

Weerstandsbepaling van perronkeerwanden op basis van testen en kwaliteitsborging via controleproeven

TNO 2025 R12527 – 19 januari 2026

Weerstandsbepaling van perronkeerwanden op basis van testen en kwaliteitsborging via controleproeven

Auteur(s)	Arthur T. Slobbe, Rein de Vries
Rubricering rapport	TNO Publiek
Aantal pagina's	22 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	ProRail
Projectnummer	060.63730

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

©2025 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Vraagstelling	4
1.3	Aanpak.....	4
1.4	Scope	5
1.5	Leeswijzer.....	5
2	Beproevingsmethode voor de weerstandsbepaling	6
2.1	Testprotocol	6
2.2	Beoordeling geschiktheid van proefresultaten	7
2.3	Evaluatie van het bezwijkgedrag	8
3	Bepalen rekenwaarde vanuit testresultaten	9
3.1	Rekenmethodiek en uitgangspunten	9
3.2	Excel-rekentool	10
3.3	Rekenvoorbeeld	11
3.4	Tekstvoorstel productspecificatie ProRail	14
4	Kwaliteitsborging via controleproeven	15
4.1	Belang van controleproeven	15
4.2	Verskil in ontwerpwaarde controle en initiële proeven	15
4.3	Gebruik van controleproeven in de praktijk.....	17
4.4	Tekstvoorstel productspecificatie ProRail	17
5	Conclusies en aanbevelingen	19
5.1	Conclusies.....	19
5.2	Aanbevelingen	20
6	Referenties	21
7	Ondertekening	22

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

ProRail hanteert de productspecificatie SPC00112 [1] voor de certificering van prefab betonachtige perronkeerwanden. Deze keerwanden vormen een essentieel onderdeel van de perroninrichting en moeten voldoen aan strikte eisen op het gebied van productie, uitvoering, sterkte (weerstand), duurzaamheid en veiligheid. In de SPC00112 [1] zijn deze eisen vastgelegd in de vorm van functionele, prestatiegerichte en inpassingseisen.

In het kader van een revisie van de SPC00112 [1] is er behoefte ontstaan om expliciet aandacht te besteden aan het experimenteel bepalen van de sterkte van prefab betonachtige perronkeerwanden door middel van beproeving. Enerzijds is dit ingegeven door de wens om producenten de mogelijkheid te bieden om keerwanden van nieuwe, gewapendbetonachtige materialen—die buiten het toepassingsgebied van NEN-EN 1992 [2] vallen—te laten certificeren. Anderzijds beoogt ProRail de toepassing van controleproeven te formaliseren, zodat de sterkte van de keerwanden gedurende de geldigheidsduur van het certificaat kan worden beoordeeld.

Bijlage C van NEN-EN 15258 [3] biedt een gestandaardiseerde procedure voor het beproeven van prefab betonachtige keerwanden. Deze procedure kan dienen als uitgangspunt voor het ontwikkelen van een aanvullende toetsingsmethodiek binnen een revisie van SPC00112 [1]. Daarbij rijzen vragen zoals: hoe worden de proefresultaten vertaald naar een rekenwaarde van de sterkte? En hoeveel proeven zijn daarvoor nodig? De weerstand van een perronkeerwand is immers geen deterministische eigenschap, maar een stochastische grootte met een bijbehorende kansverdelingsfunctie. De proefresultaten dienen zodoende te worden beschouwd als realisaties van deze verdelingsfunctie. De beantwoording van dergelijke vragen vereist daarom een probabilistische benadering voor de bepaling van de weerstand.

1.2 Vraagstelling

TNO is gevraagd door ProRail om een onderbouwde methodiek te formuleren waarmee de weerstand van een door een producent ontworpen prefab betonachtige keerwand aan de hand van experimenten kan worden bepaald. Daarnaast is de vraag gesteld op welke wijze kan worden gewaarborgd dat de geproduceerde prefab betonachtige perronkeerwanden gedurende de geldigheidsduur van het certificaat dezelfde prestaties leveren als de exemplaren die voor de certificering zijn beproefd.

1.3 Aanpak

Het onderzoek is opgedeeld in twee fasen, in lijn met de eerder geformuleerde onderzoeksvragen. De eerste fase richt zich op de bepaling van de rekenwaarde van de weerstand op basis van proefresultaten, conform bijlage D van NEN-EN 1990 [4]. In deze fase worden:

- een rekentool ontwikkeld;

- een beknopte beschrijving opgesteld van de gehanteerde probabilistische methodiek en uitgangspunten;
- en een rekenvoorbeeld uitgewerkt ter illustratie van de toepassing.

In de tweede fase zijn de noodzaak en de mogelijkheden om de prestaties van de geproduceerde perronkeerwanden gedurende de geldigheidsduur van het certificaat te waarborgen, onderzocht. Hierbij is aandacht besteed aan:

- de definitie en het belang van controleproeven;
- en een passend beoordelingskader inclusief praktische invulling.

De uitkomsten van beide fasen zijn vastgelegd in dit rapport, inclusief tekstvoorstellen voor de opname van beide procedures in een revisie van SPC00112 [1]. Deze teksten zijn voor de duidelijkheid voorzien van een kader.

1.4 Scope

De scope van het onderzoek in dit rapport is beperkt tot de weerstandsbepaling van prefab betonachtige perronkeerwanden en de borging daarvan gedurende de geldigheidsduur van het certificaat, op basis van beproevingen. De weerstand wordt hierbij gedefinieerd als de uiterste buigmomentcapaciteit aan de voet van de keerwand, conform hetgeen het testprotocol in bijlage C van NEN-EN 15258 [3] beoogt te verifiëren.

Dit onderzoek geeft geen oordeel over de geschiktheid van het in NEN-EN 15258 [3] beschreven testprotocol. Evenmin worden de ontwerpbelasting en de bepaling van de bijbehorende rekenwaarde beschouwd, aangezien deze reeds zijn vastgelegd op basis van NEN-EN 1990 [4] in SPC00112 [1].

1.5 Leeswijzer

In [hoofdstuk 2](#) wordt ingegaan op de beproevingsmethode voor de weerstandsbepaling en de wijze waarop met de proefresultaten dient te worden omgegaan. [Hoofdstuk 3](#) behandelt de achtergrond en de methode waarmee de rekenwaarde voor de sterkte kan worden afgeleid op basis van beproevingen. In [hoofdstuk 4](#) wordt beschreven hoe kwaliteitsborging via controleproeven vormgegeven kan worden. Tot slot worden in [hoofdstuk 5](#) de belangrijkste conclusies en aanbevelingen samengevat.

