



Kluiskelder Kromme Nieuwegracht

Rapport Verificatieberekening

Gemeente Utrecht

21 september 2021

Project Kluiselder Kromme Nieuwegracht ■
Opdrachtgever Gemeente Utrecht

Document Rapport Verificatieberekening
Status Definitief 03
Datum 21 september 2021
Referentie 122608/21-014.179

Projectcode 122608
Projectleider ■■■■■
Projectdirecteur ■■■■■

Auteur(s) ■■■■■
Gecontroleerd door ■■■■■
Goedgekeurd door ■■■■■

Paraaf

Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. | Deventer
Hoogoorddreef 15
Postbus 12205
1100 AE Amsterdam
+31 (0)20 312 55 55
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden veelevoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

	MANAGEMENT SAMENVATTING	5
1	INLEIDING	7
1.1	Object KNG  Kromme Nieuwegracht 	7
1.2	Doel van de verificatie	7
1.3	Leeswijzer	7
2	UITGANGSPUNTEN, RANDVOORWAARDEN EN REKENMETHODIEK	9
2.1	Beschrijving situatie	9
2.2	Beoordelingsscope	14
2.3	Veiligheidsfilosofie en Rekenmethodiek	14
	2.3.1 BGT	14
	2.3.2 UGT	16
3	MATERIAALGEGEVENS	20
3.1	Grondopbouw en geotechnische parameters	20
3.2	Eigenschappen metselwerk	21
4	MODELLERING EN BEREKENING	23
4.1	Inleiding	23
4.2	Model beschrijving	23
	4.2.1 Uitgangspunten en geometrie	23
	4.2.2 Gefaseerde berekening	26
	4.2.3 Beschouwde belastingposities	27
	4.2.4 Grondopbouw en grondparameters	28
	4.2.5 Metselwerkeigenschappen	28
	4.2.6 Overige eigenschappen	29
5	EXTERNE BELASTINGEN EN BELASTINGCOMBINATIES	30
5.1	Classificatie	30
5.2	Permanente belastingen	30

5.3	Veranderlijke belastingen	30
5.3.1	Belasting model 1 (BM1)	31
5.3.2	Belastingmodel 3 (BM3)	33
6	VERIFICATIEBEREKENING	35
6.1	Inleiding	35
6.2	Resultaten berekening belastinggeval eigen gewicht	35
6.3	BGT	37
6.3.1	BM1	37
6.3.2	BM3	40
6.4	UGT	42
6.4.1	GRF-BM1	43
6.4.2	GRF-BM3	46
6.4.3	PF-BM1	48
6.4.4	PF-BM3	52
7	CONCLUSIE	55
8	REFERENTIES	56
	Laatste pagina	57
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Materiaalparameters Diana	2
II	BGT en UGT RESULTATEN	10
III	Inspectierapport Kromme Nieuwegracht	1

MANAGEMENT SAMENVATTING

Inleiding

De gemeente Utrecht heeft verzocht om een evaluatie van de draagkracht van zestien metselwerkkelders gelegen in het stadscentrum. Voor het onderzoek zijn kelders geselecteerd met een verschillende opbouw en kenmerken die in uiteenlopende periodes zijn gebouwd. De gemetselde boogkelders vormen de fundering van delen van de openbare weg in het wervengebied in het historische centrum van Utrecht. Deze kelders vervullen dus een belangrijke functie voor de openbare weg die boven de kelders ligt. Om te beoordelen of de huidige lastbeperkingen voldoen aan de huidige bouwregelgeving is het gewenst om zes kelders aan een technisch onderzoek te onderwerpen en de belastbaarheid van deze kelders te bepalen. Als onderdeel van de onderhavige opdracht is een rekenkundige beoordeling van de constructieve veiligheid uitgevoerd van de kluiskeider gelegen aan Kromme Nieuwegracht [REDACTED] (afgekort met KNG [REDACTED]). Voorliggend rapport bevat de berekening en de uitkomsten daarvan, alsmede de gehanteerde uitgangspunten.

Scope

Over de kelder loopt een verkeersverbinding bestaande uit één rijbaan voor verkeer en een trottoir. Op de Kromme Nieuwegracht is de maximale aslast beperkt tot 2 ton. De kelder is getoetst op basis van de rekenmethodiek uit de voorafgaande studie voor de gemeente 's-Hertogenbosch 6. De gemetselde boogconstructie is gemodelleerd in 2D plane strain (vlakke rek) met het eindige elementenprogramma, DIANA versie 10.4. Voor de bepaling van de belastbaarheid van de kelder, zijn zowel berekeningen voor uiterste grenstoestand (afgekort met UGT) op basis van Global Resistance Factor (GRF) en partiële factoren (PF) als bruikbaarheidsgrenstoestanden (afgekort met BGT) uitgevoerd. De rekenmethodiek is volledig beschreven in de rekenplannen 1 en 2.

Conclusies

De constructieve veiligheid van het object is beoordeeld middels berekening van de UGT (GRF) en BGT grenstoestanden. Conform hoofdstuk 9 van Aanpak constructieve beoordeling metselwerk boogbruggen van de gemeente 's-Hertogenbosch 6 zijn verificatieberekeningen van de KNG [REDACTED] zijn uitgevoerd. De constructie is getoetst op verkeersbelasting conform Eurocode NEN-EN 1991-2, waarbij de verkeersbelasting worden geregeld volgens de bebording uit tabel 2B van de NEN8701. Voorts is een berekening van een speciaal voertuig (brandweerwagen) uitgevoerd.

Op basis van deze verificatieberekeningen is geconcludeerd dat:

- BGT: voor alle belastingposities met een C20 bord belasting (BM1) van 3 ton blijft de maximale vervorming met 6,8 mm onder de maximaal toelaatbare vervorming van 12,6 mm (criterium $L/300$). Het schade niveau 2 (afgekort met DL2) van Damage State 1 (DS1-DL2) op basis van de schadeparameter ψ van 2.4 is voor dezelfde belasting (BM1 C20 3 ton) niet overschreden. Dit betekent dat fijne scheuren ontstaan, maar de schade nog steeds binnen de BGT-grenzen blijft (Damage State 1). Ten aanzien van de BGT toets wordt voor een belasting van **3 ton** (C20 bord) derhalve aan alle gestelde eisen voldaan. De ladderwagen onder de BM3-belasting voldoet ook aan de eisen qua verplaatsing en beschadiging (DS1-DL2) voor alle belastingposities;
- UGT: voor GRF berekeningen, wordt de C20-belasting **7 ton** als de ultieme capaciteit voor de analyse beschouwd. Op dit punt wordt het bezwijkmechanisme gevormd en vertoont de capaciteitscurve een plotselinge daling. De ladderwagen belasting voldoet aan de UGT-eisen. In de maatgevende belastingpositie worden twee plastische scharnieren gevormd, waardoor de kelder de ladderwagen belasting kan dragen.

In conclusie:

- voor standaard verkeer (volgens C20 bord van BM1), 3 ton is toegestaan in BGT condities en 7 ton is toegestaan voor de UGT conditie;
- de doorvoer van de ladderwagen (volgens BM3) boven op de kelder is toegestaan en voldoet aan de eisen van zowel BGT als UGT.

Op basis van de uitgevoerde berekening van de kelder Kromme Nieuwegracht [REDACTED] kan worden geconcludeerd, dat een aslast voor standaard verkeer tot 3 ton toelaatbaar is. Ook is geconcludeerd dat een

ladderwagen op de kelder KNG kan staan. Aangetekend dient te worden dat in dezelfde straat mogelijk kelders met een lagere draagkracht liggen.

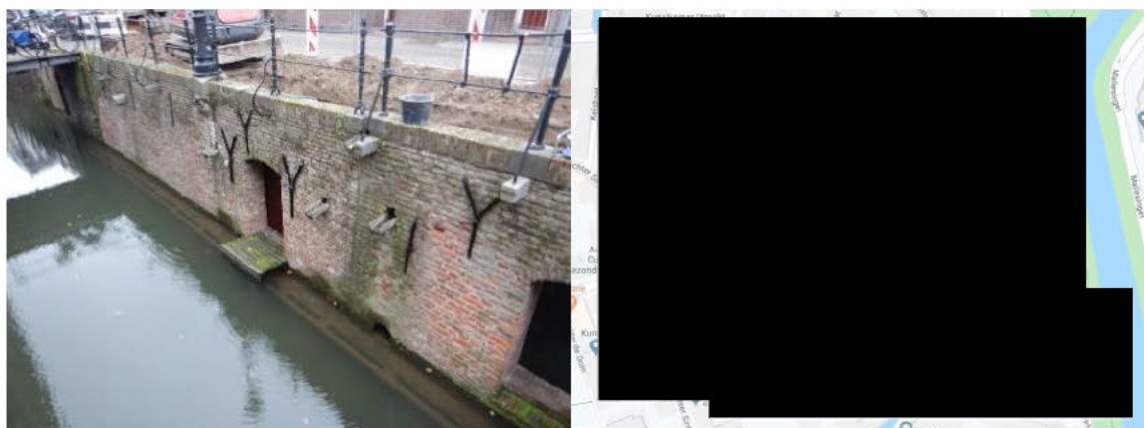
1

INLEIDING

1.1 Object KNC [REDACTED] Kromme Nieuwegracht [REDACTED]

De kelder van Kromme Nieuwegracht [REDACTED] is een kluiskeider in het stadscentrum van Utrecht. De kluiskeider verschilt van een werfkelder door de afwezigheid van de werf/wal aan de grachtzijde. In afbeelding 1.1 is een aanzicht en de locatie van de kelder gegeven.

Afbeelding 1.1 Kluiskeider Kromme Nieuwegracht [REDACTED] (bron: Google Maps)



1.2 Doel van de verificatie

De doelstelling van de uitgevoerde verificatie berekening betreft de beoordeling van de rekenkundige constructieve veiligheid van het object via berekening onder de grenstoestanden UGT (GRF en PF) en BGT.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport informeert de opdrachtgever over de uitgangspunten en de resultaten van de verificatieberekening van object KNC [REDACTED] en bevat onder meer de onderstaande onderdelen:

- paragraaf 2, uitgangspunten en randvoorwaarden: hier worden de huidige situatie van de kelder en de belangrijkste resultaten van de inspectie (bijlage III) en de archiefonderzoek samengevat. Overigens wordt de rekenmethodiek toegelicht;
- paragraaf 3, materiaalgegevens: waar de informatie over grond en metselwerk wordt gegeven;
- paragraaf 4, modellering: informatie over de implementatie van het Diana-model wordt gegeven. Materiaalmodelparameters, belastingpositie en fasering worden beschreven;
- paragraaf 5, belastingen: de verschillende externe belasting die in de berekeningen wordt gebruikt, wordt beschreven;
- paragraaf 6, verificatieberekening: de resultaten van de berekening met betrekking tot zwaartekracht, BGT en UGT worden voorleggen;

- paragraaf 7, conclusie: volgens de rekenresultaten worden conclusies over de draagkracht en de veiligheid van de kelder gegeven.

2

UITGANGSPUNTEN, RANDVOORWAARDEN EN REKENMETHODIEK

2.1 Beschrijving situatie

KNC¹ is een kluis­kelder in het stads­centrum van Utrecht. Over de kelder loopt een verkeers­ver­binding bestaande uit één rij­baan voor ver­keer en een trottoir. Op de rij­baan geldt een­richtings­ver­keer voor ge­motoriseerd ver­keer vanuit zuidoos­telijke rich­ting naar noordwestelijke rich­ting. Aan de waterzijde be­vindt zich een parkeer­strook voor pa­rallel parke­ren. Een voor­beeld is weergegeven in af­beelding 2.1. Een typische doors­nede van de kluis­kelder in Kromme Nieuwe­gracht wordt ge­toond in af­beelding 2.3. Op de Kromme Nieuwe­gracht ge­lden voertuig­beper­kingen. Dergelijke be­per­kingen worden ver­meld in tabel 2.1 en ge­toond in af­beelding 2.2.

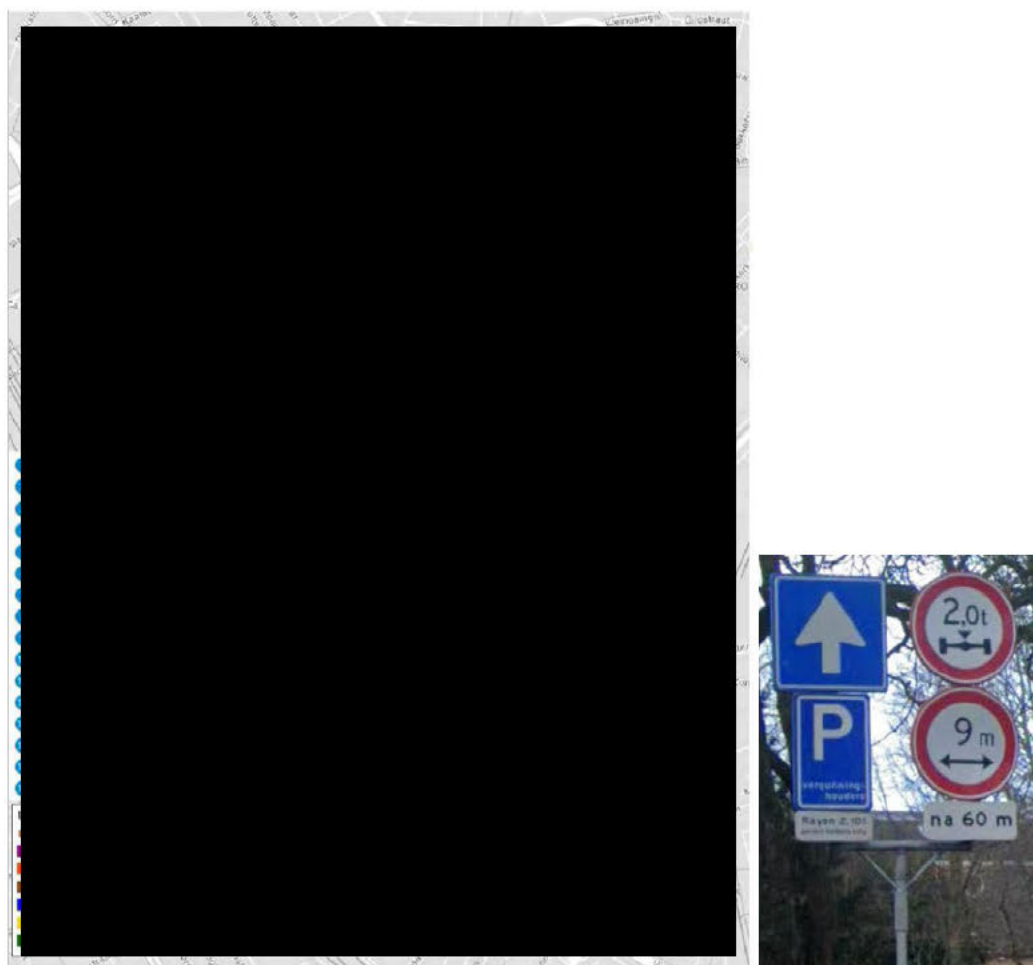
Afbeelding 2.1 Indeling op de Kromme Nieuwe­gracht (foto ter plaatse van nummer 1234567890 kijkend in noordwestelijke rich­ting)



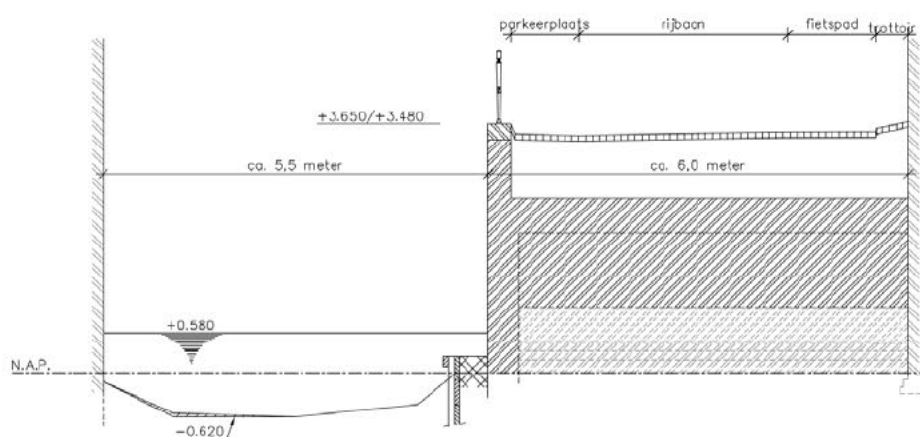
Tabel 2.1 Voertuig­beper­kingen Kromme Nieuwe­gracht¹

Verkeers­beper­king	Waarde
maximale aslast	2 ton
maximale voertuig­lengte	9 m
maximale voertuig­breedte	2,2 m

Afbeelding 2.2 Aslastbeperkingen en ontsluitingsroutes zwaar(der) verkeer in het centrum van Utrecht 22. Kromme Nieuwegracht
 ■ aangegeven met een 2. Voertuigbeperkingen bord aan het begin van Nieuwegracht (bron: Google Maps)



Afbeelding 2.3 Doorsnede kluis-kelder in richting loodrecht op de verkeersrichting (van nummer ■ kijkend in noordwestelijke richting) 23



De overspanning van de boog (zie afbeelding 2.5) is ongeveer 3,8 m. Uit de inspectieresultaten, zie bijlage III, blijkt dat de kelder geen symmetrische doorsnede heeft. De wanden hebben aan beide zijden een verschillende hoogte. De hoogte van de boog varieert tussen 1.678 en 1.808 mm. De hoogte van de wand aan de noordzijde varieert tussen 447 en 600 mm. De hoogte van de wand aan de zuidzijde varieert tussen

200 en 300 mm. Foto's van de buitenkant en de binnenkant van de Kromme Nieuwegracht kelder worden getoond in afbeelding 2.3 en afbeelding 2.4. Een schets van het bovenaanzicht en doorsneden zijn weergegeven in afbeelding 2.5. De toog is opgebouwd uit 4 lagen metselwerk. De bovenste drie lagen stenen liggen plat op elkaar. De onderste laag bestaat uit rechtopstaande stenen; zie afbeelding 2.7 voor een schematische weergave. De boog is aan de bovenzijde afgewerkt door middel van een bitumineuze laag en een soort geotextiel (vezeldoek) om de kelder waterdicht te maken. De bitumineuze laag is circa 10 mm dik. De staat van de bitumineuze laag is goed. De totale dikte van de toog, inclusief afwerklagen en bitumineuze afdichting aan de bovenzijde, is ongeveer 410 mm [1].

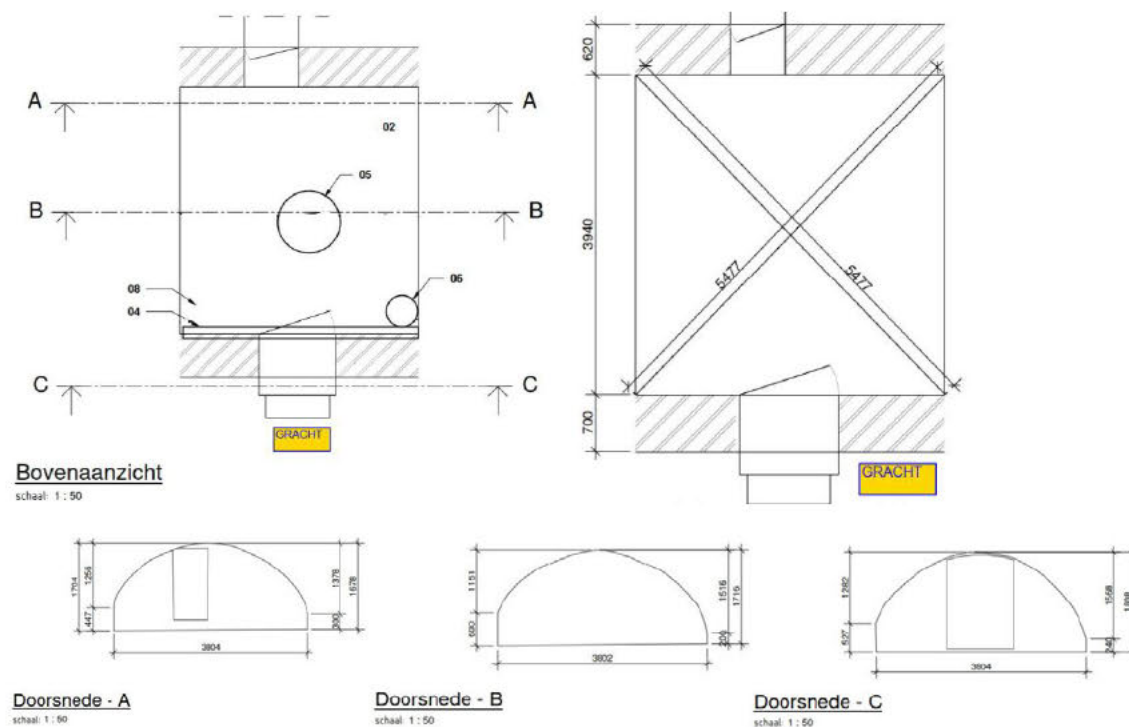
Afbeelding 2.4 Kelder KNC buitenaanzicht 8



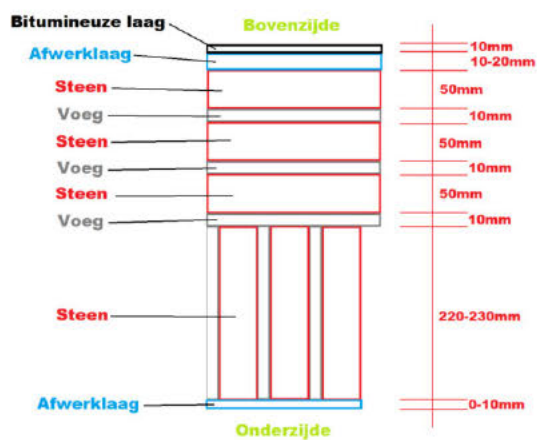
Afbeelding 2.5 Kelder KNC binnen aanzicht 8



Afbeelding 2.6 Schematisch bovenaanzicht en doorsneden kelder [1]



Afbeelding 2.7 Schematische doorsnede metselwerk toog [1]



Er is geen materiaaltest op metselwerk tijdens de inspectie van KNC [1] uitgevoerd. Op basis van dit gegeven zijn conservatief de materiaaleigenschappen die verwijzen naar metselwerk van baksteen (vóór 1945) overgenomen met de ondergrenswaarden van de parameters vermeld in 9.3.2.2 van NPR9998+C1:2020 (metselwerk met mortel in geval van CC1). Deze metselwerk eigenschappen zijn ondergrenswaarden en mogen derhalve ook voor de kelders CC2 toegepast worden (zoals ook aangegeven in de projectaanpak [25]). Lichte scheurvorming en vochtig metselwerk zijn aangetroffen (afbeelding 2.8 en afbeelding 2.9). Hier geldt dus het advies om het slechte metselwerk te vervangen/herstellen. Zodoende zal in de berekeningen met de ondergrenswaarden uit de NPR9998 gerekend worden. Met behulp van een berekeningsvariant, wordt de materiaaldegradatie onderzocht door lokaal een verminderde boogdikte te gebruiken (zie hoofdstuk 4).

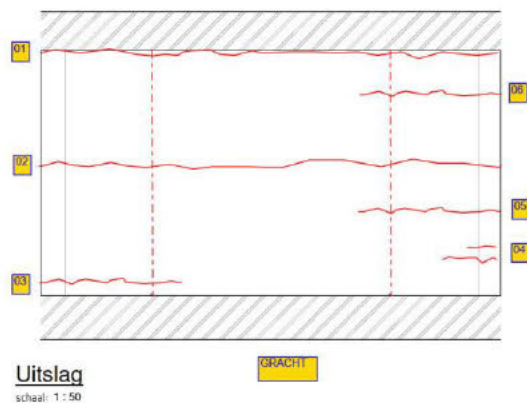
In afbeelding 2.8 is schade te zien:

- afbeelding 2.6 metselwerkschade (linker foto) [1];
- afbeelding 2.6 lekkage (rechter foto) [1].

Afbeelding 2.8 Schadepunt 05

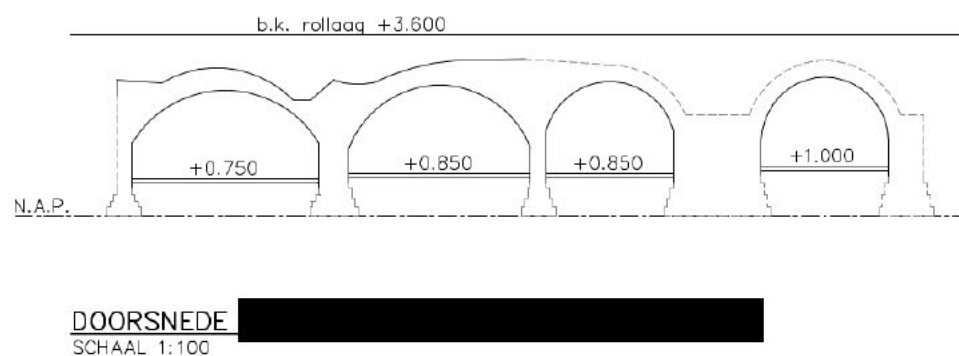


Afbeelding 2.9 Schadebeeld van de kelder [1]



KNC [redacted] is verbonden met andere kelders, namelijk (van KNC [redacted] naar KNC [redacted]) zoals weergegeven in afbeelding 2.10. Op basis van de inspectie is het vermoeden dat de geboortes van beide gewelven (tussen nummer [redacted] en nummer [redacted] aan elkaar aan zijn verbonden, zonder tussenliggend puin/metselwerk. Tijdens de inspectie hebben aan de bovenzijde (tachimetrische) diverse landmetingen plaatsgevonden. Het ging om het inmeten van de geometrie en het in kaart brengen van het verloop van de toog. De dikte van het grondpakket is ook op deze manier in beeld gebracht. Meer informatie is te vinden in het inspectierapport (bijlage III) en in archief data in 3,8.

Afbeelding 2.10 Doorsnede naastgelegen kelder KNC [redacted] t/m KNC [redacted]



2.2 Beoordelingsscope

Bij de beoordeling van de constructieve veiligheid is alleen de metselwerkboog van KNC[■] beoordeeld. Beoordeling van de aangrenzen boven valt buiten de scope van de opdracht.

2.3 Veiligheidsfilosofie en Rekenmethodiek

De verificatieberekeningen van de KNC[■] zijn uitgevoerd conform het rekenplan 1, 2 en hoofdstuk 9 van Aanpak constructieve beoordeling metselwerk boogbruggen van de gemeente 's-Hertogenbosch 6.

Voor bestaande constructies dienen de Eurocode en de NEN 8700-serie te worden toegepast. Daarnaast kan gebruik gemaakt worden van de RBK-versie 1.1 (Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken van Rijkswaterstaat) of CUR-aanbeveling 124:2019 (Constructieve veiligheid bestaande bruggen en viaducten van decentrale overheden).

Op basis hiervan kan een minimale betrouwbaarheid van een bestaande kelders vastgesteld worden. Om aan deze betrouwbaarheid te voldoen, is de gangbare werkwijze een lineair elastisch eindige elementenmodel van de kelder te maken. Op dit model worden representatieve belastingen vermenigvuldigd met een partiële belastingfactor aangebracht, terwijl de sterkte wordt bepaald met karakteristieke waarden gedeeld door een partiële materiaalfactor. De grootte van de waarden hangt af van de benodigde minimale betrouwbaarheid en de referentieperiode (restlevensduur). Het gedrag van metselwerk kelder is door scheurvorming in het metselwerk en de grond-constructie-interactie echter grotendeels niet-lineair elastisch. Op basis van dit gegeven wordt het constructieve gedrag en de constructieve veiligheid van metselwerk kelders realistisch bepaald met het niet-lineair eindige elementenprogramma DIANA FEA. DIANA FEA biedt de mogelijkheid zowel grond als metselwerkconstructie met toegesneden materiaalmodellen te modelleren. In lijn met de NLFEA (Rijkswaterstaat Technical Document, Guidelines for Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures, RTD 1016-1:2020, version 2.2, Final, 2 April 2020) is onderstaande veiligheidsfilosofie voor de verificatie van metselwerk kelders opgesteld.

Omdat het een bestaande constructie betreft, heeft vanuit de RBK 1.1 alleen naar uiterste grenstoestanden (UGT) gekeken te worden. Met andere woorden naar het uiterste draagvermogen, *nét* voordat de constructie bezwijkt. Echter de wens is, dat metselwerk kelders duurzaam veilig zijn en geen (grote) tekenen van degradatie zoals scheurvorming en vervormingen vertonen. Om hieraan te voldoen, zullen ook bruikbaarheidsgrenstoestanden (BGT) beschouwd worden.

2.3.1 BGT

De BGT wordt berekend met karakteristieke waarden van de verschillende grootheden. In de BGT worden de vervormingen en scheurvorming gecontroleerd. In de bruikbaarheidsgrenstoestand wordt wel rekening gehouden met de treksterkte van het metselwerk. Het overschrijden van de treksterkte duidt in dat geval op (mogelijke) scheurvorming.

In de afgelopen jaren is een experimenteel en numeriek onderzoek over BGT van metselwerk-constructies door de TU Delft uitgevoerd ¹⁵. Het onderzoek richtte zich op het definiëren en kwantificeren van de lichte schade. Hier wordt een nieuwe, dimensie loze parameter voor het schade-niveau (ψ) voorgesteld. De parameter beschrijft het totaal van zichtbare scheuren in één getal zodat de smalste zichtbare scheuren met een breedte van 0,1 mm (scheuren kleiner dan 0,1 mm zijn moeilijk te zien met het blote oog) resulteren in een waarde van ongeveer één ($\Psi = 1$). Iets grotere scheuren van bijna 1 mm breedte komen overeen met twee ($\Psi = 2$) en scheuren van ongeveer 4 mm breed geven een waarde van drie ($\Psi = 3$). Dit bereik wordt als DS1 (Damage State 1, zoals gedefinieerd in de European Macroseismic Scale ¹⁷) gedefinieerd, en werd aangepast door Giardina et al. ¹⁸, waarbij deze schade-niveaus op het gemak van herstel van de schade zijn gebaseerd (zie tabel 2.2). De parameter Ψ beschrijft deze kwalitatieve en benaderende beschrijvingen op een

kwantitatieve en reproduceerbare manier 15. De nieuwe parameter ψ omvat het aantal scheuren, de scheurbreedte en de scheurlengte met een wiskundige uitdrukking die de schade objectief kwantificeert.

Tabel 2.2 Opdeling van de schadeparameter in schade-subniveaus 15

Damage State	DS0	DS1			DS2
Damage Level	DL0	DL1	DL2	DL3	DL4
parameter van schade	$\psi < 1,0$	$1,0 \leq \psi < 1,4$	$1,5 \leq \psi < 2,4$	$2,5 \leq \psi < 3,4$	$\psi \geq 3,5$
geschatte scheurbreedte	onmerkbaar scheuren	tot 0,1 mm	tot 1 mm	Tot 5 mm	5 - 15 mm
schadebeschrijving	-	haarscheurtjes	fijne scheurtjes. Misschien geïsoleerde lichte breuk in de constructie. Scheuren in metselwerk zichtbaar bij nadere inspectie	verschillende lichte breuken in de constructie. Scheuren zijn zichtbaar en mogelijk moet er worden gerepareerd om de waterdichtheid te garanderen	openstaande scheuren waar de twee losse metselwerk delen zichtbaar van elkaar verplaatst zijn. Vaak water- en zandvoerende

De bruikbaarheidsgrenstoestand wordt berekend met gemiddelde waarden voor het metselwerk en met karakteristieke waarden voor de diverse grootheden van grondeigenschappen en variabele belasting, dus zonder belastingfactoren:

- gemiddelde waarde van de druksterkte van het metselwerk;
- gemiddelde waarde van de treksterkte van het metselwerk;
- gemiddelde waarde van het volumiek gewicht van metselwerk;
- gemiddelde waarde van de korte duurstijfheid van het metselwerk;
- karakteristieke waarde van de hoek van inwendige wrijving van de grond;
- karakteristieke waarde van de cohesie van de grond;
- gemiddelde waarde van het volumiek gewicht van de grond;
- karakteristieke waarde van de stijfheid van de grond;
- karakteristieke waarde van de variabele belasting.

