

Onderwerp: Technische Review van twee onderzoeksrapporten betreffende schades in het Utrechtse wervengebied

Van: Jan Rots, TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

Datum: 12 augustus 2024

De ingenieursbureaus Antea Group, Royal HaskoningDHV en Witteveen+Bos hebben in opdracht van de gemeente Utrecht een aanvullend onderzoek naar schades in de Utrechts kelders uitgevoerd en recent twee rapporten opgeleverd:

- [1] Onderzoek naar Schades in de Utrechts Kelders – Op basis van Hypotheses en Trendanalyse. Documentnummer 04895773-RAP-Trendanalyse werfkelders Utrecht, concept revisie 1.0, 13 juni 2024.
- [2] Schadeboek Kelders Utrecht – Schadeboek wervengebied, voor het beoordelen van schades in de werf-, kluis- en straatkelders in Utrecht. Documentnummer BJ3330MIRP240607, 7 juni 2024.

Het onderzoek bouwde voort op eerder onderzoek vanaf 2020 naar berekeningen van de belastbaarheid van de kelders, naar een expertoordeel over de belastbaarheid van de kelders, en naar een inventarisatie van schades.

Hoewel het doel van studie [1] niet letterlijk is opgenomen in het rapport, is te deduceren dat het vooral ging om het zoeken of er trends en patronen vallen te ontdekken in schades en schadeoorzaken, op basis van brede gegevensverzamelingen. Het doel van studie [2] was te komen tot een catalogus van veel voorkomende schadebeelden, ter bevordering van eenduidigheid en uniformiteit in inspecties en hun rapportages.

De gemeente Utrecht heeft in overleg met de keldereigenaren TU Delft (prof. Jan Rots, constructiemechanica) meegenomen in de uitvraag van de onderzoeksopdracht en in twee tussentijdse meetings over de voortgang van het aanvullend onderzoek. Bij deze voortgangsbijeenkomsten hebben de keldereigenaren de gelegenheid gekregen/genomen om vragen over de onderzoekopzet en de uitkomsten te stellen hetwelk mede input is geweest voor deze review. De gemeente heeft verzocht om een technische review van de twee rapporten op te stellen. Deze notitie doet daarvan puntsgewijs verslag.

1. Gehanteerde overall-methodologie is goed

De gehanteerde overall-methodologie is passend en in overeenstemming met state-of-the-art van wetenschappelijke [3] en technische [4] literatuur betreffende schade in metselwerk-constructies. Met overall-methodologie bedoelen we de gebalanceerde benutting van drie typen gegevens voor de schade-analyse, namelijk *object-gegevens* (over de geometrie, materialen, randcondities en bouwwijze van de kelders), *schade-gegevens* (over de scheuren, hun wijdttes, lengtes, richtingen en hun patroon, en over meer materiaalgerichte schades zoals vochtschade, corrosie, afschilfering), en *context-gegevens* (over doorgaande processen en gebeurtenissen op, in, naast of onder het object, zoals grondwaterstandsveranderingen, droogzettingen van de gracht, baggerwerkzaamheden in de gracht, nabije bouwwerkzaamheden zoals herstelwerkzaamheden van wal- en kluiswanden of rioolwerkzaamheden, verkeersgegevens in verband met statische en dynamische verkeersbelastingen, ondergrondcondities, bomengroei, klimaateffecten).

De studie heeft vooral de derde categorie gegevens beschouwd en heeft daar een grote bijdrage aan geleverd. Veel historische gegevens over werkzaamheden en gebeurtenissen zijn aangeboord en een maximale inspanning is gedaan om data uit digitale en openbaar toegankelijke GIS systemen te

verwerven over o.a. sonderingen, bodempeilingen en kaarten van kabels, leidingen, bomen, muren en kelders. Dit is gecombineerd met inspectiegegevens van 91 kelders, aangevuld met recente inzichten voor 20 kelders die blootlagen tijdens renovatiewerkzaamheden en van bovenaf geïnspecteerd konden worden. Dit betekent dat ongeveer 10% van de in totaal circa 950 kelders in het Wervengebied zijn beschouwd, met brede omgevingsgegevens.

2. Intensiteit van de belasting/hazard en intensiteit van de schade lijken onderbelicht

Bij schade-predicties en schade-diagnostiek wordt normaal gesproken en indien mogelijk gekeken naar de intensiteit van de opgelegde belastingen en de intensiteit van de schade, en naar relaties tussen die twee.

