



dr. Ir. C. (Cock) Blom
UHD (gepensioneerd)
Technische Natuurkunde,
Universiteit Twente



Ing. K.O. (Kees) van der Werf
Onderzoeker (gepensioneerd)
Technische Natuurkunde
Universiteit Twente

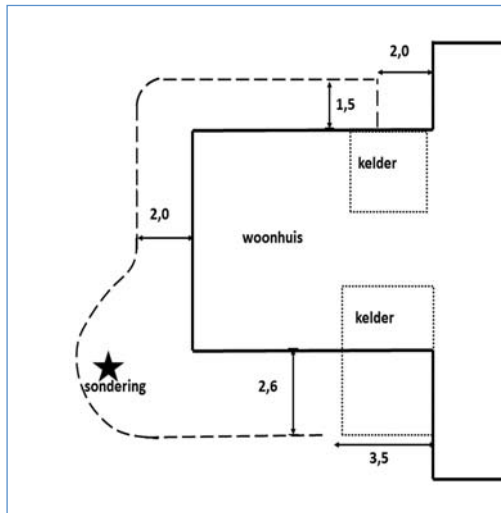


Drs. R.J. (Roelof) Stuurman
Stedelijk water- en
bodemeskundige
Deltares, Utrecht

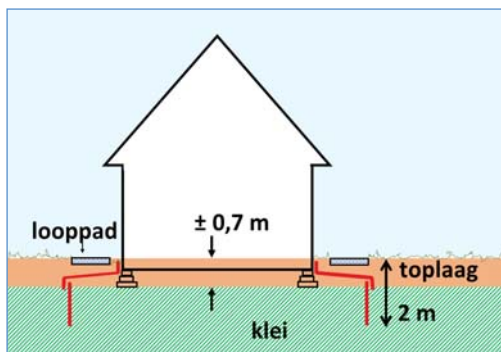


Dr. H (Henk) Kooi
sr. Adviseur/onderzoeker
Deltares, Utrecht

KLIMAATVERANDERING, KLEI EN FUNDERINGS- PROBLEMEN – EEN CASE STUDIE (DEEL 2)



Figuur 1 – Plaats vochtbarrières.



Figuur 2 – Plaats vochtbarrières, zijanzicht.

Inleiding

In de zomer van 2020 is er grote schade ontstaan aan een woonhuis in Rekken. Dit werd uitvoerig beschreven in een eerste artikel in Vakblad Geotechniek (ref 1). Het is een huis met een fundering op staal op een kleiondergrond. Metingen aan een kleimonster lieten als functie van het watergehalte een sterk krimp-zwel gedrag zien. Door de drie achtereenvolgende droge warme zomers 2018-2020 is de kleiondergrond uitgedroogd waardoor een deel van de fundering verzakte. Ook werd er in dit artikel (ref 1) een oplossing voor dit probleem geformuleerd. In april 2021 zijn horizontale en verticale vochtbarrières rond het huis aangebracht. Ook zijn de muren van het huis gerestaureerd. Een groot aantal zakbaken en vochtsensoren zijn zowel binnen als buiten de vochtbarrières aangebracht. Het doel is om hiermee de effectiviteit van vochtbarrières te bepalen. De resultaten hiervan worden in voorliggend artikel besproken.

Plaats van de vochtbarrières

In figuur 1 is de plaats van de vochtbarrières (HDPE folie dikte 2 mm) met stippellijn schematisch aangegeven (bovenaanzicht). Deze folie wordt vanwege zijn lange levensduur en chemische bestendigheid gebruikt als geomembraan.

Ook is de plaats van een van de sonderingen aangegeven. De afstand van de barrière tot het huis bij de probleemhoek is wat groter genomen. De horizontale barrière is op een diepte van ongeveer 0,5 m aangebracht. De verticale barrière gaat tot 2 m diepte beneden maaiveld, zie figuur 2. De aanzetdiepte van de fundering is ongeveer 0,7 m. Foto's van het aanbrengen van de vochtbarrières zijn te zien in figuur 3 en 4. Binnen en buiten de barrières zijn op verschillende dieptes een aantal zakbaken en vochtsensoren aangebracht waarmee de verticale bodembeweging en het watergehalte van de bodem gemeten is. Ook zijn er rond het huis op verschillende plaatsen peilbuizen aangebracht.

Meetmethodes

PEILBUIZEN

Voor het meten van de grondwaterstand zijn op meerdere plaatsen rond het huis peilbuizen aangebracht. In figuur 5 is een schematische tekening van een peilbuis gegeven. De peilbuizen zijn in 2020 al voor het aanbrengen van de vochtbarrières geplaatst. Voor een deel zijn de gaten veroorzaakt door de bodemsonderingen hiervoor benut. De posities van de peilbuizen zijn aangegeven in het eerste artikel.