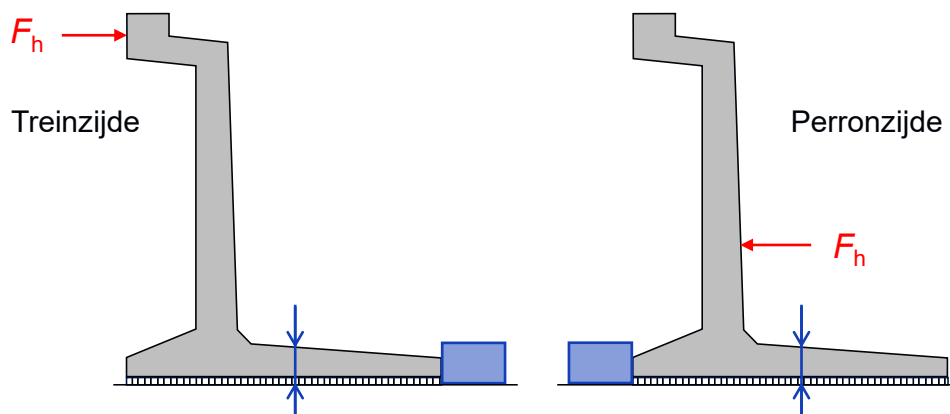
2 Beproevingsmethode voor de weerstandsbepaling

2.1 Testprotocol

De weerstand van prefab betonachtige perronkeerwanden wordt bepaald volgens het gestandaardiseerde testprotocol uit bijlage C van NEN-EN 15258 [3]. Dit protocol beschrijft een beproevingsmethode waarmee de buigmomentcapaciteit aan de voet van een prefab keerwand wordt bepaald.

Figuur 2.1 toont een schematische weergave van de proefopstelling en bijbehorende randvoorwaarden wanneer een kracht wordt aangebracht vanuit de treinzijde en de perronzijde. De proef wordt uitgevoerd op een keerwand op ware grootte, geplaatst op een zandbed van ca. 2 cm dik. De voet van de keerwand wordt gefixeerd om overhellen en verschuiven tijdens het belasten te voorkomen. Op het verticale deel van de keerwand wordt een horizontale kracht (F_h) aangebracht, die gecontroleerd wordt opgevoerd tot bezwijken. De hoogte waarop deze kracht aangrijpt is afhankelijk van het type belasting dat wordt gesimuleerd: voor een aanrijdbelasting wordt de kracht bovenaan de keerwand geplaatst; voor het simuleren van gronddruk en perronbelasting wordt de kracht bijvoorbeeld op 1/3 van de keerwandhoogte aangebracht. Bij het fixeren en aanbrengen van de horizontale kracht moet rekening worden gehouden met mogelijk lokaal bezwijken van het materiaal; door het gebruik van platen of profielen kunnen de krachten gelijkmatiger worden verdeeld.

De resultaten van de proef worden vastgelegd in een kracht-vervormingsdiagram. Daarnaast dienen alle scheuren (scheurwijdte en -locatie) te worden geregistreerd, inclusief het moment van ontstaan. Deze gegevens bieden gezamenlijk een gedetailleerd inzicht in het bezwijkgedrag van het proefstuk.



Figuur 2.1: Schematische weergave van de proefopstelling voor het beproeven van de momentweerstand gegeven een kracht vanuit de treinzijde (links) en de perronzijde (rechts).

2.2 Beoordeling geschiktheid van proefresultaten

Voordat de rekenwaarde van de sterkte van de perronkeerwanden kan worden bepaald, dient de certificerende instantie te beoordelen of de resultaten van de proevenserie geschikt zijn. Hierbij moet worden gekeken naar:

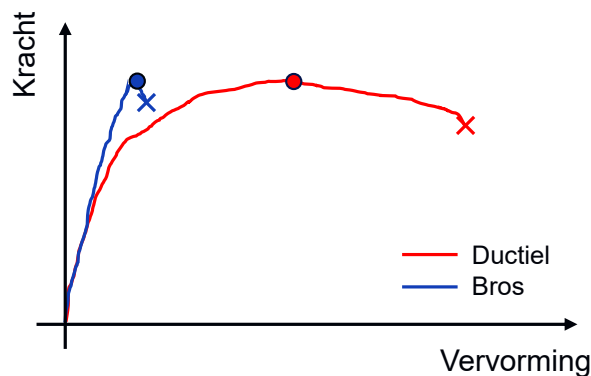
- de representativiteit van de beproefde keerwanden;
- het aantal uitgevoerde proeven;
- het bezwijkgedrag van de beproefde keerwanden.

Ten aanzien van de representativiteit en onderlinge overeenkomst dient vastgesteld te worden of de beproefde perronkeerwanden conform het ontwerp zijn waarvoor het certificaat wordt aangevraagd. Dit betreft aspecten als de afmetingen, de gebruikte materialen, de wapeningsconfiguratie en detaillering, en het productieproces. Deze kenmerken definiëren de productpopulatie. De proefstukken binnen een proevenserie moeten afkomstig zijn uit dezelfde populatie. Indien er variaties zijn in één of meerdere van bovengenoemde aspecten, betreft het verschillende populaties. In dat geval mogen de resultaten niet worden samengevoegd voor het bepalen van de rekenwaarde van de sterkte. Bij wijzigingen in ontwerpkenmerken of productieparameters is het noodzakelijk een nieuwe proevenreeks uit te voeren.