Bij grond-constructie interactie bestaat de “belasting” vaak uit opgelegde bodembewegingen, door een veelheid aan oorzaken, zoals bovenstaand genoemd onder omgevingscondities. Grofweg kun je die bodembewegingen onderverdelen in drie typen: horizontale bodembewegingen, verticale bodembewegingen en trillingen, waarbij de eerste twee statisch langzaam van aard zijn en de derde dynamisch. Als de horizontale en verticale bodembewegingen uniform verdeeld zijn over alle randen/opleggingen van de constructie, zal er slechts een zuivere translatie of rotatie optreden, geen schade. Zodra de verplaatsingen bij de opleggingen niet-uniform zijn, ofwel er zijn verticale verschil-verplaatsingen (verschil-zettingen, ‘differential settlements’, krommingen) dan wel er zijn tussen linker- en rechterzijde van het gewelf horizontale verschil-verplaatsingen, dan ontstaan vervormingen en dus spanningen en dus scheuren. Gewelven, hoewel sterk vanwege hun boogvorm, staan er om bekend gevoelig te zijn voor dergelijke niet-uniforme verplaatsingen langs hun randen. Het is gebruikelijk dat, indien mogelijk, bij inspecties wordt gekeken naar de mate ofwel intensiteit van de niet-uniforme verplaatsingen. Dit kan bijvoorbeeld via waterpassingen en lintvoegmetingen onderaan de constructie. Daaruit kan een ‘angular distortion’ of relatieve hoekverdraaiing [5] als maat voor de kromming worden gedestilleerd, en een ‘support spreading’ als maat voor de horizontale verschil-verplaatsing tussen de opleggingen ter linkerzijde en rechterzijde van het tongewelf. Naast de grootte van de verschilzettingen is ook de vorm van het zettingsverloop relevant, met mogelijkheden van symmetrische neerbuiging, symmetrische opbuiging, asymmetrische neerbuiging, asymmetrische opbuiging [5] en mogelijke 3D niet-uniforme zettingstroggen inclusief torsie vervorming. Juist omdat de categorie “zakkingen, verschil-zettingen” zo dominant aanwezig is in de problematiek van de kelders [1,2], zijn deze aspecten van belang.

Het valt op dat dergelijke intensiteitsmaten voor de verticale en horizontale verschil-verplaatsingen in de rapporten weinig of geen aandacht krijgen.

Voor trillingen ten gevolge van dynamische bronnen op, in onder of naast het object is de peak-ground-velocity (pgv) gangbaar als intensiteitsparameter. Ook daarover geeft het rapport geen of weinig kwantitatieve informatie. Trillingen door bouwwerkzaamheden aan of dichtbij de objecten krijgen weinig aandacht. Voor dynamische verkeersbelastingen wordt een nogal binair onderscheid gemaakt tussen bevoorradingsroutes en niet-bevoorradingsroutes, terwijl terecht erkend wordt dat het op basis van onderzoek nog niet duidelijk is of een eenmalige zeer hoge overbelasting dominant is voor schade dan een frequente hoge overbelasting (een eenmalig zeer zwaar voertuig zoals een brandweerauto zou ook op een niet-bevoorradingsroute kunnen voorkomen).

Wat betreft de intensiteit van de schade is het gebruikelijk een schade-classificatie te hanteren met een schaal van ‘negligible, very slight, slight, moderate, severe tot very severe (damage states DL1 t/m DL5)’, vaak gebaseerd op scheurwijdte, scheurlengte, scheuraantal en scheurposities [6,7,8]. Een dergelijke onderverdeling van de geïnspecteerde schades lijkt in de rapporten geen of weinig aandacht te krijgen, althans [1,2] tonen geen info. De studie lijkt gebaseerd op een nogal binaire

indeling in kelders mét schade en kelders zónder schade, en tellingen daarvan. Noties als “meer scheuren”, “vaker scheuren”, “meer last hebben van scheuren” en “gevoeliger zijn voor scheuren”, bijv. op pagina 40, lijken niet gebaseerd op de intensiteit van de schade maar op een kwalitatieve hoofdindeling met wel/niet aanwezig zijn van schade.

3. Goede relativering, besef van de beperkingen, en terechte voorzichtigheid in de conclusies

De onder punt 2) genoemde marginale aandacht voor de intensiteitsmaten aan de belastingskant en de schadekant, laat staan voor hun onderlinge relaties in zogenaamde kwetsbaarheidscurves (dat zijn S-vormige grafieken voor de overschrijdingskans van een bepaalde damage state als functie van de opgelegde intensiteit van de belasting [9]) betekent dat de studie niet anders kan worden gezien dan als een zeer globale trendanalyse, met beperkingen.

