

BEOORDELEN VAN BETON IN DE CONSTRUCTIE

Een betontechnoloog krijgt gewoonlijk niet te maken met het beoordelen van beton in de constructie. Dat is het werkveld van de betononderhoudskundige. Toch kan het in bepaalde gevallen voorkomen dat de betontechnoloog hiermee wel te maken krijgt.

Bijvoorbeeld als er twijfels bestaan over de sterkte in het werk. Dit kan zijn omdat de conformiteitscontrole daartoe aanleiding geeft. Maar het kan ook zijn omdat er bij de uitvoering fouten zijn gemaakt en de betontechnoloog erbij wordt betrokken omdat onduidelijk is wat de oorzaak is. In dat geval dient een betontechnoloog te kunnen (laten) beoordelen of de sterkte in het werk voldoet.

Het kan ook voorkomen dat er problemen zijn met het oppervlak van het beton, bijvoorbeeld in de vorm van loskomende stukken bij monoliet afgewerkte betonvloeren of bij vorstschade. Ook dan zal een betontechnoloog moeten kunnen beoordelen of dat te maken heeft met de gebruikte grondstoffen en het mengsel.

7.1 Inleiding

Bij de beoordeling van beton als eindproduct spelen veel aandachtspunten een rol. In verschillende situaties en voor verschillende producten kan deze beoordeling bovendien heel verschillende aspecten omvatten.

In hoofdstuk 5 is al uitgebreid ingegaan op mogelijke onvolkomenheden aan het uiterlijk van beton. In veel gevallen gaat het dan om betonproducten of betonconstructies waaraan bewust esthetische eisen zijn gesteld en waarbij deze eisen ook in de projectspecificatie zijn vastgelegd. Niet alle onvolkomenheden laten zich eenvoudig eenduidig beschrijven of "in een vakje stoppen", waardoor soms toch achteraf discussies ontstaan. Bovendien is de grens tussen uitsluitend esthetische onvolkomenheden en onvolkomenheden die ook invloed op duurzaamheid/levensduur kunnen hebben, niet altijd duidelijk.

In dit hoofdstuk richten we ons vooral op de beoordeling van beton als eindproduct in relatie tot de bruikbaarheid en levensduur van betonconstructies.

7.2 Visuele inspectie

De eenvoudigste en tegelijkertijd waarschijnlijk meest effectieve beoordeling, is de visuele inspectie. Dit levert heel nuttige informatie over het gebruikte materiaal, de wijze van uitvoeren en de effecten die invloeden van buitenaf mogelijk op de constructie hebben gehad. Afhankelijk van de achtergronden van de inspectie kan deze heel globaal of heel gedetailleerd en gestructureerd worden uitgevoerd.

Bij een visuele inspectie kunnen gebreken aan het licht komen zoals scheurvorming, vervorming, kleurverschillen en grindnesten,

De beoordeling van beton als eindproduct kan zich beperken tot een visuele beoordeling, maar kan ook gedetailleerd worden uitgevoerd. Bijvoorbeeld bij twijfel om vast te stellen of de constructie voldoet aan de in de projectspecificatie gestelde eisen ten aanzien van sterkte en duurzaamheid.

Een eerste onderscheid bij de beoordeling van beton als eindproduct ligt voor de hand: gaat het om vooraf vervaardigde (geprefabriceerde) producten of elementen of betreft het een in het werk gestorte betonconstructie?.

7.3 Betonproducten en vooraf vervaardigde betonelementen.

Het werken met vooraf vervaardigde producten heeft het voordeel dat men "ziet wat men krijgt". Dat klinkt mooi, maar een visuele beoordeling is natuurlijk per definitie beperkt tot de uiterlijke kenmerken. Eigenschappen als sterkte en duurzaamheid zijn niet eenvoudig "zichtbaar".

Daarom worden vrijwel alle betonproducten tegenwoordig geleverd onder certificaat. In dat geval kan de afnamecontrole tot een minimum beperkt blijven. Bij niet-gecertificeerde producten ligt dat gecompliceerder.

7.3.1 Afname van gecertificeerde producten

Betonwaren en betonelementen worden in Nederland normaliter onder certificaat geleverd. Dit betekent dat pas na de interne controles en goedkeuringen bij de producent de producten naar de bouwplaats worden getransporteerd. De controle op de bouwplaats kan dan tot een minimum beperkt blijven. In alle gevallen moeten de afleverdocumenten worden gecontroleerd om vast te stellen of het juiste product is geleverd. Het ligt voor de hand dit te combineren met een visuele beoordeling van de geleverde producten.

7.3.2 Afname van niet-gecertificeerde producten

Een afnamekeuring van niet-gecertificeerde producten verdient de nodige aandacht. Hierbij moeten vooraf duidelijke afspraken worden gemaakt over de door de producent of leverancier uit te voeren productiecontroles, keuringen en de rapportage daarvan. Ook de door de afnemer uit te voeren controles moeten vooraf duidelijk zijn afgesproken en vastgelegd.

Leg daarbij niet alleen de "soort" keuringen vast, maar omschrijf ook de criteria en frequenties duidelijk.

7.4 **Beoordeling van de druksterkte in constructies**

In bepaalde gevallen kan het gewenst zijn de betondruksterkte zoals werkelijk aanwezig in de betonconstructie vast te stellen. Bijvoorbeeld indien wordt getwijfeld aan de kwaliteit van een betonconstructie, of indien resultaten van de productie- of afnamecontrole daartoe aanleiding geven.

NEN-EN 13791 "Beoordeling van de druksterkte van beton in constructies en vooraf vervaardigde betonelementen" voorziet in de regelgeving voor die situaties.

Het spreekt voor zich dat deze norm bedoeld is voor uitzonderingssituaties en niet ter vervanging van de keuringscriteria zoals zijn vastgelegd in NEN-EN 206 "Beton".

7.4.1 Toepassingsgebied

De norm beschrijft de methoden en procedures voor het bepalen van de sterkte in betonconstructies en vooraf vervaardigde betonnen onderdelen. Onderzoek naar de sterkte van beton in constructies of aan vooraf vervaardigde betonelementen kan nodig zijn in de volgende situaties:

- Als de resultaten van de controleproef niet voldoen aan de gestelde eisen, bijvoorbeeld als de sterkte na 28 dagen achter blijft bij de verwachting.
- Wanneer er om andere redenen twijfel bestaat aan de kwaliteit van het beton in de constructie, bijvoorbeeld bij matige uitvoering, vorstschade of brand.
- Als de druksterkte van het beton niet bekend is, bijvoorbeeld bij renovatie of verbouw van een gebouw.
- In het (uitzonderlijke!) geval dat de projectspecificatie dit voorschrijft.