Om een betrouwbaar beeld te krijgen van de variatie in sterkte en bezwijkgedrag binnen een productpopulatie, is het noodzakelijk om een voldoende aantal proeven uit te voeren. Meer proeven leiden tot een nauwkeuriger beeld met een kleinere statistische modelonzekerheid, wat van belang is voor het bepalen van de rekenwaarde van de sterkte. Tegelijkertijd brengen proeven tijd en kosten met zich mee, waardoor het aantal proeven bij voorkeur beperkt blijft. Aangezien een groter aantal proeven doorgaans een hogere rekenwaarde oplevert, is het aan de producent om hier een balans in te vinden. Omdat de statistische onzekerheid in grote mate toeneemt bij een klein aantal proeven met onbekende standaarddeviatie wordt het volgende minimum gehanteerd (in lijn met bijlage D van NEN-EN 1990 [4]):

$$n_{\min} = 4 \quad (2.1)$$

De beproefde perronkeerwanden dienen onderling een vergelijkbaar bezwijkgedrag te vertonen. Het testprotocol uit bijlage C van NEN-EN 15258 [3] impliceert bezwijken op buiging aan de voet van de keerwand als het te beschouwen faalmechanisme. Bezwijken op buiging is in de context van traditioneel gewapend beton een *ductiel* faalmechanisme, wat betekent dat de wapening plastisch vervormt voordat het beton bezwijkt. Doordat dit gepaard gaat met grote vervormingen, biedt dit bezwijkgedrag een waarschuwend signaal voorafgaand aan bezwijken—in tegenstelling tot *broos* bezwijken waarbij het element faalt zonder noemenswaardige vervorming en na het bereiken van maximale weerstand geen herverdeling van krachten meer toelaat, zie [figuur 2.2](#). Bij toepassing van alternatieve betonachtige materialen of wapening dient de certificerende instantie na te gaan of in alle proeven sprake is van ductiel bezwijkgedrag—indien dit gedrag door de beheerder gewenst is voor de voorziene toepassing. Om vast te stellen of het bezwijkgedrag ductiel is, dient de proef te worden doorgezet tot bezwijken: het moment waarop er een relatief grote weerstandsreductie plaatsvindt. Dit is essentieel vanwege het beperkte aantal proeven en de veronderstelling van een unimodale weerstandsverdeling in de methodiek voor het bepalen van de rekenwaarde (zie [hoofdstuk 3](#)).



Figuur 2.2: Illustratie van het kracht-vervormingsdiagram voor ductiel en bros bezwijken, met markering van de maximaal opneembare kracht (o) en het moment van bezwijken (x).

2.3 Evaluatie van het bezwijkgedrag

Om na te gaan of bezwijken op buiging heeft plaatsgevonden, dient men per proef alle vastgelegde resultaten te evalueren. Belangrijke aandachtspunten hierbij zijn:

- Is plastische vervorming van de wapening waargenomen, en toont het kracht-vervormingsdiagram grote vervormingen?
- Zijn er meerdere scheuren ontstaan die zich geleidelijk ontwikkelen in lengte en/of breedte bij toenemende belasting?
- Bevinden de scheuren zich op locaties met de grootste buigende momenten (bij de aansluiting van het verticale deel met de voet van de keerwand)?

Indien bovenstaande vragen bevestigend kunnen worden beantwoord, is het aannemelijk dat bezwijken op buiging heeft plaatsgevonden. Wanneer dit voor alle proeven geldt, kan de rekenwaarde van de sterkte worden bepaald, zoals beschreven in het volgende hoofdstuk. De sterkte van de perronkeerwand wordt gedefinieerd als de uiterste buigmomentcapaciteit aan de voet van de keerwand. Voor het bepalen van de rekenwaarde moet dit maximaal opneembare buigend moment voor elke proef worden bepaald. Deze waarden verkrijgt men door de maximaal opneembare kracht (zie [figuur 2.2](#)) te vermenigvuldigen met de afstand tussen de positie van de horizontale belasting en het hart van de voet van de keerwand (zie [figuur 2.1](#)).

Bij onderling afwijkend bezwijkgedrag in de proeven, dient de oorzaak te worden onderzocht. Alleen wanneer er aantoonbaar sprake is van onjuiste uitvoering van de proef (bijv. belasting te snel aangebracht, slechte fixatie van het proefstuk, etc.) mag het resultaat worden uitgesloten en een vervangende proef worden uitgevoerd. Indien er geen duidelijke oorzaak voor het afwijkend bezwijkgedrag wordt gevonden, wordt aanbevolen aanvullende proeven uit te voeren. Herhaalt het afwijkende gedrag zich en is een consistent faalmechanisme niet aan te tonen, dan kan het bezwijkgedrag als bros worden beschouwd. Afhankelijk van de toepassing kan bros bezwijkgedrag acceptabel zijn, hoewel in dergelijke gevallen een bros of onvoorspelbaar faalmechanisme uitsluitend kan worden gecompenseerd door een aanzienlijk hogere uiterste weerstand (bijvoorbeeld een factor 2 hoger).

3 Bepalen rekenwaarde vanuit testresultaten

3.1 Rekenmethodiek en uitgangspunten

3.1.1 Beknopte beschrijving

De rekenwaarde van de weerstand wordt bepaald met een statistische methode zoals beschreven in bijlage D van NEN-EN 1990 [4]. Deze methode is bedoeld om een fractielwaarde van een stochastische variabele X (zoals bijvoorbeeld de momentweerstand M_R) te schatten op basis van een beperkt aantal testresultaten. Daarbij wordt expliciet rekening gehouden met de statistische modelonzekerheid. De gezochte fractielwaarde van de weerstand wordt hierbij uitgedrukt als:

$$X_f = \bar{x} - k_n s \quad (3.1)$$

waarin $\bar{x}$ het steekproefgemiddelde is, s de steekproef-standaarddeviatie, en k_n een factor die afhangt van het gezochte fractiel, de steekproefgrootte n . Typische voorbeelden van fractielwaarden zijn de karakteristieke waarde X_k en de ontwerpwaarde X_d . De waarde voor k_n kan worden afgeleid uit respectievelijk de tabellen D1 en D2 in bijlage D van NEN-EN 1990 [4].

3.1.2 Uitgangspunten

Er wordt aangenomen dat de standaarddeviatie onbekend is alvorens met testen wordt begonnen. Indien voorkennis over stochast X beschikbaar is, wordt een Bayesiaanse methodiek aanbevolen; dit voert echter te ver voor de huidige toepassing. Zonder enige voorkennis kan de statistische onzekerheid worden meegenomen door gebruik te maken van de Studentverdeling:

$$k_n = -F_T^{-1}(p) \sqrt{1 + 1/n} \quad (3.2)$$

hierin is $F_T^{-1}(\cdot)$ de inverse cumulatieve verdelingsfunctie van stochast T , welke een Student-verdeling volgt met $\nu = n - 1$ vrijheidsgraden. Voor het bepalen van X_k wordt doorgaans een kans $p = 0,05$ gehanteerd. Voor X_d wordt p vaak berekend via $\Phi(-\alpha_R \beta)$, waarbij $\Phi(\cdot)$ de cumulatieve verdelingsfunctie is van de standaard normaalverdeling, $\alpha_R = 0,8$ wordt aangenomen, en de betrouwbaarheidsindex β afhankelijk is van de gevolgklasse (zie tabel B2 in bijlage B van NEN-EN 1990 [4]).