In het rapport wordt überhaupt al gesteld dat de resultaten met de nodige voorzichtigheid betracht moeten worden en dat hypothesen over schade-oorzaken niet – of slechts een enkele keer gedeeltelijk – kunnen worden bevestigd ([1] pagina 4). De onderzoekers geven daarvoor als voornaamste redenen (a) dat schades zeer complex zijn, vaak meerdere gecombineerde oorzaken hebben met lastig te achterhalen volgordelijkheid, (b) dat het beeld van de omgevingscondities hoewel goed onderzocht nog steeds incompleet is en een lage betrouwbaarheid heeft, en (c) omdat er een ‘bias’ (vooringenomenheid) zit in de inspectiedata. Dit laatste wordt bijvoorbeeld gemeld op pagina 17 waar gesteld wordt dat vooral keldereigenaren die schade ondervonden zich hebben aangemeld voor de (91) inspecties. Dit zou kunnen betekenen dat het beeld te somber is en dat over de gehele populatie minder schade zou kunnen optreden. Omgekeerd wordt op pagina 16 gesteld dat het beeld te optimistisch kan zijn, omdat er scheuren gemist kunnen zijn tijdens de inspecties of omdat scheuren zich niet zichtbaar aan het oppervlak manifesteren. Zo worden bevindingen op meerdere plekken in het rapport genuanceerd en gerelativeerd, met faire vermelding. De onderzoekers blijken de beperkingen van hun studie te kennen en relativeren hun conclusies.

Wij ondersteunen deze beperkingen en de relativering van de conclusies. Wij voegen daar aan toe het genoemde onder punt 2, hetwelk tot nog meer voorzichtigheid noopt.

4. Weinig pogingen om subtypes van kelders te identificeren

Gezien bovenstaande is het in [1] vrijwel niet mogelijk gebleken bepaalde hypothesen over schadeoorzaken te verifiëren dan wel te falsificeren. Op pagina 40 wordt afsluitend gesteld dat “de bouwkwiliteit van de kelders, de conditie van de kluiswanden, het type kelder en de funderingsopbouw meer van invloed is op het schadepatroon van de kelder dan de externe invloeden die hierop hebben gewerkt”. Op pagina 41 wordt vervolgd met “Iedere kelder is uniek”.

Hierover melden wij het volgende. Bij bijvoorbeeld de schade door mijnbouw in Groningen is de huis-tot-huis variatie ook buitengewoon groot. Desalniettemin wordt daar een poging gedaan om de vele huizen onder te brengen in sub typologieën, zeg een stuk of 10-20 in totaal. Attributen zijn dan de geometrie (vorm en openingen), de afmetingen, de draag-constructieve opbouw, de conditie van de materialen (bijv. met een indeling zeer matig, matig, gemiddeld, goed), locatie-specifieke grondgegevens. Het valt op dat er geen of weinig poging lijkt te zijn gedaan om tot een dergelijke sub-classificatie van de kelders te komen; er is weliswaar naar de vier hoofdtypen gediscrimineerd (werfkelder, kluiswanden, straatkelder, brugkelder) maar onderverdelingen zijn niet gemaakt terwijl de “uniekheid” en variatie ervan wel als belangrijk, zelfs doorslaggevend, worden gezien. Object-karakteristieken zoals de helling van de toeg (flauw of spits), lengte-hoogte verhoudingen, metselwerkdiktes, de conditie en kwaliteit van het metselwerk (bouwkwiliteit, staat van de materialen) kunnen in principe tijdens inspecties in kaart worden gebracht, hetgeen zou helpen bij

het opsporen van gevoeligheden voor verschil-zettingen en verkeersbelastingen. Ter illustratie: in de SBR Trillingsrichtlijn Schade aan Bouwwerken [9] wordt een hoofdindeling gehanteerd in “Normale bouwkundige staat” en “Gevoelige bouwkundige staat en/of monumentale status” met verschillende drempelwaarden voor toegestane trillingen.

Het omkeren van de redenering, dat de bouwkwaliteit en het type kelder de *oorzaak* zouden kunnen zijn (onderaan pagina 31), eerder dan de verschilzettingen door externe invloeden of de verkeersbelastingen, gaat ver.

Ook modellering kan helpen om de gevoeligheden te begrijpen. Modellering werd in een eerder stadium wel gedaan voor de uiterste grenstoestand (‘ultimate limit state’, veiligheid), maar niet voor de hier beschouwde lagere schadetoestanden (‘serviceability limit states’, bruikbaarheids-grenstoestanden). Wellicht vielen al deze zaken (evenals de onder 2 genoemde zaken) buiten de opdracht voor deze in tijd en kosten begrensde globale trendanalyse, dus geen verwijten, maar het is goed ze te benoemen.

