

6 PROCESBEHEERSING

Dit hoofdstuk geeft een uitgebreide toelichting op de verschillende stappen in het productieproces, waarbij specifiek het beheersen van het proces centraal staat. Beton wordt in de meeste gevallen met een certificaat geleverd. Voorwaarde voor het verkrijgen van het certificaat is een aantoonbaar beheerst productieproces.

De betontechnoloog moet bekend zijn met de richtlijnen die in de Europese normen zijn vastgelegd. Daartoe behoort onder andere de conformiteit-controle van het beton, zowel op sterkte als op andere eigenschappen.

Zonder uitgebreid stil te staan bij de statistiek, worden de belangrijkste statistische begrippen besproken. Juist omdat deze onderdeel zijn van de eerder genoemde conformiteitcontrole.

Een nieuwe ontwikkeling in de procescontrole is het familieconcept. Hiermee is het mogelijk de meetresultaten van verschillende betonsamenstellingen met elkaar te combineren, zodat ze tot een familie kunnen worden samengevoegd en als zodanig kunnen worden beoordeeld.

De controles die door de betontechnoloog moeten worden uitgevoerd, zijn beschreven in de Europese en Nederlandse normen en richtlijnen. Deze komen daarom uitgebreid aan bod in dit hoofdstuk.

INHOUDSOPGAVE

Pag.

6.1	Procesbeheersing	6-3
6.1.1	Selectie (en controle) van de grondstoffen	6-3
6.1.2	Ontwerp van de mengsamenstelling	6-3
6.1.3	Vervaardigen van beton.....	6-4
6.1.4	Controleren en beproeven.....	6-5
6.1.5	Verwerken van de beproevingsresultaten	6-5
6.1.6	Inspectie van transportmiddelen	6-6
6.1.7	Monstername ten behoeve van de conformiteitcontrole.....	6-6
6.2	Statistische begrippen.....	6-7
6.2.1	Populatie	6-7
6.2.2	Steekproef.....	6-9
6.3	Conformiteitcontrole voor andere eigenschappen dan de sterkte.....	6-10
6.3.1	Conformiteitscriteria en controle voor groep 1	6-12
6.3.2	Conformiteitscriteria en controle voor groep 2	6-14
6.4	Conformiteitcontrole voor de sterkte.....	6-15
6.4.1	Druksterkte	6-15
6.4.2	Splijttreksterkte.....	6-18
6.5	Familieconcept	6-18
6.5.1	Aanleiding	6-18
6.5.2	Samenstelling van een familie.....	6-19
6.5.3	Omrekenen van familieleden.....	6-20
6.5.4	Conformiteitcontrole voor een familie	6-20
6.6	Statistische procesbeheersing (methode C)	6-23
6.6.1	Controlekaarten (Shewhart).....	6-24
6.6.2	Aangepaste Shewhart-kaart	6-26
6.6.3	CUSUM.....	6-28

6.1 Procesbeheersing

Doelstelling van een betoncentrale of betonfabriek moet zijn een goede kwaliteit beton te leveren. Om kwaliteit te leveren is procesbeheersing nodig. Procesbeheersing omvat alle maatregelen die nodig zijn om de eigenschappen van het beton aan de gestelde eisen te laten voldoen.

Voor beton bestaat procesbeheersing in ieder geval uit:

1. selectie (en controle) van de grondstoffen;
2. ontwerp van de mengsamenstelling;
3. vervaardigen van het beton;
4. controleren van de eigenschappen van betonspecie en beton;
5. verwerken van de beproevingsresultaten voor grondstoffen, betonspecie, beton en het uitvoeren van de conformiteitscontrole;
6. waar relevant, de inspectie van apparatuur die gebruikt wordt voor het transport van de betonspecie.

6.1.1 Selectie (en controle) van de grondstoffen

In beton mogen volgens de NEN-EN 206 alleen grondstoffen worden toegepast waarvan de **algemene geschiktheid voor toepassing in beton** is aangetoond. Dit is aangetoond als de betreffende grondstof voldoet aan:

- een productnorm die handelt over de toepassing in beton zoals de NEN-EN 197-1 voor cement of NEN-EN 12620 voor toeslagmateriaal;
- een Europese Technische Goedkeuring (ETA) waarin specifiek verwezen wordt naar de toepassing van de betreffende grondstof in beton volgens NEN-EN 206;
- een CUR-Aanbeveling, waarin specifiek verwezen wordt naar de toepassing van de betreffende grondstof in beton volgens NEN-EN 206 zoals CUR-Aanbeveling 116 "AEC-granulaat als toeslagmateriaal voor beton".

Indien een grondstof in algemene zin geschikt is, wil dit echter nog niet zeggen dat het geschikt is voor elke situatie en betonsamenstelling. Het is aan de betontechnoloog die grondstoffen te kiezen waarmee aan alle gestelde eisen kan worden voldaan. Hierbij moet de betontechnoloog tevens rekening houden met het productieproces, de beoogde wijze van uitvoering en de specifieke milieuomstandigheden waarin het beton terechtkomt. De selectie maakt in deze cursus deel uit van het mengselontwerp.