**Figuur 3 –
Aanbrengen
verticale
vochtbarrière.**

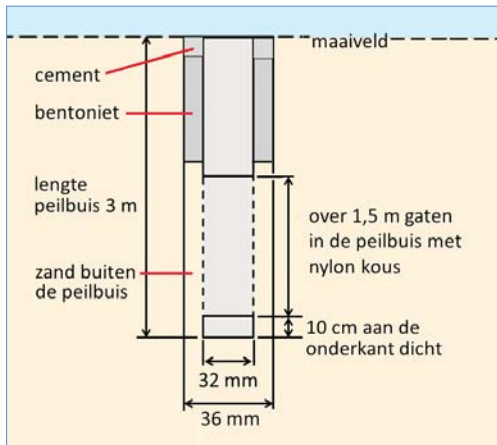


**Figuur 4 –
Aanbrengen
horizontale
vochtbarrière.**

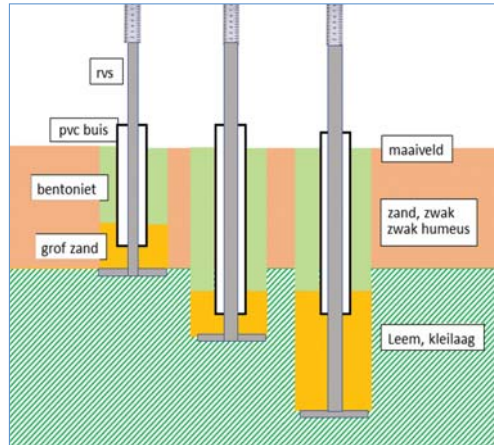
SAMENVATTING

In een eerste artikel in Vakblad Geotechniek is de schade beschreven die aan een woonhuis in Rekken is ontstaan door het zwel-krimp gedrag van de kleiondergrond waarop het huis gebouwd is. Om toekomstige schade te voorkomen zijn in april 2021 horizontale en verticale vochtbarrières in de grond rond het huis aangebracht. Er zijn vochtsensoren en zakbaken binnen en buiten de vochtbarrières aangebracht. Binnen de barrières varieert het watergehalte

van de bodem nauwelijks meer. Ook is er vrijwel geen verticale beweging van de bodem binnen de barrières. Buiten de barrières varieert het watergehalte van de bodem sterk met de seizoenen en gaat het maaiveld in de droge zomer van 2022 meer dan 50 mm naar beneden. De muren van het huis zijn gerestaureerd en na de extreem droge en warme zomer van 2022 is er geen schade meer ontstaan.



Figuur 5 – Peilbuis schematisch.



Figuur 6 – Een set van drie zakbaken, schematisch weergegeven.



Figuur 7a – Zakbaakdelen die onder het maaiveld zitten voor 0,6 - 1,2 - 1,8m diepte.



Figuur 7b – Opzetdelen zakbaken met liniaaltjes (boven het maaiveld).



Figuur 7c – De 0,6 m zakbaken zijn geplaatst door een gat te graven tot een diepte waarbij de (harde geel-kleurige) klei-leemlaag zichtbaar is.

ZAKBAKEN

Voor het meten van de verticale bodemverplaatsing zijn zakbaken toegepast, schematisch weergegeven in figuur 6. Ze bestaan uit een rvs staaf, die op een bodemplaat van rvs is bevestigd.

Er zijn vier sets van elk drie zakbaken aangebracht, waarvan twee sets binnen en twee sets buiten de barrière (zie verder bij meetlocaties). De dieptes van de drie zakbaken zijn respectievelijk 0,6 m, dit is ongeveer op de overgang van de zwak humeuze zandlaag naar de leem-kleilaag en 1,2 en 1,8 m beneden maaiveld. De bodemplaat van de 0,6 m diepe zakbaak is een plaat van 0,15 bij 0,15 m. De bodemplaten van de andere zakbaken zijn kleiner en rond, met een diameter van 0,1 m, omdat deze in een handboorgat geplaatst werden. De staaf is afgeschermd door een pvc buis die op een laag van grof zand rust. Hierdoor kan de staaf vrijwel wrijvingsloos de bodembeweging onder de bodemplaat volgen. De ruimte boven de zandlaag buiten de pvc buis (diameter pvc buis en boorgat respectievelijk 75 mm en 120 mm) is opgevuld met bentoniet (tot 0,6 à 0,8 m diepte) waardoor de pvc buis gefixeerd is in de bodem. Op het bovenste deel van de rvs staaf bevindt zich een liniaaltje, waarmee met behulp van een waterpasinstrument (Leica NA332) de verticale verplaatsing van de zakbaken gemeten wordt. Het deel van de rvs staaf boven het maaiveld is afneembaar. Foto's van de zakbaken zijn te zien in figuur 7a, 7b en 7c.