De BGT-berekening is een conservatieve benadering van de werkelijkheid, omdat voor de grondparameters met de karakteristieke waarden (in plaats van gemiddelden) wordt gerekend. De werkelijke vervormingen zullen naar verwachting kleiner zijn dan volgens de BGT-berekening. Indien bij deze toets de gemiddelde druksterkte en/of de gemiddelde treksterkte wordt overschreden, dan duidt dat op (mogelijke) scheurvorming. Specifiek die locaties behoeven extra aandacht bij inspectie om te controleren of deze in werkelijkheid ook optreedt. Als ook de scheurvorming daadwerkelijk optreedt, dient deze gemonitord te worden (of deze toeneemt) en moet overwogen worden om de (verkeers)belasting te verlagen.

Veelal zullen de vervormingen van de boogconstructie ruim binnen de algemene grenzen ($L/300$) vallen en niet maatgevend zijn 6. De vervormingsgrens kan als conservatieve waarde worden genomen uit de NEN-EN 1990 A1.4.3. Dit stelt dat de doorbuiging bij zowel vloeren als daken worden beperkt tot $1/250$ deel van de overspanning L (indien het uiterlijk van de constructie van belang is). Relatief grote vervormingen geven ook aanleiding om middels inspectie te controleren. De BGT-berekening wordt op basis van vervorming ($L/300$) en schadebeperkingen (DS1-DL2) getoetst. Als een van de twee condities is niet voldaan, wordt de toets als niet voldoende beschouwd. Bij schade niveau 2 worden alleen kleine scheuren verwacht. Dit is acceptabel als BGT-limiet van een oude structuur die al scheuren heeft. Volgens het concept gerelateerd aan de perceptie van schade aangegeven in 24, zou DL1 (scheuren van ongeveer 0,1 mm breed) een te streng criterium zijn

voor een oude metselwerkconstructie, waarin dergelijke scheurbreedtes niet eens zouden kunnen worden waargenomen. Scheuren moeten in ieder geval gemonitord worden.

2.3.2 UGT

In de UGT moet de sterkte van de constructie worden gecontroleerd. In de NLFEA (gebaseerd op FIB-modelcode 2010) worden verschillende methoden toegepast:

- 1 Global Resistance Factor-methode (GRF);
- 2 Partial Factor methode (PF).

In het conventionele (lineaire) geval worden belastingen verhoogd en materiaalsterktes verlaagd aan de hand van partiële factoren. In het geval van een niet-lineaire constructieberekening op basis van grondconstructie-interactie zal een onrealistische verlaging van de sterkte van de materiaal echter ook leiden tot een onrealistische afname van krachten doordat de vervorming wordt overschat/belasting wordt onderschat. Ook wordt het bezwijkmechanisme dat in een niet-lineaire berekening met toenemende belasting gaandeweg ontstaat onrealistisch beïnvloed door gereduceerde materiaalsterktes. Vanuit dit oogpunt is er in de RTD1016-1:2020 voor gekozen de partiële factor voor materiaalsterktes niet toe te kennen aan de materiaalsterktes (R) maar aan de belastingzijde (S). Deze aanpak is gebaseerd op de Global Resistance Factor (GRF).

Op basis van deze aannames, wordt de GRF methode als primaire toetsingsprocedure voor de verificatie van de constructie toegepast. De PF-methode zal als ondersteunende toetsingsprocedure (ter referentie van de middels de GRF-methode gevonden maximale belastingen en mechanismen) worden gevolgd.

Een gevoeligheidsstudie waarbij ook de PF-methode wordt geïmplementeerd, is beschreven in paragraaf 6.

Voor de uiterste grenstoestand wordt ervan uitgegaan, dat het metselwerk geen trek op kan nemen. Omdat een absolute waarde van 0 veelal in instabiliteit in de niet-lineaire berekeningen zorgt, is in de berekeningen een zeer lage plastische/constante waarde ($5 \text{ kPa} = 0,005 \text{ MPa}$) voor de treksterkte ingevoerd.

UGT-GRF

Volgens de GRF-methode wordt gerekend met karakteristieke waarden voor zowel metselwerk als grond. De variabele belasting wordt met een gecombineerde belastingfactor vanuit de belastingfactor op de variabele belasting en de materiaalfactor van metselwerk ($\gamma_Q \cdot \gamma_M$) verhoogd. Voor een beoordeling volgens het gebruiksniveau CC2 conform NEN 8700 Ontw. 2018 bedraagt $\gamma_Q = 1,1$. De partiële factor voor de materiaalsterkte $\gamma_M = 2,2$ (conform NEN-EN 1996-1-1) bestaat uit het product van een modelfactor $\gamma_{Rd} = 1,42$ gebaseerd op een variatiecoëfficiënt van 25 % voor metselwerk en een sterktefactor van $\gamma_m = 1,55$. Voor CC2 gebruiksniveau resulteert een gecombineerde belastingfactor van $1,1 \cdot 1,42 \cdot 1,55 = 2,42$.

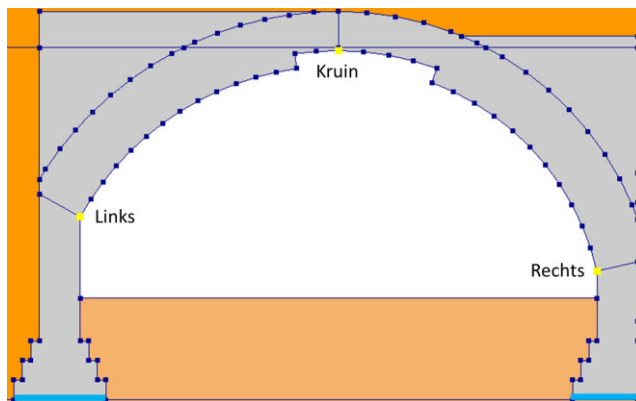
De GRF wordt berekend met karakteristieke waarden voor het metselwerk en de grond (grond als variabele belasting), maar met een gecombineerde belastingfactor over de variabele belasting:

- karakteristieke waarde van de druksterkte van het metselwerk;
- verwaarloosbaar kleine treksterkte van het metselwerk om wegvallen van de treksterkte na ontstaan van scheuren mee te nemen in het model, maar nog wel zó groot, dat geen numerieke instabiliteit ontstaat waardoor het model niet meer doorrekent. Een waarde van maximaal 5 kPa ($0,005 \text{ N/mm}^2$) wordt gebruikt;
- gemiddelde waarde van het volumieke gewicht van het metselwerk;
- gemiddelde waarde van de korteduurstijfheid van het metselwerk;
- karakteristieke waarde van de hoek van inwendige wrijving van de grond;
- karakteristieke waarde van de cohesie van de grond;
- gemiddelde waarde van het volumieke gewicht van de grond;
- karakteristieke waarde van de stijfheid van de grond;

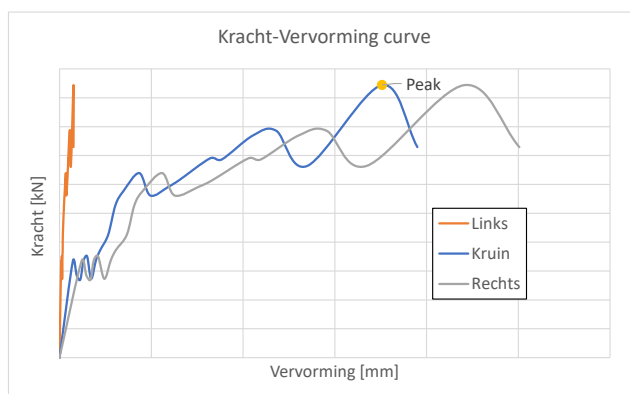
- rekenwaarde van de variabele belasting (karakteristieke waarde maal gecombineerde belastingfactor CC2 gebruik 2,42).

Als gevolg van de hoge niet-lineariteit (scheurvorming en plasticiteit) in de UGT berekeningen, kan is een evaluatie op basis van 3 of 4 plastische scharnieren niet eenduidig (afbeelding 2.13). Voor een meer objectieve evaluatie van de draagkracht van de kluiskeider wordt de kracht-verplaatsing van KNG berekend. Het uitgangspunt is dat enkel de linker boog (KNG) als dragende constructie wordt beschouwd. De verkeersbelasting toegepast als input wordt verdeeld over verschillende kelders. De totale verticale kracht werkend op de linker boog wordt berekend, exclusief de afdracht naar de aanliggende boog. Krachten worden berekend door de spanningen aan de voet van de boog te integreren (lichtblauwe lijnen in afbeelding 2.11). Dit is de totale aandrijvende kracht op de boog. De verticale kracht van de linkerboog wordt samen met de verplaatsing op drie specifieke knooppunten uitgezet (gele knooppunten in afbeelding 2.11). Een voorbeeld van een krachtverplaatsingscurve wordt gegeven in afbeelding 2.12. De capaciteit wordt verkregen als de piekwaarde, vóór daling van de kracht (Peak punt afbeelding 2.12). Verschillende punten van de curve (vooral die na een val van de kracht) worden gecontroleerd en vergeleken met het mogelijke bezwijkmechanisme beschreven in afbeelding 2.13. De geëvalueerde piekwaarde wordt dan gekoppeld aan de toegepaste verkeersbelasting (volgens C20 bord of BM3 belasting).

Afbeelding 2.11 Knooppunten waar de verplaatsingsuitvoer wordt gelezen (gele knooppunten) en locatie waar de kracht wordt bepaald (lichtblauwe lijnen)



Afbeelding 2.12 Voorbeeld van kracht-vervormingscurve en piekpunt



UGT-PF

Volgens de PF-methode wordt er gerekend met rekenwaarden voor zowel metselwerk, grond als variabele belasting. Voor een beoordeling volgens het gebruiksniveau CC2 conform NEN 8700 Ontw. 2018 bedraagt $\gamma_0 = 1,1$. De partiele factor voor de materiaalsterkte $\gamma_M = 2,2$ (conform NEN-EN 1996-1-1) bestaat uit het product van een modelfactor $\gamma_{Rd} = 1,42$ gebaseerd op een variatiecoëfficiënt van 25 % voor metselwerk en

een sterkte-factor van $\gamma_m = 1,55$.

Voor hoek van inwendige wrijving, cohesie en volumieke gewicht worden rekenparameters aangehouden op basis van de NEN 9997 tabel A.4a kolom Keermuur. Voor de stijfheid (E-modulus) worden karakteristieke waarden toegepast.

De PF-methode ziet er als volgt uit:

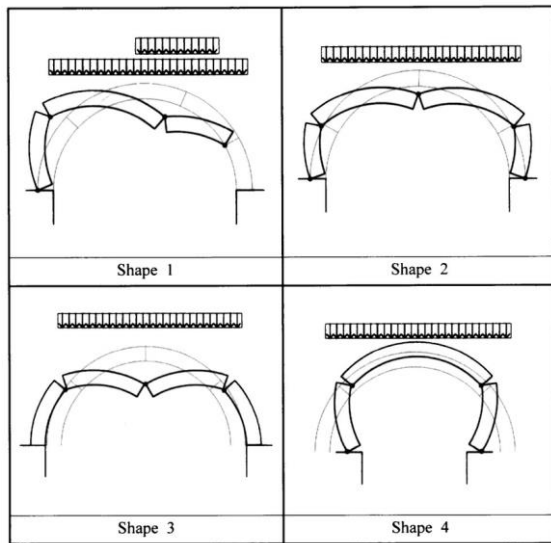
- rekenwaarde van de druksterkte van het metselwerk (karakteristiek/2,2);
- verwaarloosbaar kleine treksterkte van het metselwerk om wegvallen van de treksterkte na ontstaan van scheuren mee te nemen in het model, maar nog wel zó groot, dat geen numerieke instabiliteit ontstaat waardoor het model niet meer doorrekent. Een waarde van maximaal 5 kPa (0,005 N/mm²) wordt gebruikt;
- gemiddelde waarde van het volumiek gewicht van metselwerk;
- gemiddelde waarde van de korteduurstijfheid van het metselwerk;
- rekenwaarde van de hoek van inwendige wrijving van de grond door de lage karakteristieke waarde van het laaggemiddelde te delen door een partiële factor van 1,2 conform tabel A.4a NEN 9997-1+C2-Keermuur;
- rekenwaarde van de cohesie van de grond met een partiele factor van 1,5 conform tabel A.4a NEN 9997-1+C2-Keermuur;
- rekenwaarde van het volumieke gewicht van de grond door de gemiddelde waarde te delen door een partiële factor van 1,1 conform tabel A.4a NEN 9997-1+C2-Keermuur;
- karakteristieke waarde van de stijfheid van de grond;
- rekenwaarde van de variabele belasting (Karakteristieke waarde maal belastingfactor CC2 gebruik 1,1).

Dezelfde procedure zoals beschreven bij de GRF-methode wordt gebruikt om de structurele veiligheid van de kelder te bepalen.

Tabel 2.3 Overzicht gebruikte parameters voor de verschillende rekenmethodieken

Methodiek	Belasting factor	Metselwerk E [MPa]	Metselwerk f_t [MPa]	Metselwerk f_c [MPa]	Grond factor φ	Grond factor c	Grond factor γ
BGT	1,00	5.000	0,100	8,50	1	1	1
UGT-GRF	2,42	3.500	0,005	5,0	1	1,2/1,5	1
UGT-PF	1,10	3.500	0,005	2,27	1/1,2	1/1,5	1/1,1

Afbeelding 2.13 Vormen van bezwijkmechanisme van metselwerk boog [16]



3

MATERIAALGEGEVENS

3.1 Grondopbouw en geotechnische parameters

Sinds de 12de eeuw zijn er in de Kromme Nieuwegracht kluiskeiders gebouwd. Waarschijnlijk zijn in de periode 1500-1700 de keldergewelven opnieuw maar met een hogere kruinhoogte opgemetseld. Om deze redenen nemen we aan dat de grond onder de kelders volledig is 'voorbelaat' door de eerder aanwezige en in het verleden gesloopte werfkelders.

Uit het archief van de gemeente Utrecht zijn enkele sonderingen en boringen uit de nabijgelegen omgeving bekend. De meest recente metingen, uitgevoerd door Hoogveld in 2014 zijn gehanteerd. Dit wordt volledig beschreven in rapportage 4 en samengevat in [5]. Voor de grondparameters zal aangesloten worden op NEN-EN9997-1+C2; 2017 Geotechnisch ontwerp van constructies- Deel 1: Algemene regels en CUR 2003-7 Bepaling geotechnische parameters. De onderstaande afbeelding 3.1 toont de grondinterpretatie en parameterbepaling voor sonderingen 10 en 11. Uit deze afbeeldingen blijkt dat de maatgevende sondering CPT 10 is vanwege de dikkere kleilaag. De genormaliseerde qc-waarden van sondering 10 en 11 zijn onderling vergelijkbaar en de inschatting van de parameters is onderling vergelijkbaar.

Afbeelding 3.1 Locaties aanwezige sonderingen Kromme Nieuwegracht (links) en KNC in cirkel (rechts)



De grondopbouw is volgens het beschikbare grondonderzoek als volgt:

- vanaf maaiveld (NAP +3,60 m) is er zandig materiaal dat is gebruikt voor de fundering van de wegen. De eerste 1-2 m zijn geroerd en tonen daarom in de grafieken lage qc-waarden. Aan de hand van de roeren wordt hier uitgegaan van los-matig gepakt zand;
- tussen circa NAP +2,60 m en NAP +0 m ligt schone klei met een slappe consistentie;
- tussen circa NAP +0 m en NAP -1,0 m ligt matig tot zwak zandige klei;
- vanaf NAP -1,0 m bestaat de bodem voornamelijk uit zandmateriaal waarbij variaties van de conusweerstand qc verschillende zandlagen aangeven. Er is een afwisseling van los tot meer matig gepakte zandlagen.

De onderstaande afbeelding toont de grondinterpretatie en parameterbepaling (karakteristieke waarden) voor de maatgevende sondering. De parameters worden bepaald uit NEN 9997-1+C2:2017.

Afbeelding 3.2 Grondopbouw en karakteristiek geotechnische parameters volgens maatgevende sondering

Grondlaag	b.k. laag ref.	yunsat	ysat	n	c	φ	ψ	qc_veld	Eoed	E50	Eur	m _{plaxis}	m _{DIANA}	OCR	K _{oNC}	pref
	[mNAP]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[-]	[kPa]	[graden]	[graden]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kPa]
Aanvul zand	3,57	17,0	19,0	0,36	0,1	30,0	0,0	0,5	10	10	40	0,5	0,5	1,0	0,500	100
Klei 1	2,60	14,0	14,0	0,47	0,1	17,5	0,0	0,5	1	1	4	0,8	0,2	1,0	0,699	100
Klei 2	0,00	18,0	18,0	0,32	5,0	22,5	0,0	0,5	3	3	12	0,8	0,2	1,0	0,617	100
Zand 1	-1,00	17,0	19,0	0,36	0,1	30,0	0,0	7,0	23	23	90	0,5	0,5	1,0	0,500	100
Zand 2	-8,40	18,0	20,0	0,32	0,1	32,0	2,0	13,5	36	36	143	0,5	0,5	1,0	0,470	100
Zand 3	-10,00	17,0	19,0	0,36	0,1	30,0	0,0	8,0	20	20	81	0,5	0,5	1,0	0,500	100
Zand 4	-11,00	18,0	20,0	0,32	0,1	32,0	2,0	13,5	33	33	131	0,5	0,5	1,0	0,470	100
Zand 5	-12,50	17,0	19,0	0,36	0,1	30,0	0,0	12,0	27	27	109	0,5	0,5	1,0	0,500	100

De grond wordt in DIANA gemodelleerd met het Hardening Soil-model (HS). Het gedrag van dit model in Diana komt overeen met het Hardening Soil-model in PLAXIS. De validatie van het DIANA HS-model met betrekking tot het HS of PLAXIS-model wordt beschreven in 12. De twee grondmodellen zijn gelijkwaardig.

3.2 Eigenschappen metselwerk

Voor de materiaaleigenschappen van metselwerk kan worden uitgegaan van de eigenschappen gegeven in de NPR9998+C1:2020. De norm stelt dat de metselparameters kunnen worden bepaald door middel van experimenten, of door middel van de tabel F.2 (voor de gemiddelde waarden) of volgens de ondergrenswaarden 9.3.2.2 (voor de karakteristieke waarden). Lichte scheurvorming in het gewelf, lokaal missend voegwerk en optrekkend vocht verslechteren de kwaliteit van het metselwerk. Door reparatie van het historisch voegwerk op basis van kalk zal de kwaliteit weer op voldoende niveau komen en is het rekenen met de eigenschappen conform de NPR acceptabel, en vermoedelijk conservatief. In tabel 3.1 zijn de karakteristieke en gemiddelde waarden van metselwerk opgenomen. De karakteristieke waarden zijn conform 9.3.2.2 van NPR 9998+C1:2020, terwijl gemiddelde waarden uit tabel F.2 van NPR 9998+C1:2020 zijn betrokken (uit de kolom 'baksteen metselwerk met mortel voor algemene toepassing (voor 1945)'). Indien dit onbekend is zal voor het volumieke gewicht van metselwerk 23 kN/m³ worden aangehouden. Conform de NEN-EN 1996-1-1:2006+A1:2013/NB:2018 nl kan de korte duur stijfheid worden benaderd door de druksterkte te vermenigvuldigen met een factor 700.

De afschuifmodulus van karakteristieke waarden wordt berekend uit de dwarscontractiecoëfficiënt ν (gelijk aan 0,20).

Tabel 3.1 Metselwerk eigenschappen NPR9998. Karakteristieke waarde van metselwerk met mortel voor algemeen toepassing.
Gemiddelde waarde van baksteen metselwerk met mortel voor algemene toepassing (voor 1945)

	Karakteristieke waarde		Gemiddelde waarde	
druksterkte	f_k [N/mm ²]	5,0	$f_{m,a,m}$ [N/mm ²]	8,5
elasticiteitsmodulus	E_k [N/mm ²]	3.500 ¹	E_m [N/mm ²]	5.000
glijmodulus	G_k [N/mm ²]	1.458 ²	G_m [N/mm ²]	2.000
treksterkte bezwijkvlak evenwijdig aan lintvoeg = sterkte loodrecht op de voeg			$f_{m,a,b,per}$ [N/mm ²]	0,10
initiële schuifsterkte	$f_{v,0,k}$ [N/mm ²]	0,20	$f_{m,a,v,0}$ [N/mm ²]	0,30
wrijvingscoëfficiënt			$\mu_{m,a,m}$	0,75
breukenergie trek loodrecht op lintvoegen			$G_{ft,per}$ [N/m]	10
breukenergie belasting op druk			$G_{f,c}$ [N/m]	20000
breukenergie bij afschuiving (lintvoeg)			$G_{ft,v,par}$ [N/m]	100

¹ 700 maal de druksterkte

² $G = E / (2 * (1 + \nu))$

4

MODELLERING EN BEREKENING

4.1 Inleiding

De toetsing van kelder KNG¹ wordt door middel van een EEM-berekening in DIANA FEA versie 10.4 uitgevoerd. Het doel van de berekeningen is om de constructieve veiligheid van de gemetselde kelder KNG¹ te bepalen. Hardening Soil Model (HS) wordt gebruikt als materiaalmodel voor de grond. Voor het modelleren van het metselwerk in DIANA is het gebruik van het Total Strain Rotating Crack Model gebruikelijk en wordt toegepast 11. In lengterichting (rijrichting) worden meerdere posities van het laststelsel beschouwd om zo de maatgevende positie te bepalen. In het geval van aaneengeschakelde werfkelders worden meer belastingposities beoordeeld dan aangehouden in 's-Hertogenbosch (zie paragraaf 4.2.3). De beoordeling laat zien of de kelder de belasting kan dragen, hoe de kelder vervormt als gevolg van de belasting en welke spanningen en scheurvorming in de kelder optreden.

Het uitgangspunt is om 2D-berekeningen te maken in plane strain (vlakke rek). Dit betekent dat de vervorming (rek) in de richting van de gracht (dwars op het model) op nul wordt gesteld. Dit is het geval bij KNG¹ waar de boog via stalen ankers wordt tussen de kluismuur en de bebouwing is opgesloten. Voor het bepalen van het brosse gedrag van de metselwerk zijn niet-lineaire analyses toegepast.

Conform de Aanpak constructieve beoordeling metselwerk boogbruggen 6 wordt de kluiskeider getoetst in de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT) en de uiterste grenstoestand (UGT). In deze berekening wordt zowel het metselwerk als omliggende grond gemodelleerd. Het constructieve draagvermogen van het metselwerk kelder KNG¹ wordt getoetst. Voor de bepaling van de belastbaarheid van de kelders dienen de kelders te worden berekend inclusief verkeersbelasting. Naast de reguliere verkeersbelastingen wordt een berekening uitgevoerd van de belasting bij incidentele inzet van de brandweer. Het passeren van het voertuig boven de kelders wordt beschouwd. Samen met de genoemde variabele belastingen zijn ook permanente belastingen (zoals waterdruk) in het model opgenomen.

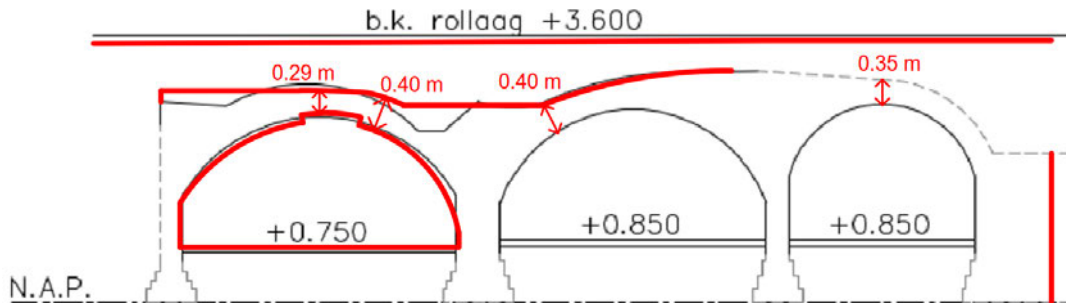
4.2 Model beschrijving

4.2.1 Uitgangspunten en geometrie

Het 2D-model, bestaande uit drie werfkelders en omliggende grond, is ongeveer 22,15 m lang en 8,54 m hoog. Het uitgangspunt is om 2D-berekeningen te maken in plane strain (vlakke rek), dus een strook van 1,0 m dikte wordt weergegeven. De geometrische eigenschappen van de kluiskeider uit de archiefgegevens zijn gevalideerd met de metingen uit de inspectie III. De doorsnede die in de berekening wordt gebruikt is doorsnede B (afbeelding 2.6) die aan de linkerkant de kleinste hoogte van de geboorte heeft, dus de meest kritische. De constructieve dikte van de boog is dus 400 mm ($= 3 * (50 \text{ mm} + 10 \text{ mm}) + 220 \text{ mm}$). Tijdens de inspectie is degradatie, beschadiging en ontbrekend metselwerk aangetroffen III. Dit is in de berekening verdisconteerd door de boogdikte lokaal te verminderen (afbeelding 4.3), waarbij lokaal ter hoogte van de kruin van de boog een dikte van 290 mm wordt aangehouden (halve steen, gelijk aan 110 mm, wordt verwijderd). Omdat de stenen in dit gedegradeerde gebied niet loskomen van de boog, is het uitgangspunt dat tenminste 50 % van het metselwerk in de betreffende zone een goede samenhang heeft.

Om rekening te houden met het groepsgedrag van de aangesloten kelders zijn KNG [REDACTED] en [REDACTED] (met de helft van het rechter landhoofd) in het model opgenomen. De doorsnede die in het model zal worden gebruikt, is weergegeven in afbeelding 4.1.

Afbeelding 4.1 Doorsnede die gebruikt wordt in de Diana-berekeningen



Het effect van naastgelegen werfkelders zal onderzocht worden door een eerste berekening zonder naastgelegen kluis-kelders (wel met het naastgelegen zandlichaam) te maken en vervolgens de naastgelegen kelders mee te nemen in de modellering. Zodoende wordt kennis vergaard van het ondersteunende effect van deze naastgelegen kelders.

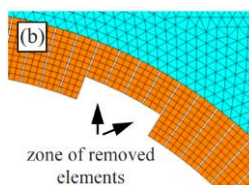
Werkkelders zijn altijd op staal gefundeerd met een paar versnijdingen (afbeelding 4.2). De hoogte van de kelder wordt gehaald uit archiefgegevens, waarbij het funderingsniveau van de gehele doorsnede circa NAP +0,0 m bedraagt. De verwachting is dat de funderingsdiepte varieert van +0,0 m NAP tot +0,5 m NAP. Omdat funderingsonderzoeken van kelders niet beschikbaar zijn, wordt de invloed van de funderingsdiepte onderzocht door op beide funderingsniveaus een berekening uit te voeren.

Met stempelwerking door de vloer wordt geen rekening gehouden. Een laag vastgepakt zand wordt in plaats van de vloer gemodelleerd.

Afbeelding 4.2 Fundering op staal. 9



Afbeelding 4.3 Modellering van boogdefecten in EEM. Boogdikte te verminderen 10



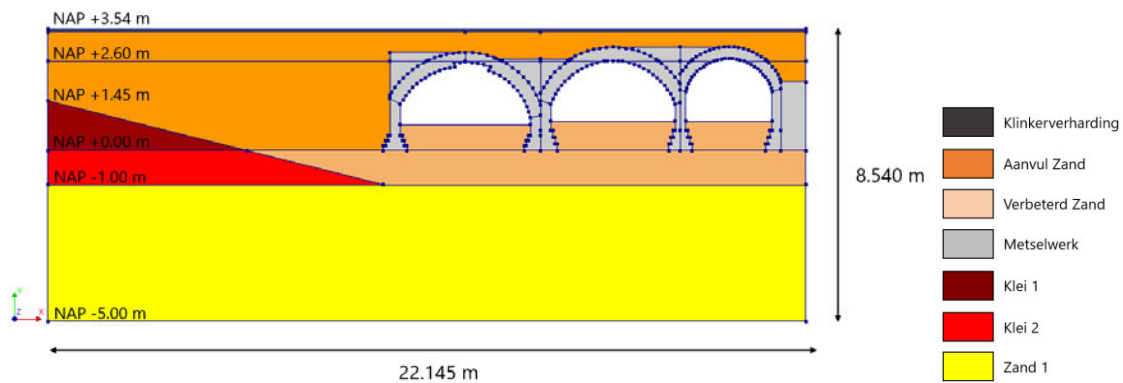
Een afbeelding van de modelgeometrie wordt gegeven in afbeelding 4.4. Uitgangspunt is dat grondverbetering is toegepast onder de kelders en de achtergebleven slappe klei lagen aanwezig zijn in een

talud met een helling van 14 graden. Daarom is in het model de 'klei 2' grondlaag onder de kelders vervangen door de grondlaag 'verbeterd zand' en de 'klei 1' laag aan de linkerkant van de KNG kelder vervangen door de grondlaag 'aanvulling zand'. Dit wordt als een realistische aanname beschouwd omdat het zeer waarschijnlijk is dat de resterende 1 m klei tijdens de aanleg van de metselwerkkelder vervangen is. Ook zal de grond onder de fundering door de langdurige (verkeers) belasting van de kelder naar verwachting verdicht zijn. De materiaaleigenschappen van de grondlagen zijn in bijlage I te vinden. Interface-elementen met tension cut-off en Coulomb-friction gedrag worden tussen grond- en metselwerkconstructie geplaatst om een meer realistische spanningsoverdracht tussen grond en kelders te bieden. De interfaceverbinding wordt weergegeven in afbeelding 4.5.

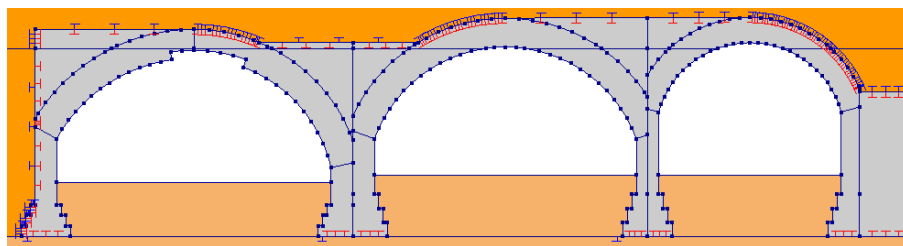
Kwadratische 8-knoops vlakke rekelementen (CQ16E en CT12E) worden gebruikt om grond en kelders te modelleren. Het model is horizontaal ingeklemd aan de twee zijranden en verticaal aan de onderrand (NAP -5,0 m). Het mesh van het model wordt getoond in afbeelding 4.6.

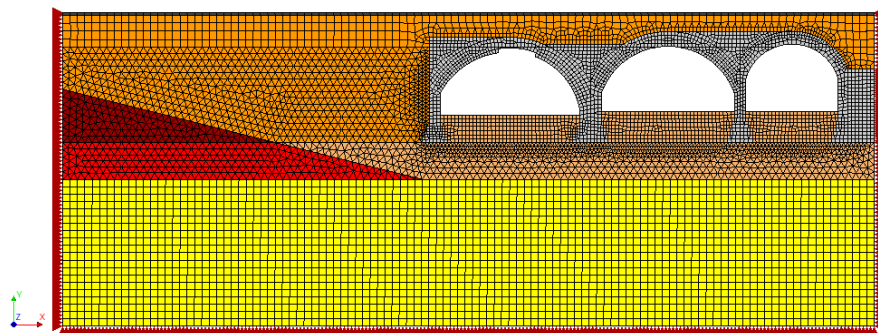
Als iteratieve methode wordt de reguliere Newton-Raphson-methode gebruikt. Line Search optie is hierbij geactiveerd. Verplaatsing en Krachtnorm moeten beide worden vervuld tijdens de iteratieve procedure met een tolerantie van 1 %. De Parallel Direct Sparse-methode wordt gebruikt om het stelsel vergelijkingen op te lossen.