5. Enkele opmerkingen bij de categorisering van schadebeelden

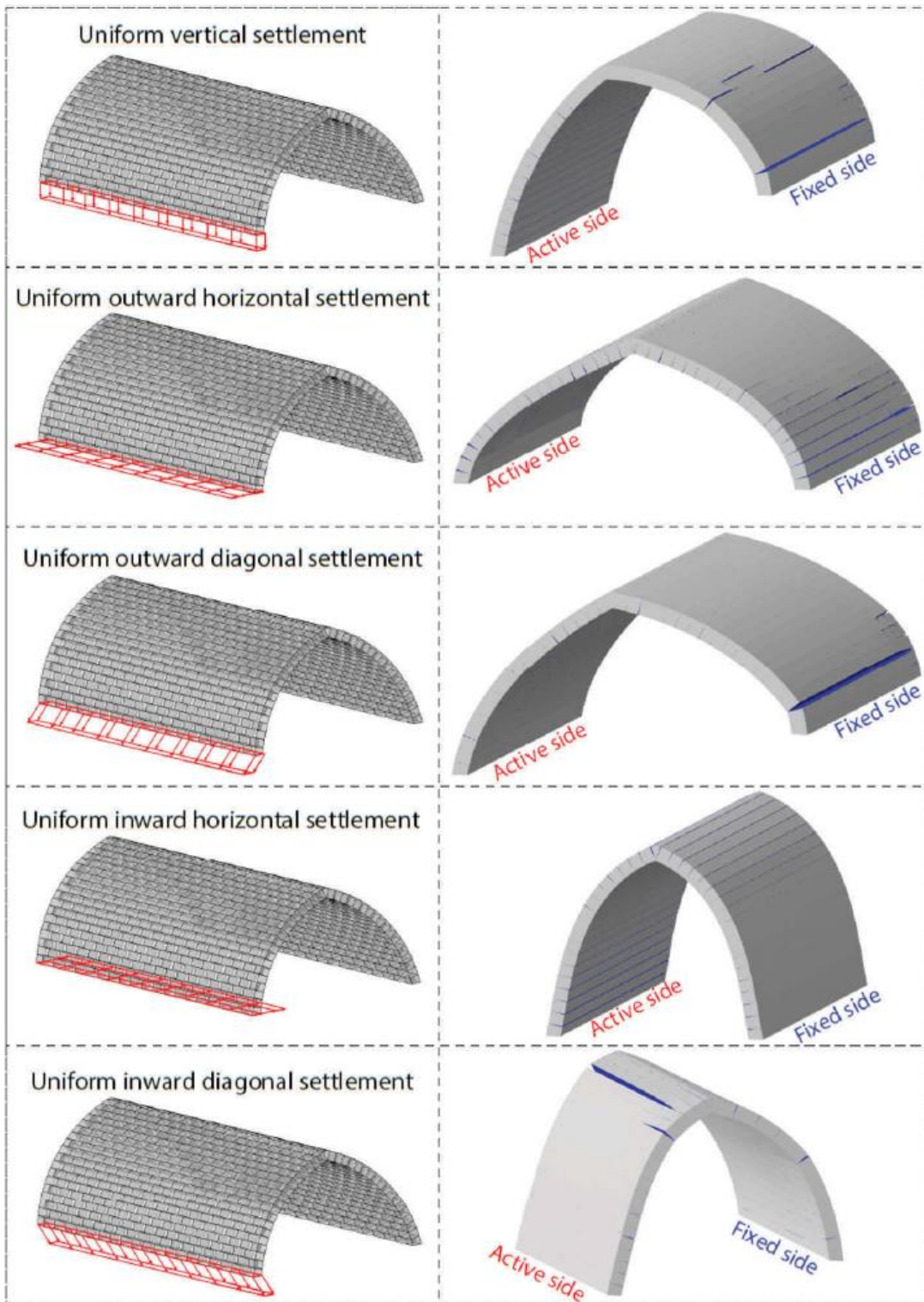
Het schadeboek [2] omvat twee delen, de schade in termen van scheurbeelden (hoofdstuk 3, veelal constructieve schade) en de schade die meer materiaalkundig van aard is (hoofdstuk 4, corrosie, afschilfering, schade aan voegwerk) en/of meer als gevolgschade kan worden aangemerkt (vochtschade, hoofdstuk 4, kan materiaalkundig of bouwfysisch van aard zijn, of gevolg van constructieve scheuren).

Het schadeboek maakt een complete indruk. We zien geen omissies. Wel zijn er de volgende opmerkingen qua ordening en potentiële oorzaken van de scheuren, over het eerste deel.