Als referentie voor de metingen van de bodemverplaatsingen is buiten de barrière een zakbaak op 5 m diepte aangebracht. De lengte van de pvc beschermhuis is hier 2,5 m en zoals bij de andere



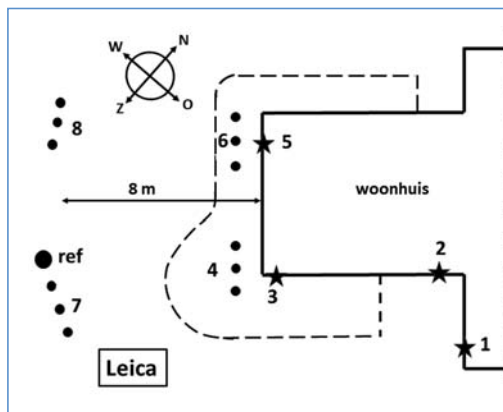
Figuur 8 – Plateau voor de Leica (drie aan elkaar gelaste L-profielen).

zakbaken is deze buis tot een diepte van 0,8 m met bentoniet vastgezet in de bodem. De ruimte buiten en onder de buis is verder opgevuld met grof zand. De onderste 1,5 m is opgevuld met bentoniet. Het effectieve aangrijpingspunt voor de bodembeweging zal hierdoor minder dan 5 m diep zijn.

Met het waterpasinstrument worden de verticale verplaatsingen van de linaaltjes gemeten. Voor de metingen wordt het instrument op een plateau geplaatst, dat op het maaiveld is aangebracht (zie figuur 8). Testmetingen geven aan dat de nauwkeurigheid van de verplaatsingsmetingen minder dan 0,5 mm bedraagt.

MEETLOCATIES

In figuur 9 zijn de posities van de vier sets van drie zakbaken aangegeven met 4, 6, 7 en 8. De 5 m diepe referentiezakbaak is aangegeven met ref. Om de verticale beweging van het huis te kunnen meten zijn op verschillende plaatsen op de muren ook linaaltjes aangebracht, aangegeven met 1, 2, 3 en 5. De plaats van het waterpasinstrument is aangegeven met Leica. De positie van het waterpasinstrument en de nummering is zo gekozen, dat bij een "tegen de klokrotatie" van het waterpasinstrument de linaaltjes in de cijfervolgorde in het gezichtsveld van het instrument komen, hetgeen de metingen vergemakkelijkt.



Figuur 9 – Positie linaaltjes op het huis, vier sets van drie zakbaken, de referentiezakbaak (ref) en de positie van het waterpasinstrument (Leica).

VOCHTSENSOREN

Voor de meting van het watergehalte van de klei zijn op 0,6 m en 1,2 m diepte zowel binnen als buiten de barrière vochtsensoren in de bodem aangebracht. De locaties zijn aangegeven in figuur 10. Het gebruikte type is ECHO EC5 vochtsensor, zie figuur 11. De omrekening van de uitlezing van deze vochtsensoren (RAW) naar een watergehalte is niet eenduidig en is afhankelijk van de grondsoort (ref 2). Een ijking is daarom nodig. Om het watergehalte van de klei te bepalen is met een vochtsensor een ijkmeting uitgevoerd met twee verschillende kleimonsters, die op een diepte van ongeveer 1,2 m zijn ontnomen. Met deze monsters is de uitlezing van de vochtsensor (RAW) als functie van het monstergewicht bepaald. Het watergehalte (massa water t.o.v. de totale massa) is bepaald door na de metingen de monsters in een oven te drogen en zo het drooggewicht te meten. In figuur 12 zijn de metingen gegeven met een tweedegraads polynoom fit. Met de fit parameters uit deze ijking zijn de metingen van de vochtsensoren verwerkt. Er is geen ijking gedaan met grondmonsters van 0,6 m diepte.

Resultaten

PEILBUIZEN

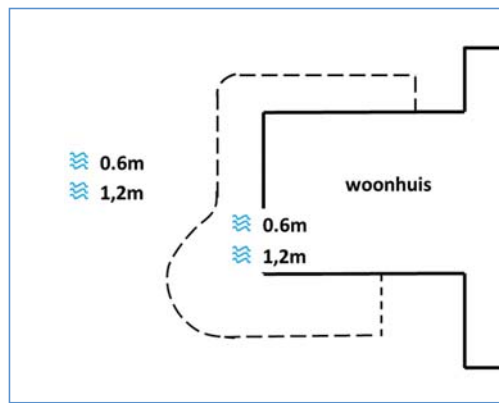
In figuur 13 is het resultaat van twee peilbuizen