Afbeelding 4.4 Geometrie KNG model DIANA FEA



Afbeelding 4.5 Interface tussen grond en kelders



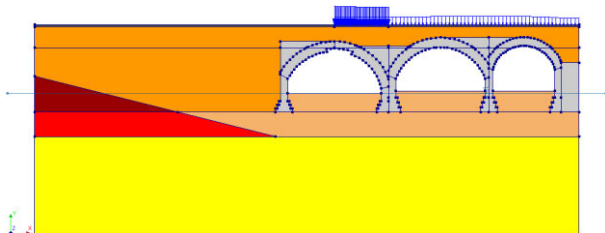


4.2.2 Gefaseerde berekening

De berekening wordt gefaseerd uitgevoerd op basis van de volgende berekeningstappen (tabel 4.1).

Tabel 4.1 Fasering overzicht

Fase	Fasebeschrijving	Modeloverzicht in specifieke fase
1	initiële (K0) situatie met grondwaterstand van NAP+0,75 m. De twee kleilagen (klei 1 en 2) en de zandlaag worden geactiveerd	
2	de grond wordt onder een talud van 14 graden ontgraven tot NAP -1,0 m. De grondwaterstand wordt verlaagd tot NAP -1,5 m	
3	boven op de oorspronkelijke zandlaag wordt een zandlaag van 1,0 m dikte als grondverbetering aangebracht	
4	de drie kelders worden boven op het verbeterd zand aangebracht, samen met de vulzandlaag die de vloer vertegenwoordigt. Horizontale bekisting die aan de linker kant van de kelder wordt geactiveerd. De Interfaces aan de onderkant van de landhoofden worden geactiveerd	
5	bekisting wordt verwijderd. De aanvulling zand en de klinkerverharding is toegevoegd. Interface elementen tussen kelders en bodem wordt geactiveerd. Grondwaterstand is verhoogd tot NAP +0,75 m	

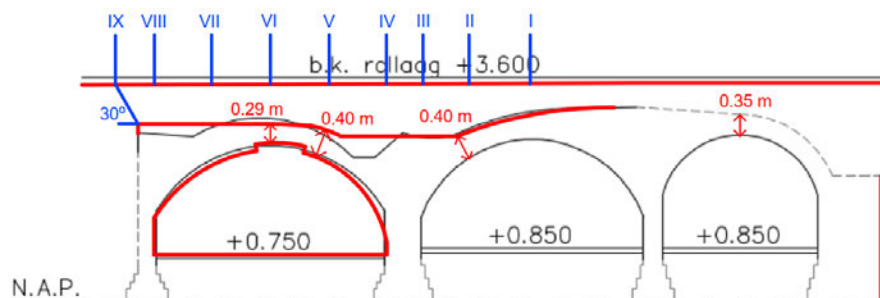
Fase	Fasebeschrijving	Modeloverzicht in specifieke fase
6	verkeersbelasting wordt op verschillende posities geplaatst en geanalyseerd	

In het model wordt de 'Staged Construction' -analyse gebruikt. De bekisting wordt voornamelijk gebruikt om voor extra numerieke stabiliteit te zorgen.

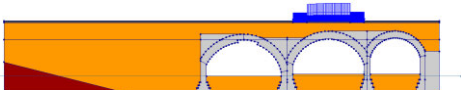
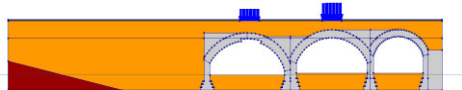
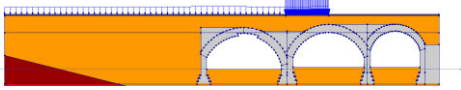
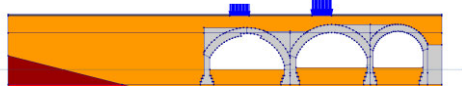
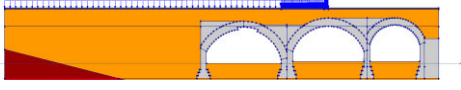
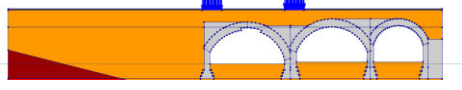
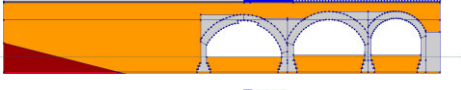
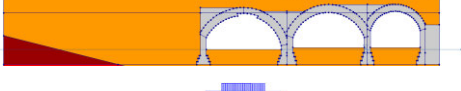
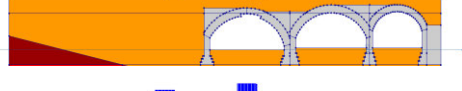
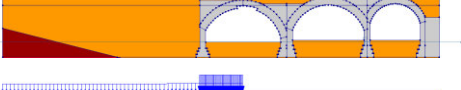
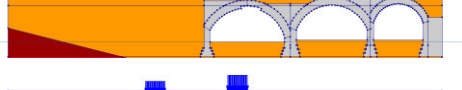
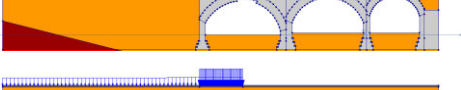
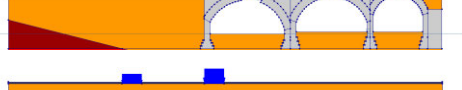
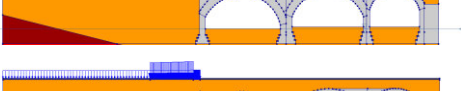
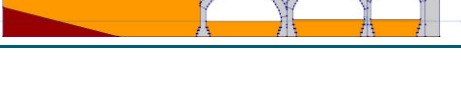
4.2.3 Beschouwde belastingposities

De 'Aanpak beoordeling metselwerk boogbruggen 's-Hertogenbosch' beschrijft minimaal vier posities van de belasting in de lengterichting op de werfkelder die voor de berekening moeten worden uitgevoerd. Omdat meerdere kelders met elkaar zijn verbonden worden verschillende unieke belastingposities onderzocht om alle mogelijke mechanismen van de kelders te evalueren. De belastingposities staan in afbeelding 4.7. Een gedetailleerd overzicht van de verschillende verkeerbelastinglocaties van het BM1 UDL-aslast en het aslast van de BM3 belasting wordt gegeven in tabel 4.2. Door de geometrische afmeting van de kelder KNG en de aanpak van de belastingpositie (volgens 6 en 5.3.1) komt de belastingpositie VIII redelijk overeen met belastingpositie VII. Er is dus besloten om positie VIII uit de berekening te verwijderen.

Afbeelding 4.7 Doorsnede die gebruikt wordt in de DIANA-berekeningen met hart positie van verkeersbelasting



Tabel 4.2 Verkeersbelasting locatie-overzicht

Positie	BM1 UDL-Aslast	BM3 Aslast
I		
II		
III		
IV		
V		
VI		
VII		
VIII		
IX		

4.2.4 Grondopbouw en grondparameters

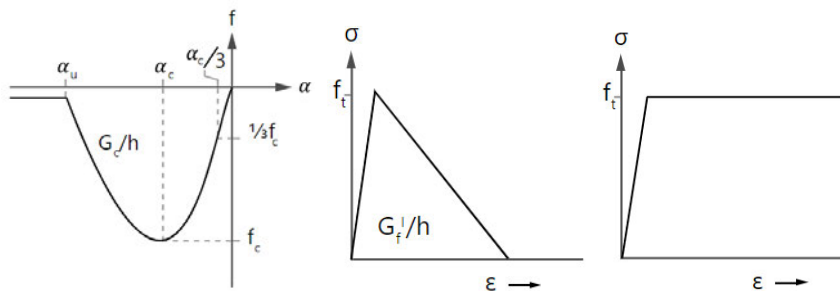
Als bodemmateriaalmodel wordt de Hardening Soil Model toegepast. Het grondpakket en de grondparameters die in het model worden gebruikt (karakteristieke waarden), zijn beschreven in hoofdstuk 3. De volledige lijst met parameters die in het Hardening Soil Model in Diana worden gebruikt, wordt vermeld in bijlage I.

4.2.5 Metselwerkeigenschappen

Het niet-lineaire Total Strain Rotating Crack Model wordt gebruikt om het metselwerk in DIANA te modelleren. Het constitutieve model op basis van total strain is ontwikkeld volgens de lijnen van de Modified Compression Field Theory, oorspronkelijk voorgesteld door Vecchio & Collins. Het Total Strain Crack Model volgt de 'smeared cracking' benadering. Het 'smeared cracking'-model beschouwt scheurvorming als een verdeeld effect over de elementen, waarbij scheurvorming ontstaat in de richting van de hoofdtrekspanningen. Onder belasting wordt het metselwerk blootgesteld aan zowel trek- als drukspanningen, wat kan leiden tot scheuren en verbrijzeling van het materiaal. Hiermee wordt in het model rekening gehouden. Voor compressie wordt een parabolisch gedrag gekozen, terwijl voor de trekspanning een lineaire softening curve voor BGT rekeningen en een elastoplastische curve voor UGT berekeningen wordt gekozen (afbeelding 4.8). Aangenomen wordt dat verhoging van de druksterkte in geval van alzijdige druk niet mogelijk is gemaakt in het rekenmodel. Het model maakt gebruik van isotrope stijfheidsparameters van metselwerk, trek- en druksterkte, breukenergie op trek en druk. De breukenergie, dus het

'cracking/crushing' gedrag is afhankelijk van element-grootte. Deze bijdrage wordt automatisch rekening gehouden door het materiaalmodel via de scheurbandbreedte h (afbeelding 4.8). De berekening van de parameter h is gebaseerd op de Rots-methode die afhankelijk is van de grootte, de vorm en de interpolatiefunctie van het gebruikte eindige element. Een gevoeligheidsstudie van het scheurgedrag van metselwerkwanden gemodelleerd met verschillende element-grootte is uitgevoerd in 26. De resultaten in termen van schade en scheurbreedte veranderen nauwelijks voor verschillende element-grootte. Afschuifgedrag wordt in aanmerking genomen en berekend volgens de hoofdspanningsrichting. Het gebruik van het Total Strain Rotating Crack-model wordt aanbevolen voor bros materiaal zoals beton en metselwerk. Uit testvalidaties is gebleken dat het Total Strain Rotating Crack-model een efficiënt en goed model is voor gedrag van metselwerk onder unidirectionele belasting. Meer informatie over het materiaalmodel is te vinden in 11. De volledige lijst met parameters die in Diana worden gebruikt, wordt vermeld in bijlage I.

Afbeelding 4.8 Druk- (links) en trekgedrag voor BGT (midden) en UGT (rechts) berekeningen van Total Strain Rotating Crack Model
DIANA FEA 11



4.2.6 Overige eigenschappen

Klinkerverharding

De meest toegepaste materialen zoals asfalt en grond komen voor als rustende belastingen op het dek (en de fundering). Hiervoor zijn de gewichten bepaald aan de hand van NEN-EN 1991-1-1. Op de bovenste zandlaag wordt een klinkerverharding tot NAP +3,54 m aangenomen met:

- laagdikte: 0,08 m;
- λ / λ_{sat} : 20,0 / 20,0 kN/m³;
- $E / G / \nu$: 10,0 MPa / 5,0 MPa / 0,0;
- materiaalmodel: lineair elastisch.

Interface bodem-metselwerk

- interface-elementen worden gemodelleerd tussen grond- en metselwerkconstructie. Er wordt een Coulomb-friction model gebruikt met de volgende eigenschappen:
 - normale stijfheidsmodulus k_n : 1,0E+09 N/m³;
 - afschuifstijfheidsmodulus k_t : 1,0E+08 N/m³;
 - $c / \phi / \psi$: 0,7 * c_{zand} / 0,7 * ϕ_{zand} / 0,0;
 - tension cut-off: 0,0 MPa.

De interface-eigenschappen zijn gebaseerd uit van de sterkte van de omringende grond (aanvulling zand) met een reductiefactor R van 0,7.

EXTERNE BELASTINGEN EN BELASTINGCOMBINATIES

5.1 Classificatie

De aan te houden gevolgklasse is gelijk aan CC2, conform de NEN8700. De kelderconstructie zijn 'erfgoed' en in de berekeningen uit 2014 door de gemeente Utrecht is ook CC2 aangehouden. Op basis van NEN8701 bijlage B is bij toepassing van bebording zijn reducties van de karakteristieke belasting op basis van: aantal vrachtwagens per jaar, kortere referentie periode en de trend niet toegelaten.

5.2 Permanente belastingen

Permanente belastingen zijn in principe altijd aanwezig op de constructie, maar kunnen gedurende de (rest)levensduur van de constructie veranderen als gevolg van renovaties en/of verbouwingen. Gedurende de levensduur van de constructie zijn geen grote wijzigingen in de constructie doorgevoerd. De permanente belastingen die in het model zijn opgenomen, worden hieronder beschreven.

Eigen gewicht

Voor het soortelijk gewicht van het metselwerk is $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$ aangehouden. Voor de grond, het soortelijk gewicht en porositeit van de verschillende lagen zijn aangegeven in tabel 3.1.

Waterdruk

Het gemiddeld grondwaterpeil in het meest nabije meetpunt van de Kromme Nieuwegracht bedraagt volgens het Dinoloket (peilbuis B001 in de Voetiusstraat). Het niveau fluctueert tussen de NAP +0,10 m en NAP +0,80 m, zie 2. Na het consolidatieproces vertoont het linker landhoofd enige inwaartse vervorming en kleine scheurtjes, afbeelding 6.5. Deze beginsituatie bepaalt de toestand van voorbeschadiging bepalen aan het begin van de toepassing van de verkeersbelasting. Een laag grondwaterpeil vermindert de amplitude van de binnenwaartse vervormingen en dus de scheurvorming. Als conservatieve benadering wordt het hoogste grondwaterniveau gekozen. Bij een waterpeil in de gracht van NAP +0,80 m staan de kelders KNC-1 onder water. Rekening is gehouden met een grondwaterstand van NAP +0,75 m.

5.3 Veranderlijke belastingen

De verkeersbelasting is bepaald conform NEN-EN 1991-2. Het normatieve BM1 omvat regulier verkeer met doorgaande ontheffingen tot 100 ton. De berekeningen betreffen belasting gestuurde berekeningen waar de belasting uit het tandem stelsel (2 assen hart-op-hart 1,2 m) en een verdeelde verkeersbelasting bestaat. Belasting waarden worden bepaald volgens de bebording uit tabel 2B van de NEN8701. Afhankelijk van het type berekening (BGT of UGT) zal een reductiefactor α_{c20} uit de oplegde belasting voortkomen. De belasting in het rekenmodel inclusief veiligheidsfactoren (dynamisch en belastingfactor) vermenigvuldigd met de reductiefactor ($Q_{1b} = \alpha_{c20} \times Q_1$) worden vervolgens vergeleken met de rekenwaarden (Q_{1b}), tabel 5.1. Bij toepassing van bebording zijn reducties van de karakteristieke belasting op basis van: aantal vrachtwagens per jaar, kortere referentie periode en de trend niet toegelaten.

Door de opdrachtgever zijn diverse lastmodellen opgegeven voor bijzondere voertuigen (BM3). Er is gerekend met het normatief voorgeschreven BM1 en vervolgens is ook BM3 uitgewerkt.

Afbeelding 5.1 Belasting reductiefactoren volgens tabel B.2 NEN8701

Tabel B.2 — Reductiefactoren α_{C20} voor de karakteristiek belasting bij gebruik van bord C20

α_{C20}	bord C20 (ton)	bord C20 (kN)	Q_{1b} per as (kN)	Q_{2b} per as (kN)
1,000	12	120	300	200
0,773	10	100	232	155
0,668	9	90	200	134
0,569	8	80	171	114
0,477	7	70	143	95
0,391	6	60	117	78
0,310	5	50	93	62
0,236	4	40	71	47
0,168	3	30	50	34

5.3.1 Belasting model 1 (BM1)

Conform NEN-EN 1991-2 dient de constructie getoetst te worden op de volgende belastinggevallen:

- belastingmodel 1 (LM1, NEN-EN 1991-2 art. 4.3.2).

Verkeersbelastingen conform NEN-EN 1991-2 zijn gebaseerd op theoretische rijstroken. Het aantal theoretische rijstroken bepaalt het aantal aslaststelsels dat gelijktijdig in rekening moet worden gebracht. De kluiskeiders ligt in het lokale wegennet. De bogen hebben een doorgaand metselwerkverband loodrecht op de rijrichting. De rijbaanbreedte over de kelders is <5,4 m zodat er bij de fictieve indeling één theoretische rijstrook per boog op past. Er zal wel rekening gehouden worden met de naastgelegen parkeerstrook. De ligging buiten het hoofdwegennet maakt dat de correctiefactoren onder fictief en werkelijk gebruik gelijk zijn aan $\alpha_{q1} = 1,0$ en $\alpha_{qi} = 1,0$ (voor $i > 1$). Het aantal zware voertuigen (per jaar per rijstrook; N_{obs}) is 2.000 stuks. De referentieperiode (T_{ref}) is 15 jaar. Bij toepassing van bebording zijn reducties van de karakteristieke belasting op basis van: aantal vrachtwagens per jaar, kortere referentie periode en de trend niet toegelaten. Een overzicht van de gebruiken belastingen voor BM1 wordt gegeven in tabel 5.1.

Tabel 5.1 Overzicht belastingen BM1

	Norm Q_{k1}	q_{k1}
basiswaarde Q [kN], q [kN/m ²]	300,0	9,0
α_q	1,0	1,0
referentieperiode reductie	1,0	1,0
trendreductie	1,0	1,0
aantal zware voertuigen reductie	1,0	1,0
karakteristieke waarden Q [kN], q [kN/m ²]	300,0	9,0

Het verkeer kan niet aan de rand van de boog rijden. Parkeren pal tegen de rijbaan aan is wel gebruikelijk waardoor hier rekening met spreiden van verkeersbelasting gehouden dient te worden. Conform NEN-EN 1991-2 mag het tandemstelsel bestaande uit twee aslasten (hart-op-hart 1,2 m) worden vervangen door een equivalente, gelijkmatig verdeelde belasting die wordt verdeeld over een rechthoekig vlak met breedte van

3,0 m en een lengte van 2,2 m. Dit is op onderkant verharding (= bovenkant grond). De spreiding in de grond wordt in 2D richting meegenomen in de Diana 2D-berekening. De spreiding in de breedte richting zal gereduceerd worden van 3,0 m naar 2,7 m om rekening te houden met belasting uit de parkeerstrook (eenzijdige spanningsspreiding). De overzicht van de spreiding van de BM1 belastingen wordt gegeven in tabel 5.2. Deze belastingen zijn zonder belastingfactoren.

In de breedte richting wordt een belastingspreiding onder 30 graden aangehouden over de hoogte van het grondpakket tot de bovenkant van de metselwerkboog met als maximum de kelderbreedte. De spanningsspreiding wordt dus richting de draagmuren groter dan ter plaatse van het midden van de boog. Naast de kelder kan spanningsspreiding onder 45 graden tot de afstand van de draagmuur worden toegepast, zoals gebruikelijk is voor bijvoorbeeld damwandberekeningen, met als maximum de kelderbreedte.

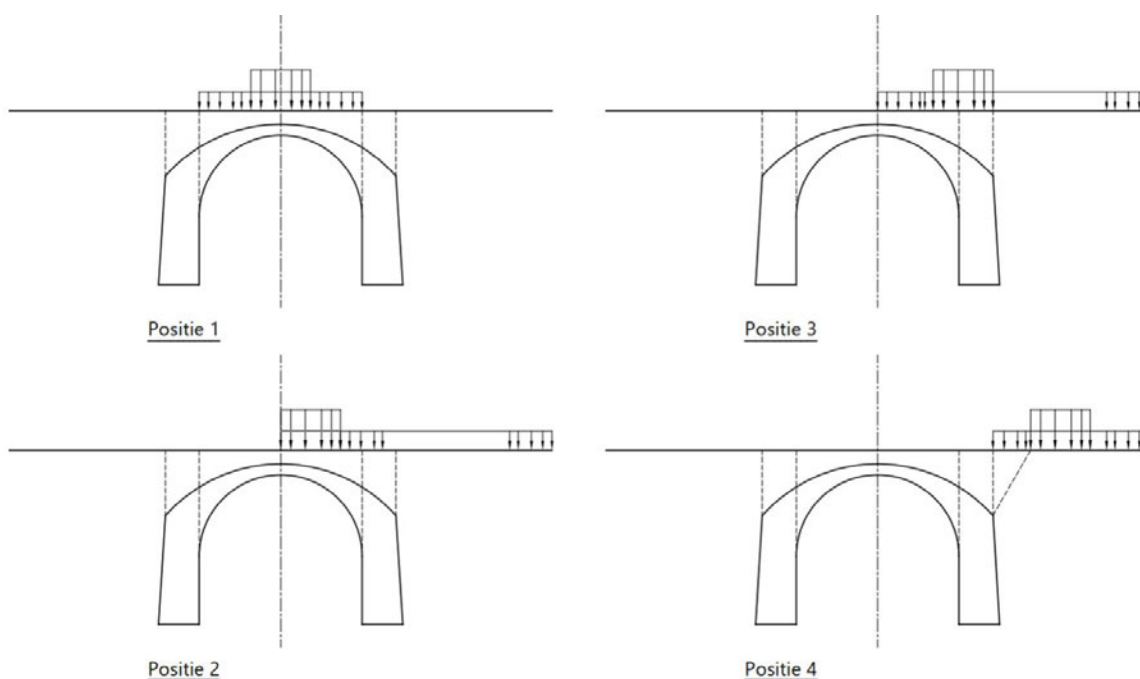
Tabel 5.2 Spreiding belastingen BM1

Belasting	F_{Ts} [kN]	Afmetingen wielvlak [m x m]	q_{wiel} [kN/m ²]	q_{k1} [kN/m ²]
BM1	$300,0 \times 2 = 600,0$	2,7 x 2,2	101,0	9,0

De positie van de verkeersbelasting is variabel. In de berekening worden een viertal hoofdposities per kelder beschouwd:

- 1 geconcentreerde belasting in het midden van de kelder en de gelijkmatig verdeelde belasting over de gehele kelderlengte, tot voorzijde van draagmuren (dagmaat);
- 2 geconcentreerde belasting tussen midden van de kelder en 2,2 m uit het midden van de kelder. De gelijkmatig verdeelde belasting verdeeld over de halve lengte van de kelder en achter de draagmuren;
- 3 geconcentreerde belasting op de draagmuur, beginnend aan de achterzijde van de draagmuur en 2,2 m richting midden van de overspanning. Gelijkmatig verdeelde belasting op halve kelderlengte achter de draagmuren;
- 4 geconcentreerde belasting achter de draagmuur. De afstand tot de kelder hangt af van de diepteligging van de kelder, 30 graden vanaf bovenzijde draagmuur.

Afbeelding 5.2 Posities verkeersbelasting



5.3.2 Belastingmodel 3 (BM3)

Naast de reguliere verkeersbelastingen wordt een berekening uitgevoerd van de belasting bij incidentele inzet van de brandweer. De door de opdrachtgever opgegeven lastmodellen zijn weergegeven in tabel 5.3. De aangegeven aslasten zijn allen karakteristieke waarden, dus zonder dynamische factoren. Het stelsel van samenstellingen van aslasten die model staan voor de bijzondere zware voertuigen vormen de invulling voor Belastingmodel 3 (BM3) volgens NEN-EN 1991-2/NB. Een verdeelde verkeersbelasting zoals in BM1 is afwezig in BM3.

Tabel 5.3 Stelsels van de samenstelling van de aslasten voor de voertuigen van de brandweer Utrecht. Maatgevende voertuig vetgedrukt

Type voertuig	Aslast vooras [kN]	Aslast achteras [kN]	Afstand wielbasis [m]
blusvoertuig	47,0	93,0	3,61
containervoertuig	75,0	115,0	4,80
ladderwagen	80,0	115,0	4,20
hoogwerker	71,0	115,0	4,80

Op de kelders met allen een rijbaan breedte van <6 m past er maximaal één bijzonder voertuig binnen BM3. Op basis van de verstrekte as-configuraties is het voertuig 'Ladderwagen' maatgevend (totale aslast belasting). De kelderconstructie zal dus beoordeeld worden voor het stelsel van samenstelling van aslasten van de Ladderwagen (maatgevend volgens tabel 5.3). De twee assen van 8 ton en 11,5 ton met een wielbasis afstand van 4,20 m worden als maatgevende assen op de constructie geplaatst.

Volgens art 4.3.4 van NEN-EN 1991-2-C1:2015/NB:2019 geldt bij BM3 dat, wanneer de bijzondere voertuigen bewegen met een snelheid van meer dan 5 km/h (wenselijk, dus onbeperkt gebruik), er voor de verticale belastingen een dynamische vergrotingsfactor in rekening moet zijn gebracht ter grootte van: $\varphi = 1,40 - L/500$ waar $\varphi \geq 1$ met L = de getalswaarde van de invloedlengte (in meters). Voor de overspanning(en) van de metselwerk kluiskelders is deze klein en dus $\varphi = 1,4$ is aangenomen. Dit is een erg conservatieve aanname omdat de snelheid zeer laag zal zijn bij het passeren van de kluiskelder (< 50 km/h). De belasting van de twee assen wordt verdeeld over een rechthoekig vlak met breedte van 2,7 m en een lengte van 1,0 m. De Kromme Nieuwgracht is een één richtingsweg. Doordat de overspanning van KNG kleiner of ongeveer gelijk is aan de wielbasis, kan de vooras een positief effect kunnen hebben op de draagkracht van de kelder. Dus de zwaardere achteras is maatgevend. Daarom één rijrichting van het voertuig wordt onderzocht (lichtere vooras links van de zwaardere achteras).

Tabel 5.4 Overzicht belastingen BM3

	Q _{vooras}	Q _{achteras}
basiswaarde Q [kN]	80,0	115,0
α_q	1,0	1,0
referentieperiode reductie	1,0	1,0
trendreductie	1,0	1,0
aantal zware voertuigen reductie	1,0	1,0
dynamische vergrotingsfactor	1,4	1,4
karakteristieke waarden Q [kN]	112,0	161,0

Tabel 5.5 Spreiding belastingen BM3

Belasting	Q _{vooras} [kN]	Q _{achteras} [kN]	Afmetingen wielvlak [m x m]	q _{vooras} [kN/m ²]	q _{achteras} [kN/m ²]
BM3	112,0	161,0	2,7 x 1,0	41,5	59,6

6

VERIFICATIEBEREKENING

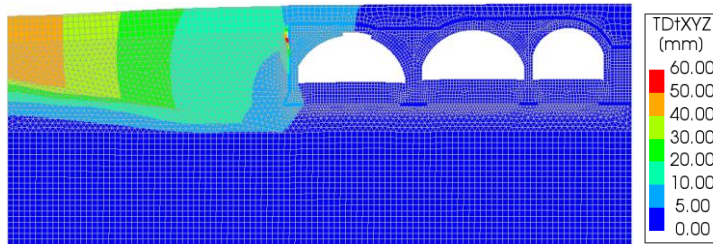
6.1 Inleiding

De boog is getoetst voor acht belastingposities: I (midden van de centrale kelder), II (rand van de centrale kelder), III (op het landhoofd van de centrale kelder), IV (op het recht landhoofd van de linkskelder), V (recht rand van de linkskelder), VI (midden van de linkskelder), VII (links rand van de linkskelder) en IX (naast de linkskelder/landhoofd). Hierbij is gekeken naar de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT) en de uiterste grenstoestand (UGT). BGT- en UGT-berekeningsresultaten zijn ook opgenomen in bijlage II. Fase 5 van de analyse (grond- en metselwerkconstructie onderhevig aan zwaartekracht en waterdrukbelasting) wordt ook besproken.

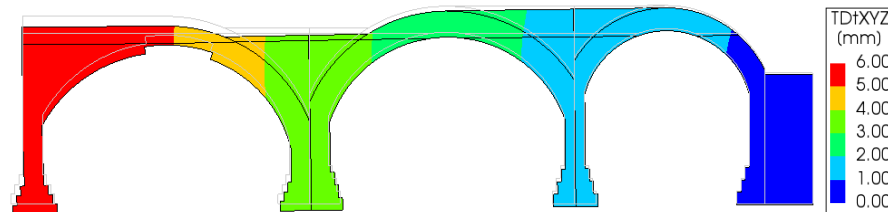
6.2 Resultaten berekening belastinggeval eigen gewicht

De beginsituatie vóór het aanbrengen van de verkeersbelasting wordt gecontroleerd en gerapporteerd. Dit zijn de resultaten van fase 5, waarin de metselwerkconstructie en het aanvulzand volledig in het model worden meegenomen. De resultaten beschrijven de situatie waarin de initialisatie van de aanvulzandspanning en zwaartekrachtbelasting in het model wordt toegepast. De resultaten zijn uitgedrukt in termen van verplaatsing, hoofdspanningen en scheuren van het metselwerk voor BGT-analyses. De situatie beschrijft voornamelijk het consolidatieproces van de grond aan de linkerkant van de kelder. In feite is de zwakke kleigrond rond de kelder, die waarschijnlijk rond de 12e eeuw is aangelegd (waarschijnlijk gerenoveerd rond 1500-1700), al die jaren onderworpen aan een progressieve consolidatie. Deze zogenaamde seculaire zetting is een typisch gedrag van zwakke bodemlagen. Zoals te zien is op afbeelding 6.1 verschuift de linkerkant van het model verticaal ongeveer 45 mm. De vervorming van de kelder is weergegeven in afbeelding 6.2. Door de (non-tension) interface tussen metselwerk en grond kan de grond vervormen zonder dat er trekspanningen op de boog worden uitgeoefend. Door het niet-lineaire gedrag van de interface kan de grond in het geval van lokale trekspanning losraken en afschuiven langs het metselwerk (rode contour van afbeelding 6.1). Het linker landhoofd wordt iets naar binnen geduwd (horizontale verplaatsing afbeelding 6.1). Dit concentreert de drukspanningen op de rechterrاند van het linker landhoofd. Dit is te zien aan de hoofdspanningstensorplot van afbeelding 6.3. Trek (S1) en compressieve (S3) hoofdspanningscontourplots worden ook in weergegeven afbeelding 6.4. Door de lage treksterkte van het metselwerk ontstaan er kleine scheurtjes tijdens de zwaartekrachtfase. Ze worden getoond in afbeelding 6.5. Naast de plot met de metselwerkgebieden die de treksterktegrens overschrijden, wordt de scheurbreedte ook met alleen waarden boven de smalste zichtbare scheuren met een breedte van 0,1 mm uitgedrukt 15.

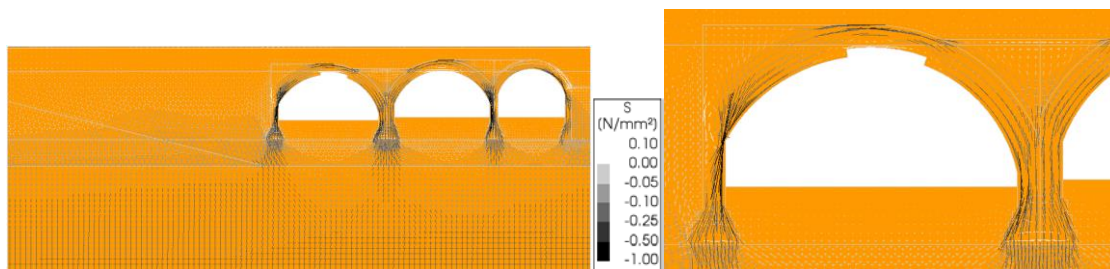
Afbeelding 6.1 Resulterende vervormingen van fase 5 van BGT analyse



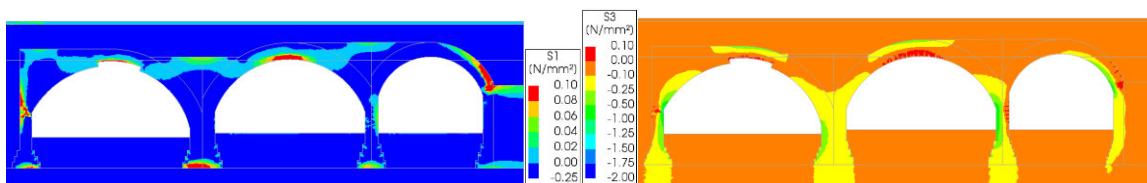
Afbeelding 6.2 Resulterende vervormingen van kelders van fase 5 voor BGT-analyse



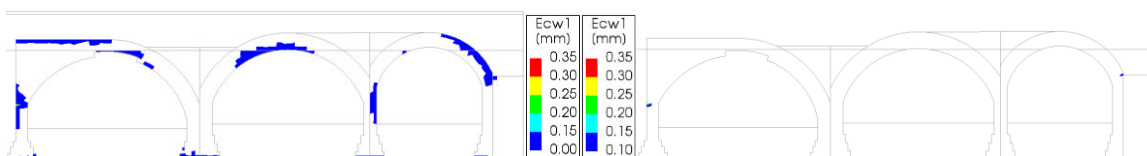
Afbeelding 6.3 Hoofddrukspanningstensorplot van fase 5 voor BGT-analyse



Afbeelding 6.4 Contourplot hoofdtrekspanning (links) en hoofddrukspanning (rechts) van fase 5 voor BGT-analyse



Afbeelding 6.5 Hoofdscheurbreedte plot- zonder contourlimiet (links) en degenen met waarden boven 0,1 mm (rechts) van fase 5 voor BGT analyse



De belasting door eigen gewicht leidt tot een initiële vervorming van de constructie als gevolg van de consolidatie-effecten. De drie kelders ondergaan een starre lichaamsrotatie, zonder grote relatieve differentieële vervormingen. De basis van het linker landhoofd van KNC buigt naar binnen. Hierdoor ontstaat een horizontale scheur aan de buitenkant van de landhoofd ter hoogte van de geboorte van de

boog. De verkeersbelasting, indien geplaatst boven het rechter landhoofd, vergroot de scheur van het linker landhoofd. Het schade niveau van de constructie wordt beschouwd als DL0 (uit tabel 2.2).