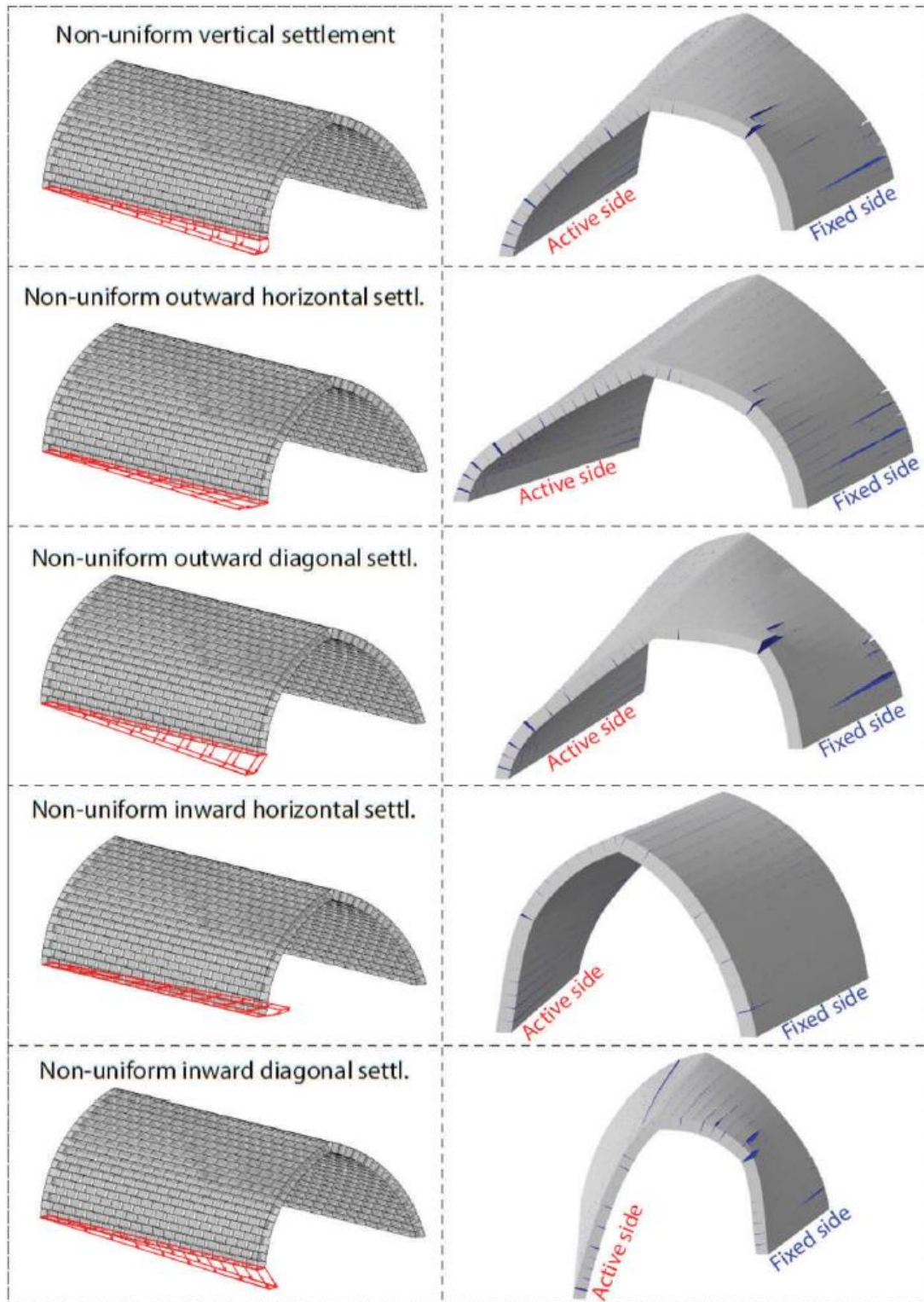
- In hoofdstuk 3 wordt een indeling gepresenteerd in negen categorieën (S01A, S01B, S02A, S02B, S03, S04, S05, S06, S07). Op pagina 10 en 15 van het analyserapport [1] wordt verwezen naar een oudere indeling met scheuren van het type I, II, III, IV en V. Het verdient aanbeveling dit in een toekomstige update te harmoniseren.
- Schade S01A (scheur in de lengterichting van het gewelf, dat wil zeggen loodrecht op de rijrichting) wordt volledig toegewezen aan verkeersbelasting. Dergelijke scheuren kunnen echter ook ontstaan door ongelijke steunpunts-verplaatsingen aan de randen van het gewelf, met dan weer meerdere achterliggende oorzaken voor die ongelijke steunpunts-verplaatsingen. Dit blijkt bijvoorbeeld uit een modelstudie [10] met numerieke metselwerkmodellen in de eindige-elementenmethode [11], zie Figuur 1 en 2. De figuren geven voorspelde scheurpatronen voor verschillende scenario’s van uniforme en niet-uniforme horizontale en verticale steunpuntsverplaatsingen langs een van de randen. Ze tonen regelmatig horizontale scheuren in de lengterichting van het gewelf. Dergelijke modellen zijn gevalideerd aan de hand van laboratoriumproeven waarbij horizontale en diagonale scheuren optraden, zie Figuur 3.
- Wat betreft de schadebeelden S02A, S03 en S05 (verticale scheuren in de wanden doorgaand als horizontale of diagonale scheur in de boog): in een vorige versie van het schadeboek [12] werd een duidelijker onderscheid aangebracht. Daar werden scheuren van het type II, beginnend bovenaan de constructie, helder gekoppeld aan opbuigende situaties waarbij “de uiteindes van de kelder minder steun vinden in de fundering en een grotere zakking ervaren dan het middengedeelte van de kelder” (pagina 10, [12]). Scheuren van het type III, beginnend vanaf de onderzijde, werden helder gekoppeld aan situaties waarbij “de uiteindes van de kelder meer steun vinden in de fundering” en een kleinere zakking ervaren dan het middengedeelte (pagina 11, [12]). Dit refereert naar de onder punt 2) genoemde zettingspatronen van opbuiging (‘hogging’, trek aan de bovenzijde, de scheuren beginnen