gegeven, die representatief zijn voor de peilbuis-metingen. Beide peilbuizen bevinden zich buiten de vochtbarrières. Voor het vergelijken van alle metingen is de tijd/as in alle volgende grafieken hetzelfde genomen. Ondanks dat de peilbuizen op geringe afstand van elkaar staan (ongeveer 20 m) zijn er grote verschillen te zien. De locatie van de peilbuis PB1 is in de nabijheid van enkele bomen en de locatie van peilbuis PB2 is in een grasveld aan de noordzijde van het huis. Bij peilbuis PB1 komt in de zomer het waterniveau zelfs onder de bodem van de buis (3 m onder maaiveld). De oorzaak van de grote verschillen is de geringe waterdoorlaatbaarheid van de klei (ref 1). Verder is te zien dat in maart het waterpeil in de beide buizen steeds weer op het drainage-niveau (de diepte van de goed waterdoorlatende laag boven de klei) komt. Duidelijk is ook het verschil tussen een "normale zomer" 2021 en een droge zomer 2022 te zien (ref 5).

ZAKBAKEN

In figuur 14a, 14b en 14c zijn respectievelijk de gemeten bodembeweging op verschillende dieptes buiten en binnen de barrières en de bewegingen van de linaaltjes op de muren te zien. Deze metingen zijn gestart na plaatsing van de barrières.

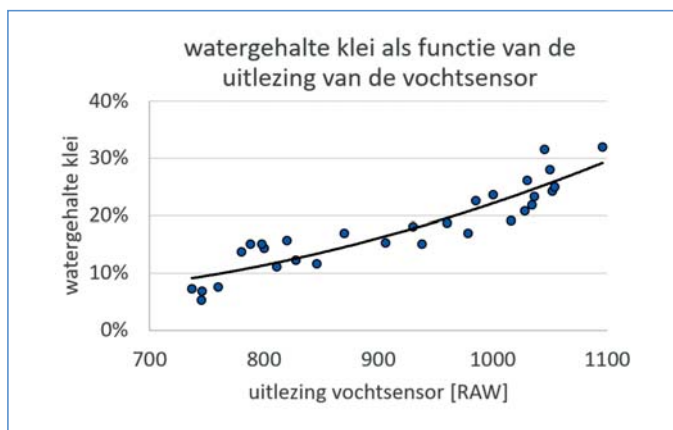
De meetwaarden zijn ten opzichte van de 5m referentiezakbaak. Voor elk van de curven is



Figuur 10 – Plaats vochtsensoren.

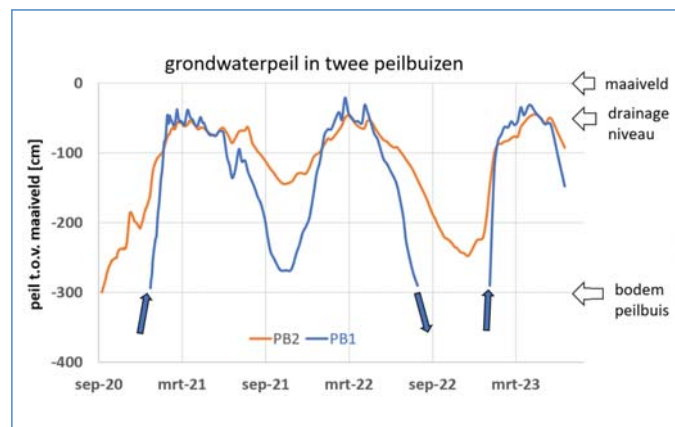


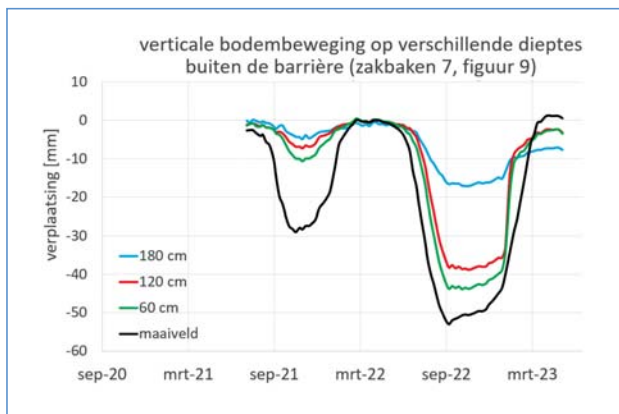
Figuur 11 – Vochtsensor.