6.3 BGT

6.3.1 BM1

In deze paragraaf zijn de resultaten weergegeven van de BGT-berekeningen voor de 9 belastingposities (positie VIII is verwijderd omdat gelijk is aan positie VII) en de 9 C20-bord belasting voor belasting model 1 (BM1). Het overzicht van de locatie van de laadpositie wordt gegeven in tabel 4.2. De maximaal toelaatbare vervorming van de KNC kelder is gelijk aan $L/300 = 12,6$ mm, waarin L = overspanningslengte = 3,8 m. De maximale vervorming wordt bepaald als de maximale verplaatsing bij de binnenzijde van de KNC boog. Schade is beperkt tot schade niveau 2 (DS1-DL2) wat een ψ -waarde van maximaal 2,4 betekent. Voor alle belastingposities met een C20 bord belasting lager of gelijk aan 5 ton is de maximale vervorming onder de maximaal toelaatbare vervorming van 12,6 mm (tabel 6.1). Bij een belasting van 6 ton (volgens bord C20) vertonen de twee posities IV en V (meest maatgevend) een overschrijding van de vervormingscriteria. Bij een belasting van 7 en 8 ton, alleen de positie I, VII en IX voldoen aan de vervormingscriteria. Bij een belasting van 9, 10 en 12 ton, alleen de positie IX laat een maximale verplaatsing van minder dan 12,6 mm zien (tabel 6.1). De maximaal drukspanning is voor alle belastingposities lager dan de gemiddelde druksterkte van 8,5 MPa (tabel 6.2). De scheurontwikkeling bij de binnenzijde van de boog (zichtbare scheuren) wordt geregistreerd in termen van scheurbreedte (tabel 6.3). De berekende schadeparameters ψ van de verschillende scenario's zijn weergegeven in tabel 6.4. Schade niveau 1 (DL1) wordt overschreden voor positie IV-V-VI voor de belasting met bord van 3 ton. Schade niveau 2 (DL2) voldoet voor een belasting borden van 3 in alle belasting positie. Bij een belasting van 4-5-6 ton wordt DL2 overschreden voor de enige positie IV en V.

Tabel 6.1 Maximale vervorming [mm]. Toelaatbare maximum, 12,6 mm. Groen: criteria voldoet

Belasting positie	Bord C20 3 ton	Bord C20 4 ton	Bord C20 5 ton	Bord C20 6 ton	Bord C20 7 ton	Bord C20 8 ton	Bord C20 9 ton	Bord C20 10 ton	Bord C20 12 ton
I	4.43	5.63	6.90	8.10	10.18	12.40	14.33	16.96	23.17
II	5.78	7.39	8.93	10.67	12.84	15.37	17.24	21.00	30.30
III	5.80	7.42	8.98	10.83	13.00	15.49	18.34	21.72	30.97
IV	6.77	8.29	10.02	12.69	15.67	19.28	23.26	28.28	39.79
V	6.74	8.21	9.88	12.98	15.53	19.16	23.34	27.53	38.83
VI	4.96	6.39	8.13	10.65	13.15	15.96	19.13	23.01	32.37
VII	5.15	6.30	7.58	9.00	10.68	12.56	14.81	17.99	25.89
IX	3.35	4.02	4.76	5.62	6.58	7.64	8.76	9.94	12.60

Tabel 6.2 Maximale drukspanning [MPa]. Maximum druksterkte, 8,5 MPa - ter informatie/geen criterium

Belasting positie	Bord C20 3 ton	Bord C20 4 ton	Bord C20 5 ton	Bord C20 6 ton	Bord C20 7 ton	Bord C20 8 ton	Bord C20 9 ton	Bord C20 10 ton	Bord C20 12 ton
I	-4.10	-4.36	-4.62	-4.82	-5.03	-4.96	-4.95	-4.89	-4.80
II	-3.44	-3.93	-4.29	-4.65	-4.99	-6.03	-5.88	-4.79	-4.92
III	-3.46	-3.93	-4.30	-4.69	-5.02	-5.13	-5.02	-4.67	-4.80
IV	-5.16	-5.30	-4.90	-4.86	-4.19	-4.06	-4.14	-4.34	-6.65
V	-5.21	-5.36	-5.06	-5.00	-4.40	-4.29	-4.41	-4.65	-5.66
VI	-3.77	-4.20	-4.71	-5.48	-5.86	-6.05	-6.22	-6.49	-7.07
VII	-1.27	-2.30	-3.46	-3.96	-4.27	-4.58	-4.96	-5.38	-6.79
IX	-0.89	-1.02	-1.26	-1.56	-1.88	-2.19	-2.48	-2.64	-2.76

Tabel 6.3 Maximale scheurbreedte bij de binnenzijde van de boog [mm] - ter informatie/geen criterium

Belasting positie	Bord C20 3 ton	Bord C20 4 ton	Bord C20 5 ton	Bord C20 6 ton	Bord C20 7 ton	Bord C20 8 ton	Bord C20 9 ton	Bord C20 10 ton	Bord C20 12 ton
I	0.3	0.4	0.5	0.6	0.5	1.3	1.8	4.1	8.6
II	0.0	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	1.8	1.8	1.9
III	0.1	0.5	0.8	1.2	1.6	1.9	2.3	2.3	2.9
IV	1.5	2.0	2.5	3.4	4.4	6.8	8.7	10.5	15.1
V	1.4	2.0	2.6	3.8	4.5	6.3	8.0	9.8	13.4
VI	0.6	0.9	1.3	1.9	2.5	3.2	4.0	5.1	7.8
VII	0.0	0.4	0.7	1.0	1.4	1.7	2.4	3.0	5.2
IX	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.2

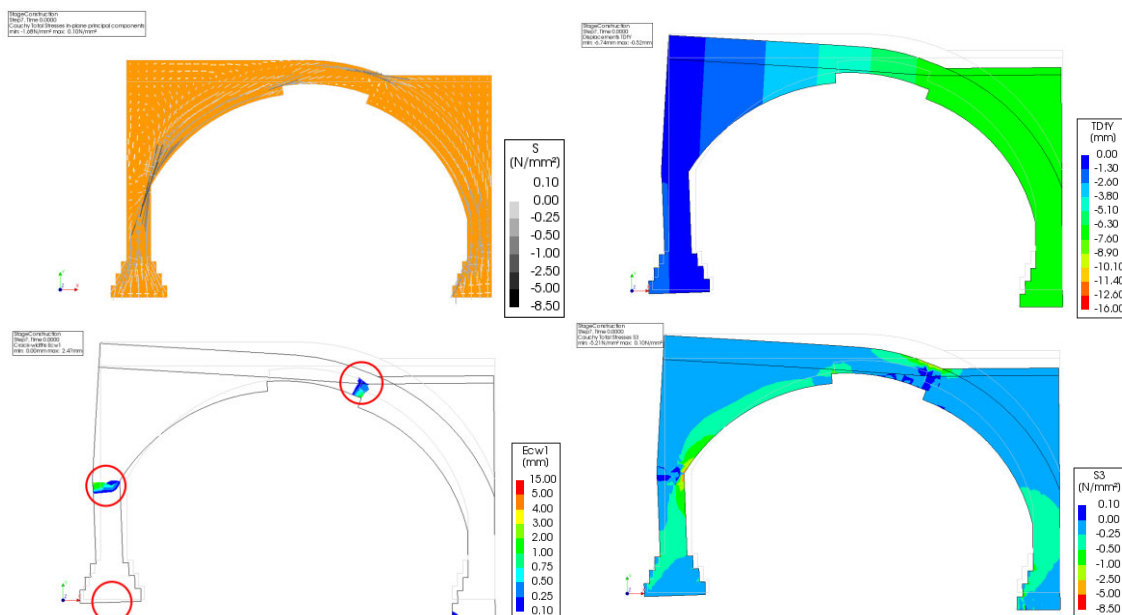
Tabel 6.4 Schadewaarde ψ . Groen: criteria DL1 voldoet ($\psi < 1,5$). DL2 in oranje en DL3 in rood

Belasting positie	Bord C20 3 ton	Bord C20 4 ton	Bord C20 5 ton	Bord C20 6 ton	Bord C20 7 ton	Bord C20 8 ton	Bord C20 9 ton	Bord C20 10 ton	Bord C20 12 ton
I	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	2.3	2.6	3.2	3.8
II	0.0	1.5	1.8	2.0	2.2	2.3	2.4	2.4	2.4
III	1.0	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.6	2.6	2.8
IV	2.3	2.5	2.6	2.9	3.1	3.6	3.8	4.0	4.5
V	2.2	2.5	2.7	3.0	3.1	3.5	3.7	4.0	4.4
VI	1.7	1.9	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.3	3.7
VII	0.0	1.5	1.8	2.0	2.2	2.3	2.6	2.8	3.3
IX	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	2.1

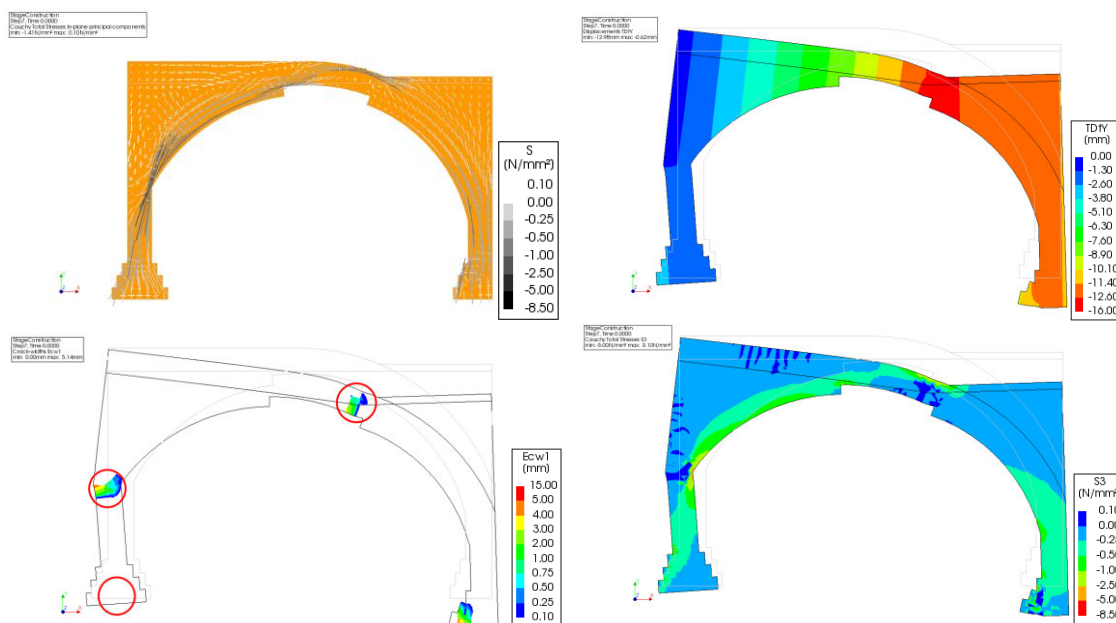
Afbeelding 6.6 toont de belangrijkste output gegenereerd uit het modelscenario met een C20 bordbelasting van 3 ton en positie V. De hoofddrukspanningsvector laten zien hoe de compressiekrachten in de boog

verlopen. Omdat de belasting boven het rechter landhoofd wordt uitgeoefend, is de drukzone voornamelijk gelokaliseerd aan de binnenzijde van de linkerkant van de boog. Op het kruinniveau verschuift de drukzone naar de bovenkant van de boog. Tegenover, bij de binnenzijde van de boog vormt zich een scheur. De drukkrachten zetten zich voort langs de rechterkant van de boog met lage waarden (laag buigend moment in de wand), nadat ze het rechte landhoofd hebben bereikt. Een andere scheur vormt zich op het linker landhoofd aan de geboorte van de boog. De zakking van het rechter landhoofd is ongeveer 7 mm. In werkelijkheid zal de zakking minder zijn. De verkeersbelasting is gespreid tot 2,7 m in de breedterichting om de metselwerk boog te toetsen. Dit is een conservatieve aanname. Deze zelfde belasting is nu voor het draagvermogen van de grondlagen onder de kelder toegepast. Echter zal de verkeersbelasting door de wanden over een veel grotere breedte dan 2,7 m spreiden. Zo wordt de belasting aan de onderkant van de voet aanzienlijk lager en zal de kelder minder zakken. Het mechanisme wordt desalniettemin conservatief door het model beschreven. Modelscenario met een C20 bord belasting van 6 ton en positie IV en V worden getoond in afbeelding 6.7 en afbeelding 6.8. De mechanisme is vergelijkbaar met wat in het vorige geval is waargenomen. Bovendien is de trekspanning aan de boven- en linkerkant van de boog toeneemt, met typisch buiggedrag. Concluderend is aan vervormingencriteria voldoen voor C20 bord tot 5 ton, maar anderzijds wordt het schade niveau 2 (DL2) bij C20 4 ton bord overschreden. De BGT toets van BM1 belasting voldoet dus aan de C20 bord van 3 ton. Het convergentiegedrag van BGT-BM1 berekeningen is goed. De relatieve verplaatsingsnormvariatie bij de laatste stap is nooit hoger dan 6 %, terwijl de norm voor onbalanskracht nooit hoger is dan 8 %.

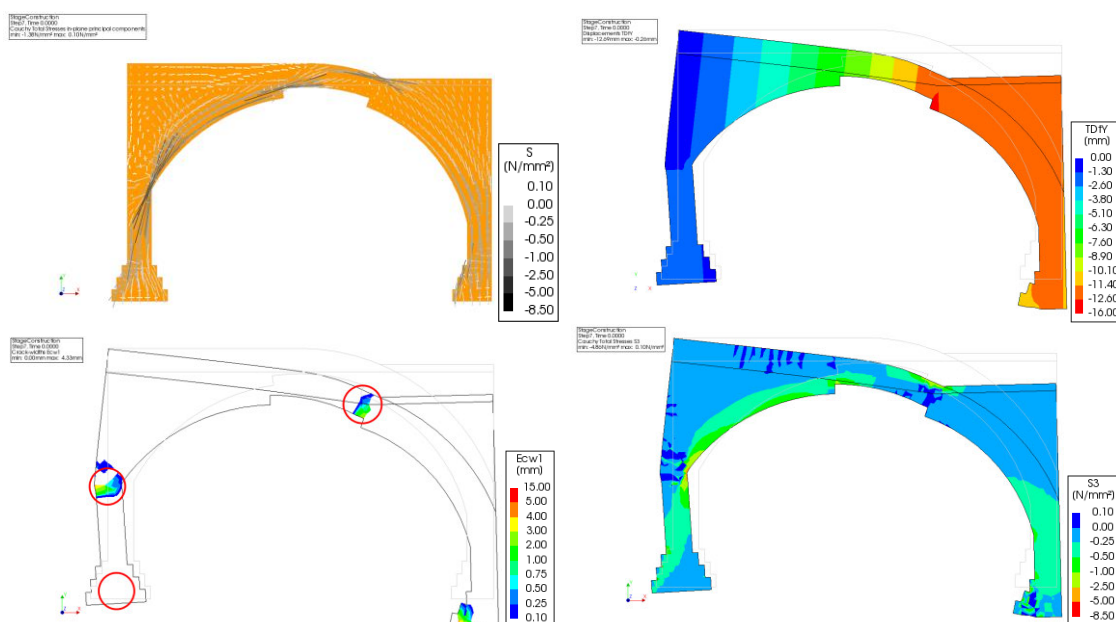
Afbeelding 6.6 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met C20 3 ton belasting en belastingpositie V. Scharnieren met rondjes intekenen



Afbeelding 6.7 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met C20 6 ton belasting en belastingpositie V. Scharnieren met rondjes intekenen



Afbeelding 6.8 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en compressieve hoofddrukspanning voor scenario met C20 6 ton belasting en belastingpositie IV. Scharnieren met rondjes intekenen



6.3.2 BM3

In deze paragraaf zijn de resultaten weergegeven van de BGT-berekeningen voor de 9 belastingposities voor belasting model 3 (BM3). Het overzicht van de locatie van de belastingpositie wordt gegeven in tabel 4.2. Zoals al gedaan in de BM1-belasting, de maximaal toelaatbare vervorming van de KNC kelder is gelijk aan 12,6 mm. De maximaal toelaatbare vervormingen wordt voor alle belastingposities niet overschreden (tabel 6.5). Ook de gemiddelde druksterkte van 8,5 MPa wordt voor alle belastingposities niet overschreden (tabel 6.5). Schade niveau 1 (DL1) wordt overschreden voor positie I-VI-VII. Schade niveau 2 (DL2) voldoet voor alle belasting positie. Anders dan de BM1-belasting wordt de meest maatgevende positie in termen van

vervormingen zijn op locatie I en II gevonden. In deze positie bevindt de belasting van het vooras van de ladderwagen zich in het midden van de KNC en de zwaardere belasting van het achteras in het midden van de naastgelegen kelder. De mechanisme is weergegeven in afbeelding 6.9 waar kan worden gezien dat het rechtse landhoofd een zakking ondergaat. Deze twee belastingposities zijn kritischer in termen van vervormingen dan posities VI en VII (nog maatgevende qua schade) waar de zware belasting van het achteras boven kelder KNC wordt uitgeoefend. In feite heeft de belasting van het vooras (die buiten het keldergebied op de grond wordt geplaatst) een gunstige invloed op het mechanisme. Die verhoogt de passieve druk van de grond naar het linker landhoofd van de kelder. Dit resulteert in een vermindering van het buigende moment in het linker landhoofd en dus van scheurvorming (afbeelding 6.10). De zichtbare scheurbreedte (binnenzijde van de kelder) is voor alle belastingposities onder 0,4 mm (tabel 6.5).

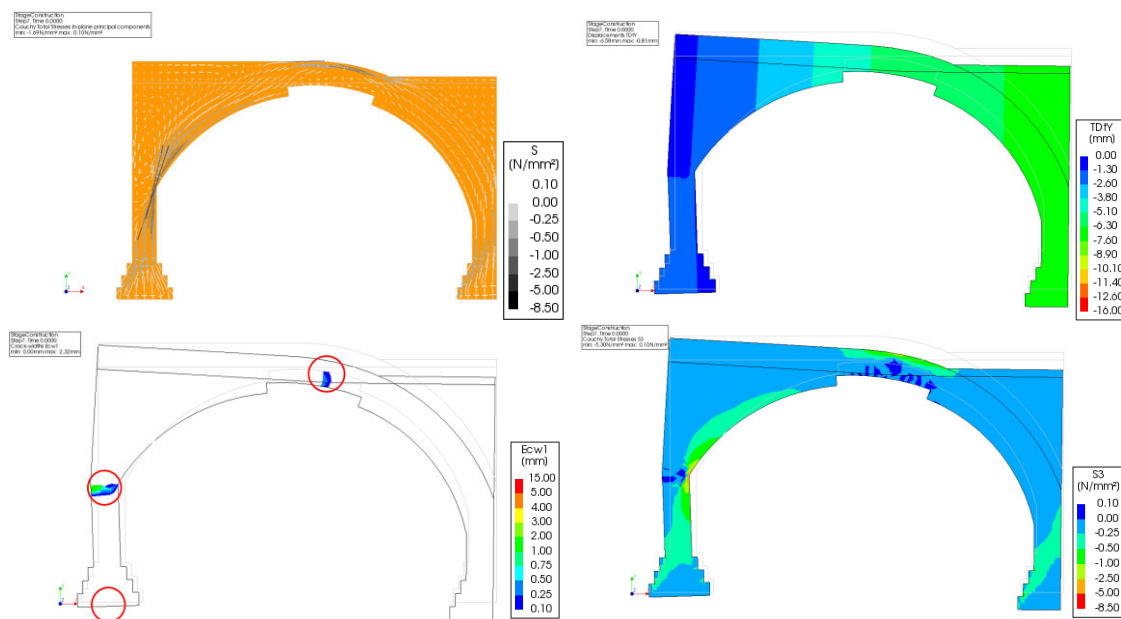
Concluderend voldoet de constructie aan de gestelde vervorming- en schadecriteria.

Het convergentiegedrag van BGT-BM3 berekeningen is goed. De relatieve verplaatsingsnormvariatie bij de laatste stap is nooit hoger dan 9 %, terwijl de norm voor onbalanskracht nooit hoger is dan 4 %.

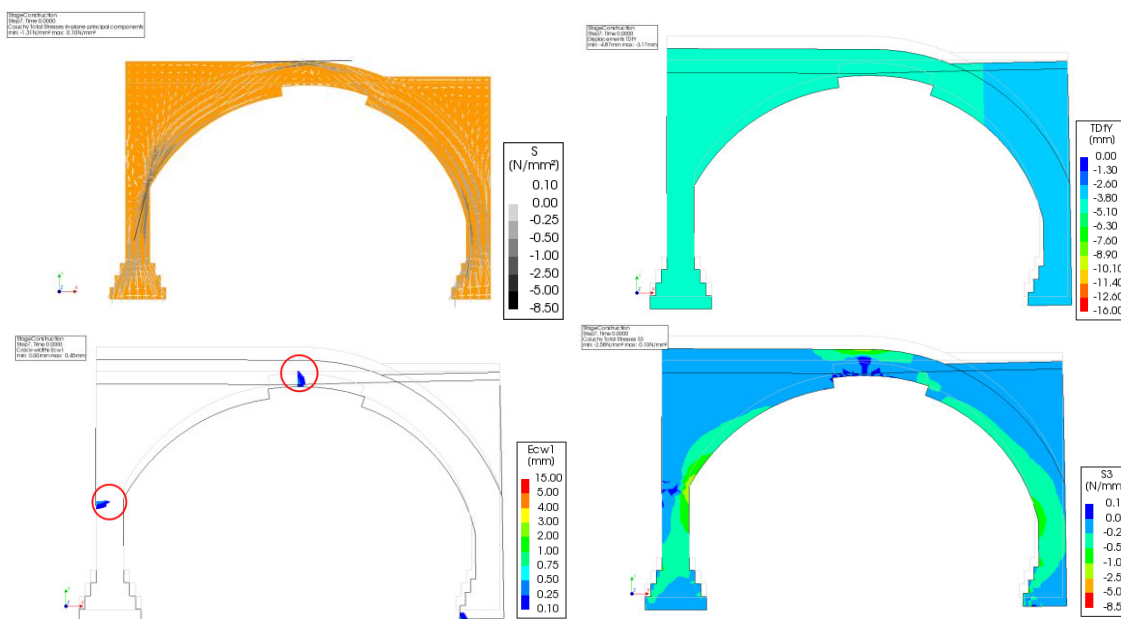
Tabel 6.5 Maximale vervorming [mm], drukspanning [MPa] en schadewaarde ψ . Toelaatbare maximum, 12,6 mm, 8,5 MPa, $\psi < 1,5$.
Groen: criteria voldoet. Voor ψ , DL2 in oranje

Belastingpositie	Vervorming [mm]	Drukspanning [MPa]	Scheurbreedte [mm]	Schadewaarde ψ [-]
I	6.47	-5.30	0.4	1.5
II	6.37	-4.24	0.3	1.4
III	5.24	-2.79	0.0	0.0
IV	4.80	-2.48	0.2	1.2
V	4.95	-2.75	0.3	1.4
VI	4.87	-2.58	0.4	1.5
VII	4.92	-2.11	0.4	1.5
VIII	4.90	-1.24	0.0	0.0
IX	3.46	-0.91	0.0	0.0

Afbeelding 6.9 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie I. Scharnieren met rondjes intekenen



Afbeelding 6.10 Hoofspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie VI. Scharnieren met rondjes intekenen



6.4 UGT

Onderstaand is per belastingpositie en C20 bord de UGT-toets weergegeven. De twee verschillende belastingmodellen, namelijk BM1 en BM3, worden ook berekend.

Zoals beschreven in §2.3.2 wordt de GRF methode voor de UGT-toets gebruikt.

Bij de GRF-methode wordt er geen partiële factor toegepast op het metselwerk. Ten opzichte van de BGT-berekeningen wordt de karakteristieke stijfheid (3.500 MPa) voor het metselwerkmateriaal gebruikt. Een overzicht over de gehanteerde waarden wordt gegeven in tabel 2.3.

De draagkracht van de kelder wordt berekend door de kracht-verplaatsingscurve te analyseren zoals beschreven in hoofdstuk 2.3.2. Uit de curve wordt het piekcapaciteit (vóór daling van de kracht) vastgesteld. Verschillende punten van de curve (vooral die na een val van de kracht) worden gecontroleerd en vergeleken met het mogelijke bezwijkmechanisme beschreven in afbeelding 2.13.

6.4.1 GRF-BM1

De UGT-GRF-analyseresultaten worden berekend op dezelfde manier als gespecificeerd in de vorige paragraaf. Dus voor de maatgevende belastingpositie wordt de capaciteit van de kelder berekend. Informatieve resultaten van maximale vervorming, maximale drukspanning en maximale scheurbreedte van de linkerboog worden gegeven in tabel 6.6, tabel 6.7, tabel 6.8, respectievelijk. In de UGT is de vervorming fictief omdat met rekenwaarden van verschillende parameters wordt gerekend waardoor de vervormingen geen relatie meer hebben met de werkelijke vervormingen. Wel geeft het vervormingsplaatje een beeld van het meest kritische bezwijkgedrag.

Tabel 6.6 Maximale (fictieve) vervorming [mm] - ter informatie/geen criterium

Belastingpositie	Bord C20 3 ton	Bord C20 4 ton
I	12.52	18.25
II	20.16	26.63
III	20.49	28.25
IV	27.38	43.69
V	34.00	45.65
VI	38.95	42.62
VII	21.65	29.50
IX	8.05	10.33

Tabel 6.7 Maximale drukspanning [MPa]. Maximum druksterkte, 5,0 MPa - ter informatie/geen criterium

Belastingpositie	Bord C20 3 ton	Bord C20 4 ton
I	-3.77	-2.89
II	-3.64	-4.04
III	-4.19	-5.00
IV	-3.15	-4.75
V	-3.69	-3.78
VI	-4.80	-5.00
VII	-5.00	-5.00
IX	-2.08	-2.17

Tabel 6.8 Maximale scheurbreedte [mm] - ter informatie/geen criterium

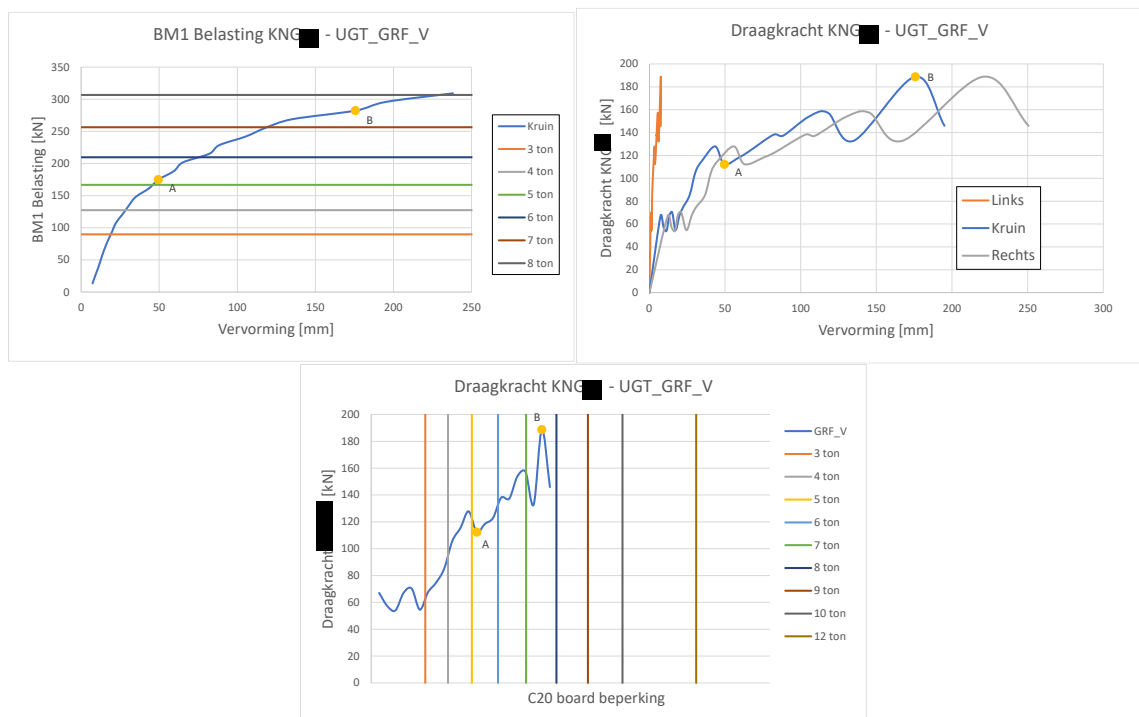
Belastingpositie	Bord C20 3 ton	Bord C20 4 ton
I	7.9	11.4
II	11.9	13.3
III	3.9	29.5
IV	13.9	27.7
V	27.2	20.3
VI	16.9	22.1
VII	8.3	21.5
IX	3.0	2.2

De BM1 aslast belasting wordt uitgezet tegen de vervorming van de kruin (afbeelding 6.11). Deze belasting wordt verdeeld over verschillende kelders. De kracht die alleen door de linkerboog wordt gedragen, wordt uitgezet tegen vervormingen op drie verschillende locaties (afbeelding 2.11). Dit wordt getoond in afbeelding 6.11, rechts. Zodra de piekbelasting van de linkerboog is bepaald, wordt de maximaal toegestane BM1-belasting geëvalueerd (afbeelding 6.11, onder). Punt B van afbeelding 6.11 (onder), dat verwijst naar de piekkracht van de linkerboog, wordt verkregen voor een verkeersbelasting tussen 7 en 8 ton, afgerond op 7 ton. Contourgrafieken van vervorming, scheurbreedte en druk plastische rek wordt in afbeelding 6.12 en afbeelding 6.13 voor twee verschillende stappen (A en B in afbeelding 6.11) getoond. De eerste stap verwijst naar de eerste grote daling van de capaciteit (ongeveer 15 %). Bij een dergelijke belasting (bijna C20 5 ton) wordt de druksterkte overschreden maar de kelder kan nog steeds de compressie langs de boog overbrengen. De draagkracht blijft dan groeien tot de C20-belasting van ongeveer 7 (en een halve) ton. Op dit punt zijn de vier plastic scharnieren zichtbaar (afbeelding 6.12). Na dit punt wordt een krachtreductie van ongeveer 22 % gevonden, wat kan worden aangenomen als bezwijken van de kelder.