Onderzoek aan de constructie kan meer inhouden dan uitsluitend de bepaling van de sterkte van het beton. Met name duurzaamheidsaspecten zoals de dekking van het beton op de wapening, de aanwezigheid en afmetingen van scheuren, het chloridegehalte, de carbonatatie, de porositeit en de vorstbestandheid van het beton zijn daarvan bekende voorbeelden.

Meer informatie over dit onderwerp geeft CUR-Aanbeveling 72 "Inspectie en onderzoek van betonconstructies".

In het kader van deze opleiding gaat het te ver om de norm en CUR-Aanbevelingen gedetailleerd te behandelen. We beschrijven hierna in grote lijnen de methoden van onderzoek naar de sterkte op basis van NEN-EN 13791.

7.4.2 Methoden voor het bepalen van de druksterkte in het werk

Voor het onderzoek naar de druksterkte is het onderzoek op basis van uit het werk geboorde cilinders de referentie. Deze directe methode is voorgeschreven indien er twijfel is aan de betonkwaliteit in het werk op basis van de uitgevoerde conformiteitbeoordeling.

In andere gevallen, bijvoorbeeld wanneer er om andere redenen twijfel bestaat aan de kwaliteit van het beton in de constructie - bijvoorbeeld bij matige uitvoering, vorstschade of brand - of als de druksterkte van het beton niet bekend is - bijvoorbeeld bij renovatie of verbouw van een gebouw - mag de druksterkte in het werk ook worden bepaald met een alternatieve methode, gebaseerd op een indirecte meetmethode (terugslaghamer, ultrasone geluidssnelheid of uittrekproef). Deze indirecte testmethoden voorzien dan in een alternatief voor de beoordeling met geboorde cilinders.

De indirecte methoden mogen, na kalibratie met cilinderwaarden, op de volgende manier worden gebruikt:

- Beoordeling op basis van één indirecte testmethode;
- Beoordeling op basis van een combinatie van indirecte testmethoden;
- Beoordeling op basis van een combinatie van indirecte methoden en boorkernen.

7.4.3 Beproevingnormen

Voor de beproeving van geboorde cilinders en de metingen met de verschillende indirecte methoden zijn de volgende beproevingsnormen van toepassing:

- Bepaling van de druksterkte van uitgeboorde cilinders:
- NEN-EN 12504-1 Beproeving van beton in constructies - Deel 1: Boorkernen - Monsterneming, onderzoek en bepaling van de druksterkte.
- Bepaling van de oppervlaktehardheid met behulp van een terugslaghamer:
- NEN-EN 12504-2 Beproeving van beton in constructies - Deel 2: Niet-destructief onderzoek - Bepaling van de terugslagwaarde.
- Bepaling van de uittrekkraft:
- NEN-EN 12504-3 Beproeving van beton in constructies - Deel 3: Bepaling van de uittrekkraft.
- Bepaling van de elasticiteitsmodulus door meting van de voortplantingssnelheid van een geluidsgolf:
- NEN-EN 12504-4 Beproeving van beton - Deel 4: Bepaling van de ultrasone-pulssnelheid.

7.4.4 Onderzoek met behulp van geboorde cilinders

Voor het onderzoek met behulp van geboorde cilinders is een aantal punten van belang:

- Het aantal cilinders dat moet worden geboord voor de beoordeling van een bepaald gebied hangt af van het te onderzoeken volume beton en het doel van het onderzoek. Om betrouwbare resultaten te krijgen moet een zo groot mogelijk aantal cilinders worden beproefd.
- De bepaling van de sterkte in het werk voor een bepaald gebied omvat ten minste 3 geboorde cilinders.
- De locaties moeten bereikbaar zijn.
- De testlocaties moeten representatief zijn voor de hele constructie of voor het onderdeel dat beoordeeld wordt.
- Het selecteren van de plaats en het boren moeten zodanig plaatshebben, dat de veiligheid van de constructie voldoende gewaarborgd blijft.
- Bij het boren moet de wapening zoveel mogelijk worden gemeden. Deze wapening kan met behulp van een zogenoemde 'wapeningsdetector' worden gelokaliseerd.
- De ontstane boorgaten moeten worden gedicht met een betonspecie van ten minste dezelfde sterkte- en milieuklasse of een geschikte cementgebonden reparatiemortel (die voldoet aan CUR-Aanbeveling 54).
- De diameter en de lengte/diameter-verhouding van de geboorde cilinder bepaalt op welke wijze de met een boorkern verkregen meetresultaten moeten worden geïnterpreteerd:
 - Een boorkern met een diameter van 100 mm en lengte/diameter-verhouding van $l/d = 1$: beschouw de meetresultaten als 150 mm kubussen.
 - Een boorkern met een diameter tussen 100 en 150 mm en lengte/diameter-verhouding van $l/d = 2$: beschouw de meetresultaten als cilinders 150/300.

De geboorde cilinders moeten worden genomen, beoordeeld en geprepareerd overeenkomstig NEN-EN 12504-1. In deze norm wordt verwezen naar normen betreffende de eisen aan proefstukken (maattoleranties; vlakheid; haaksheid).

De bepaling van de druksterkte aan geboorde cilinders is beschreven in NEN-EN 12390-3. De boorkernen moeten de laatste 3 dagen worden bewaard onder laboratoriumcondities.

Voor het onderzoek met behulp van geboorde cilinders mag uit de volgende twee benaderingen worden gekozen:

7.4.4.1 *Methode A: bij meer dan 15 cilindersterktes.*

De geschatte sterkte in het werk van het betreffende gebied is de laagste waarde van:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - k_2 \times s$$

of:

$$f_{ck,is} = f_{is,laagste} + 4$$

Waarin:

- $f_{ck,is}$ = de karakteristieke druksterkte in het werk;
- $f_{m(n),is}$ = de gemiddelde druksterkte van de geboorde cilinders;
- $f_{is,laagste}$ = de laagst gemeten druksterkte van de geboorde cilinders;
- s = de standaardafwijking van de testresultaten of 2,0: maatgevend is de hoogste waarde;
- k_2 = 1,48 of de waarde uit nationale regelgeving.