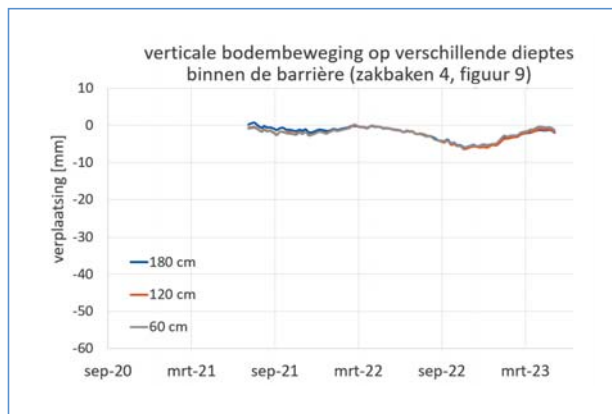
Figuur 12 – IJkcurve vochtsensoren.

Figuur 13 – Grondwaterstand in twee peilbuizen.

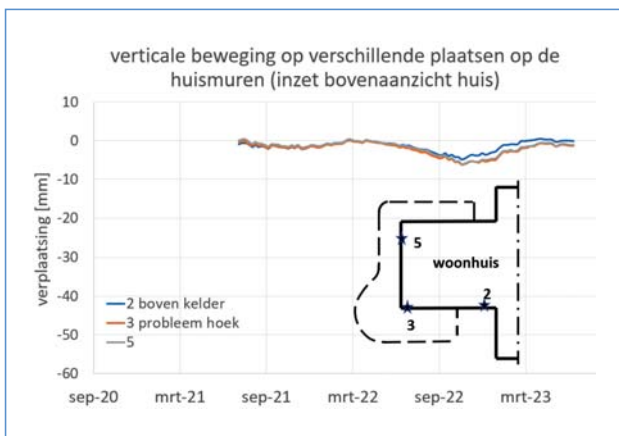




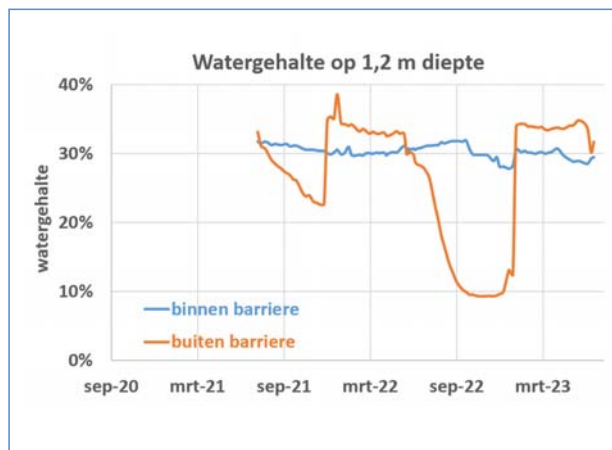
Figuur 14a –
Bodembeweging
buiten de barrière.



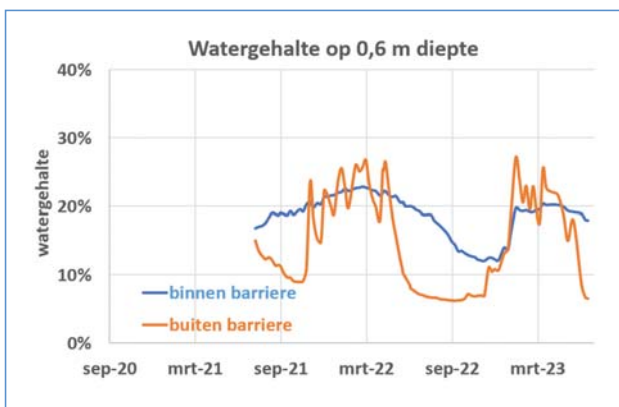
Figuur 14b –
Bodembeweging
binnen de barrière.



Figuur 14c –
Beweging muren huis.



Figuur 15a –
Watergehalte op
1,2 m diepte.



Figuur 15b –
Watergehalte
op 0,6 m diepte.

voor het nul niveau begin april 2022 genomen. Dit is een tijdstip waarop de seizoenale verplaatsing een plateau bereikt (maximale zwel) en vervolgens, naar de zomer, weer overgaat in krimp en daling.

Buiten de barrière zakt het maaiveld in de droge zomer van 2022 meer dan 50 mm (vergelijkbaar met de literatuur gegevens in ref 1). In de "gewone zomer" 2021 is dat minder dan 30 mm. Verschillende bodemlagen geven in de twee zomers verschillende bijdragen aan de verlaging van het maaiveld. In 2021 komt de grootste bijdrage op rekening van de toplaag en in 2022 is de bijdrage van de laag tussen 1,2 en 1,8 m het grootst.