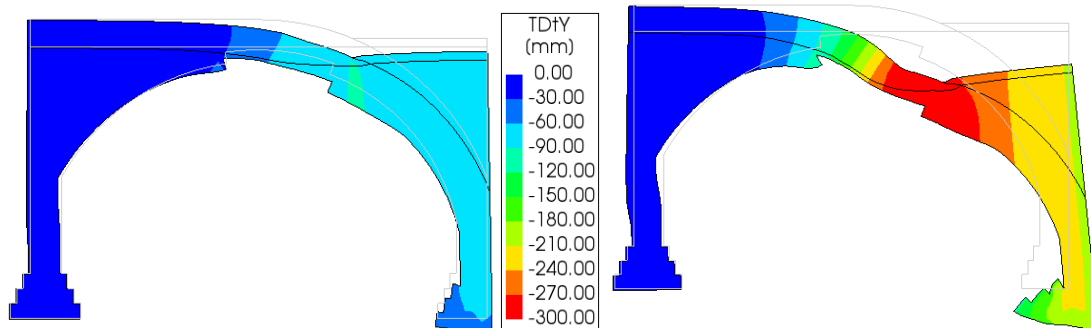
In conclusie kan de C20-belasting 7 ton als de ultieme capaciteit voor de UGT-GRF-analyse worden beschouwd.

Het convergentiegedrag van UGT-GRF-BM1 berekeningen is acceptabel. De norm voor de onbalanskracht is nooit hoger is dan 20 %.

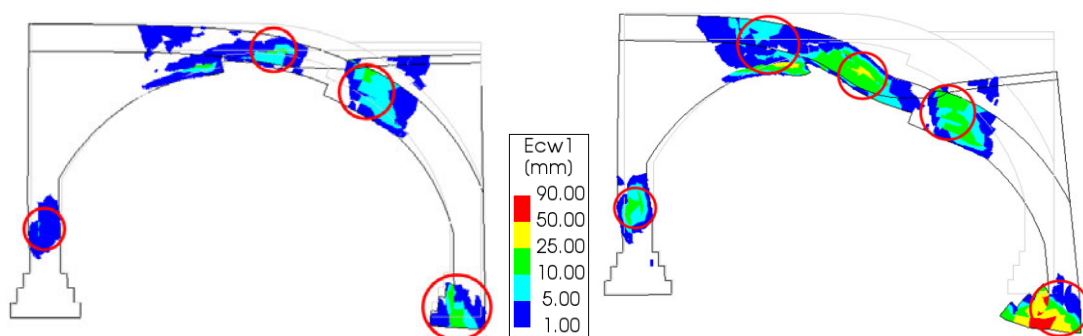
Afbeelding 6.11 BM1 belasting-vervorming plot (links). Draagkracht KNC voor UGT-GRF belasting BM1 in positie V. Kracht-vervorming plot (recht) en evaluatie van toegestane belasting met kruin als referentie punt (onder)



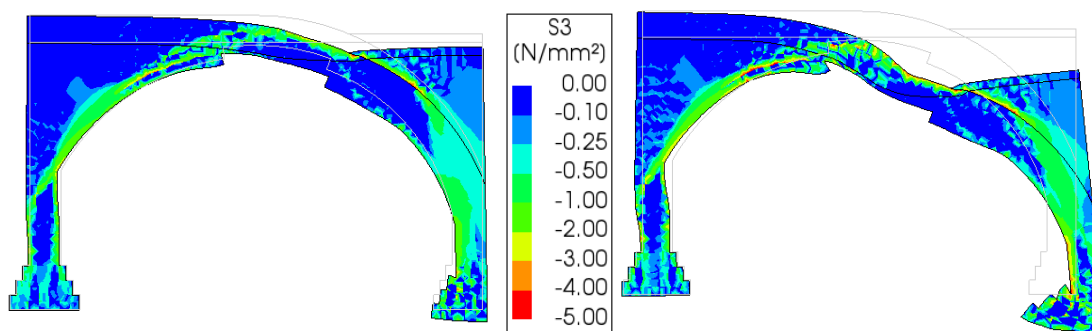
Afbeelding 6.12 Verticale (fictieve) vervorming, voor UGT-GRF met BM1 belasting en belastingpositie V. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot)



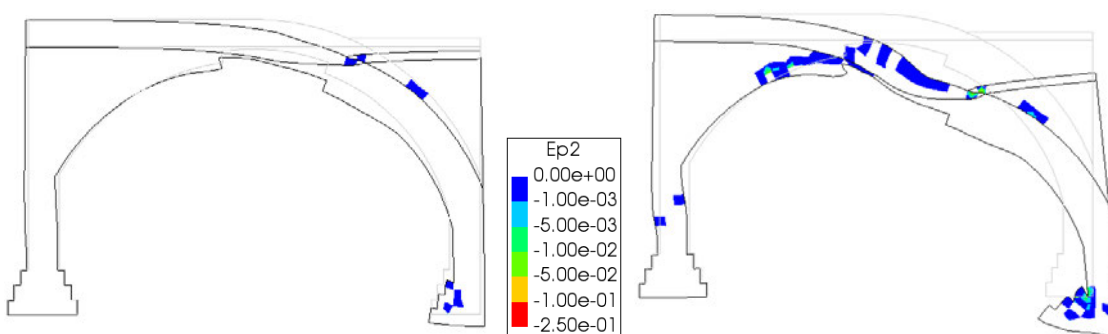
Afbeelding 6.13 Scheurbreedte in de hoofdrichting, voor UGT-GRF met BM1 belasting en belastingpositie V. Punt A (links) en Punt B (rechts). Scharnieren zijn met cirkels aangegeven.



Afbeelding 6.14 Hoofddrukspanning, voor UGT-GRF met BM1 belasting en belastingpositie V. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot)



Afbeelding 6.15 Plastische stuik, voor UGT-GRF met BM1 belasting en belastingpositie V. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot)



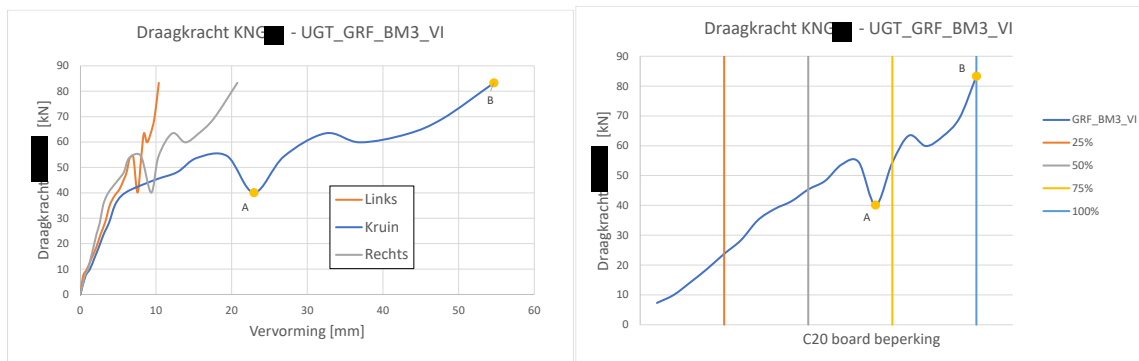
6.4.2 GRF-BM3

De draagkracht wordt berekend voor de maatgevende belastingpositie VI. De draagkracht-vervorming plot wordt getoond in afbeelding 6.16 (links). Bij dit type belastingpositie, waar de zwaar achteras (met 2,42 belastingfactor) in het midden van de KNG-boog geplaatst is, het mechanisme geconcentreerd bij het kruin is. De meeste verticale vervorming treedt op bij deze gebied. De rechtse landhoofd draait naar binnen terwijl het linker landhoofd naar buiten beweegt. Na een eerste lineaire vertakking een vermindering van ongeveer 26 % wordt gevonden in de kracht-verplaatsingsgrafiek (punt A, afbeelding 6.16). Op dit punt laat de schadefoto (afbeelding 6.18, links) in principe geen schade zien. In de tweede vertakking evolueren de mechanismen bestaande uit vorming van een enkel plastische scharnier dicht bij de kruin. Na enkele stappen en vóór de piekkracht wordt aan de rechterkant van de kruin een tweede plastic scharnier waargenomen. De draagkracht stijgt tot bijna 90 kN (punt B in de plot). Op dit punt wordt de compressie nog steeds overgedragen langs de boog en zijn de plastic scharnieren niet voldoende om een bezwijkmechanisme te genereren. Voor beide punten in de curve (A en B) worden contourgrafieken van verplaatsing, scheurbreedte en druk plastische rek getoond in afbeelding 6.17, afbeelding 6.18 en afbeelding 6.20. De kelder kan de 100 % van de belasting van de ladderwagen dragen, dus is de toets van de UGT-GRF-BM3 voldoet.

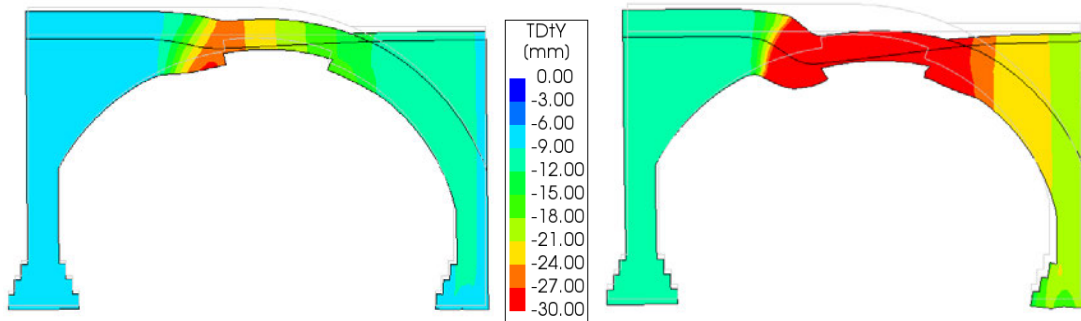
Het overzicht van andere belastingposities van de UGT-GRF BM3-resultaten wordt gegeven in II.

Het convergentiegedrag van UGT-GRF-BM3 berekeningen is acceptabel. De norm voor onbalanskracht nooit hoger is dan 20 %.

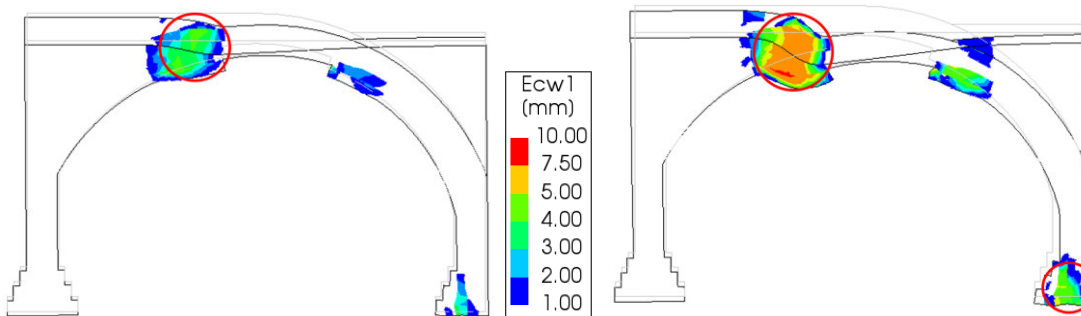
Afbeelding 6.16 Draagkracht KNC voor UGT-GRF belasting BM3 in positie VI. Draagkracht-vervorming plot (links) en evaluatie van toegestane belasting met kruin als referentie punt (rechts)



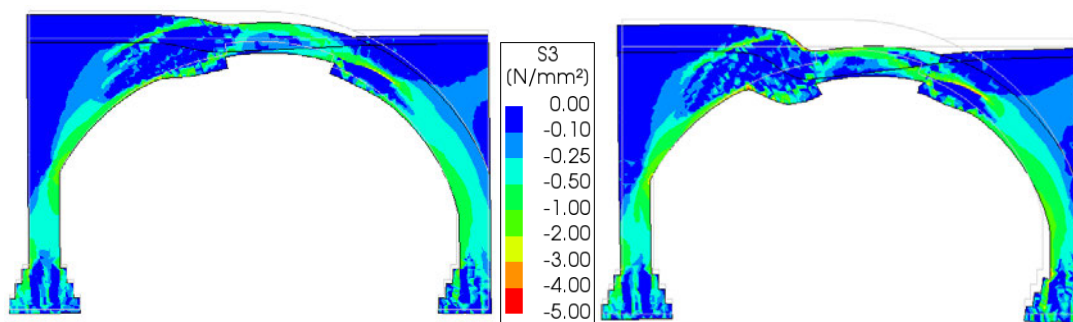
Afbeelding 6.17 Verticale (fictieve) vervorming, voor UGT-GRF met BM3 belasting en belastingpositie VI. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot)



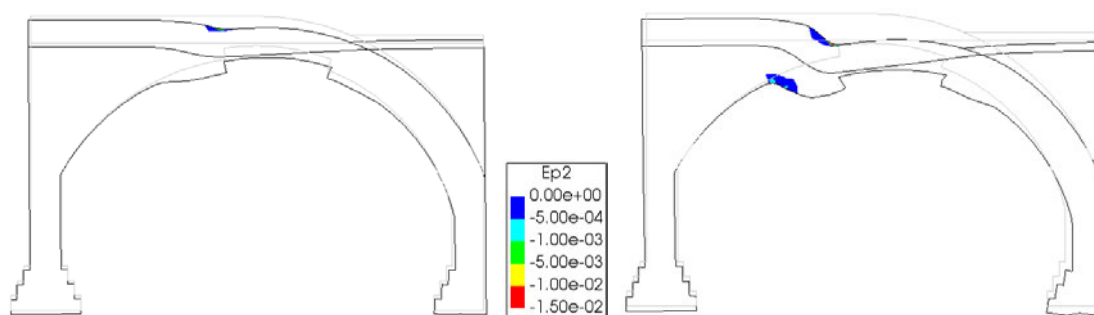
Afbeelding 6.18 Scheurbreedte in de hoofdrichting, voor UGT-GRF met BM3 belasting en belastingpositie VI. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot). Scharnieren met rondjes intekenen.



Afbeelding 6.19 Hoofddrukspanning, voor UGT-GRF met BM3 belasting en belastingpositie VI. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot)



Afbeelding 6.20 Druk plastische rek, voor UGT-PF met BM3 belasting en belastingpositie VI, punt B. Vervorming geamplificeerd 20 keer



6.4.3 PF-BM1

Hoewel de GRF-methode wordt gebruikt als primaire verificatieprocedure voor de kelder, wordt de PF-methode gebruikt als ondersteunende beoordelingsprocedure om te bekijken of ondanks de verschillende toewijzing van veiligheidsfactoren een vergelijkbaar antwoord (in termen van maximale draagkracht en bezwijkmechanismen) wordt gevonden. De resultaten van de PF-analyses van de kelder onderworpen aan BM1-verkeersbelasting worden hier beschreven.

De resultaten in termen van vervorming, maximale drukspanning en scheurbreedte geëvalueerd in de KNG kelder (linkerboog) worden weergegeven in tabel 6.9, tabel 6.10 en tabel 6.11, respectievelijk. Wanneer de belasting volgens de C20 3 ton bord wordt toegepast, bereikt de maximale vervorming een waarde van ongeveer 21 mm voor positie V (meest maatgevend). Voor bijna alle belasting posities wordt de maximale druksterkte in de boog lokaal bereikt. Dit leidt dan ook niet tot bezwijken van de constructie. De evaluatie van de stabiliteit en de draagkracht van de boog volgt dezelfde procedure als de GRF methode.

Tabel 6.9 Maximale (fictieve) vervorming [mm] - ter informatie/geen criterium

Belastingpositie	Bord C20 3 ton
I	12.15
II	14.26
III	15.91
IV	14.75
V	21.08
VI	12.74
VII	8.83
IX	5.90

Tabel 6.10 Maximale drukspanning [MPa]. Maximum druksterkte 2,27 MPa - ter informatie/geen criterium

Belastingpositie	Bord C20 3 ton
I	-2.27
II	-2.27
III	-2.27
IV	-2.27
V	-2.27
VI	-2.27
VII	-2.04
IX	-1.83

Tabel 6.11 Maximale scheurbreedte [mm] - ter informatie/geen criterium

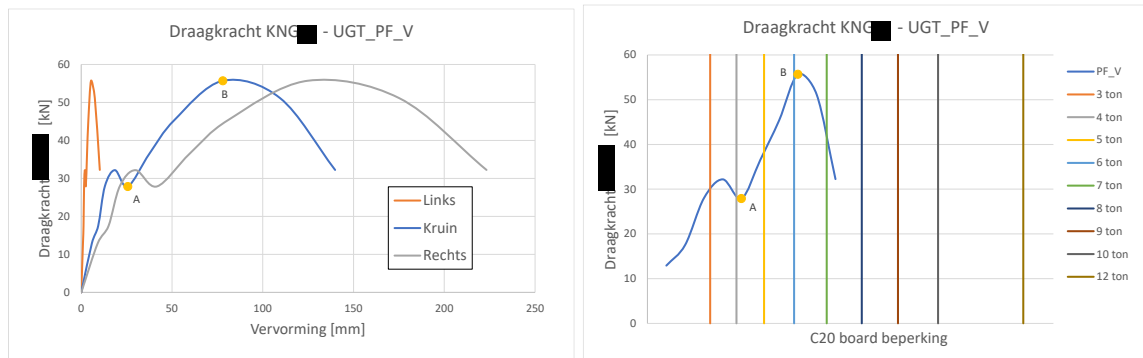
Belastingpositie	Bord C20 3 ton
I	4.0
II	7.2
III	6.0
IV	5.2
V	7.5
VI	7.3
VII	3.6
IX	2.3

De kracht-vervorming plot van belasting positie V wordt getoond in afbeelding 6.21 (links). Bij dit type belastingpositie zakt het linker landhoofd niet veel. De meeste verticale vervorming treedt op bij kruin en rechts landhoofd. Na een eerste lineaire vertakking vormt zich de eerste plastic scharnier (punt A in de plot) dicht bij de kruin. In de tweede vertakking evolueren de mechanismen tot het bereiken van de piekcapaciteit (ongeveer 55 kN, punt B in de plot). Voor dit twee punten in de curve worden contourgrafieken van

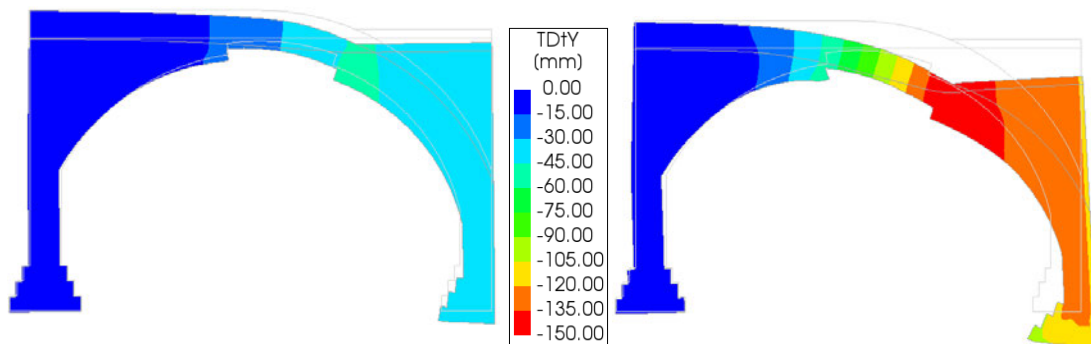
verplaatsing, scheurbreedte en druk plastische rek getoond in afbeelding 6.22, afbeelding 6.23 en afbeelding 6.24. De capaciteitscurve van de boog wordt ook uitgezet tegen de toegepaste belasting van het C20 bord (afbeelding 6.21, rechts). Zoals beschreven door de plot de draagkracht van de kelder optreedt direct na het aanbrengen van de belasting beschreven door C20 6 ton. Dit kan worden beschouwd als de ultieme capaciteit voor de UGT-PF-analyse. Na dit punt wordt een krachtreductie van ongeveer 42 % gevonden, wat kan worden aangenomen als bezwijken van de kelder.

Het convergentiegedrag van UGT-PF-BM1 berekeningen is acceptabel. De norm voor onbalanskracht nooit hoger is dan 30 %.

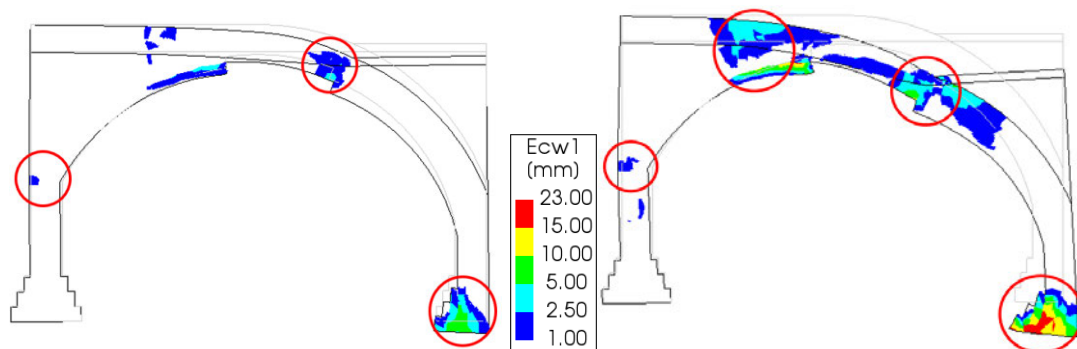
Afbeelding 6.21 Draagkracht KNC [kN] voor UGT-PF belasting BM1 in positie V. Kracht-ervorming plot (links) en evaluatie van toegestane belasting met kruin als referentie punt (rechts)



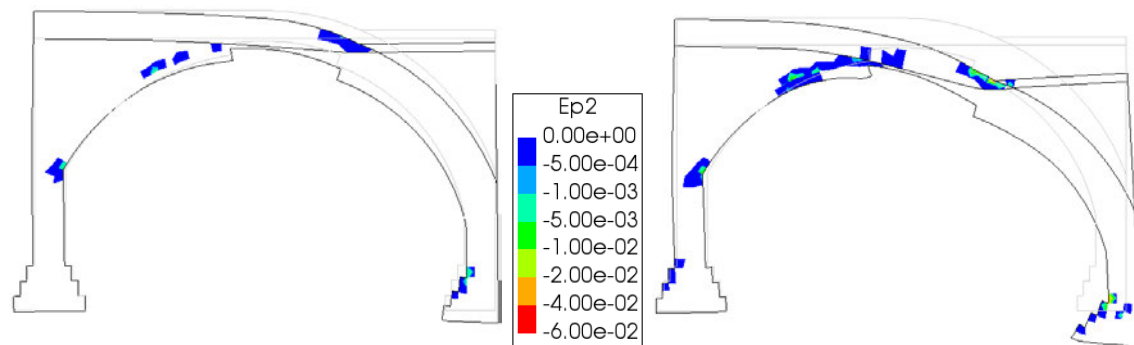
Afbeelding 6.22 Verticale (fictieve) vervorming, voor UGT-PF met BM1 belasting en belastingpositie V. Punt A (links) en Punt B (rechts)



Afbeelding 6.23 Scheurbreedte in de hoofdrichting, voor UGT-PF met BM1 belasting en belastingpositie V. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot). Scharnieren met rondjes intekenen



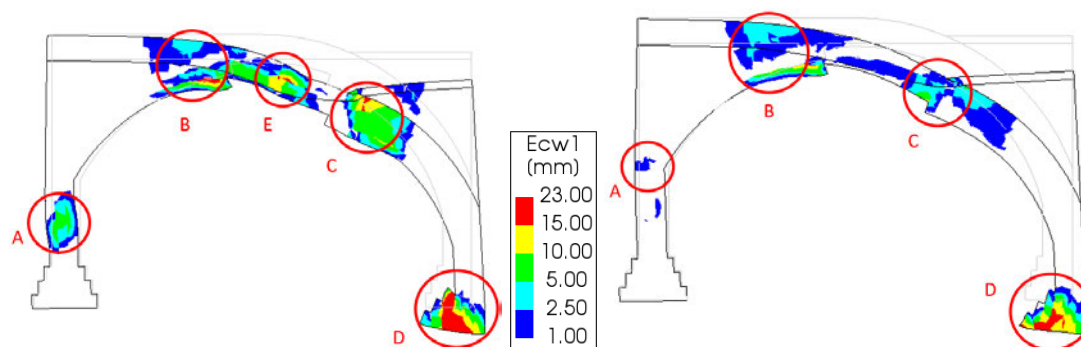
Afbeelding 6.24 Plastische drukrek, voor UGT-PF met BM1 belasting en belastingpositie V. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot)



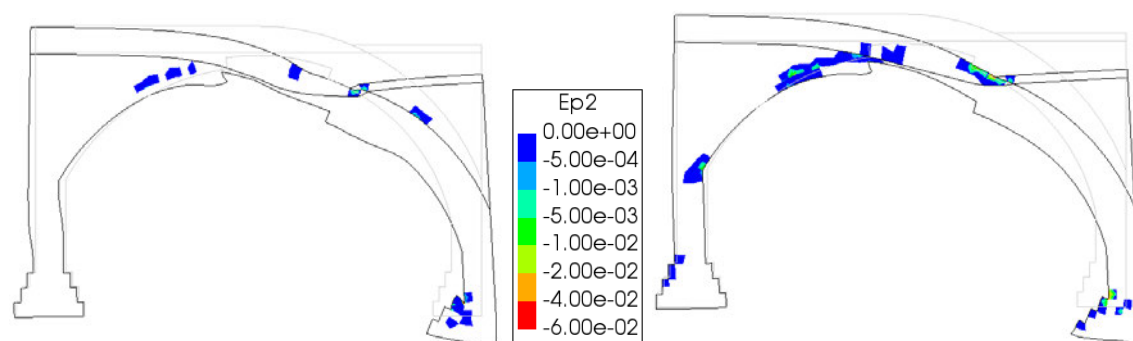
Ten opzichte van de GRF-methode vertoont de PF-methode een enigszins lagere draagkracht. De maximaal toegestane belasting volgens de PF methode bedraagt 6 ton versus 7 ton voor de GRF-methode. Het mechanisme is voor de GRF- en PF-methode voor een BM1-belasting van 6 ton vergelijkbaar en wordt weergegeven in afbeelding 6.25 en afbeelding 6.26. Vier plastische scharnieren bevinden zich aan het linker landhoofd (A), aan de bovenkant van de boog op ongeveer L/4 vanaf de kruin (B en C) en aan de basis van het rechter landhoofd (D). De PF-analyse toont meer een buiggedrag van het linker landhoofd (locatie A), met een combinatie van trek aan de buitenkant en druk aan de binnenkant. De GRF-analyse laat een meer op afschuiving gebaseerd bezwijken zien. Scheuren op locatie B, C en D zijn vergelijkbaar. De zwaardere BM1-belasting van de GRF-belasting vertoont grotere scheuren aan de kruin (locatie E).

Concluderend geeft de PF-methode een goed overzicht van de gevoeligheid van de druksterkte parameter en de belasting factor. Ten opzichte van de GRF-methode maakt de PF-methode een klein verschil in het bezwijkmechanisme en levert het een iets kleinere draagkracht op (6 ton tegen 7 ton).

Afbeelding 6.25 Scheurbreedte in de hoofdrichting, voor BM1 belasting 6 ton en belastingpositie V. UGT-GRF (links) en UGT-PF (rechts) analyse. Scharnieren met rondjes intekenen



Afbeelding 6.26 Plastische drukrek, voor BM1 belasting 6 ton en belastingpositie V. UGT-GRF (links) en UGT-PF (rechts) analyse



6.4.4 PF-BM3

De resultaten in termen van vervorming, maximale drukspanning en scheurbreedte geëvalueerd in de KNC XXXX kelder voor de negen belastingpositie van BM3 worden weergegeven in tabel 6.12.

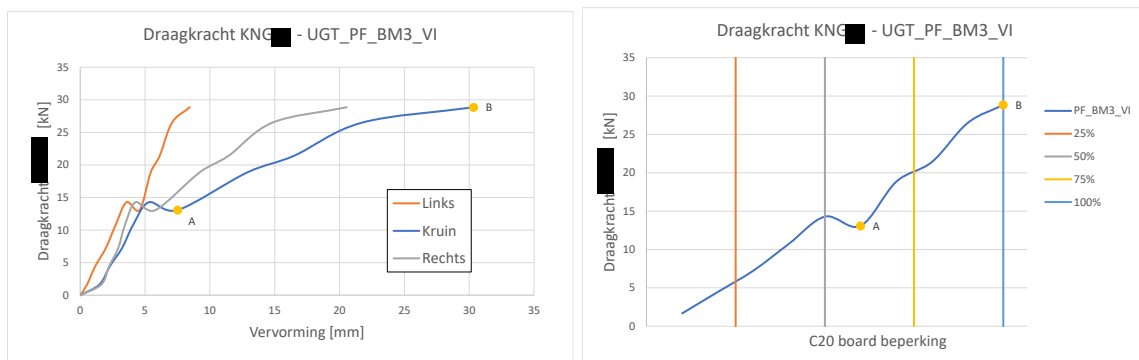
De draagkracht wordt berekend voor de maatgevende belastingpositie VI. De draagkracht-vervorming plot wordt getoond in afbeelding 6.27 (links). Bij dit type belastingpositie, waar de zwaar achteras in het midden van de KNC XXXX boog geplaatst is, zakt het linker landhoofd niet veel. De meeste verticale vervorming treedt op bij kruin. De rechtse landhoofd draait naar binnen. Na een eerste lineaire vertakking vormt zich een klein plateau (afbeelding 6.27) dat de start van het mechanisme beschrijft. In de tweede vertakking evolueren de mechanismen bestaande uit vorming van een enkel plastische scharnier dicht bij de kruin. De kelder kan bij elke stap de belasting dragen en de curve groeit gestaag tot een piek van ongeveer 29 kN (punt B in de plot). Voor dit twee punten in de curve worden contourgrafieken van verplaatsing, scheurbreedte en druk plastische rek getoond in afbeelding 6.28, afbeelding 6.29 en afbeelding 6.30. Zoals beschreven in de plot, ontwikkelt het keldermechanisme drie plastische scharnieren die nog geen bezwijkmechanisme vormen. De kelder kan de PF-BM3 belasting dragen.

Het convergentiegedrag van UGT-PF-BM3 berekeningen is acceptabel. De norm voor onbalanskracht nooit hoger is dan 35 %.

