigenschappen geldt dat de samendrukbaarheid en de doorlatendheid van de kleilaag op de Zonegge kleiner is in vergelijking met de Julianalaan. De klei zoals aangetroffen ter plaatse van handboring HB 1-2 monster 1 krimpt minder (krimp bedraagt circa 1%) in vergelijking met de overige monsters (gemiddeld circa 3,2%). Ook het watergehalte en de plasticiteitsindex zijn voor dit monster afwijkend ten opzichte van de overige monsters.

De panden Julianalaan 28 en Zonegge zijn nader onderzocht. De funderingsdrukken ter plaatse van de Zonegge zijn kleiner, en onder de fundering bevindt zich een kleilaag welke minder dik is in vergelijking tot hetgeen aangetroffen ter plaatse van de Julianalaan. Het pand Julianalaan 28 is ongelijkmatig gefundeerd doordat een gedeelte van het pand onderkelderd is. Lintvoegmetingen geven een maximaal hoogteverschil van circa 0,07 en circa 0,03 m ter plaatse van twee bouwblokken in de Julianalaan, terwijl dit in de Zonegge circa 0,01 m bedraagt.

De kleilaag onder de woningen is aan verschillende processen onderhevig: krimp ten gevolge van uitdroging, restzettingen van het terrein, zettingen ten gevolge van aanbrengen funderingsdruk en zettingen ten gevolge van verlagen grondwaterstand. Uit oriënterende berekeningen blijkt dat de restzetting van het terrein en de verlaging van de grondwaterstand een relatief klein aandeel hebben in de totale zetting en daarmee in de totale spanningsverhoging. Het aanbrengen van de funderingsdruk en de krimp bij (volledige) uitdroging geven zettingen in de orde van enkele centimeters. De vervormingen zoals ter plaatse van de maatgevende panden waargenomen worden daarmee deels verklaard. De precieze plaats en richting van de vervorming wordt ook bepaald door de heterogeniteit van de ondergrond en doorworteling.

Het draagvermogen van de kleilaag is in de onderzochte gevallen voldoende voor de ondiepe fundering.

5 Zetting bekeken vanuit de ruimte

Petar Marinkovic and Ramon Hanssen, Sectie Mathematische Geodesie en Puntbepaling van de faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, TUDelft

Satellieten uitgerust met een radar kunnen het aardoppervlak systematisch aftasten. Dit levert voor elke overkomst van de satelliet (om de vijf weken) een strook van 100 km breed op die met hoge resolutie wordt waargenomen. De teruggekaatste radargolven worden verwerkt tot een radarbeeld. Elk pixel van dit beeld is feitelijk een 'radarreflector,' waarbij sommige reflectoren in de tijd op vergelijkbare wijze reflecteren, zoals bijvoorbeeld huizen, en infrastructuur. De overgrote meerderheid van de reflectoren is echter instabiel in de tijd; de reflectie-eigenschappen zijn sterk veranderlijk, zoals bijvoorbeeld landbouwgebied of vegetatie. Doordat de beelden uit miljoenen reflecties bestaan, is de hoeveelheid geschikte reflecties toch zeer groot (duizenden meetpunten).

De interferometrische verwerking van deze complexe data maakt het mogelijk om de afstandsverschillen tussen de satelliet en de geschikte radarreflectoren met millimeter precisie te volgen. Deze gegevens zijn relatief in ruimte en tijd. Dit wil zeggen dat de beweging tussen punten onderling wordt bepaald, en niet in de absolute zin. In de tijd wordt een referentietijdstip gekozen, waardoor alle waargenomen beweging relatief is tot dit tijdstip. Doordat satellietbeelden zijn waargenomen sinds 1992 is het mogelijk om met terugwerkende kracht te bepalen of in een bepaald gebied verzakkingen zijn opgetreden. Belangrijk aandachtspunt hierbij is dat betrouwbare metingen alleen mogelijk zijn voor de hiertoe geschikte reflectoren. Welke objecten geschikt zijn is sterk toevalsafhangelijk. Het is dus onwaarschijnlijk dat voor een specifiek huis een meting beschikbaar zal zijn, terwijl men wel kan stellen dat mogelijk is om voor een bebouwd gebied een hoge punt dichtheid (vele tientallen punten per vierkante kilometer) te bereiken. Wanneer dus het verzakkingsproces een ruimtelijk gebied bestrijkt groter dan een paar honderd meter, is het waarschijnlijk dat er voldoende geschikte reflecties worden gevonden om dit signaal voldoende te bemonsteren.

In dit project is deze radar techniek, bekend als PSI (Persistent Scatterer Interferometry, vanuit Synthetische Apertuur Radar) toegepast op de gemeente Zevenaar. Hierbij is geprobeerd om zowel de ruimtelijke als de temporele bemonstering te optimaliseren, zonder daarbij op kwaliteitscriteria in te boeten.

In de volgende paragrafen wordt een overzicht gegeven van de beschikbare satellietdata en de gevolgde dataverwerkingsmethode. Daarna worden de resultaten getoond, waarna deze geïnterpreteerd worden en er conclusies uit worden getrokken.

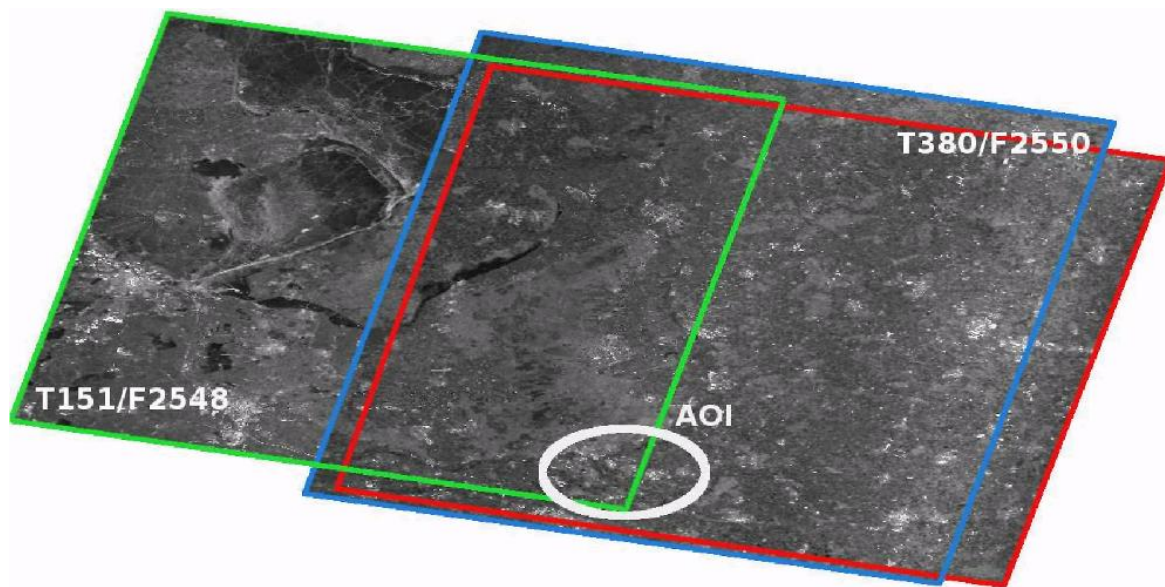
5.1 Satellietgegevens

5.1.1 Satellietgegevens

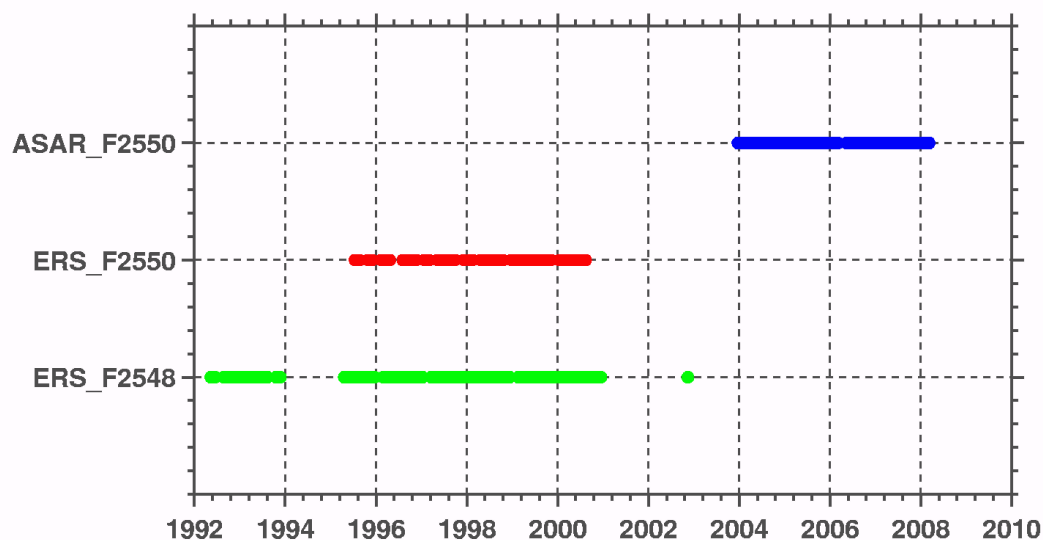
Voor de schatting van de verzakkingsparameters is een lange tijdserie data nodig. Hier zijn data gebruikt van de ESA satellieten ERS-1 en ERS-2, die het tijdvak tussen 1992 en 2001 beslaan, en van de satelliet Envisat (vanaf 2002 tot nu).

5.1.1.1 Data selectie criteria

Gegeven de opgenomen en gearchiveerde satellietdata en de geografische ligging van het interessegebied is gekozen voor het ERS-1/2/Envisat beeld van strook (track) nummer 380 en beeld (frame) nummer 2550, zie Figuur 5.1.



Figuur 5.1 Ligging van het radarbeeld van strook 380, beeld 2550 en van het beeld van strook 151 en beeld 2548. en de 'Area Of Interest' (AOI). Alhoewel dit gebied in beide beelden ligt, is gekozen voor de eerste optie (380/2550), zoals aangegeven in blauw (Envisat) en rood (ERS-1/2). Voor het andere beeld is Zevenaar in 40% van de beschikbare beelden niet zichtbaar. Toch is ook deze dataset verwerkt.

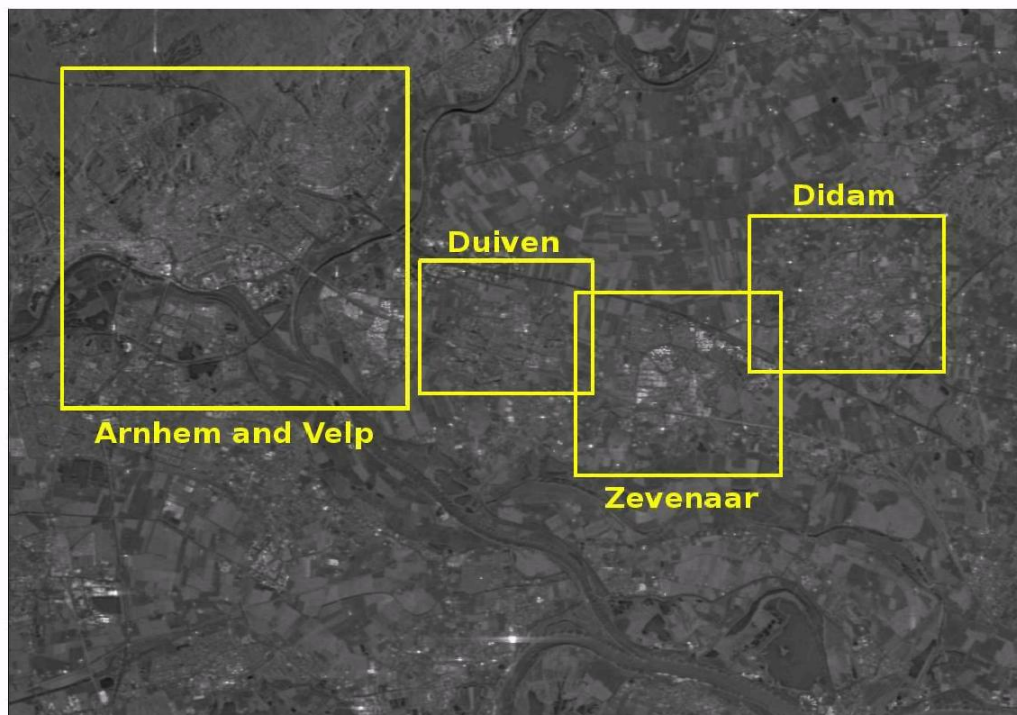


Figuur 5.2 Data beschikbaarheid en temporeel bereik van de verschillende datasets. Er zijn 82 ERS1/2 beelden beschikbaar voor strook/beeld 151/2548 (groen); 44 ERS1/2 beelden voor strook/beeld 380/2250 (rood); and 44 Envisat (ASAR) beelden voor strook/beeld 380/2250 (blauw). Duidelijk zichtbaar zijn de intervallen 1994-1995 en 2001-2004, waarbij geen data door de satellieten zijn opgenomen.

Het dalende ERS beeld 151/2548, (groen in Figuur 5.1) bestrijkt het interessegebied en is in de analyse opgenomen. Zevenaar zelf lag echter exact op de rand van het gebied, en was daardoor slechts in een beperkt aantal beelden geheel opgenomen. De volledige tijdserie is opgenomen voor Arnhem/Westervoort/Duiven, terwijl slechts 20 beelden zijn gebruikt voor de verwerking van Zevenaar, zie de figuren 5.1 en 5.2. Het totaal aantal beelden gebruikt in de analyse is ongeveer 190, tussen 1992 en 2008, zie fig. 5.2.

5.1.2 Dataverwerkingsmethode: InSAR en PSI

Elke strook/beeld combinatie is apart verwerkt. Het referentiebeeld voor elke combinatie is gekozen op basis van de maximale verwachte kwaliteit (coherentie) van de serie. Voor de radardata verwerking is gebruik gemaakt van de Delft Object-oriented Radar Interferometric Software (DORIS), en voor de PSI verwerking van Depsi, de Delftse PSI methode. Hieronder worden de belangrijkste resultaten getoond, inclusief een detail-analyse van Zevenaar met het gebied waar de grootste verzakkingen waren gerapporteerd. De PSI resultaat tabellen zijn geïntegreerd beschikbaar gemaakt binnen GoogleEarth, en zijn aanklikbaar om de tijdseries te evalueren.



Figuur 5.3 Incoherent gemiddeld radar amplitudebeeld, met daarin de geanalyseerde gebieden.

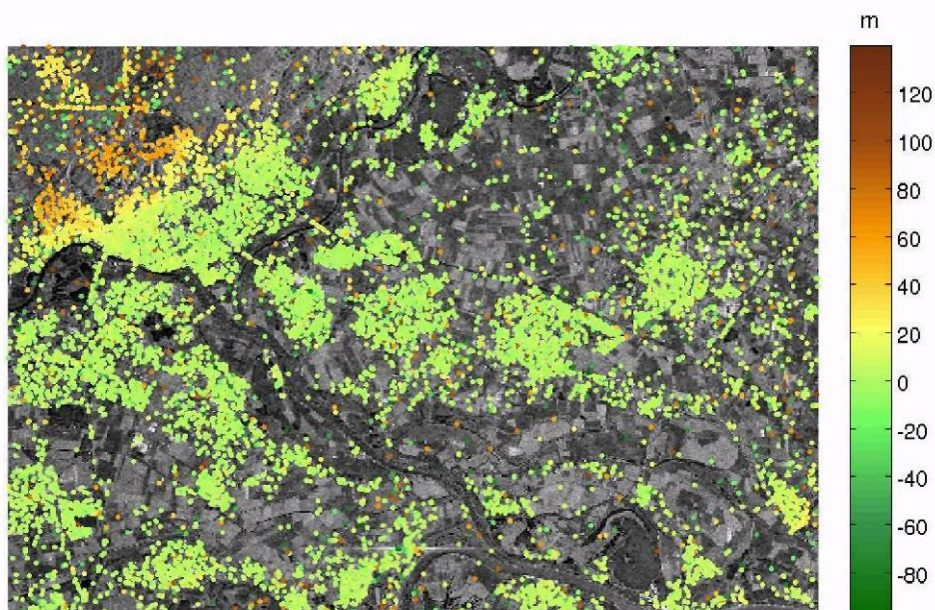
5.1.3 Resultaten: interpretatie

Voor de correcte interpretatie van de resultaten dient nog te worden benadrukt dat de verzakingsdata als relatieve data geïnterpreteerd dienen te worden. De locatie en keuze voor het nulpunt (0 mm/jaar) is dus arbitrair. Dit geldt ook voor de schatting van de topografische hoogte. Tot slot zijn ruimtelijk lineaire trends uit de data geëlimineerd.

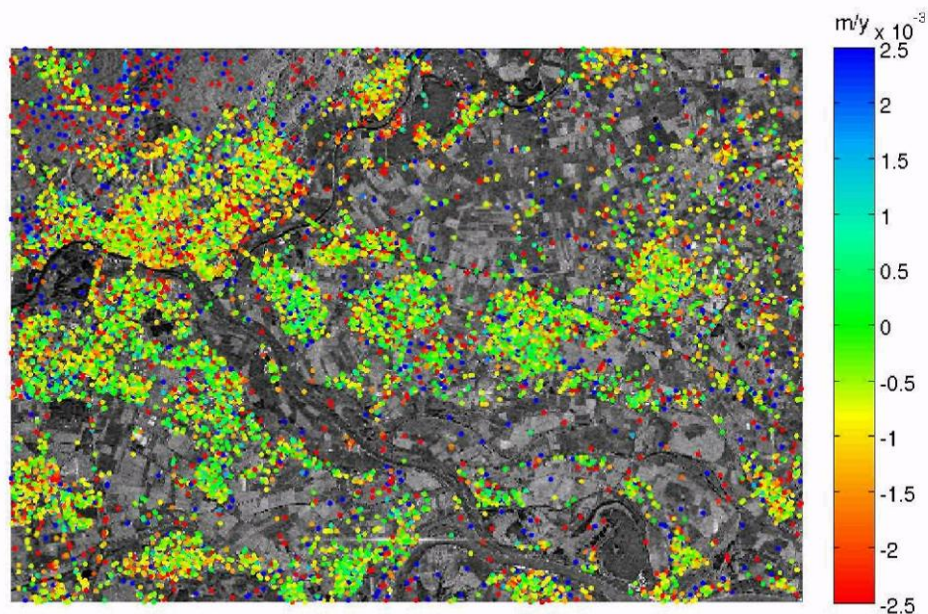
5.1.4 Resultaten: overzicht

Hieronder worden de overzichtsbeelden van de drie onafhankelijke tijdseries getoond. De geo-gelocaliseerde resultaten worden weergegeven in een GIS/GoogleEarth omgeving, zie <http://enterprise.lr.tudelft.nl/zevenaar>.

5.1.4.1 Envisat (ASAR) 2003-2008: strook 380, beeld 2550

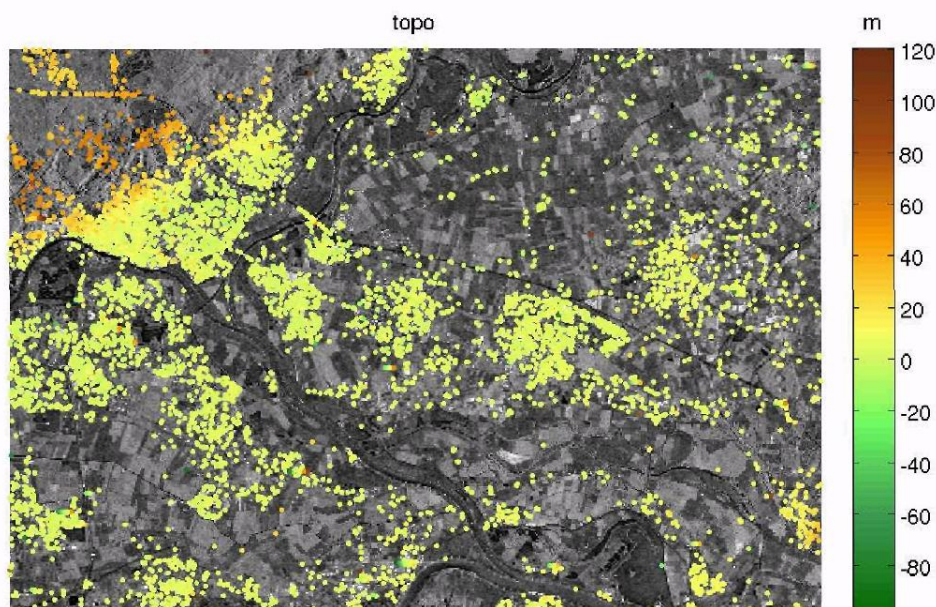


Figuur 5.4 Geschatte residuele topografie voor het totale gebied in meters, relatief tot aan het referentiepunt. 43 interferogrammen zijn gebruikt voor deze analyse tussen 21.12.2003 en 709.03.2008.

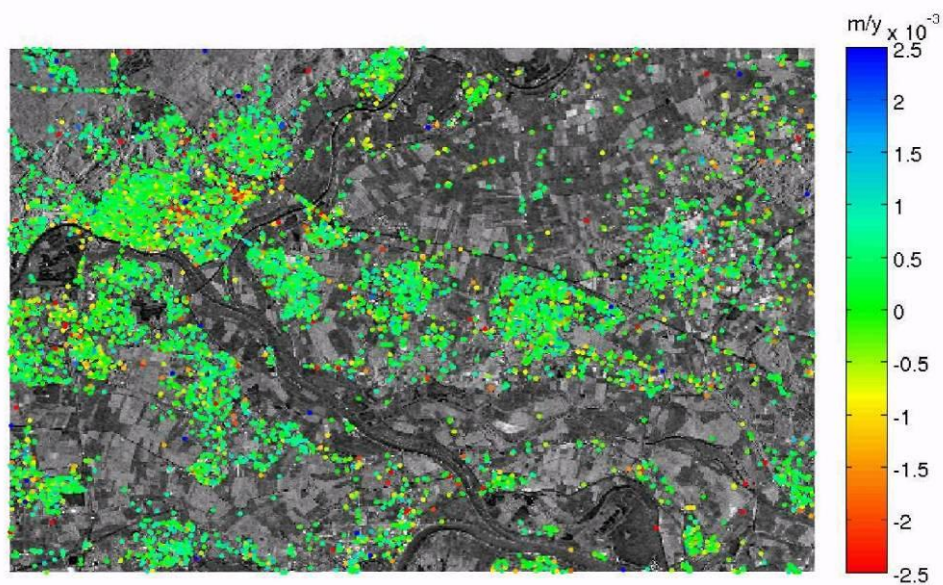


Figuur 5.5 Geschatte lineaire snelheid in meters per jaar voor het totale gebied relatief aan het referentiepunt. 43 interferogrammen bestrijken het interval 21.12.2003 - 09.03.2008.

5.1.4.2 ERS1/2 (1995-2000): Strook 380, Beeld 2550



Figuur 5.6 Geschatte residuele topografie (in meters) voor het totale gebied relatief tot het referentiepunt. 83 interferogrammen zijn gebruikt in de analyse tussen 16.07.1995 - 15.01.2000.

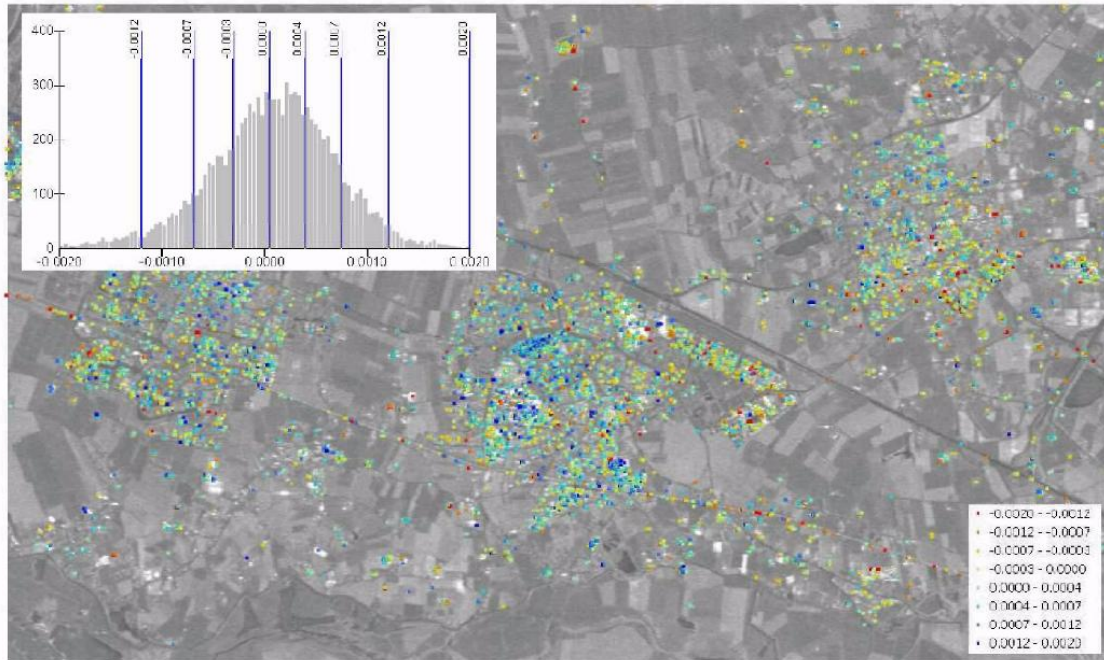


Figuur 5.7 Schattingen voor lineaire snelheid in meters per jaar, relatief aan het referentiepunt. 83 verwerkte interferogrammen bestrijken de periode 16.07.1995 - 15.01.2000.

5.1.4.3 ERS1/2 (1995-2000): Strook 151, Beeld 2548

In deze beeldcombinatie (151/2548), waarbij Zevenaar aan de rand ligt, soms net wel, en soms net niet in het beeld valt, zijn slechts 21 beelden beschikbaar waar Zevenaar wel zichtbaar is. Het tijdsinterval is bijna 5 jaar, van 8 september 1995 tot 15 december 2000. Doordat er minder beelden beschikbaar zijn worden minder bruikbare radarreflecties

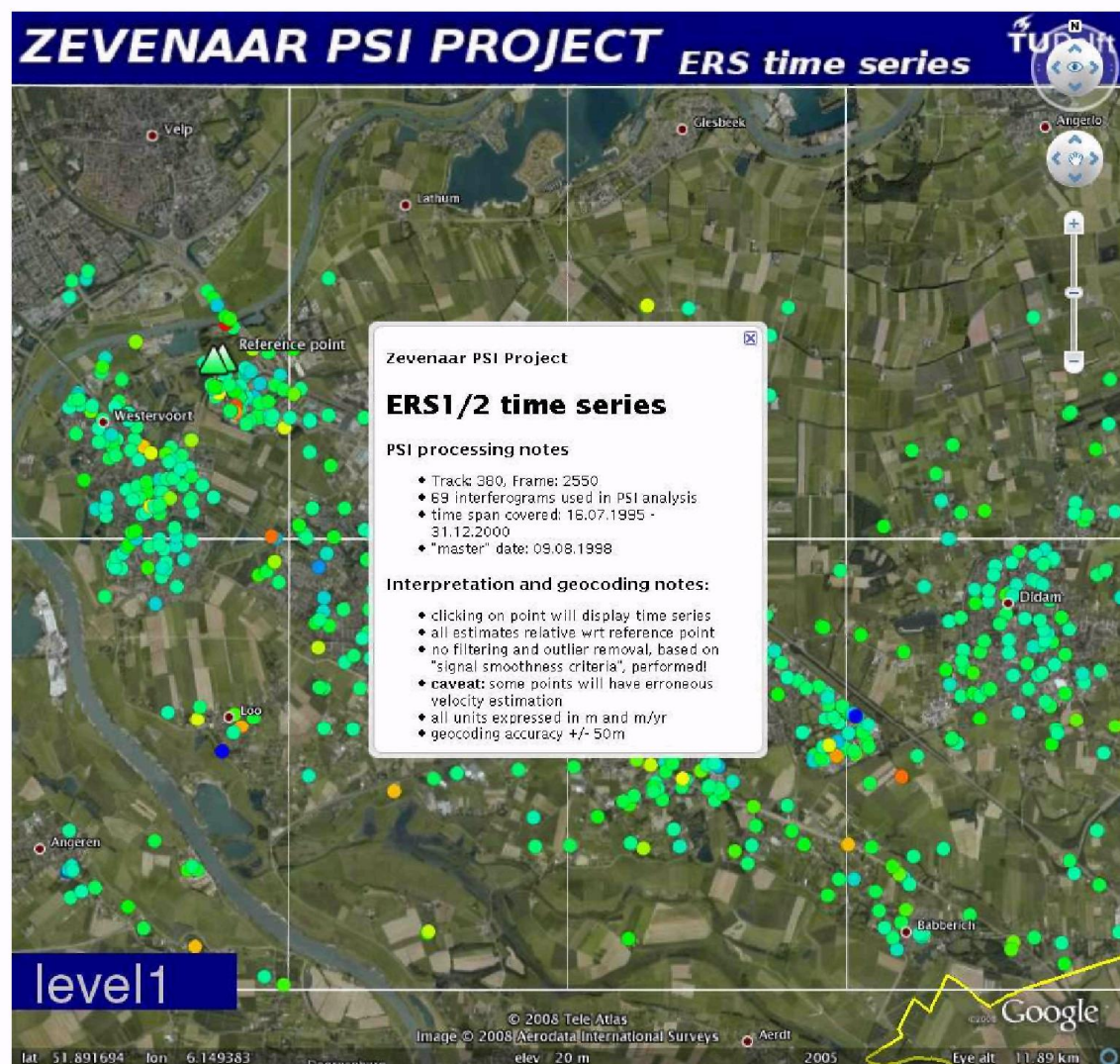
gedetecteerd, resulterend in een lagere punt dichtheid, zie figuur 5.8, in vergelijking met de andere beeldcombinaties.



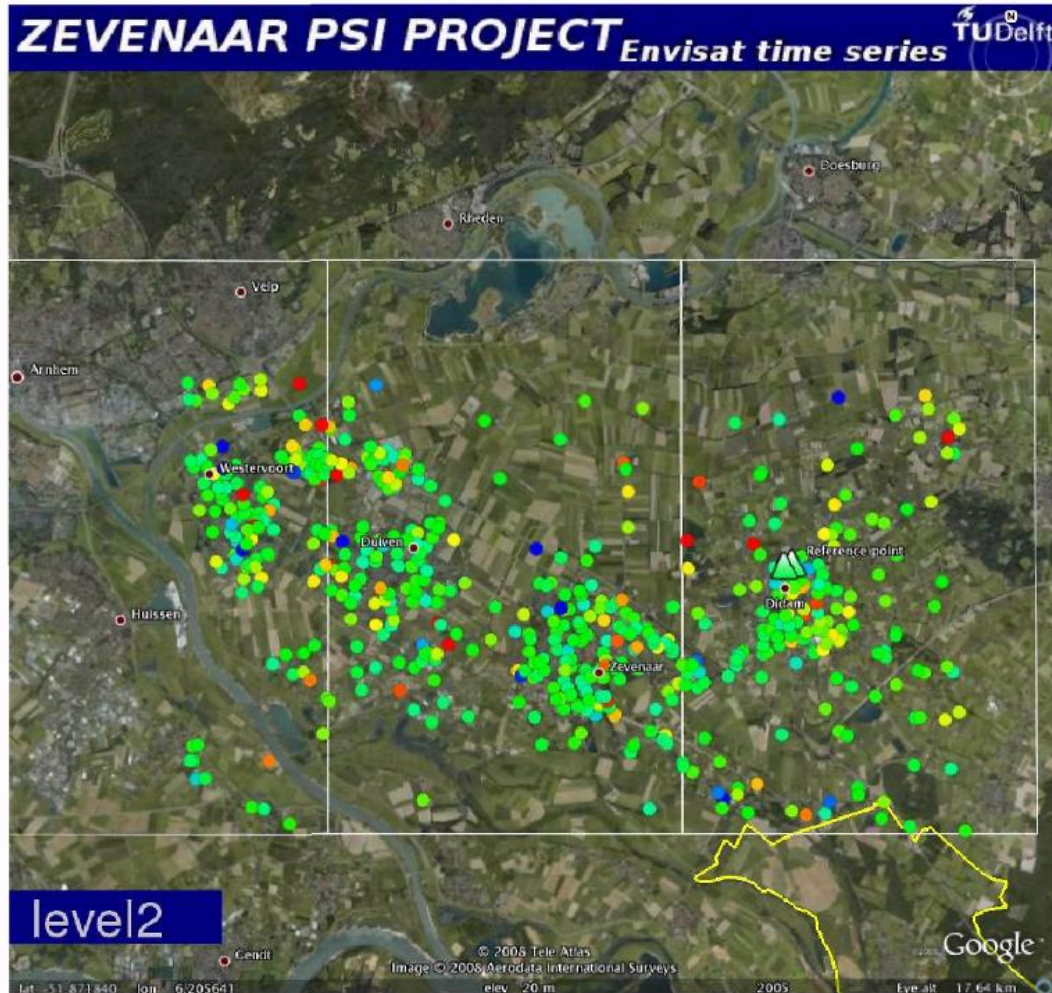
Figuur 5.8 Schatting van de lineaire snelheid van het gebied rond Zevenaar, in meters per jaar Slechts 21 beelden konden worden gebruikt tussen 08.09.1995 - 15.12.2000. Doordat het gebied op de rand van de beelden ligt is alleen het gebied van Duiven, Zevenaar en Didam verwerkt.

5.2 Resultaten in Google Earth

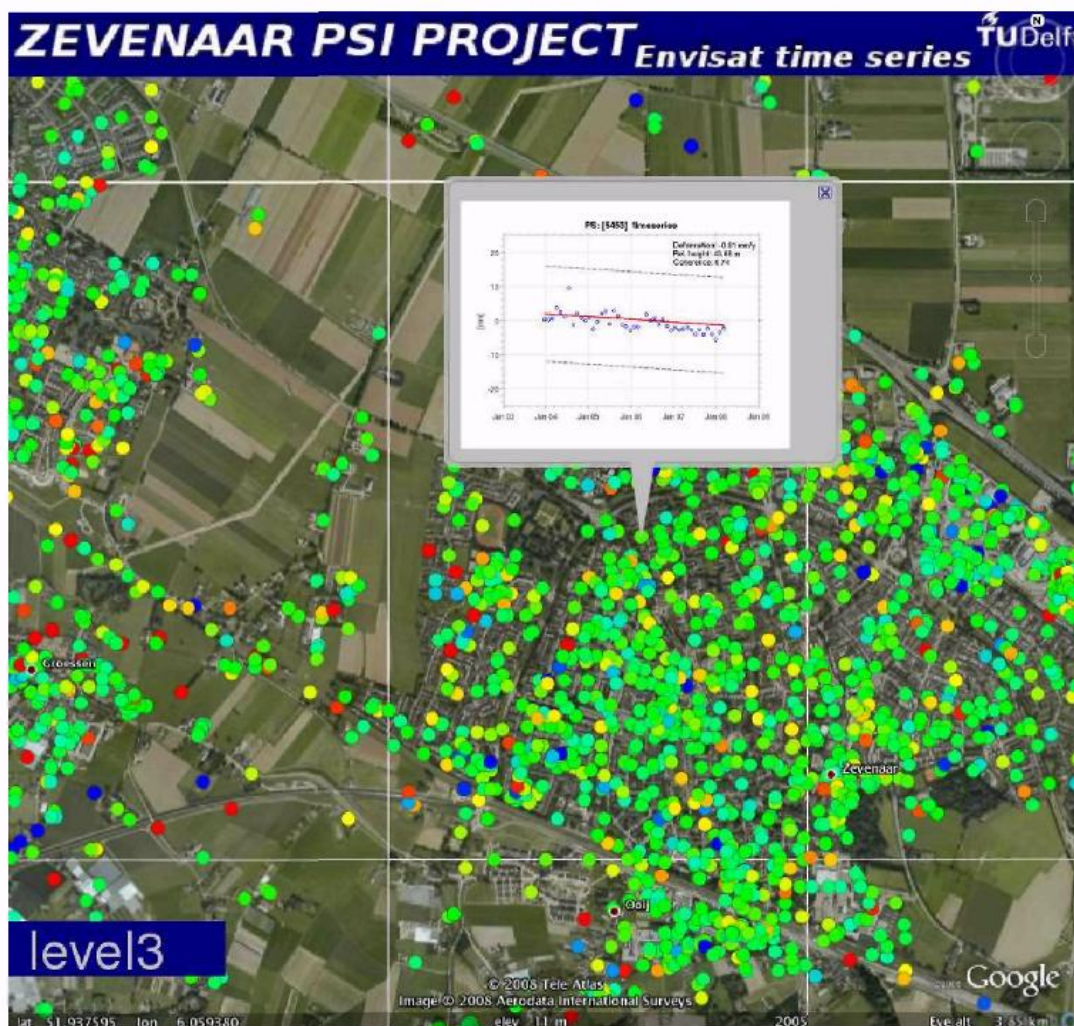
Figuur 9 toont een voorbeeld van de integratie van de radar resultaten in Google Earth. Alle resultaten van dit project zijn in te zien op de web pagina: <http://enterprise.lr.tudelft.nl/zevenaar>. Alle punten kunnen worden aangeklikt, waarna voor elk punt het verloop van de relatieve deformatie als functie van de tijd zichtbaar is. De positie van alle punten is zo goed als mogelijk op het aardoppervlak afgebeeld. Voor de horizontale positie is de precisie beter dan 50 meter.



Figuur 5.9 Voorbeeld van de PSI resultaten van de ERS satellieten in Google Earth. Afhankelijk van het gekozen schaalniveau (in/uitzoomen) worden meer of minder punten getoond.



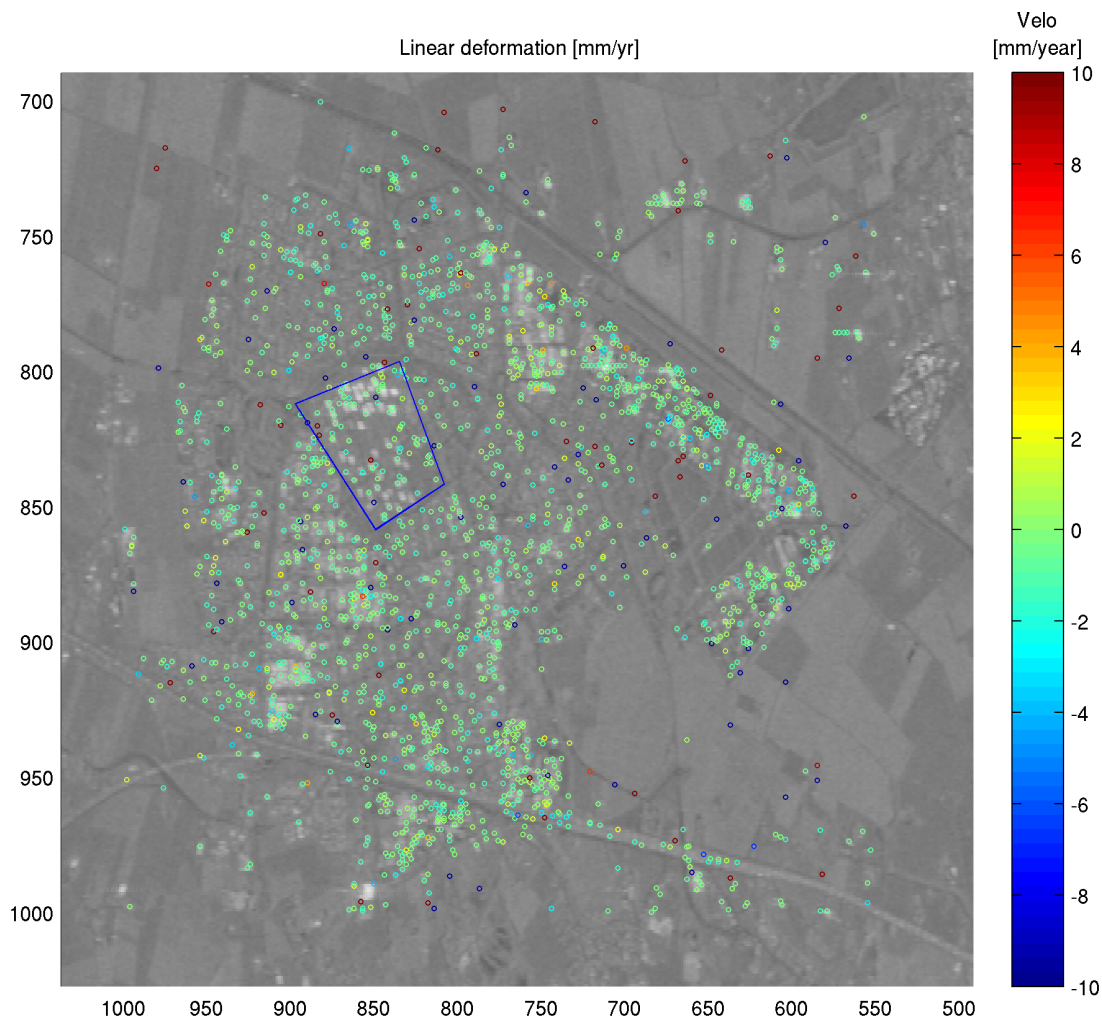
Figuur 5.10 Voorbeeld van de PSI resultaten van de Envisat satelliet in Google Earth. In dit voorbeeld is geen filtering en 'outlier' detection toegepast, waardoor enkele punten een onjuist deformatiepatroon zullen vertonen



Figuur 5.11 Voorbeeld van een aangeklikt punt en de getoonde tijdserie van dat punt. Alle schattingen zijn relatief tot een referentiepunt, dat met een special symbol is aangeduid in de kaart. Alle eenheden zijn in meters per jaar. De localisering van de punten heeft een precisie van ca 50 meter.