Binnen de barrière is er (schijnbaar) ook een seizoeninvloed te zien, maar er is vrijwel geen

verschil in de verticale beweging op de verschillende dieptes (figuur 14b). Omdat alle metingen ten opzichte van de referentiezakbaak zijn, zou dit kunnen duiden op een geringe seizoenbeweging van de referentiezakbaak. Ook is er nog een effect van de temperatuur op de metingen. Zo zal de referentie rvs staaf door het verschil in zomer- en wintertemperatuur in lengte variëren. Het verschil tussen de zomer- en wintertemperatuur van de bodem gemiddeld over een diepte van 5 m is ongeveer 11°C. Dit geeft een uitzettingsverschil van 1 mm voor de 5 m lange referentie staaf.

De metingen van de liniaaltjes op het huis geven ook nauwelijks een verticale beweging te zien (figuur 14c). De beweging die te zien is, komt vrijwel overeen met de beweging van de zakbaken binnen de barrière. Het huis gaat ofwel enkele mm op en neer met de seizoenen, ofwel wordt

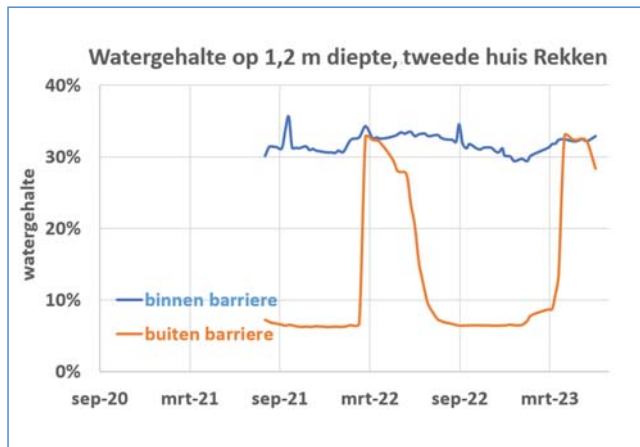


Figuur 16 –
Sleuf voor het
aanbrengen van de
verticale barrière,
bovenin zijn de
doorgesneden
wortels te zien.

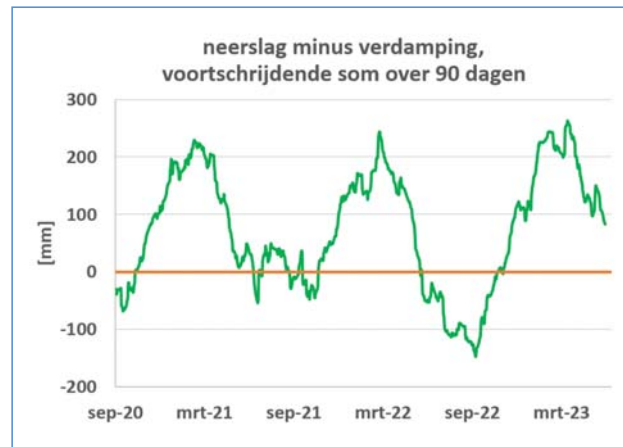
dit veroorzaakt door de hierboven genoemde mogelijke beweging van de referentiezakbaak. Wat in ieder geval duidelijk is dat de beweging van de probleemhoek nauwelijks verschilt van de beweging van de andere hoeken van het huis (minder dan 2 mm).

Vochtsensoren

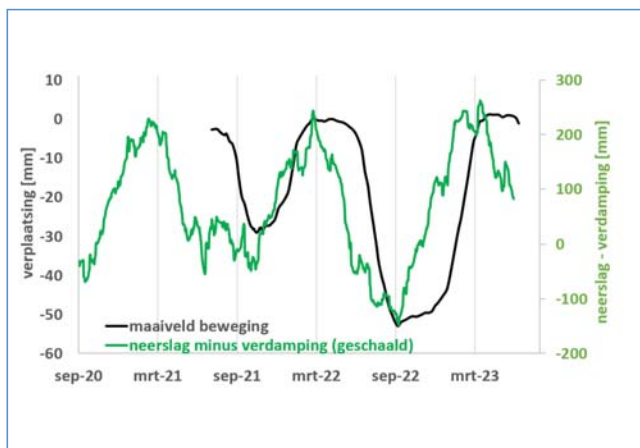
In figuur 15a en 15b is het watergehalte van de bodem op 1,2 en 0,6 m diepte binnen en buiten de barrière te zien. Op 1,2 m diepte binnen de



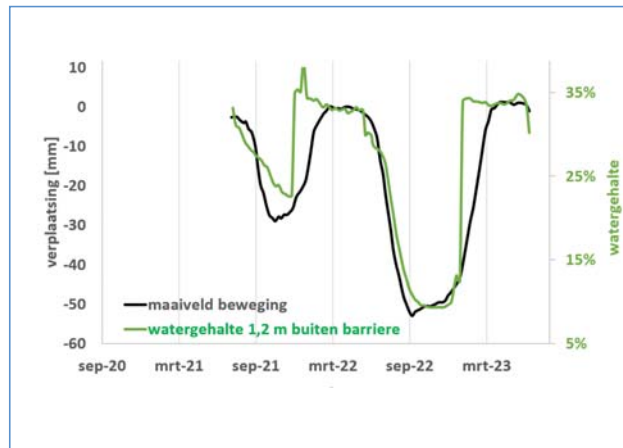
Figuur 17 –
Watergehalte op 1,2 m diepte, tweede huis in Rekken.