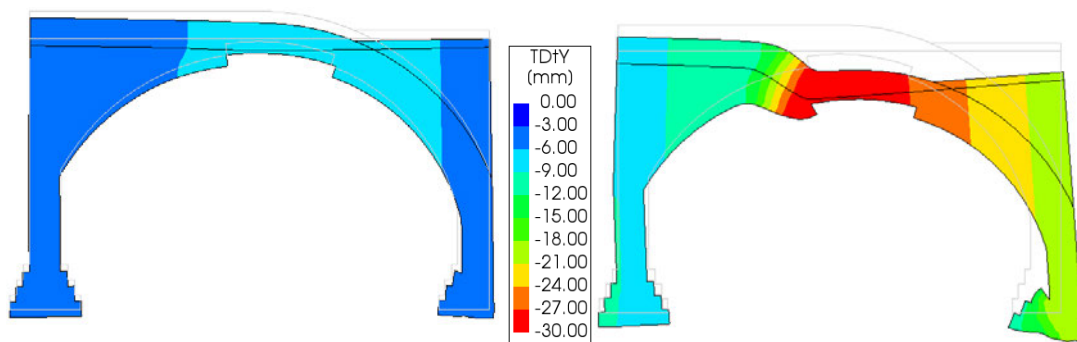
Tabel 6.12 Maximale vervorming [mm], drukspanning [MPa] en scheurbreedte [mm]. Maximum druksterkte 2,27 MPa - ter informatie/geen criterium

Belastingpositie	Vervorming [mm]	Drukspanning [MPa]	Scheurbreedte [mm]
I	15.05	-2.27	5.3
II	18.21	-2.27	5.5
III	12.25	-2.27	6.3
IV	12.55	-2.27	5.4
V	20.48	-2.27	16.4
VI	23.47	-2.27	12.7
VII	20.37	-2.27	7.3
VIII	8.76	-2.27	3.7
IX	6.94	-2.04	3.2

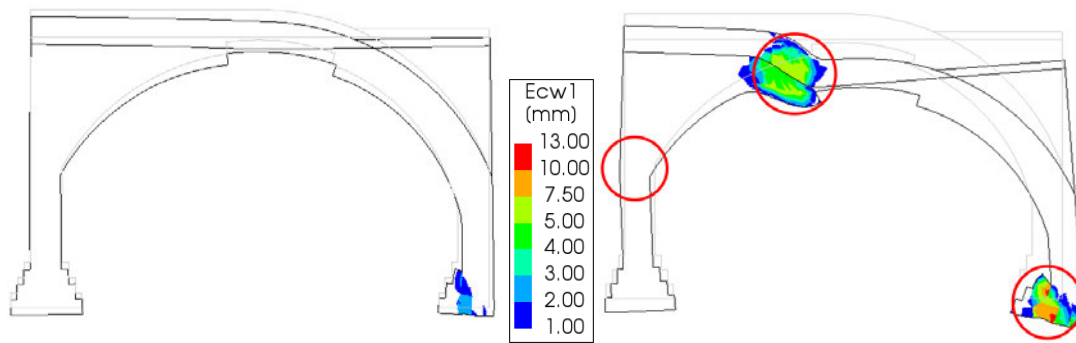
Afbeelding 6.27 Draagkracht KNC voor UGT-PF belasting BM3 in positie VI. Draagkracht-vervorming plot (links) en evaluatie van toegestane belasting met kruin als referentie punt (rechts)



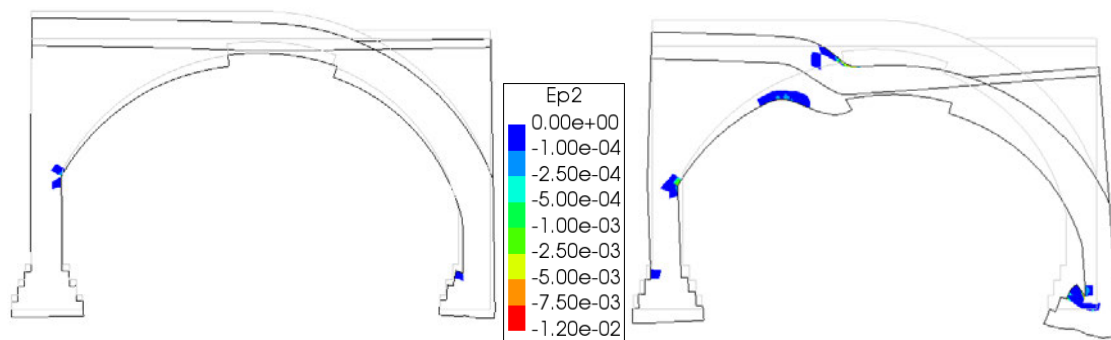
Afbeelding 6.28 Verticale (fictieve) vervorming, voor UGT-PF met BM3 belasting en belastingpositie VI. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot). Vervorming geamplificeerd 15 keer



Afbeelding 6.29 Scheurbreedte in de hoofdrichting, voor UGT-PF met BM3 belasting en belastingpositie V. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot)



Afbeelding 6.30 Plastische drukrek, voor UGT-PF met BM3 belasting en belastingpositie VI. Punt A (linker plot) en Punt B (rechts plot). Vervorming geamplificeerd 15 keer



Wat betreft de vergelijking van de BM1-belasting worden ook kleine verschillen gevonden bij het vergelijken van het gedrag van de kelder tussen GRF- en PF-methode voor de BM3-belasting. De lagere druksterkte wordt gecompenseerd door de lagere belastingfactor. De belangrijkste mechanismen en maximale verplaatsing van GRF- en PF-methode liggen in hetzelfde bereik. Aan de linker landhoofd wordt de druksterkte overschreden, waardoor een extra plastische scharnier ontstaat. Dit is in ieder geval niet genoeg om een bezwijkmechanisme te genereren, waarmee de constructie ook volgens de PF-methode voldoet aan belastinggeval BM3.

CONCLUSIE

De constructieve veiligheid van het object KNC█ wordt beoordeeld door berekening van uiterste grenstoestand (afgekort met UGT) op basis van GRF en PF methode en bruikbaarheidsgrenstoestanden (afgekort met BGT) condities voor de evaluatie van het draagvermogen. Twee belastingmodellen worden getoetst, BM1 en BM3.

Op basis van deze verificatieberekeningen is geconcludeerd dat:

- BGT: voor alle belastingposities met een C20 bord belasting (BM1) van **3 ton** is de maximale vervorming met 6,8 mm onder de maximaal toelaatbare vervorming van 12,6 mm. Het schade niveau 2 (afgekort met DL2) van Damage State 1 (DS1-DL2) met een beperking van de schadeparameter ψ van 2.4 is voor dezelfde belasting (BM1 C20 3 ton) niet overschreden. Dit betekent dat fijne scheuren ontstaan, maar de schade is nog steeds binnen de BGT-grenzen (Damage state 1). Ten aanzien van de BGT toets wordt voor een belasting van 3 ton (C20 bord) derhalve aan alle gestelde eisen voldaan. De ladderwagen onder de BM3-belasting voldoet ook aan de eisen qua verplaatsing en beschadiging (DS1-DL2) voor alle belastingposities;
- UGT: volgens de GRF berekeningen, wordt een C20-belasting van **7 ton** als uiterste capaciteit van de kelder voor belasting model 1 (BM1) gevonden. Op dit punt wordt is het bezwijkmechanisme volledig doorontwikkeld en vertoont de capaciteitscurve een plotselinge daling. Het opstellen van een ladderwagen voldoet aan de UGT-eisen. In de maatgevende belastingpositie worden twee plastische scharnieren gevormd, waardoor de kelder kan de ladderwagen belasting dragen. Volgens de PF berekeningen bedraagt de uiterste capaciteit voor de belasting model 1 (BM1) 6 ton. Belasting model 3 voldoet volgens de PF methode ook aan de UGT-eisen en bij het toetsen van de ladderwagen belasting wordt eveneens geen bezwijken van de kelder geconstateerd. De gevonden bezwijkmechanismen zijn voor de GRF en PF methoden vergelijkbaar. Op advies van RTD 1016-1:2020 21 worden alleen de resultaten van de GRF-methode gebruikt en wordt een uiterste capaciteit van **7 ton** aangehouden.

In conclusie:

- voor standaard verkeer (volgens C20 bord van BM1) is 3 ton is toegestaan in BGT condities en 7 ton is toegestaan voor de UGT conditie onder BM1;
- het opstellen van een ladderwagen (volgens BM3) boven op de kelder is toegestaan en voldoet aan de eisen van zowel BGT als UGT.

Op basis van de uitgevoerde berekening van de kelder Kromme Nieuwegracht█ kan worden geconcludeerd, dat een aslast voor standaard verkeer tot 3 ton toelaatbaar is. Ook is geconcludeerd dat een ladderwagen op de kelder KNC█ kan staan. Aangetekend dient te worden dat in dezelfde straat mogelijk kelders met een lagere draagkracht liggen. Een verhoging van het verkeer tot een maximale aslast van 3 ton zou mogelijk tot aanvullende scheurvorming kunnen leiden, die gemonitord moet worden. Door een reparatie van het gedegradieerd metselwerk aan de kruin, wordt een positief effect verwacht. Op deze locatie treden scheuren op voor de maatgevende BM1-belastingposities (IV en V). De toename van de boogdikte kan de scheurbreedte, dus schade, verminderen (in BGT-analyses) en de bezwijkcapaciteit verhogen.

REFERENTIES

- [1] Rekenplan - Kluiskeiders Kromme Nieuwegracht ■■■ Witteveen+Bos, 122608/21-001.370, Concept01, 28 januari 2021.
- [2] Rekenplan - Kluiskeiders Kromme Nieuwegracht ■■■ RHDHV, BH3201TPNT2010300901 versie 11 januari 2021.
- [3] Kluiskeiders Utrecht: Kromme Nieuwe-gracht ■■■ en ■■■ Plan van Aanpak 'Onderzoek draagkracht 3 kluiskeiders: KNG ■■■ en ■■■ 2 September 2020.
- [4] Veldrapport betreffende grondonderzoek ten behoeve van project aan de Kromme Nieuwegracht te Utrecht, referentie: HA-011221/141.2002.05, d.d. 9 mei 2014, Hoogveld sonderingen.
- [5] EEM Parameter inschatting, Witteveen+Bos, 122608/21-001.476, 28 januari 2021.
- [6] Metselwerk boogbruggen, Aanpak constructieve beoordeling metselwerk boogbruggen 's-Hertogenbosch, Gemeente 's-Hertogenbosch, 23 Juli 2020.
- [8] KW1116 Welfbrug Nieuwstraat 's-Hertogenbosch, RHDHV, Fase 5: Verificatieberekening. Versie 0.4/Concept, 13 Juli 2020.
- [7] RO CVK 's-Hertogenbosch Deelopdracht 04: Verificatieberekening KW1115 Judasbrug, 29 Oktober 2020.
- [8] Rapport De Prouw BV 'Kromme Nieuwegracht Rak 22 te Utrecht - Inspectie gebreken en risicoafweging buitenring.
- [9] Funderingen langs de grachten, bouwhistorische notitie, Frans Kip, 22-09-2009.
- [10] Application of Kinematic Method and FEM in Analysis of Ultimate Load Bearing Capacity of Damaged Masonry Arch Bridges – Kaminski T., Bien J. (2013).
- [11] DIANA FEA 10.4 Manual. <https://dianafea.com/manuals/d104/Diana.html>.
- [12] DIANA FEA 10.4 Manual. Verification Report, Material Soil Model <https://dianafea.com/manuals/d104/Verify/Verifypa6.html#x77-414000VI>.
- [13] Numerical and experimental investigation of Hydraulic fracturing in kaolin clay. Xu T., Ranjith P.G., Au A.D.K., Wasantha P.L.P., Journal of Petroleum Science and Engineering, August 2015.
- [14] DIANA Validation report for Masonry modelling - Schreppers G.M.A. et al. (2017). DIANA FEA BV and TU Delft.
- [15] Crack Initiation And Propagation In Unreinforced Masonry Specimens Subjected to Repeated In-Plane Loading During Light Damage. P.A. Korswagen, M. Longo, E. Meulman, J.G. Rots (2019). Bulletin of Earthquake Engineering.
- [16] Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips. Foraboschi P. (2004). Journal of composites for construction.
- [17] European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). G. Grünthal (1998). European Seismological Commission, sub commission on Engineering Seismology. Working Group Macroseismic Scales. Conseil de l'Europe, Caheirs du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, vol 15, Luxembourg.
- [18] Modelling of settlement induced building damage. G. Giardina, J.G. Rots, M.A.N. Hendriks (2013). TU Delft, Delft.
- [19] Modelling Deelopdracht 02 -KW1116 Welfbrug Nieuwstraat - Onderzoek Constructieve veiligheid - Fase 2: Vooronderzoek Validatie VK proeven. 15 November 2019.
- [20] Guidelines for Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures. RTD 1016-1:2017, version 2.1 Final, 15 June 2017.
- [21] Guidelines for Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures. RTD 1016-1:2020, version 2.2 Final, 2 April 2020.
- [22] Spoor 2 - Voorlopige Expertbeoordeling, RHDHV, BH3201TPRP2010271409, definitief/3.0, 26 januari 2021.

- [23] Herstel wal- en kluismuren Kromme Nieuwegracht, Bestaande situatie Rak 21-C, Bestek. Stadsingenieurs, Projectnummer 141.2002.05, Tekeningnummer C&B.040-006, 14-07-2017, versie C.
- [24] Damage sensitivity of Groningen masonry structures - experimental and computational studies - Stream 1. P.A. Korswagen, M. Longo, E. Meulman, C. van Hoogdalem (2017). C31B69WP0-12, TU Delft.
- [25] Nadere beschrijving van de opdracht. Ingenieursproducten Bepaling belastbaarheid kelders. W. Akkermans, Gemeente Utrecht.
- [26] Damage sensitivity of Groningen masonry structures - experimental and computational studies - Stream 2, Appendix C. P.A. Korswagen, M. Longo, E. Meulman (2019). C31B69WP0-14-2, TU Delft.

BIJLAGE: MATERIAALPARAMETERS DIANA

De materiaalparameters die in het model worden gebruikt, worden hieronder vermeld.

Grondparameters - Hardening Soil Model

De waarden verwijzen naar de karakteristieke waarden (geen veiligheidsfactoren).

Tabel I.1 Hardening Soil Model parameters in het model gebruikt

HS	Eenheid	Aanvul zand	Klei 1	Klei 2	Verbeterd Zand	Zand 1
E ₅₀	MPa	10,0	1,0	3,0	30,0	23,0
E _{UR}	MPa	40,0	4,0	12,0	120,0	90,0
E _{oed}	MPa	10,0	1,0	3,0	30,0	23,0
u	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
c	MPa	0,0001	0,0001	0,005	0,0001	0,0001
φ	graden	30,0	17,5	22,5	30,0	30,0
ψ	graden	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
q _i /q _a	-	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
m	-	0,5	0,2	0,2	0,5	0,5
p _{ref}	MPa	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
OCR	-	1	1	1	1	1
K _{nc}	-	0,5	0,699	0,617	0,5	0,5
Cut-off	MPa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
γ	kN/m ³	17,0	14,0	18,0	17,0	17,0
n	-	0,36	0,47	0,32	0,36	0,36
K ₀	-	0,5	0,699	0,617	0,5	0,5

Metselwerkparameters - Total Strain Rotating Crack Model

De waarden zijn gebaseerd op het type analyse (BGT, UGT-GRF of UGT-OF). In de tabel wordt rekening gehouden met veiligheidsfactoren. De breukenergie op druk voor GRF en PF analyse wordt berekend met de formule $G_{fc} = 15 + 0.43 \times f_c - 0.0036 \times f_c^2$ uit 14 die is gebaseerd op experimentele test.

Tabel I.1 Total Strain Rotating Crack Model parameters in het model gebruikt

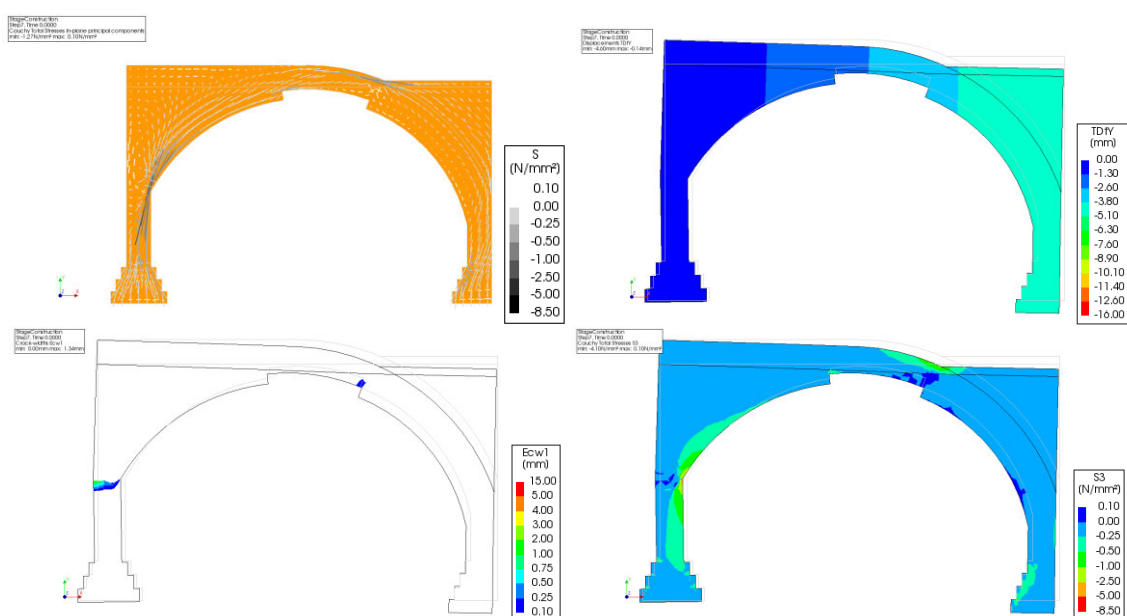
Total Strain Crack Model	Eenheid	BGT	UGT-GRF	UGT-PF
E	MPa	5.000	3.500	3.500
ν	-	0,25	0,25	0,25
γ	kN/m ³	23,0	23,0	23,0
Scheur oriëntatie	-	Rotating	Rotating	Rotating
f_t	MPa	0,10	0,005	0,005
Trekcurve	-	Linear-crack energy	Ideal	Ideal
$G_{ft,I}$	N/m	10,0	-	-
Scheurbandbreedte specificatie	-	Rots	-	-
f_c	MPa	8,5	5,0	2,27
drukcurve	-	Parabolic	Parabolic	Parabolic
G_{fc}	N/m	20.000	17.060	15.958



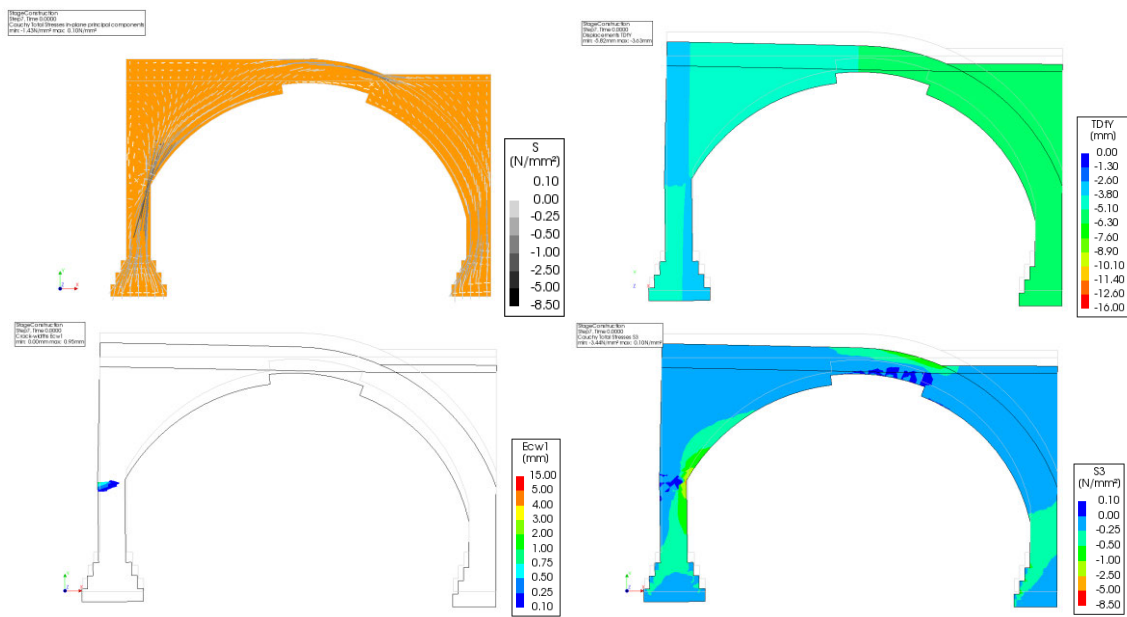
BIJLAGE: BGT EN UGT RESULTATEN

BGT-BM1 - 3 ton

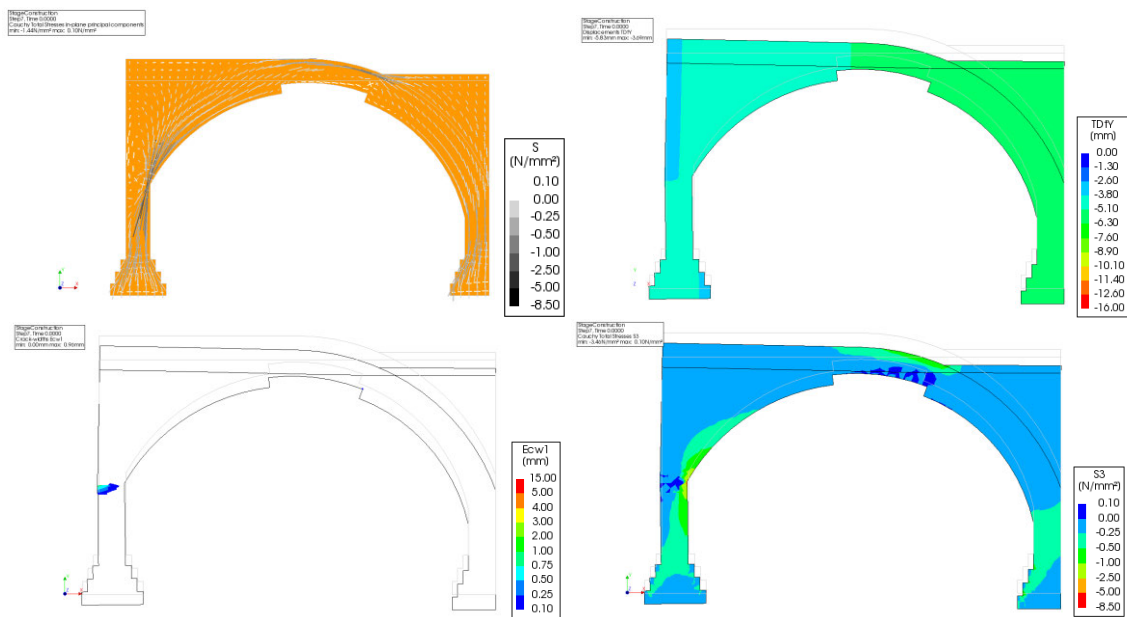
Afbeelding II.1 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met C20 3 ton belasting en belastingpositie I



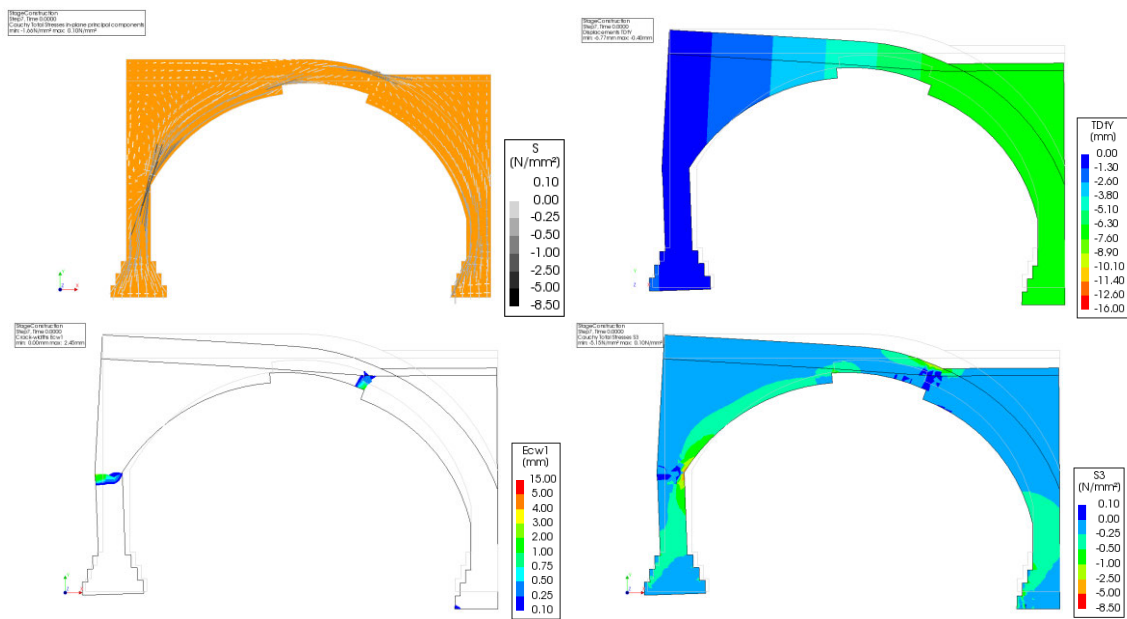
Afbeelding II.2 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met C20 3 ton belasting en belastingpositie II



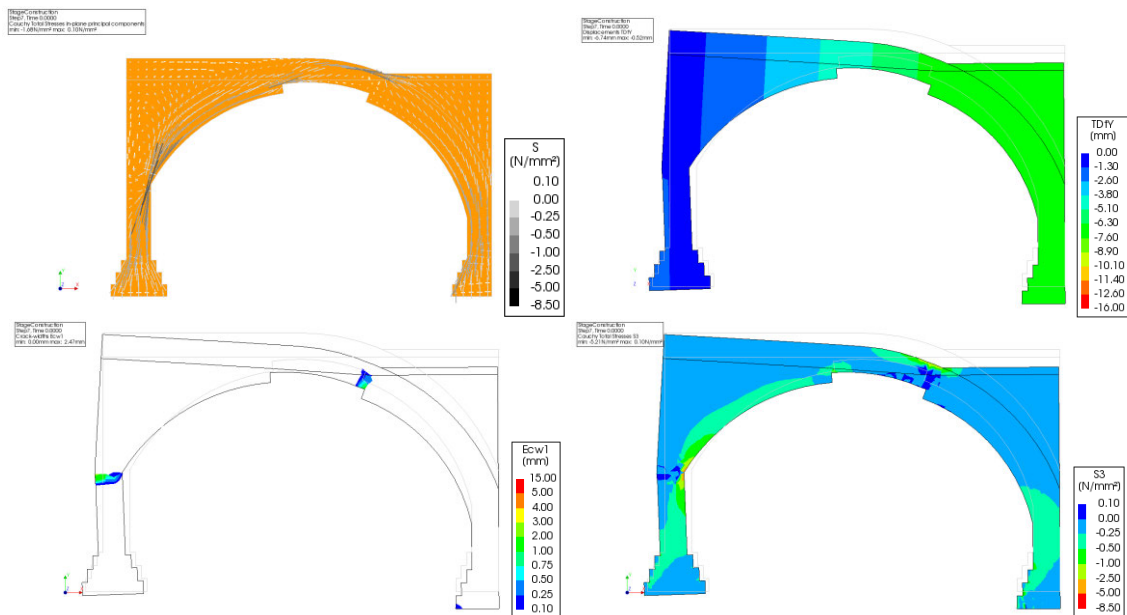
Afbeelding II.3 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met C20 3 ton belasting en belastingpositie III



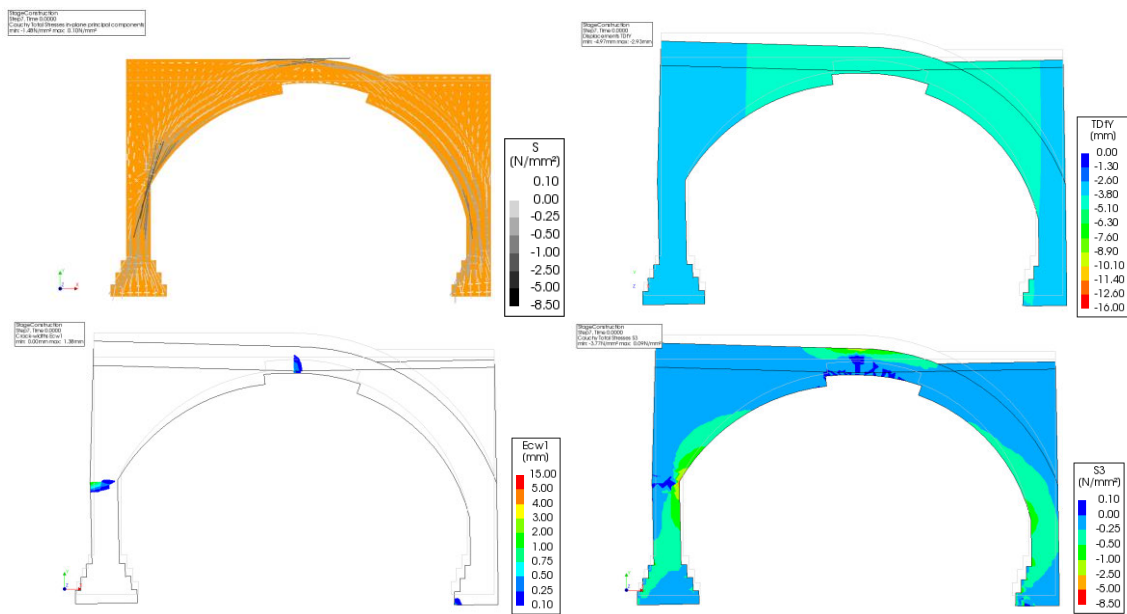
Afbeelding II.4 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met C20 3 ton belasting en belastingpositie IV



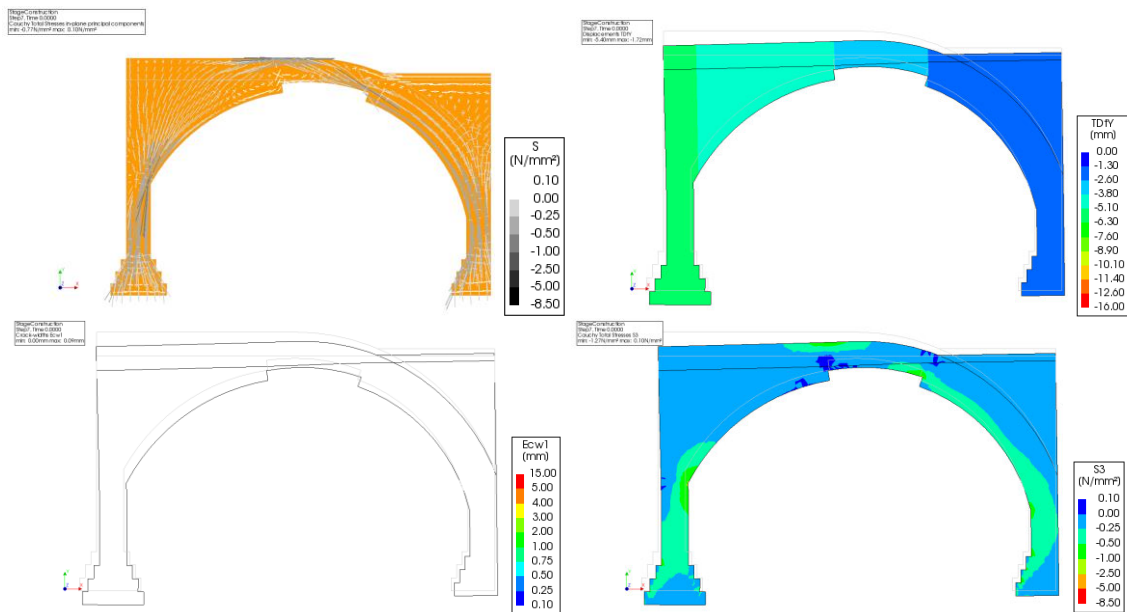
Afbeelding II.5 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met C20 3 ton belasting en belastingpositie V



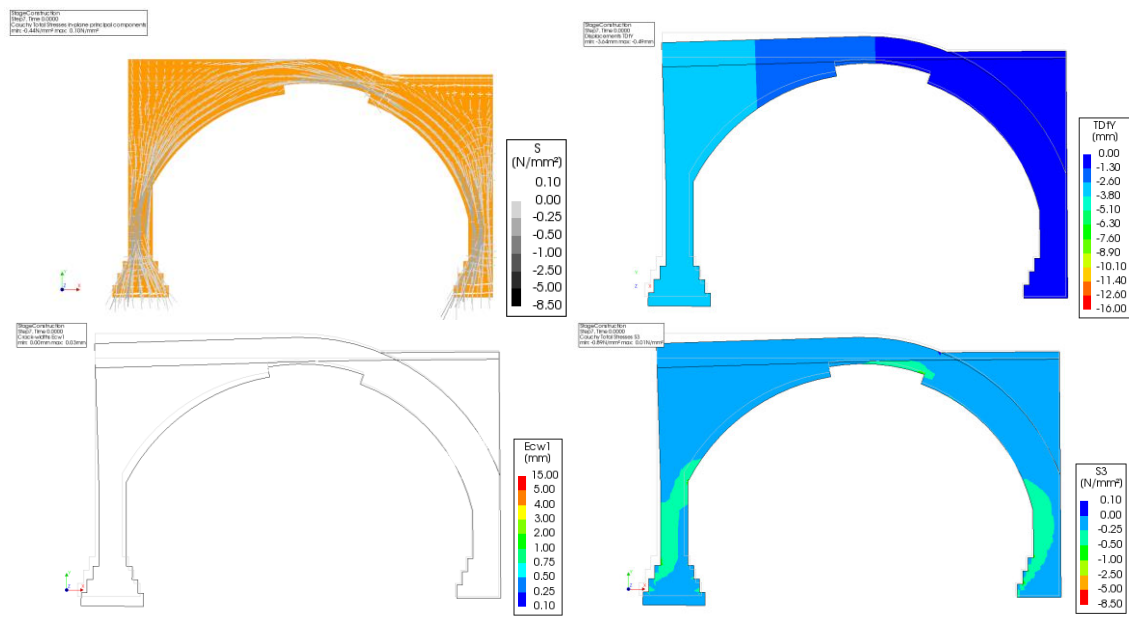
Afbeelding II.6 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met C20 3 ton belasting en belastingpositie VI