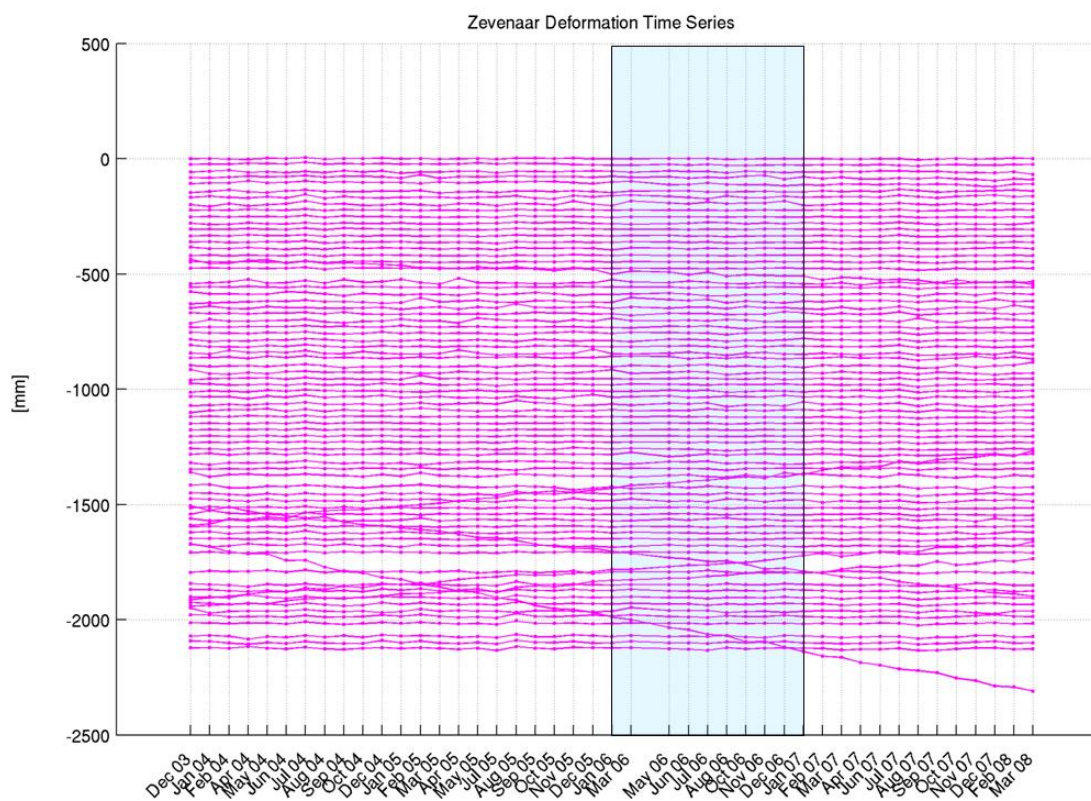
5.3 Tijdseries van Julianalaan en Zonegge

De tijdseries zijn ook onderzocht voor de locaties Julianalaan en Zonegge voor de periode tijdens en rond de zomer van 2006.



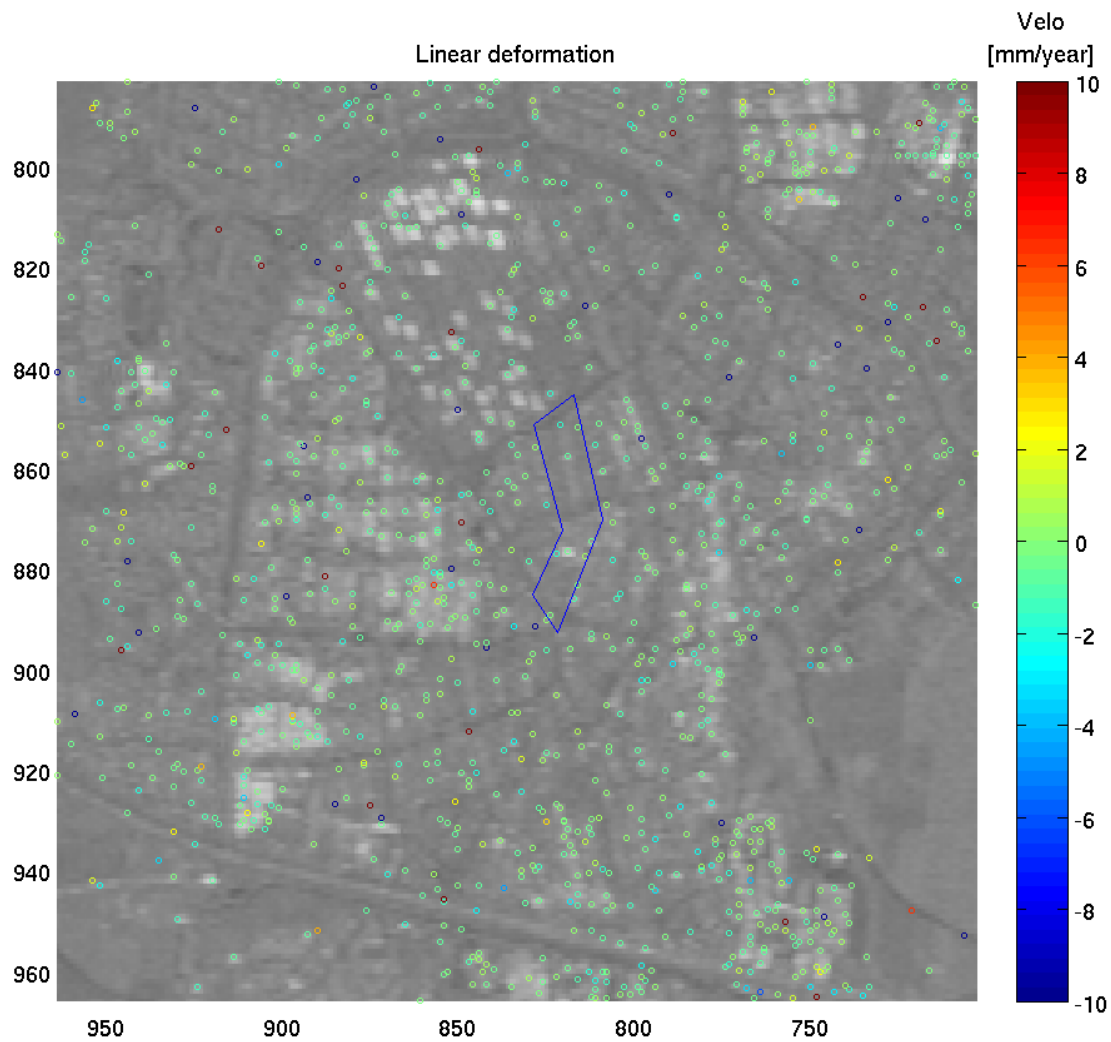
Figuur 5.12 Selectie van PS reflecties in de wijk Zonégge De blauwe polygon geeft het in detail geanalyseerde gebied aan.

De volgende figuur toont de tijdseries van alle punten binnen dit gebied. Alle lijnen hebben een kleine verticale verschuiving gekregen om ze beter zichtbaar en interpreteerbaar te maken.

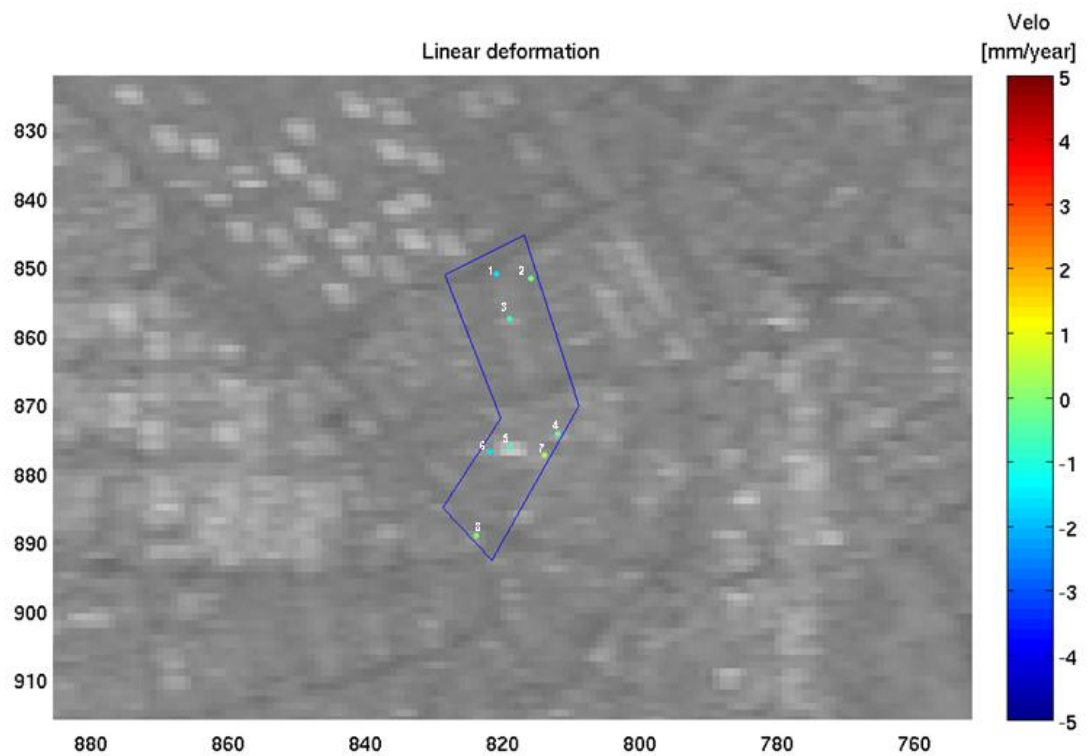


Figuur 5.13 Tijdsree van de PS reflecties in Zonegge van december 2003 tot maart 2008

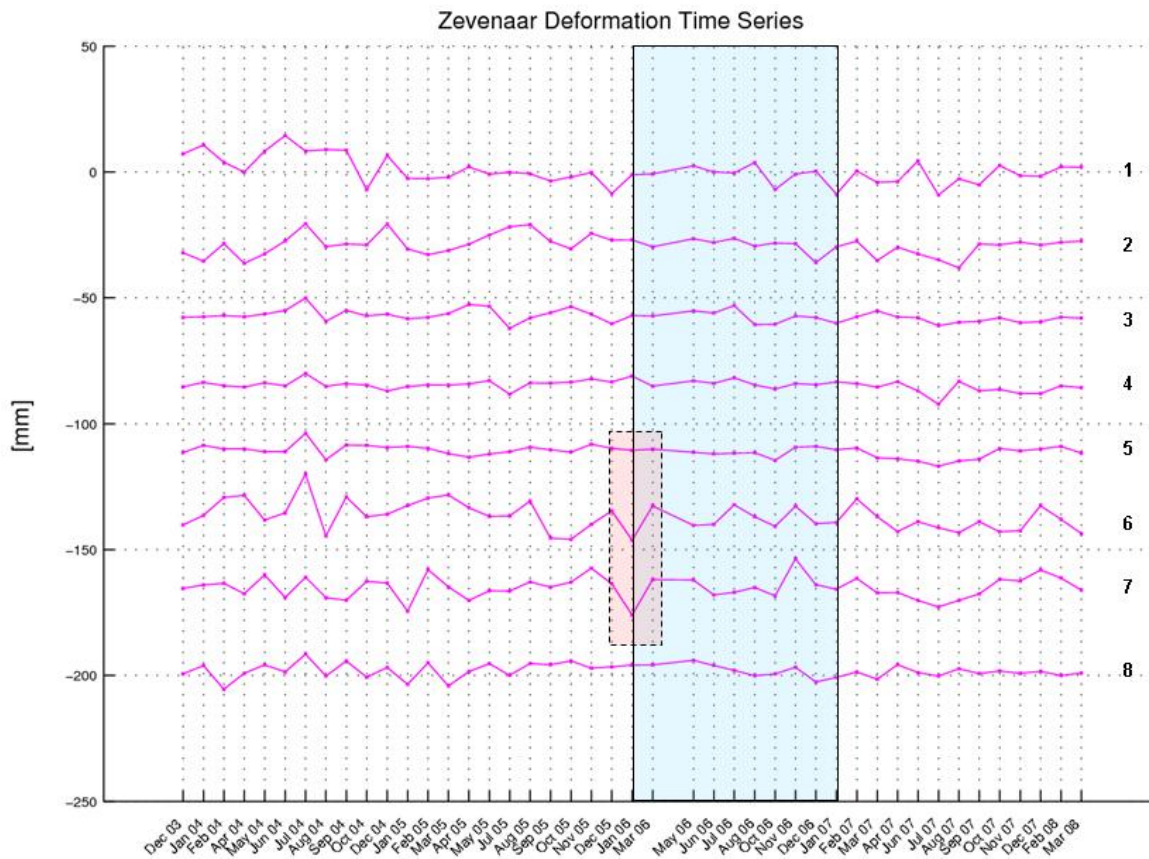
De globale deformatie blijkt redelijk periodiek te zijn. Geen significante deformatie is waargenomen in het tijdsvak tussen januari 2006 en januari 2007.



Figuur 5.14 Selectie van PS reflecties in de wijk Julianalaan. De blauwe polygon geeft het in detail geanalyseerde gebied aan.

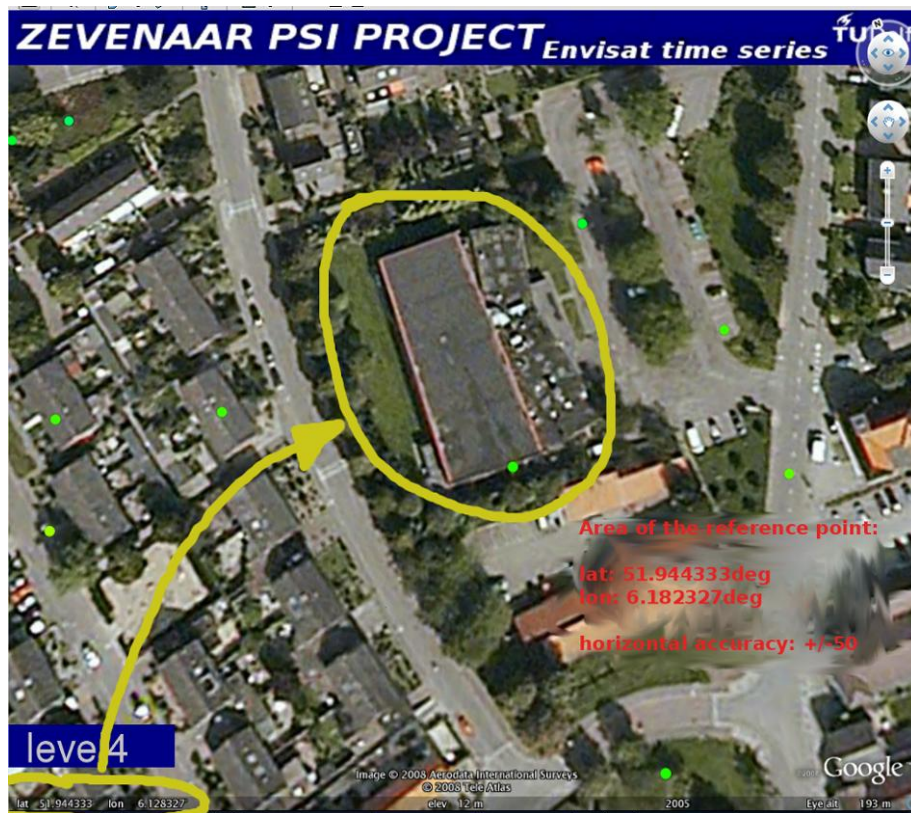


Figuur 5.15 Julianalaan (zoom in) De blauwe polygon omvat de PS punten in het gebied Julianalaan. In Figuur 5.16 de tijdseries van deze specifieke punten.



Figuur 5.16 Tijdsree van de PS reflecties in de Julianalaan van december 2003 tot maart 2008.

Ook in de Julianalaan blijkt de beweging maximaal een licht-periodieke component te hebben, maar geen significante bodemdaling kan worden waargenomen in de periode januari 2006 en januari 2007. Drie punten tonen een kleine systematische beweging rond januari 2006, aangegeven in het kader. Wanneer het gebruikte referentiepunt niet stabiel zou zijn, maar bijvoorbeeld zou verzakken kan dit leiden tot een onderschatting van de bodemdaling in het onderzochte gebied. Het referentiepunt in deze analyse was gekozen in Didam buiten het gebied van de Holocene kleilagen en is gefundeerd in het pleistocene zand. De coördinaten van dit punt zijn: latitude: 51.944333 deg, longitude: 6.182327 deg, horizontale precisie: +/- 50 m, zie figuur. Deze locatie is vanwege de opbouw van de ondergrond stabiel verondersteld relatief aan Zevenaar.



Figuur 5.17 Locatie van het referentiepunt in Didam

5.4 Interpretaties en conclusies

De analyse van drie onafhankelijk verwerkte series satellietbeelden, in totaal over een periode van bijna 13 jaar, toont geen significante bodembeweging in Zevenaar. Onder significant wordt hier bodembeweging van meer dan ± 2 mm/jaar begrepen, en afgezien van een enkel geïsoleerd meetpunt wordt deze grens niet overschreden. Significants betekent dus dat de bodembeweging zich uitstrekt over een bepaald gebied groter dan een paar honderd meter. Tevens kan uit de vergelijking tussen bewegingssnelheden in het centrum van de gemeente en die van gebieden net ten zuiden van de Betuwespoorweg niet worden geconstateerd dat de aanleg van de spoorlijn een significante impact heeft gehad op de lokale deformatie in sommige gebieden van de gemeente. Desalniettemin dient te worden onderstreept dat het ontbreken van satellietwaarnemingen in de periode dat de feitelijke deformatie plaatsvond, en door de ruimtelijke en temporele geïsoleerdheid van de calamiteiten, het trekken van onomstotelijke conclusies voor die periode bemoeilijkt.

In de periode 2004 – 2008 is in de beschouwde straten in Zonégge en de Julianalaan geen algemeen dalende trend zichtbaar. Verzakkingen in de zomer van 2006 zijn in de beschikbare PS reflecties niet aanwezig, wat erop wijst dat de verzakkingen die hebben plaatsgevonden geen algemeen optredend fenomeen is geweest.

In het algemeen kan worden gezegd dat er geen verschil is waar te nemen in de gemiddelde beweging tussen de wijken met funderingen op palen en wijken met funderingen op staal.

6 Vertaling van de verdamping van bomen naar de vochtonttrekking aan de bodem op locaties Julianalaan en Zonegge te Zevenaar, 2008

Jitze Kopinga, Alterra

6.1 Doorworteld bodemvolume

Een belangrijke parameter bij de berekening van de vochtonttrekking is (kennis van) het volume, en de plaats van het volume, waarin de grond doorworteld is, of de grond gaandeweg de verdere groei gedurende het groeiseizoen nog kan worden doorworteld. In een bosopstand wordt voor de zijdelingse wortelspreiding als goed bruikbare parameter de oppervlakte van de kroonprojectie aangehouden. De zgn. wortelprojectie is hier dan gelijk aan de kroonprojectie.

Bij solitaire bomen in het vrije veld is de wortelprojectie doorgaans groter dan de kroonprojectie. De wortelprojectie wordt hier in het onderzoekspraktijk doorgaans vastgesteld aan de hand van steekproefsgewijze bodemprofielopnames.

In het stedelijk gebied is de wortelprojectie van met name straatbomen als regel grillig vanwege de heterogene (verstoorde) bodemomstandigheden. Ook het straatprofiel (o.a. de aan- of afwezigheid van voortuinen) is zeer bepalend voor de ruimtelijke ontwikkeling van boomwortels. Ook zal aan de straatzijde, afhankelijk van de aard van de wegverharding, de (mogelijkheden voor) wortelontwikkeling beperkter zijn dan van de wegzijde af. Een enigszins nauwkeurige kartering van de wortelprojectie is hier vaak, vanuit praktisch oogpunt, een onbegonnen zaak. Daarom wordt in globale berekeningen vooralsnog de kroonprojectie als maat voor de wortelprojectie van de bomen genomen.

Voor bomen in het stedelijk gebied is de bewortelingsdiepte als vuistregel 1 à 1,25 meter wanneer de hoogte van het grondwater geen beperkende factor is. Als bosbouwkundige norm wordt echter uitgegaan van een potentiële bewortelingsdiepte tot aan de hoogte van de permanent gereduceerde bodemzone¹. Dit gaat op voor de meeste bosboomsoorten, waaronder beuk, eik, es en naaldbomen. Omdat de bodemkundige situatie van de proefobjecten in Zevenaar bekend is, wordt hier de hoogte van de permanent gereduceerde bodemzone als potentiële bewortelingsdiepte (PWD) aangehouden. Deze ligt in alle drie de onderzoeksobjecten ruwweg rond 2,5 m beneden maaiveld.

In onderstaande tabel zijn de boringen aangegeven waarvan mag worden aangenomen dat deze binnen de invloedssfeer staan van de beworteling van de bomen (zomereiken) in de straatbeplanting van de Julianalaan en de singelbeplanting ten westen van de Zonegge.

Wat opvalt is dat in de Julianalaan op een uitzondering na de toplaag van overwegend fijn, humeus tot licht humeus zand een dikte heeft van 1,2 à 1,4 meter. Dit kan van betekenis zijn voor de mate en snelheid waarin de kleilaag kan uitdrogen a.g.v. vochtonttrekking door de bomen.

Uitgaande van de normale wortelintensiteit van bomen naar de diepte toe, zullen de meeste wortels zich in deze toplaag bevinden en zullen de bomen voor hun verdamping eerder (en sneller) aanspraak maken op de watervoorraad in de toplaag dan de watervoorraad in het kleipakket.

¹ Dit is in dit geval de zone die permanent met water is verzadigd. Kenmerkend daarvoor is dat er alleen nog grijze klei voorkomt waarin geen roestverschijnselen meer aanwezig zijn.

Tabel 6.1 Boorprofielen binnen de invloedssfeer van bomen met de Potentiële Bewortlingsdiepte

Boring	Toplaag (m)	Kleipakket (m)	PWD (m)
HB1-3	1.3	1.4	2.5
HB1-4	1.3	1.4	2.5
HB1-5	0.55	2.15	2.4
HB2-4	1.3	1.4	2.7
HB2-3	1.25	2.4	2.55
HB2-2	1.4	2.3	2.5
HB3-6	0.3	2	2.7
HB3-5	0	2.4	2.9
HB3-4	0.4	3.1	2

Uitgaande van een vochtleverend vermogen van 150 mm (= 150 liter per kubieke meter grond) die geldt voor een humusarme dekzand, gaat het dan om een vochtvoorraad van 1,2 à 1,4 x 150 mm = 180 à 210 liter per kubieke meter die kan worden beschouwd als “buffer” gedurende de periode dat er geen neerslag valt alvorens de boom volledig gedwongen is om de watervoorraad in het kleipakket aan te spreken.

Aan de Zonegge is de dikte van de (eventueel) aanwezige toplaag gering en substantieel minder van belang in het bufferen van vocht. Hier zal de vochtvoorraad in het kleipakket al snel door de bomen worden aangesproken.

6.2 Verdamping

Als eenheid voor de bladverdamping is vooralsnog uitgegaan van een “redelijk” gemiddelde voor alle boomsoorten van 0,25*Eref., waarbij Eref. de referentiegewasverdamping is die door de weerstations in Nederland wordt berekend volgens de methode ‘Makkink’ (Kopinga, 1998)². Deze betreft de verhouding van de verdamping (in liters/dag) via het bladoppervlak en de grootte van dit bladoppervlak (in m²) (ook wel bladmassa genoemd), waardoor Eref. in (liters/dag/m² bladmassa).

Er wordt aangenomen dat de actuele verdamping van de boom gelijk is aan de potentiële verdamping. D.w.z. dat de verdamping onbeperkt door kan gaan tot het zgn. verwelkingpunt is bereikt, wat optreedt bij een vochtgehalte van de bodem bij pF = 4,2. Dit is gelijk aan een drukhoogte (H) van de zgn. zuigspanning van de bodem van -16000 cm). Er zullen boomsoorten zijn die al bij een hoger vochtgehalte al hun verdamping beperken door het sluiten van de huidmondjes. Dit kan al optreden bij een pF waarde vanaf 3,5 of zelfs lager. Hierover is echter nog te weinig bekend om daarop in de berekening te kunnen corrigeren en dit is hier verder buiten beschouwing gelaten. Overigens betreft het vooral de snelheid waarmee een boom water onttrekt aan de bodem. Bij langdurige droogte zal op den duur het verwelkingspunt (pF = 4,2) worden bereikt ongeacht de aard van de boomsoort (“verkwistend” of “spaarzaam”).

De invloed van de boom op het vochtgehalte van een zware kleigrond ligt dan tussen het verzadigingspunt (0,5 à 0,6 van de volumefractie) en het verwelkingspunt (ca. 0.35 van de volumefractie). Ruwweg wordt dit verschil gesteld op 0,2 deel van de volumefractie. Dit komt overeen met 200 liter per m³ bodemvolume. Afhankelijk van het kleitype kan dit via de PLE

² Kopinga, J. 1998. Evaporation and water requirements of amenity trees with regard to the construction of a planting site. Pp. 233- 245 in: Neely, D & G.W. Watson (eds). The Landscape Below Ground II. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils. International Society of Arboriculture, Champaign, Ill. 265 pp.

(= Potential Linear Extensibility) worden vertaald naar de mate van krimp- en zwel die kan optreden als gevolg van de maximale mogelijke vochtonttrekking door bomen. Voor een matig zware klei ligt deze dan rond 15 cm/m en voor een zware komklei rond 12 cm/m (Bronswijk & Evers, 1987)³.

Een maximale vochtonttrekking kan zich dan voordoen in situaties waar gedurende het groeiseizoen niet of nauwelijks nalevering is van vocht vanuit het grondwater en waar het doorlopend potentieel verdampingsoverschot (= de cumulatieve hoeveelheid verdamping minus de cumulatieve hoeveelheid effectieve neerslag) 200 mm of meer bedraagt per meter diepte van het doorwortelde bodemvolume (zie Bijlage C, sub 3).

6.3 Effectieve neerslag

Effectieve neerslag is hierbij de hoeveelheid neerslag die in de bodem kan dringen en zodoende de hoeveelheid bodemvocht kan aanvullen.

Twee belangrijke oorzaken maken dat de effectieve neerslag minder kan zijn dan de totale neerslag:

1. Interceptie (= ondervangen) van neerslag door de boomkroon en andere vegetatie op de wortelprojectie, waardoor de neerslag al wordt "weggevangen" voordat het de bodem bereikt en
2. de infiltratie van regenwater door het bodemoppervlak, c.q. de mate waarin op de bodem gevallen neerslag wordt afgevoerd, of direct verdampt voordat het in de bodem dringt.

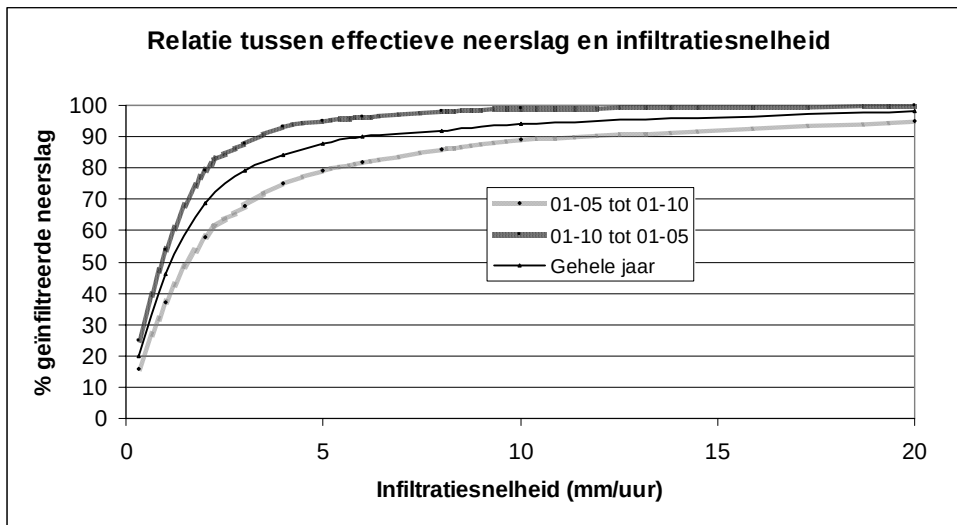
Ad. 1. Over de bijdrage van interceptie aan vermindering van de effectieve neerslag van solitaire bomen is weinig onderzocht. Voor groenblijvende bomen zoals de steeneik (*Quercus ilex*) in mediterrane klimaten wordt als maximum een waarde van ca. 20% van de jaarlijkse neerslag aangehouden. Voor bladverliezende bomen zal dit lager liggen: 10 à 15 %, of zelfs aanmerkelijk lager naarmate de wortelprojectie groter is dan de kroonprojectie. In sommige berekeningen van vochtbalansen wordt gesteld dat de verdamping van aanhangend water vanaf de bladoppervlakte één op één in vermindering kan worden gebracht op de totale verdamping (evapotranspiratie) van de boom tot aan het moment dat het aanhangend water geheel is verdampt.

In de hierna uitgevoerde voorbeeldberekeningen is de invloed van de interceptie op 0 gesteld.

Ad. 2. Bij straatbomen in tegel- of klinkerverhardingen zal niet alle neerslag die op de bodem valt in de grond dringen. Bij zware regenval zal een gedeelte via het wegdrainagesysteem ("molgoten" en kolken) worden afgevoerd en bij lichte regenval zal een gedeelte vanaf de verharding weer verdampen voordat het in de grond kan dringen. Één en ander is afhankelijk van de gemiddelde infiltratiesnelheid van het verhardingstype. Daarbij is de infiltratie gedurende het groeiseizoen gemiddeld iets lager dan gedurende de wintermaanden. Dit is geïllustreerd in onderstaande grafiek (Bebelaar & Bakker, 1981)⁴.

³ Bronswijk, J.B.B. & J.J. Evers-Vermeer. 1987. *Krimpkaracteristieken van kleigronden in Nederland. Rapport nr. 22 (nieuwe serie) ICW, Wageningen.* 54 pp.

⁴ Bebelaar, J.P. & J.W. Bakker. 1981. *Infiltratie van regenwater door verschillende wegdekken i.v.m. de watervoorziening van straatbomen.. Nota 1247. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.* 39p.



Figuur 6.1 Relatie tussen effectieve neerslag en infiltratiesnelheid

Voor een verharding met trottoirtegels is de infiltratiesnelheid ca 15 mm/uur wat neerkomt op een effectieve neerslag van ca 80% van de totale neerslag gedurende het groeiseizoen. Voor straatklinkers ligt de infiltratiesnelheid tussen ca 20 en 35 mm/uur, wat neerkomt op een effectieve neerslag van ca 95% van de totale neerslag.

Om de effectieve neerslag enigszins nauwkeurig te kunnen inschatten zal het groeiplaatsprofiel waarin de bomen staan nader moeten worden gekarteerd.

6.4 Voorbeeldberekening Julianalaan

De zomereiken langs de laan hebben een stamdiameter van 40 à 50 cm. Om met dit gegeven de verdamping te schatten wordt de LAI parameter gebruikt, te weten 'Leaf Area Index', welke dimensieloze grootte voor een boom de verhouding aangeeft tussen het oppervlak van de bladmassa (in m²) en het oppervlak van de wortelprojectie (in m²). De LAI komt daarmee op ca 4 (zie Bijlage C, sub 1). De Verdamping is dan 4*0,25*E-ref, oftewel gelijk aan de E-ref.

De afbeelding van de verdampingsoverschotten in bijlage C-3 kunnen daarmee zonder correctie worden toegepast.

In de Julianalaan is het waterleverend vermogen van de toplaag gemiddeld ongeveer 200 mm. Dit wordt ieder winterseizoen weer aangevuld tot maximale capaciteit. Dit zal zowel door de neerslag zijn (hier niet in de grafieken weergegeven) als vanuit het grondwater waar dat gedurende de winter contact maakt met de onderzijde van de kleilaag. Zoals eerder is gesteld mag worden verwacht dat serieuze vochtonttrekking uit de kleilaag zal plaatsvinden wanneer de toplaag is uitgedroogd. Dit betekent dat hieraan ca. 200 mm vocht moet zijn onttrokken. Dit treedt slechts in een beperkt aantal jaren op, zoals in 2003 en in 2006. In de overige jaren is de aanvulling met vocht gedurende het groeiseizoen ruim toereikend om de grond niet te laten uitdrogen.

2008 was in dit opzicht een gemiddeld jaar met een maximum verdampingsoverschot tot aan 150 mm. Hier zou in principe enige uitdroging van de kleipakketten hebben kunnen optreden wanneer de effectieve neerslag minder is geweest dan ca 75% van de globale neerslag gedurende het groeiseizoen of wanneer de verdamping van de boom een vierde meer zou zijn geweest dan nu het geval was. Dit zou theoretisch in de toekomst het geval kunnen zijn wanneer de bomen zich verder ontwikkelen bij een gelijkblijvend doorworteld bodemvolume.

6.5 Discussie

De resultaten van de metingen van de vochtsensoren op de proeflocaties geven alle slechts geringe fluctuaties over het groeiseizoen. Dit wijst er op dat “kritieke” situaties t.a.v. het uitdrogen van het kleipakket in 2008 onder de gegeven (meteorologische) omstandigheden nog niet zijn bereikt. Alleen in raai 2 (Julianalaan 28) geeft een in de bovengrond geplaatste vochtsensor een lichte daling gedurende het groeiseizoen die zou kunnen worden toegeschreven aan vochtonttrekking door vegetatie. Dit beperkt zich echter tot de bovengrond; in de dieper gelegen zone is geen verandering in de vochtsituatie die aan vochtonttrekking door vegetatie kan worden toegeschreven.

Opvallend is dat bij vochtmetingen in de raaien 1 en 3 er ook in de bovengrond geen duidelijk invloed van de beplanting naar voren komt op plaatsen waarvan aanwezigheid van wortels van een boom en struikvegetatie, in de directe nabijheid van de sensoren, mag worden verondersteld.

Dat de dieper gelegen zones in de kleilaag slechts weinig fluctuaties in het vochtgehalte te zien geven kan het beste worden verklaard uit de opbouw c.q. structuur van de kleilaag (macroporositeit) die een aanzienlijk grotere capillaire opstijging van water vanuit het grondwater toelaat dan op basis van laboratoriumonderzoek naar de waterdoorlatendheid van de klei kon worden berekend.

Mocht dit het geval zijn, dan is dat op zich een gunstige situatie die echter sterk wordt bepaald door de hoogte van de grondwaterspiegel. Wanneer deze namelijk te diep in het zandpakket onder de kleilaag komt te liggen (en dat hoeft een kwestie van slechts enige centimeters te zijn) kan het contact met de kleilaag worden verbroken waardoor de nalevering van vocht sterk vermindert of zelfs geheel stopt.

Belangrijk is in dit opzicht dan ook een goede beheersing van het grondwaterpeil.

Dit is ook van belang met het oog op progressieve uitdroging van de kleilaag door bomen. Uit de metingen mag worden afgeleid dat dit tot dusver nog geen rol van betekenis heeft gespeeld.

Zowel voor de gewasverdamping als de hoeveelheid neerslag blijkt 2008 een “gemiddeld” jaar te zijn geweest waarin een boomvegetatie kennelijk niet in staat is om een kleilaag over grotere diepte uit te drogen en waarbij de vochtlevering vanuit het grondwater voldoende blijkt te zijn om het water dat door de boom aan de bodem wordt onttrokken snel genoeg aan te vullen. Wat dat betreft lijkt er op deze locaties geen dwingende noodzaak tot het op korte termijn treffen van maatregelen.

Desalniettemin moet er rekening mee worden gehouden dat in droge jaren de situatie minder gunstig kan zijn omdat bomen in droge jaren als regel meer water verdampen. Ook zal de omvang van de boomkronen –en dus ook de grootte van het verdampend oppervlak– toenemen naarmate de bomen nog groter worden. Het is dus niet uitgesloten dat in de toekomst alsnog kritieke situaties ontstaan met op stevig gefundeerde gebouwen wanneer in de nabijheid bomen zijn gegroeid.

Een belangrijk aspect hierbij is de vraag in hoeverre de onderkant van de kleilaag gevaar loopt om het contact met het grondwater te verliezen. Het verdient aanbeveling om deze locaties nader in kaart te brengen zodat de “zwakste”locaties (ook in bouwkundig opzicht) het eerste kunnen worden aangepakt.

Los daarvan kunnen maatregelen worden getroffen die erop zijn gericht om het indringen van regenwater in de bodem te vergemakkelijken en de vochtonttrekking aan de bodem door bomen te verminderen. Zo zal door het toepassen van een open verharding onder de boom

de infiltratie van regenwater worden bevorderd. Bij aanhoudende droogte heeft dit echter geen effect.

Ook kan bij het vervangen van een boombeplanting worden gekozen voor soorten die minder verdampen bij een vergelijkbaar kroonvolume.

In de literatuur wordt wel eens gewezen op de mogelijkheid om de bladmassa van de bomen terug te brengen door snoei. Dit is inderdaad effectief, maar de snoei moet dan behoorlijk fors zijn om enig effect te sorteren. Afgezien van het esthetische aspect kleven er diverse nadelen aan deze benadering.

Vrijwel iedere boom zal op forse wijze reageren door een snel herstel van de bladmassa. Het effect van de snoei beslaat daarmee een periode van slechts enkele jaren. Voor een blijvend effect zal men dus met regelmaat wederom moeten snoeien. Vooral bij wat grotere bomen brengt dit aanzienlijke extra onderhoudskosten met zich mee.

Sommige boomsoorten (o.a. eik) reageren op forse snoei door uitbundige vorming van zgn. waterlot op de stam. Het regelmatig verwijderen daarvan geeft extra onderhoudskosten.

Niet alle boomsoorten verdragen forse snoei. Sommige soorten (o.a. beuk) kunnen er slecht tegen en kunnen er zelfs door afsterven.

Indien door het snoeien van een boom de in de buurt staande (onder)beplanting meer licht krijgt zal deze ook meer gaan verdampen. Overigens geldt in dit opzicht als regel dat boomgerichte maatregelen eigenlijk pas optimaal aan het doel beantwoorden wanneer tevens wordt afgezien van het beplanten van de voortuinen van de woningen met diepwortelende beplanting.

Bovenstaande maatregelen garanderen echter geen preventie van krimp. In hoofdstuk 7 wordt aangetoond dat de aanzet van verdroging hierdoor slechts zal worden teruggedrongen. Zelfs zonder bomen kan de verdroging bij aanhoudende droogte tot onder de krimp grens zakken. Cruciaal is het vochtig kunnen houden van de grond onder de funderingen. In de literatuur wordt gewezen op de mogelijkheid om de grond nabij de fundamente van een gebouw permanent vochtig te houden door irrigatie, bijvoorbeeld via een buizenstelsel. Los van de civieltechnische haalbaarheid en de kosten om het aan te leggen en operationeel te houden is het belangrijkste bezwaar dat de beworteling van bomen hierdoor extra wordt gestimuleerd om zich in de richting van de woningen te ontwikkelen. In dat geval zal tevens moeten worden bekeken of en hoe dat kan worden tegengegaan (o.a. door het plaatsen van fysische barrières zoals zgn. wortelschermen). Op veel locaties zal dit tevens worden bepaald c.q. beperkt door de aard en aanwezigheid van de ondergrondse infrastructuur.

6.6 Conclusies

Het blijkt voornamelijk niet dat boombeplantingen langs straten in staat zijn om in een meteorologisch "gemiddeld" jaar het kleipakket in de nabijheid van de fundering van de woningen langs de straat substantieel uit te drogen en te doen krimpen. Desalniettemin mag niet worden uitgesloten dat dit in droge jaren wél zou kunnen optreden.

Sterk bepalend hiervoor lijkt de mate waarin (her)bevochtiging van het kleipakket kan plaatsvinden vanuit het grondwater. Vooral locaties waar gedurende een droge zomer het grondwater het contact met het kleipakket verliest zijn in dit opzicht kwetsbaar.

Maatregelen die erop zijn gericht om de infiltratie van neerlag in de bodem te bevorderen blijven zinvol, mits infiltratie gebeurt op plaatsen waar wortelontwikkeling geen probleem is.

Boomgerichte maatregelen (o.a. snoei) zijn niet bij alle boomsoorten even goed toepasbaar en geven een aanzienlijke verhoging van de jaarlijkse beheerkosten. Overigens zijn de

boomgerichte maatregelen pas zinvol op plaatsen waar geen diepwortelende beplanting in de voortuinen van de woningen aanwezig is.

Bij het vervangen van bomen in reeds bestaande situaties (aanwezigheid van op staal gebouwde woningen) kan worden overwogen om boomsoorten te planten die bij een vergelijkbaar kroonvolume minder verdampen.

7 Grondwateraspecten

Jelle Buma en Neeltje Goorden, Deltares

7.1 Overzicht

Dit hoofdstuk begint met een analyse van de grondwatersituatie op de onderzoekslocaties Julianalaan en Zonegge. De analyse bestaat uit een nadere beschouwing van de beschikbare meetgegevens (paragraaf 7.2), en berekeningen met een zgn. straatmodel, waarmee het vochtgehalte in de wortelzone is berekend in verschillende maatgevende situaties (paragraaf 7.3). Uit de analyse komt naar voren dat capillaire nalevering vanuit het grondwater / de stijghoogte niet verwaarloosbaar mag worden. Dit betekent dat ook externe, bovenlokale invloeden op de stijghoogte indirect van belang kunnen zijn voor de verzakkingsproblematiek. Om inzicht te krijgen in de mate waarin deze invloeden relevant zijn, is vervolgens een (grond)watersysteemanalyse op bovenlokaal en regionaal niveau uitgevoerd (paragraaf 7.4), en zijn aanvullend berekeningen met een regionaal grondwatermodel uitgevoerd (paragraaf 7.5).