Tabel 7.1 Voorbeeld van resultaten druksterkte van 15 geboorde cilinders.

boorkern	druksterkte in N/mm ²
1	33,8
2	35,9
3	38,5
4	39,9
5	33,8
6	42,1
7	36,5
8	37,4
9	39,9
10	40,5
11	37,3
12	45,0
13	40,0
14	38,7
15	36,5

Van deze serie van 15 meetwaarden is het gemiddelde en de standaardafwijking berekend:

$$f_{cm(15),is} = 38,4 \text{ N/mm}^2 \text{ en}$$

$$s_{15} = 3,01 \text{ N/mm}^2.$$

De karakteristieke druksterkte in het werk is de laagste waarde van

$$f_{cm(15),is} - 1,48 \times s = 38,4 - 1,48 \times 3,01 = 33,9 \text{ N/mm}^2 \text{ en}$$

$$f_{is,laagste} = 33,8 + 4 = 37,8 \text{ N/mm}^2.$$

7.4.4.2 *Methode B: tussen 3 en 15 cilindersterktes*

De geschatte sterkte in het werk van het betreffende gebied is de laagste waarde van:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - k$$

of:

$$f_{ck,is} = f_{is,laagste} + 4$$

De waarde voor k hangt af van het aantal beproefde cilinders, zie tabel 7.2:

Tabel 7.2 k als functie van het aantal beproefde cilinders.

n	k
$\geq 10 \text{ en } \leq 14$	5
$\geq 7 \text{ en } \leq 9$	6
$\geq 3 \text{ en } \leq 6$	7

Als voorbeeld zijn de eerste 9 resultaten van tabel 7.1 beoordeeld.

Van deze serie van 9 meetwaarden is het gemiddelde en de standaardafwijking berekend:

$$f_{cm(9),is} = 37,5 \text{ N/mm}^2 \text{ en}$$

$$s_9 = 2,84 \text{ N/mm}^2.$$

De karakteristieke druksterkte in het werk is de laagste waarde van

$$f_{cm(9),is} - k = 37,5 - 6 = 31,5 \text{ N/mm}^2 \text{ en}$$

$$f_{is,laagste} = 33,8 + 4 = 37,8 \text{ N/mm}^2.$$

7.4.5 Onderzoek met behulp van indirecte meetmethoden

Bij gebruik van de indirecte meetmethoden behoeven niet in alle gevallen cilinders uit het betreffende werk te worden geboord. Er kan worden gewerkt met één of een combinatie van indirecte meetmethoden (terugslaghamer, ultrasone geluidssnelheid of uittrekproef) of met een combinatie van een indirecte meetmethode en boorkernen.

De relatie tussen meetwaarden verkregen met de indirecte methode en de cilinder-druksterkte moet bekend zijn.

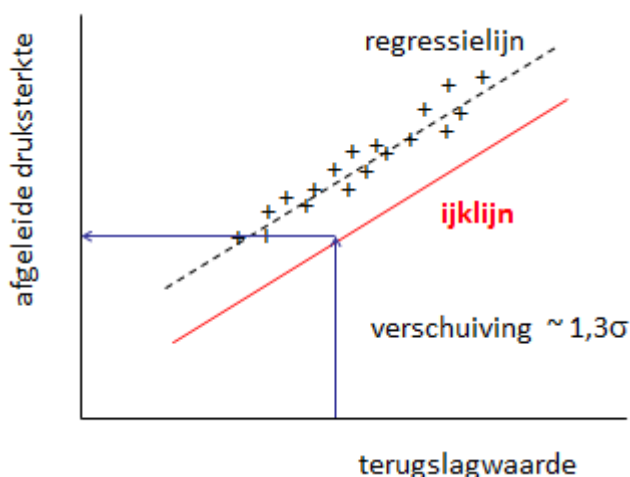
In de norm (NEN-EN 13791) worden twee alternatieve methoden uitgewerkt, gebaseerd op een combinatie van een indirecte meetmethode en boorkernen. De manier waarop deze relatie wordt vastgesteld, verschilt voor deze twee methoden.

7.4.5.1 *Alternatief 1: directe correlatie met de cilindersterkte*

Mag worden gebruikt indien voor het betreffende beton een specifieke relatie is vastgesteld tussen de sterkte in het werk en de indirecte methode (terugslaghamer, ultrasone geluidssnelheid of uittrekproef).

Deze relatie moet zijn vastgesteld op basis van ten minste 18 "gepaarde" metingen: 18 cilindersterktes en 18 waarden met de indirecte meetmethode. Een "gepaarde meting" is een combinatie van het sterkteresultaat van een geboorde cilinder en een indirecte meting op dezelfde locatie. Ook in de norm wordt opgemerkt dat deze aantallen een absoluut minimum zijn en wordt aanbevolen over een aanzienlijk groter aantal waarnemingen te beschikken om de relatie tussen de indirecte meetmethode en de sterkte in het werk vast te stellen.

De methode is vergelijkbaar met die van de gewogen rijpheid. De 18 gepaarde metingen worden uitgezet in een grafiek met op de horizontale as de terugslagwaarde (of de ultrasoonwaarde) en op de verticale as de gemeten druksterkte van de cilinders (figuur 7.1). Door deze meetpunten wordt een regressielijn getrokken en evenwijdig daaraan wordt de "ijklijn" getrokken op een afstand van ongeveer $1,3\sigma$ naar beneden.



Figuur 7.1 IJKgrafiek voor alternatief 1.

Voor het beoordelen van de sterkte moeten ten minste 15 alternatieve metingen worden uitgevoerd, waarbij met behulp van de ijkgrafiek de 15 afgeleide druksterkten worden bepaald.

De karakteristieke druksterkte in het werk is nu de laagste waarde van:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - 1,48 \times s \quad \text{met } s \geq 3 \text{ N/mm}^2$$