boven) en neerbuiging ('sagging', trek aan de onderzijde, de scheuren beginnen onder) en is behulpzaam in het duiden van schades bij zettingsverschillen. Dergelijke redeneringen zijn minder helder terug te vinden in de beschrijvingen van S02A, S03 en S05.

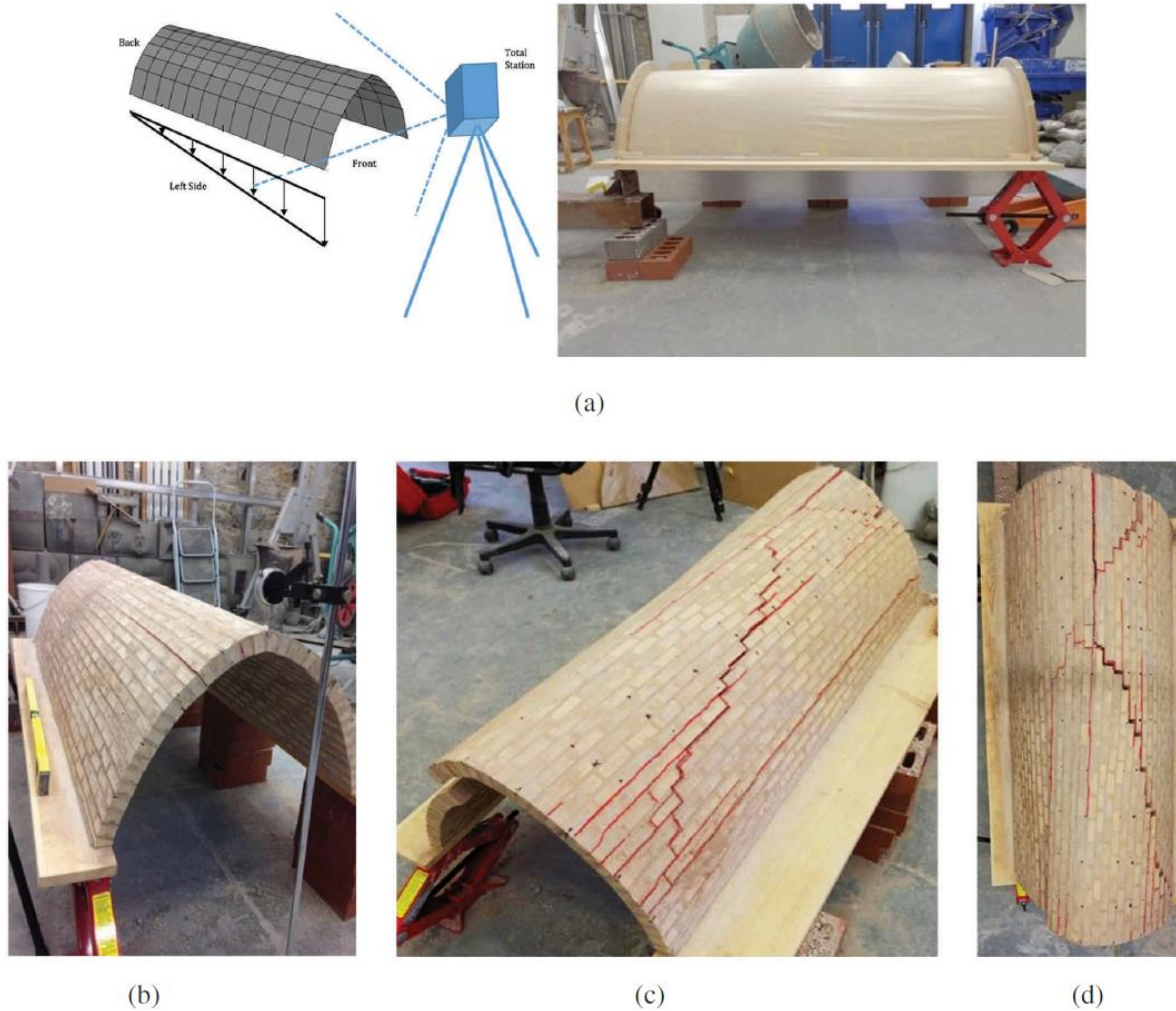
- Gekoppeld aan bovenstaande: in de figuren bij S02A, S03 en S05 zijn horizontale of verticale pijlen toegevoegd die de relatieve beweging van kelderdelen en muur delen ten opzichte van elkaar illustreren. Deze pijlen zijn niet compleet. Bijvoorbeeld het beeld bij S02A kan niet alleen komen door een horizontale verplaatsing van het voorste kelderdeel, maar ook door een verticale verplaatsing van het voorste kelderdeel naar beneden (de constructie breekt dan van bovenaf in tweeën). En voor het beeld bij S05 zouden ook verticale pijlen kunnen worden toegevoegd, naast de horizontale pijlen. Er zijn meerdere mogelijkheden van horizontale en verticale verplaatsingen langs de randen die scheuren kunnen verklaren, zie ook Figuur 1 en 2. Dit zou nader benoemd of geïllustreerd kunnen worden. Het maakt ook de verbinding naar achterliggende oorzaken van die verschilverplaatsingen beter mogelijk.
- *Actieve, passieve en ademende scheuren.* Het verdient aanbeveling waar mogelijk de aandacht, inspectie en duiding ook te richten op de activiteit van de scheuren. Een scheur kan actief zijn over langere tijd, dat wil zeggen groeien in lengte en breedte in een voortschrijdend proces. Een scheur kan ook passief worden, dat wil zeggen de scheurbreedte neemt af, kennelijk is de aanvankelijke oorzaak van de scheur dan aan het wegebben, of een nieuwe scheur eist alle