Er wordt aangenomen dat de weerstand lognormaal verdeeld is. Dit is een gebruikelijk uitgangspunt en sluit aan bij een algemene probabilistische modellering [5]. De testresultaten x_i met $i = 1, 2, \dots, n$ worden dus beschouwd als een steekproef uit een lognormale verdeling. Daarom worden de testresultaten eerst logaritmisches getransformeerd als $y_i = \ln(x_i)$, waarbij de nieuwe stochast Y normaal verdeeld is. Na toepassing van vergelijking (3.1) wordt de fractielwaarde terug-getransformeerd via $X_f = \exp(Y_f)$.

3.1.3 Invloed van het aantal proeven

Uit de methode volgt dat de uitkomst voor de rekenwaarde afhankelijk is van het aantal uitgevoerde proeven. In het algemeen geldt: hoe groter het aantal proeven, des te kleiner de factor k_n , en dus de statistische onzekerheid. Dit leidt tot een nauwkeurigere schatting. Hoewel het niet gegarandeerd is, zal de rekenwaarde gemiddeld genomen toenemen bij een groter aantal proeven.

3.2 Excel-rekentool

3.2.1 Beschrijving

Op basis van de hierboven beschreven methode is een Excel-rekentool ontwikkeld voor het bepalen van de rekenwaarde van prefab betonachtige perronkeerwanden, op grond van proefresultaten. De tool ondersteunt het certificeringsproces waarin wordt beoordeeld of een door de producent ontworpen keerwand voldoet aan de eisen zoals vastgelegd in de toekomstige revisie van SPC00112 [1]. De beoogde gebruiker is een door ProRail geautoriseerde certificerende instantie en in de voorbereidende fase de producent, die hiermee inzicht krijgt in hoe het aantal proeven de rekenwaarde beïnvloedt. De rekentool biedt een overzichtelijke en toegankelijke werkwijze voor het uitvoeren van de berekeningen. Door toepassing van gestandaardiseerde methodiek en uniforme invoerverwerking draagt de tool bij aan het waarborgen van zowel de reproduceerbaarheid van resultaten als de consistentie van uitkomsten.

De rekentool bestaat uit drie tabbladen. Tabblad 1 bevat een beknopte gebruikershandleiding. Tabblad 2 bevat de invoervelden voor de berekening aan de linkerkant en toont de uitkomsten aan de rechterkant. De berekening wordt uitgevoerd in een derde tabblad, dat bewust is afgeschermd voor de gebruiker. Dit verkleint de kans op (onbedoelde) aanpassingen en draagt bij aan de consistentie en betrouwbaarheid van de resultaten. De Excel-rekentool voert twee controles uit:

1. Controle op het aantal proeven, waarbij geldt: $n \geq n_{\min}$.
2. Controle op de beoogde sterkte, door middel van de toets $M_{Ed}/M_{Rd} \leq 1$.

3.2.2 Uitgangspunten van de rekentool

De Excel-rekentool is gebaseerd op de volgende uitgangspunten:

1. De testresultaten zijn verkregen met inachtneming van de aandachtspunten zoals beschreven in [hoofdstuk 2](#) van dit rapport.
2. De sterkte van de perronkeerwand is gedefinieerd als de uiterste buigmomentcapaciteit aan de voet van de keerwand (M_R). Dit betekent: $X \rightarrow M_R$, ofwel $x_i \rightarrow M_{Ri}$, en $X_d \rightarrow M_{Rd}$.
3. M_R volgt een lognormale verdeling; de standaarddeviatie is onbekend, en er is geen voorkennis over het gemiddelde en de standaarddeviatie.
4. Het minimum aantal proeven, $n_{\min}$, is gelijk aan vier, conform tabel D2 in bijlage D van NEN-EN 1990 [4].
5. De invloedscoëfficiënt van de weerstand, α_R , heeft een vaste waarde van 0,8.
6. De rekenwaarde van het optredende moment aan de voet van de keerwand (M_{Ed}) wordt veronderstelt bekend te zijn. Deze volgt uit de SPC00112 [1], mede op basis van NEN-EN 1990 [4].

3.2.3 Gebruik van de rekentool

De gebruiker dient in tabblad 2 de volgende invoer te specificeren: (i) de waarden voor de momentweerstand bij bezwijken uit de proeven (M_{Ri}); (ii) de rekenwaarde van het belastingseffect (M_{Ed}); en (iii) de gevolgklasse waarin de ontworpen perronkeerwand is ingedeeld (standaard CC2, zie SPC00112 [1]). Op basis van deze invoer berekent de tool het steekproefgemiddelde, de steekproefstandaarddeviatie, en de rekenwaarde van de weerstand (M_{Rd}). Deze waarde correspondeert normaliter met een referentieperiode van 50 jaar, conform tabel B2 in bijlage B van NEN-EN 1990 [4]. Met de toets $M_{Ed}/M_{Rd} \leq 1$ wordt gecontroleerd of de perronkeerwand voldoet aan de gestelde weerstandseis.

In de volgende paragraaf wordt een fictief rekenvoorbeeld gepresenteerd ter illustratie van de werkwijze en het gebruik van de Excel-rekentool.

3.3 Rekenvoorbeeld

Het bedrijf Vriesbeton te Slobvuurt heeft jarenlange ervaring in het maken van prefab betonachtige elementen. Materiaalkundigen van de R&D-afdeling van het bedrijf hebben recent een innovatief betonmengsel ontwikkeld en getest, waarbij er een CO₂-reductie van ten minste 40% bereikt wordt, terwijl de mechanische eigenschappen en de verwerkbaarheid vergelijkbaar zijn met die van de traditionele betonmengsels. De CO₂-reductie wordt vooral bereikt door minder cement toe passen. Daardoor bevat het betonmengsel minder cement dan vereist in NEN-EN 8005 [6] waardoor NEN-EN 1992 [2] niet van toepassing kan worden verklaard. Desondanks wil Vriesbeton het nieuwe betonmengsel gaan gebruiken in hun productieproces.