Als de grondstoffen eenmaal gekozen zijn, is het van belang dat regelmatig wordt gecontroleerd of de eigenschappen van de grondstoffen niet zodanig veranderen dat niet meer aan de eisen voldaan kan worden. Een belangrijk voorbeeld hiervan is de korrelgrootteverdeling van het toeslagmateriaal. Als deze verandert, kan dit invloed hebben op de waterbehoefte en dus op de verwerkbaarheid, de water-cementfactor en de druksterkte. Ook de afwezigheid van eventuele verontreinigingen in het toeslagmateriaal moet regelmatig gecontroleerd worden.

6.1.2 Ontwerp van de mengsamenstelling

De betonsamenstelling moet door de betontechnoloog zo worden ontworpen, dat met de gekozen grondstoffen wordt voldaan aan de voorgeschreven eisen voor de betonspecie en

het verharde beton. Tot deze eisen behoren in elk geval de consistentie, de druksterkte, de duurzaamheid en de bescherming van in het beton opgenomen staal tegen corrosie.

De betonsamenstelling moet daarbij voldoen aan alle grenswaarden die samenhangen met de duurzaamheid zoals:

- minimaal bindmiddelgehalte of cementgehalte;
- maximale water-bindmiddelfactor of water-cementfactor;
- minimale (en maximale) hoeveelheid lucht ingebracht met een luchtbelvormer (indien van toepassing);
- maximaal gehalte aan chloriden;
- maximaal gehalte aan alkaliën.

Het mengselontwerp moet verder zodanig zijn, dat ontmenging van en waterafscheiding in de betonspecie zo veel mogelijk wordt voorkomen, tenzij anders is voorgeschreven.

Door het mengsel volgens de in hoofdstuk 2 behandelde systematiek te ontwerpen wordt hieraan voldaan.

Door middel van een geschiktheidsonderzoek moet vervolgens worden bepaald of een op theoretische basis ontworpen mengsel ook daadwerkelijk voldoet. Hiervoor moeten van het ontworpen mengsel drie afzonderlijke batches aangemaakt worden, waarna de eigenschappen die van belang zijn worden beproefd. Eventueel wordt naar aanleiding van de meetresultaten de mengselsamenstelling bijgestuurd. Zo kan bijvoorbeeld blijken dat meer of minder water nodig is voor het bereiken van de gewenste consistentieklasse. Mocht blijken dat meer water nodig is, dan kan dat leiden tot een volledige aanpassing van het mengsel om aan bovengenoemde eisen te voldoen.

6.1.3 Vervaardigen van beton

Bij het vervaardigen is het van belang dat de grondstoffen in de gewenste hoeveelheden gedoseerd worden en tot een homogeen eindproduct worden gemengd.

Het aanwezige water in het toeslagmateriaal verdient bijzondere aandacht. Hiermee moet rekening gehouden worden bij het bepalen van de hoeveelheid aanmaakwater. Eventueel moet ook een correctie plaatshebben op de gedoseerde hoeveelheden toeslagmateriaal. Uiteindelijk moet de hoeveelheid water zodanig zijn dat voor elk mengsel de gewenste consistentie wordt bereikt, terwijl tegelijkertijd voldaan wordt aan de maximale water-bindmiddelfactor of water-cementfactor. Vochtmeters in de opslag van het toeslagmateriaal of in de menger kunnen hierbij een belangrijk hulpmiddel zijn. Ook deze moeten regelmatig gekalibreerd worden.

Om een homogeen eindproduct te krijgen is het verder van belang dat in de juiste volgorde wordt gedoseerd (om met name kluitvorming te voorkomen) en dat voldoende lang en intensief wordt gemengd om een homogeen mengsel te verkrijgen. Tevens moeten geen grondstoffen meer worden toegevoegd als deze niet meer homogeen door het mengsel gemengd kunnen worden. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren als grondstoffen worden toegevoegd als het mengproces al bijna of geheel is afgerond.

Dit moet in instructies voor de mengmeester duidelijk zijn vastgelegd. In hoofdstuk 7.1.5.1 van de cursus BBT is uitgebreid ingegaan op de te volgen mengprocedure.

6.1.4 Controleren en beproeven

Het controleren en beproeven moet om vast te stellen of alles is zoals het moet zijn en om eventueel het productieproces bij te sturen.

Er zijn minimale frequenties waarmee de verschillende controles moeten worden uitgevoerd. In geval van twijfel kan het noodzakelijk zijn extra controles uit te voeren.

De controles vallen uiteen in de volgende vier groepen:

- controle van de grondstoffen;
- kalibratie van de weeg- en doseerinstallaties;
- kalibratie van de beproevings- en meetapparatuur;
- controle van de betoneigenschappen.