7.2 Hydrologische systeemanalyse (Julianalaan en Zonegge)

7.2.1 Bodemopbouw

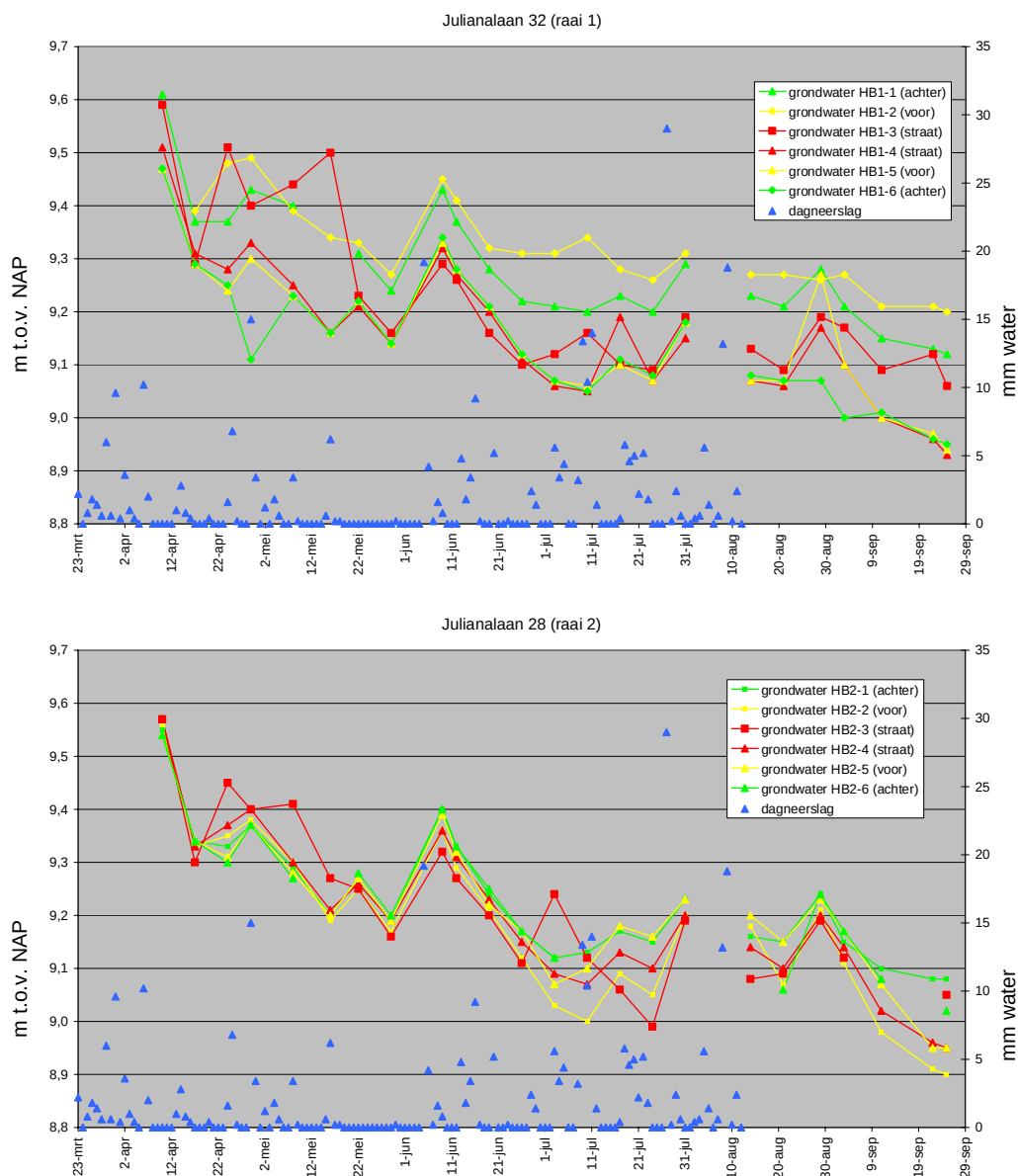
Uit de boorprofielen van de onderzoekslocaties Julianalaan 28, 32 en Zonegge 19, zoals besproken in hoofdstuk 4, is af te leiden dat de kleiige deklaag 1 tot anderhalve meter dik is. Boven op deze kleilaag is een zandige toplaag aanwezig die in de Julianalaan 1 tot anderhalve meter dik is en aan de Zonegge ca. 50 cm. Verder zijn in de boorstaten de kleur van het sediment en de aanwezigheid van roestkenmerken (zgn. hydromorfe kenmerken) aangegeven. Op basis daarvan is de historisch laagste grondwaterstand meestal indicatief aan te geven; dit is het niveau van de bovenkant van de permanent gereduceerde zone, die doorgaans gekenmerkt wordt door een grijze kleur. Dit niveau is vergeleken met de onderkant van de kleilaag in de boorstaten. In de Julianalaan ligt dit niveau steeds onder in de kleilaag (in één boring valt het samen met de basis van de kleilaag), maar aan de Zonegge ligt dit niveau, voor zover het kon worden afgeleid, enkele decimeters onder de basis van de klei. Hieruit kunnen twee conclusies worden getrokken:

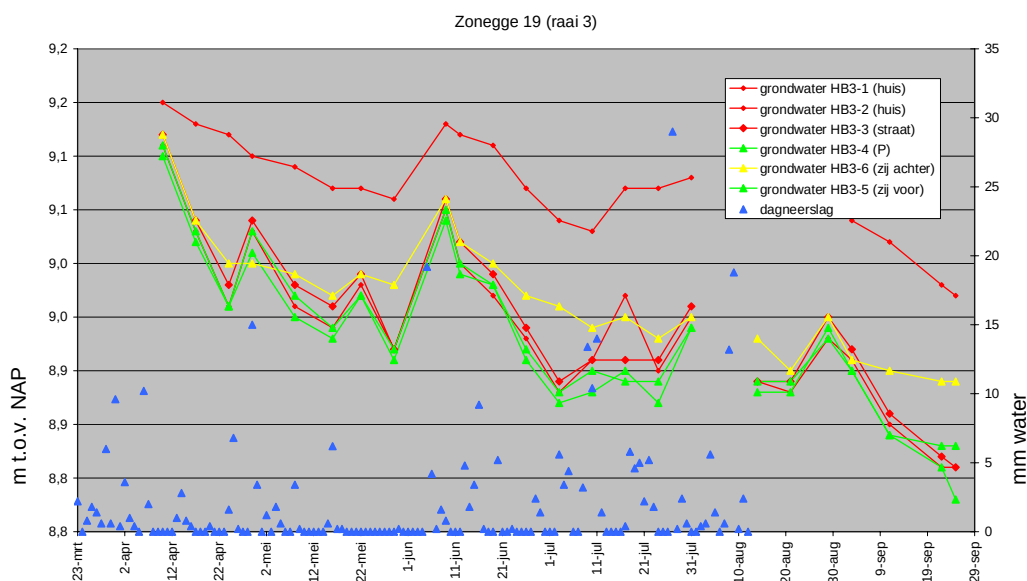
- Op de locaties aan de Julianalaan is de grondwaterstand waarschijnlijk zelden of nooit onder de basis van de klei gezakt; aan de Zonegge is dit wel het geval geweest.
- Op basis van het feit dat de potentiële diepte van de wortels reikt tot de gereduceerde zone (zie hoofdstuk 6), kan de kleilaag op de Julianalaan-locaties voor 60-100% doorworteld zijn en aan de Zonegge voor 100%.

Regelmatig worden resten van hout vermeld in de boorstaten. Met één uitzondering zijn deze aangetroffen in het gereduceerde (grijze) deel van de kleilaag of in het onderliggende watervoerende pakket. Dit lijkt in tegenspraak met het vorige punt, maar het betreft vermoedelijk fossiel hout, afkomstig van natuurlijke begroeiing uit de periode vóór bedijking en landbouwactiviteiten,

7.2.2 Grondwaterstanden

In figuur 7.1 is het tijdsverloop van de grondwaterstanden op de onderzoekslocaties weergegeven. In alle gevallen betreft het de freatische grondwaterstand (de stijghoogten worden in de volgende sectie besproken). Deze grondwaterstand beweegt zich in alle gevallen in de kleilaag gedurende de hele meetperiode. Er is geen duidelijk verschil tussen grondwaterstanden gemeten aan de straatzijde, aan de voor- en achterzijde van de bebouwing. Dit is een aanwijzing dat er geen invloed is van lekkende gemeentelijke rioleringen op de grondwaterstand. Bij dergelijke lekkages wordt de grondwaterstand als regel lager dicht bij de straat.

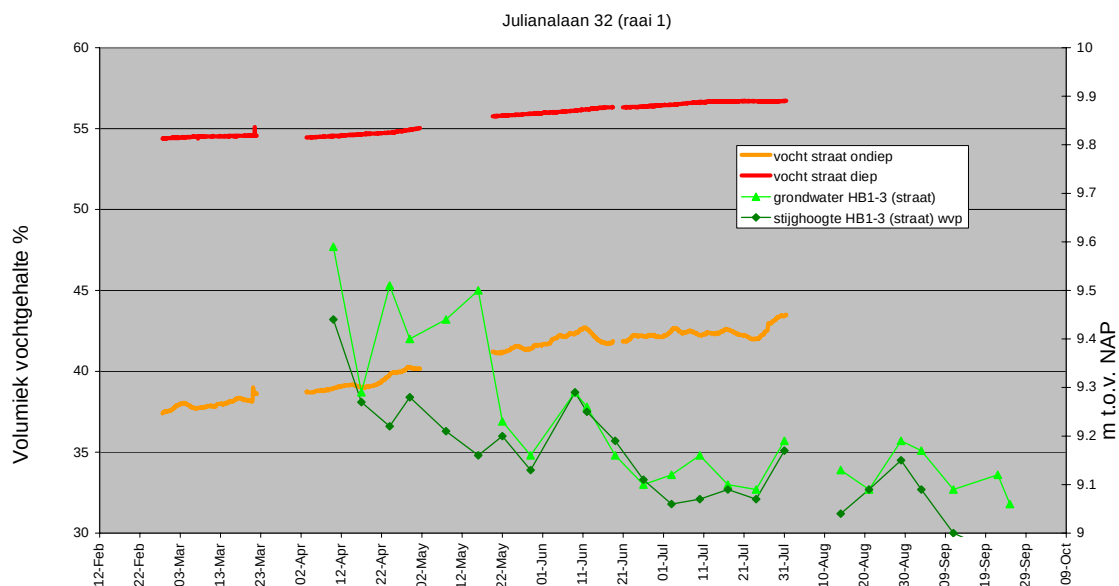


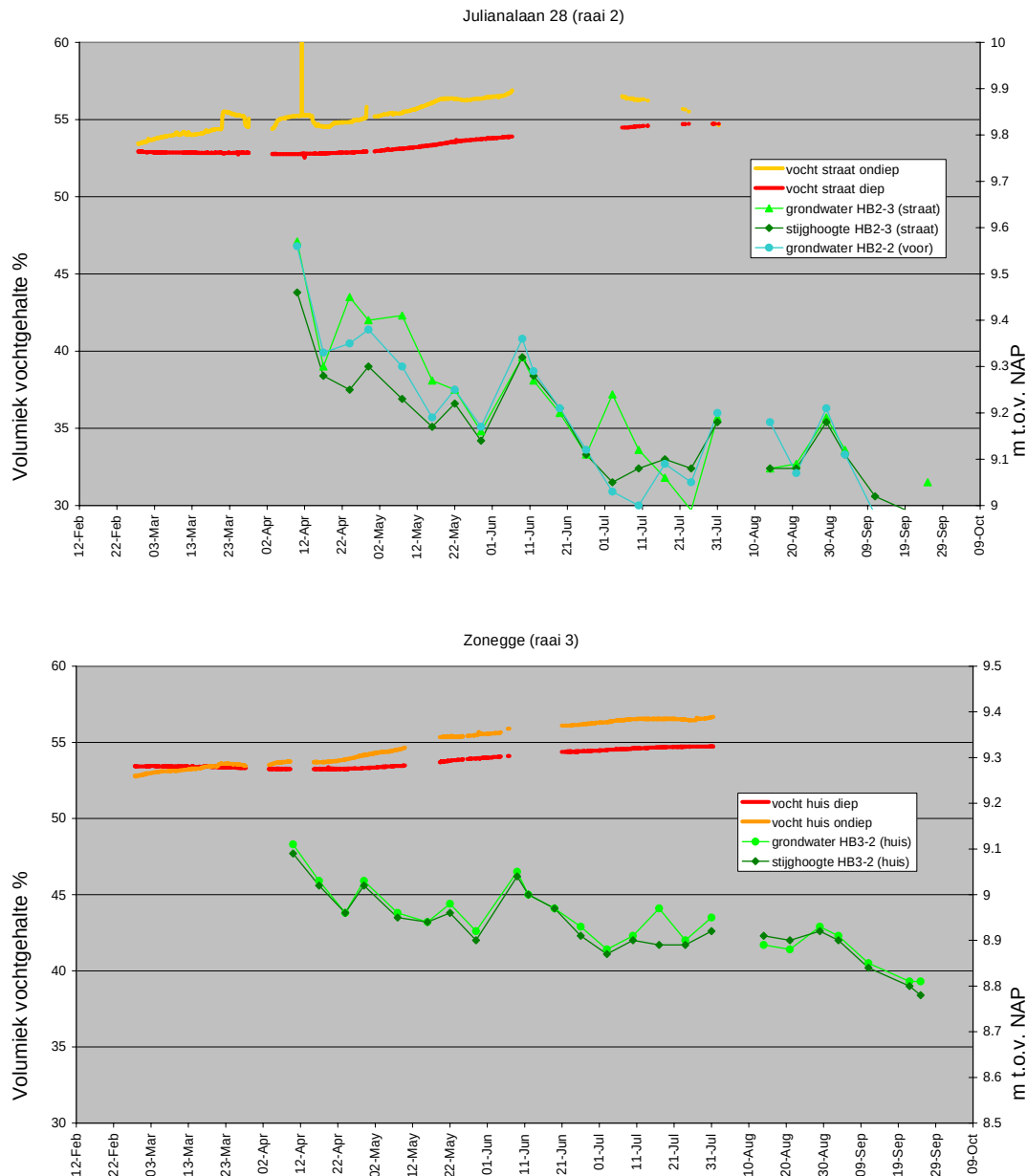


Figuur 7.1 Grondwaterstanden in kleilaag, Julianalaan 28, 32 en Zonegge 19.

7.2.3 Vochtmetingen

Van maart t/m juli 2008 zijn op de 3 onderzoekslocaties (Julianalaan 28, Julianalaan 32 en Zonegge 19) metingen uitgevoerd aan het vochtgehalte van de klei (zie hoofdstuk 4). De resultaten zijn in figuur 7.2 weergegeven, samen met de grondwaterstanden en stijghoogten in de dichtstbijzijnde peilbuizen.





Figuur 7.2 Vochtgehalten, grondwaterstanden (klei = hoog) en stijghoogten (zand = laag), Julianalaan 28, 32 en Zonégge 19.

Opmerkelijk is dat zowel de grondwaterstanden als de stijghoogten een neerwaartse trend vertonen gedurende het groeiseizoen, terwijl de vochtgehalten een licht stijgende trend vertonen. Met andere woorden: de grondwaterstand in de klei lijkt veel meer op de stijghoogte in het 1^e watervoerend pakket dan op de vochtmeting in de klei.

Deze resultaten wijzen op een zgn. dual systeem in de kleilaag: (1) een relatief goed doorlatend systeem van macroporiën, zoals wortel- en graafgangen, opgevulde krimp-scheuren, hydraulisch in verbinding staande met het 1^e watervoerend pakket; en (2) een slecht doorlatende, massieve kleimatrix. Poriën groter dan ca. 0.1 mm kunnen onder 'macro'poriën worden verstaan⁵. Wanneer aangenomen wordt dat de filters van de

⁵ Zie bv. Kroes, J.G. en J.C. van Dam (2003) SWAP version 3.0.3 Reference manual; Report 773,

peilbuizen het macroporiënsysteem aansnijden, terwijl de sensoren uitsluitend in de matrix staan, kan dit de metingen verklaren. Dat de kleimatrix zeer slecht doorlatend is, blijkt uit de laboratoriumproeven, waar k-waarden van minder dan 0.01 mm/d zijn gemeten.

Er is wel enig verschil te zien tussen de grondwaterstanden enerzijds en de stijghoogten anderzijds. De hydraulische verbinding is dus niet zo direct dat beide exact gelijk zijn; er is sprake van een zekere, zij het beperkte hydraulische weerstand. Dit wijst op een zekere mate van opvulling van de macroporiën.

De tijdelijke ontgraving t.b.v. archeologisch onderzoek in de bouwput aan het Masiusplein (ca. 500 m van de Julianalaan) bood de gelegenheid om vast te stellen of het macroporiënsysteem met onafhankelijke waarnemingen kon worden aangetoond (foto's figuur 7.3). De kleilaag vertoonde geen grootschalige aanwezigheid van zichtbare scheuren of spleten. Wel was een patroon van kleine scheurtjes en gangetjes zichtbaar, evenals patronen van roestvlekken en andere kleurverschillen die duiden op macroporiën. Verder is op basis van de boorprofielen in paragraaf 7.2.1. afgeleid dat de kleilaag geheel doorworteld kan zijn met actieve danwel fossiele wortels.



Figuur 7.3 Foto's kleilaag, ontgraving bouwplaats Masiusplein, Zevenaar.

De uit de gegevens afgeleide hydraulische verbinding tussen macroporiën in de kleilaag en watervoerend pakket betekent dat capillaire nalevering vanuit de stijghoogte niet verwaarloosd kan worden. De capillaire opstijging is afhankelijk van de stijghoogte en de

doorlatendheid van het materiaal waarmee deze macroporiën (deels) zijn opgevuld. Het vochtgehalte in de krimpgevoelige kleiige matrix is op zijn beurt weer afhankelijk van het vochtgehalte (en dus de capillaire situatie) in het opvulmateriaal in de macroporiën. Naarmate de stijghoogte daalt, neemt de capillaire werking af, uiteindelijk tot kritische waarden.

Uiteraard wordt de capillaire opstijging sterk negatief beïnvloed als de stijghoogte daalt tot in het (soms zeer grove) zand van het watervoerend pakket. Er is echter geen aanwijzing dat dit per se nodig is om een voor krimp kritische vochttoestand te bereiken. Dit wordt bevestigd door de hydromorfe kenmerken uit de boorstaten van de Julianalaan paragraaf 7.2.1: de permanent gereduceerde zone ligt deels nog in de klei.

7.3 Berekeningen met straatmodel

7.3.1 Algemeen

Het straatmodel is een combinatie van Modflow⁶ en Metaswap⁷. Metaswap is afgeleid van de onverzadigde zone modellen SWAP⁸ en haar voorganger SWAT(RE)⁹. SWAP is een wereldwijd veel gebruikt model voor verzadigde en onverzadigde bodem- en grondwaterstroming. Metaswap is eenvoudiger van opzet dan SWAP, en is daardoor efficiënter qua gebruik en rekentijd. Daar staat tegenover dat Metaswap sommige processen minder nauwkeurig beschrijft. Bij droge bodems in homogene, lichte kleigrond wordt het vochtgehalte in de wortelzone overschat ten opzichte van SWAP, en onderschat in de ondergrond (de bodemzone onder de wortelzone). Verder is SWAP in staat stroming in macroporiën te simuleren. Hiervoor is echter veel meer informatie nodig dan in dit onderzoek verzameld kon worden (geometrie, continuïteit en dynamisch gedrag van de macroporiën). Bovendien wordt uitgegaan van stroming door holle macroporiën, terwijl deze in Zevenaar vermoedelijk (deels) opgevuld zijn. Het gebruik van SWAP zou dan ook slechts een schijnnaauwkeurigheid leveren ten opzichte van eenvoudigere modellen zoals MetaSwap.

Het modelconcept zoals toegepast in Zevenaar is weergegeven in figuur 7.4. De opgevulde macroporiën zijn afhankelijk van capillaire levering vanuit het grondwater. De kleimatrix is omgeven door deze opgevulde macroporiën en is daarmee indirect ook afhankelijk van deze capillaire levering. De weergegeven modelresultaten hebben betrekking op het vochtgehalte in de klei. De aanname in het model is dat dit direct mee reageert met het vochtgehalte in de opgevulde macroporiën, welke een doorlatendheid hebben van 1.2 cm/dag. Door de lage doorlatendheid van de klei zal er in werkelijkheid sprake zijn van een vertraging in de reactie van het vochtgehalte in de klei op dat in de opgevulde macroporiën. De resultaten zijn dus wat dat betreft een ongunstige schatting van het vochtgehalte, hetgeen wordt versterkt door

⁶ McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988) (PDF). [A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model](http://pubs.usgs.gov/twri/twri6a1/). Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6. U.S. Geological Survey.

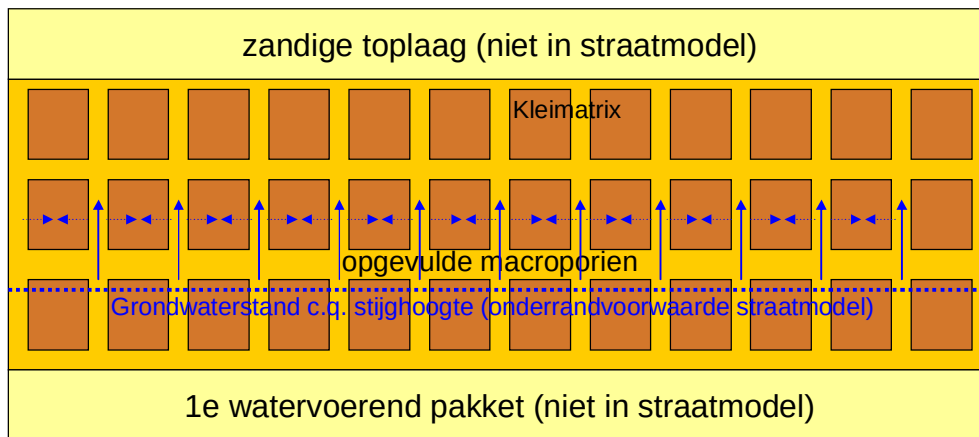
⁷ Kroes, J.G. en J.C. van Dam (2003) SWAP version 3.0.3 Reference manual: Report 773. Alterra, Wageningen.

⁸ Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks and J.G. Kroes, 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. Vadose Zone J., Vol.7, No.2, May 2008.

⁴ Feddes, R.A., Kowalik P.J. & Zaradny H. (1978) Simulation of field water use and crop yield. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen, 189 pp.

⁹ Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks and J.G. Kroes, 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. Vadose Zone J., Vol.7, No.2, May 2008.

het feit dat in kleigronden het vochtgehalte in de wortelzone mogelijk wordt onderschat (zie eerder).



Figuur 7.4 Modelconcept Metaswap zoals toegepast in Zevenaar.

Voor de gehele wortelzone wordt één gemiddeld vochtgehalte berekend per tijdstap. De tijdstap is één dag.

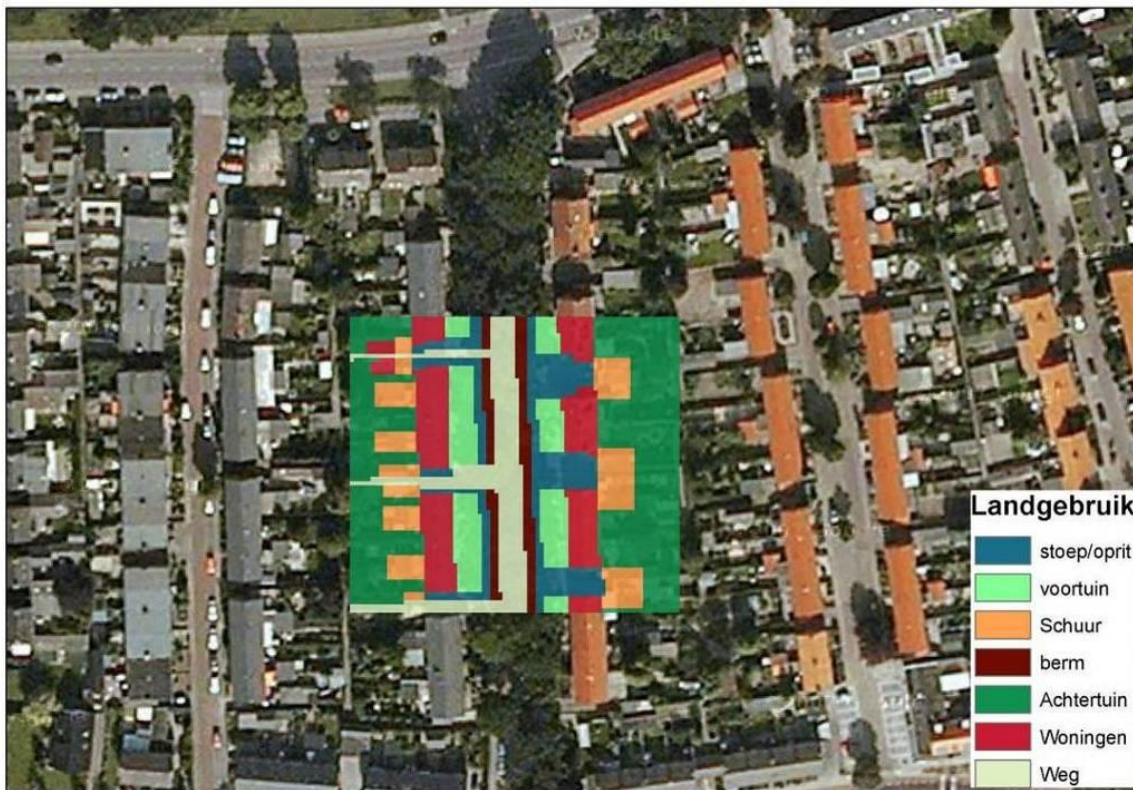
Het bovenstaande is zeer belangrijk bij het interpreteren van de modeluitkomsten. De resultaten dienen niet om nauwkeurig vochtgehalten te voorspellen of na te bootsen (en kunnen dat ook niet), maar om gevoeligheden van het vochtgehalte voor de verschillende externe factoren na te gaan, en *kwalitatieve* antwoorden te geven op de volgende vragen:

- Is de veronderstelde krimp van de klei in principe mogelijk onder realistische condities?
- Wat is de relatieve invloed van de meteorologie, de begroeiing, de doorlatendheid van de bodem (lees: van de opvulling van de macroporiën), en de stijghoogte?

7.3.2 Parameterisatie

Het model meet 80 bij 72 m², en kent een hoge mate van ruimtelijk detail (celgrootte 1 x 1 m), zodat ruimtelijke verdelingen in grondgebruik en verdamping kunnen worden gesimuleerd op de gewenste schaal. Het gaat hier met name om de ruimtelijke configuratie van straatbomen, groenstroken, bewortelingspatronen, voortuinen en achtertuinen, versus verhard en bebouwd terrein.

De opzet is geweest om de nadruk te leggen op simulatie van het vochtgehalte in de klei in een droge periode zonder neerslag, met variërende randvoorwaarden. Daartoe zijn situaties met variërende grondwaterstanden, bodemtypen en begroeiing doorgerekend.



Figuur 7.5 Grondgebruik zoals ingevoerd in het straatmodel, op basis van Google Maps Julianalaan 28-32 en omgeving.

De onderzoekslocatie Julianalaan 28-32 en directe omgeving hebben model gestaan voor het straatmodel, zonder dat het overigens de bedoeling was om deze locatie in detail expliciet te modelleren (figuur 7.5).

Verdampingsgegevens voor de genoemde perioden zijn door Alterra opgesteld voor een aantal soorten begroeiing, en vervolgens door Deltares vertaald naar een geschikte invoerreeks voor het straatmodel. Hierbij is voor de straatbomen uitgegaan van zomereik, en voor de tuinbegroeiing van gras. Als basisbestand is de verdampingsreeks van vliegveld Twente gebruikt. Deze reeks is op enkele momenten aangepast, bijvoorbeeld op 8 en 9 juli 2006. Op deze dagen viel in Twente lokaal een onweersbui, terwijl Zevenaar droog bleef.

Voor de ondergrondschematisatie is gebruik gemaakt van het eveneens voor dit project vervaardigde GIS-bestand met de geometrie van de kleilaag, aangevuld met informatie van de gemeente Zevenaar over cunetten en drainage. Volgens opgave van de gemeente werden de wegen bij de aanleg van de wijk niet systematisch in cunetten gelegd, en was er hoogstens incidenteel sprake van het aanbrengen van buisdrainage. Er is in het model dan ook van uit gegaan dat de kleilaag, die 1.50 m dik is, ter plaatse van de weg niet is weggegraven of opgevuld met zand en dat er geen als onderbemaling fungerende drainage ligt.

Er is gerekend met één uitgangssituatie, waarop vervolgens voor elk scenario steeds één parameter is gevarieerd. Deze uitgangssituatie is samengevat in de onderstaande tabel.

Tabel 7.1. Uitgangssituatie straatmodel.

Deelaspect / Grootheid	Waarde
Bodemtype	Homogene lichte klei (k-waarde = 1.2 cm /d)
Meteorologie	Juni – augustus 2006 (geen neerslag), verdampingsreeks Twente, aangepast voor Zevenaarse situatie
Begroeiing	LAI 4 (representatief voor zomereik cf. hoofdstuk 6)
Grondwater / Stijghoogte	1.70 m beneden maaiveld (in de kleilaag)

Het model geeft niet het vochtgehalte als uitvoer, maar de verzadigingsgraad. Als op basis van het laboratoriumonderzoek (hoofdstuk 4) wordt uitgegaan van (1) een volumiek vochtgehalte bij verzadiging van 55%, en (2) een krimpgrens bij een volumiek vochtgehalte van 30 tot 40%, betekent dit dat een verzadigingsgraad van 55 - 70% de kritische grens vormt voor krimp van de klei.

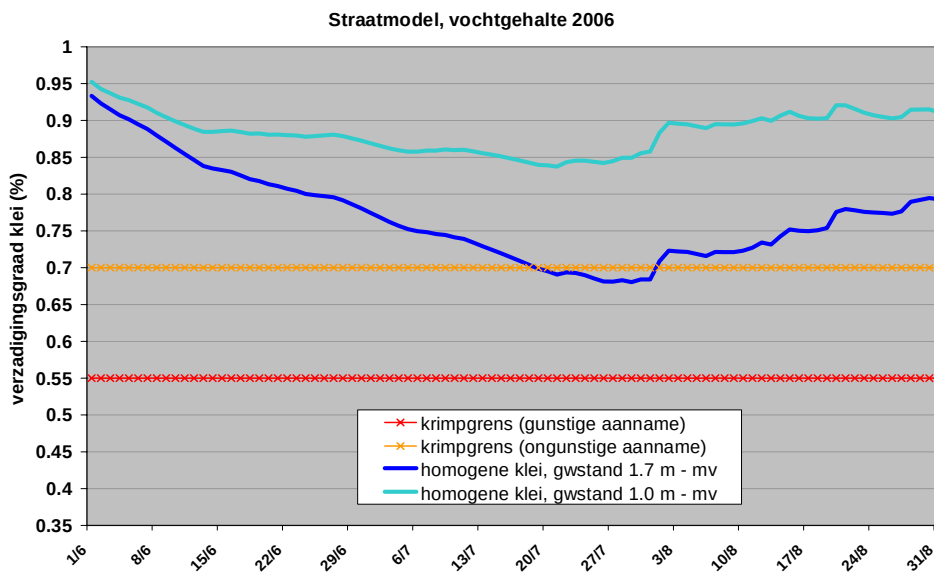
Verder is van belang dat de aanvangsverzadigingsgraad op 100% is gesteld. Deze is kunstmatig opgevoerd door voorafgaand aan de simulatieperiode het straatmodel 'in te slingeren' met enkele maanden overvloedige neerslag. Dit was nodig omdat METASWAP standaard rekent met een aanvangsverzadigingsgraad van 50%, hetgeen niet realistisch is in de Zevenaarse situatie. Een verzadigingsgraad van 100% is het tegendeel van 'worst case'. De invloed hiervan op de modelresultaten zal worden besproken.

De weergegeven resultaten hebben betrekking op een locatie aan de voorzijde van een woning, tenzij anders aangegeven.

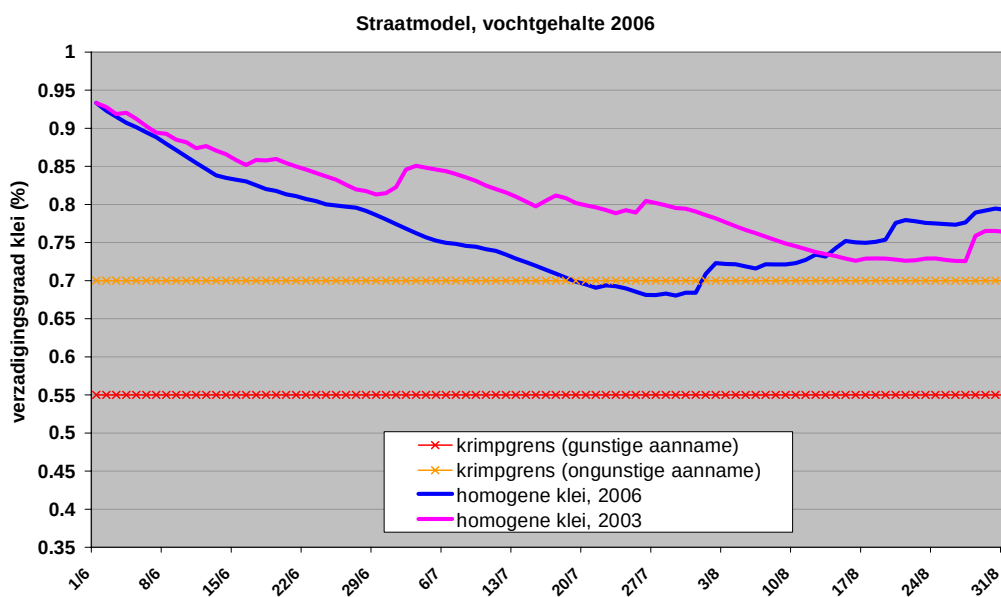
7.3.3 Resultaten

In figuur 7.6 is de berekende verzadigingsgraad in de wortelzone afgebeeld voor een locatie aan de voorzijde van een woning, voor de uitgangssituatie en een situatie met een 70 cm hogere grondwaterstand.

Uit de figuur blijkt dat de grondwaterstand aanzienlijk invloed heeft op de verzadigingsgraad. Capillaire levering speelt derhalve een niet te verwaarlozen rol. Verder is vermeldenswaard dat de grondwaterstand nog in de klei staat (met MetaSwap kan de uitzakking tot onder de klei niet worden gesimuleerd). Dit bevestigt de conclusie dat daling van de stijghoogte tot onder de klei niet alleen doorslaggevend hoeft te zijn voor het al of niet optreden van krimp. Ook wanneer de stijghoogte nog onderin in de klei reikt kan de verzadigingsgraad in het kritieke bereik komen.



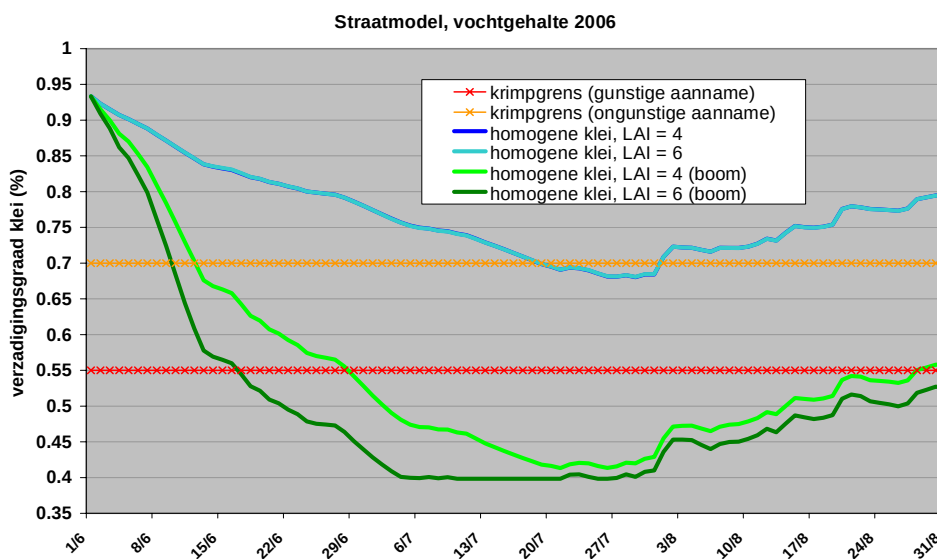
Figuur 7.6 Berekende verzadigingsgraad, uitgangssituatie en hogere grondwaterstand.



Figuur 7.7 Berekende verzadigingsgraad, 2003 versus 2006.

In figuur 7.7 is wederom het vochtgehalte in de uitgangssituatie weergegeven, maar nu vergeleken met dezelfde condities en de meteorologie van 2003. De resultaten bevestigen het beeld dat al uit de meteorologische analyse naar voren kwam: beide zomers waren droog, maar het zwaartepunt in 2003 lag later en de droogte was meer gespreid over het seizoen.

Tenslotte is in figuur 7.8 aangegeven wat de invloed is van de begroeiing op het vochtgehalte. Hiertoe is de Leaf Area Index (LAI) verhoogd van 4 naar 6.



Figuur 7.8 Berekende verzadigingsgraad, invloed begroeiing.

Ter hoogte van de woning wordt het vochtgehalte volgens het model nauwelijks beïnvloed door de LAI-waarde (blauwe curven, liggen op elkaar). Anders ligt het ter hoogte van de boom (groene curven). Dit ligt voor de hand aangezien de worteldichtheid direct bij de boom hoger zal zijn. Een lagere LAI heeft evenwel alleen uitstel van de uitdroging tot gevolg. Als de droogte aanhoudt wordt ongeveer dezelfde situatie bereikt. Uitstel van uitdroging betekent wel, dat de voor krimp kritische omstandigheden minder vaak zullen optreden. Immers, langdurige droogten komen minder vaak voor dan kortstondige droogten. In deze kortstondige droogten kan een lagere LAI het verschil maken tussen wel of geen krimp.

7.4 Conclusies t.a.v. de grondwatersituatie op de onderzoekslocaties

- De vocht- en grondwaterstandsmetingen wijzen op een niet te verwaarlozen invloed van capillaire nalevering via een systeem van (met relatief goed doorlatend materiaal opgevulde) macroporiën in de kleilaag. Op basis van alleen de laboratoriumproeven zou de conclusie anders zijn, namelijk dat de klei te ondoorlatend is om capillaire opstijging mogelijk te maken. De freatische grondwaterstand in de kleilaag is nagenoeg gelijk aan de stijghoogte in het watervoerend pakket eronder. Dit wijst op een hydraulische connectie tussen kleilaag en watervoerend pakket.
- Het is denkbaar dat ter plaatse en ten tijde van de schadevorming de stijghoogte tot onder de kleilaag is gedaald. Uit de analyse van de tijdreeksen van de gemeentelijke meetpunten 1,8,12,13 en 25 blijkt echter niet met overtuiging dat het dalen van de stijghoogte onder de kleilaag doorslaggevend is geweest voor het juist in 2006 optreden van verzakkingen. De berekeningen met het straatmodel suggereren dat het uitzakken van de grondwaterstand tot onderin de kleilaag op zichzelf al kan leiden tot een zodanige afname van de capillaire nalevering, dat vochttekorten in de wortelzone ontstaan in een droge periode.
- De berekeningen met het straatmodel leiden tot de conclusie dat de veronderstelde krimp van de klei in principe mogelijk is onder realistische condities. Zowel meteorologische omstandigheden als capillaire levering vanuit het grondwater zijn hierbij invloedrijke factoren.

- Dit betekent dat de rol van de stijghoogte in de verzakkingsproblematiek niet verwaarloosd mag worden, en rechtvaardigt een nadere beschouwing van deze stijghoogte en haar invloedsfactoren (zie volgende paragraaf).
- Een aanpassing in begroeiing ter reductie van verdamping biedt volgens de berekeningen soelaas bij kortdurende droogten, maar niet bij langdurige droge perioden.

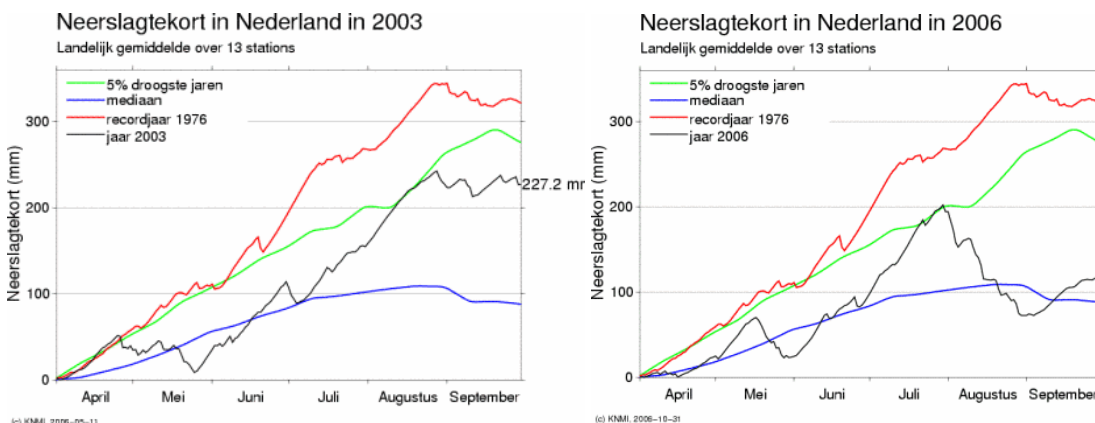
7.5 Bovenlokale / regionale watersysteemanalyse

7.5.1 Meteorologie

De vraag dringt zich op waarom juist in 2006 de verzakkingsproblemen optraden, en niet bijvoorbeeld in 2003, die toch ook te boek staat als een warme, droge zomer (o.a. problematiek rond inlaat zout water in West-Nederland in de landelijke pers).