De eerste mogelijkheid dient zich al snel aan. Voor de uitbreiding van het centraal station te Slobvuurt komt ProRail met een order voor 1320 perronkeerwanden van het type 1980. Om de order binnen te halen, heeft Vriesbeton een productcertificaat nodig ter vaststelling dat hun perronkeerwand voldoet aan alle eisen zoals vastgelegd in de revisie van SPC00112 [1]. Onderdeel van deze certificering is het bepalen van de rekenwaarde van de sterkte van de perronkeerwand op basis van proeven (en de toets of deze voldoende is), omdat het nieuwe betonmengsel buiten het toepassingsdomein van de vigerende normen valt. De proeven worden uitgevoerd conform NEN-EN 15258 [3], welke zich richt op het verifiëren van momentweerstand (M_R) van het wandpaneel bij de aansluiting met de onderplaat.

Vriesbeton laat twee proevenseries uitvoeren voor het certificeringsproces. Om een aanrijding te simuleren wordt in de eerste proevenserie een horizontale kracht vanaf spoorzijde op de keerwand aangebracht. In de tweede proevenserie wordt een horizontale kracht vanaf perronzijde aangebracht om gronddruk en perronbelasting te simuleren. Voor beide belastingssituaties worden in eerste instantie vier proeven uitgevoerd; waarmee precies voldaan wordt aan het minimum vereiste aantal proeven (paragraaf 2.2). Tijdens de proeven worden de horizontale krachten verhoogd tot aan bezwijken van de perronwand. De maximale weerstandswaarden worden voor iedere proevenserie apart ingevuld in de Excel-tool om de rekenwaarde te bepalen.

Tabel 3.1 toont de M_R -waarden die zijn gevonden in beide proevenseries. Alle beproefde perronkeerwanden gedragen zich als traditioneel gewapend beton; de waargenomen scheur-

Tabel 3.1: Maximale momentweerstand (M_R) [kNm] per proef in beide belastingsituaties, volgend uit vier proeven.

1: Belasting vanuit spoorzijde ^a	2: Belasting vanuit perronzijde ^b
18,39	29,01
16,25	24,09
21,14	35,71
21,43	36,47

^a De data is gegenereerd met random sampling uit een lognormale verdeling met een gemiddelde van 20 kNm en een standaarddeviatie van 2 kNm.

^b De data is gegenereerd met random sampling uit een lognormale verdeling met een gemiddelde van 33 kNm en een standaarddeviatie van 4,95 kNm.

BENODIGDE INVOER	UITKOMSTEN STERKTEBEPALING O.B.V. OPGEGEVEN PROEFRESULTATEN
Rekenwaarde van het optredende buigend moment (M_{Ed}):	Voldoende proefresultaten ($n \geq 4$)? 4 VOLDOET
4,6	Steekproefgemiddelde: 19,346
	Standaarddeviatie van de steekproef: 2,534
Gevolgklasse (CC1, CC2 of CC3):	Karakteristieke waarde van de sterkte: 13,610
CC2	Rekenwaarde van de sterkte (M_{Rd}): 4,700
Testresultaten (M_R) - max. 100 invoervelden:	Unity check (M_{Ed} / M_{Rd}): 0,979 VOLDOET
18,39	
16,25	
21,14	
21,43	

Figuur 3.1: Screenshot in-en uitvoer rekentool voor belastingsituatie 1 op basis van vier proeven.

BENODIGDE INVOER	UITKOMSTEN STERKTEBEPALING O.B.V. OPGEGEVEN PROEFRESULTATEN
Rekenwaarde van het optredende buigend moment (M_{Ed}):	Voldoende proefresultaten ($n \geq 4$)? 4 VOLDOET
7,9	Steekproefgemiddelde: 31,481
	Standaarddeviatie van de steekproef: 6,206
Gevolgklasse (CC1, CC2 of CC3):	Karakteristieke waarde van de sterkte: 18,479
CC2	Rekenwaarde van de sterkte (M_{Rd}): 3,762
Testresultaten (M_R) - max. 100 invoervelden:	Unity check (M_{Ed} / M_{Rd}): 2,100 VOLDOET NIET
29,01	
24,09	
35,71	
36,47	

Figuur 3.2: Screenshot in-en uitvoer rekentool voor belastingsituatie 2 op basis van vier proeven.

ontwikkelingen en de gemeten kracht-verplaatsingscurven duiden op buiging als faalmechanisme met een ductiel bezwijkgedrag. Op basis van deze informatie kunnen direct alle proeven worden meegenomen in de bepaling van de rekenwaarde van de sterkte (M_{Rd}).

De in- en uitvoer van de daarvoor ontwikkelde Excel-rekentool (tabblad 2) is weergegeven in figuren 3.1 en 3.2 voor respectievelijk belastingsituatie 1 en 2. Uit de berekening blijkt dat de rekenwaarde van de weerstand voor de perronkeerwand belast vanuit de spoorzijde (M_{Rd1}) gelijk is aan 4,7 kNm. Daarmee is de sterkte van de perronkeerwand voor deze belastingsituatie net voldoende, dat wil zeggen: $M_{Rd1} > M_{Ed1}$, waarbij de rekenwaarde van de optredende horizontale belasting (M_{Ed1}) bepaald is conform SPC00112 [1]. De weerstand voor de perronkeerwand belast vanuit perronzijde (M_{Rd2}) is gelijk aan 3,76 kNm, en deze voldoet daarentegen ruimschoots niet met een unity check M_{Ed2} / M_{Rd2} van 2,1.

Naar aanleiding van deze resultaten besluit Vriesbeton de proevenserie uit te breiden door voor elke belastingsituatie nog twee proeven uit te voeren. De resultaten van de uitgebreide

Tabel 3.2: Maximale momentweerstand (M_R) [kNm] per proef in beide belastingsituaties, volgend uit zes proeven.

1: Belasting vanuit spoorzijde ^a	2: Belasting vanuit perronzijde ^b
18,39	29,01
16,25	24,09
21,14	35,71
21,43	36,47
19,30	31,16
20,64	34,47

^a De data is gegenereerd met random sampling uit een lognormale verdeling met een gemiddelde van 20 kNm en een standaarddeviatie van 2 kNm.

^b De data is gegenereerd met random sampling uit een lognormale verdeling met een gemiddelde van 33 kNm en een standaarddeviatie van 4,95 kNm.