Afbeelding II.7 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met C20 3 ton belasting en belastingpositie VII

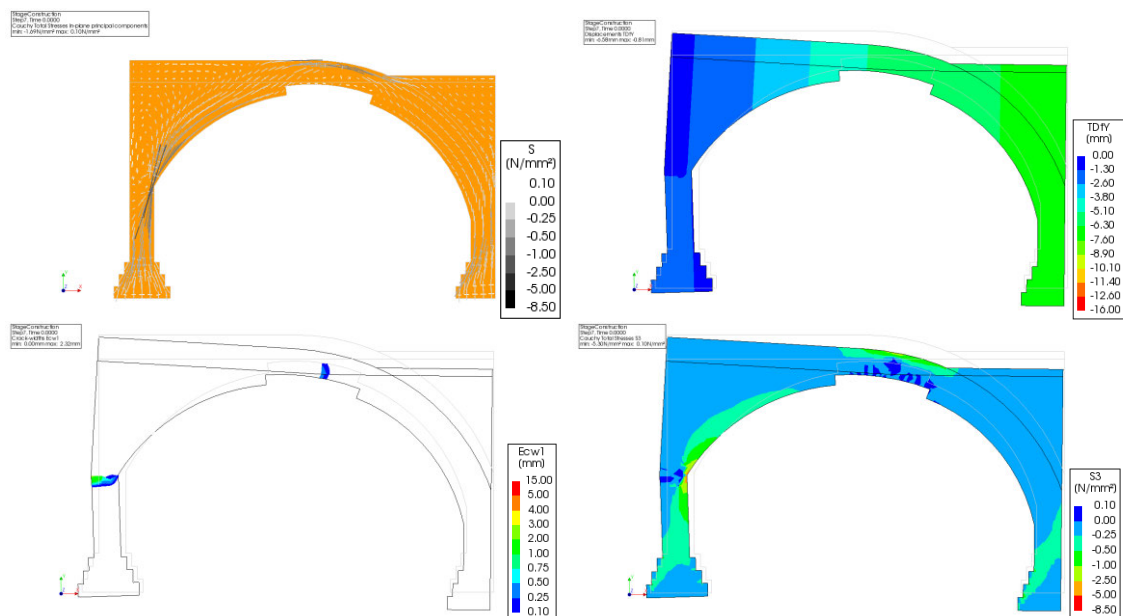


Afbeelding II.8 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met C20 3 ton belasting en belastingpositie IX

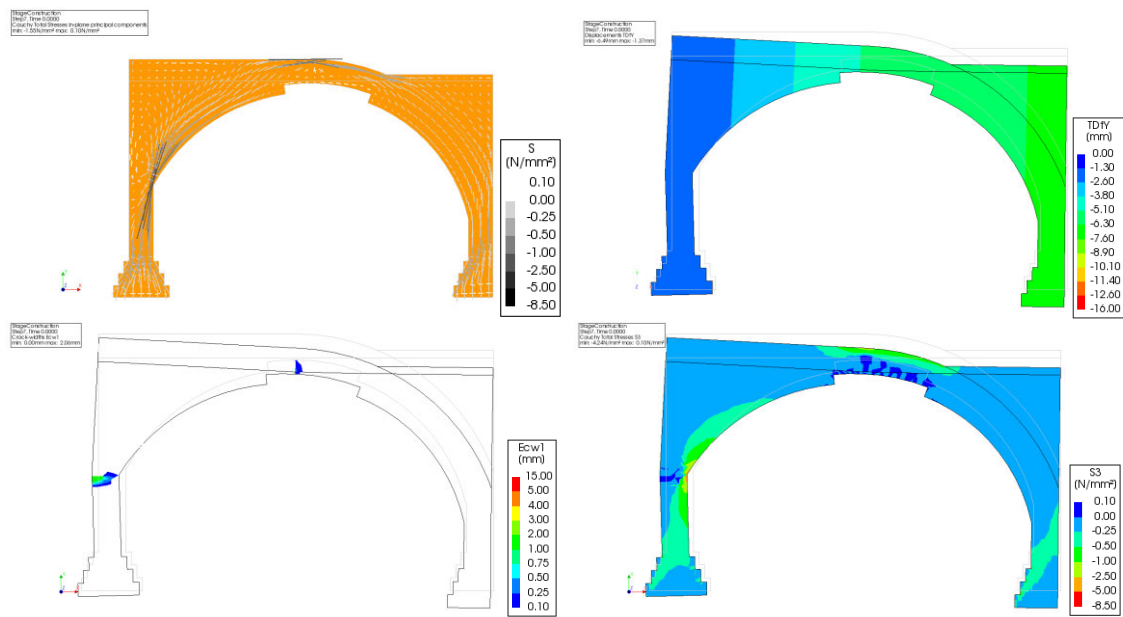


BGT-BM3

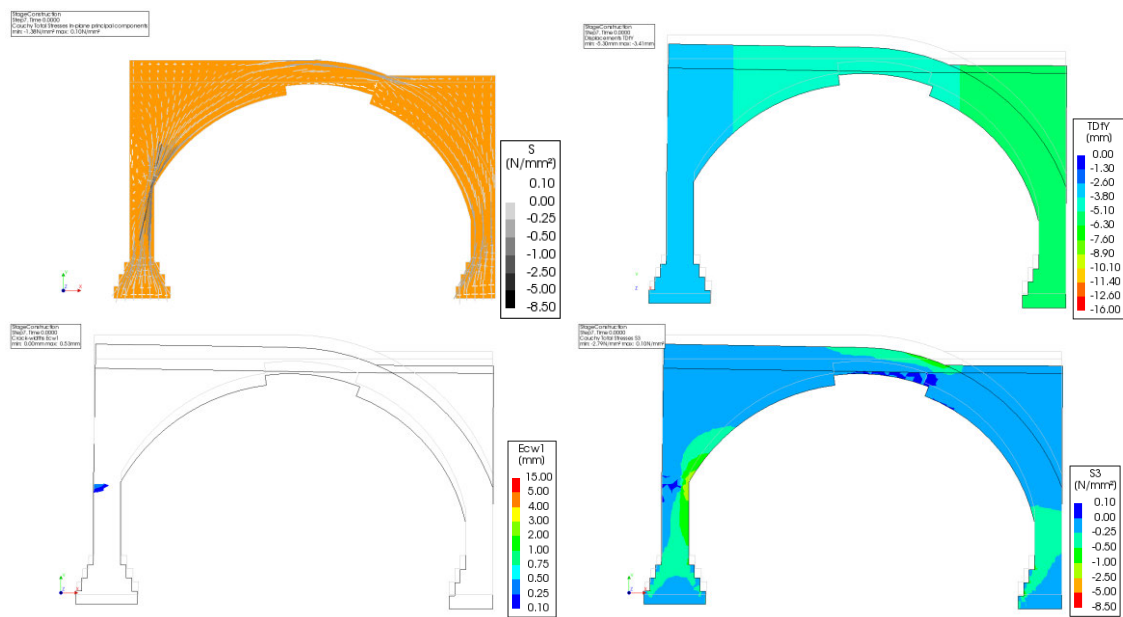
Afbeelding II.9 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie I



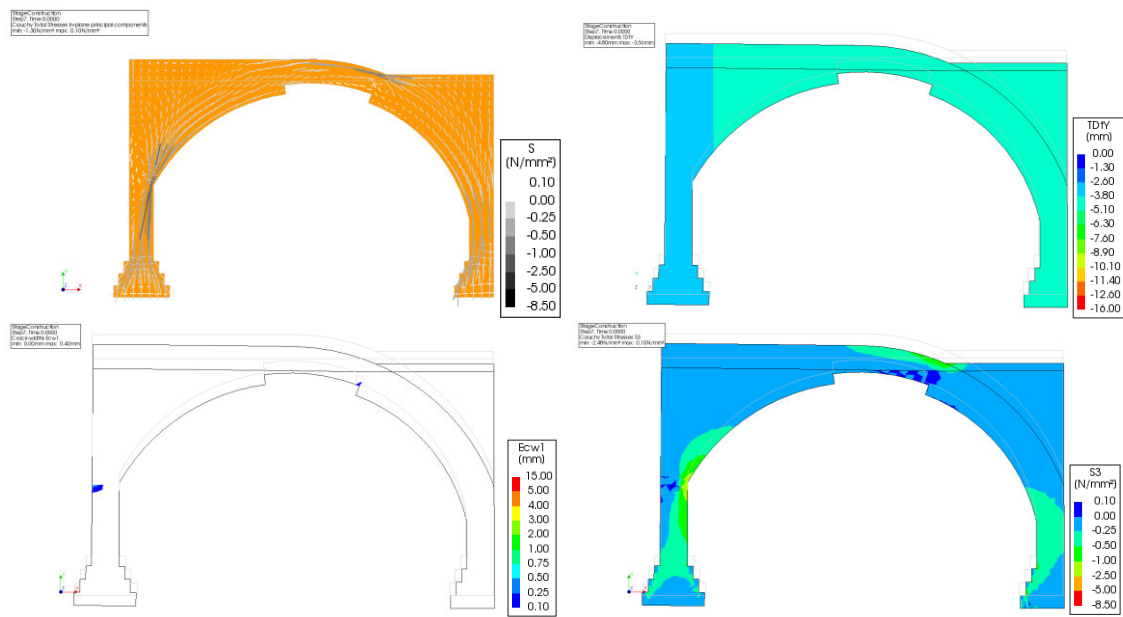
Afbeelding II.10 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie II



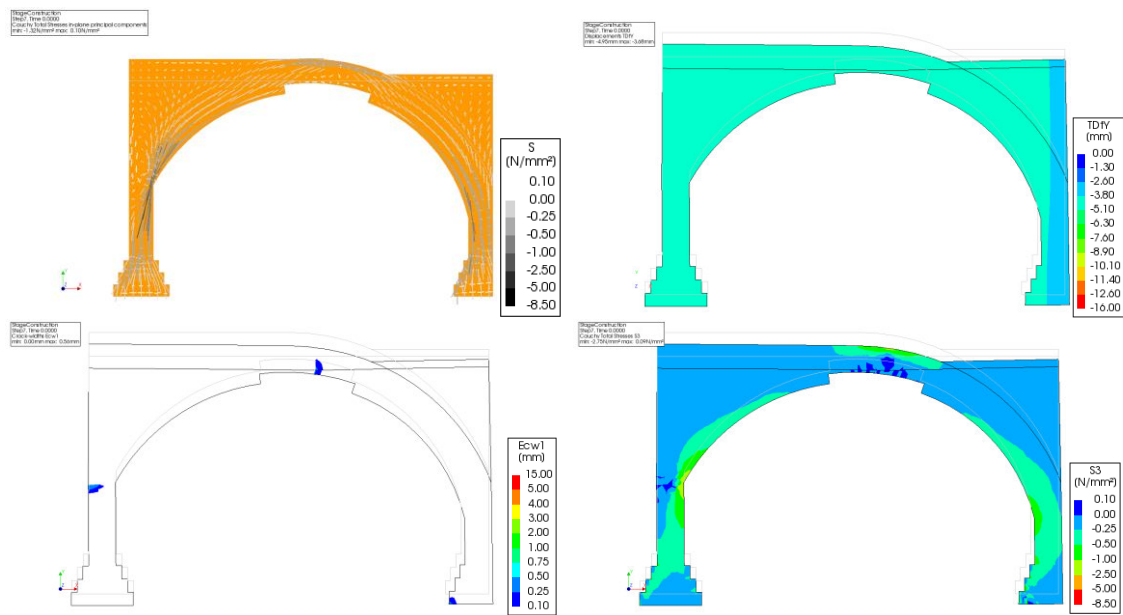
Afbeelding II.11 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie III



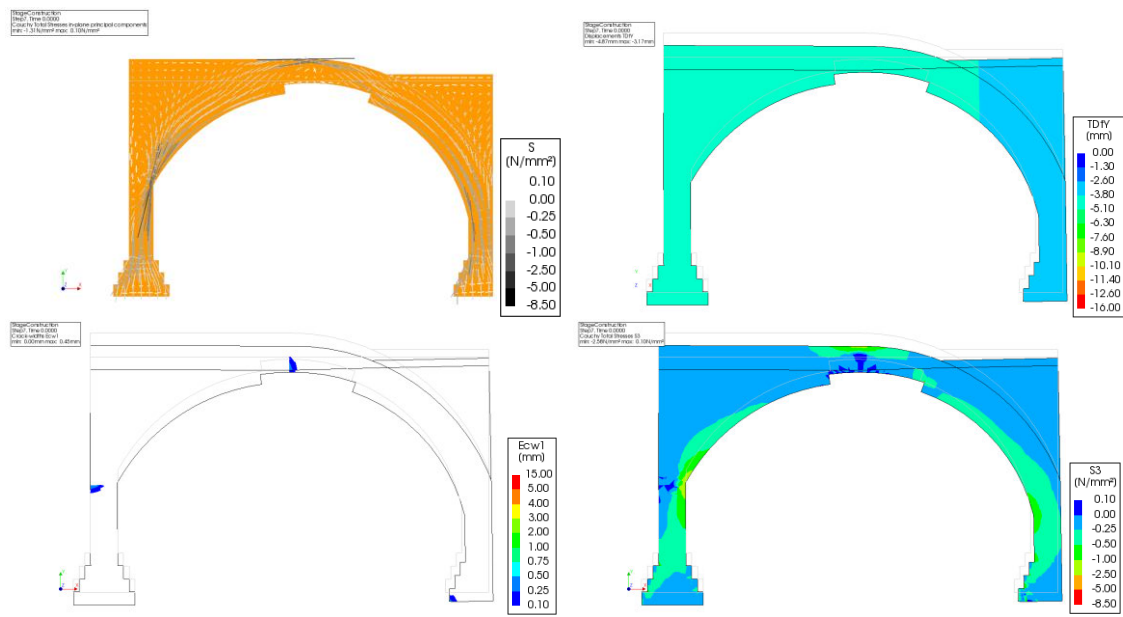
Afbeelding II.12 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie IV



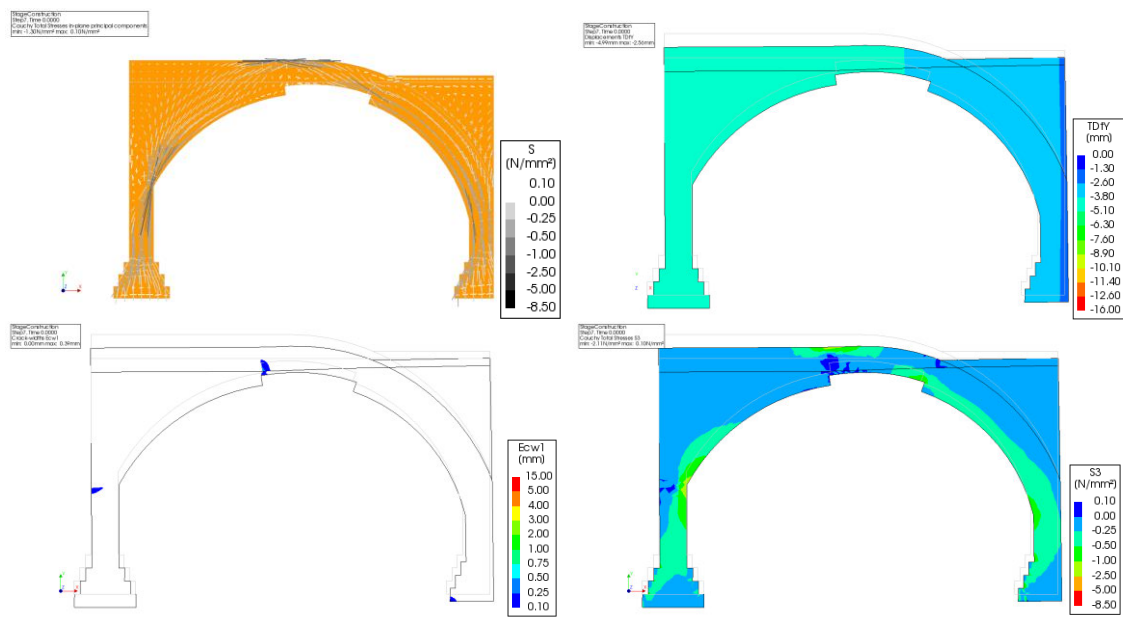
Afbeelding II.13 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie V



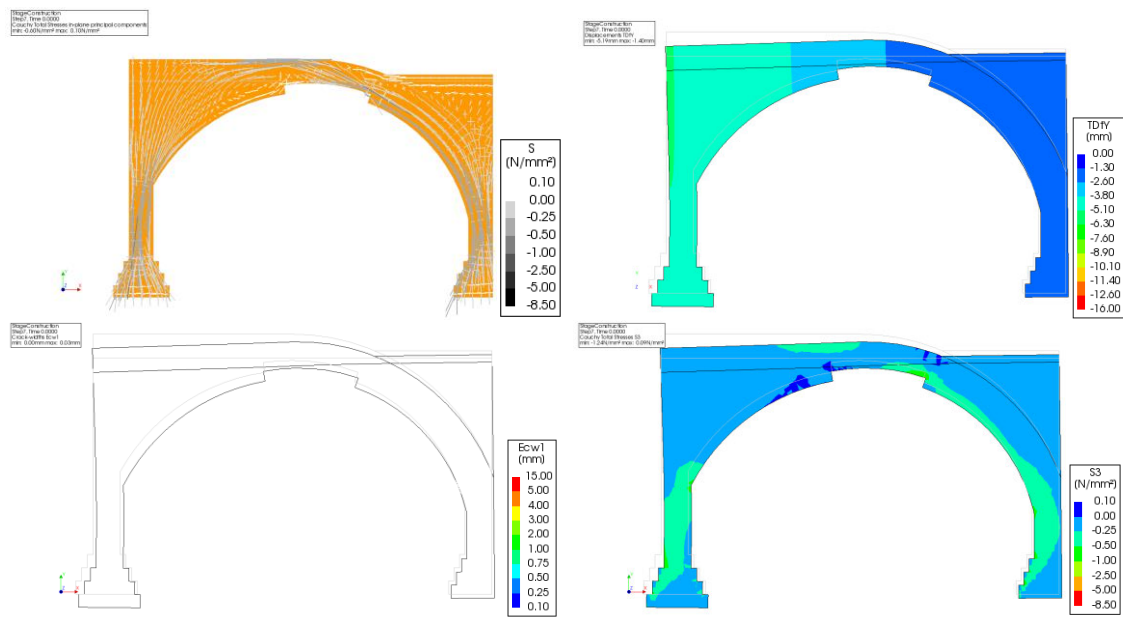
Afbeelding II.14 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie VI



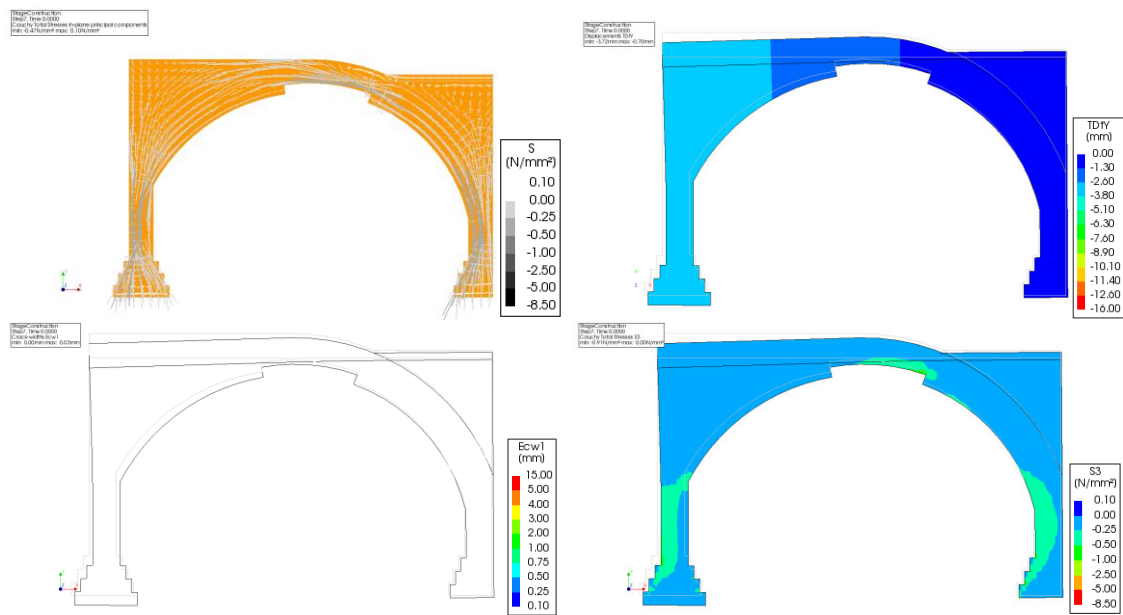
Afbeelding II.15 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie VII



Afbeelding II.16 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie VIII

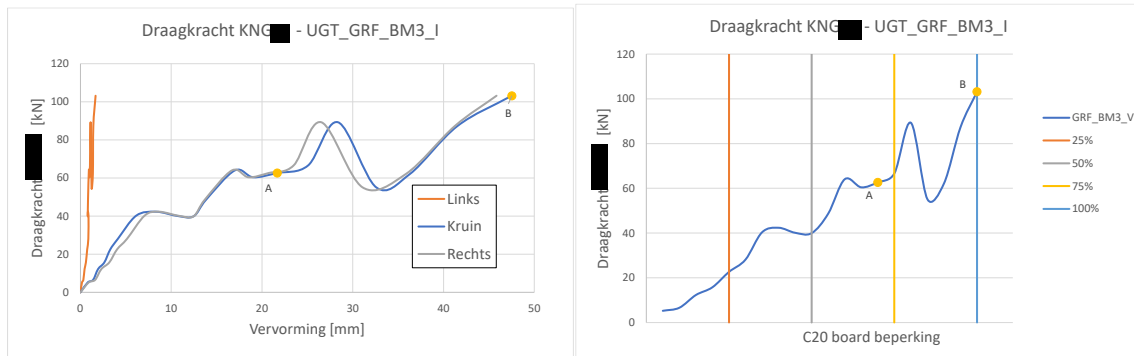


Afbeelding II.17 Hoofddrukspanningsvector, verticale verplaatsing, scheurbreedte in de hoofdrichting en hoofddrukspanning voor scenario met BM3 belasting en belastingpositie IX



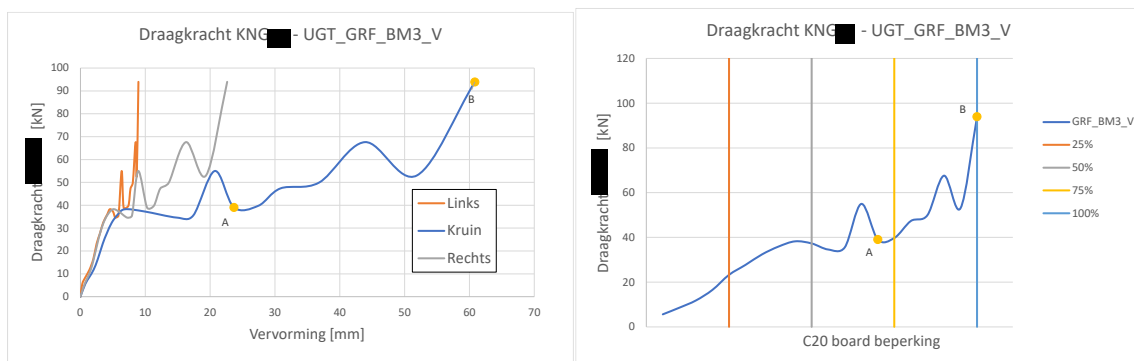
UGT-GRF-BM3 - Belastingpositie I

Afbeelding II.18 Draagkracht KNC [redacted] voor UGT-GRF belasting BM3 in positie I. Draagkracht-vervorming plot (links) en evaluatie van toegestane belasting (rechts)



UGT-GRF-BM3 - Belastingpositie V

Afbeelding II.19 Draagkracht KNC [redacted] voor UGT-GRF belasting BM3 in positie V. Draagkracht-vervorming plot (links) en evaluatie van toegestane belasting (rechts)





BIJLAGE: INSPECTIERAPPORT KROMME NIEUWEGRACHT



Kluiskeepers Utrecht: Kromme Nieuwegracht

Rapportage inspectie en onderzoek KNG 

Gemeente Utrecht

18 januari 2021

Project Kluisvelders Utrecht: Kromme Nieuwegracht ■
Opdrachtgever Gemeente Utrecht

Document Rapportage inspectie en onderzoek KNG ■
Status Definitief
Datum 18 januari 2021
Referentie 122608/21-000.785

Projectcode 122608
Projectleider F.G A. Linthorst
Projectdirecteur ir. W.F. van den Berg

Auteur(s) ■
Gecontroleerd door ■
Goedgekeurd door ■

Paraaf

Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.
Leeuwenbrug 8
Postbus 233
7400 AE Deventer
+31 (0)570 69 79 11
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden vervaelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	5
1.1	Doel van dit document	5
1.2	Doel van de inspecties en onderzoeken	5
1.3	Locatiegegevens	5
1.4	Leeswijzer	6
2	WERKZAAMHEDEN	7
2.1	Vastgestelde werkzaamheden	7
2.2	Scope	7
2.3	Afwijkingen t.o.v. inspectieplan	8
3	RESULTATEN INSPECTIE	9
3.1	Inspectieresultaten	9
4	RESULTATEN ONDERZOEKEN	16
4.1	Uitgevoerde onderzoeken	16
4.2	Graven van de proefsleuf (WK-7)	16
4.3	Inmetingen bovenzijde (WK-7, WK-8 en WK-13)	17
4.4	Inmetingen binnenzijde (WK-14)	18
4.5	Boorkernen (WK-9 en WK-10)	18
	Laatste pagina	20
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Inspectietekeningen	2
II	Inmeting profielen bovenzijde	1

1

INLEIDING

1.1 Doel van dit document

Voorliggend inspectie- en onderzoeksrapportage behoort toe aan de (aangepaste) uitvraag van de gemeente Utrecht (GU) met betrekking tot de aangepaste uitvraag Ingenieursproducten 'Bepaling belastbaarheid kelders' van 5 oktober 2020 opgesteld door de heer [REDACTED]

Het rapport beschrijft de uitkomsten van de uitgevoerde inspecties en onderzoeken aan de kluiskeider aan de Kromme Nieuwegracht [REDACTED] te Utrecht. Als basis voor de werkzaamheden is vooraf een inspectie- en onderzoeksplan opgesteld 'Inspectie- en onderzoeksplan ten behoeve van Onderzoek draagkracht 2 kluiskeiders: KNG [REDACTED] & [REDACTED] ref. 122608/20-017.794 van 23 november 2020. Aan dit document zal verder dit plan als 'REF1' worden gerefereerd.

De werkzaamheden beschreven in deze rapportage zijn gelijktijdig uitgevoerd met die aan de nabijgelegen kluiskeider op nr. [REDACTED]

1.2 Doel van de inspecties en onderzoeken

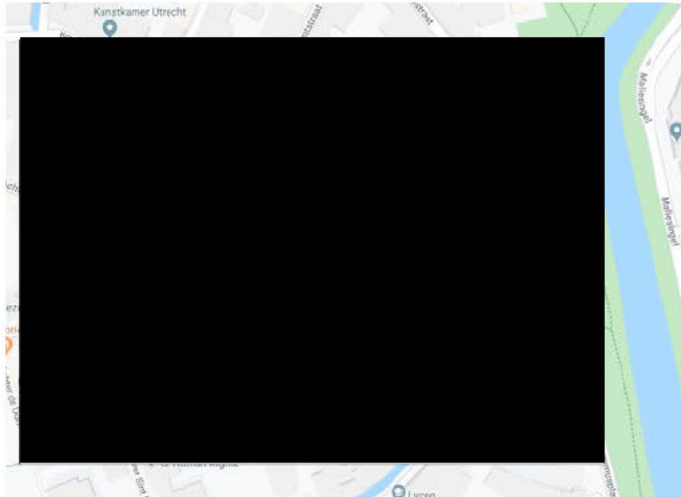
Deze rapportage is opgesteld met als afgeleide doelstelling:

- vastleggen van de inspectieresultaten, specifiek gericht op de constructieve- en onderhoudsstaat;
- het uitvoeren van (non)destructieve onderzoeken en verificaties.

1.3 Locatiegegevens

Het object is gelegen aan de Kromme Nieuwegracht [REDACTED] te Utrecht, zie afbeelding 1.1.

Afbeelding 1.1 Locatie kelder Kromme Nieuwegracht te Utrecht (bron: Google maps)



1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 staan de uitgevoerde werkzaamheden beschreven. Ook de eventuele afwijkingen ten aanzien van het inspectieplan (REF1) staan hier in benoemd.

- in hoofdstuk 3 staan de uitgevoerde inspecties uitgewerkt;
- hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van de diverse onderzoeken, inclusief de uitkomsten en resultaten;
- afsluitend geeft hoofdstuk 5 een samenvatting van alle uitgevoerde inspecties en onderzoeken.

2

WERKZAAMHEDEN

2.1 Vastgestelde werkzaamheden

In het vooraf opgestelde inspectie- en onderzoeksplan (REF1) is de benodigde scope ten behoeve van de in dit rapport uitgewerkte inspecties en onderzoeken beschreven op basis van een bureaustudie van de beschikbare gegevens en foto's van de kelder.

In dit hoofdstuk wordt stapsgewijs doorgenomen welke inspecties en onderzoeken vooraf zijn vastgesteld en hoe hier invulling aan gegeven is. De uitwerking is verder op in deze rapportage uitgebreid beschreven.

2.2 Scope

De inspecties en onderzoeken zoals bepaald in het inspectieplan (REF1) zijn samengevat in tabel 2.1. Hierin staat tevens in welke mate deze onderzoeken zijn uitgevoerd. Kleine wijzigingen in de voorziene inspecties en onderzoeken treden nagenoeg altijd op als gevolg van een verschil tussen de theoretische analyse tijdens de bureaustudie en de feitelijke situatie ter plaatse. Door de inspecteurs van Witteveen+Bos is ter plaatse besloten welke voorziene inspecties ongewijzigd uitgevoerd kunnen worden en welke in aangepaste vorm uit te voeren.

Indien is afgeweken van het onderzoeksplan staat in paragraaf 2.3 aangegeven welke onderzoeken dit betreft en om welke reden(en).