Daartoe is ten eerste gekeken hoe de verdamping in juli 2006 zich verhield tot andere jaren. Als informatiebron is de Makkink-referentie verdampingsreeks van KNMI-hoofdstation Twente nader bekeken. Voor de maanden april t/m september in de jaren 1976, 1983 en 1995-2007 zijn de maandsommen van de verdamping berekend. Hieruit blijkt dat de verdamping in juli 2006 veruit het hoogste was, namelijk 127 mm, ruim 10% hoger dan de één na hoogste waarde (114 mm in juli 1995). Ook voor wat betreft de gesommeerde verdamping van juli plus de voorafgaande maanden april, mei en juni, blijft 2006 koploper, nog vóór het recordjaar 1976. Uiteraard is de analyse niet helemaal zuiver omdat eigenlijk naar het verdampingsoverschot (= verschil tussen verdamping en neerslag) gekeken moet worden in plaats van de verdamping. Maar het KNMI meldt dat juni 2006 in het oosten van Nederland uitzonderlijk droog was. En aangezien ook in de maand juli 2006 nauwelijks neerslag viel, kan gesteld worden dat juni-juli 2006 qua verdampingsoverschot een uitzonderlijke periode was.

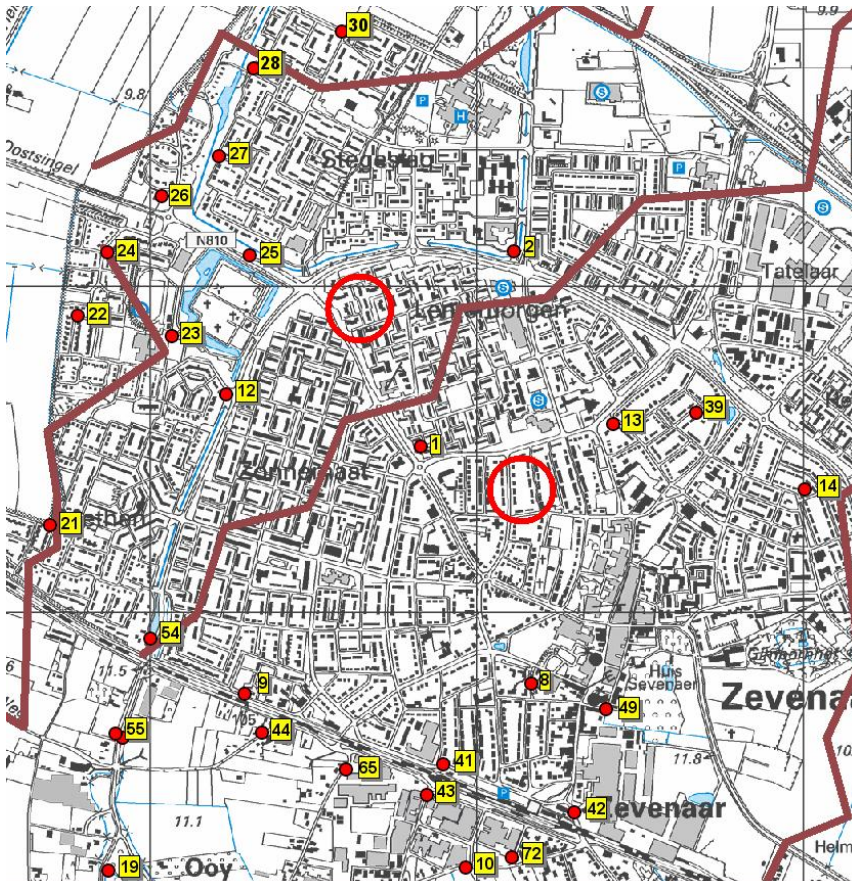
Alleen voor wat betreft de totale verdamping april – september scoort 2003 hoger, namelijk 508 mm tegen 487 mm in 2006. Het grote verschil zit in de timing en de verdeling over het groeiseizoen: in 2003 gelijkmatiger met het zwaartepunt later in het seizoen. Dit wordt geïllustreerd door figuur 7.9. Op 1 juli zijn de doorlopend potentiële neerslagtekorten in 2003 en 2006 ongeveer gelijk (rond 100 mm), terwijl op 1 augustus het tekort in 2006 aanmerkelijk hoger is (200 mm tegen ca. 150 mm in 2003).



Figuur 7.9 Doorlopend potentieel neerslagtekort 2003 en 2006, landelijk gemiddelde over 13 stations (bron: KNMI, www.knmi.nl/klimatologie).

7.5.2 Stijghoogten (algemeen)

Zevenaar beschikt over een grondwatermeetnet waarvan sinds 1996 de gegevens digitaal beschikbaar zijn. In figuur 7.10 zijn de peilbuizen in de buurt van het gebied met verzakkingen weergegeven. In de Julianalaan en Zonegge zijn geen peilbuizen van het meetnet aanwezig.

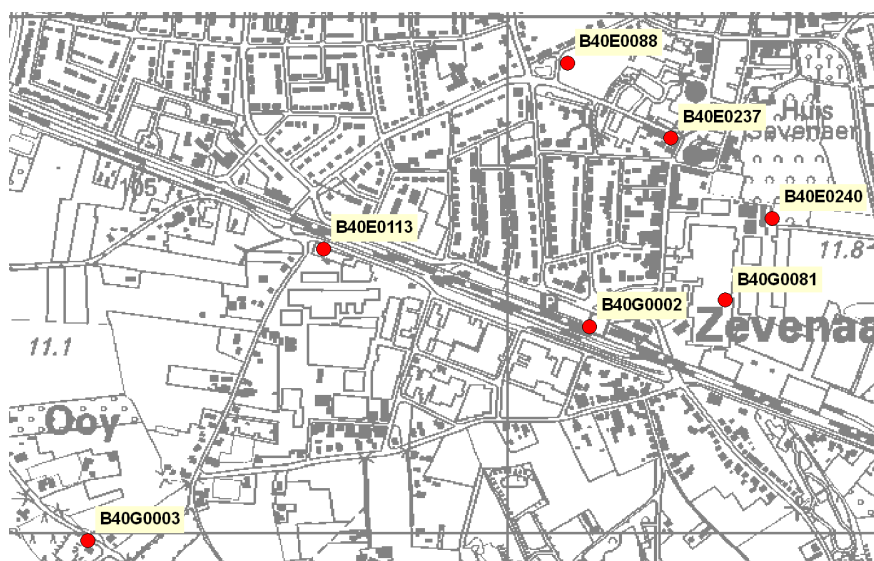


Figuur 7.10 Peilbuizen gemeentelijk grondwatermeetnet in aandachtsgebied. De onderzoekslocaties Julianalaan en Zonegge zijn omcirkeld in rood.

Alle meetpunten staan met hun filters in het watervoerend pakket onder de kleilaag. Dit watervoerend pakket bestaat uit zanden van de Formatie van Kreftenheye, met ingeschakelde leem- of kleilagen. In tabel 7.1 zijn aan de hand van enkele boringen uit DINOLoket de kenmerken van dit watervoerend pakket weergegeven. Hieruit blijkt dat het watervoerend pakket in Zevenaar minimaal enkele tientallen meters dik is. Het zand varieert van fijn tot zeer grof, soms grindig. Al met al betekent dit een groot doorlaatvermogen voor grondwaterstroming (kD-waarde).

Tabel 7.2. Selectie boringen Zevenaar met eigenschappen watervoerend pakket. Locaties zijn weergegeven in figuur 7.11.

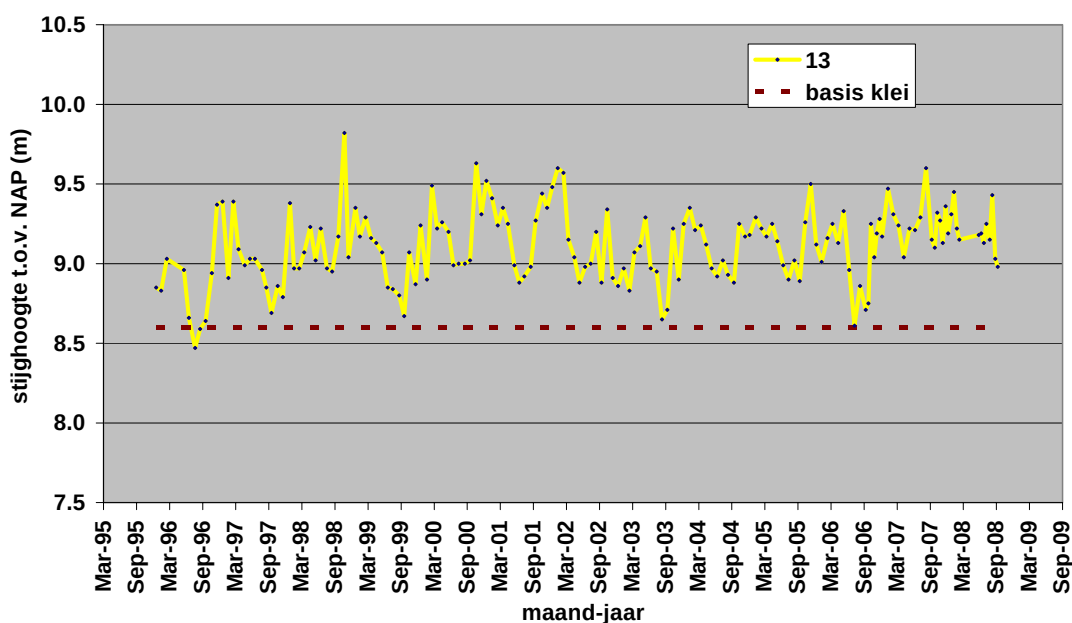
Boring no.	Top zand (t.o.v NAP)	Basis zand (t.o.v NAP)	Opmerkingen
B40E0113	+7.3	-33.2 of dieper	einde boring in zand
B40G0081	+7.7	-31.9	ca. 3 m sterk zandige klei rond NAP -8 m
B40G0003	+7.05	-74.7 of dieper	Einde boring in zand; vanaf -49 m leem- en kleilagen 1 à 2 m dik
B40G0002	+7.95	-18.55 of dieper	Einde boring in zand; 2.8 m leem rond NAP -8 m
B40E0240	+7.80	-35.4 of dieper	Einde boring in zand
B40E0237	+11.3	-23.0 of dieper	Einde boring in zand
B40E0088	+6.3	-12.0 of dieper	Einde boring in zand



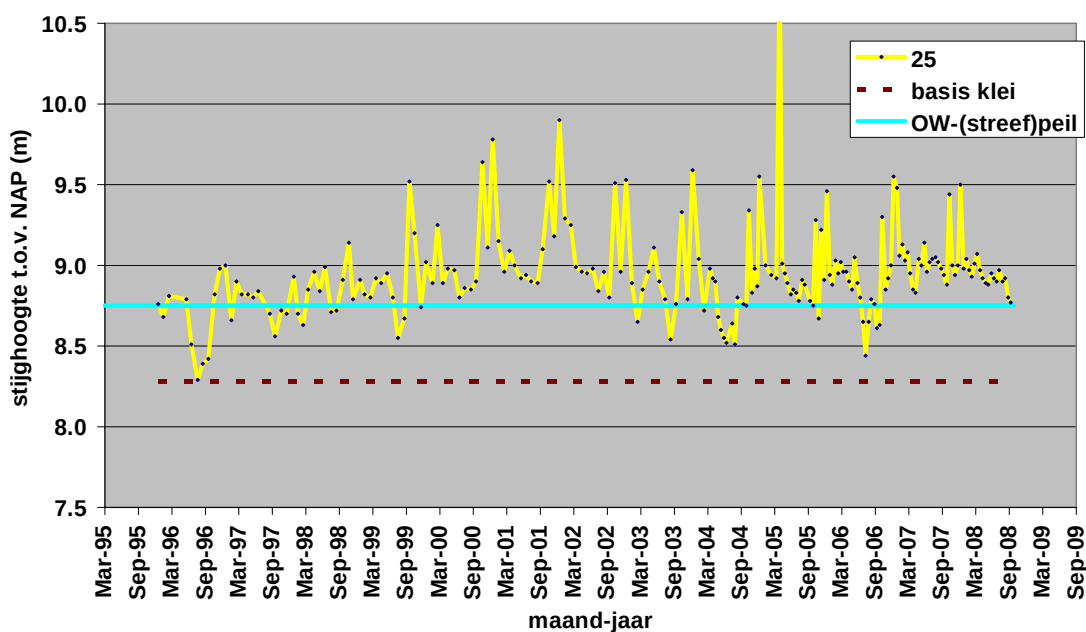
Figuur 7.11 Selectie DINO-boringen Zevenaar.

Van de meetpuntlocaties zijn geen boorprofielen bekend. Daarom zijn van de dichtstbijzijnde meetpunten die in 2006 werden bemeten (1,8,12,13 en 25) de gemeten stijghoogten vergeleken met het niveau van de onderkant van de kleilaag, zoals deze is afgeleid in hoofdstuk 3. De stijghoogte blijft in 2006 boven de onderkant van de klei, met uitzondering van meetpunt 13. In meetpunt 13 daalt de stijghoogte ook in andere jaren (1996, 1999 en 2003) tot de onderkant van klei of iets daaronder.

De reeksen voor meetpunten 13 en 25 zijn weergegeven in figuur 7.12 en 7.13. De overige drie reeksen staan in bijlage D.



Figuur 7.12 Tijdreeks stijghoogte, meetpunt 13.



Figuur 7.13 Tijdreeks stijghoogte, meetpunt 25. OW = oppervlakte water.

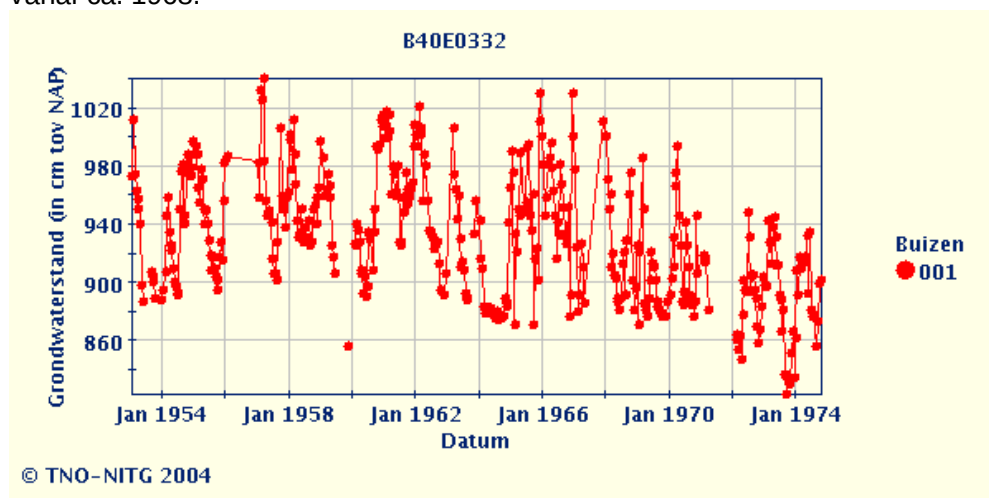
7.5.3 Historische ontwikkeling van de stijghoogte in de omgeving van Zevenaar

7.5.3.1 Periode 1950-1975

De wijken waar de verzakkingsproblematiek is opgetreden zijn gebouwd tussen 1950 en 1980. In de betreffende gebieden is de waterhuishouding sterk aangepast als gevolg van de verstedelijking. Het dempen van kavelsloten heeft enerzijds geleid tot een vergroting van de slootafstand, en daarmee in principe een verhoging van de grondwaterstand. Anderzijds kan het aanbrengen van verhardingen en mogelijk (werk)drainages hebben geleid tot een

vermindering van de grondwateraanvulling, en daarmee een verlagend effect op de grondwaterstand. Volgens opgaaf van de gemeente Zevenaar was er hoogstens incidenteel sprake van het aanbrengen van buisdrainage. Bovendien is er relatief veel elementen- of klinkerverharding aanwezig, en is het areaal aan groen en tuinen ook aanzienlijk. Al met al is het dan ook zeker geen vaststaand feit dat de uitbreiding van Zevenaar heeft geleid tot een daling van de stijghoogte. Niet toevallig kampen veel stedelijke gebieden in Nederland juist met grondwateroverlast als gevolg van de genoemde aanpassingen in de waterhuishouding tijdens het bouwrijp maken.

Grondwaterinformatie van vóór 1950 is beperkt beschikbaar voor Zevenaar. DINOLoket vermeldt slechts één meetreeks vanaf 1954, van meetpunt B40E0332 (Methen). De meetperiode was vóór de bouw van de gelijknamige woonwijk, dus het effect van verstedelijking kan hier niet aan worden afgelezen. In figuur 7.14 is de bijbehorende tijdreeks weergegeven. In deze reeks is sprake van een stijghoogtedaling van enkele decimeters vanaf ca. 1968.

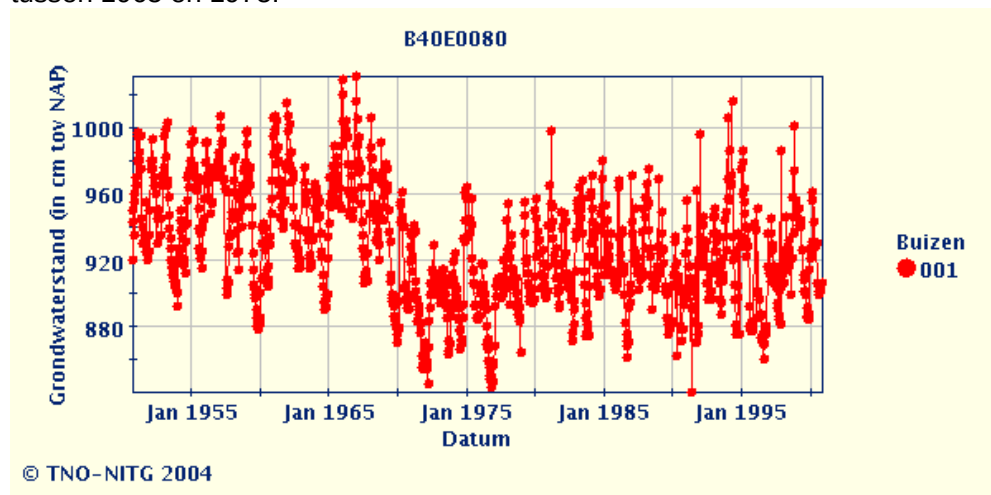


Figuur 7.14 Meetreeks DINOLoket, put B40E0332, Methen, Zevenaar.

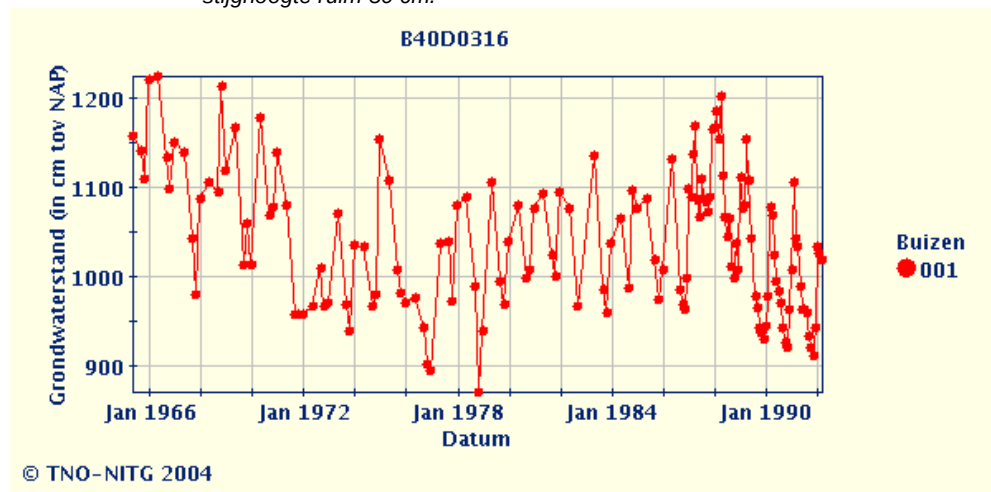
Tussen ca. 1965 en 1975 zijn verschillende grootschalige ingrepen in de waterhuishouding in de omgeving van Zevenaar uitgevoerd, zoals de ruilverkavelingen Bevermeer, het afsluiten van de Oude Rijn en peilaanpassingen in het Rijnstrangengebied. Hiertoe zijn diverse gemalen gebouwd of verbeterd om de afwatering van de polders rond Zevenaar beter te kunnen reguleren, en de tot dan toe frequente inundaties van landbouwgronden te voorkómen¹⁰. Het is aannemelijk dat dit ter plaatse heeft geleid tot een diepere ontwatering. Omdat het grootschalige ingrepen betreft, kunnen deze effecten via het eerste watervoerende pakket relatief ver doorwerken, ook naar de stijghoogte in Zevenaar. De daling in figuur 7.14 valt in de ruilverkavelingsperiode, en kan er dan ook mogelijk door worden verklaard. Ook tijdreeksen rond Didam vertonen deze sprongsgewijze dalingen, zoals B40E0080 (zie figuur 7.15), B40E0091 en B40E0284. Ook ten zuiden van Zevenaar vertonen de (schaarse) tijdreeksen die teruggaan tot vóór 1970 een daling in deze periode, zoals B40D0316 (ten noorden van Pannerden, zie figuur 7.16) en B40B04556 (Groessen). Deze laatste houden wellicht (ook) verband met waterhuishoudkundige ingrepen in het Rijnstrangengebied in deze periode. Er zijn overigens in de genoemde gebieden ook tijdreeksen waar in deze periode geen daling te zien is. Niettemin zijn de getoonde reeksen aanwijzingen dat de stijghoogte op veel plaatsen is gedaald onder invloed van een

¹⁰ Centrale Cultuurtechnische Commissie (1968) Rapport voor de ruilverkaveling De Bevermeer.

verscheidenheid aan waterhuishoudkundige ingrepen in de omgeving van Zevenaar, ruwweg tussen 1965 en 1975.



Figuur 7.15 Meetreeks DINOloket, put B40E0080, ten noordwesten van Didam. Rond 1970 daalt de stijghoogte ruim 50 cm.



Figuur 7.16 Meetreeks DINOloket, put B40D0316, ten noorden van Pannerden. Ook hier lijkt sprake van een daling rond 1970 met enkele decimeters.

Al met al wordt op basis van de (schaarse) beschikbare informatie geconcludeerd, dat het aannemelijk is dat de stijghoogte sinds ca. 1950 met enkele decimeters is gedaald in en rond Zevenaar.

7.5.3.2 Droge zomers

De zomer van 1976 staat vooralsnog te boek als droogterecordhouder. Dit is zichtbaar in langjarige DINO-reeksen zoals figuur 7.15 en 7.16. Meer recent zijn 1989-91, 1996, 1999, 2003, 2004 en 2006 (zeer) droog geweest. De in dit hoofdstuk getoonde tijdreeksen laten zien dat de droge jaren in de stijghoogten worden weerspiegeld. Het is daarbij niet zo dat in 2006 steevast de laagste stijghoogten zijn gemeten. De stijghoogten aan het eind van juni – dus aan het begin van de droge julimaand – zijn in 2006 vergelijkbaar met 1996, 1999, 2001 en 2004. Zoals echter eerder aangegeven was de verdamping in de daaropvolgende julimaand in 2006 veel hoger dan in de andere jaren. Samengevat: juli 2006 is bijzonder omdat een extreme verdampingsvraag samenviel met relatief lage uitgangsstijghoogten, en

daarmee met mogelijk ongunstige randvoorwaarden voor capillaire levering vanuit het grondwater.

Dat juist in 2006 de verzakingsproblemen acuut werden, kan ook veroorzaakt zijn door een cumulatief effect. Daarbij kunnen boomwortels zich in eerdere droge perioden hebben uitgestrekt in de tuinen, op zoek naar vocht, waarna diezelfde wortels in 2006 de bodem ter plaatse van deze tuinen (dus dichterbij de woningen) sterker hebben uitgedroogd. Of dit cumulatieve effect belangrijker is dan de meteorologische verschillen tussen 2003 en 2006, kan op basis van de beschikbare gegevens niet worden vastgesteld. Hoe dan ook geldt wel, dat een zomer zoals 2003 of 2006 ooit weer zal optreden.

Langjarige meetreeksen zoals getoond in figuur 7.16 illustreren bovendien dat droge zomers weliswaar leiden tot (wellicht) record-lage stijghoogten, maar dat het bereiken van zo'n record veeleer is veroorzaakt door structurele verlagingen die daaraan voorafgingen.

7.5.3.3 1999-2001: Aanleg Betuwelijn

Blijvende effecten

Tussen 1999 en 2001 is ten behoeve van de Betuwelijn een betonnen tunnelbak aangelegd direct ten zuiden van de bestaande spoorlijn in Zevenaar. De onderkant van de bak ligt op een niveau van ca. NAP - 2 m¹¹. Hierdoor reikt de tunnelbak tot ca. 9 meter in het eerste watervoerend pakket. Zoals aangegeven in tabel 7.1. is het watervoerend pakket ter plekke echter minimaal enkele tientallen meters dik. De blokkering van dit pakket door de tunnelbak is daarmee beperkt. Op basis hiervan is een significante beïnvloeding van de stijghoogte door de tunnelbak niet aannemelijk.

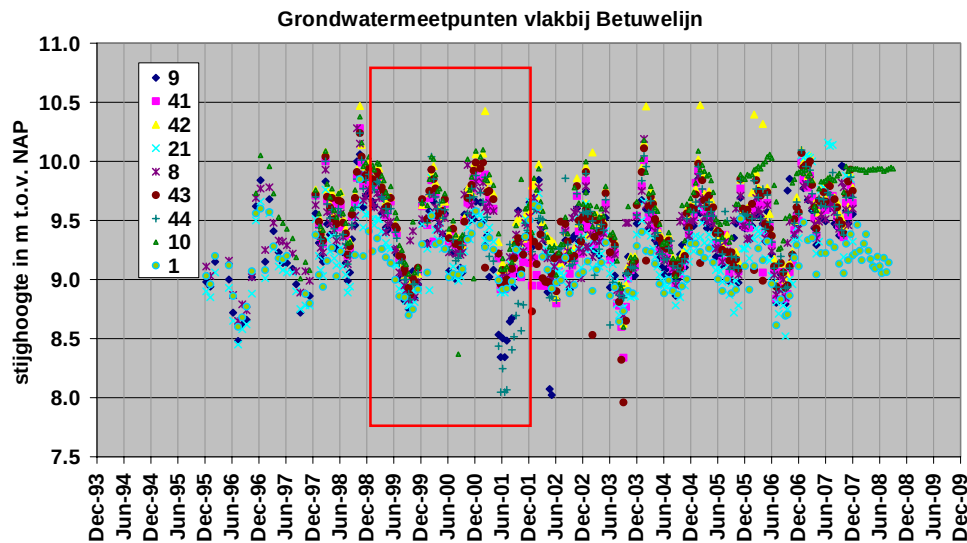
Dit blijkt ook uit de stijghoogtewaarnemingen in de omgeving, weergegeven in figuur 7.17. Sinds de bouw van de tunnelbak is geen structurele dalende trend in de stijghoogte af te leiden sindsdien.

Tijdelijke effecten

In de zomer van 2001 trad een calamiteit op tijdens de bouw, waardoor een noodbemaling noodzakelijk werd. Ten gevolge hiervan zijn sterke stijghoogtedalingen opgetreden. In figuur 7.17 zijn deze verlagingen te zien in peilbuizen 9 en 44 direct naast de spoorlijn. De Commissie Deskundigen Grondwater geeft aan dat ten gevolge hiervan geen zettingen van betekenis opgetreden kunnen zijn¹². Peilbuizen op grotere afstand laten in deze periode geen abnormale verlagingen zien.

¹¹ NS Railinfrabeheer (1997) *Geotechnisch lengteprofiel tunnel Zevenaar. Tekening nr. 2945102 158 K104.000, status : voorlopig d.d. 11-04-1997.*

¹² *Commissie van Deskundigen Grondwaterwet (2002) Betuweroute Zevenaar, notitie inzake schade aan bebouwing als gevolg van grondwaterstandsverlaging, mei 2002.*



Figuur 7.17 Stijghoogteverloop 1996-2008. Aanleg tunnelbak Betuweroute (1999-2001) is met de rode rechthoek weergegeven. Voor ligging meetpunten zie figuur 7.10.

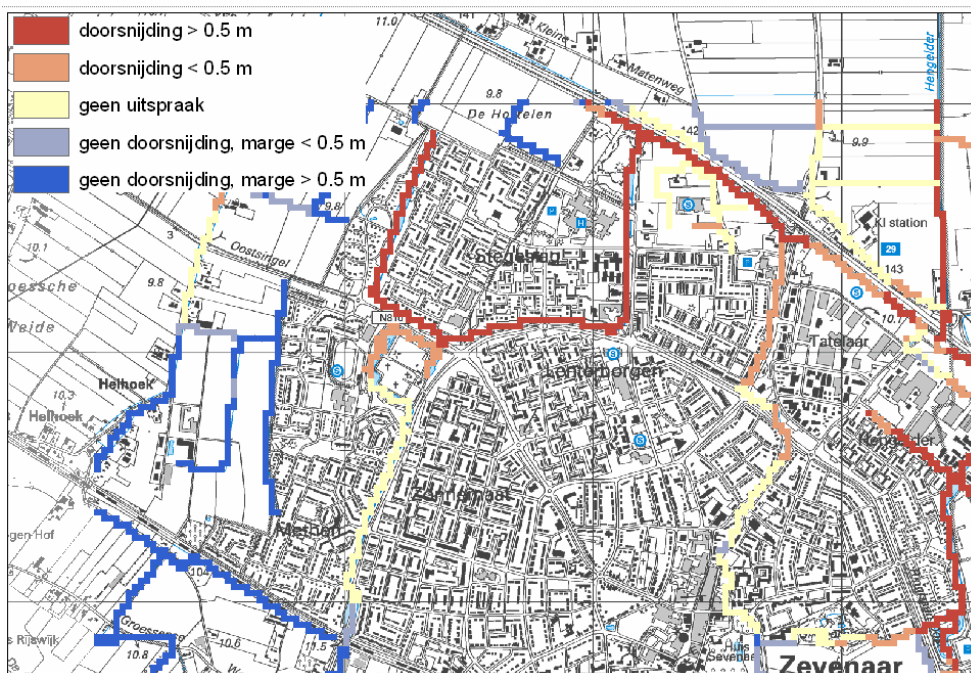
7.5.4 Invloed lokaal oppervlaktewater op stijghoogte

Voor wat betreft de relatie tussen oppervlaktewater en stijghoogte moet onderscheid worden gemaakt tussen enerzijds een regionale invloed van de waterpeilen in de (wijde) omgeving, en anderzijds een lokale invloed van de waterlopen in het onderzochte deel van Zevenaar.

Dat er vermoedelijk een **regionale** invloed van de oppervlaktewaterpeilen op de stijghoogte in Zevenaar is, is al eerder in deze paragraaf beargumenteerd. De vraag is in hoeverre er sprake is van lokale beïnvloeding van de stijghoogte door de waterlopen in Zevenaar zelf. Daartoe zijn de stijghoogtemetingen in Zevenaar nader geanalyseerd.

In het noordwestelijk deel van Zevenaar worden stijghoogten gemeten die fluctueren rond het streefpeil van de **lokale** watergangen (NAP +8.75 m). Zie figuur 7.13. als voorbeeld. In de zomer zijn de stijghoogten lager, wat in droge zomers resulteert in droogval, aangezien er momenteel door het Waterschap geen oppervlaktewater van buiten de gemeente aangevoerd kan worden. In deze periode hebben de waterlopen dan ook geen invloed op de stijghoogte; de beïnvloeding is andersom. In de winterperiode daarentegen zijn de stijghoogten hoger dan het streefpeil.

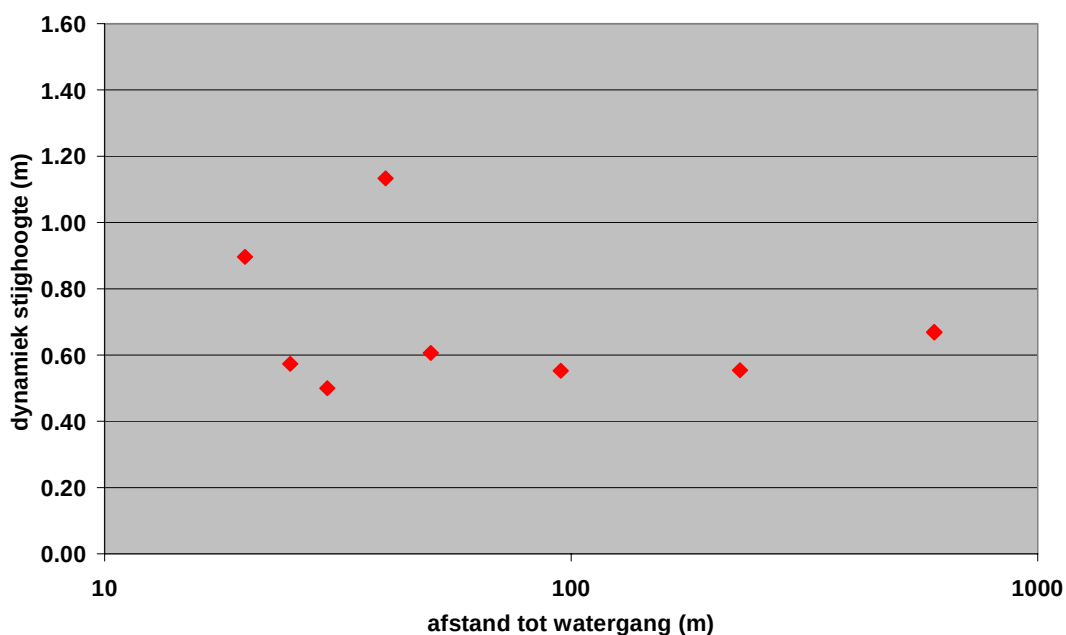
De invloed van de lokale waterlopen op de stijghoogte wordt ten eerste bepaald door het al dan niet doorsnijden van de kleilaag. Om dit te bepalen is het NAP-niveau van de bodem van de watergang (volgens de legger van Waterschap Rijn en IJssel zoals deze is aangeleverd ten behoeve van de bouw van het Rijn en IJssel grondwatermodel) vergeleken met de onderkant van de kleilaag, zoals in hoofdstuk 3 afgeleid. Het resultaat is weergegeven in figuur 7.18, waarbij de rode en roze tinten betrekking hebben op deklaagdoorsnijdende watergangen. Op basis van de figuur is de conclusie dat in het onderzochte deel van Zevenaar de watergangen de kleilaag doorsnijden. Een directe beïnvloeding van de stijghoogte door het waterpeil is hiermee goed denkbaar, maar de vraag is tot hoever deze invloed reikt.



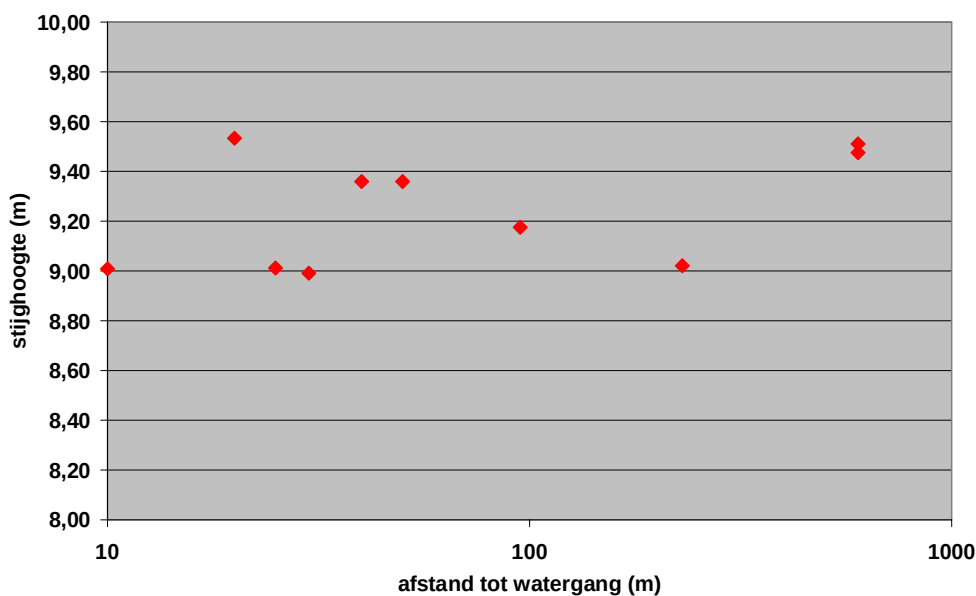
Figuur 7.18 Doorsnijding van de kleilaag door watergangen in Zevenaar. Als waterbodemhoogte is het gemiddelde genomen van de benedenstroomse en bovenstroomse waterhoogte per waterloopsegment.

De dynamiek van de stijghoogte is in principe lager vlakbij een drainerende watergang die op een constant peil wordt gehouden. De stijghoogtefluctuaties nemen dan toe met toenemende afstand tot de watergang. Dit wordt echter niet bevestigd door de meetgegevens: de dynamiek van de stijghoogte lijkt onafhankelijk van de afstand tot de dichtstbijzijnde watergang, zie figuur 7.19. De kortste afstanden tot de watergang waren in deze analyse 20 tot 30 meter. Ook is er in theorie sprake van een opbolling van de stijghoogte tussen watergangen, wat betekent dat de stijghoogte toe zou moeten nemen met toenemende afstand tot de watergang. Er is echter geen duidelijke relatie tussen beide grootheden, zoals blijkt uit figuur 7.20. De twee punten op de grootste afstand (600 m) hebben weliswaar een relatief hoge stijghoogte, maar dit kan ook veroorzaakt zijn doordat ze het meest stroomopwaarts liggen. Al met al kan niet aannemelijk worden gemaakt dat de invloed van het oppervlaktewater op de stijghoogte verder reikt dan 10 à 20 meter.

Een mogelijke verklaring hiervoor is het grote doorlaatvermogen van het watervoerend pakket (zie par. 7.1.2). Met andere woorden er stroomt zoveel grondwater door dit pakket dat een beetje meer of minder drainage door waterlopen er nauwelijks toe doet. Een andere verklaring is drainage van grondwater in het gebied tussen de waterlopen, bv. door zandige straatcunetten, sterk doorwortelde bodemprofielen en buisdrainages.



Figuur 7.19 Stijghoogtedynamiek in relatie tot afstand tot dichtstbijzijnde watergang. Dynamiek is gedefinieerd als het gemiddelde van de verschillen tussen de hoogste en laagste gemeten stijghoogte (m t.o.v. NAP) in elk jaar. Op basis van meetpunten 1,2,12,13,23,25-28 en 30.

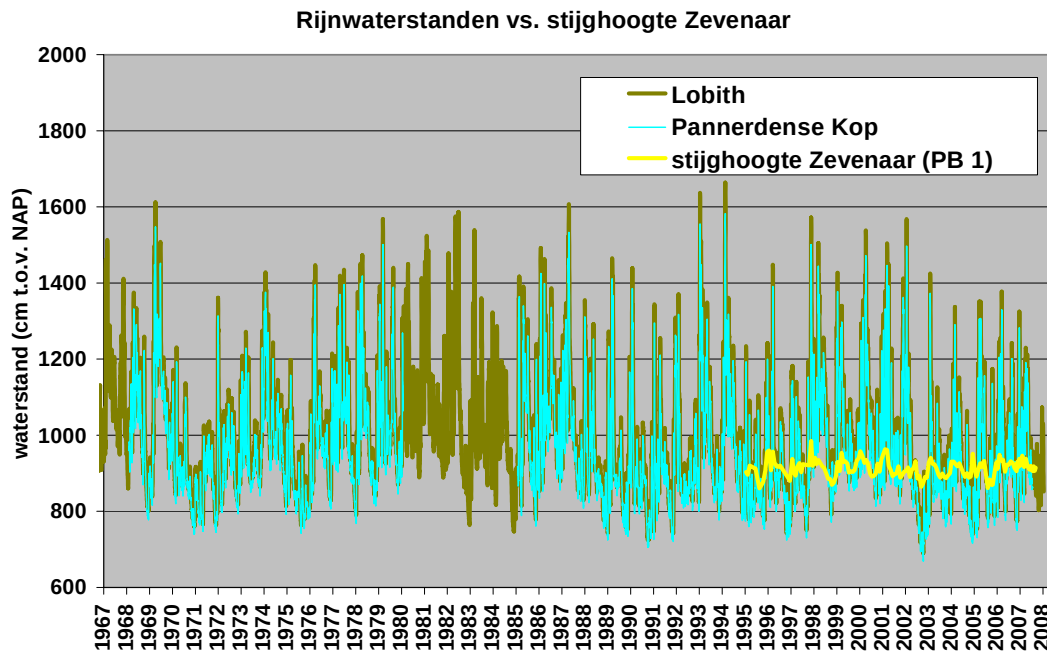


Figuur 7.20 Gemiddelde stijghoogte 1996-2004 en maaiveldhoogte (bovenkant schaal, t.o.v. NAP) in relatie tot afstand tot dichtstbijzijnde watergang. Op basis van meetpunten 1,2,12,13,23,25-28 en 30.

7.5.5 Invloed Rijnwaterstanden op de stijghoogte

In figuur 7.21 zijn de rivierwaterstanden, gemiddeld per kalendermaand, voor zowel Lobith als de Pannerdense Kop weergegeven. Tevens zijn de stijghoogten in meetpunt 1 in Zevenaar aangegeven. De uitdemping van de rivierdynamiek in Zevenaar is goed zichtbaar.