BENODIGDE INVOER	UITKOMSTEN STERKTEBEPALING O.B.V. OPGEGEVEN PROEFRESULTATEN
Rekenwaarde van het optredende buigend moment (M_{Ed}):	Voldoende proefresultaten ($n \geq 4$)? 6 VOLDOET
4,6	Steekproefgemiddelde: 19,545
	Standaarddeviatie van de steekproef: 2,063
Gevolgsklasse (CC1, CC2 of CC3):	Karakteristieke waarde van de sterkte: 15,458
CC2	Rekenwaarde van de sterkte (M_{Rd}): 10,198
Testresultaten (M_R) - max. 100 invoervelden:	Unity check (M_{Ed} / M_{Rd}): 0,451 VOLDOET
18,39	
16,25	
21,14	
21,43	
19,3	
20,64	

Figuur 3.3: Screenshot in-en uitvoer rekentool voor belastingsituatie 1 op basis van zes proeven.

BENODIGDE INVOER	UITKOMSTEN STERKTEBEPALING O.B.V. OPGEGEVEN PROEFRESULTATEN
Rekenwaarde van het optredende buigend moment (M_{Ed}):	Voldoende proefresultaten ($n \geq 4$)? 6 VOLDOET
7,9	Steekproefgemiddelde: 31,897
	Standaarddeviatie van de steekproef: 5,057
Gevolgsklasse (CC1, CC2 of CC3):	Karakteristieke waarde van de sterkte: 22,357
CC2	Rekenwaarde van de sterkte (M_{Rd}): 11,993
Testresultaten (M_R) - max. 100 invoervelden:	Unity check (M_{Ed} / M_{Rd}): 0,659 VOLDOET
29,01	
24,09	
35,71	
36,47	
31,16	
34,47	

Figuur 3.4: Screenshot in-en uitvoer rekentool voor belastingsituatie 2 op basis van zes proeven.

proevenseries zijn getoond in tabel 3.2. De in- en uitvoer voor de berekeningen van de rekenwaarde van de weerstand zijn weergegeven in figuren 3.3 en 3.4. Het vergroten van het aantal proeven—en daarmee het verkleinen van de statistische onzekerheid—leidt tot hogere rekenwaarden, namelijk: $M_{Rd1} = 10,2$ kNm en $M_{Rd2} = 12$ kNm. Uit de unity checks blijkt dat voor beide belastingsituaties de rekenwaarden van de momentweerstand groter zijn dan de bijbehorende rekenwaarden van de optredende momenten, waarmee is aangetoond dat Vriesbeton's innovatieve type perronkeerwand voldoende sterkte heeft.

3.4 Tekstvoorstel productspecificatie ProRail

Voor gevallen waarin de sterkte van prefab betonachtige perronkeerwanden rechtstreeks wordt bepaald uit proeven, bijvoorbeeld wanneer de keerwanden gemaakt zijn van nieuwe, betonachtige materialen die buiten het toepassingsgebied van NEN-EN 1992 [2] vallen, wordt voorgesteld om de volgende bepaling op te nemen in de revisie van productspecificatie SPC00112 [1]:

Bepaling rekenwaarde sterkte perronkeerwand vanuit testresultaten

De rekenwaarde voor de sterkte van de perronkeerwand vanuit proeven (“design by testing”) dient bepaald te worden op basis van de probabilistische methode zoals beschreven in bijlage D van NEN-EN 1990. Er wordt aanbevolen om gebruik te maken van de Excel-rekentool, waarvan de actuele versie (23 september 2025) als bijlage bij deze productspecificatie is opgenomen. De bepaling van de rekenwaarde van de weerstand en het gebruik van de rekentool dient te geschieden zoals beschreven in rapport TNO 2025 R12527.

4 Kwaliteitsborging via controleproeven

4.1 Belang van controleproeven

Om te voorkomen dat onvoldoende presterende perronkeerwanden in het spoornet worden geplaatst, kunnen controleproeven uitkomst bieden. Dit type proeven wordt uitgevoerd op elementen die reeds gecertificeerd zijn. Hierbij wordt wederom de weerstand beschouwd, niet de materiaaleigenschappen zoals de betondruksterkte. Na afgifte van een certificaat mag een producent perronkeerwanden leveren voor toepassing in het spoornet gedurende de geldigheidsduur van het certificaat, namelijk vijf jaar. Certificering is gebaseerd op initiële beproevingen, de aanwezigheid van een kwaliteitssysteem, periodieke bezoeken door de certificerende instantie en andere keuringscriteria. Toch biedt dit geen absolute garantie dat alle geleverde elementen gedurende die periode consistent blijven presteren. Gedurende de certificaatperiode kunnen zich namelijk veranderingen voordoen in grondstofsamenstelling, productieproces, opslag of transport. Zelfs kleine variaties kunnen al leiden tot afwijkingen in mechanische eigenschappen van de geproduceerde elementen. Dus kunnen er, ondanks de certificeringsvoorwaarden, toch twijfels ontstaan over de prestaties van geleverde perronkeerwanden gedurende de certificeringsduur.

Controleproeven geven ProRail de mogelijkheid om willekeurig (een beperkt aantal) elementen uit de lopende productie te selecteren en te beproeven. Zo kunnen afwijkingen tijdig worden opgespoord, de productkwaliteit worden bewaakt en bij twijfel objectief worden getoetst. Indien nodig kunnen direct maatregelen worden genomen om toepassing van perronkeerwanden met onvoldoende weerstand in het spoornet te voorkomen. De mogelijkheid voor de beheerder tot het uitvoeren van controleproeven stimuleert producenten daarmee om voortdurend zorg te dragen voor correct functionerende elementen. De controleproeven zijn dus een essentieel onderdeel van het kwaliteitsborgingssysteem: ze bieden zekerheid over de naleving van specificaties en versterken het vertrouwen van de beheerder in de betrouwbaarheid van de geleverde perronkeerwanden.

4.2 Verschil in ontwerpwaarde controle en initiële proeven

Zoals beschreven in [hoofdstuk 3](#) komt de ontwerpwaarde tot stand door het beschouwen van de natuurlijke variabiliteit en de statistische modelonzekerheid. Omdat de statistische onzekerheid vrij groot is bij een klein aantal proeven zijn de ontwerpwaarden laag ten opzichte van de gemiddelde weerstand. Door de natuurlijke variabiliteit, en omdat het aantal proefresultaten kan verschillen tussen de initiële en de controleproeven, is het mogelijk dat verschillende rekenwaarden worden gevonden—zelfs wanneer de werkelijke weerstandsverdeling in feite onveranderd is. Normaliter zullen bij een controleproef het aantal te testen elementen klein zijn, en zodoende kan toegenomen onzekerheid tot dermate lage ontwerpwaarden leiden.