aandacht en trekspanning op. Daarnaast kan een scheur wisselend wijder en minder breed worden, bijvoorbeeld door reguliere seizoensinvloeden of dag- en nachtcycli. Het is aan te bevelen daar in de toekomst over na te denken. Relatief eenvoudige scheurmetingen zijn mogelijk. Dit helpt om scheuren beter te begrijpen.
- Meer aandacht voor verergering van scheuren. Het is goed mogelijk dat voor een bepaald scheurbeeld aanvankelijk een hoofdoorzaak was aan te wijzen, maar dat een andere latere belasting die scheuren verergert. Er ontstaat dan niet het preferente scheurbeeld dat hoort bij die belasting, maar een ander reeds bestaand scheurbeeld verergert, bijv. door toename van scheurbreedtes of scheurlengtes. Dit speelt bijvoorbeeld zodra een langzaam ontwikkeld scheurpatroon door zettingen wordt verergerd door zwaar verkeer. We komen dan in de sfeer van de meerdere oorzaken die door elkaar lopen en elkaar kunnen versterken. Het schadeboek besteedt er aandacht aan in de teksten voor oorzaak en aanleiding, op pagina's 7-17, maar het onderwerp zou nog intensiever geadresseerd kunnen worden omdat het van belang is voor 'technische toerekenbaarheid' van schades naar meerdere oorzaken, ook de meerdere achterliggende oorzaken van de zettingen.
- Lay-out technisch is het handiger om in de belangrijke tabel op pagina 5 en 6 duidelijker aan te geven dat de bovenschrijftjes horen bij de plaatjes eronder, bijvoorbeeld door extra blanco regels, en de bovenschrijftjes S03 en S04 onderaan pagina 5 te verschuiven naar pagina 6. (Terzijde: in beide rapporten zitten nog enkele taalfouten, het verdient aanbeveling ze bij een eventuele update te verbeteren).