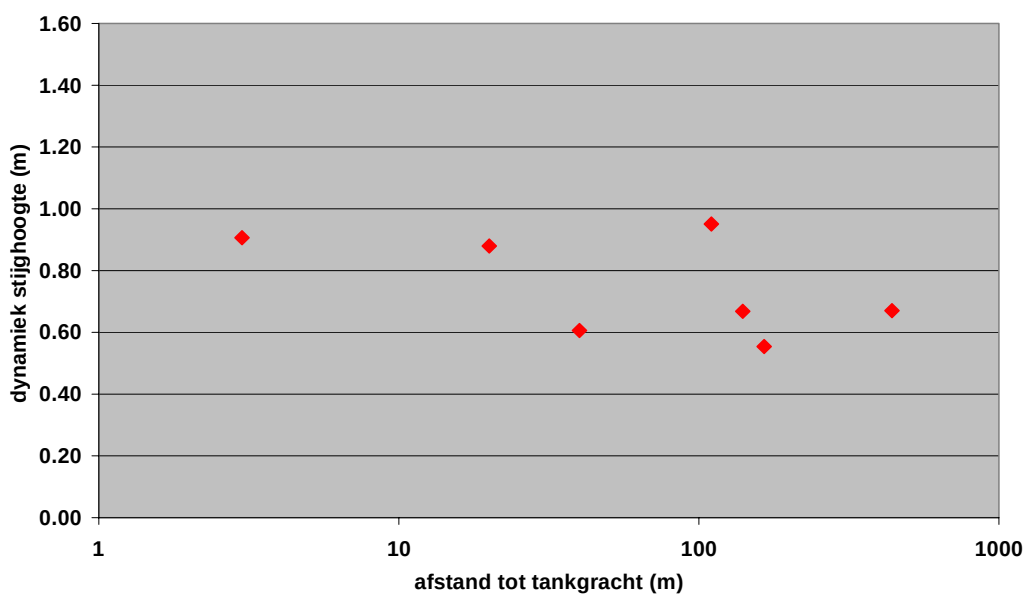
De rivierwaterstand is weliswaar laag in de zomer van 2006, maar niet extreem laag zoals in 2003. Ook opvallend is dat in november en december 2005 de Rijnwaterstand lager is dan in 2006, terwijl de stijghoogte in Zevenaar dan juist een piek vertoont. Ook in andere jaren, zoals 1998 en 2004 vallen lage rivierstanden niet overtuigend samen met lage stijghoogten in Zevenaar. Het lijkt er derhalve op dat lage Rijnwaterstanden niet bepalend zijn voor lage stijghoogten in Zevenaar.



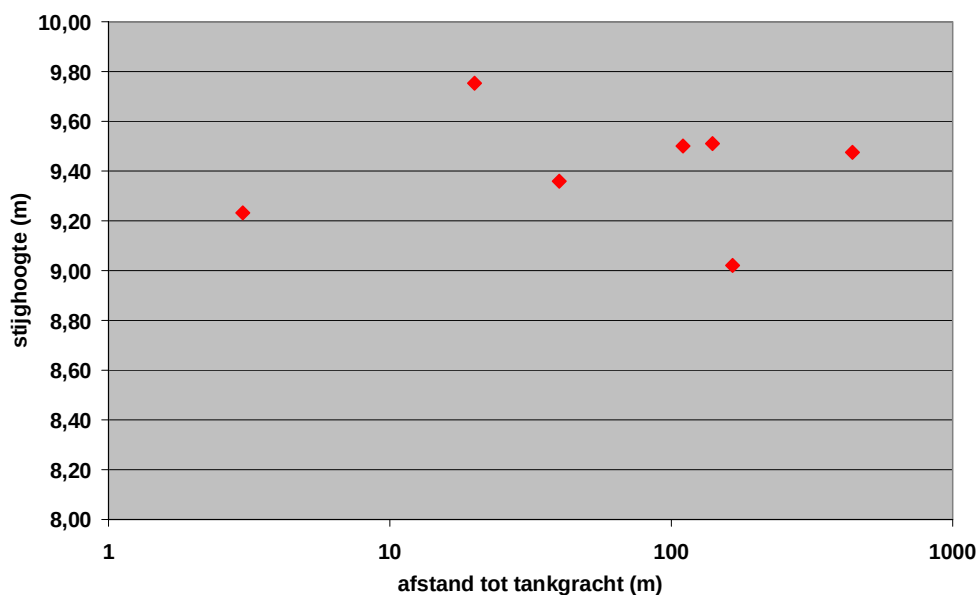
Figuur 7.21 Waterstanden Pannerdense Kop en stijghoogte meetpunt 1 Zevenaar.

7.5.6 Invloed tankgrachten op de stijghoogte

In theorie kan een tankgracht drainerend werken als gevolg van het doorlatendere materiaal waarmee het is opgevuld. Tankgrachten uit de Tweede Wereldoorlog zijn - in tegenstelling tot loopgraven - zo diep dat ze de kleilaag in Zevenaar kunnen doorsnijden en aldus het watervoerend pakket rechtstreeks kunnen draineren. Er moet dan wel een hydraulische connectie zijn met een lager peil, bijvoorbeeld een watergang in een lager peilgebied, een onderbemalen drain, of een bemaling. Om de invloed van tankgrachten te onderzoeken is een zelfde procedure gevolgd als bij het onderzoeken van de invloed van watergangen (paragraaf 7.1.3): (1) de stijghoogtedynamiek en (2) de stijghoogte, beiden uitgezet tegen de afstand tot de tankgracht. De resultaten zijn weergegeven in figuur 7.22 en 7.23. Er is geen duidelijk verband tussen afstand tot de tankgracht en stijghoogte. Dit is wederom waarschijnlijk toe te schrijven aan het grote doorlaatvermogen van het watervoerend pakket (zie par. 7.1.2).



Figuur 7.22 Stijghoogtedynamiek in relatie tot afstand tot tankgracht.



Figuur 7.23 Gemiddelde stijghoogte in relatie tot afstand tot tankgracht.

7.6 Berekeningen met regionaal model

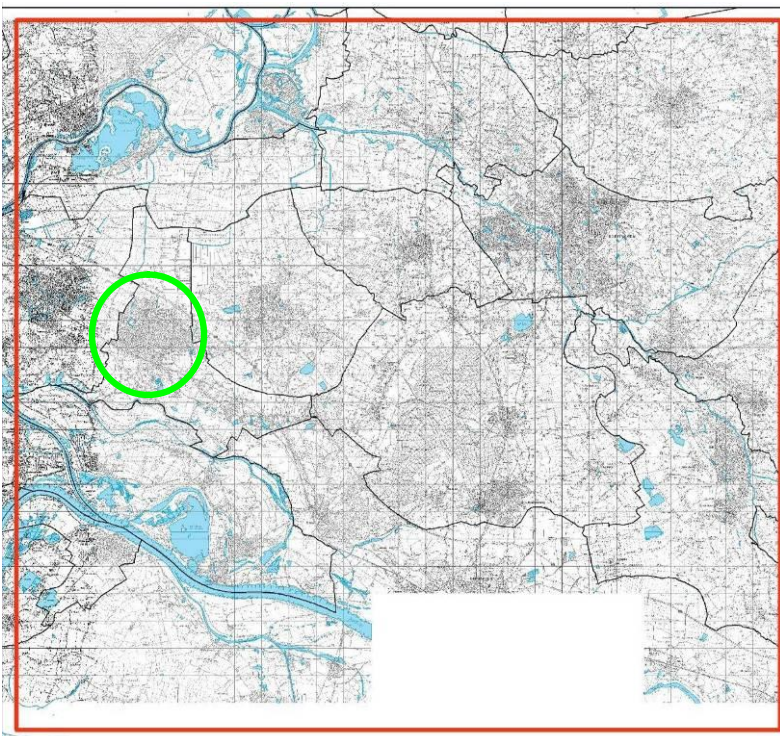
7.6.1 Algemeen

Voorzover de invloed op de stijghoogte niet kon worden afgeleid uit de beschikbare meetgegevens, zijn verschillende scenario's doorgerekend met een regionaal grondwatermodel. Als eerste worden de invoerparameters van het grondwatermodel, en zijn prestaties bij het nabootsen van de huidige situatie nader belicht.

7.6.2 Modelinvoer

Het model is gebaseerd op het Actueel Grondwater Instrument Gelderland Oost (AMIGO)¹³, ontwikkeld in opdracht van Waterschap Rijn en IJssel, Provincie Gelderland en Waterbedrijf Vitens. Uit dit model is een deelmodel 'geknipt' bestaande uit Zevenaar en omgeving. Het model rekent tijdsafhankelijk, heeft een celgrootte van 250 bij 250 m, en heeft exact dezelfde invoer als het Rijn en IJssel model. De onverzadigde zone wordt gesimuleerd met CAPSIM¹⁴, en de verzadigde zone met Modflow. De rekenperiode is 1996-2004 omdat de invoerbestanden van het originele Rijn en IJssel model voor deze periode zijn gegenereerd. Ofschoon het jaar van aandacht 2006 niet in deze periode valt, is de periode lang en meteorologisch divers genoeg (droog jaar 2003) om representatieve analyses van effecten op de stijghoogte in Zevenaar te kunnen uitvoeren.

De randen van het model liggen op zodanige afstand dat de stijghoogten in Zevenaar niet worden beïnvloed door randvoorwaarden. In figuur 7.24 is de modelknip weergegeven. Zevenaar (groene ellips) ligt eccentricisch in het modelgebied omdat de grondwaterwinning verder oostelijk bij Zeddam in één van de scenario's is gesimuleerd.



Figuur 7.24 Modelgrens regionaal grondwatermodel Zevenaar. Zevenaar is omcirkeld in groen.

Het regionale model is *niet* lokaal verfijnd in Zevenaar – daarvoor is het straatmodel ontwikkeld. Dit betekent dat de verschillende onderdelen van het geohydrologisch systeem

¹³ Linden W van der, Berendrecht W, Veldhuizen A, Massop H, Blonk A, Heuven A, Zaadhoordijk WJ (2008) Actueel Model Instrument Gelderland Oost. Rapport **Error! Unknown document property name.**, Deltares, Alterra, Tauw, Royal Haskoning.

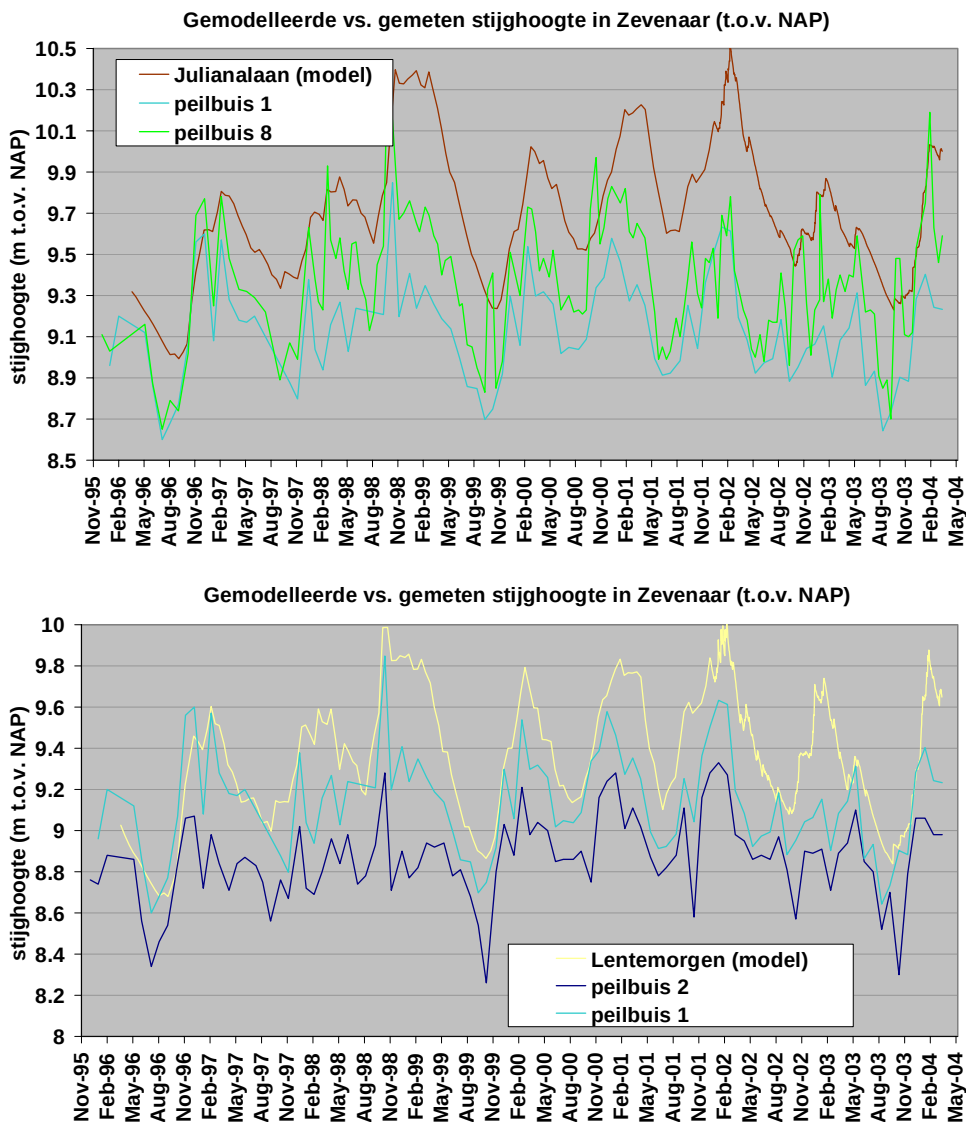
¹⁴ Veldhuizen, A.A., Poelman, A., Stuyt, L.C.P.M. (1998a). Software documentation for SIMGRO V3.0: regional water management simulator. SC Technical Document 50, 289.

vereenvoudigd in het model zitten, ook in Zevenaar. In het kort wordt onderstaand ingegaan op de voor Zevenaar relevante onderdelen.

- De deklaagweerstand van de Holocene klei- en veenlagen is gebaseerd op de boorinformatie die in de DINO database beschikbaar is, dus niet met toevoeging van de detaillering van de basis van de klei in Zevenaar. De weerstand is gecorrigeerd ter plaatse van de in de deklaag aanwezige zandbanen. Ter plaatse van de klei is de deklaagweerstand in het model gemiddeld 175 dagen, bij een dikte van 2 meter. Dit komt overeen met de weerstand gebruikt in het straatmodel (Tabel 7.1).
- De oppervlaktewaterpeilen worden als vaste waarden voor een bepaalde periode opgegeven, in principe zijn dit de zomer- en winterperioden. Variaties en tijdelijke aanpassingen (bijv. als gevolg van opstuwing of opwaaiing en maalstops of tijdelijke inlaat) worden verwaarloosd. Drainage en infiltratie hangen af van het verschil tussen de vaste oppervlaktewaterpeilen en de berekende grondwaterstanden. Infiltratie zal *altijd* plaatsvinden zolang het waterpeil zich boven de grondwaterstand bevindt én er een waterlaag in de waterloop staat. Droogval wordt gesimuleerd als de grondwaterstand zakt tot onder het waterpeil, en de waterloop niet als infiltrerend is aangemerkt. Dit is het geval in Zevenaar.
- Alle stedelijke gebieden zijn in het model uniform gedraineerd met buisdrainage. Het niveau van de buisdrainage wordt 'opgehangen' aan het maaiveldniveau, dat op zijn beurt wordt afgeleid door filtering van het AHN-bestand (5x5 m). Dit betekent dat als de ligging dusdanig hoog is dat buisdrainage overbodig is, deze in het model ook niet zal werken.
- De onttrokken hoeveelheden bij grondwateronttrekkingen uitgezonderd berekening worden per maand bepaald op basis van het mediane debiet. De modellaag waaruit wordt onttrokken is bepaald door de diepteligging van de filters te combineren met de diepte van de modellenlagen.
- Berekening treedt op in het model op locaties en diepten die gebaseerd zijn op de gegevens van vergunde beregeningsputten, binnen het groeiseizoen (verschilt per gewas). Als het vochttekort zodanig is dat de pF boven 2,5 uitkomt, treedt de berekening in werking. Verondersteld is dat in een cirkel van 200 meter rondom een put kan worden beregend. De grootte van de berekening hangt af van het vochttekort, dat dynamisch in het model wordt bijgehouden. Maximaal bedraagt de berekening 3 mm per dag.

7.6.3 Resultaten huidige situatie

Figuur 7.25 toont de verschillen tussen de berekende en gemeten stijghoogten in Zevenaar. De berekende stijghoogten zijn systematisch enkele decimeters hoger dan de meetwaarden. Voor de modeltoepassing in Zevenaar zijn deze verschillen niet problematisch, omdat alleen naar de effecten op de stijghoogte voor verschillende ingrepen wordt gekeken, dus relatieve verschillen en geen absolute waarden, en dan ook nog op een globaal niveau (geen, iets, of significant effect). Belangrijker voor de interpretatie is de dynamiek, d.w.z. de verschillen tussen pieken en dalen binnen individuele meetreeksen. En deze blijken redelijk goed overeen te stemmen. Weliswaar zijn pieken in de meetreeksen van kortere duur, maar de uitzakking in droge perioden, die van belang is voor de verzakkingsproblematiek, wordt goed gereproduceerd door het model.



Figuur 7.25 Verschillen tussen gemeten en berekende stijghoogten in Zevenaar. De locaties waarvoor de modelreeksen worden getoond, liggen steeds tussen de beide peilbuizen in.

7.6.4 Scenario's

7.6.4.1 Overzicht

De volgende scenario's zijn doorgerekend met het grondwatermodel:

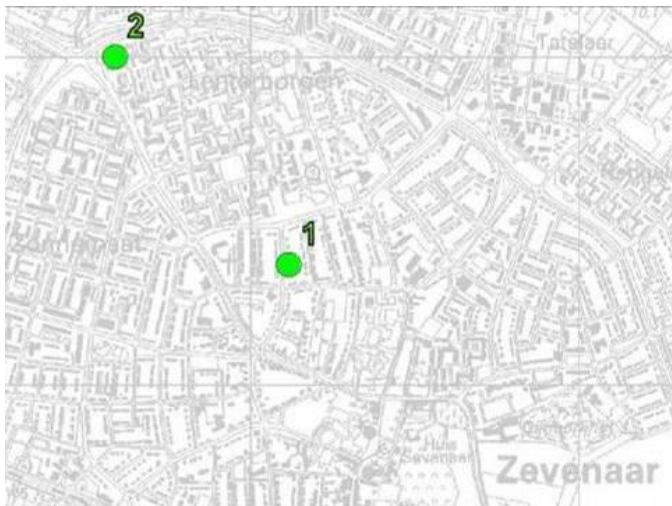
1. Uitschakeling van de grondwateronttrekkingen uitgezonderd beregening;
2. Uitschakeling van de grondwateronttrekkingen beregening door landbouw;
3. Peilverhoging van 40 cm hoger in het hele modelgebied;
4. Peilaanpassing Rijnstrangengebied, conform de bijlagennotitie bij de GGOR studie voor dit gebied;

De volgende scenario's zijn *niet* doorgerekend met het grondwatermodel.

5. Invloed van de tunnelbak van de Betuweroute;
6. Invloed van tankgrachten;

De motivatie om scenario's 5 en 6 niet door te rekenen is, dat uit de meetgegevens afdoende blijkt dat deze factoren geen significant effect hebben op de stijghoogte. Als het model dit bevestigt levert het niets nieuws, als het model afwijkt hebben de metingen altijd gelijk.

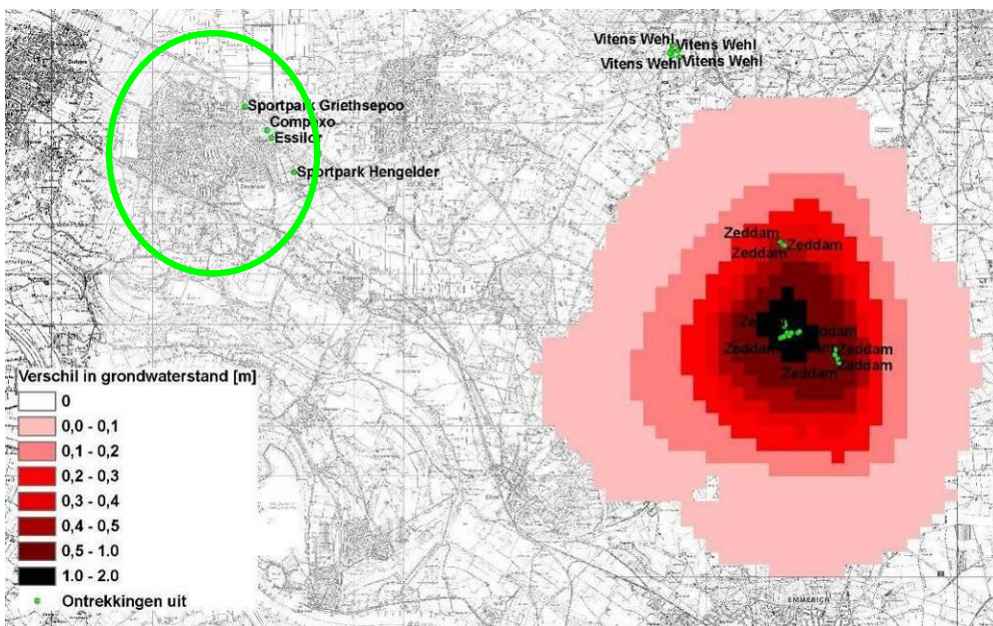
Voor elk scenario zijn er kaarten gemaakt waarop het verschil in stijghoogte met de huidige situatie is weergegeven. Deze kaarten hebben betrekking op 6 oktober 2003, het tijdstip waarop de maximale uitzakking van de stijghoogte wordt berekend. De kaarten zijn dus indicatief voor een droge situatie. Ook zijn, indien relevant, de berekende tijdreeksen van de stijghoogte voor de locaties Julianalaan en Zonegge weergegeven. Zie figuur 7.26.



Figuur 7.26 Locaties waarvoor tijdreeksen van de scenario-resultaten zijn weergegeven.

7.6.4.2 Scenario 1: uitschakeling grondwateronttrekkingen

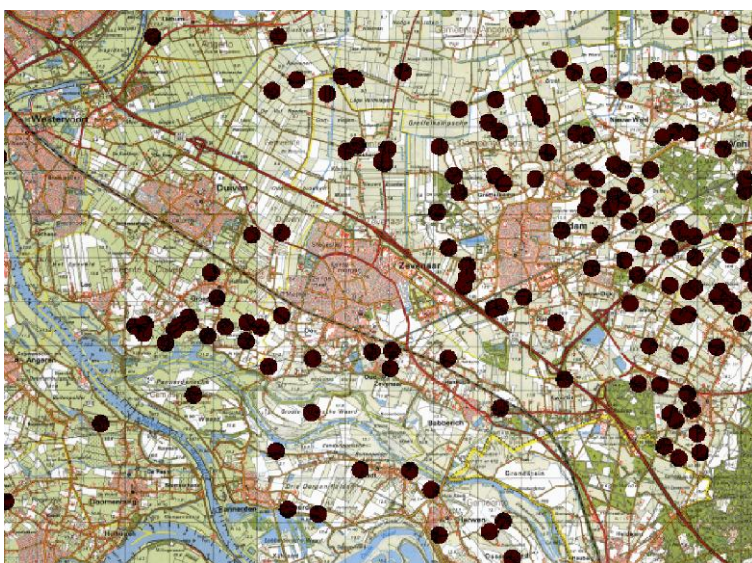
In dit scenario zijn de meest relevante grondwateronttrekkingen in Zevenaar en omgeving, te weten Vitens drinkwateronttrekkingen bij Wehl en Zeddam, de industrieonttrekkingen van Compaxo en Essilor en de onttrekkingen van sportpark Hengelder en sportpark Griethsepoort uitgezet. Het effect op de stijghoogte is ruimtelijk weergegeven in figuur 7.27. Uit de figuur blijkt dat de grondwateronttrekkingen in Zevenaar zelf de stijghoogte niet beïnvloeden. Dit is een bevestiging van eerdere studies, en heeft te maken met zowel de diepte waarop wordt onttrokken als de geringe onttrekkingshoeveelheden. De Vitens-onttrekkingen zijn wel groot, maar liggen te ver weg om in Zevenaar effect te hebben.



Figuur 7.27 Toename van de stijghoogte na uitschakeling van de aangegeven ontbrekkingen. Zevenaar ligt in de groene ellips.

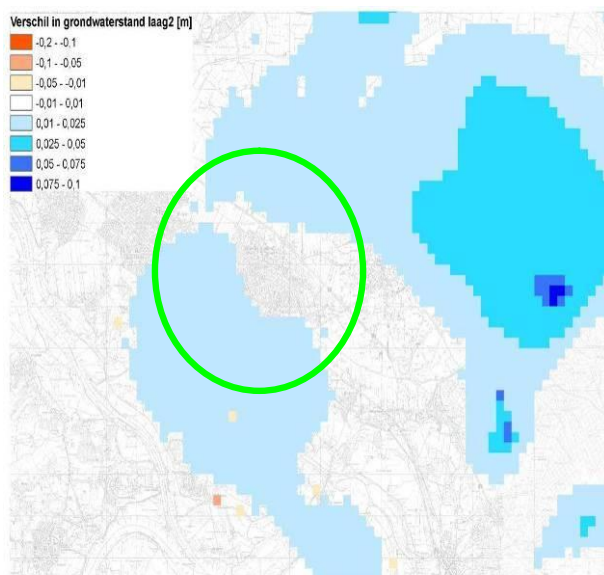
7.6.4.3 Scenario 2: grondwateronttrekkingen voor beregening uit landbouw

Volgens de vergunningsgegevens van de provincie Gelderland ligt er een aanzienlijk aantal beregeningsputten voor landbouw rond Zevenaar (figuur 7.28). Het is te verwachten dat grondwater wordt opgepompt uit een groot deel van deze putten in warme, droge perioden. Een individuele put zal nauwelijks effect hebben op de stijghoogte in de bebouwde kom van Zevenaar, maar voor de som van alle putten ligt dat mogelijk anders. Daarom is een berekening uitgevoerd waarbij beregening in al deze putten wordt uitgeschakeld. In de huidige situatie wordt door het model automatisch beregening gesimuleerd in droge perioden, zie paragraaf 7.4.3.2.



Figuur 7.28 Vergunde beregeningslocaties rond Zevenaar, volgens informatie van de provincie Gelderland.

Het effect van uitschakeling van de beregeningsputten op de stijghoogte is ruimtelijk weergegeven in figuur 7.29.



Figuur 7.29 Toename van de stijghoogte na uitschakeling van de in figuur 7.28 aangegeven beregeningsputten. Zevenaar ligt in de groene ellips.

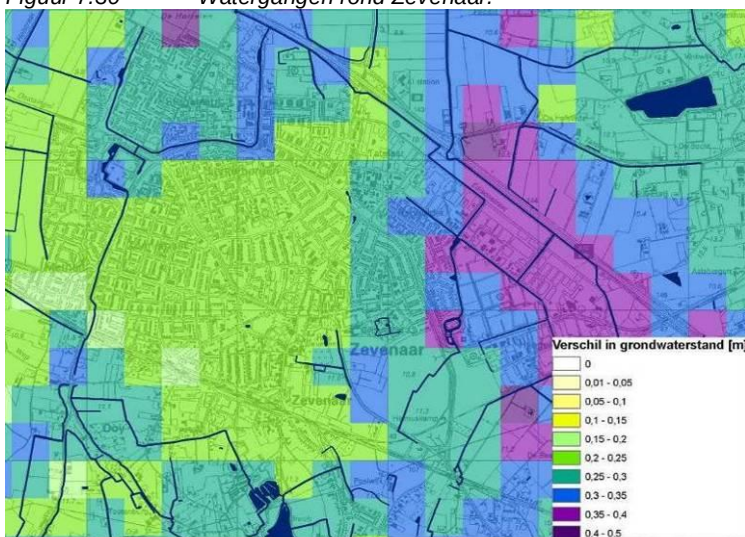
Uit figuur 7.29 blijkt dat het effect van beregening in Zevenaar beperkt blijft tot enkele cm. Ter plaatse van de 2 onderzoekslocaties is het berekende effect vrijwel nihil. Het berekende effect is mogelijk onderschat doordat er eventueel ook niet-vergunde putten in het gebied liggen; deze zijn niet opgenomen in het grondwatermodel. Daar staat tegenover dat de berekende effecten in dezelfde orde van grootte vallen als de onzekerheden die inherent zijn aan dit type modelberekeningen. Geconcludeerd wordt dat beregening door landbouw een weliswaar niet volledig te verwaarlozen, maar marginale bijdrage levert aan verlaging van de stijghoogte in Zevenaar.

7.6.4.4 Scenario 3: Peilverhoging van 40 cm in het gehele modelgebied

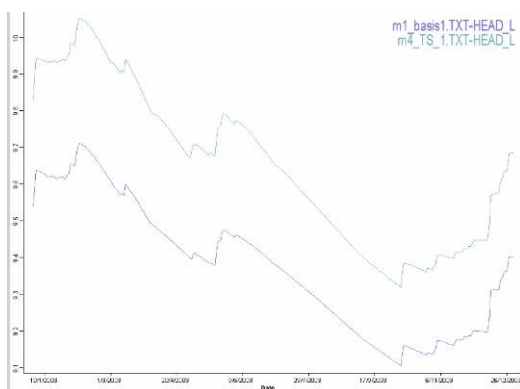
Dit scenario geeft een indruk van het mogelijke effect van grootschalige waterhuishoudkundige ingrepen in de omgeving. Om het effect van de eerder beschreven ruilverkavelingen in de omgeving in te schatten zijn de peilen van alle watergangen in het modelgebied met 40 cm verhoogd. De betreffende waterlopen zijn weergegeven in figuur 7.30. De peilen van de Rijn en de IJssel zijn niet verhoogd. De verhogingen leiden tot berekende stijghoogten in Zevenaar die structureel 20 tot 35 cm hoger zijn, ook in gebieden waar geen waterlopen aanwezig zijn. Dit is weergegeven in figuur 7.31 en 7.32.



Figuur 7.30 Watergangen rond Zevenaar.



Figuur 7.31 Toename stijghoogte als de peilen van alle watergangen in Zevenaar en wijde omgeving met 40 cm zouden worden verhoogd.



Figuur 7.32 Tijdreeksen van de berekende stijghoogte, huidige situatie (blauw) en met 40 cm hogere peilen (blauwgroen) op de onderzoekslocatie Julianalaan.

Bij deze resultaten moeten twee kanttekeningen worden geplaatst.

Er is een aanvullende berekening uitgevoerd, waarbij alleen de waterlopen in Zevenaar zelf met 40 cm werden verhoogd. Deze lokale peilverhoging blijkt - volgens het model - ca. 40% van het effect te veroorzaken (niet afgebeeld). In paragraaf 7.5.4 is echter juist geconcludeerd dat de watergangen in Zevenaar zelf geen invloed van betekenis hebben op de stijghoogte, op afstanden groter dan ca. 20 meter. Het feit dat door het model toch significante beïnvloeding door lokale waterlopen wordt berekend, komt vermoedelijk doordat in het model geen drainage van grondwater plaatsvindt in het gebied tussen de waterlopen, bv. door zandige straatcunetten, sterk doorwortelde bodemprofielen en drainages. Als de stijghoogte door dergelijke zeer lokale fenomenen wordt gestuurd, hebben ingrepen in de watergangen geen effect. Drainages zitten weliswaar in het model, maar de niveaus zijn te hoog om de berekende stijghoogte te beïnvloeden. De oorzaak hiervoor is dat de maaiveldhoogte in stedelijk gebied vaak wordt overschat door de toegepaste AHN-filtering. Kortom: de invloed van waterlopen op de stijghoogte in Zevenaar zelf wordt overschat door het model, en daarmee ook het totale berekende effect van de peilopzet van 40 cm in dit scenario.

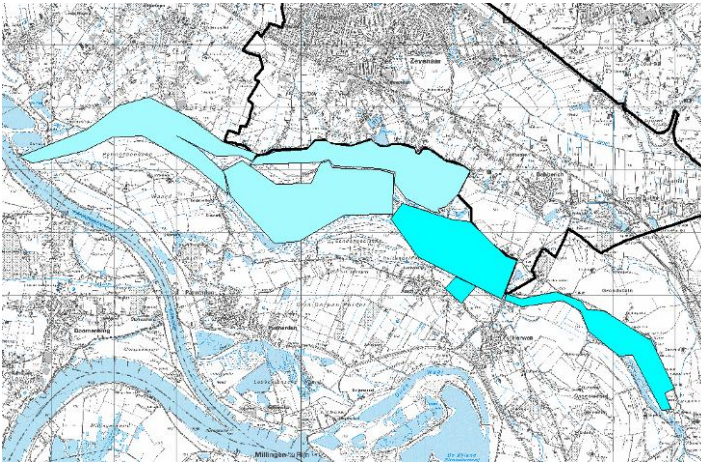
Hier staat tegenover dat niet in de berekening is meegenomen dat sloten ook verontdiept kunnen worden, waarbij de doorsnijding van de kleilaag mogelijk wordt opgeheven. Dit zou de stijghoogte juist doen toenemen, omdat de drainerende werking vermindert.

Al met al blijft er dan een effect over vanuit de omgeving van 15-30 cm. In feite kan dit scenario worden gezien als het terugdraaien van de ruilverkavelingen etc. uit het verleden. Op de vraag of een dergelijk scenario maatschappelijk relevant of haalbaar is, wordt in deze rapportage verder niet ingegaan.

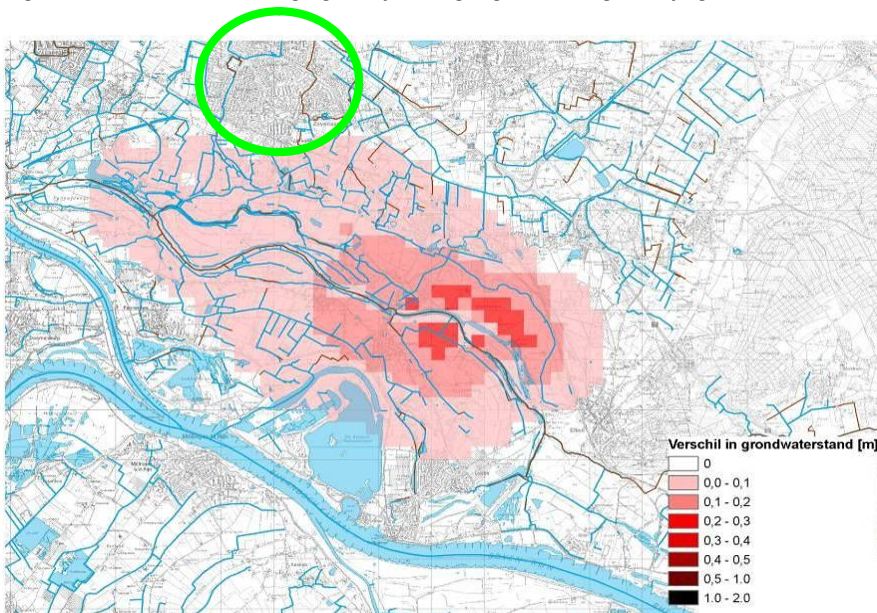
7.6.4.4 Scenario 4. Peilaanpassing in het Rijnstrangengebied

In het kader van de GGOR Rijnstrangen zullen de peilen in dit gebied mogelijk worden verhoogd. Om het effect van eventuele peilverhogingen op de stijghoogten in Zevenaar in beeld te brengen, zijn de peilen van de watergangen in dit gebied in het model verhoogd conform de bijlagennotitie bij de GGOR studie voor dit gebied (opgesteld voor Waterschap Rijn en IJssel, januari 2007). Dit houdt in een verhoging van het 'minimumpeil' met 25 cm in het westelijke deel en 45 cm in het oostelijke deel (zie figuur 7.33). Dit is naar het model vertaald als een verhoging van het zomerpeil met 25 cm in het westelijke deel en 45 cm in het oostelijke deel.

De berekende effecten van deze peilverhogingen op de stijghoogte reiken niet tot de bebouwde kom van Zevenaar, zoals wordt weergegeven door figuur 7.34. Dit betekent dat de ruimtelijke ontwikkelingen in dit gebied geen merkbaar gunstige neveneffecten opleveren voor de stijghoogte in Zevenaar in relatie tot de verzakkingsproblematiek.



Figuur 7.33 Peilverhogingen Rijnstrangengebied, volgens bijlagennotitie GGOR Rijnstrangen (WRIJ, 2007).



Figuur 7.34 Toename stijghoogte bij peilverhoging Rijnstrangengebied conform GGOR-notitie. Zevenaar is groen omcirkeld.

7.7 Conclusies bovenlokale / regionale systeemanalyse

- De maand juli 2006 is hydrometeorologisch gezien bijzonder vanwege een uitzonderlijk hoog verdampingsoverschot, terwijl de stijghoogte aan het begin van de maand al lager dan gemiddeld was. Bodemvochtsystemen met een relatief kort geheugen zullen meer stress hebben ondervonden in 2006, en systemen met een langer geheugen meer in 2003. De vraag is wat een 'kort geheugen' inhoudt. Men zou kunnen denken aan bodems (inclusief de toplaag) die relatief snel veel vocht verliezen onder invloed van uiteenlopende factoren (sterk verdampende begroeiing, sterk zandige textuur, drainage).
- We mogen er niet van uitgaan dat zomers zoals 2006 nooit meer zullen optreden, en moeten dus rekening houden met nieuwe schadegevallen in de toekomst.
- Het is aannemelijk dat de stijghoogte sinds ca. 1950 met enkele decimeters is gedaald in en rond Zevenaar. Grootschalige waterhuishoudkundige ingrepen in de omgeving van Zevenaar lijken hiervoor de oorzaak te zijn. Een effect van de verstedelijking van Zevenaar zelf op de grondwaterhuishouding kon niet worden vastgesteld.

- Een significante blijvende beïnvloeding van de stijghoogte door de aanwezigheid van de tunnelbak van de Betuweroute (sinds 2001) is onwaarschijnlijk. Dit wordt bevestigd door de afwezigheid van dalende trends in de stijghoogte in naburige meetpunten, tussen 1996 en 2008. De tunnelbak blokkeert slechts een beperkt deel van het watervoerend pakket.
- Een tijdelijke beïnvloeding van de stijghoogte door de aanleg van de Betuwelijn in 2001 is alleen zichtbaar in de stijghoogtemetingen van twee peilbuizen direct langs de spoorlijn (nrs. 9 en 44).
- Lage rivierwaterstanden lijken niet maatgevend voor lage stijghoogten in Zevenaar.
- Op basis van de beschikbare waarnemingen in Zevenaar kan geen drainerende werking van waterlopen en tankgrachten op de stijghoogte worden aangetoond.
- De invloed van de aanwezige grondwateronttrekkingen (uitgezonderd beregening voor de landbouw) op de stijghoogte in Zevenaar is verwaarloosbaar.
- De invloed van beregening voor de landbouw op de stijghoogte in Zevenaar is marginaal. Gezien de onzekerheden die inherent zijn aan dit type modelberekeningen wordt sterk betwijfeld of dit effect significant genoeg is om het nadenken over maatregelen in deze richting te rechtvaardigen.
- Het verhogen van de waterpeilen in de omgeving levert een berekende netto stijghoogtetoeename in Zevenaar van enkele decimeters. Dit scenario staat gelijk aan het terugdraaien van de grootschalige waterhuishoudkundige ingrepen uit het verleden.
- De stijghoogte in Zevenaar zal niet significant stijgen als gevolg van mogelijke peilaanpassingen in het Rijnstrangengebied;

8 Synthese en conclusies

8.1 Diagnose

De verschillende onderdelen van het onderzoek leveren de volgende voor de zakking relevante feiten op.

- **Satelliet waarnemingen:**
Er is geen systematische significante daling geconstateerd op wijk- en gemeenteniveau. De invloed van de Betuwelijn in een areaal buiten het projectgebied van de tunnel is eveneens niet waargenomen. Dit komt overeen met het gedrag van de grondwaterstand tijdreeksen. De droge zomer 2006 is niet als een grootschalig effect zichtbaar. Klaarblijkelijk betreft het toch een beperkt aantal locaties waar de omstandigheden in samenhang tot krimp van de kleilaag hebben geleid.
- **Laboratoriumonderzoek:**
De kleilaag is onderzocht op krimpgevoeligheid. Het vochtgehalte waarbij krimp optreedt ligt in de orde van grootte van: 30-18 gewichtsprocent. In de krimpproeven is een krimp van 1 tot 1,6 mm per 50mm monsterdikte waargenomen. Bij een zeer conservatieve schatting kan dit tot 20-32 mm per meter kleidikte leiden (bij volledige uitdroging).
- **Bouwkundig onderzoek:**
Er zijn geen afwijkingen van de bouwtekeningen en de het funderingsontwerp geconstateerd. Het draagvermogen van de kleilaag is in de onderzochte gevallen voldoende. Het scheurenpatroon en de vervormingsmetingen duiden op een differentiële zetting, die veroorzaakt is door vormverandering van de funderingslaag. In het ontwerp van de onderzochte huizen is een ongelijke belasting van dragende muren geconstateerd. Funderingen op staal hebben in tegenstelling tot funderingen op palen in de pleistocene zandlaag altijd te leiden van zettingen onder invloed van het gewicht van de constructie. De zettingsberekeningen wijzen uit dat zetting onder het gewicht van de constructie en ten gevolgen van grondwaterstandsverlaging de waargenomen differentiële zetting ten dele kunnen verklaren. Uit de proeven blijkt dat krimp bij langdurige uitdroging een significante bijdrage aan de zetting kan geven. Op plaatsen waar zetting plaatsvindt hebben situaties als gedeeltelijke onderkeldering door de daardoor grote verschillen in funderingsdruk tot relatief grotere verschilzetting en schade bijgedragen.
- **Klimaat:**
Juli 2006 was bijzonder omdat een extreme verdampingsvraag samenviel met relatief lage uitgangsstijghoogten, en daarmee met mogelijk ongunstige randvoorwaarden voor capillaire levering vanuit het grondwater. We mogen er niet van uitgaan dat dit soort situaties nooit meer zullen optreden, en moeten dus rekening houden met nieuwe schadegevallen in de toekomst.
- **Grondwater ter plaatse van de onderzoekslocaties en begroeiing:**
 - De gecombineerde vocht- en grondwaterstandsmetingen wijzen op een hydraulische connectie tussen kleilaag en watervoerend pakket, en daarmee op een niet te verwaarlozen invloed van capillaire nalevering vanuit het grondwater.
 - Het dalen van de stijghoogte onder de kleilaag is weliswaar niet gunstig voor de vochttoestand in de klei, maar het is ook niet de enige doorslaggevende factor. Kritische vochtgehalten blijken bij lage grondwaterstanden in de klei ook op te treden. De mate van verdamping van bomen lijkt hier weinig invloed op te hebben.
 - Volgens de modelberekeningen met het straatmodel is de veronderstelde krimp

mogelijk onder realistische condities, maar is het resultaat van een complex van factoren. Zowel meteorologische omstandigheden als capillaire levering vanuit het grondwater zijn hierbij invloedrijke factoren. Wanneer de stijghoogte onder de kleilaag zakt wordt de uitdroging versneld en vergroot. In twee grondwaterstandmeetpunten is waargenomen dat dit ten minste enkele malen is voorgekomen. Het is niet uitgesloten dat er meer plaatsen zijn die dit risico lopen in een langdurige droge periode.