en

$$f_{ck, is} = f_{is, laagste} + 4$$

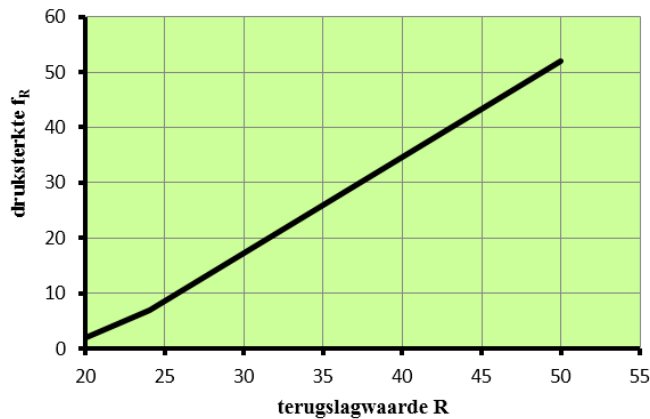
7.4.5.2

Alternatief 2: kalibratie met cilindersterktes voor een beperkt sterktegebied

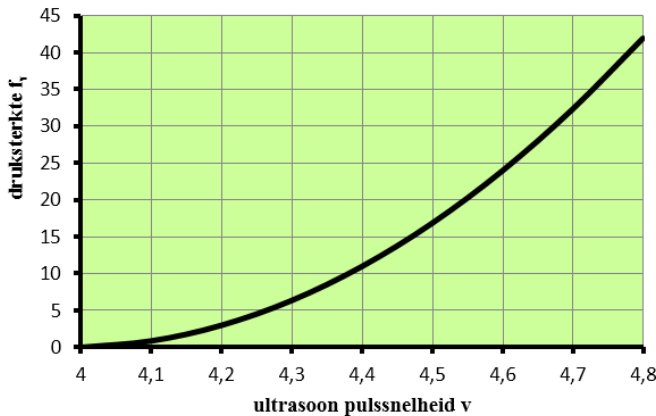
Dit alternatief is gebaseerd op een bekende relatie tussen de gekozen indirecte methode (terugslaghamer, ultrasone geluidssnelheid of uittrekproef) en de druksterkte. Aanvullend moet deze "bekende relatie" voor het te onderzoeken "sterktegebied" worden gecorrigeerd met aanvullende proeven op cilinders.

Waar bij "alternatief 1" moet worden gewerkt met een door de onderzoeker voor de betreffende indirecte meting vastgestelde relatie, mag bij dit "alternatief 2" ook worden gewerkt op basis van de in norm NEN-EN 13791 gegeven relatie. Voor de terugslaghamer zie figuur 7.2 en voor de ultrasone pulssnelheid zie figuur 7.3.

Deze relatie moet wel worden gecorrigeerd voor het betreffende sterktegebied op basis van ten minste 9 gepaarde metingen (cilinderproef en indirecte methode) aan beton uit dezelfde "populatie" in hetzelfde sterktegebied.



Figuur 7.2 Basiscurve voor de terugslaghamer uit NEN-EN 13791.



Figuur 7.3 Basiscurve voor ultrasoonmeting uit NEN-EN 13791.

Aan de hand van 9 gepaarde metingen moet de basiscurve worden gecorrigeerd naar de voor de praktijk te gebruiken relatie.

Deze metingen worden uitgezet in de hierboven aangegeven grafiek (terugslagamer of ultrasoonmeting). Per meetpunt wordt het verschil $\delta f_i = f_{is} - f_R$ bepaald.

Vervolgens wordt de gemiddelde $\delta f_{m(n)}$ en de standaardafwijking s berekend.

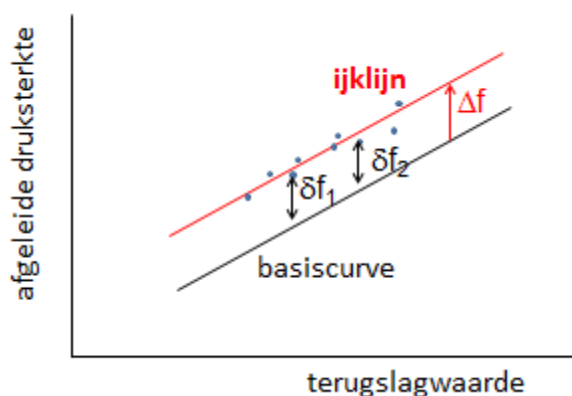
Hiermee wordt de verschuivingsfactor Δf bepaald met de formule

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 \times s$$

De waarde k_1 is afhankelijk van het aantal gepaarde metingen en volgt uit de tabel 7.3.

Tabel 7.3 Coëfficiënt k_1 afhankelijk van het aantal gepaarde metingen.

Aantal gepaarde meetresultaten	coëfficiënt k_1
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
≥ 15	1,48



Figuur 7.4 Correctie van de bestaande regressielijn voor de indirecte meetmethode met gegevens aan beton uit dezelfde populatie in het betreffende sterktegebied.

Voor het beoordelen van de sterkte moeten ten minste 15 alternatieve metingen worden uitgevoerd, waarbij met behulp van de ijkgrafiek de 15 afgeleide druksterkten worden bepaald.

De karakteristieke druksterkte in het werk is nu de laagste waarde van:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - 1,48 \times s \quad \text{met } s \geq 3 \text{ N/mm}^2$$

en

$$f_{ck,is} = f_{is, laagste} + 4$$

Praktijkvoorbeeld alternatief 2

De sterkte in het werk wordt bepaald met behulp van de terugslagamer. Daarvoor is de ijklijn bepaald door middel van ten minste 9 gepaarde metingen (druksterkte en terugslagwaarde). Het resultaat van die 9 metingen is weergegeven in tabel 7.4.

Tabel 7.4 Gepaarde metingen van terugslagamer.

mediaan terugslagwaarde	sterkte volgens basiscurve	sterkte na beproeven	verschil δf
30	17,4	21,4	4,0
32	20,9	26,1	5,2
34	24,3	30,8	6,5
36	27,8	35,5	7,7
38	31,2	40,2	9,0
40	34,7	42,9	8,2
32	20,9	26,1	5,2
34	24,3	30,2	5,9
36	27,8	35,0	7,2

Vervolgens is per meting het verschil δf bepaald. Zie de rechter kolom van tabel 7.4.

Van de 9 waarden van δf is het gemiddelde en de standaardafwijking berekend.

Het gemiddelde $\delta f_{m(9)} = 6,54 \text{ N/mm}^2$ en de standaardafwijking $s_9 = 1,62 \text{ N/mm}^2$.

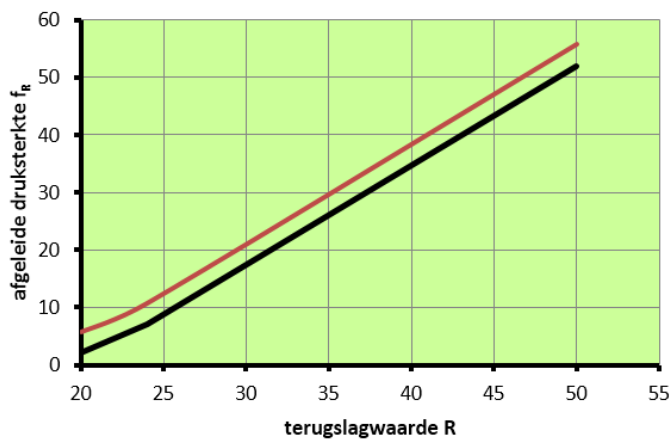
Hiermee kan de Δf worden berekend volgens $\Delta f = \delta f_{m(9)} - k \times s_9$, waarbij k afgelezen kan worden uit tabel 7.5.