Figuur 18 –
Neerslag minus verdamping.



Figuur 19 –
Bodembeweging maaiveld buiten de barrière met geschaalde neerslag-verdamping.



Figuur 20 –
Bodembeweging maaiveld buiten de barrière met geschaalde watergehalte op 1,2 m diepte buiten de barrière

barrière blijft het watergehalte van de klei hoog en vrijwel constant, terwijl het buiten de barrière sterk varieert en in de zomer erg laag is. Het watergehalte op 0,6 m diepte is binnen de barrière ook meer constant dan buiten de barrière. Dat er toch binnen de barrière op dit niveau een seizoeninvloed te zien is, komt waarschijnlijk doordat er via de fundering en muren een uitwisseling van vocht met de bovenste grondlaag is. De vochtsensoren bevinden zich op slechts 0,6 m van de muur van het huis.

Tweede case

In 2021 zijn bij een ander huis in Rekken op dezelfde manier vochtbarrières aangebracht. Hier was de schade aan de zuid-west zijde ontstaan. Bovendien staan er dicht bij dit huis enkele grote eiken. In figuur 16 is te zien dat de (soms grote) wortels zich bevinden in de bovenste meter van de grond. Door de verticale barrière wordt voorkomen dat de wortels van de bomen vocht onttrekken aan de klei bij de fundering. Ook op deze locatie zijn er enkele vochtsensoren aan-gebracht. In figuur 17 is het resultaat van vochtsensoren op 1,2 m diepte binnen en buiten de barrière te zien. Ook hier is de watergehalte binnen de barrière hoog en blijft deze vrijwel constant. Buiten de barrière in de nabijheid van de eiken zijn grote veranderingen te zien. Aan dit huis is er na de droge zomer van 2022 ook geen nieuwe schade meer ontstaan.

Correlatie met de neerslag minus verdamping

Interessant is ook om na te gaan hoe de correlatie is tussen de bodembeweging en de hoeveelheid water die de bodem opneemt of afstaat. Als afstroming van neerslag kan worden verwaarloosd wordt deze waterhoeveelheid bepaald door de neerslag minus de verdamping. Van de KNMI website (ref 3) kan de dagelijkse neerslag-hoeveelheid in Rekken en de dagelijkse referentieverdamping (E_0) in Hupsel (vlakbij Rekken) gedownload worden. De referentieverdamping is de theoretisch maximale verdamping van een ideale grasmat met een optimale beschikbaarheid van water, berekend met de formule van Makkink (ref 4). Hoe groot de werkelijke verdamping van een oppervlak of gebied is, hangt af van de soort vegetatie/gewas, (soort) bomen, bebouwing, e.d. In een warm en droog jaar is de werkelijke verdamping lager dan in een gewoon jaar. De werkelijke verdamping (E) wordt gegeven door $E = g \cdot E_0$, waarbij g de reductiefactor is. Voor 2021 (een "normale zomer") wordt hier een reductiefactor van 0,81 toegepast en voor 2022, een droge warme zomer, een reductiefactor van 0,69 (ref 5). Deze waarden zijn gemiddelde waarden voor het hele Berkelgebied. In figuur 18 is de voortschrijdende som van de neerslag minus de werkelijke verdamping gegeven. De som over drie maanden is genomen om de trend in de neerslag minus verdamping weer te geven. Duidelijk te zien is dat in de zomer

van 2022 er een groter neerslagtekort was t.o.v. de zomer van 2021.

In figuur 19 is bodembeweging van het maaiveld buiten de barrière met de geschaalde waarde van de neerslag minus verdamping gegeven. De schaling van de neerslag minus de verdamping is zo gedaan dat het maximum en minimum hiervan samenvallen met ongeveer die van de bodembeweging. Hierdoor wordt het faseverschil zichtbaar. De bodemdaling volgt met een vertraging van twee tot vijf maanden de afname van de vochthoeveelheid. De stijging van de bodem volgt de toename van de vochthoeveelheid na een droge zomer trager dan na een gewone zomer. De klei neemt sneller vocht op dan dat het afstaat.

De bodembeweging van het maaiveld buiten de barrière met de geschaalde waarde van het watergehalte op 1,2 m buiten de barrière is te zien in figuur 20. Deze parameters zijn vrijwel in fase, zij het dat de bodemstijging een snelle toename van het watergehalte niet direct volgt.