Tabel 2.1 Specificatie benodigde inspecties en onderzoeken KNC

Nr.	Werkzaamheden/actie	Uitgevoerd?	Bijzonderheden t.a.v. uitvoering
WK-1	visuele inspectie BINNENZIJDE	ja	geen
WK-2	visuele inspectie BUITENZIJDE	ja	vanuit de deuropening en vanaf de naastgelegen bruggen. Er is een goed beeld ontstaan over de staat, gebreken en opbouw van het metselwerk aan de buitenzijde
WK-3	controle metselwerk, letten op dilataties, overgang type constructies, etc. BINNENZIJDE	ja	geen
WK-4	controle metselwerk, letten op dilataties, overgang type constructies, etc. BUITENZIJDE	ja	vanuit de deuropening en vanaf de naastgelegen bruggen. Er is een goed beeld ontstaan over de staat, gebreken en opbouw van het metselwerk aan de buitenzijde
WK-5	controle metselwerk op uitbreidingen/aanpassingen uit verleden BINNENZIJDE	ja	geen
WK-6	controle metselwerk op uitbreidingen/aanpassingen uit verleden BUITENZIJDE	ja	vanuit de deuropening en vanaf de naastgelegen bruggen. Er is een goed beeld ontstaan over de staat, gebreken en opbouw van het metselwerk aan de buitenzijde

Nr.	Werkzaamheden/actie	Uitgevoerd?	Bijzonderheden t.a.v. uitvoering
WK-7	graven proefsleuven en controleren geometrie en vorm bovenzijde kelder, eveneens inmeten profiel	ja	geen
WK-8	in beeld brengen grondopbouw	ja	uitgevoerd doormiddel van landmetingen
WK-9	boorkernen t.b.v. bepaling dikte toog en opbouw metselwerk vanaf bovenzijde	ja	geen
WK-10	boorkernen nemen t.b.v. bepalen dikte afwerklaag buitenzijde kelder	ja	geen
WK-11	bepalen koppeling naastgelegen toog (nr. ■■■ om boring in wanden te voorkomen.	nee	aan de bovenzijde is niet vastgesteld hoe deze aansluiting aanwezig is. Zie paragraaf 2.3 voor meer info
WK-13	tachimetrische inmeting t.b.v. hoogteligging en verloop bovenzijde toogconstructie en drempel doorgang in kluiswand	ja	geen
WK-14	contouren inmeten binnenzijde d.m.v. 3D-laserscan en vastleggen hoogte drempel t.p.v. doorgang kluiswand	ja	geen

2.3 Afwijkingen t.o.v. inspectieplan

Inspecties en/of onderzoeken waar bij de werkelijke uitvoering afgeweken is van de voorziene uitvoering zijn in deze paragraaf gespecificeerd in tabel 2.2 inclusief een toelichting. Als er een alternatief onderzoek heeft plaatsgevonden, is dit tevens toegelicht.

Tabel 2.2 Toelichting afwijkingen t.o.v. inspectieplan KNC ■■■

Nr.	Werkzaamheden/actie	Toelichting/onderbouwing
WK-11	Bepalen koppeling naastgelegen toog (nr. ■■■ om boring in wanden te voorkomen.	Door de aanwezigheid van een zogenaamde 'grindkoffer' aan de bovenzijde ter hoogte van deze aansluiting en de aanwezigheid van diverse (hemel)waterafvoeren, is geen boring mogelijk geweest. Wel lijkt er sprake van een 'harde' aansluiting, dus geen opbouw van bijvoorbeeld puin. Dit is tevens het idee van de betrokkenen vanuit de aannemer die veel ervaring hebben met dergelijke constructies. Het vermoeden is daarom ook dat de geboortes van beide gewelven (tussen nr. ■■■ en nr. ■■■ tegen elkaar aan zijn geplaatst, zonder tussenliggend puin/metselwerk. Vastgesteld is dit echter niet.

3

RESULTATEN INSPECTIE

3.1 Inspectieresultaten

Per inspectielocatie is in tabel 3.1 aangegeven wat de bevindingen zijn, inclusief foto's. De locatie van de schade is weergegeven op een inspectietekening, bijgevoegd onder bijlage I bij dit rapport.

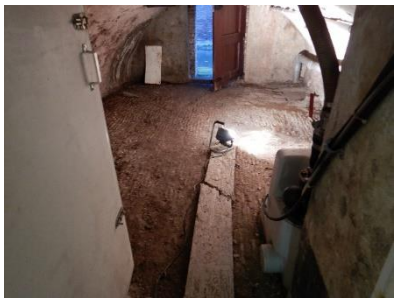
Er is tevens aangegeven of een schade een lokale betreft, of een generieke. In het laatste geval betreft het een schade die verspreid over het gehele constructieonderdeel meerdere malen voorkomt en een gelijk karakter vertoont.

Tabel 3.1 Uitwerking resultaten inspectie en onderzoek

Inspectie Nr.	Nr. onderzoeksplan	Locatie	Bevinding(en)	Foto(s)
01	WK-1	De binnenzijde van de kelder, deel onder het huis (geen onderdeel van scope)	Er is een oude doorgang zichtbaar in het deel van de kelder dat onder het huis aanwezig is. Dit duidt mogelijk op een (voormalig) naastgelegen kelder ter hoogte van nr. ■■■. Hier is echter geen verdere aanleiding voor gevonden. Deze kelder maakt geen onderdeel uit van de scope van de werkzaamheden.	
02	WK-1	Binnenzijde van de kelder, onderzijde metselwerk boog	De afwerking is in slechte staat. Dit is het algehele beeld. Er is een afwerklaag aanwezig aan de gehele onderzijde van de boog, maar deze is op veel plekken (circa 30-40 %) vergaan waardoor het onderliggende metselwerk zichtbaar is. Een vermoedelijke oorzaak hierbij is het vocht dat aanwezig is. Veel plekken die nog wel voorzien zijn van de afwerklaag, liggen los. Er is om	

Inspectie Nr.	Nr. onderzoeksplan	Locatie	Bevinding(en)	Foto(s)
			deze reden niet afgeklopt i.v.m. het risico op loslaten van een deel van de afwerking.	
03	WK-1	Binnenzijde van de kelder, onderzijde metselwerk boog	Er is scheurvorming zichtbaar op diverse locaties aan de onderzijde. De scheuren waarvan een duidelijke scheurpatroon kan worden herkend, zijn in de overspanningsrichting van de kelder. Het gaat om 1 doorlopende scheur. De scheurwijdte varieert sterk, maar is lastig vast te stellen door de afwerklaag. De overige scheuren hebben een variërende scheurwijdte. Scheur staat aan de onderzijde (aansluiting vloer) 25 mm open en in de top van de toog 2 mm open	
04	WK-1	Binnenzijde van de kelder, onderzijde metselwerk boog, nabij kluiswand grachtzijde	Er is een reparatieplek (cementgebonden) aanwezig nabij de aansluiting wand (grachtzijde) en metselwerk boog. Deze loopt over de volledige breedte van de boog (vloer tot vloer). Een deel van de op deze locatie aanwezige scheurvorming loopt door de reparatie heen.	
05	WK-1	Binnenzijde van de kelder, onderzijde metselwerk boog	Een groot deel van het metselwerk ligt bloot op circa de helft van de constructie, op het hoogste punt. Het gaat om een oppervlakte van circa 2 x 2 m. De stenen zijn in slechte staat en deels afgebrokkeld en poreus. Er is nog sprake van enige samenhang, al ontbreekt een groot deel van het voegwerk. Er is niet afgeklopt op deze locatie. Er zijn nog oude staalprofielen zichtbaar tussen de stenen, welke zijn gecorrodeerd. Deze zijn vermoedelijk	

Inspectie Nr.	Nr. onderzoeksplan	Locatie	Bevinding(en)	Foto(s)
			een overblijfsel van oude leidingklemmen of iets dergelijks. Verspreid over de kelder is lokaal een enkele steen te vinden met hetzelfde beeld, een deels ontbrekende steen.	
06	WK-1	Binnenzijde van de kelder, onderzijde metselwerk boog, aansluiting nabij kluiswand (grachtzijde)	In de hoek van de kelder (grachtzijde) is een lekkage zichtbaar met uitbloei. Het gaat om een locatie van circa 1 x 1 m. De plek is vochtig en vertoont scheuren in de afwerklaag. Ook loopt één van de aanwezige scheuren er doorheen.	
07	WK-1	Binnenzijde van de kelder, onderzijde metselwerk boog, ankers	Beide in de kelder zichtbare ankers, zijn gecorrodeerd. Ook zijn ze beiden vochtig. Er is sprake van een minimale afname van circa 1-2 mm maximaal.	 

Inspectie Nr.	Nr. onderzoeksplan	Locatie	Bevinding(en)	Foto(s)
08	WK-1	Binnenzijde van de kelder, onderzijde metselwerk boog, hoek (grachtzijde)	Er is een aantal jaar geleden (niet duidelijk wanneer exact) een gat gegraven in de kelder ten behoeve van een funderingsonderzoek. Er is een verzakking zichtbaar in de vloer. Ook lijkt er sprake te zijn van een zetting van de wand aan de grachtzijde. De scheurvorming in deze hoek is het grootst, circa 10 mm. Zie schadenr. 03.	
09	WK-3, WK-5	Binnenzijde, gehele kelder	Er zijn geen dilataties, overgang, aanpassingen en uitbreidingen zichtbaar aan de binnenzijde.	
10	WK-2	Buitenzijde kelder, metselwerk	Er is een klein deel van het metselwerk vervangen. Het gaat om drie lagen van in totaal circa 16 stenen. Geen bijzonderheden, stenen zijn in goede staat. Wel is er vervuiling aanwezig van met name de bovenste helft van de wand en onder de afwateringsvoorzieningen.	e 
11	WK-2	Buitenzijde kelder, ankers	Er zijn aan de buitenzijde 3 ankers aanwezig. Twee hiervan zijn aan de binnenzijde zichtbaar. Er zijn aan de buitenzijde geen bijzonderheden zichtbaar. De ankers zijn geconserveerd en in goede staat.	 

Inspectie Nr.	Nr. onderzoeksplan	Locatie	Bevinding(en)	Foto(s)
12	WK-2	Buitenzijde kelder, afwatering	Er zijn in totaal twee natuurstenen afwateringsvoorzieningen zichtbaar. Op groene aanslag na zijn deze in goede staat. Ze zijn nog in gebruik als HWA.	
13	WK-2	Buitenzijde kelder, metselwerk	Op zes locaties aan de voorzijde zijn kleine beschadigingen zichtbaar aan het metselwerk. Het gaat hierbij om stukjes steen die zijn afgesprongen.	
14	WK-2	Buitenzijde kelder, houten vlonder	Er is aan de buitenzijde een houten vlonder aanwezig. De staat is goed, er is enkel sprake van groene aanslag op de planken.	
15	WK-4, WK-6	Buitenzijde, gehele wand	Er zijn geen dilataties, overgang, aanpassingen en uitbreidingen zichtbaar aan de buitenzijde, anders dan de overgang naar de naastgelegen constructies.	
16	WK-2	Buitenzijde, bovenzijde kelder	Er is een betonnen L-wand aanwezig langs de kademuur. De L-wand is aan de bovenzijde opgelegd op de toeg. De breedte is circa 360 mm.	

Inspectie Nr.	Nr. onderzoeksplan	Locatie	Bevinding(en)	Foto(s)
17	WK-2	Buitenzijde, bovenzijde kelder	Er zijn geen gebreken waarneembaar aan de bovenzijde. Dit komt door de afwerking aan de bovenzijde van de toog. Er zijn geen zettingen of dergelijke aanwezig.	
18	WK-2	Buitenzijde, bovenzijde kelder	Er is een zogenaamde grindkoffer aanwezig op de overgang tussen kelder en . Deze is in goede staat. Hierdoor is het helaas niet mogelijk om te controleren wat er onder deze grindkoffer aanwezig is. Wel is het een harde ondergrond, zo is vastgesteld doormiddel van de inspectie	
19	WK-2	Buitenzijde, bovenzijde kelder, afwerking	De toog is aan de bovenzijde afgewerkt doormiddel van een bitumineuze laag en een soort geotextiel (vezeldoek) om de kelder waterdicht te maken. Deze zijn om-en-om aangebracht. Dit is 1998 uitgevoerd blijkt uit de archiefstudie. De laag is circa 10 mm dik. De staat is goed.	

Inspectie Nr.	Nr. onderzoeksplan	Locatie	Bevinding(en)	Foto(s)
				

4

RESULTATEN ONDERZOEKEN

4.1 Uitgevoerde onderzoeken

Er zijn aan het object diverse onderzoeken uitgevoerd, zowel destructief als non-destructief. In tabel 4.1 staan de onderzoeken beschreven die in dit hoofdstuk behandeld worden.

Tabel 4.1 Specificatie benodigde inspecties en onderzoeken KNC

Nr.	Werkzaamheden/actie	Uitgevoerd?	Bijzonderheden t.a.v. uitvoering
WK-7	gaven proefsleuven en controleren geometrie en vorm bovenzijde kelder, eveneens inmeten profiel	ja	geen
WK-8	in beeld brengen grondopbouw	ja	geen
WK-9	boorkernen t.b.v. bepaling dikte toog en opbouw metselwerk vanaf bovenzijde	ja	geen
WK-10	boorkernen nemen t.b.v. bepalen dikte afwerklaag buitenzijde kelder	ja	geen
WK-13	tachimetrische inmeting t.b.v. hoogteligging en verloop bovenzijde toogconstructie en drempel doorgang in kluiswand	ja	geen
WK-14	contouren inmeten binnenzijde d.m.v. 3D-laserscan en vastleggen hoogte drempel t.p.v. doorgang kluiswand	ja	geen

4.2 Graven van de proefsleuf (WK-7)

Er is door Gebr. De Leeuw een proefsleuf gegraven (zie afbeelding 4.1) om te kijken naar een aantal zaken en om diverse onderzoeken uit te kunnen voeren. De belangrijkste onderdelen was het inmeten van de geometrie en het boren van een aantal kernen.

Aan de bovenzijde was niet veel zichtbaar door de aanwezige afwerklaag. Zie hoofdstuk 3 voor meer informatie.

Het vrijgraven is verder zonder problemen verlopen.

Afbeelding 4.1 De proefsleuf boven kelder nr. ■



4.3 Inmetingen bovenzijde (WK-7, WK-8 en WK-13)

Er hebben aan de bovenzijde diverse (tachimetrische) landmetingen plaatsgevonden. Het ging om het inmeten van de geometrie, het in kaart brengen van het verloop van de toog.

De dikte van het grondpakket is ook op deze manier in beeld gebracht. Het grondpakket bestaat uit zand.

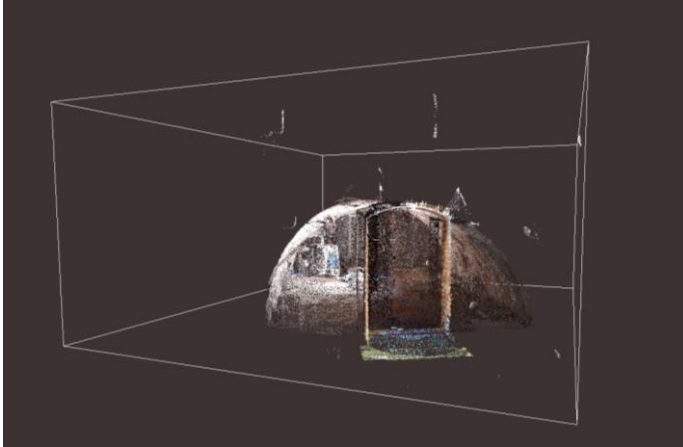
Er zijn in totaal twee profielen aan de bovenzijde ingemeten. Ook is er een meting gedaan om de 3D-scan te kunnen koppelen aan de overige inmetingen.

De profielmetingen zijn bijgevoegd onder bijlage II.

4.4 Inmetingen binnenzijde (WK-14)

Aan de binnenzijde van de kelder is een 3D laserscan uitgevoerd om de contouren van de kelder in kaart te brengen. Tevens zijn er tijdens deze metingen foto's gemaakt. Hierdoor zijn de exacte afmetingen zichtbaar en altijd in te zien. Zie afbeelding 4.2.

Afbeelding 4.2 3D laserscan binnenzijde kelder KNC



De gegevens zijn aangeleverd als zogenaamde 'pointcloud' en vormen input voor de berekeningen.

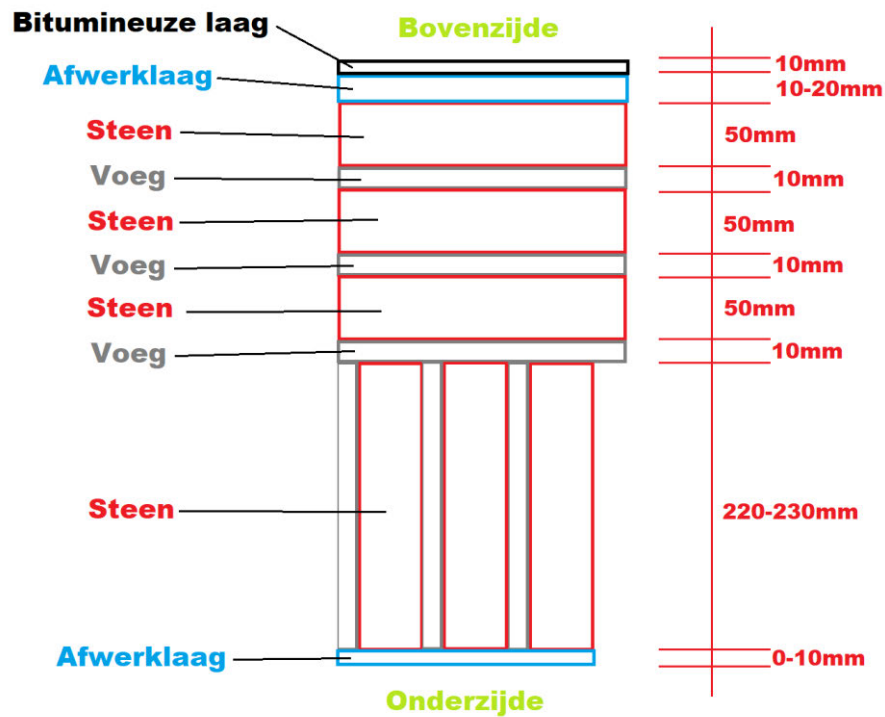
4.5 Boorkernen (WK-9 en WK-10)

Vanaf de bovenzijde zijn een tweetal boringen uitgevoerd. Eén van deze boringen is op het hoogste punt van de toog door-en-door geboord om de laagopbouw en dikte vast te stellen. De andere is geboord om te beoordelen hoe de afwerklaag is opgebouwd.

Dikte constructie

De boorkern laat zien dat de toog is opgebouwd uit 4 lagen metselwerk. De bovenste drie lagen liggen plat op elkaar, de onderste steen staat rechtop. Zie afbeelding 4.3 voor een schematische weergave.

Afbeelding 4.3 Schematische doorsnede metselwerk toog



De dikte van de stenen is circa 50 mm, de lengte circa 220-230 mm. De eerste en laatste laag zijn onsamenvallend. Zie afbeelding 4.4.

Afbeelding 4.4 Boorkern metselwerk



Aan zowel de bovenzijde is een afwerklaag (kalk gebonden mortel) aanwezig van circa 10-20 mm. Aan de onderzijde is deze circa 0-10 mm.

De totale dikte, inclusief afwerklagen en bitumineuze afdichting aan de bovenzijde, is op de boorlocatie 410 mm.

Afwerklaag

De afwerklaag aan de bovenzijde, bestaat uit een bitumineuze laag en een soort geotextiel (vezeldoek). Deze zijn om-en-om aangebracht. De dikte van deze laag is circa 10 mm.

Op de bovenzijde van de toog is een kalk gebonden afwerklaag aanwezig van circa 10-20 mm dik. Er is aanvullend nog een tweede kern geboord om de opbouw te kunnen verifiëren. Deze kern is geboord tot een diepte van circa 100 mm. Ook bij deze kern was het beeld identiek. Zie afbeelding 4.5.

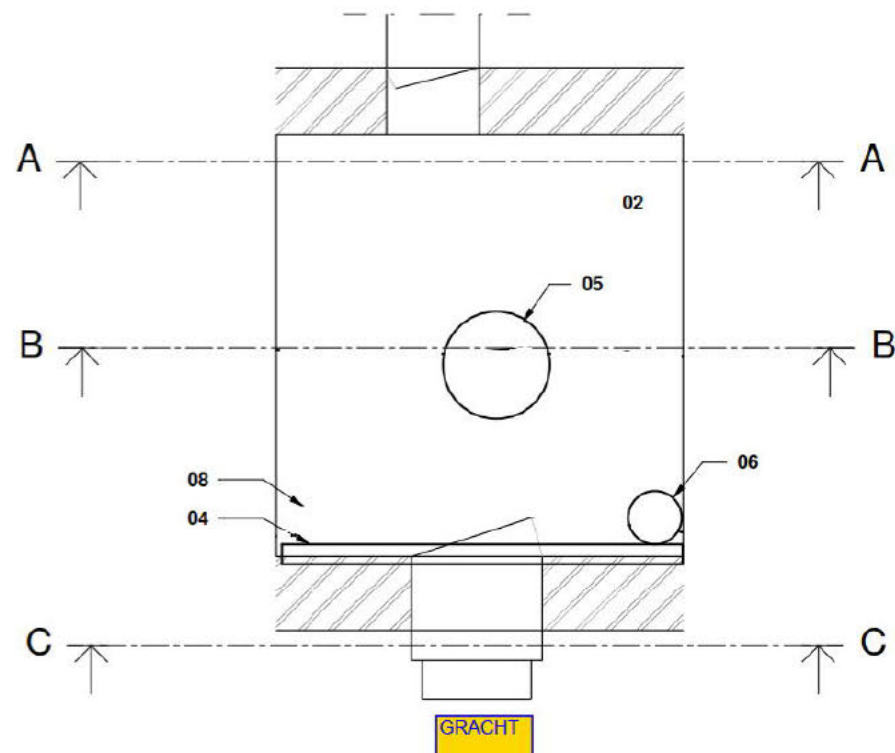
Afbeelding 4.5 Boorkern afwerklaag



Bijlage(n)

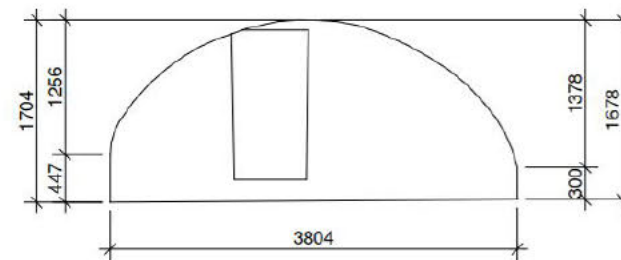
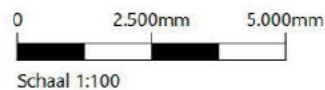
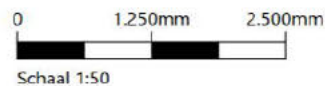


BIJLAGE: INSPECTIETEKENINGEN



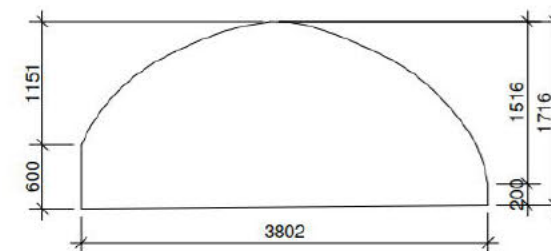
Bovenaanzicht

schaal: 1 : 50



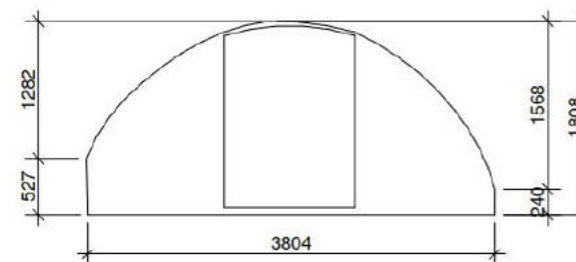
Doorsnede - A

schaal: 1 : 50



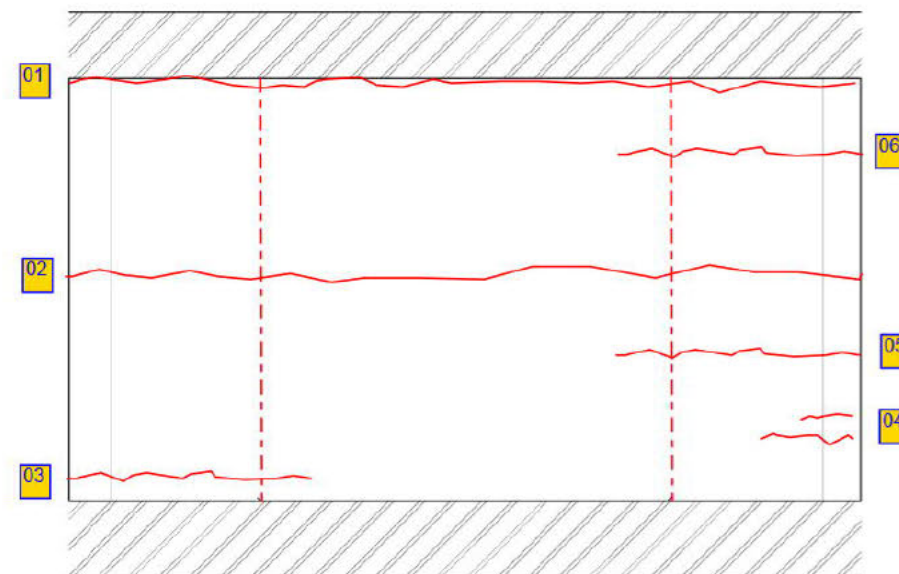
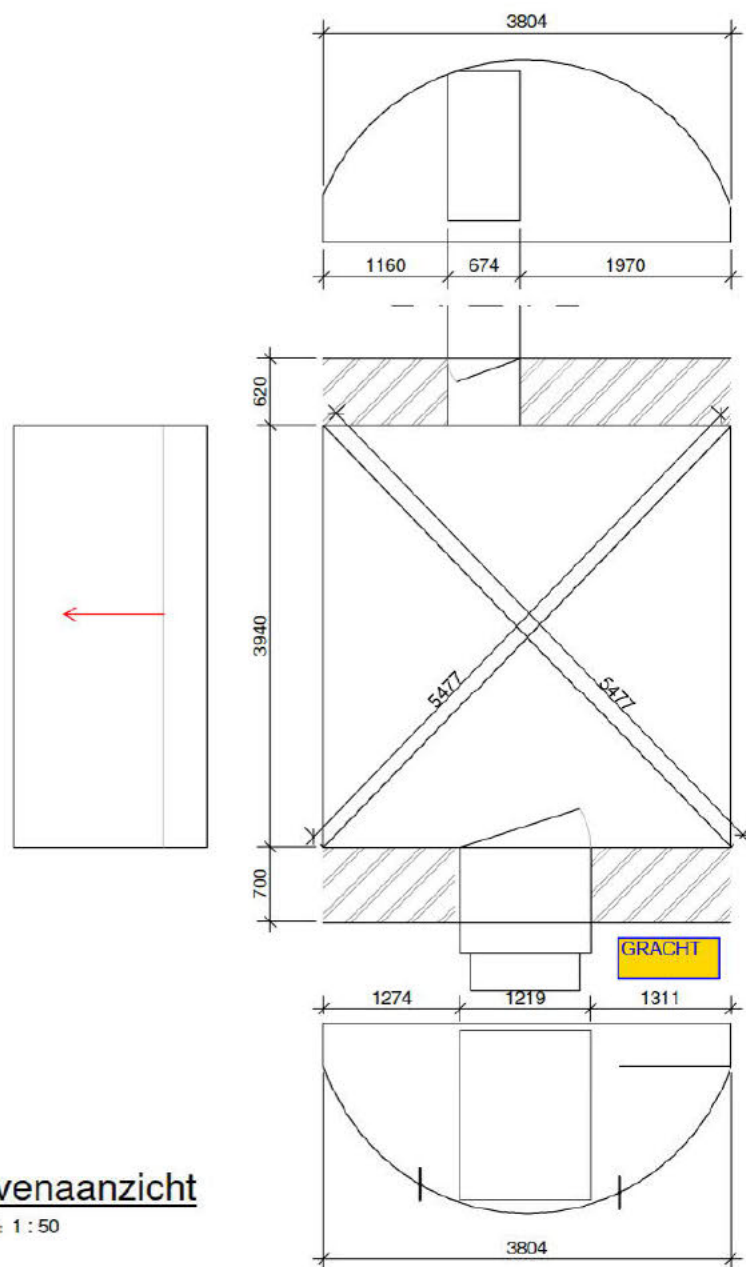
Doorsnede - B

schaal: 1 : 50



Doorsnede - C

schaal: 1 : 50

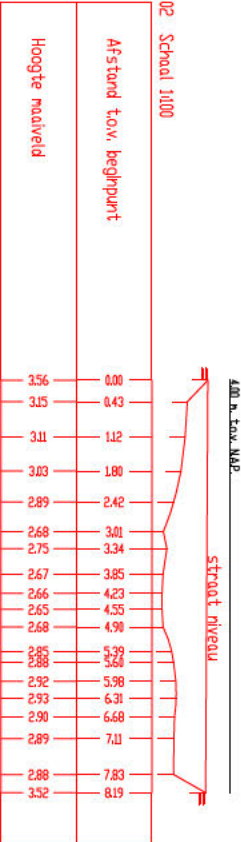
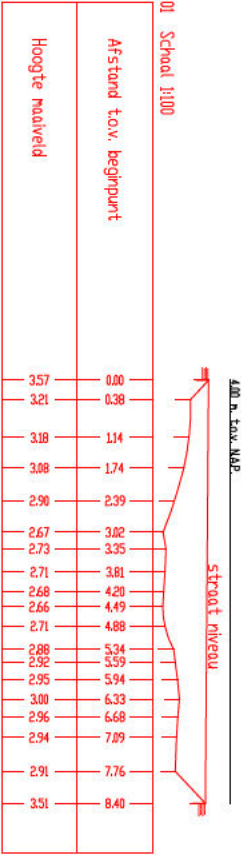
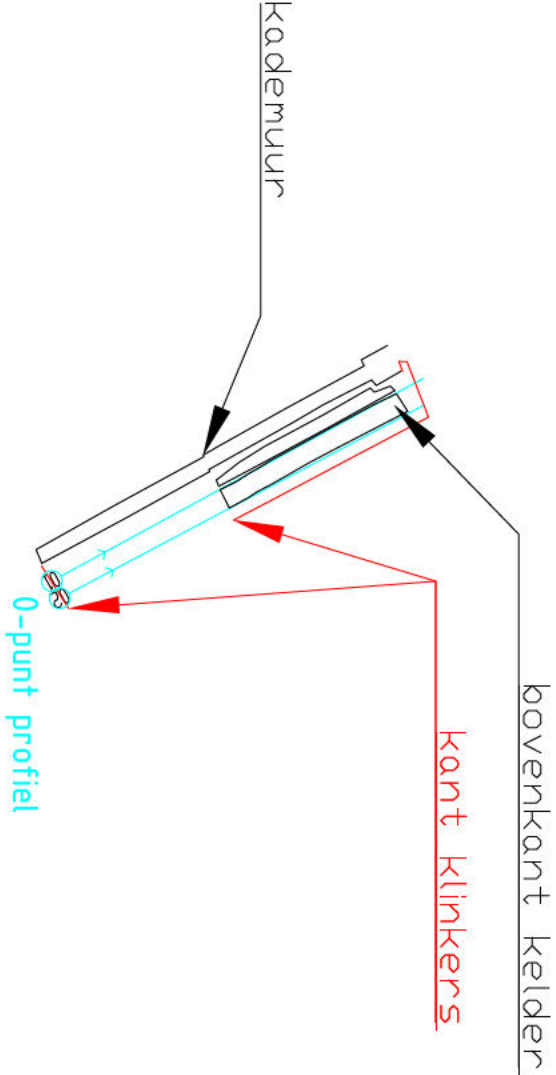


- 01- De kelder scheurt los van de achterwand.
- 02- Scheur in de overspanningsrichting over de volledige breedte, scheurwijdte is tussen 0,2 en 10 mm.
- 03- Scheur over de wand en een deel van het gewelf, scheurwijdte tussen 2 en 25 mm.
- 04- Scheuren t.p.v. de vochtplek.
- 05- Scheur direct achter de anker.
- 06- Scheur over de wand en een deel van het gewelf, scheurwijdte tussen 1 en 5 mm.



BIJLAGE:

Werkelder Kromme Nieuwegracht 52



Opdrachtgever
Witteveen+Bos

Project
Werkelder Kromme Nieuwegracht 52 Utrecht

Onderdeel
Inmeting bovenkant werkelder + profielen

Tekeningnummer	Rev.	Bestandsnaam	Formaat	Schaal	Blad	Aantal
T001		Werkelder Utrecht 52.dwg	A3	1:150	1	1
Kentoor	Projectnummer	Bestelnummer	Datum van uitgave	Gek.	Gaz.	Act.
Lieren	G900222		08-12-2020	DKO	MDM	