Figuur 1. Voorbeelden van schadepatronen bij verschillende *uniforme* verticale, horizontale en diagonale verplaatsingen langs een van de opleggronden van het tongewelf. Uit modelleerstudie [10] op basis van eindige-elementenmethode [11].



Figuur 2. Voorbeelden van schadepatronen bij verschillende *niet-uniforme* verticale, horizontale en diagonale verplaatsingen langs een van de oplegranden van het tongewelf. Uit modelleerstudie [10] op basis van eindige-elementenmethode [11].



Figuur 3. Voorbeelden van laboratoriumexperimenten ter validatie van de numerieke modellen [10].

6. Slotopmerkingen

Hoewel de overall-methodologie van de trendanalyse en het schadeboek passend en geschikt zijn met de drieslag van object-gegevens, schade-gegevens en context/omgevings-gegevens, is bovenstaand een aantal kanttekeningen geplaatst die nogmaals en in versterkte mate de door de onderzoekers genoemde beperkingen van de studie bevestigen. Dit betekent dat de uitkomsten en conclusies van de studie met grote voorzichtigheid tegemoet dienen te worden getreden. Er is voorsnog geen duidelijk patroon met schades herkenbaar gerelateerd aan oorzaken te ontdekken.

Dit is wellicht een tegenvaller voor zowel de onderzoekers, als voor de steeds meer gezamenlijk optrekkende Gemeente en Eigenaren. Het is zoals het is, maar de poging is gedaan met de thans beschikbare informatie, en dat was onderdeel van de zorgplicht en verantwoordelijkheid van de gemeente als 'buur' van de eigenaren, conform [13].

In deze technische review is een aantal technische punten benoemd dat als suggestie voor toekomstige uitbreiding en nader onderzoek kan worden opgevat. Het gaat dan bijvoorbeeld om meer kleur aan te brengen qua intensiteit van de diverse belastingen waaronder zettingsverschillen, meer differentiatie in schadetoestanden van licht tot zwaar, zo mogelijk het gebruik van sub-typologieën van kelders al was het maar in grove vorm, en een aantal verbeteruggesties voor het schadeboek.

Of het nuttig en proportioneel is om daar dieper in te duiken gegeven de komende keuze tussen de drie varianten voor een kostenverdeelsleutel (bewijsvermoeden, technisch expertoordeel en subsidieregeling) valt te bezien. Wel blijft het een gezamenlijke wens van eigenaren en gemeente om schades waar mogelijk beter te begrijpen, al was het maar om ondersteuning te bieden aan het ontwerp van effectieve herstelmaatregelen (je kunt een patiënt pas goed genezen als je de oorzaak van zijn/haar aandoening kent). In dat verband is het goed om te wijzen op de reeks Anamnese, Diagnose, Therapie en Control. Het verhaal van de patient (de anamnese, levensloop, conditie, omgevingscondities), de diagnose van de schade, de effectieve therapie, alsook de controle na afloop zijn van belang, al zal dat laatste nog ver weg zijn in de gedachten. Nieuwe, steeds meer toegankelijke en betaalbare monitoringstechnieken die continu real-time en op afstand data kunnen uitlezen, alsmede modelleertechnieken kunnen daarbij in de toekomst desgewenst behulpzaam zijn.

Referenties

[1] Onderzoek naar Schades in de Utrechts Kelders – Op basis van Hypotheses en Trendanalyse. Documentnummer 04895773-RAP-Trendanalyse werfkelders Utrecht, concept revisie 1.0, 13 juni 2024.

[2] Schadeboek Kelders Utrecht – Schadeboek wervengebied, voor het beoordelen van schades in de werf-, kluis- en straatkelders in Utrecht. Documentnummer BJ3330MIRP240607, 7 juni 2024.

[3] Structural damage in masonry – Developing diagnostic decision support. I.A.E. de Vent. Proefschrift, TU Delft, 274 pp, 2011.

[4] Onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen – Methodologie en case studies ter duiding van de oorzaken. Van Staalduinen P.C., Terwel K.C., Rots J.G. Rapport in opdracht van NCG Nationaal Coördinator Groningen. TU Delft Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, rapport nummer CM-2018-01, juli 2018.

[5] 2D and 3D Modelling strategies to reproduce the response of historical masonry buildings subjected to settlements. Prosperi A., Longo M., Korswagen P.A., Korff M., Rots J.G. International Journal of Architectural Heritage – Conservation, Analysis, and Restoration. March 2024.

[6] Settlement of buildings and associated damage. Burland J.P., Wroth C.P. In Proceedings of Conference on Settlement of Structures, pp. 611-654, Pentech Press, Cambridge, 1974.

[7] Building response to excavation-induced settlement. Boscardin M. D., Cording E. J. Journal of Geotechnical Engineering-ASCE 115 (1):1–21, 1989.

[8] Fragility curves for light damage of clay masonry walls subjected to seismic vibrations. Korswagen P.A., Longo M. Rots J.G. Bulletin of Earthquake Engineering 20:6193–6227, 2022.

[9] SBR Trillingsrichtlijn A: Schade aan Bouwwerken. SBRCURnet Delft, 2017.

[10] Historic barrel vaults undergoing differential settlements. D'Altri A.M., De Miranda S., Castellazzi G., Hudson J., Theodossopoulos D. International Journal of Architectural Heritage Vol. 14, No. 8, 1196-1209, 2020.

[11] A damaging block-based model for the analysis of the cyclic behaviour of full-scale masonry structures. D'Altri A.M., Messali F., Rots J.G., Castellazzi G., De Miranda S. Engineering Fracture Mechanics 209:423-48, 2019.

[12] Kelders Wervengebied Utrecht – Inventarisatie en overzicht oorzaken schades aan kelders, Antea Group, RoyalHaskoningDHV en Witteveen+Bos, Rapport projectnummer 0413927.128, definitieve revisie 5.0, 28 januari 2022.

[13] De vergeten burenplicht. Advies van 12 april 2021, uitgebracht aan de Raad en het College van Burgemeester en Wethouders van de Gemeente Utrecht en de Eigenaren. Commissie van Wijzen Wervengebied Utrecht, 86 pagina's met bijlagen, 2021.