Met behulp van simulaties wordt hier vastgesteld in welke mate verschillen in de ontwerpwaarde kunnen worden verwacht bij controleproeven. Hiertoe is een lognormaal verdeelde weerstand aangenomen met een variatiecoëfficiënt van 0,07. Deze waarde is een lage inschatting voor de momentweerstand van gewapendbetonachtige materialen in een gecontroleerde testomgeving. (Uitgaan van een lage waarde is in dit geval conservatief.) In de simulaties worden eerst initiële testrealisaties gegenereerd, waaruit de rekenwaarde wordt afgeleid (M_{Rdi}). Daarna worden een nieuw aantal realisaties gegenereerd die de controleproeven vertegenwoordigen, waaruit opnieuw een rekenwaarde wordt bepaald (M_{Rdc}). Vanuit de simulaties is vervolgens het 90%-betrouwbaarheidsinterval bepaald voor de verhouding M_{Rdc}/M_{Rdi} , waarvan de ondergrens, mediaan en bovengrens zijn gegeven in [tabel 4.1](#).

Tabel 4.1: Verwachte verschillen tussen de ontwerpwaarde van de weerstand bepaald vanuit controle en initiële proeven (90%-betrouwbaarheidsinterval van M_{Rdc}/M_{Rdi}).

Initieel aantal	Controle aantal	Ondergrens	Mediaan	Bovengrens
4	4	0,50	1,00	1,99
	5	0,71	1,20	2,22
	6	0,81	1,31	2,34
	10	0,94	1,45	2,54
	20	1,00	1,53	2,65
5	4	0,45	0,83	1,41
	5	0,66	1,00	1,53
	6	0,76	1,08	1,60
	10	0,90	1,20	1,71
	20	0,96	1,26	1,77
6	4	0,43	0,77	1,24
	5	0,63	0,92	1,32
	6	0,73	1,00	1,37
	10	0,87	1,11	1,45
	20	0,94	1,17	1,50
10	4	0,39	0,69	1,06
	5	0,59	0,83	1,12
	6	0,69	0,90	1,14
	10	0,84	1,00	1,19
	20	0,92	1,05	1,22
20	4	0,38	0,66	1,00
	5	0,56	0,79	1,04
	6	0,67	0,86	1,06
	10	0,82	0,95	1,09
	20	0,90	1,00	1,11
30	4	0,37	0,65	0,98
	5	0,56	0,78	1,02
	6	0,66	0,85	1,04
	10	0,82	0,94	1,07
	20	0,90	0,99	1,08

Uit de resultaten van [tabel 4.1](#) wordt duidelijk dat de afwijking in de ontwerpwaarde volgend uit controleproeven ten opzichte van de initiële proeven, afhankelijk is van het aantal testen in beide situaties. Alleen bij evenveel testen wordt een gelijke ontwerpwaarde worden verwacht—maar het verschil kan alsnog erg groot zijn, met name wanneer het aantal testen klein is.

4.3 Gebruik van controleproeven in de praktijk

In de regel worden de proeven uitgevoerd op willekeurig gekozen elementen uit de lopende productie, zodat een representatief beeld van de actuele productkwaliteit wordt verkregen. De eigenschappen die worden onderzocht, de uitvoering van de proeven, en de wijze waarop de proefresultaten worden getoetst blijven onveranderd en zijn reeds beschreven in [hoofdstukken 2 en 3](#). De resultaten van de controleproeven worden dus niet samengevoegd met initiële proeven: er wordt met alleen de controleproef resultaten opnieuw de rekenwaarde bepaald.

De frequentie van de controleproeven kan worden bepaald op basis van verstreken tijdsduur, of op basis van het aantal geproduceerde elementen. Anderzijds kunnen controleproeven extra zekerheid bieden bij de uitvoering van een groot of belangrijk project. Uit [tabel 4.1](#) blijkt dat een zeer gering aantal controleproeven onvoldoende inzicht geeft in de beoordeling van de weerstand. Wanneer het aantal controleproeven klein is ten opzichte van het initiële aantal proeven, wordt altijd een lagere ontwerpwaarde verwacht, omdat de statistische onzekerheid groter is (zie de mediaanwaarden in [tabel 4.1](#)). Om in te schatten of de initiële en controle-rekenwaarde met elkaar in overeenstemming zijn, wordt aanbevolen te controleren of de verhouding (M_{Rdc}/M_{Rdi}) binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval valt (zie de onder- en bovengrenswaarden in [tabel 4.1](#)).

Voorbeeld: Uit de initiële beproeving ter certificering is uit 6 perronzijde testen een rekenwaarde van $M_{Rdi} = 12,0$ kNm naar voren gekomen met een bijbehorende *unity check* van 0,66 (zie [paragraaf 3.3](#)). Om te controleren of de rekenwaarde aannemelijk is, zijn er op een later moment 4 controleproeven uitgevoerd, resulterend in $M_{Rdc} = 7,8$ kNm. Deze waarde lijkt in eerste instantie alarmerend laag; echter, de verhouding is $7,8 / 12,0 = 0,65$ en valt daarmee binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval van 0,43 tot 1,24 (zie [tabel 4.1](#)). Daarnaast was bij de initiële beproevingen slechts een rekenwaarde van $0,66 \times 12,0 = 7,9$ kNm vereist. Deze vergelijking heeft geen betrekking op het wel of niet aannemelijk zijn van de initiële rekenwaarde, maar kan helpen in het geval van lage controlewaarden. In dit geval is er dus geen reden om te concluderen dat de weerstand van de perronkeerwanden wezenlijk is veranderd. Bovendien is het waarschijnlijk dat met één extra controleproef de ontwerpwaarde boven 7,9 kNm zal uitkomen.