Overige resultaten

In dit artikel is een representatieve selectie van alle meetresultaten gegeven. Op de website in aanbouw wonenopklei.nl (ref 7) zullen alle resultaten en andere informatie over dit onderwerp te vinden zijn. Het is de bedoeling dat de metingen voortgezet worden en het resultaat op de website bijgehouden wordt.

Discussie en conclusie

In het geval dat het huis of gebouw als geheel op en neer gaat door zwel-krimp van klei zal er niet snel schade ontstaan. De schade ontstaat wel als er sprake is van een verschilzetting. Belangrijkste risicofactoren voor een huis met een fundering op staal op een klei-ondergrond zijn:

- Een droge warme zomer met veel verdamping waarbij er een verschil kan ontstaan tussen bijvoorbeeld de zuid- en de noordzijde van het huis,
- Een gedeeltelijke onderkeldering,
- Bomen in de nabijheid van het huis (ref 6). Bij het hier besproken huis is de schade ontstaan aan de zuid zijde. Bovendien is dit huis ook gedeeltelijk onderkelderd.

De belangrijkste conclusie is dat na het aanbrengen van de barrières er geen nieuwe schade meer is ontstaan aan het huis (ook niet aan het tweede huis), dit ondanks de extreem droge en warme zomer van 2022 (ref 5 en 8). Het effect van de vochtbarrières is ook duidelijk te zien in de meetresultaten: er is nauwelijks nog een verticale bodembeweging binnen de barrières en het watergehalte van de klei binnen de barrière is vrijwel onafhankelijk van het seizoen. Dit maakt dat er geen beweging meer is door het krimp-zwel gedrag van de klei binnen de barrières.

Als gevolg is er ook nauwelijks een beweging van muurdelen t.o.v. elkaar te zien waardoor het ook onwaarschijnlijk is dat er in de toekomst nog schade zal ontstaan.

Het is aangeraden de vochtbarrières in het voorjaar aan te brengen, omdat er dan een (tijdelijke) evenwichtssituatie is. Dit is ook de tijd dat de ontstane scheuren geheel of gedeeltelijk zijn dichtgetrokken waardoor een restauratie minder ingrijpend is.

Schade kan voorkomen worden door variatie van het watergehalte van de klei-ondergrond zo veel mogelijk te beperken door zowel horizontaal als verticaal vochtbarrières in de bodem te plaatsen. Het is niet het neerslagtekort of het grondwaterpeil waarop de focus op gericht moet zijn. Het is de (hoge) verdamping die de boosdoener is en dat moet voorkomen worden. Dit wordt ook aangetoond door het experiment van Fytius e.a. (ref 9): Het maaiveldniveau onder de folie blijft langjarig stabiel door de kleibodem af te dekken met een folie met aan de zijkanten enkel ondiepe verticale barrières. Hier is eigenlijk alleen maar sprake van het verhinderen van de verdamping aan het oppervlak. Als er bomen in het spel zijn is een verticale barrière wel noodzakelijk. Samen met de lange levensduur van de toegepaste geomembraan is de verwachting dat de gekozen oplossing duurzaam zal zijn.

Referenties

1. Klimaatverandering, klei en funderingsproblemen, een case studie (deel 1), C. Blom, K. O. van der Werf, R.J. Stuurman, H. Kooi, GeoTechniek, juni 2022, 20-25
2. 20431_EC-5_Manual_Web.pdf. (metergroup.com)
3. KNMI - Overzicht van de neerslag en verdamping in Nederland.
4. CHO (1988) rapport 19, Van Penman naar Makkink - Een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen, 's-Gravenhage.
5. Waterhuishouding in het Berkelgebied, C. Blom en K. O. van der Werf, Stromingen, 2022 (28) nr 4, 3-12.
6. Krimp-Zwel een groeiend probleem, R. Stuurman, H. Kooi, R. Melman, K. van der Werf en C. Blom, Land en Water, mei 2021 nr 5, 34-35
7. www.wonenopklei.nl.
8. KNMI - Niet eerder deze eeuw zo droog als dit jaar.
9. Expansive soil test site near Newcastle, S.G. Fityus, D.W. Smith en M.A. Allman, J. Geotech Geotenvron Eng, 2004, 130, 686-695. ●

Van experimenteel onderzoek naar toepassing in de praktijk



www.deltares.nl

Deltares
Enabling Delta Life

Deltares is een onafhankelijk toegepast kennisinstituut op het gebied van water, bodem en infrastructuur. Wereldwijd werken we aan slimme technologische innovaties en duurzame oplossingen voor maatschappelijke uitdagingen.

Wij werken aan geotechniek in

- Waterkeringen
- (Spoor)weg- en leiding infrastructuur
- Funderingen en ondergrondse constructies
- Klimaatbestendige netwerken