- Dit betekent dat de rol van de stijghoogte in de verzakkingsproblematiek van cruciaal belang is. Een aanpassing in begroeiing ter reductie van verdamping biedt volgens de berekeningen soelaas bij kortdurende droogten. De verdamping van de begroeiing zal in kortdurende droge perioden leiden tot lagere vochtspanningen en lagere stijghoogten, maar bij langere perioden loopt deze terug (de begroeiing verwelkt), waardoor de invloed van de begroeiing op de krimpzetting uiteindelijk zeer beperkt is.
- Bovenlokaal en regionaal grondwater in en rond Zevenaar:
 - Het is aannemelijk dat de stijghoogte in Zevenaar sinds ca. 1950 met enkele decimeters is gedaald, onder invloed van grootschalige waterhuishoudkundige ingrepen in de omgeving. Omgekeerd betekent dit dat het grootschalig verhogen van waterpeilen en het verontdiepen van watergangen in de omgeving een niet te verwaarlozen stijghoogtetoeename in Zevenaar zal kunnen veroorzaken en daarmee kan bijdragen aan het verkleinen van het risico van krimpzettingen.
 - Een blijvende beïnvloeding van de stijghoogte door de aanwezigheid van de tunnelbak van de Betuweroute is onwaarschijnlijk. Dit wordt bevestigd door de afwezigheid van dalende trends in de stijghoogte in naburige meetpunten, tussen 1996 en 2008 (Figuur 7.17). De tunnelbak blokkeert slechts een beperkt deel van het watervoerend pakket.
 - Lage rivierwaterstanden lijken niet bepalend voor lage stijghoogten in Zevenaar.
 - Een drainerende werking van waterlopen en tankgrachten op de stijghoogte in Zevenaar kon niet worden aangetoond.
 - De invloed van de huidige grondwateronttrekkingen op de stijghoogte in Zevenaar is marginaal of verwaarloosbaar.
 - De stijghoogte in Zevenaar zal niet significant stijgen als gevolg van mogelijke peilaanpassingen in het Rijnstrangengebied;

8.2 Effectiviteit van maatregelen:

De hierboven opgesomde constatering leiden tot een aantal verschillende maatregelen die het risico op zetting door krimp kunnen verminderen.

- 1) Bouwkundige maatregel: de fundering aanpassen door bijvoorbeeld palen tot in het pleistocene zand toe te passen. Deze maatregel kan de constructie onafhankelijk maken van de vochtuithouding in de klei
- 2) Stijghoogte op peil houden, uitzakking tot onder de kleilaag voorkómen.
- 3) Maatregelen die het bodemvocht onder de funderingen in kritische perioden en op kritische plaatsen op peil kunnen houden. Te denken valt aan drainage systemen. Dit vereist ook de beschikbaarheid van een voldoende grote waterbuffer. Berekening in de nabijheid van de funderingen is ongewenst omdat dit wortelgroei bevordert en daardoor op den duur een averechts effect kan hebben.
- 4) Aanpassing van begroeiing. Dit vertraagt alleen het optreden van krimp. Ook is niet goed aan te wijzen waar het wortelstelsel tot kritische situaties zal leiden.
- 5) Hetzelfde geldt voor het plaatsen van wortelwerende schermen. Omdat het vochtgehalte onder de huizen hoger is dan in de straat zullen de wortels van de bomen overwegend in de richting van de huizen groeien. Een scherm verhindert de invloed van begroeiing maar garandeert geen preventie van uitdroging en krimp.

9 Literatuur

FUGRO Rapport betreffende verzakking woningen te Zevenaar, Opdrachtnummer: 6006-0521-000, 2006

ALTERRA Rapport, De invloed van beworteling van bomen op het verzakken van funderingen van gebouwen op kleigronden, Jitze Kopinga, 2007

Berendsen, H.J.A. & E. Stouthamer, 2001. Palaeogeographic development of the Rhine-Meuse delta, The Netherlands, 2001. Assen: van Gorcum, 268 pp.

Meene, E.A. van de, 1977. Toelichtingen bij de Geologische kaart van Nederland 1:50.000. Blad Arnhem Oost (40 O). Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Mulder, E. de, M.C. Geluk, I. Ritsema, W.E. Westerhoff & T.E. Wong, 2003. De ondergrond van Nederland. Nederlands Instituut van Toegepaste geowetenschappen, Peeters, Herent, België, 379 pp.

A Bijlage: Fugro rapport 6006-0521-001 met bijlagen

Inclusief bouwkundige opnamen uitgevoerd door Triops Advies

B Bijlage: Literatuuronderzoek Alterra

DE INVLOED VAN BEWORTELING VAN BOMEN OP HET VERZAKKEN VAN FUNDERINGEN VAN GEBOUWEN OP KLEIGRONDEN.

Een overzicht van de ervaringen, achtergronden en oplossingsrichtingen opgesteld op basis van een literatuuronderzoek, uitgevoerd in opdracht van de gemeente Zevenaar.

Jitze Kopinga
(Alterra, Wageningen UR)

1. AANLEIDING EN PROBLEEMSTELLING

Eind 2006 is Alterra door de gemeente Zevenaar benaderd om een advies op te stellen over de wijze waarop bomen zoals kunnen bijdragen aan schade aan woningen als gevolg van de wateronttrekking door boomwortels aan de grond onder de funderingen.

In een aantal wijken in de gemeente is dit in de afgelopen jaren opgetreden c.q. gerapporteerd waarbij soms verbanden zijn gelegd tussen het optreden van schade en de aanwezigheid van openbaar groen c.q. straatbomen. Het recentelijk uitgevoerd onderzoek door Fugro (2006) bevat de volgende eindconclusies:

“Het optreden van zakking bij op staal gefundeerde woningen is een normaal verschijnsel en is tijdsafhankelijk. In samendrukbare grond wordt dit consolidatiezetting genoemd.

Nagegaan is of consolidatiezetting de in de zomer van 2006 in de gemeente Zevenaar gemelde schades kan veroorzaken. Berekeningen tonen echter aan dat het grootste deel van de consolidatiezetting kort na de bouw van de panden moet zijn opgetreden. Een deel van de thans zichtbare scheurvorming kan aan eerder opgetreden consolidatiezetting toegeschreven worden. Consolidatiezetting speelt thans geen rol van betekenis.

Uit het voor deze studie uitgevoerde literatuur- en laboratoriumonderzoek volgt, dat uitdroging (rijping) van klei kan leiden tot krimp van de in de in de deklaag aanwezige klei. De krimp leidt tot zettingen en heeft scheurvorming bij op staal gefundeerde woningen tot gevolg.

Uit de resultaten van het grondonderzoek en een beoordeling van de geohydrologische omstandigheden volgt dat de uitdroging van de bovenzijde van de deklaag met name wordt beïnvloed door het verschil tussen neerslag en verdamping (neerslagtekort). Het optreden van neerslagtekort is een natuurlijk proces. Gezien de extreem droge omstandigheden in de zomer van 2006 moet verondersteld worden dat verdamping door gewassen een belangrijke hoeveelheid vocht aan de bodem heeft onttrokken, terwijl vrijwel geen sprake was van aanvoer. Ten gevolge van het (ongelijkmatig) onttrekken van bodemvocht treedt een proces op waarbij het volume van de klei ten gevolge van rijping (oxidatie) afneemt.

Het onttrekken van bodemvocht en resulterende krimp hoeft niet per definitie tot scheurvorming te leiden. Dit wordt bevestigd door het schadebeeld, waaruit blijkt dat niet overal schade is opgetreden. De condities voor het ontstaan van scheurvorming in woningen is afhankelijk van een complex van factoren, waar onder bodemopbouw, fundatiewijze, belastingverschillen en stijfheid van het casco; per locatie kan de situatie verschillen.

Het is een bekend fenomeen, ook in de Nederlandse praktijk, dat situaties bestaan waarbij lage grondwaterstanden door vochtonttrekking door bomen tot zakking en scheurvorming leiden. Vanwege het grote neerslagtekort in de zomer van 2006 waren de voor dit mechanisme noodzakelijke condities in de gemeente Zevenaar aanwezig. Daarbij wordt erop gewezen dat dit in Zevenaar niet is onderzocht en niet met metingen en data is vastgesteld.

Uit een statistische analyse van peilbuisgegevens blijkt, dat de grondwaterstand in het 1^e watervoerende pakket in 2006 niet significant lager was als in de voorgaande jaren. Uit de peilbuisgegevens blijkt verder dat externe factoren, zoals permanente of tijdelijke bemalingen en barrièrewerking door de tunnelbak van de Betuweroute geen belangrijke rol spelen.”

Tevens wordt er ten aanzien van de invloed van de vegetatie op het uitdrogingsproces nog een aantal aanbevelingen gedaan:

“Uit het onderzoek is gebleken dat in droge perioden extra vochtonttrekking optreedt onder invloed van bomen, die lokaal en mogelijk met grote reikwijdte extra vocht onttrekken aan de bodem. Bomen hebben een belangrijke functie in het stedelijk gebied van Zevenaar. De exacte invloed hiervan is niet bekend, derhalve is niet goed te onderbouwen of het nodig is om maatregelen in de groenvoorzieningen te treffen. Aanbevolen wordt om een onderzoek te initiëren op basis waarvan de invloedzone van diverse typen bomen in de gemeente Zevenaar kan worden vastgesteld. Onderzoek dient zich te richten op de mate waarin krimp in klei kan voortzetten in de tijd is daarbij ook belangrijk.

Met behulp van de resultaten van 1) Monitoring van panden of locaties en 2) resultaten van onderzoek naar gedrag van vegetatie is het mogelijk om een beheersplan op te stellen.

Dit dient te leiden tot beheersmaatregelen die lokaal extra vochtonttrekking kunnen verminderen. Doelstelling is verdere rijping van kleilagen op voor verdroging gevoelige locaties te voorkomen. De uitkomsten van de in de gemeente Zevenaar uitgevoerde proefprojecten dient hiertoe te worden geëvalueerd. Om vochtonttrekking door (boom)wortels te verminderen kan bijvoorbeeld worden overwogen wortelgroei direct naast en onder de fundering onmogelijk te maken door het aanbrengen van korte schermen. Beheersmaatregelen kunnen ook bestaan uit het beïnvloeden van voeding van bomen of, in het uiterste geval, vervangen van bomen door andere typen. Geadviseerd wordt om onderzoek te doen naar de effectiviteit van dergelijke maatregelen”.

Samengevat zou dus moeten worden nagegaan óf de bomen daadwerkelijk een bijdrage leveren ten aanzien van het zakken van de funderingen en zo ja, welke bijdrage. Vervolgens komt dan de vraag aan bod op welke wijze kan worden omgegaan met de problematiek, vertaald naar (de haalbaarheid en beperkingen van) een aantal concrete beheersmaatregelen.

In onderling overleg met de gemeente is besloten dat Alterra ten behoeve van de beeldvorming op basis van een literatuurstudie een overzicht opstelt van de ervaringen die met dit fenomeen elders zijn opgedaan, de condities waaronder het kan optreden en de oplossingen die er in de loop der tijd zoal zijn ontwikkeld. Dit kan als raamwerk dienen voor het zoeken naar meer specifiek op de Zevenaarse situatie afgestemde oplossingsrichtingen. In voorliggende rapportage is getracht een overzicht te geven van de huidige inzichten en de oplossingen die inmiddels zijn ontwikkeld alsmede de eventuele beperkingen in de toepasbaarheid, min of meer aansluitend c.q. voortbordurend op eerder uitgevoerde studies naar de algemene geohydrologische en geomorfologische situatie, alsmede fysische bodemomstandigheden op enkele locaties in Zevenaar (o.a. Fugro 2006). De voorliggende rapportage heeft zich geconcentreerd op de vegetatie-aspecten met als accent de relatie tussen bomen en de uitdroging van klei. (Woning)bouwtechnische aspecten en oplossingen zijn slechts in zijn algemeenheid behandeld.

Aspecten die aan bod komen zijn:

- Hoofdstuk 1. Aanleiding en probleemstelling;
- Hoofdstuk 2. Inleiding
- Hoofdstuk 3. De verdamping van bomen (wateronttrekking aan de grond, gekoppeld aan klimaat en boomsoort (waterbalans), bewortelingspatroon);
- Hoofdstuk 4. Het gedrag van kleigronden (uitdroging, zwel en krimp);
- Hoofdstuk 5. Tegengaan van schade
Boomsoortenkeuze (vorm, grootte, waterverbruik, "agressiviteit"-algemeen);
Afstand van bomen tot gebouwen (bewortelingsdiepte en –spreiding),
Technische aanpassingen (fundering)
Beheermaatregelen (infiltratie van water, rigoureuze snoei,
wortelschermen, ontwerptechnische aanpassingen);
- Hoofdstuk 6. Risico-inschatting en onderzoek.

De rapportage sluit af met een aantal conclusies en aanbevelingen.

Waar dat relevant is wordt een koppeling gelegd met situaties die specifiek zijn voor Zevenaar. Dit is aangegeven in schuinschrift. Voor de verklaring van een aantal gebruikte begrippen (aangegeven met een cijfer achter de betreffende term) wordt verwezen naar de voetnoten in de ondermarge van de pagina's.

2. INLEIDING

Bomen kunnen op diverse manieren schade veroorzaken aan gebouwen door hun boven- of ondergrondse delen.

Afgezien van schade die kan ontstaan wanneer een boom “bezwijkt”, al dan niet gedurende een storm, en omvalt op een gebouw, kunnen bomen door de diktegroei van stam en wortels muren wegdrücken of opdrukken al naar gelang de afstand van de stam en takken tot het gebouw en de aanwezigheid van zgn. gestelwortels onder de muren van het gebouw. De funderingen van de meeste woningen zijn zwaar genoeg om de druk van de zich verdikkende wortels te weerstaan.

Indirecte schade aan gebouwen kan ontstaan doordat bomen invloed uitoefenen op de stabiliteit van de ondergrond als gevolg van wateronttrekking aan krimpgevoelige gronden zoals klei- en veengronden. Deze krimpen wanneer ze uitdrogen en zwellen wanneer ze wederom vochtig worden. Wanneer deze gronden aanwezig zijn onder gebouwen kunnen plaatselijk onder de fundering hoogteverschillen ontstaan waardoor de mechanische belasting van de fundering niet meer goed wordt verdeeld over de fundering en de funderingen en muren erboven kunnen gaan scheuren.

Dit fenomeen komt wereldwijd voor. Veel van de literatuur waarin de mechanismen en effecten worden beschreven komt uit Groot Brittannië, Australië en Canada, maar ook uit landen zoals Rusland en het verre Oosten (zie de literatuurlijst).

In Nederland is het fenomeen ook al vrij lang bekend, onder andere in verband de effecten van polderpeilverlagingen en schade aan wegverhardingen (Janssen, 1992; Wind, 1984; Bakker, et al, 1995, 1992; Van den Akker & van Putten, 1995).

Veel schadegevallen ontstaan in situaties waar bomen en struiken zich in de nabijheid van gebouwen bevinden en door hun verdamping zorgen voor extra uitdroging van de doorwortelde bodemzones. De verandering van de hoeveelheid water in een kleilaag waaraan door boomwortels water wordt onttrokken wordt bepaald door de hoeveelheid verdamping van bomen en de hoeveelheid wortels in relatie tot de totale hoeveelheid wortels die het betreffende kleivolume hebben doorworteld. Daarnaast is de verandering tevens afhankelijk van de hoeveelheid water die op andere wijze uit de bodem verdwijnt (o.a. door directe verdamping vanuit de bodem) en daarnaast van de hoeveelheid water waarmee gedurende de periode van verdamping het aan de bodem onttrokken water weer wordt aangevuld (bijvoorbeeld door de neerslag)

3. DE VERDAMPING VAN BOMEN

De hoeveelheid water die een boom verdampt is afhankelijk van het seizoen en is gekoppeld aan de referentiegewasverdamping (E-ref.)¹⁵. Voor solitair staande bomen is deze als vuistregel gemiddeld 1,5 maal de E-ref. per m² door het gewas bedekt grondoppervlak. Voor een boom is dit oppervlakte gelijk aan de kroonprojectie (= het bodemoppervlakte van de grond binnen de verticale projectie van de buitenste contouren van de kroon). Voor een solitair staande boom die in een omgeving staat waarin de atmosfeer gemiddeld droger is en er meer omgevingswarmte is, kan de verdamping zelfs oplopen tot 2 maal de referentiegewasverdamping.

De hoeveelheid verdamping is niet voor iedere boom of boomsoort dezelfde. Het is afhankelijk van zowel de hoeveelheid verdampend bladoppervlak binnen een bepaald kroonvolume als de hoeveelheid water die per eenheid bladoppervlak kan worden verdampt. Hiertussen zitten substantiële verschillen (Kopinga, 1998).

Ook is de ontwikkeling van de totale bladoppervlakte of bladmassa afhankelijk van de tijd. Bij snel groeiende boomsoorten zal een bepaalde massa c.q. kroonvolume eerder zijn bereikt dan bij langzaam groeiende soorten. Tabel 1 geeft een overzicht van de bladoppervlakte van een aantal boomsoorten gedurende de ontwikkeling van de boom.

Tabel 1. De hoeveelheid bladmassa (uitgedrukt in m²) op verschillende leeftijd bij diverse algemeen voorkomende boomsoorten. Naar: Vrestiak.(1991).

Boomsoort	Leeftijd						
	20 jaar	30 jaar	40 jaar	50 jaar	60 jaar	70 jaar	80 jaar
Veldesdoorn	35	110	180	250	310	370	420
Vederesdoorn	140	220	340	530			
Noorse esdoorn	185	435	655				
Gewone esdoorn	130	400	685	980			
Zilveresdoorn	115	555	1195	1835			
Paardenkastanje	180	455	905	1530			
Hemelboom	90	145	205	260	315		
Gewone berk	90	325	570	690			
Haagbeuk	80	225	350	455	540	610	660
Zuilvormige haagbeuk	130	390	1245				
Trompetboom	120	300	470	615			
Turkse hazelaar	165	355	425				
Beuk	115	220	340	475	625		
Gewone es	170	250	325	380	430	475	535
Pluimes	50	90	110				
Valse Christusdoorn	85	190	280	345	385		
Zwarte noot	90	180	345	585	895	1280	
Plataan	130	210	335	505	715	970	
Kerspruim	40	70	80				
Japanse sierkers	40	95	145	200	250		
Zuilvormige witte populier	85	160	250	355			
Zwarte populier	100	235	395				
Italiaanse populier	50	120	215	320			
Chinese balsempopulier	195	275	300	315			
Zomereik	100	225	330	420	480	535	565
Amerikaanse eik	210	475	660	765	780		
Witte acacia	255	410	540	640	730	795	
Treunwilg	170	285	420	570			
Honingboom	255	465	616	705			
Gewone lijsterbes	70	240					
Winterlinde	110	275	560	960			
Zomerlinde	175	275	365	445	520	590	650
Bergiep	70	165	260	355	440	520	595

¹⁵ De E-ref. is een maat voor de hoeveelheid water die een "standaard"-gewas verdampt en wordt via een rekenkundige formule afgeleid uit een aantal meteorologische parameters (luchtvochtigheid, straling).

Uitgaande van het gegeven dat de verdamping sterkt gecorreleerd is aan de hoeveelheid bladmassa van een boom én de ouderdom van de boom er in principe weinig toe doet, kan deze tabel een globale leidraad zijn voor het kiezen van bomen in de nabijheid van gebouwen op krimpgevoelige gronden om in te schatten welke boomsoorten in een bepaald ontwikkelingsstadium c.q. op een bepaald tijdstip in de ontwikkeling het meeste vocht aan de bodem onttrekken. Het blijkt reeds uit de tabel dat dit vooral de snel groeiende bomen van 1^e grootte (> 18 à 20 m hoogte) zullen zijn.

Voor wat betreft de verdamping per eenheid bladoppervlak zijn sommige soorten aanmerkelijk meer “verkwistend” dan andere. Wilg is bijvoorbeeld een uitgesproken “verkwister” en een Noorse esdoorn hoort bijvoorbeeld tot de “zuinige” categorie bij eenzelfde hoeveelheid bladmassa (zie tabel 2). Het kwantitatieve voordeel van deze zuinigheid is uiteraard minder naarmate de boom meer blad per eenheid kroonvolume heeft en dan speelt tevens de groeisnelheid bij de soortkeuze een rol. Kennis van de hoeveelheid bladmassa in de loop van de ontwikkeling van de boom én de relatieve verdamping van boomsoorten kan voor de groenontwerper zinvol zijn om in situaties waar wateronttrekking en waterbehoefte van bomen belangrijke aspecten zijn meer gericht te kiezen op bomen die minder water verbruiken maar die overigens qua groenontwerp (vorm en grootte) uiteindelijk gelijkwaardig zijn.

Tabel 2: Voorbeeld van het waterverbruik gedurende het groeiseizoen van enkele boomsoorten, als jonge boom in containerproeven, bij optimaal wateraanbod (bron: Braun, 1976)

Boomsoort	Waterverbruik (liter per boom)	Waterverbruik (liter per m2 bladoppervlakte)
Wilg cv Liempde	823	159
Populier cv Robusta	747	99
Populier cv Barn	850	97
Populier cv Oxford	657	90
Gewone es	342	96
Zwarte els	369	94
Gewone esdoorn	110	87
Noorse esdoorn	141	56

Van veel boomsoorten is nog niet onderzocht c.q. bekend wat de actuele verdamping per eenheid bladoppervlak is. Van een beperkt aantal boomsoorten zijn gegevens voorhanden uit containerproeven (Braun, 1975, zie tabel 2, Kopinga 1998). Daarnaast zijn van een beperkt aantal boomsoorten gegevens voorhanden uit bosbouwkundig onderzoek die globaal ook van toepassing zijn op solitaire bomen in het stedelijk gebied (Kopinga, 1995).

Omdat van veel algemeen voorkomende boomsoorten de nodige gegevens echter nog ontbreken zou men in de praktijk voorts nog in eerste benadering uit kunnen gaan van een gemiddelde verdamping van 1,5 maal de referentiegewasverdamping voor een “gemiddelde” boom. Dit houdt in dat men als enige “boomvariabele” uitgaat van de kroonprojectie.

Voorbeeld: bij een (gemiddelde) E-ref. van 3 mm per dag en een boom met een kroonprojectie van 60 m2 en een totaal bladoppervlakte van ca. 300 m2, verdampt deze boom dagelijks $1,5 \times 3 \times 60$ mm water = 270 mm per dag, oftewel 270 liter. Bij een doorworteld bodemvolume van 10 m3 betekent dat een wateronttrekking van 27 l/m3 bodemvolume. Is het doorworteld bodemvolume 30 m3, dan ligt de wateronttrekking per m3 3 maal lager en is de wateronttrekking 9 l per m3 bodemvolume. Wanneer er tijdens de

periode van verdamping geen water van elders wordt aangevoerd, dan is een volume van 30 m³ doorwortelde matig zware klei (vochtleverend vermogen, uitgaande van veldcapaciteit van 130 mm = 130 liter per m³) in een tijdsbestek van ca 130/9 dag = 14 à 15 dagen door de boom drooggetrokken”.

De berekeningen kunnen worden verfijnd door tevens rekening te houden met de bladmassa per boom zoals aangegeven in tabel 1, al dan niet gecorrigeerd naar de kroonprojectie, en uit te gaan van een verdamping per m² blad van $\frac{1}{4}$ maal de E-ref. (Kopinga, 1998). De vraag doet zich dan echter voor of deze nauwkeurigheid wenselijk dan wel noodzakelijk is. Enerzijds, omdat bij geringere conditie (bijvoorbeeld als gevolg van tekorten in de voorziening van voedingselementen) de bladmassa per eenheid kroonvolume als regel lager is en er onvoldoende literatuurreferenties zijn die het mogelijk maken om aan de hand de cijfers t.a.v. de bladmassa te corrigeren. Anderzijds, omdat de omvang van het totaal aan doorworteld of doorwortelbaar bodemvolume en de hoeveelheden vocht die tijdens de periode van verdamping (kunnen) worden aangevoerd nog onbekende parameters zijn of (gedeeltelijk) blijven.

De gegevens over het waterverbruik kunnen (dan ook) niet zonder enig voorbehoud worden gekoppeld aan de statistische kans op het optreden van schade.

Een illustratie daarvan vormen de opmerkelijke verschillen tussen waarden die men kan berekenen uit tabel 1 en de mate waarin boomsoorten in het verleden in Groot Brittannië waren betrokken bij schadegevallen en op basis waarvan door diverse auteurs een rangorde is opgesteld (zie tabel 4 onder hoofdstuk 5.2.). Opvallend is daarin bijvoorbeeld het gedrag van de paardenkastanje die qua wateronttrekking (gebaseerd op de hoeveelheid verdampend blad) hoog zou moeten scoren hier slechts tot de “middenmoot” behoort. De conclusie is derhalve dat bladmassa én waterverbruik in de praktijk nog niet alles zeggen over de schadekans.

Ook komen de waarnemingen van verschillende auteurs niet altijd met elkaar overeen wanneer het gaat om de hoeveelheid water die bomen van eenzelfde soort (kunnen) verdampen (o.a. Biddle, 1979; Kramer & Kozlowski, 1979).

Bovendien blijkt dat sommige soorten die in de gematigde gebieden niet excessief water gebruiken in aride en semi aride gebieden soms bekend staan als “dorstig” (Cameron & Earl, 1982). Op zich is dit verschil niet verwonderlijk gezien het gegeven dat zonnestraling de meest bepalende factor is voor de hoeveelheid water die een boom verdampt (Kopinga, 1998). Wind is daarbij van belang voor het weg“blazen” van de volledig met waterdamp verzadigde lucht vanaf het blad, maar is verder alleen van invloed (als remmende factor) bij nagenoeg windstil weer.

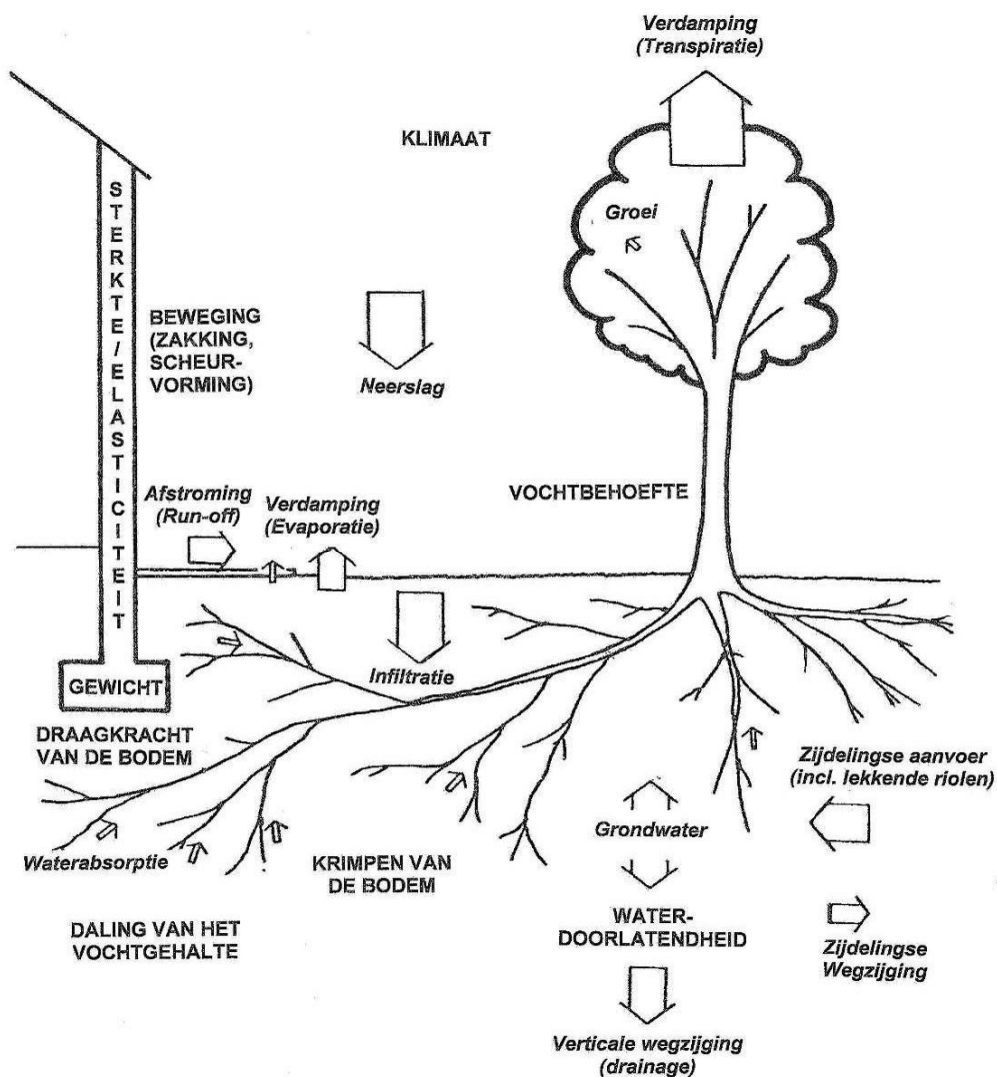
Omdat bij optimale watervoorziening de verhouding tussen verdamping min of meer lineair verloopt met de hoeveelheid verdampend bladoppervlak (o.a. Kopinga, 1998), wordt de snelheid waarmee een bepaald volume aan bewortelde grond kan worden drooggetrokken bepaald door de bladmassa én de E-ref.

Bij de boomsoortenkeuze zou men daarmee rekening kunnen houden, bijvoorbeeld door op kwetsbare plaatsen bij voorkeur te kiezen voor bomen met een lage bladmassa op half volwassen en volwassen leeftijd, bij voorkeur gekoppeld aan een lage verdamping per eenheid bladoppervlak, voor zover daarover gegevens bekend zijn.

Indien de vorm en omvang van de boom er minder toe doet, kan men er ook voor kiezen om de totale bladmassa van een boom door regelmatige snoei op een gewenst peil te houden, maar dit kent een aantal praktische beperkingen (zie verderop in dit rapport).

De verdamping van bomen (en daarmee het uitdrogingsproces van klei als gevolg van wateronttrekking door vegetatie) begint voor loofbomen pas op het moment dat de bladeren beginnen uit te lopen. Voor groenblijvende soorten, waaronder de meeste coniferen, begint dat in principe al eerder, maar in de wintermaanden is de verdamping zeer laag, (omdat dan ook de referentiegewasverdamping laag is) en is qua hoeveelheid ten opzichte van de zomermaanden gering. Hetzelfde geldt voor zeer vroeg uitlopende loofbomen. Het gegeven dat sommige soorten iets vroeger uitlopen dan andere draagt derhalve niet zoveel bij aan de totale hoeveelheid water die een boom gedurende een groeiseizoen verdampt.

De hoeveelheid water die de boom kan benutten wordt vooral bepaald door de voorraad aanwezig "hangwater" aan het begin van het groeiseizoen, de hoeveelheid neerslag en infiltratie daarvan in de bewortelde bodemzone en de hoeveelheid die kan worden aangeleverd vanuit het toestromend c.q. omhoog zijgend grondwater. Daarnaast zijn er nog andere wegen denkbaar zoals lekkende rioleringen of andere minder gebruikelijke wegen. Een vrij compleet overzicht van watertoevoer en waterverlies uit een bodem, opgesteld door Biddle (1979), is hieronder weergegeven als figuur 1.



Figuur 1: Diagram (niet op schaal) met daarin de voornaamste waterbewegingen in de bodem (schuinschrift) en factoren die in ogenschouw dienen te worden genomen bij onderzoek naar de eventuele betrokkenheid van bomen bij het ontstaan van schade aan gebouwen op krimpgevoelige gronden.

De hoeveelheid neerslag die de boom kan benutten is in eerste instantie afhankelijk van de mate van zgn. run-off van de neerslag c.q. de afstroming van de hoeveelheid water die in de bodem infiltreert. Dit wordt in het stedelijk gebied in belangrijke mate bepaald door de aan- of afwezigheid van verharding boven de wortelprojectie¹⁶ en is vooral van invloed bij infiltratiesnelheden door de verharding van minder dan 5 mm/uur.

Daarnaast is het afhankelijk van de intensiteit en duur van de neerslag en de interceptie ervan door de boomkronen. Neerslag van buien van korte duur en geringe intensiteit zal als regel in zijn geheel vanaf het bodemoppervlak verdampen, voor zover het al niet door de boomkroon wordt onderschept en direct vanaf het bladoppervlak weer verdampt. Overigens wordt deze hoeveelheid bij min of meer nauwkeurige berekening van de verdamping van bomen in mindering gebracht op de verdamping van via de wortels opgenomen water. Voor een globale berekening van de orde van grootte van verdamping gedurende een groeiseizoen dragen de zgn minder-dan-vijf-minuten regens niet zoveel bij aan de totale hoeveelheid door de bodem opgenomen neerslag gedurende een groeiseizoen.

In hoeverre boomwortels in staat zijn om het grondwater te benutten hangt af van de stijghoogte en de snelheid waarmee aan het doorworteld bodemgedeelte onttrokken water kan worden aangevuld, c.q. de zijdelingse doorlatendheid van de bodem. Deze zijn zeer afhankelijk van het bodemtype c.q. het type klei.

In zware, ongerijpte kleigronden is deze zodanig laag ($< 0,1$ cm per etmaal) dat het watertoevoer door opwaartse en zijdelingse aanvoer bij de berekeningen van de dagelijkse verdamping op nul wordt gesteld en alleen de watervoorraad in de bewortelde zone in het voorjaar in de berekening van de vochtbalans wordt opgenomen (Bakker et. al. 1995).

De rechtstreekse verdamping vanuit “zwarte” grond, of door de bodembedekkende ondervegetatie kan een belangrijke bijdrage leveren in het vochtverlies van de toplaag, tot meer dan 1 m diepte. Met name wanneer de klei krimpscheuren gaat vertonen kan het waterverlies vanuit grotere dieptes substantieel oplopen. In dit soort gevallen zou verharding op de wortelprojectie juist een gunstig effect hebben, omdat de jaarlijkse verdamping door “gemiddelde” tegelverharding boven de wortelzone gemiddeld genomen gedurende het groeiseizoen ca. 35 mm bedraagt (Atsma & in 't Velt, 1999).

Een belangrijk aspect is in hoeverre het volume aan doorwortelde klei in verhouding staat tot het overige volume aan doorwortelde grond van dezelfde boom. Wanneer dit evenredig is verdeeld, dan hoeft men dit in modelberekeningen niet te corrigeren en kan men uitgaan van de gemiddelde verdamping per m² kroon- of wortelprojectie. Indien blijkt dat slechts een beperkt gedeelte van een bodemzone, c.q. kleilaag is doorworteld, dan zal de berekening daarop moeten worden bijgesteld. Een niet te verwaarlozen aspect van boombeplantingen in het stedelijk gebied is dat straatbomen als regel de neiging hebben om weinig wortels in de richting van een wegdek te ontwikkelen en veel wortels in de richting van de voortuinen (en dus ook de funderingen). Dit heeft enerzijds te maken met de “aantrekkende” kracht van de voortuinen vanwege de betere doorwortelbaarheid en een naar verhouding gunstige voorzieningen van vocht en voedingselementen, maar anderzijds (en vooral) dat de bodem onder rijbanen doorgaans niet dan wel zeer slecht doorwortelbaar is vanwege een te hoge bodemdichtheid en een ongunstige bodemluchthuishouding. Kortom, de wortels kunnen in

¹⁶ *Wortelprojectie. Het grondoppervlakte dat valt binnen de opwaartse projectie van de contouren van de zijdelingse beworteling van een boom.*

Figuur 2: Voorbeeld van de ruimtelijke verdeling van de beworteling van een straatbomen in een straatprofiel met huizen met (boven) en zonder (onder) voortuin en bomen die staan in een 2 meter brede, met gras begroeide groenstrook tussen de rijbaan aan één zijde en een trottoir aan de andere. A geeft een bovenaanzicht van de wortelprojectie en B het aanzicht van de verticale dwarsdoorsnede van de centrale sectie (Bron: Cermak et al., 2000).

Voor situaties in Zevenaar zijn met betrekking tot de vochtbalans ondermeer van belang:

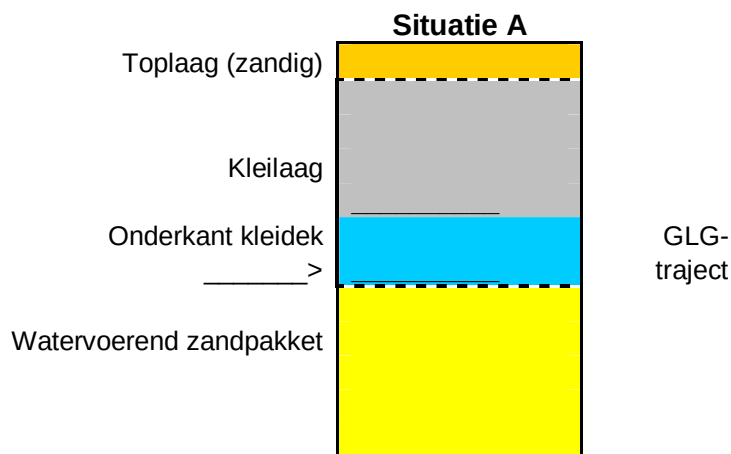
- de aanwezigheid en aard (waterdoorlatendheid) van verhardingen;
- idem, van lekkende rioleringen;
- hoeveelheid interceptie en afvoer van regenwater (wegen, daken);
- de infiltratiecapaciteit / waterdoorlatendheid van de bodem;
- eventueel aanwezige storende lagen en schijfgrondwaterstanden in verband met run-off van boven de kleilaag opgehoopte neerlag naar lager gelegen gedeelten, zoals met zand gedempte sloten of eveneens als drains werkende oude rioleringen;
- de hoeveelheid opstijging vanuit het grondwater.
- ruimtelijke verdeling van de beworteling van vegetatie

Met name de invloed van het grondwater is een aandachtspunt dat bepaalt of bomen sowieso gedeeltelijk gebruik kunnen maken van het grondwater én de mate waarin door de boom aan de grond onttrokken water buiten het groeiseizoen kan worden aangevuld. Uit eerder verkennend onderzoek door Fugro (2006, gemeente Zevenaar, opdracht nr. 6006-0521-000) kwam daarin namelijk enige verschillen naar voren:

- Sellersmaat: GLG¹⁷ reikt tot de onderzijde van de deklaag;
- Zonegge: GLG reikt tot onder de deklaag;
- Julianalaan: GLG reikt tot in de deklaag.

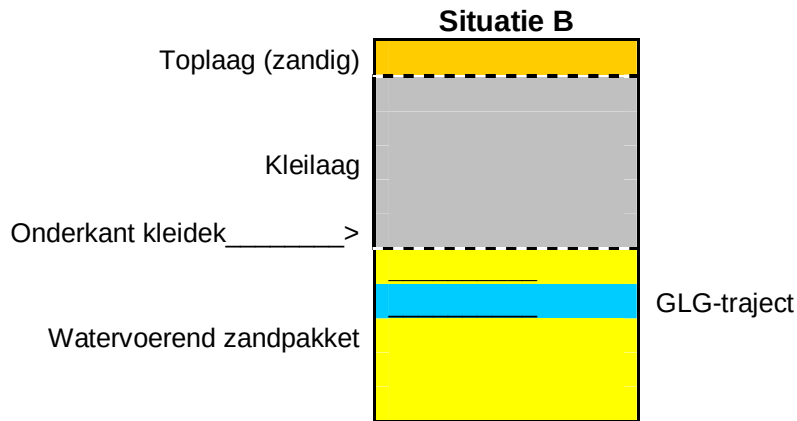
We zouden derhalve in de watervoorziening van bomen gedurende de zomer vier situaties kunnen onderscheiden:

- A Situaties waarin de laagste grondwaterstand gedurende elk groeiseizoen reikt tot in de kleilaag of direct tot aan de onderkant van de kleilaag;



¹⁷ GLG: Gemiddelde diepte, over een aantal jaren, van de laagste grondwaterstand, doorgaans optredend gedurende de zomer.