4.4 Tekstvoorstel productspecificatie ProRail

Om invulling te geven aan kwaliteitsborging via controleproeven voor perronkeerwanden wordt voorgesteld om de volgende tekst op te nemen in de revisie van productspecificatie SPC00112 [1]:

Controleproeven na afgifte certificaat

De beheerder mag op ieder moment beslissen een beperkt aantal perronkeerwanden uit de lopende productie te selecteren om te beproeven. Om tot een objectief oordeel te komen over het voldoende zijn van de momentweerstand wordt voor de controleproeven de rekenwaarde van de weerstand apart bepaald. Het wordt aanbevolen gebruik te maken van de Excel-rekentool, waarvan de actuele versie (23 september 2025) als bijlage bij deze productspecificatie is opgenomen. De hieruit verkregen waarde kan worden vergeleken met de rekenwaarde voor de overeenkomstige belastingsituatie die op de productspecificatie staat vermeld. Alleen wanneer de verhouding tussen deze twee waarden binnen het 90%-betrouwbaarheidsinterval in tabel 4.1 van rapport TNO 2025 R12527 valt, kan worden gesteld dat de weerstand van de perronkeerwanden niet wezenlijk is veranderd. Wanneer de waarde buiten dit interval valt, wordt geadviseerd de mogelijke oorzaak te onderzoeken en eventueel aanvullende testen uit te voeren alvorens de productieserie af te keuren.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

In dit onderzoek is een methodiek ontwikkeld om de weerstand van prefab betonachtige perronkeerwanden te bepalen op basis van beproevingen, en is onderzocht hoe deze prestaties tijdens de geldigheidsduur van het productcertificaat kunnen worden geborgd. De belangrijkste conclusies zijn als volgt:

1. **Bepalen van de rekenwaarde van de weerstand:** Het toepassen van een probabilistische benadering, conform bijlage D van NEN-EN 1990 [4], biedt een internationaal geaccepteerde methode om de rekenwaarde voor de weerstand af te leiden uit (een beperkt aantal) proefresultaten. Hierbij wordt expliciet rekening gehouden met de statistische modelonzekerheid bij een beperkt aantal proeven. De methode is toepasbaar voor traditioneel gewapend beton én voor alternatieve betonachtige materialen, waarbij extra aandacht uit dient te gaan naar het bezwijkgedrag.
2. **Geschiktheid en uitvoering van de proeven:** Voor een consistente bepaling van de rekenwaarde dient de proevenserie representatief te zijn voor de productpopulatie. Dit vereist overeenkomstigheid in ontwerp, materialen en productieparameters. De proeven moeten worden uitgevoerd tot bezwijken van het proefstuk zodat het faalmechanisme en bezwijkgedrag duidelijk wordt. Een minimum van vier proeven is noodzakelijk vanwege de grote statistische onzekerheid bij kleinere steekproeven, maar levert doorgaans een conservatieve rekenwaarde op. Meer proeven leiden doorgaans tot een hogere rekenwaarden, het is aan de producent om hier een afweging in te maken.
3. **Rekentool als hulpmiddel voor certificering:** De ontwikkelde Excel-rekentool ondersteunt certificerende instanties en producenten bij de toepassing van de methodiek. De tool voldoet aan de uitgangspunten van NEN-EN 1990 [4] en voorgestelde revisie van SPC00112 [1] en vormt een praktisch hulpmiddel voor zowel initiële beproevingen als eventuele controleproeven. De tool is flexibel met betrekking tot het aantal proeven en de gevolgklasse van het bouwwerk waar de perronkeerwanden deel uit van zullen maken.
4. **Kwaliteitsborging tijdens de certificeringsperiode:** Omdat de prestaties van prefab perronkeerwanden kunnen variëren door bijvoorbeeld wijzigingen in grondstoffen, productieparameters of logistieke omstandigheden, kunnen controleproeven extra kwaliteitszekerheid bieden. De rekenwaarde die uit controleproeven volgt, wordt steeds onafhankelijk bepaald (zonder samenvoegen van proefresultaten). Er zijn statistische simulaties uitgevoerd om 90%-betrouwbaarheidsintervallen te bepalen waarbij zowel natuurlijke variabiliteit als statistische onzekerheid bij een beperkt aantal proeven wordt meegenomen. Het vergelijken van de initiële en controle rekenwaarde van de weerstand via de afgeleide intervallen biedt een objectief criterium om te beoordelen of de kwaliteit wezenlijk is gewijzigd.

5.2 Aanbevelingen

Naast bovengenoemde conclusies zijn de volgende aanbevelingen geformuleerd:

1. **Opnemen van beide procedures:** Het is wenselijk om zowel de procedure voor het bepalen van de rekenwaarde via testen als die voor controleproeven formeel op te nemen in de revisie van SPC00112 [1]. De tekstvoorstellen in dit rapport bieden hiervoor invulling.
2. **Gebruik van de rekentool sterk aanbevelen:** Om consistentie tussen projecten en producenten te garanderen wordt aanbevolen de rekentool op te nemen als gestandaardiseerd hulpmiddel, bijvoorbeeld als bijlage bij een revisie van SPC00112 [1]. Hiermee worden berekeningen eenduidig uitgevoerd en worden fouten geminimaliseerd. Het gebruik ervan wordt niet verplicht gesteld aangezien een correcte implementatie van de methodiek in bijlage D van NEN-EN 1990 [4] equivalente resultaten geeft en kan iedere omgeving kan worden geïmplementeerd.
3. **Grote proefseries waar mogelijk:** Het verdient aanbeveling om meer dan het minimumniveau van vier proeven uit te voeren omdat dit de statistische modelonzekerheid verkleint en onnodig lage rekenwaarden voorkomt. Dit geldt bij de initiële proeven, maar ook bij de controleproeven: een kleine testserie ter controle levert feitelijk weinig informatie op.

6 Referenties

- [1] ProRail. *Productspecificatie: Perronkeerwand type 1980 en type standaard 1000 mm*. SPC00112. Versie 005. 2022.
- [2] Nederlands Normalisatie Instituut (NEN). *NEN-EN 1992-1-1+C2+A1:2015/NB+A1:2020: Eurocode 2: Ontwerp van betonconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*. 2020.
- [3] Nederlands Normalisatie Instituut (NEN). *NEN-EN 15258:2008: Vooraf vervaardigde betonproducten – Keerwanden*. 2008.
- [4] Nederlands Normalisatie Instituut (NEN). *NEN-EN 1990+A1+A1/C2:2019/NB:2019: Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp*. 2019.
- [5] JCSS. *Probabilistic model code*. Joint Committee on Structural Safety, 2015. <https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code/>.
- [6] Nederlands Normalisatie Instituut (NEN). *NEN 8005+A1:2025: Nederlandse invulling van NEN-EN 206: Beton – Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit*. 2025.

7 Ondertekening

TNO › Mobility & Built Environment › Delft, 19 januari 2026

b.a. Dr.ir. A.T. Slobbe
Ir. R. de Vries
Auteur

Dr.ir. A.H.J.M. Vervuurt
Project manager

Ir.ing. M. Steins
Research manager
Building Materials & Structures

Mobility & Built Environment

Molengraaffsingel 8
2629 JD Delft
www.tno.nl