Tabel 7.5 Waarden van k als functie van aantal metingen.

aantal metingen	coëfficiënt k
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
≥ 15	1,48

Uit de tabel lezen we af dat $k = 1,67$ voor 9 metingen, dus wordt de verschuivingsfactor naar boven $\Delta f = 6,54 - 1,67 \times 1,62 = 3,8 \text{ N/mm}^2$.

Deze berekening levert de volgende ijklijn van figuur 7.5.



Figuur 7.5 Basiscurve met verschoven ijklijn.

Vervolgens kan de beoordeling van de constructie worden uitgevoerd. Daarvoor worden 15 terugslagwaarden bepaald en van deze waarden wordt met behulp van de ijklijn van figuur 7.5 de afgeleide druksterkte bepaald (zie tabel 7.6).

Tabel 7.6 Beoordeling constructie m.b.v. 15 terugslagwaarden volgens alternatief 2.

mediaan terugslagwaarde	afgeleide druksterkte N/mm ²
29	19,5
31	22,9
31	22,9
33	26,4
34	28,1
34	28,1
38	35,0
40	38,5
41	40,2
39	36,8
39	36,8
38	35,0
35	29,9
40	38,5
34	28,1

Van deze reeks van 15 afgeleide druksterkten wordt het gemiddelde $f_{m(15)}$ en de standaardafwijking s_{15} berekend. De karakteristieke sterkte is de laagste waarde van $f_{m(15)} - 1,48 \times s$ en $f_{i,laagste} + 4$.

Dit levert als resultaat:

$$f_{m(15)} = 31,1 \text{ N/mm}^2$$

$$s_{15} = 6,59 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m(15)} - 1,48 \times s_{15} = 31,1 - 1,48 \times 6,59 = 21,4 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{laagste} = 19,5 + 4 = 23,5 \text{ N/mm}^2$$

De karakteristieke sterkte van deze serie is dus 21,4 N/mm²

7.4.5.3

Terugslaghamer

Van de verschillende "indirecte methoden" wordt de terugslaghamer in Nederland verreweg het meest gebruikt. Daarom een wat uitgebreider toelichting op deze methode.

Met een terugslaghamer wordt de mate van terugveren bepaald van een massa, die door een gespannen veer tegen het betonoppervlak wordt 'geschoten'. Om deze reden wordt de terugslaghamer ook wel *schiethamer* genoemd. De waarde van de terugvering is behalve van de (sterkte-)eigenschappen van het te onderzoeken betonoppervlak, ook afhankelijk van de hoek ten opzichte van het horizontale vlak. De correctie die men bij het gebruik van de hamer in een andere richting moet toepassen, is te vinden in de gebruiksaanwijzing bij de hamer. Het onderzoek moet worden uitgevoerd volgens NEN-EN 12504-2.

Er zijn verschillende uitvoeringen van de terugslaghamer. Het principe is steeds hetzelfde. De terugslaghamer 'systeem Schmidt' (zie figuur 7.6) is het meest bekend.

De bepaling van de oppervlaktehardheid met een terugslaghamer levert slechts gegevens op over de buitenste laag beton (circa 30 mm). De gevonden waarden zullen dan ook sterke verschillen kunnen vertonen. Zo maakt het uit of men de meting uitvoert op een plaats waar zich een groot stuk toeslagmateriaal vlak onder het oppervlak bevindt, of dat daar ter plaatse juist een overmaat aan mortel aanwezig is.

Ook wapening heeft een belangrijke invloed. Om deze storende factoren zoveel mogelijk uit te sluiten, worden verschillende metingen op een aantal dicht bij elkaar gelegen punten uitgevoerd; echter nooit tweemaal op dezelfde plaats, omdat er bij elke meting, afhankelijk van de sterkte van het beton, toch een geringe indrukking optreedt.

Bij het gebruik van de hamer moet men erop letten dat de plaatsen waar men meet een droog, vlak en dicht oppervlak vertonen. Eventueel moet men met behulp van een carborundumsteen (of in sommige gevallen met een elektrische slijpsteen) het oppervlak van oneffenheden ontdoen.

NEN-EN 12504-2 geeft aan dat men negen terugslagmetingen in de onmiddellijke nabijheid van elkaar moet doen, waarbij dan de mediaan van deze waarnemingen geldt als de terugslagwaarde (R) daar ter plaatse. De mediaan is de middelste uitkomst, wanneer de uitkomsten naar grootte worden gerangschikt.



Figuur 7.6 Terugslaghamer "systeem Schmidt" voor onderzoek aan de constructie.

Om de juiste werking van de terugslaghamer te controleren, moet voor gebruik een meting op een ijkaambeeld worden uitgevoerd. Bij afwijkende resultaten zal de hamer nagekeken moeten worden en kan het nodig zijn opnieuw een correlatiegrafiek op te stellen. Verschillen in de meetwaarden van plus of min 5 N/mm² zijn goed mogelijk. Daarmee wordt ook de betrekkelijkheid van de met behulp van de terugslaghamer gevonden resultaten aangegeven. De terugslaghamer als instrument voor de bepaling of al dan niet ontstikt kan worden, is discutabel, zeker als voor het betreffende sterktegebied en betontype geen betrouwbare relatie met de betonsterkte beschikbaar is.

7.4.5.4 *Ultrasonische pulssnelheid*

De indirecte methode op basis van de meting van de ultrasone pulssnelheid wordt incidenteel nog in Nederland gebruikt.

Basis van de methode is de relatie tussen de voortplantingssnelheid van geluid in beton en de (sterkte-)eigenschappen ervan. Gebleken is dat de meting van de geluidssnelheid het nauwkeurigste met behulp van ultrasone geluidsimpulsen kan worden uitgevoerd. Figuur 7.7 geeft een indruk van de daarvoor benodigde apparatuur.

De uitvoering van het onderzoek is vastgelegd in NEN-EN 12504-4, Beproeving van beton – Deel 4: Bepaling van de ultrasone pulssnelheid.

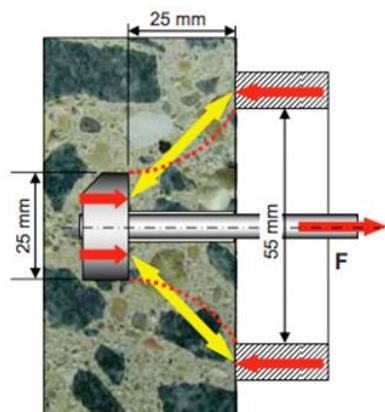


Figuur 7.7 Betontester: bepalen van de geluidssnelheid door een kubus.