- B** *Situaties waarin de grondwaterstand continu dan wel in bepaalde jaren lager reikt dan de onderkant van de kleilaag;*



- C** *Als, A, maar dan gedurende natte zomers, waarbij tevens substantiële aanvoer van water plaatsvindt vanuit de neerslag;*
- D** *Als B, maar dan in natte zomers waarbij tevens substantiële aanvoer van water plaatsvindt vanuit de neerslag.*

Voor A geldt dat boomwortels, zelfs wanneer ze in het kleipakket de grondwaterstand plaatselijk tijdelijk verlagen doordat ze een “put” zuigen, niet dieper zullen groeien dan de bovenkant van het watervoerend zandpakket, omdat dit een permanent anaerobe bodemzone is met voldoende waterdoorlatendheid waarin het door de boom onttrokken water continu wordt aangevuld. Aanvulling van water van onderaf in de kleilaag is afhankelijk van de opwaartse waterdoorlatendheid van de bodem c.q. de nalevering tot bepaalde hoogtes vanuit het grondwater. Wanneer daarover meer bekend is kan meer in detail worden aangegeven tot welke diepte, gerekend vanaf de zandlaag de beworteling de grond droog kan trekken. Men zou er eenvoudigheidshalve echter ook van uit kunnen gaan dat de waterdoorlatendheid zodanig gering is dat de dagelijkse aanvoer van water vanuit het grondwater verwaarloosbaar is. In dat geval is de diepte waarop de boomwortels het kleipakket kunnen uitdrogen gelijk aan de dikte van het kleipakket. In hoeverre deze aanname gerechtvaardigd is zal moeten worden afgestemd op de resultaten van onderzoek in situ.

Voor A geldt eveneens dat er gedurende de winter een herbevochtiging plaatsvindt van het bodemprofiel tot aan het freatische vlak (i.c. de GHG¹⁸), vermeerderd met de stijghoogte a.g.v. capillaire werking. Er treedt derhalve geen progressieve uitdroging (inklinking) van de kleilaag in de achtereenvolgende jaren (maar wél een jaarlijks terugkerende uitzetting, c.q. zwellen). De hoeveelheid water komt weer ten goede aan de voorraad in de bodem, die de boom in het begin van het groeiseizoen kan benutten.

De periode waarover de wederom opgebouwde voorraad water is verbruikt hangt af van de boomsoort (bladmassa, tijd van uitlopen van het blad, etc.), de verdeling van de beworteling in de bodem en de tussentijdse aanvulling door watertoevoer via de hierboven aangegeven wegen.

¹⁸ GHG: Gemiddelde hoogte, over een aantal jaren, van de hoogste grondwaterstand, doorgaans optredend gedurende de winter.

Zonder bomen is de uitdroging van de bodem in hoofdzaak toe te schrijven aan directe verdamping vanuit de bodem en verdamping door overige vegetatie (o.a. gras, bodembedekkers, etc.).

Voor B geldt dat de afstand van de grondwaterstand en de onderkant van de kleilaag in belangrijke mate bepaalt wat er vanuit het zandpakket aan water kan worden nageleverd. Is de afstand tussen de laagste grondwaterstand groter dan de stijghoogte a.g.v. capillaire opstijging, dan vindt gedurende de periode dat de GLG zich heeft ingesteld zelfs geheel geen nalevering plaats.

Wanneer men mag aannemen dat het gaat om geringe hoeveelheden vanwege de geringe waterdoorlatendheid van de klei, dan zal het droogtrekken van het kleipakket qua aard en snelheid vergelijkbaar zijn met situatie A. Afhankelijk van de aanwezigheid van voldoende zuurstof in de zandlaag (NB de waargenomen "roestplekken" wijzen daarop) is het mogelijk dat zich ook in de zandlaag nog wortels ontwikkelen, maar dit heeft dan op zich weinig invloed meer op het gedrag van de kleilaag. Wél is het mogelijk dat de wortels die zich hier ontwikkelen gaan specialiseren tot "waterhalers", en de in het kleipakket aanwezige wortel meer tot "nutriëntenhalers" hetgeen een vermindering zou betekenen van de hoeveelheid water die aan het kleipakket wordt onttrokken. De literatuur geeft echter onvoldoende informatie over in hoeverre dit het geval zal zijn en (derhalve) of hierin mogelijk aanknopingspunten liggen voor technische oplossingsrichtingen zoals het aanbrengen van goed doorwortelbare grondpijlers tot in het zandpakket.

Wanneer de GHG zich buiten het groeiseizoen nog steeds onder de kleilaag bevindt is het in situatie B mogelijk dat de aanvoer van water vanuit het grondwater ontoereikend is om de gedurende de zomer drooggetrokken kleilaag wederom aan te vullen. Afhankelijk van andere wegen waarlangs gedurende de winter het water kan worden aangevuld is er kans op progressieve uitdroging van de doorwortelde kleilaag.

Dit is niet of nauwelijks te verwachten bij afwezigheid van bomen of andere verdampende vegetatie omdat de directe verdamping vanuit de bodem in de zomer als regel minder is dan het neerslagoverschot en er derhalve jaarlijks voldoende aanvulling plaats kan vinden.

Voor de situaties C en D is vooral bepalend in hoeverre de neerslag ook werkelijk kans ziet om de doorwortelde bodemzone te bereiken én de tijd krijgt om in voldoende mate in de kleilaag te infiltreren (afgezien van de waterdoorlatendheid van de klei c.q. de infiltratiecapaciteit). Dit zal in substantiële mate afhankelijk zijn van de zgn. run off, zowel via de verharding en afvoergoten als via de toplaag van de bodem (schijngrondwaterstand). Overigens is ook in de natte zomers nog sprake van een verdampingsoverschot wanneer het gaat om verdamping door bomen. Dus ook in gemiddeld natte jaren mag niet worden uitgesloten dat zich krimp- en zwelbewegingen kunnen voordoen. Gezien de in het verleden uitgevoerde inventarisaties, waarbij er vooral in de zeer droge zomer van 1976 veel schadegevallen optraden, mag men aannemen dat globaal genomen er in droge zomers meer beweging in krimpgevoelige gronden is te verwachten dan in natte jaren. Dit zal in grote lijnen ook opgaan voor de diverse situaties in Zevenaar, alhoewel de effecten minder kunnen zijn omdat de dikte van de kleilaag minder is dan in veel van de geïnventariseerde buitenlandse situaties.

Algemeen geldt dat de vertaling van de invloed van het klimaat (neerslag, verdamping) niet kan worden losgezien van de vraag in hoeverre de watertoevoer vanuit het grondwater én via andere wegen ook in droge zomers toereikend is om de verdampingsbehoefte van de vegetatie te dekken en (gedeeltelijk) te voorkomen dat de klei overmatig uitdroogt.

4. HET GEDRAG VAN KLEIGRONDEN

Bij mechanische belasting van klei treedt een eerste zetting oftewel consolidatie op die in het begin relatief snel is, maar afneemt in de tijd. Na enige tijd is de zetting in evenwicht met de belasting en is het geheel gestabiliseerd vooropgesteld dat het watergehalte constant is. Dit is niet het geval in gronden waarin sprake is van een substantiële (al dan niet seizoensgebonden) grondwaterbeweging of verandering van het watergehalte vanwege vochtonttrekking door de verdamping van vegetatie die de klei heeft doorworteld. Hierdoor ontstaat een volumereductie die binnen een bepaald vochtigheidstraject min of meer gelijk is aan het volume van het onttrokken water.

In kleigronden licht de hoeveelheid waarop een vegetatie nog invloed kan uitoefenen door wateronttrekking tussen een pF-waarde¹⁹ van 0 en 4,2. De hoeveelheid water waar het dan om gaat verschilt per grondsoort. Voor zand is dit een watergehalte (v/v) tussen 0,41 en 0,02; voor zavel tussen 0,50 en 0,10 en voor zware klei (komklei) tussen 0,58 en 0,35. De maximale theoretische krimp van zware klei als gevolg van de aanwezigheid van vegetatie is dan 22 %. Wanneer men uitgaat van niet geheel waterverzadigde bodems, maar bodems op veldcapaciteit²⁰ die zich boven de volcapillaire zone bevinden, dan ligt de variatie van het watergehalte onder invloed van vegetatie voor een zware klei tussen 0,51 en 0,35, waarbij de maximale theoretische krimp 15 % is.

Tussen de diverse kleigronden bestaan verschillen in krimp als gevolg van waterverlies. Een illustratie daarvan is weergegeven in tabel 3.

Welke positie de kleigrond in Zevenaar hierin inneemt is niet exact aan te geven vanwege de variatie die is gevonden in de plasticiteitsindex van de klei in de boringen op de drie onderzoekslocaties Julianalaan, Zonégge en Sellersmaat en die uiteen liepen van 30 tot 63 (Fugro, 2006). Dit zou ruwweg overeenkomen met een PLE die varieert tussen ca. 11 en ca. 18.

¹⁹ pF-waarde: De logaritme (log-10) van de drukhoogte. Dit is een maat voor het vochtgehalte oftewel de uitdrogingstoestand van een bodem. Bij pF = 0 is de bodem geheel met water verzadigd, bij pF = 4,2 is de bodem zodanig droog dat planten er geen water meer aan kunnen onttrekken.

²⁰ Veldcapaciteit: Een bodem is op veldcapaciteit bij een pF-waarde van 1, waarbij als gevolg van de zwaartekracht geen neerwaartse waterbeweging meer plaatsvindt in de bodem en de bodemporiën gedeeltelijk met water en lucht zijn gevuld.

Tabel 3: Overzicht van de krimpgevoeligheid van een aantal in Nederland voorkomende kleigronden. PLE (Potential Linear Extensibility) is een maat voor het potentiële zwel- en krimpvermogen van de bovenste meter van een bodemprofiel (Bron: Bronswijk & Evers-Vermeer, 1987)

Profiel nummer	Naam	Bodemtype	PLE voor het traject van 0 tot -16 000 (cm)
1	Oosterend	kalkloze matig zware klei, grasland	13,1
2	Nieuw-Beerta	kalkrijke matig zware klei, bouwland	15,3
3	Nieuw-Statenzijl	kalkrijke zeer zware klei, bouwland	13,3
4	Schermerhorn	kalkrijke lichte klei, bouwland	11,3
5	Dronten	kalkrijke matig zware klei, bouwland	12,7
6	Bruchem	kalkloze zeer zware klei, grasland	11,6
7	Kats	kalkrijke lichte klei, bouwland	11,4

5. HET BEPERKEN OF VOORKOMEN VAN SCHADE

Het Britse Building research Establishment (BRE), dat ondermeer zich bezig houdt met het opstellen van richtlijnen voor bouwtechniek heeft vanaf medio jaren '70 een aantal praktische adviezen ontwikkeld die ruwweg zijn in te delen in boomgerichte, ontwerpgerichte en constructie (object)gerichte maatregelen (Reynolds, 1979).

Een aantal van deze richtlijnen zijn nog onverkort geldig, maar kunnen op basis van de huidige stand van kennis op sommige punten worden verfijnd of uitgebreid. De belangrijkste aspecten die een rol speelden (en nog steeds spelen) in deze richtlijnen zijn hieronder aangegeven en kort beschreven.

5.1. Vorm en omvang van de volwassen boom

In algemene zin zijn de vorm en grootte van de volwassen boom van belang en de groeikracht c.q. de snelheid waarmee een bepaalde omvang wordt bereikt. Dit wordt bepaald door een samenspel van meerdere groeiplaatsinvloeden, maar is in beginsel afhankelijk van de soort. Niet zozeer de hoogte en breedte van de kroon zijn dan determinerende factoren, gezien de variabiliteit in bladmassa, maar veeleer de leeftijd waarop een boom een bepaalde hoeveelheid verdampend bladoppervlak heeft gevormd. Hiermee kan rekening worden gehouden in het ruimtelijke groenontwerp.

5.2. De “agressiviteit” van de boomsoort in algemene zin

Uit inventarisaties die door de jaren heen in onder andere de UK zijn uitgevoerd zijn boomsoorten ingedeeld in de frequentie waarmee ze schade aan woningen hebben veroorzaakt. Op basis hiervan zijn bomen ingedeeld in bepaalde categorieën of rangorde van agressiviteit. Deze zijn in de loop der jaren regelmatig getoetst en aangepast. Een voorbeeld, opgesteld door McCombie(1979) op basis van eigen cijfers en die van de National House Building Council (NHBC) en de onderzoeker Driscoll (1983) is weergegeven in Tabel 4.

Ondanks dat dit een statistische indeling is waarbij verder geen of slechts beperkt rekening is gehouden met bepaalde randvoorwaarden, geeft dit een algemene indruk om welke boomsoorten het zoal gaat.

Het gaat in dit geval echter om een globale indicatie (en niet meer dan dat!), omdat enerzijds in de tabel zelf wat tegenstrijdigheden zitten (met als extreem de notering “H” van de NHBC voor de, zowel door Driscoll als McCombie laag gewaardeerde Cypres. Ook blijkt dat wanneer men deze rangorde namelijk vergelijkt met de literatuur over het waterverbruik van bomen (zie o.a. Biddle, 1979 en Cameron, 2001) Zomereik beduidend lager zou moeten scoren dan Populier en Wilg. De tabel geeft dus geen (of onvoldoende) indicatie over de “agressiviteit” in relatie tot het waterverbruik van bomen.

Tabel 4: De "agressiviteit" van boomsoorten ten aanzien van hun betrokkenheid bij schade aan woningen op krimpgevoelige gronden, ingedeeld naar rangorde van meest "agressief" (laagste cijfer) tot "weinig agressief" (hoogste cijfer). In de middelste kolom is dit aangegeven door een waardering: H = hoog; M = Intermediair; L = Laag. (Bron: McCombie, 1979)

Boomsoort	Driscoll	HNCB (*)	Combie
Zomereik	1	H	1
Populier	2	H	2
Linde	3	M	5
Gewone es	4	M	3
Plataan	5	M	10
Wilg	6	H	7
Iep	7	H	?
Meidoorn	8	M	4
Esdoorn	9	M	14
Kers / Pruim	10	M	11
Beuk	11	L	6
Berk	12	L	13
Vlier	13	M	15
Cypres	14	H	16
Paardekastanje	—	M	8
Appel / Peer	—	M	9
Robinia ("acacia")	—	M	12

5.3. Zijwaartse spreiding, omvang en diepte van de beworteling

Op de zwaardere gronden is het natuurlijk bewortelingspatroon van bomen als regel wat oppervlakkiger dan op de lichtere gronden. Dit heeft ondermeer te maken met de gemiddelde diepte van een voldoende zuurstofdiffusie in de bodem.

Als zijwaartse spreiding wordt op kleibodems doorgaans uitgegaan van een diameter van de wortelprojectie van bomen in het "vrije veld" van 2 – 4 maal de boomhoogte. Voor de meeste boomsoorten bevindt 80 % van de wortels zich in de toplaag van ca 3 dm dikte, en overige 20 % in de rest van de bodem tot 1 à 1,5 m diepte. Een klein gedeelte groeit echter door tot 2 à 3 meter en soms zelfs dieper. De diepte waarop het vochtgehalte van de grond door boomwortels wordt beïnvloed reikt tot 3 à 4 meter, maar soms dieper. Dit zal afhankelijk zijn van de omvang van de boom. Hiervoor zijn diverse modellen opgesteld, o.a. door Cameron (2001), en verfijningen daarvan (o.a. Jaksa et al. 2002).

NB. In Zevenaar zal de bewortelingsdiepte van de bomen vooral worden bepaald door de diepte van de zomerse grondwaterstand (GLG) in het zandpakket onder de daarboven liggende kleilaag en zal op veel plaatsten niet dieper zijn dan de onderkant van de kleilaag (max. ca. 2,5 m beneden maaiveld).

Wanneer het gaat om "veilige" afstanden tot gebouwen, ongeacht de bewortelingsdiepte, is op basis van een uitvoerige landelijke inventarisatie in de UK door Cutler & Richardson (1989) een lijst opgesteld met schadekansen van een aantal veel voorkomende boomsoorten op bepaalde afstanden tot gebouwen. Deze is weergegeven in tabel 5.

Tabel 5: Schadekarakteristieken van verschillende boomsoorten op kleigronden (Bron: Bakker et al., 1995)

Boomsoort	hoogte (m)	50% schade binnen (m)	90% schade binnen (m)	% schade % aanplant	beworteling
populier	25	12	20	8,7/3,0	diep
wilg	15	7	18	5,7/4,5	matig diep
iep	20	8	19	2/ ?	diep
eik	16-23	9,5	18	11,5/2	diep
es	23	7	13	7 /3	diep
esdoorn	17-24	6	12	8,3/13,9	diep
appel peer	10-12	4	8	6 /7	ondiep
berk	12	4	8	1,5/4,9	ondiep
beuk	20	7	11	1 /1	ondiep
linde	20	6	11	8,2/6,4	matig diep
meidoorn	10	5	8,7	4,0/3,5	diep
kastanje	16-25	7,5	15	2,9/2,2	matig
plataan	30	5,5	10	11/13,7	matig
prunus	12	3	7,5	6 /15	ondiep
robinia	18-20	7	10,5	3 /1,8	diep ?
sorbus(spec.)	12	5	9,5	2,4/9,4	ondiep

Ook hierbij moet met klem worden opgemerkt dat het gaat om statistische kansen en dat de tabel vooral tot doel heeft om boomsoorten onderling te vergelijken. In hoeverre (als percentage) een afstand wel of niet als "veilig" kan worden aangemerkt kan op basis van deze tabel niet worden aangegeven. Wanneer men bijvoorbeeld een populier aanplant op meer dan 20 meter afstand van een gebouw, ervan uitgaande dat 90 % van alle schadegevallen optreden bij bomen die op minder dan 20 m afstand zijn geplant, dan zou dat kunnen worden opgevat als dat de kans op schade daarmee is gereduceerd tot 10 %. De vraag is echter 10 % van wát? Bomen die op geringere afstand staan, maar geen schade hebben veroorzaakt zijn in het onderzoek namelijk niet meegenomen. Bovendien gaat deze tabel voorbij aan de eventuele invloed van eenzijdige ontwikkeling van de wortelprojectie (nl. naar de bebouwing toe) en ook betreft het data die zijn ontleend aan situaties die gemiddeld genomen kunnen afwijken van de specifieke Zevenaarse situatie, zoals de eventuele invloed van grondwater en verschillen daarin (zie elders in dit rapport. Ook verschillen de geïnventariseerde woningen gemiddeld genomen met die van Zevenaar op aspecten zoals funderingsdiepte, ouderdom van de fundering en de dikte van de onderliggende kleilaag, enzovoorts.

5.4. Aanpassen funderingsconstructies

Omdat dit rapport is opgesteld vanuit een vegetatie-optiek zal niet uitgebreid worden ingegaan op de diverse mogelijkheden die er zijn om door middel van het verbeteren van de funderingsconstructie (verdere) schade aan gebouwen te voorkomen. Ze zullen hieronder slechts kort worden aangegeven. Voor meer gedetailleerde informatie over de diverse mogelijkheden wordt verwezen naar o.a. Archi info 124 (2004), De NHBC standards 4.2. (1995, 50 pag. inclusief diagrammen en tabellen, verkrijgbaar bij The National House Building Council, Chiltern Avenue, Amersham, Bucks, HP6 5AP, England), de British Standard 5837 (2005) en CBD-184 van de National Research Council Canada (2005).

Bij gebouwen met funderingen die 3 meter of dieper zijn, zijn tot dusver nauwelijks schadegevallen gerapporteerd (Pryke, 1979).

NB. Voor Zevenaar is dit gegeven niet of nauwelijks relevant, omdat de funderingen dan al op de meer draagkrachtige zandbodem staan en in de praktijk schade eigenlijk alleen te verwachten is in situaties waarin er nog een laag klei tussen de onderkant van de fundering en het zandpakket aanwezig is. Dieptes waarop deze voorkomen bevinden zich binnen 3 m minus maaiveld.

Het plaatsen van paalfunderingen. Gebruik hiervan als curatieve methode wordt weinig toegepast vanwege technische en financiële beperkingen/overwegingen. Overigens zijn er behalve het gebruik van paalfunderingen meerdere technische mogelijkheden om de starheid, draagkracht en mechanische samenhang van een bestaande fundering te vergroten.

In het algemeen wordt ontraden om bij het ontwerp van een gebouw, en vooral bij uitbouw en aanbouw, verschillen aan te brengen in de diepte waartoe de fundering in de grond steekt. Hiermee is ook de dikte van de nog onder de fundering aanwezige kleilaag doorgaans verschillend, waardoor bij uitdroging er sowieso krachtverschillen zullen ontstaan.

5.5. Vernatting van de kleilaag

Vanwege gevallen die bekend zijn van indirecte schade aan funderingen op krimpgevoelige gronden als gevolg van lekkende rioleringen en zwembaden, wordt het permanent nathouden van de grond of het “opzetten” van een (schijn) grondwaterstand wel eens aangevoerd als mogelijkheid om schade tegen te gaan. Voor het nathouden van de grond wordt doorgaans een zgn. omgekeerde drainage aanbevolen boven een oppervlakkige toediening (beregening) van water, maar de kwetsbaarheid c.q. duurzaamheid hiervan worden gezien als nadelen. Afhankelijk van de situatie en mogelijkheden ter plaatse zijn diverse benaderingen denkbaar, zoals een voldoende diepe greppel gevuld met goed waterdoorlatend zand die permanent wordt nat gehouden met van elders aangevoerd oppervlaktewater. De voorwaarde hierbij is uiteraard dat de aanvoer een continu karakter moet hebben anders geeft het enkel enige vertraging in het tijdstip waarop de grond tijdens droge zomers uitdroogt (en niet meer dan dat). Tevens moet er rekening mee worden gehouden dat de grond wellicht enige tijd nodig heeft om zich in te stellen op de nieuwe situatie (dus ook rekening houden met swelling van progressief uitgedroogde bodemzones). Overigens zal met min of meer permanente bevoeiing of inundaties van te voren moeten worden vastgesteld in hoeverre het negatieve gevolgen kan hebben op de vegetatie (“verzuipen” van bomen met als gevolg wortelsterfte en vermindering van de stabiliteit).

Omdat een onderbegroeiing van lage vegetatie (kruiden, gras, heesters) eveneens een forse bijdrage levert aan de uitdroging van de bodem, ook op plaatsen waar zich inmiddels boomwortels bevinden, zal de snelheid van uitdrogen van de bodem door de verdamping hoe dan ook kunnen worden vertraagd door het regelmatig besproeien van de vegetatie, met name gedurende droogteperioden. Deze maatregel is echter organisatorisch kwetsbaar.

Een vraag t.a.v. het van bovenaf toedienen van water blijft vooralsnog of vanwege de geringe waterdoorlatendheid van klei voldoende water in de kleilaag kan doordringen om het droogtrekken ervan door boomwortels te voorkomen. Dit zal in belangrijke mate afhankelijk zijn van de waterdoorlatendheid van de toplaag van het kleipakket die door bijvoorbeeld rijpingsprocessen, of een andere samenstelling c.q. zand-klei verhouding aanmerkelijk gunstiger kan zijn dan de dieper liggende, nog ongerijpte klei. Dit zal nader moeten worden bekeken alvorens hierover iets meer in algemene zin kan worden gezegd.

5.6. Het ingrijpen in de hoeveelheid bladoppervlak van bomen door snoei

Reductie van het bladoppervlak zal resulteren in een min of meer evenredige afname van de hoeveelheid verdamping.

Bij de keuze om bomen te snoeien zal men overigens worden geconfronteerd met een aantal praktische vragen c.q. beperkingen:

Het snoeien zal met enige regelmaat moeten worden herhaald om het beoogde effect te handhaven omdat de boom zal trachten zijn normale kroonumfang te herstellen. Dit trekt een extra wissel op het onderhoudsbudget en de arbeidsorganisatie.

Daarbij komt ook nog dat niet iedere boom snoei even goed verdraagt en dat rigoureuze snoei aanleiding kan zijn tot de vorming van breukgevaarlijke takken die op korte of langere termijn een gevaar voor de omgeving kunnen opleveren.

Als vuistregel geldt dat daaraan verbonden extra beheermaatregelen noodzakelijk gaan worden wanneer de hoogte van een boom ongeveer gelijk is geworden aan de afstand tot het gebouw

5.7. Aanleg van wortelschermen ("root barriers")

Over de toepassing van wortelschermen is inmiddels het nodige bekend (o.a. Costello & Jones, 2003, Kopinga, 1994). De meest algemeen gebruikte schermen bestaan uit in de grond ingebrachte platen of folies van kunststof materiaal. In de laatste categorie gaat het om niet waterdoorlatende folies, of folies die enigszins waterdoorlatend zijn zoals de zgn. geotextielen.

De effectiviteit van de wortelschermen hangt sterk af met de vraag of boomwortel in staat zijn om er op kortere of langere termijn onderdoor of overheen te groeien. In de praktijk betekent dit dat de onderzijde van de schermen bij voorkeur dieper moeten reiken dan het niveau van de permanent anaerobe zone en dat de bovenzijde beschermd moet worden tegen onder andere beschadigingen en weersinvloeden die de levensduur verkorten. Met name door boomsoorten zoals Populier, Robinia en Wilg kan dit scherm dan in korte tijd worden overgroeid.

Afhankelijk van de situatie zal moeten worden bekeken in hoeverre aan deze voorwaarden kan worden voldaan. In alle gevallen dienen de schermen tijdens het inbrengen niet te worden beschadigd omdat iedere opening, hoe klein ook, boomwortels de kans geeft om door de schermen heen te groeien.

Er wordt in het algemeen geadviseerd om de schermen in de directe nabijheid van het te beschermen object te plaatsen en niet in de buurt van de boom. Voor de hand liggende redenen daarvoor zijn dat het beperken van de doorwortelbare ruimte van een boom niet ten goede komt aan een goede groei en ontwikkeling (m.a.w. hoe verder van de boom, hoe meer er van de benodigde doorwortelbare ruimte overblijft) én dat het voor de boom doorgaans weinig schadelijk is wanneer op enige afstand wortels worden verwijderd wanneer blijkt dat bij het plaatsen van de schermen schade aan wortelgroei niet geheel kan worden voorkomen.

5.8. Chemische barrières

In de USA is gedurende de afgelopen decennia onderzoek uitgevoerd naar het effect van toevoeging aan wortelschermen van wortelgroei remmende chemicaliën zoals koperverbindingen. Ze worden op beperkte schaal toegepast in onder andere de boomkwekerij. Toepassing daarvan in de toekomst in EU-landen ligt echter niet in de lijn der verwachtingen gezien de stand van zaken en ontwikkelingen op het gebied van milieuwetgeving.

5.9. Ontwerptechnische aanpassingen van de groene infrastructuur

De beworteling van bomen in het vrije veld en dus ook de invloedzone van wateronttrekking kan aanmerkelijk verder reiken dan de kroonprojectie, ook bij niet zuilvormige bomen. Hierbij kan overigens nog een fors deel van de wateronttrekking worden toegeschreven aan een onderbegroeiing van struiken of laagblijvende vegetatie.

Ook de reeds eerder genoemde éézijdigheid waarmee boomwortels zich in een straatprofiel kunnen ontwikkelen is een belangrijk punt van aandacht (overigens ook i.v.m. de problematiek van kabels, leidingen en boomwortels).

Om te weten waar de boomwortels zich zoal ontwikkelen of kunnen ontwikkelen (zodat men in dat opzicht niet voor verassingen komt te staan), wordt in het groenontwerp steeds meer uitgegaan van het creëren van een bekend volume aan doorwortelbare ruimte dat voldoende is voor de boomgroei en waarbuiten boomwortels zich niet of nauwelijks zullen ontwikkelen. Dit laatste houdt tevens verband met de beperking van de schade door boomwortels aan ondergrondse nutsvoorzieningen en andersom (schade aan de beworteling a.g.v. graafwerkzaamheden). Illustratieve voorbeelden zijn beschreven door o.a. Van Loon (2002). Deze ontwerpen hebben het bijkomend voordeel dat wanneer wortels die zich desondanks in een ongewenste richting ontwikkelen worden verwijderd de nadelige gevolgen voor de boom beperkt kunnen blijven.

Voor het “absoluut” verhinderen van wortelontwikkeling in een bepaalde gebied van de bodem zal men gebruik moeten (blijven) maken van mechanische of fysieke barrières.

6. RISICO-INSCHATTING EN ONDERZOEK

6.1. Algemeen

Tabel 6. Overzicht van problemen en inschatting van risico's (bron: Canadian Mortgage & Housing Corporation, publicatie CE-31, 2005)

Bodemfactoren	Mate van gevoeligheid voor krimp	Geen krimp -> niet of nauwelijks schade
	Vochtvoorziening	Bij lagere Gt waarden minder kans op schade
	Dikte van de krimpende laag onder de fundering	Hoe dunner hoe minder krimp c.q. zakkings
	Waterdoorlatend vermogen	Minder krimp naarmate de verdamping van een boom gedurende het groeiseizoen kan worden aangevuld door toestroming of opzijing van water van elders uit de bodem
	Progressieve uitdroging	Onvoldoende bevochtiging gedurende de winter, "blijvende" krimp. Oppassen bij het wegnemen van de oorzaken i.v.m. zwelkrachten
Boomfactoren	Bewortelbare ruimte	Hoeveelheid wateronttrekking op een bepaalde plek is positief gerelateerd aan de hoeveelheid wortelmassa ten opzichte van de overige wortelmassa
	Afstand boom – object	De kans op schade neemt aanzienlijk af wanneer de afstand tot de boom meer is dan de hoogte van de volwassen boom
	Boomsoort	Zie de boomsoortenlijst
	Afmeting van de boom	De kans neemt toe naarmate de boom ouder (en groter) wordt. Gaat niet op voor frequent gesnoeide bomen.
	Groeicondities	Risico kan lager zijn wanneer de meeste wortels in richtingen vanaf het object hebben ontwikkeld n.a.v. verschillen in bodemgesteldheid of bodemdichtheid (storende lagen, groeiplaatsverbetering, reeds aanwezig barrières)
	Beheer-historie	Hoe is de boom onderhouden? (o.a. snoei, regelmatig watergeven, etc.)
Constructiefactoren	Ouderdom	Oudere funderingen zijn vaak wat zwakker dan nieuwe funderingen
	Type	Voorbeeld: gewapend beton is sterker dan grof gemetselde bakstenen
	Gevoeligheid voor zgn. verschilzetting	Naarmate de structuur meer (kleine) drukverschillen kan opvangen is het risico lager
	Funderingsdiepte	Bij diepte groter dan 1 m is de kans op schade al veel lager
	Verharding op de wortelprojectie	Bij een beter infiltratie van regenwater in de bewortelde zone is de kans op schade lager
Overige factoren	Eigendomsituatie	Van wie is de boom, wie dekt de schade? Etc.
	Waarde/voordelen van bomen	Een boom verhoogt de verkoopwaarde van een woning / draagt in diverse opzichten bij aan de ecologische, fysische en psychische kwaliteit van de leefomgeving

	Veiligheidsaspecten	Is er een kans dat het gebouw onbewoonbaar wordt door de schade?
	Andere oorzaken van het vochtig of droog worden van klei	Lekkende, waterbevattende systemen/constructies, grondwaterstandsveranderingen (vernatting/verdroging)
	Andere schade-oorzaken dan het krimpen van klei	Afschuiving, trilling (o.a. door verkeer en bouwwerkzaamheden), etc.

6.2. Veldwaarnemingen

Scheurvorming van gronden op maaiveld bij uitdroging is een indicatie dat de bodem krimpgevoelig is en dat ook zal doen bij uitdroging. Scheurvorming in gebouwen wijst er doorgaans op dat dit het geval is.

De aanwezigheid van fijne boomwortels onder een fundering is een indicatie dat er bomen in het spel zijn, maar indien meerdere boom- en struiksoorten in de directe nabijheid aanwezig zijn is nadere identificatie van de soort (onder meer aan de hand van de anatomie van de wortels) noodzakelijk om vast te stellen welke boom de schade veroorzaakt.

De deformatie van een constructie en het patroon van scheurvorming (en de geschiedenis daarvan!) moet een consistente relatie hebben met de locatie van de boomwortels en de ontwikkeling daarvan in de achterliggende jaren. Scheuren en andere defecten moeten de te verwachten seizoensgebonden variatie vertonen zoals het wijder worden gedurende de zomer en het nauwer worden gedurende de winter.

Het kan zinvol zijn om gebouwen op zgn. paspunten in te meten, maar dan moet de veronderstelling gerechtvaardigd zijn dat het gebouw "waterpas" was toen het werd gebouwd.

De omvang en uitgestrektheid van het wortelstelsel van een boom is in de praktijk nauwelijks te voorspellen. Belangrijk is de zijwaartse verspreiding van de beworteling naar plaatsten waar ze zich gemakkelijk naar beneden toe onder de funderingen kunnen ontwikkelen. Pas bij voldoende informatie daarover, alsmede over die van de (doorgaans eenvoudig waarneembare) bovengrondse ontwikkeling van een boom kan een enigszins nauwkeurige inschatting worden gegeven van de wezenlijke bijdrage van de boom aan de veranderingen van het vochtgehalte van de bodem. Afhankelijk van de vraagstelling/diagnose, kan het noodzakelijk zijn om te onderzoeken welke boom(soort) de "schuldige" is, zowel bij leven (krimpen) als dood (wederom zwellen van een progressief uitgedroogde grond). Aanvullend onderzoek naar de aard en beworteling van onder de fundering aangetroffen wortels kan dan inzicht geven in de boomsoort en de mate van levende wortels (o.a. Cutler, 1974; Miller & Pye, 1999). De bewortelingsdiepte (en ook de zijwaartse verspreiding) van bomen wordt sterk bepaald door bodemomstandigheden zoals dichtheid en gasdiffusieweerstand (c.q. anaërobie) en de reactie daarop verschilt per boomsoort.

Vroeger werd verondersteld dat boomwortels niet dieper groeien dan de permanent gereduceerde bodemzone die in veel gevallen wordt bepaald door de hoogte van het freatische vlak en de seizoensfluctuaties daarin. In krimpgevoelige kleigronden, kunnen bomen echter zelf een plaatselijke daling van het grondwater veroorzaken en afhankelijke van de daarmee gepaard gaande zuurstoftoetreding aanmerkelijk dieper wortelen. De eigenschap om een dergelijk "put" te veroorzaken en de snelheid waarmee de wortels zich vervolgens dieper kunnen ontwikkelen verschilt per boomsoort. Zo zal een Beuk (*Fagus silvatica*) daar als regel meer moeite mee hebben dan een populier (*Populus spp.*). Één en ander zal ook afhangen van de mate waarin bomen in staat zijn om in anaërobe bodemzones nog wortels te ontwikkelen. Wortels van Populier (*Populus spp.*) en els (*Alnus spp.*) zijn bijvoorbeeld in staat om nog enige decimeters door te groeien in een anaërobe bodemzone en het gegeven dat bomen plaatselijk zelf de grondwaterstand omlaag kunnen trekken was al

langer bekend en Bakker et al. (1985) stelden vast dat de verlaging door Wilg op klei in het groeiseizoen een meter of meer kan bedragen.

NB. Voor de meeste situaties in Zevenaar zal de diepte van de "put" die de bomen kunnen trekken beperkt zijn tot de dikte van de kleilaag vanwege omdat de watertoevoer vanuit de zandlaag de verdamping van de boom ruimschoots dekt (en de boom de waterstand hierin dus niet kan verlagen).

6.3. In wat voor mate zijn bomen primaire oorzaak van schade?

Voor het kunnen "verdedigen" van de aanwezigheid bomen in het straatprofiel zou een beter inzicht verkregen moeten worden in de gevallen en situaties waarin bomen werkelijk de primaire oorzaak van schade zijn (geweest) en in welke ze slechts een beperkte bijdrage hebben geleverd of zelfs geheel niet. Het is duidelijk dat bomen een belangrijke oorzaak zijn van schade dan wel een substantiële bijdrage daaraan vormen, maar dit is niet per definitie altijd het geval.

Biddle (1979) stelde op basis van eigen inventarisaties in de UK vast dat van 200 binnengekomen schademeldingen van situaties waarbij bomen bij gebouwen stonden in 44% van de gevallen bomen de primaire oorzaak waren, dat ze in 28% gedeeltelijk bijdragen aan de schade en dat in 16% bomen op geen enkele wijze bij het ontstaan van de schade waren betrokken. In 12% van de gemelde gevallen was er geen sprake van schade, maar hadden de huiseigenaren al uit een zekere "voorzorg" een vermeende schade opgevoerd.

Één en ander betekent dat weliswaar in 72% van de gevallen bomen op de een of andere wijze hebben bijgedragen aan het ontstaan van schade maar Biddle plaats hierbij de kanttekening dat de genoemde 12% eerder te laag dan te hoog kan zijn. Alle gevallen waarin geen oorzaak konden zijn (omdat er geen bomen in de buurt stonden) werden namelijk niet altijd door huiseigenaren gemeld in de tijd dat dit onderzoek speelde, omdat ze ervan uitgingen dat ze sowieso niet in aanmerking kwamen voor een vergoeding van de schade (omdat bij veel verzekeringen alleen uitzicht was op verhaal van schade wanneer die zou zijn veroorzaakt door bomen).

6.4. Bodemeigenschappen

Zeer belangrijk is om te weten welke (klei)bodems een krimp- en zwelgedrag vertonen en in welke mate, zodat men de constructie van een fundering daarop kan afstemmen. Het krimp- en zwel gedrag van kleigronden is een vrij complexe materie, onder meer door het verschil in gedrag van de verschillende typen kleigronden die er zijn. Dit heeft op zijn beurt weer te maken de chemische structuur van de klei en de granulaire samenstelling. In het laboratorium kan de lineaire zakking, ook wel aangeduid als PLE (= Potential Linear Extensibility) op diverse manieren worden bepaald c.q. berekend (zie Bakker et. al., 1995).

Afhankelijk van de "verfijning" die men wenst kan wellicht ook worden volstaan met alleen wat globale gegevens uit beschikbare bodemkaarten. Deze zijn echter beperkt t.a.v. informatie over de diepte van de kleilagen en bij onvoldoende informatie, met name over grootschalige groundbewerkingen en waterstandveranderingen die zich in het verleden hebben voorgedaan zal dit ter plekke nader moeten worden vastgesteld.

Overigens zal niet alleen bij nieuwbouw, maar ook in gevallen waarin een verdere zakking van een fundering moet worden ingeschat (o.a. om de noodzaak tot ingrijpen af te wegen tegen de totaal te verwachten schade) hoe dan ook de dikte van het nog aanwezig kleipakket

tussen de fundering en een eventueel aanwezige draagkrachtige ondergrond moeten worden vastgesteld.

In reeds lang bestaande situaties met inmiddels reeds grote bomen zou de kans op progressieve uitdroging moeten worden verkend. Een veel belangrijker effect van een drastische reductie van de bladmassa, of in het extreme geval het vellen van een boom is de kans dat een in de loop der jaren progressief uitgedroogde klei weer nat wordt en gaat zwellen waardoor juist als gevolg daarvan (opnieuw) scheurvorming kan optreden in een fundering die zich inmiddels heeft “gevormd” naar de zich geleidelijk voorheen ingestelde situatie. Het zwellen als gevolg van het wederom nat worden kan, al naar gelang de situatie vele jaren in beslag nemen, soms meer dan 25 jaar (Biddle, 1979) en de krachten die een zwellende klei kan uitoefenen kunnen tot 4 MPa oplopen.

7. OVERIGE AFWEGINGEN / OVERWEGINGEN

Voor huiseigenaren geeft scheurvorming aanleiding tot verzwakking van de gehele constructie, maar ook kunnen onderdelen van de constructie (deuren, ramen) soms niet meer naar behoren functioneren. In veel gevallen betekent dit extra herstelkosten en kosten om verdere scheurvorming te beperken of te voorkomen. Ook zullen eigenaren zich terecht zorgen (kunnen) maken over de invloed van de scheurvorming op de verkoopwaarde van de woning. Evenals woningen vertegenwoordigen echter ook bomen een bepaalde waarde voor de (directe) omgeving. Deze is moeilijk exact aan te geven maar komt doorgaans tevens in positieve zin tot uitdrukking in de onroerend goed waarde (verkoopwaarde) van het pand (Morales, 1980; Morales et al., 1983). Andere waarden van bomen zoals de ecologische, emotionele en cultuurhistorische zijn doorgaans zeer moeilijk aan te geven en blijven vooralsnog imponderabel. Wetenschappelijk onderzoek in de afgelopen decennia heeft echter onomstotelijk aangetoond dat bomen meetbare positieve effecten hebben op het welbevinden van mensen (werkdruk, stress, psychische gezondheid) en de luchtkwaliteit (aandoeningen aan ademhalingswegen) en de positieve invloed op matiging van extreme stadsklimaat-omstandigheden was reeds langer bekend (o.a. Lawson, 2000).

Bij de keuze om bomen te vellen of niet meer toe te passen zal men de waarde van de bomen, in samenhang met de waarde die men toekent aan de instandhouding van stedelijke groenstructuren dan ook moeten afwegen tegen de kosten die worden gemaakt om schade te herstellen en verdere schade te voorkomen (Reynolds, 1980).

In de meeste gevallen zal schade aan woningen zich beperken tot bovengenoemde 'ongemakken' zoals het scheuren van muren en het klemmen van deuren en ramen, slechts in exceptionele gevallen worden gebouwen onveilig.

Reparatie van de schade hoeft niet per definitie duur te zijn. Het is lang niet altijd nodig om ingrijpende maatregelen te nemen, zoals het geheel renoveren van de fundering (onderheien) en het is vrijwel nooit noodzakelijk om beschadigde gebouwen te slopen (Reynolds, 1980, Lawson, 2000).

8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

8.1. Conclusies

Uit de (vele) literatuur blijkt onomstotelijk dat bomen als gevolg van vochtonttrekking aan de bodem een substantiële bijdrage (kunnen) leveren aan de schade die ontstaat aan gebouwen (met bomen in de nabijheid) op krimpgevoelige gronden, zoals de zwaardere kleigronden. Engelse literatuur spreekt over een percentage van 44 % waarin bomen worden aangewezen als primaire oorzaak, maar exacte percentages van de bijdrage van bomen is op basis van de literatuur nog niet aan te geven, omdat in de betreffende inventarisaties veel gevallen waarin bomen (nog) geen schade hebben aangericht buiten beschouwing zijn gebleven.

Schade treedt echter pas op onder bepaalde condities en in bepaalde situaties zoals kleitype, dikte van een kleilaag, invloed van uitdroging in samenhang met de positie van boomwortels, klimaat, duur van een droogteperiode, boomsoort, afstand van een boom tot bebouwing, et cetera).

De belangrijkste conditie lijkt hierin vooralsnog de kwaliteit van de fundering c.q. de constructie van de bebouwing. Het blijkt eveneens onomstotelijk dat bomen vooral, zo niet uitsluitend schade veroorzaken aan gebouwen waarvan de fundering onvoldoende is berekend op de zwel- en krimpwerking van de onderliggende grond. In die situaties kan ook schade ontstaan zonder dat er bomen bij betrokken zijn. Gebouwen met een voldoende solide fundering ondervinden als regel geen schade, ongeacht de aan- of afwezigheid van bomen. Naast de aanwezigheid van bomen is de constructie van de fundering daarmee ook een "beïnvloedbare" factor.

De bijdrage van bomen aan het ontstaan van schade is op diverse manieren en op diverse niveaus (van stedelijke inrichting) beïnvloedbaar. Zie hiervoor de hieronder gegeven aanbevelingen.

8.2. Aanbevelingen

De belangrijkste aanbeveling is echter om de in de literatuur aangegeven methodes en richtlijnen niet klakkeloos te gaan toepassen. De situaties in Zevenaar hoeven niet in essentiële opzichten overeen te komen met de in de literatuur genoemde algemene voorwaarden. Toepassing van de meest effectieve methode is dan ook "maatwerk".

Op basis van de bestaande kennis is het mogelijk om al in de ontwerpfase van een beplanting in te spelen op mogelijk problematiek m.b.t. het zakken van kleigronden door een gerichte boomsoortenkeuze, waarbij met name gebruik wordt gemaakt van de bestaande verschillen in verdamping van bomen. Bij de boomsoortenkeuze zou men daarmee rekening kunnen houden, bijvoorbeeld door op kwetsbare plaatsen bij voorkeur te kiezen voor bomen met een lage bladmassa op half volwassen en volwassen leeftijd, bij voorkeur gekoppeld aan een lage verdamping per eenheid bladoppervlak, voor zover daarover gegevens bekend zijn.

Los hiervan is het evenzeer mogelijk (en noodzakelijk) om al in de ontwerpfase van een gebouw in te spelen op deze problematiek. Waar momenteel al niet als vanzelfsprekend paalfunderingen op klei worden gebruikt, zullen de ontwerpen van funderingen op staal aandacht moeten voorzien in een voldoende solide constructie van deze funderingen.

Algemeen geldt dat de invloed van bomen minder is naarmate de afstand boom-object groter is. Op deze regel zijn echter uitzonderingen mogelijk vanwege de variabiliteit in het “gedrag” van de diverse boomsoorten zoals de bestaande (en in dit rapport als tabel weergegeven) verschillen ten aanzien van de gemiddelde “agressiviteit” van boomsoorten wanneer het gaat om het veroorzaken van schade.

Indien bij een aangepaste boomsoortenkeuze de afstand tussen boom en bebouwing tóch nog onvoldoende (statistische) waarborgen biedt kan met aangepaste plantplaatsconstructies (schermen, bakken) worden voorkomen dat boomwortels zich in de richting van de fundering van gebouwen ontwikkelen.

Het is niet uitgesloten dat de vochtonttrekking van de kleilaag in kwantitatieve zin kan worden verminderd door de beworteling direct contact te laten maken met het water uit het onderliggend watervoerend zandpakket, maar over de effectiviteit van deze methode valt nog onvoldoende aan te geven en dit zou onderwerp kunnen zijn voor een nader vergelijkend onderzoek ter plekke (bijvoorbeeld aan de hand van het volgen van bodemvochtfluctuaties in situ).

Het is op basis van de bestaande kennis mogelijk om vrij nauwkeurig aan te geven wat de invloed van boomwortels is op de bewegingen van een krimpgevoelige grond. Voor een exacte invulling naar een gegeven situatie moet echter ook bekend zijn waar de beworteling van de bomen zich bevindt (of gaat bevinden) en wat het krimpgedrag is van de betreffende grondsoort.

Om in te schatten wat de eventuele omvang is van de “put” die bomen in het grondwater kunnen trekken moet daarnaast tevens bekend zijn wat de hoeveelheid opwaartse en zijdelingse aanvoer van water in theorie kan zijn (omdat dit sterk te maken heeft met de waterdoorlatendheid van de klei). Hieruit valt af te leiden hoever de invloed van de beworteling zich nog kan uitstrekken buiten de doorwortelde bodemzone (en dus op hoeveel afstand daarbuiten in theorie daardoor nog krimp kan ontstaan).

Het tegengaan van uitdroging van de bodem door de aanvoer van water gedurende de periode van wateronttrekking te vergroten zal per definitie de kans op schade door uitdroging verminderen. De effectiviteit en mogelijkheden zijn echter afhankelijk van een aantal bodemeigenschappen, zoals de infiltratiecapaciteit en hierover zal voldoende bekend moeten zijn teneinde de juiste c.q. optimale methode te kiezen. Aanvullend onderzoek alvorens deze benadering op groter schaal te propageren is derhalve gewenst. Desalniettemin mag men verwachten dat door het regelmatig besproeien van bewortelde bodemzones gedurende langdurige droogte (en het daarmee nabootsen van regenval die in “gemiddelde” zomers optreedt) de invloed van droogte-extremen, zoals die van 1976, waarin relatief veel schade aan gebouwen is opgetreden, kan worden getemperd.

Bij het vellen (om welke reden dan ook, zoals onveiligheid van oude bomen) of zwaar snoeien van bomen moet worden gezien in hoeverre er alsnog schade kan optreden als gevolg van herstel van progressieve uitdroging.

Vellen is derhalve niet in alle situaties een gegarandeerde oplossing om het probleem van verzakking in reeds bestaande schadesituaties te beperken, althans geen korte termijn oplossing.

Overigens heeft het vellen van bomen in een openbare groenstructuur in dit opzicht pas zin wanneer de houtige (tuin) beplantingen tevens wordt verwijderd, omdat deze per oppervlakte-

eenheid ongeveer evenveel water aan de bodem onttrekken als bomen en per definitie gemiddeld genomen dicht bij de woningen staan.

Overigens zal bij het besluit om bomen te vellen voldoende bekend moeten zijn of de bodem sowieso bijdraagt aan het ontstaan van de schade en in welke mate. Daarnaast kan het van belang zijn om een goed beeld te hebben van de eventuele verergering van de schade in de toekomst bij overwegingen t.a.v. de noodzaak tot reparatie van schade (en de daaraan verbonden kosten) en afwegingen daarvan ten opzichte van de waarde van de (samenhang van de) stedelijke groenstructuur.

9. LITERATUUR

AIE –Trees and Buildings. Indirect damage to buildings: Part 2. Arboricultural Information Exchange www.aie.org.uk

Akker, J.J.H. van den, 2001. Een inventarisatie van bodemfysische materiaalmodellen zoals toegepast in het landbouwkundig onderzoek. Rapport Delft Cluster, Alterra, Wageningen.

Akker, J.J.H. van den & Th.H. van Putten. 1995. Bomen, een genot langs en voor de weg? Wegen 69 (5): 4-11.

Atsma, J & Y. in 't Velt. 1999. Stadsbomenvademecum deel 2 Groeiplaats en aanplant.IPC Groene Ruimte, Arnhem. 529p.

Anderson, L.M. & H.K. Cordell. 1988. Influence of trees on residential property values in Athens, Georgia (USA): A survey based on actual sales prices. Landscape and Urban Planning 15: 153-164.

Bakker, J.W., P. Cornelissen & Th. H. van Putten. 1992. Droogteschade aan wegen bij bermbeplanting. P. 693-709, Syllabus Wegbouwkundige dagen 20-21 mei 1992, Arnhem, deel II. Stichting CROW, Ede.

Bakker, J.W., J.J.H. van den Akker, P. Cornelissen & D. Boels. 1995. Oorzaak en preventie van schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen. Rapport 318, Staring Centrum - DLO, Wageningen. 103 pp.

Biddle, P. G. 1998. Tree Root Damage to Buildings, Vol. 1: Causes, Diagnosis and Remedy & Vol 2: Patterns of soil drying in proximity to trees on clay soils. Willowmead Publishing Ltd. Wantage, England. 376 + 299 pp.

Biddle, P.G. Trees and Buildings.1987. P.121- 132 in: (Patch D. ed.) Advances in Practical Arboriculture. Bulletin 65, Forestry Commission, UK.196 pp.

Biddle, P.G. 1979. Tree Root Damage to Buildings – An Arboriculturist's Experience. Arboricultural Journal 3 (6): 397-412.

Blight, G.E. 2005. Desiccation of a clay by grass, bushes and trees. Geotechnical and Geological Engineering 23: 697-720.

Braun, H.J. 1976. Rhythmus und Grosse von Wachstum, Wasserverbrauch und Produktivität des Wasserverbrauchs bei Holzpflanzen. II. Acer platanoides L. , Acer pseudoplatanus L. und Fraxinus excelsior L. mit einem Vergleich aller untersuchter Baumarten einschliesslich einiger Populus-Klone. Allgemeine Forst und Jagd Zeitung 147 (8): 163-168.

Bronswijk, J.J.B. 1988. Modelling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. Journal of Hydrology 97: 199-122 / Technical Bulletins (new series) nr. 69, ICW, Wageningen.

Bronswijk, J.J.B. 1987. Zwel- en krimpprocessen in zware kleigronden. Cultuurtechnisch Tijdschrift 26, 6 / Mededeling nr. 46 (nieuwe serie), ICW, Wageningen.

Bronswijk, J.B.B. & J.J. Evers-Vermeer. 1987. Krimpkaracteristieken van kleigronden in Nederland. Rapport nr. 22 (nieuwe serie) ICW, Wageningen. 54 pp.

Cameron, D.A. 2001. The extent of soil desiccation near trees in a semi-arid environment. *Geotechnical and Geological Engineering* 19: 357-370.

Cameron, D.A. & I. Earl. 1982. Trees and Houses: a Question of Function. Cement and Concrete Association of Australia. 20 pp.

Cermak, J., J. Hruska, M. Martinkova & A. Prax. 2000. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetration radar and sap flow techniques. *Plant and Soil* 219: 103-116.

CMHC-SCHL. 2005. Understanding and Dealing with Interactions between Trees, Sensitive Clay Soils and Foundations. Fact sheet: About your House – General Series Canadian Mortgage and Housing Corporation. CE31. 8pp.

Costello, L.R. & K.S. Jones. 2003. reducing infrastructure damage by tree roots: a compendium of strategies. Western chapter of the International Society of Arboriculture (WCISA), Cohasset, CA. 119 pp.

Coutts, M.P. 1979. The Physiological Characteristics of Trees, and Damage to Buildings by root activity. *Arboricultural Journal* 3 (6): 413-419.

Crilly, M. 2001. Analysis of a database of subsidence damage. *Structural Survey* 19 (1): 7-15.

Cutler, D.F. & B.K. Richardson. 1989. Tree roots and Buildings (Second edition). Longman Scientific & Technical. 71 pp.

Cutler, D.F. 1974. Tree root damage to buildings. *Journal of the Institute of Wood Science* 6 (6): 9-12.

Driscoll, R. 1983. The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. *Geotechnique* 33 (2): 93-105.

Fairfax County. 2006. Overcoming Problems with Marine Clays. Land Development Services, Department of Public Works and Environmental Sciences. Fairfax County, Virginia, US.

Flora, T. 1979. Trees and Building Foundations. *Arboricultural Journal* 3 (6): 419-425.

Fugro Ingenieursbureau B.V. 2006. Rapport betreffende verzakking wonngen te Zevenaar – Opdrachtnummer: 6006-0521-000. Gemeente Zevenaar, 38 pp.

Hamilton, J.J. 1977. Foundations on Swelling or Shrinking Subsoils. CBD-184. National Research Council Canada.

Jaksa, M.B., W.S. Kaggwa & J.A. Woodburn. 2002. Influence of large gum tree on the soil suction profile in expansive soils. *Australian Geomechanics*, March 2002, p. 23-33.

Janssen, F. 1992. Schade en schaderisico's aan gebouwen en wegen bij polderpeilverlagingen. Onderzoek en praktijkervaringen in enkele Friese landinrichtingsprojecten. Landinrichting 32 (3): 25-30.

KBKW. 2004. Colloquium bouwpathologie. Archi-Info 124: 4-13. Koninklijke BouwmeestersKring van West-Vlaanderen. Tielt, België.

Kopinga, J. 1998. Evaporation and water requirements of amenity trees with regard to the construction of a planting site. Pp. 233- 245 in: Neely, D & G.W. Watson (eds). The Landscape Below Ground II. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils. International Society of Arboriculture, Champaign, Ill. 265 pp.

Kopinga, J. 1995. Waterverbruik en watervoorziening van stadsbomen. Groen 51 (3): 22-27.

Kopinga, J. 1994. Aspects of the damage to asphalt road pavings caused by tree roots. Pp 165-178 in: Neely, D & G.W. Watson (eds). The Landscape Below Ground. Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils. International Society of Arboriculture, Champaign, Ill.

Kramer, P.J. & T.T. Kozlowski. 1979. Physiology of Woody Plants. Academic Press. 811 pp.

Lawson, M. 2004. Tree related subsidence of low rise buildings and the management options. Arboricultural Journal 27: 191-219.

Loon, A. van. 2003. Ruimte voor de stadsboom. Blauwdruk, Wageningen. 127 p.

Malley O', A.P.K. & D.A. Cameron. 2005. The influence of trees on soil moisture, dwellings and pavements in an urban environment. University of Australia / City of Salesbury. 90 pp.

Mathur, S. 1999. Settlement of soil due to water uptake. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 23: 1349-1357.

McCombie, P.F. 1993. Trees and foundations – a reassessment. Arboricultural Journal 17: 341-357.

Miller, J.A. & K. Pye. 1999. The starch-jodine test applied to tree rootlets from the fens. Engineering Failure Analysis 6: 423-424.

Misra, R.K. & R. Sands. 1993. Water Extraction by Isolated Trees and its Possible Impact on Building Foundations on Clay Soils. Australian Journal of Soil Research 31: 25-37.

Misra, R.K. & R. Sands. 1992. A comparison of sap flux and water relations of leaves of various isolated trees with special reference to foundation movement in clay soil. Plant and Soil 140: 269-278.

Morales, D.J. 1980. The contribution of trees to residential property value. Journal of Arboriculture 6 (11): 305-308.

Morales, D.J., F.R. Mischa & R.L. Weber. 1983. Two methods of valuating trees on residential sites. Journal of Arboriculture 9 (10): 21-24.

O'Callaghan, D.P. & O. Kelly. 2005. Tree related subsidence: Pruning is not the answer. *Journal of Building Appraisal* 1 (2): 113-129.

Pryke, J.F.S. 1979. Trees and Buildings. *Arboricultural Journal* 3 (6): 388-396.

Reeve, M.J., D.G.M. Hall & P. Bullock. 1980. The effects of soil composition and environmental factors on the shrinkage of some clayey British soils. *Journal of Soil Science* 31: 429-442.

Reynolds, E.R.C. 1980. Tree roots and foundations. *Arboriculture Research Note* 28 80 SILS. DOE Arboricultural Advisory and Information Service. 3pp.

Reynolds, E.R.C. 1979. A report on tree roots and build development. Prepared for the Department of the Environment. HMSO. Bristol. 20 pp.

Vreštiak, P. 1991. Vývoj listovej biomasy v štruktúre sídelnej zelene. *Acta Dendrobiologica Arborétum Mliňaney - Ústav dendronbiológie Slovenskej akadémie vied*. Veda, Bratislava. 205 pp.

Wind, G.P. Hydrologische aspecten van een methode om schade aan gebouwen door polderpeilverlaging te voorspellen. *Cultuurtechnisch Tijdschrift* 24 (1): 5-15.

De invloed van beworteling van bomen op het verzakken van funderingen van gebouwen op kleigronden, door Jitze Kopinga, 2007

C Bijlage: Tabellen en figuren vegetatieaspecten

BIJLAGE C1: Stamdoorsnede op borsthoogte (DBH in cm), bladmassa (m²) verdamping per boom (in liter/dag/boom) bij E-ref =1 (liter/dag/m² bladmassa), boomhoogte (m), kroonbreedte (m), kroonprojectie (m²) en Leaf Area Index (LAI) van vier in Nederland algemeen voorkomende boomsoorten in het stedelijk gebied (naar: Vreštiak, 1991)²¹

Leeswijzer:

Deze tabellen kunnen worden gebruikt om de dagelijkse vochtonttrekking van een boom aan de bodem in te schatten, vanuit diverse parameters, zoals de boomhoogte, stamdiameter of de kroonbreedte. De bladmassa zal als regel moeilijker te bepalen zijn, maar is hier volledigheidshalve weergegeven. De vochtonttrekking kan worden berekend over het totaal aan doorworteld bodemvolume. Wanneer dat niet bekend is wordt als regel de oppervlakte van de kroonprojectie aangehouden, waarmee de verdamping kan worden uitgedrukt in "mm" oftewel liters per m² grondoppervlak (wat aansluit bij de waarde waarin de referentiegewasverdamping (E-ref) als regel wordt uitgedrukt. De verdamping van de boom verhoudt zich lineair tot de E-ref. Indien de E-ref over een bepaalde dag bijvoorbeeld 3 mm bedraagt, dan is de verdamping op die dag van de boom zoals weergegeven in de tabellen eveneens drie maal hoger. Bedraagt de E-ref. op een dag 0,5 mm, dan is de verdamping van de boom de helft van de waarde die is weergegeven in de tabellen. Op deze wijze kan op basis van overzichten van de meteorologische stations die naast de neerslag ook de E-ref. meten de orde van grootte worden berekend van de hoeveelheid water die een boom gedurende zowel gemiddeld droge als natte jaren aan de bodem zal onttrekken.

Zomereik

DBH	Bladmassa	Verdamping	Boomhoogte	Kroonbreedte	Kroonprojectie	LAI
10	41.4	10.4	4.9	2.8	6.2	6.73
15	102.4	25.6	6.3	4.8	18.1	5.66
20	159.6	39.9	7.6	6.4	32.2	4.96
25	213	53.3	9.1	7.7	46.5	4.58
30	262.6	65.7	10.5	8.9	62.2	4.22
35	308.4	77.1	11.8	9.8	75.4	4.09
40	350.5	87.6	13	10.6	88.2	3.97
45	388.8	97.2	14.3	11.3	100.2	3.88
50	423.3	105.8	15.5	11.8	109.3	3.87
55	454	113.5	16.6	12.3	118.8	3.82
60	480.9	120.2	17.8	12.7	126.6	3.80
65	504.1	126.0	18.9	13.2	136.8	3.69
70	523.5	130.9	19.9	13.6	145.2	3.61
75	539.1	134.8	21	14.1	156.1	3.45

²¹ Vreštiak, P. 1991. Vývoj listovej biomasy v štruktúre sídelnej zelene. Acta Dendrobiologica Arborétum Mliňanay - Ústav dendronbiológie Slovenskej akadémie vied. Veda, Bratislava. 205 pp.

Es

DBH	Bladmassa	Verdamping	Boomhoogte	Kroonbreedte	Kroonprojectie	LAI
10	92	23.0	5.5	4.3	14.5	6.34
15	135	33.8	7.2	5.6	24.6	5.48
20	175	43.8	8.9	6.8	36.3	4.82
25	205.1	51.3	10.6	7.9	49.0	4.19
30	240.2	60.1	12.2	9	63.6	3.78
35	272.9	68.2	13.8	9.9	76.9	3.55
40	307.4	76.9	15.3	10.8	91.6	3.36
45	347.7	86.9	16.7	11.6	105.6	3.29
50	397.9	99.5	18	12.2	116.8	3.41
55	462.3	115.6	19.2	12.8	128.6	3.59
60	544.9	136.2	20.3	13.4	141.0	3.87
65	576.3	144.1	21.55	13.8	149.5	3.86
70	593.7	148.4	22.75	14.1	156.1	3.80
75	636.9	159.2	23.95	14.4	162.8	3.91

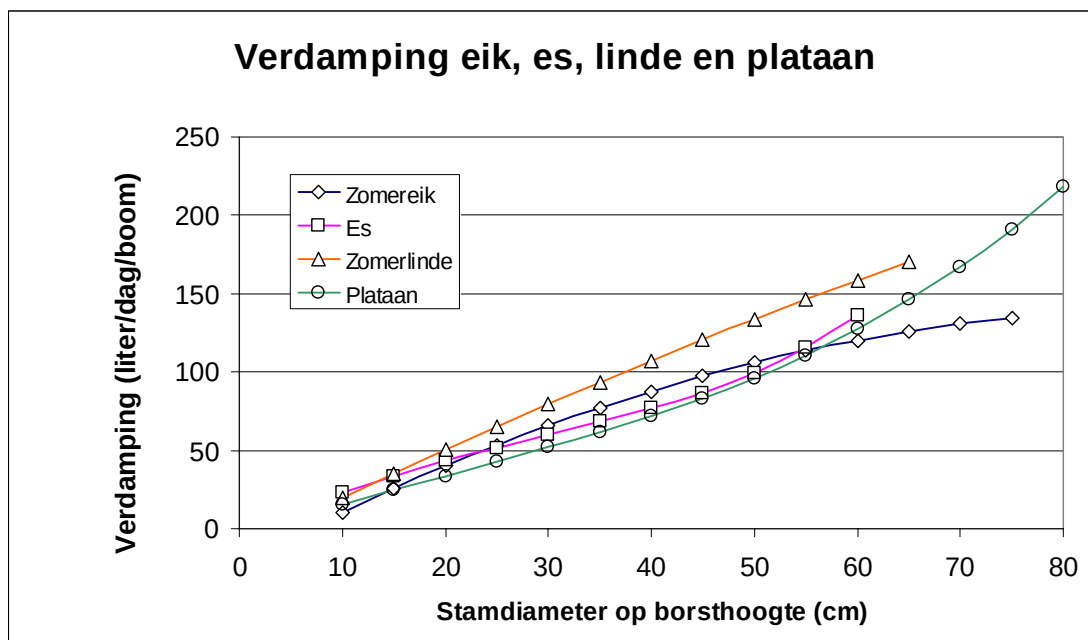
Zomerlinde

DBH	Bladmassa	Verdamping	Boomhoogte	Kroonbreedte	Kroonprojectie	LAI
10	79.5	19.9	7.5	4.1	13.2	6.02
15	141.1	35.3	8.5	5.1	20.4	6.91
20	201.4	50.4	9.5	6.2	30.2	6.67
25	260.3	65.1	10.6	7.2	40.7	6.40
30	317.9	79.5	11.7	8.2	52.8	6.02
35	374	93.5	12.9	9.1	65.0	5.75
40	428.8	107.2	14.1	10	78.5	5.46
45	482.3	120.6	15.3	10.9	93.3	5.17
50	534.4	133.6	16.6	11.7	107.5	4.97
55	585.1	146.3	18	12.6	124.6	4.69
60	634.5	158.6	19.4	13.4	141.0	4.50
65	682.4	170.6	20.8	14.1	156.1	4.37

Plataan

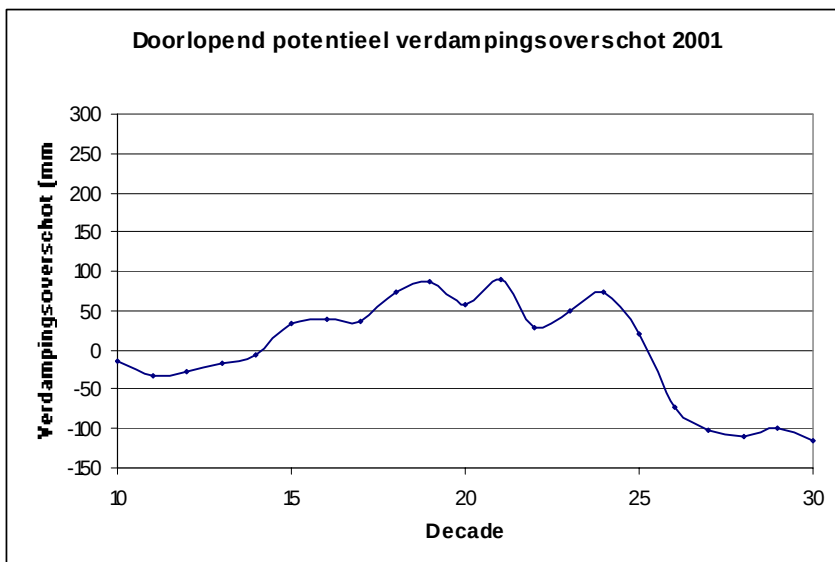
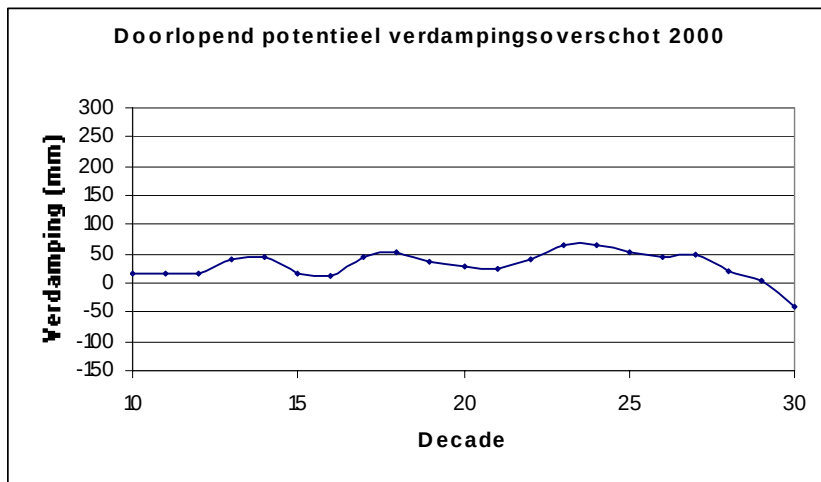
DBH	Bladmassa	Verdamping	Boomhoogte	Kroonbreedte	Kroonprojectie	LAI
10	62.4	15.6	6.2	4	12.6	4.97
15	99.5	24.9	7.5	5.2	21.2	4.69
20	135.2	33.8	8.7	6.2	30.2	4.48
25	170.7	42.7	9.9	7.1	39.6	4.31
30	207.1	51.8	11	7.9	49.0	4.23
35	245.6	61.4	12.1	8.6	58.1	4.23
40	287.3	71.8	13.1	9.1	65.0	4.42
45	333.4	83.4	14.1	9.6	72.3	4.61
50	384.9	96.2	15.1	10	78.5	4.90
55	443.1	110.8	16.1	10.5	86.5	5.12
60	509	127.3	17.1	10.9	93.3	5.46
65	583.9	146.0	18.1	11.4	102.0	5.72
70	668.8	167.2	19.1	12	113.0	5.92
75	764.9	191.2	20.1	12.6	124.6	6.14
80	73.3	8.3	21.2	13.3	138.9	9

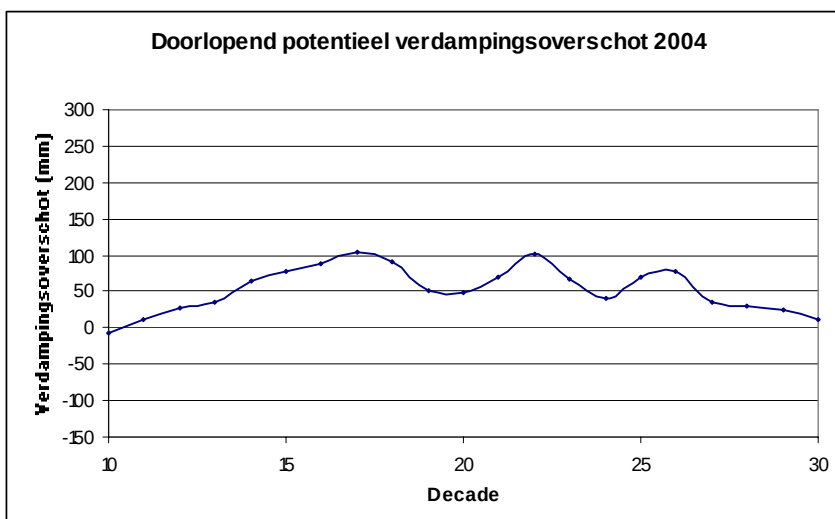
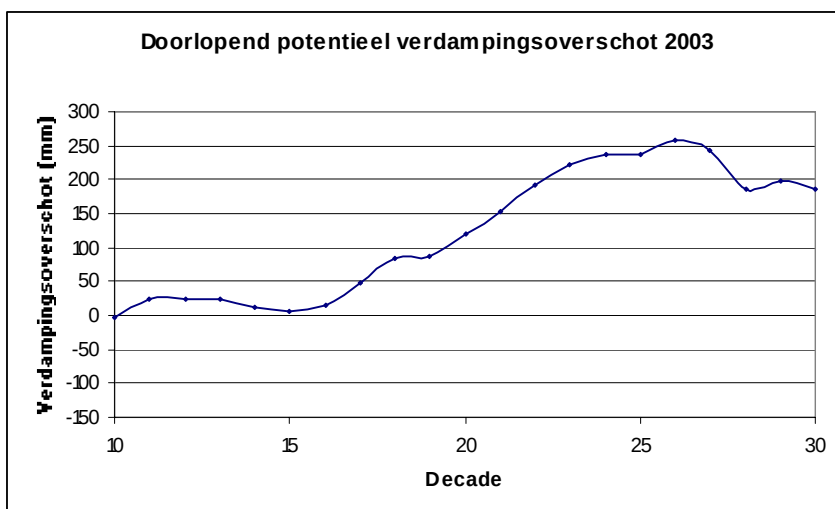
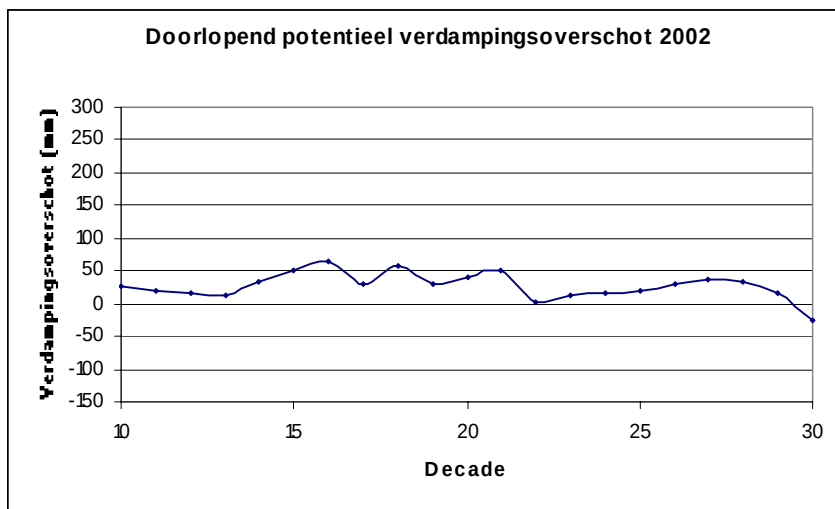
BIJLAGE C2 Grafische voorstelling van de verdamping van 4 algemeen voorkomende boomsoorten bij E-ref = 1 in diverse stadia van groei en ontwikkeling (uitgedrukt als stamdiameter op borsthoogte).

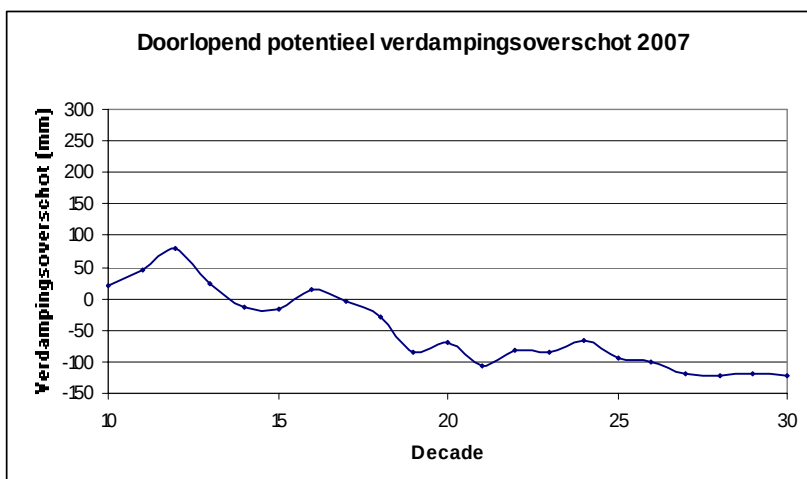
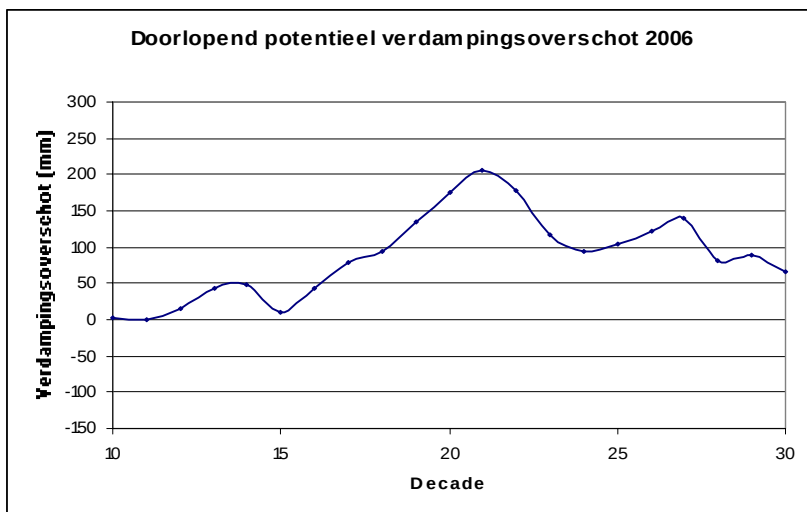
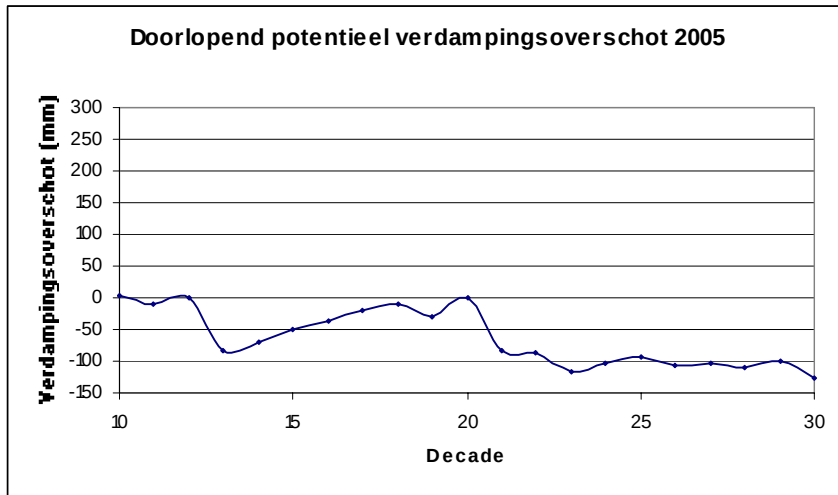


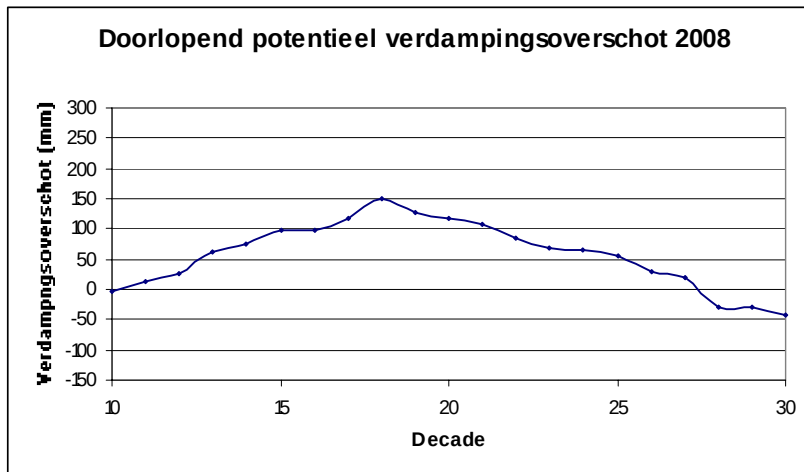
BIJLAGE C3. Doorlopend potentieel verdampingoverschot gedurende de periode 1 april – 30 oktober van de jaren 2000 t/m 2008 op basis van meetgegevens in De Bilt (KNMI). De waarden zijn uitgedrukt als gemiddelden per decade (= een periode van 10 dagen, oftewel een derde van een maand)

Leeswijzer: het doorlopend potentieel verdampingsoverschot (ook wel aangeduid als cumulatief neerslagtekort) is de balans tussen de vochtonttrekking van een referentiegewas aan de bodem a.g.v. verdamping en de aanvulling van de vochtvoorraad in de bodem door de neerslag. Hierbij is aangenomen dat alle neerslag door de bodem kan worden opgenomen. Dit zal bij bomen die in een bestrating staan doorgaans niet het geval zijn en voor de “vertaling” van deze gegevens naar de vochtbalans van bomen zal men in dit opzicht rekening houden met een geringere effectiviteit van de neerslag (zie ook de hoofdtekst). Overigens geven de figuren een goed beeld van wat in het verleden de gemiddeld droge en natte jaren waren en over welke periode een droogte aanhield.



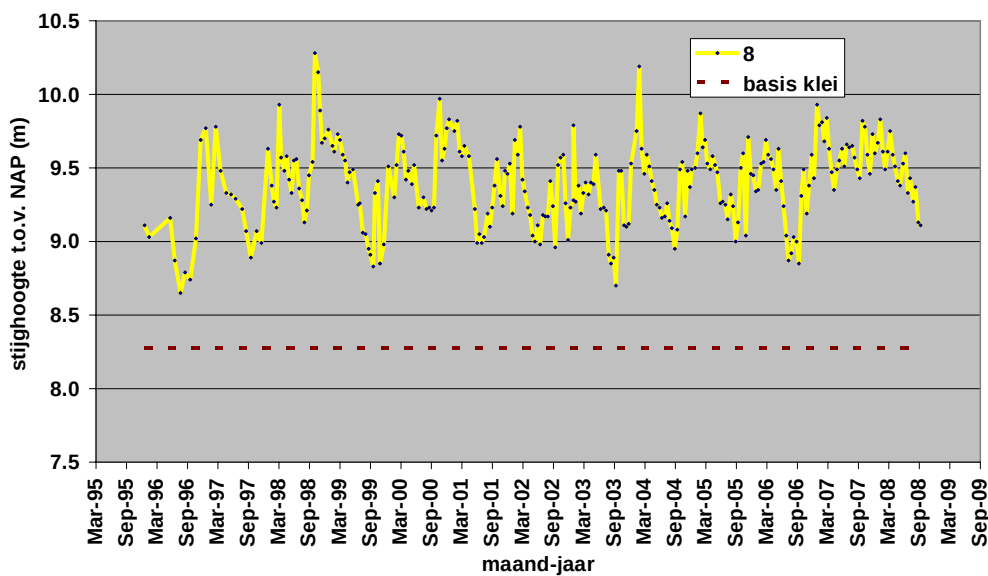




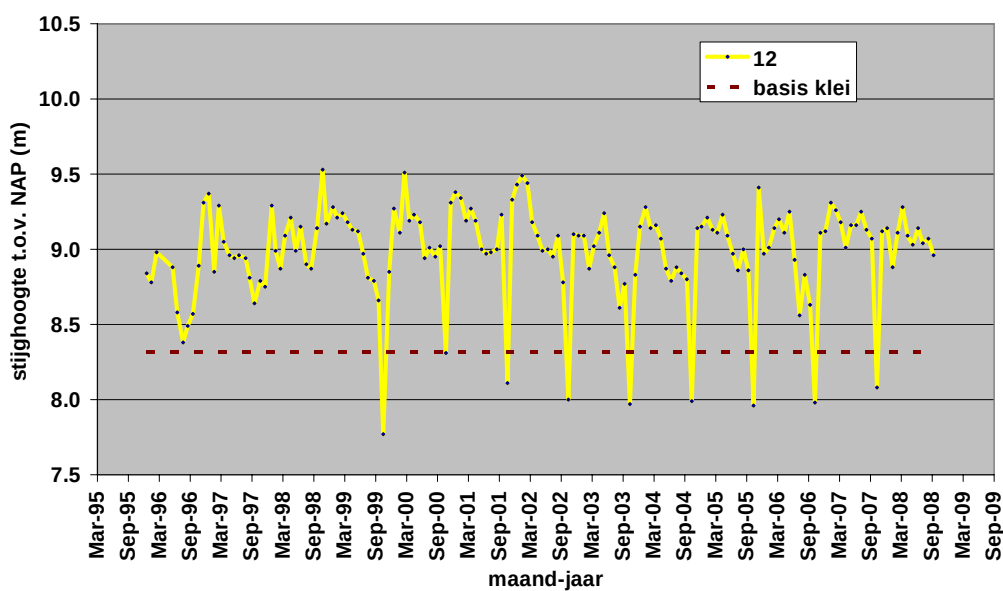


D Bijlage: Figuren Grondwateraspecten

Tijdreeks stijghoogte, meetpunt 1.



Tijdreeks stijghoogte, meetpunt 8.



Tijdreeks stijghoogte, meetpunt 12.