De apparatuur geeft de looptijd van een geluidsimpuls tussen zend- en ontvangstopervlak meestal in tienden van microseconden. Door de deling van de op te meten afstand tussen de twee oppervlakken door de afgelezen looptijd, wordt de voortplantingssnelheid van het geluid (v) verkregen. Omdat de voortplantingssnelheid wordt beïnvloed door eventueel aanwezige wapening, is het belangrijk de metingen te verrichten op plaatsen waar zo weinig mogelijk wapening tussen de meetkoppen aanwezig is. In de praktijk wordt de meting vaak gecombineerd met de bepaling van de terugslagwaarde op dezelfde plaats.

7.4.5.5 *Uittrekproef*

Deze methode wordt in Nederland nauwelijks gebruikt en is daarom niet verder uitgewerkt. In figuur 7.8 is aangegeven hoe het uittrekken van een ingestort stalen schijfje wordt uitgevoerd. Zoals ook bij de terugslagwaarde en de ultrasone pulssnelheid kan de uittrekkraft worden gerelateerd aan de betonsterkte.



Figuur 7.8 Uittrekproef.

7.4.5.6 *Combinatiemetingen*

De hiervoor genoemde meetmethoden kunnen met elkaar worden gecombineerd om tot een nauwkeuriger uitspraak over de sterkte in de constructie te komen, dan wel om het boren van (een groot aantal) cilinders zoveel mogelijk te voorkomen. Zeker als het gaat om de meting van de sterkte in kritische constructiedelen is het boren van cilinders daaruit niet het meest voor de hand liggend. Ook al zou de sterkte van het beton voldoende blijken te zijn, dan is het uiteraard niet de bedoeling dat de verzwakking ten gevolge van het uitboren van cilinders toch tot afkeur van het betreffende constructiedeel zou kunnen leiden.

Nadat is nagegaan voor welk deel van de constructie onderzoek naar de aanwezige sterkte gewenst is, worden de meet- en boorplaatsen zo goed mogelijk aselekt gespreid over het gehele betreffende deel, zowel in horizontale als in verticale zin vastgesteld.

Het is belangrijk dat partijen het vooraf eens worden over de hierbij aan te houden procedures. De beschikbare ervaring met de te gebruiken niet-destructieve meetmethode, vooral in de vorm van correlatiegrafieken aan proefstukken en correlaties uit eerdere metingen in het werk met daarbij beoordeelde geboorde cilinders, is hierbij doorslaggevend.

7.4.6 Eisen aan de karakteristieke sterkte in het werk

De eisen aan de karakteristieke sterkte in het werk zijn niet gelijk aan de eisen voor de van toepassing zijnde sterkteklasse volgens NEN-EN 206. De minimale karakteristieke sterkte in het werk moet groter zijn dan $0,85 \times$ de karakteristieke sterkte overeenkomende met de sterkteklasse overeenkomstig NEN-EN 206. De correctiefactor 0,85 is gebaseerd op de correctiewaarden, zoals gehanteerd in de Eurocode (NEN-EN 1992-1-1). De correctie wordt gebruikt omdat deze norm al rekening houdt met de invloed van uitvoering en verhardingsomstandigheden, die uiteraard niet overeenkomen met de geconditioneerde manier van vervaardigen en verharden van proefstukken voor de controleproef.

Dit betekent bijvoorbeeld dat voor sterkteklasse C35/45 de minimale karakteristieke kubusdruksterkte in het werk ($f_{ck, is\ cube}$) $0,85 \times 45 = 38 \text{ N/mm}^2$ moet bedragen.

7.4.7 Beoordeling van het beton bij twijfel uitkomst controleproef

De criteria die in dit geval moeten worden gehanteerd, wijken af van de hiervoor uitgewerkte onderzoeksmethoden. Hoofdstuk 9 van NEN-EN 13791 geeft drie mogelijkheden voor het benodigde onderzoek en de criteria voor de beoordeling van de resultaten in deze situatie:

1. Op basis van 15 cilinders uit een te beoordelen gebied:

Indien:

$$f_{m(n), is} \geq 0,85(f_{ck} + 1,48 \times s)$$

en:

$$f_{is, laagste} \geq 0,85(f_{ck} - 4)$$

mag worden aangenomen dat het beton in dit gebied voldoet aan de betreffende sterkteklasse conform NEN-EN 206.

Hierin is:

$f_{m(n), is}$: de gemiddelde druksterkte in het werk (in situ);

$f_{is, lowest}$: de laagst gemeten druksterkte in het werk (in situ).

2. Op basis van een van de volgende twee alternatieve methoden:

- a. Indien partijen hier overeenstemming over hebben en er 15 of meer indirecte meetwaarden ter beschikking zijn (dit zijn bijvoorbeeld meetwaarden met de terugslag-hamer of ultrasoonmeter) en aanvullend ten minste 2 geboorde cilinders van de locatie waar het beton mogelijk een lagere sterkte heeft, mag het beton verondersteld worden een voldoende sterkte te hebben indien:

$$f_{is,laagste} \geq 0,85(f_{ck} - 4).$$

- b. In een klein gebied dat een of slechts enkele charges beton bevat, kunnen op basis van ervaring twee locaties geselecteerd worden voor het boren. Verondersteld mag worden dat het beton een voldoende sterkte heeft indien:

$$f_{is,laagste} \geq 0,85(f_{ck} - 4).$$

7.5 Beoordelen van schades aan beton in constructies

Het beoordelen van schades aan beton in constructies en advies over de te nemen maatregelen, is het werk van een betononderhoudskundige. Bij deze vragen spelen constructieve aspecten een belangrijke rol.

Echter een betontechnoloog kan wel bij de schades betrokken raken wanneer het vermoeden bestaat, dat de schade te maken heeft met de grondstoffen of het gebruikte mengsel. In dit hoofdstuk worden daarom een aantal schades aan beton behandeld.

- Scheurvorming
- Losliggende toplagen
- Vorst-/dooizout schade.

7.5.1 Scheurvorming

Scheurvorming in beton kan optreden in verschillende stadia en door heel verschillende oorzaken, vanaf het moment dat de betonspecie in de bekisting is gestort tot en met de gebruiksfase van de betonconstructie.

Ook als bij het ontwerp en de vervaardiging van de constructie zorgvuldig te werk is gegaan, kan scheurvorming in de constructie optreden. Dit hoeft niet direct reden voor ongerustheid te zijn. Sterker nog, wapeningsstaal in beton kan zijn werk pas doen als er enige scheurvorming in het beton is opgetreden.

7.5.1.1 *Scheurvorming in jong beton*

Scheurvorming in beton kan optreden in verschillende stadia en door heel verschillende oorzaken, vanaf het moment dat de betonspecie in de bekisting is gestort tot en met de gebruiksfase van de betonconstructie.

In de nog plastische fase, gedurende de eerste uren na het verwerken van de betonspecie, kan al scheurvorming ontstaan. We hebben dan te maken met sedimentatie of zettingscheuren of met plastische krimp.

In verhardend beton spelen verschillende processen een rol in relatie tot het risico op scheurvorming. Zowel krimp en uitzetting door temperatureffecten als krimp door

uitdroging kan een rol spelen. Indien bijvoorbeeld een betonwand op een reeds verharde vloer wordt gestort, zijn deze risico's groot.

7.5.1.2 *Plastische scheurvorming*

Wanneer de verdamping van water aan het specieoppervlak groter is dan de (interne) watertoevoer kan de nog plastische betonspecie gaan krimpen; dit verschijnsel heet plastische krimp en kan ernstige scheurvorming veroorzaken. Plastische scheurvorming is herkenbaar aan een onregelmatig scheurenpatroon of soms verschillende parallellopende scheuren in het bovenvlak van vers gestort beton.



Figuur 7.9 Plastische krimpscheuren.

Randen van de scheuren zijn rafelig. De lengte van de scheuren is variabel; van enkele decimeters tot wel enkele meters. De scheuren worden niet ingeleid door de vorm van de constructie.

Externe invloedsfactoren

Plastische krimp ontstaat vaak door externe factoren: een lage luchtvochtigheid, temperatuurverschillen tussen betonspecie en omringende lucht, wind. Kortom, voortijdige uitdroging van het nog verse beton. Plastische krimp treedt op in de eerste uren na het storten en verdichten.

Betonsamenstelling

Naast de verhardingsomstandigheden heeft ook de betonsamenstelling een grote invloed op het risico van plastische krimp. Dit risico is het grootst bij zeer stabiele mengsels. Vaak zijn dit mengsels waarin veel grondstoffen voorkomen met een hoog specifiek oppervlak, dus met een groot watervasthoudend vermogen. Voorbeelden zijn beton met hoge sterkte (met veel cement en silica fume), zelfverdichtend beton (met een hoog aandeel fijne vulstof) en colloïdaal beton met speciale colloïdale hulpstoffen.

In deze species is nauwelijks intern vochttransport mogelijk, waardoor ze zeer gevoelig zijn voor uitdroging aan het specieoppervlak.

7.5.1.3 *Scheurvorming door temperatuurspanningen*

De warmteontwikkeling in verhardend beton als gevolg van vrijkomende hydratatiewarmte leidt potentieel tot uitzetting. Na verharden zal het beton onvermijdelijk weer afkoelen en verkorten door temperatuurverlaging. Dit veroorzaakt trekspanningen in het beton. Temperatuurspanningen ten gevolge van temperatuurgradiënten in afkoelend beton kunnen de oorzaak van scheurvorming zijn.



Figuur 7.10 *Thermische krimp.*

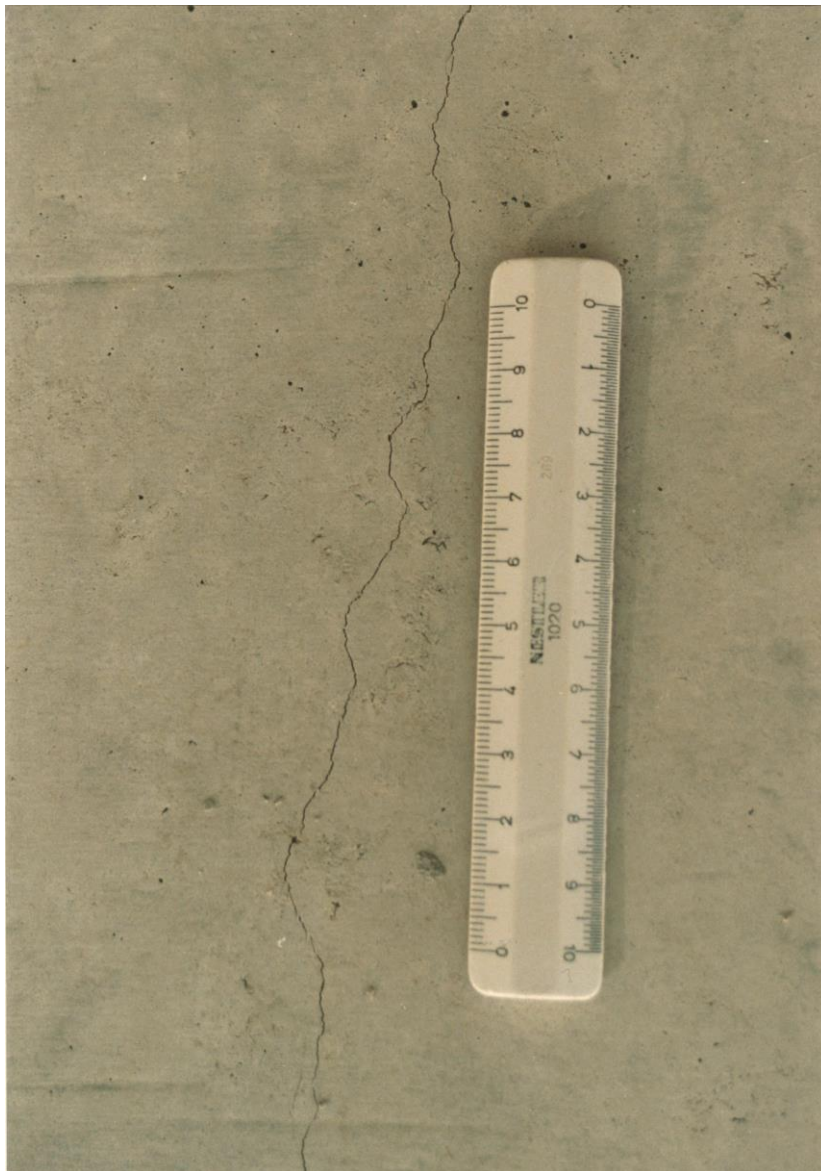
7.5.1.4 *Scheurvorming door uitdrogingskrimp*

Uitdrogingskrimp is het gevolg van het verdampen van het niet-gebonden water in het beton via de capillaire poriën. Door dit waterverlies trekken de poriën samen. Hiertegenover staat dat door wateropname de poriën zwellen en het beton kan uitzetten.

Het fenomeen 'uitdrogingskrimp' is onlosmakelijk verbonden met de toepassing van cement. Indien een constructie niet vrij kan vervormen, kan uitdrogingskrimp op langere termijn ongewenste scheurvorming veroorzaken. Voldoende dilatatie kan ongewenste scheurvorming voorkomen.

Uitdrogingskrimp hangt voornamelijk af van de relatieve vochtigheid van de omgeving, de afmetingen van het betreffende bouwdeel en de betonsamenstelling. De grootte en de snelheid waarmee uitdrogingskrimp optreedt, wordt bepaald door de betonsamenstelling en omgevingsfactoren.

Zo levert een lage water-cementfactor kleinere capillaire poriën, waaruit het water minder gemakkelijk verdampt, waardoor uitdrogingskrimp wordt beperkt. Ook bij goed en voldoende lang nabehandelen worden bij toenemende hydratatiegraad de capillaire poriën kleiner.



Figuur 7.11 Scheurvorming door uitdrogingskrimp.

7.5.2 Loslatende toplagen (bij monoliet afgewerkte vloeren)

Bij monoliet afgewerkte vloeren komt het in een enkel geval voor dat de tijdens het afwerken gevormde toplaag loskomt van het onderliggende beton. Het oppervlak van de vloer vertoont dan scheuren in de vorm van grofmazige craquelé (zie figuur 7.12). Bij het tikken met een hamer op het vloeroppervlak klinkt de vloer hol. De randen van de schollen (gedeelten tussen de scheuren) komen omhoog (schotelen), waarna ze geheel loskomen. De grootte van de plaatsen met onthechting kan variëren van enkele vierkante centimeters tot enkele vierkante meters. De dikte van de loskomende schollen is doorgaans slechts enkele millimeters. De onthechting kan ontstaan doordat tussen toplaag en onderliggend beton een zwak laagje aanwezig is door een verhoogd luchtgehalte of een hogere water-cementfactor. De oorzaak is niet altijd 100% duidelijk.

Bekend is dat de kans op een dergelijke zwakke zone groter is bij:

- betonvloeren met een verhoogd luchtgehalte;
- betonvloeren gemaakt met een onvoldoende stabiele betonspecie;
- betonvloeren waarbij de toplaag (te) snel is opgesteven en/of de afwerking te vroeg is begonnen.



Figuur 7.12 Toplaag is losgekomen van constructieve onderlaag.

7.5.3

Vorstschade

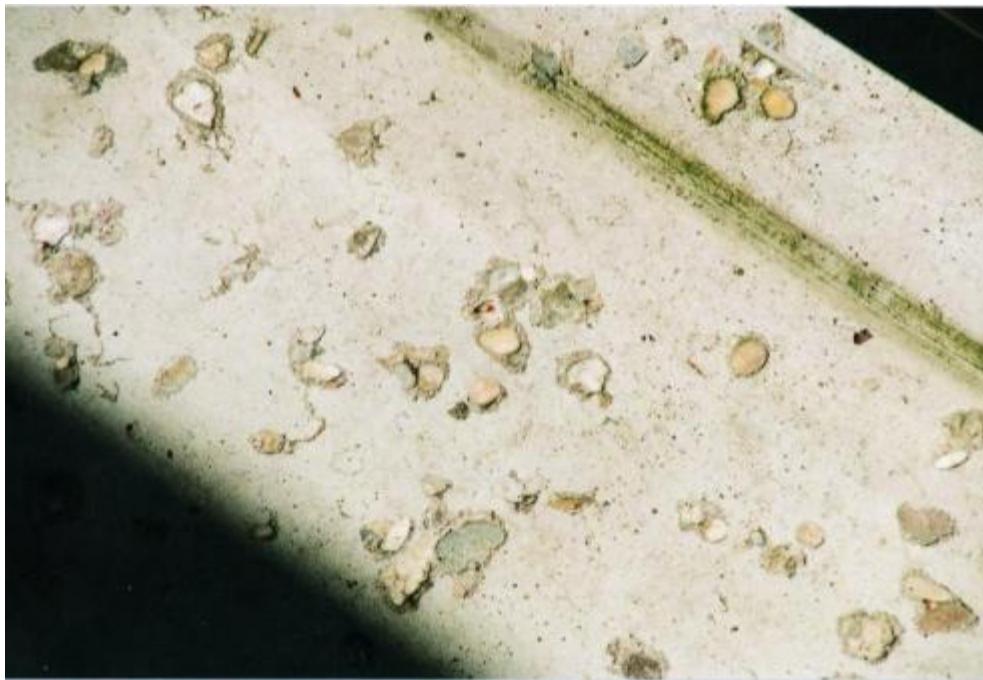
Vorst en vorst in combinatie met dooizouten kunnen schade veroorzaken aan beton. Het in de poriën aanwezige water kan bevriezen en schade veroorzaken door uitzetting. Dat risico is het grootst bij jong, nog onvolledig verhard beton. Dit bevat relatief gezien meer water en heeft nog een lage sterkte.

Bij het gebruik van dooizouten kunnen in de toplaag aanzienlijke temperatuurverschillen ontstaan, doordat het smeltende ijs in het betonoppervlak warmte onttrekt aan het onderliggende beton. Het verschil in zoutconcentratie tussen toplaag en onderliggend beton speelt hierin ook een rol. Bij de spanningen die kunnen ontstaan bij ijsvorming onder het betonoppervlak kan het toplaagje van het beton worden afgedrukt. In de betonvoorschriften NEN-EN 206 en NEN 8005 zijn voor beton dat wordt blootgesteld aan vorst/dooiwisselingen met of zonder dooizouten, zijn daarom randvoorwaarden voor de betonsamenstelling vastgelegd. Deze betreffen bijvoorbeeld een minimaal cementgehalte of een maximale water-cementfactor.

De vorst-/dooizoutbestandheid van beton hangt mede af van de gebruikte cementsoort. Bekend is dat portlandcement (CEM I) of portlandvliegascement (CEM II–V) beter presteert met betrekking tot de vorst-/dooizoutbestandheid dan hoogovencement (CEM III).

De vorst-/dooizoutbestandheid van beton is aanmerkelijk te verbeteren door het gebruik van een luchtbelvormer of zogenoemde holle microbolletjes in de betonspecie. Dan worden de poriën onderbroken en ontstaat ruimte voor het bevroerende en daarbij uitzettende water.

Verder is voor vorst-/dooibestandheid goede nabehandeling een noodzaak. Als gevolg van slechte nabehandeling ontstaat een zeer poreus oppervlaktehuidje dat bij vorst kan afvriezen.



Figuur 7.13 Vorstschade aan bovenzijde galerijplaat (detail).