Om zeker te weten dat inderdaad gedoseerd wordt wat beoogd is, moet de doseerapparatuur regelmatig gekalibreerd worden. Het gaat daarbij om alle weeginstallaties en installaties voor het doseren op volume: doorstroommeters, watermeters, enz. Tevens moet worden nagegaan of de apparatuur door mogelijke vervuiling niet meer naar behoren functioneert. Regelmatig schoonmaken van de productieapparatuur draagt daardoor bij aan het beheerst houden van het proces.

Onder de beproevings- en meetapparatuur vallen bijvoorbeeld de drukbank, kubusmallen, luchtvat, thermometers, schuifmaten, meetlinten, dekkingsmeters, enz. In verschillende normen is vastgelegd op welke wijze de kalibratie moet plaatshebben en aan welke toleranties voldaan moet worden. Voor kubusmallen is dit bijvoorbeeld de NEN-EN 12390-1 en voor de drukbank de NEN-EN 12390-4.

Onder de controle van de betoneigenschappen vallen de gespecificeerde eigenschappen zoals consistentie, water-bindmiddelfactor of water-cementfactor, bindmiddel- of cement-gehalte, druksterkte en indien van toepassing temperatuur van de specie, luchtgehalte, volumieke massa, waterindringing, enz.

6.1.5 Verwerken van de beproevingsresultaten

Als de resultaten van de controles voldoen is er geen reden het productieproces bij te sturen. Als de resultaten niet voldoen is actie vereist.

- De resultaten van de controles van de grondstoffen kunnen leiden tot het weigeren van de grondstof en het aanvoeren van een nieuwe, wel geschikte grondstof. In sommige gevallen is dit niet nodig en kan het voldoende zijn de mengsamenstelling aan te passen;
- Indien de kalibratie van meetmiddelen een waarde oplevert buiten de toegestane tolerantie, moet de betreffende installatie, beproevings- of meetapparatuur direct bijgesteld worden. Indien dit niet mogelijk is, zoals bij een meetlint of kubusmal, moet deze vervangen worden door een geschikt exemplaar. Uiteraard moet ook worden nagegaan wat de invloed was van deze afwijkende meetapparatuur op de tot op dat moment verkregen meetresultaten;
- De meetresultaten voor de gespecificeerde betoneigenschappen moeten aan een conformiteitcontrole worden onderworpen om te beoordelen of de geleverde betonspecie aan de gestelde eisen voldoet (zie ook 6.1.7).
Indien de betoneigenschappen dan niet blijken te voldoen, moeten onmiddellijk maatregelen worden getroffen.

Deze zijn als volgt:

- Controleer de beproevingsresultaten. Ga na of bij het vastleggen de juiste werkwijze is gehanteerd;
- Als het mogelijk de meting te herhalen en als blijkt dat de meetwaarde nog steeds niet voldoet, controleer dan of de productie van het betreffende beton op de juiste wijze is uitgevoerd: juiste grondstoffen, juiste mengverhoudingen, juiste mengtijd, mogelijke fouten bij de dosering, enz.
- Voer indien mogelijk aanvullende controles uit.
- Als er achteraf sprake is van het niet voldoen aan de eisen terwijl dit bij het leveren nog niet duidelijk was (denk daarbij aan de volumieke massa of de druksterkte) moet de afnemer worden ingelicht. Als de sterkte niet voldoet kan aanvullend onderzoek aan de constructie(s), waarin het desbetreffende beton werd toegepast, noodzakelijk zijn, bijvoorbeeld door het boren en beproeven van kernen.

6.1.6 Inspectie van transportmiddelen

Het is belangrijk dat alle transportmiddelen die gebruikt worden om het beton van de menger in de mal te brengen, geen verontreinigingen bevatten die de eigenschappen van het beton beïnvloeden. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan water dat na het schoonmaken in de truckmixer of een kubel is achtergebleven. Het is belangrijk dat de betrokken medewerkers zoals truckmixerchauffeurs en productiepersoneel hier duidelijke instructies over hebben. Ook is het van belang dat niet per ongeluk water in het mengsel terecht kan komen, omdat bijvoorbeeld een kraan open is blijven staan.

6.1.7 Monsternames ten behoeve van de conformiteitcontrole

Monsternames ten behoeve van de conformiteitscontroles vinden met een bepaalde frequentie plaats. Dit zal gewoonlijk één tot enkele keren per dag zijn (consistentie, sterkte, duurzaamheid). Hoofdstuk 6.2.2 gaat hierop verder in.

Niet van elke geleverde hoeveelheid betonspecie wordt een monster getrokken. Dat betekent dat er ook betonspecie wordt geleverd die niet daadwerkelijk wordt gecontroleerd. Toch moet worden vastgesteld en aangegeven dat ook dat beton voldoet aan de norm. Dat kan alleen als de monsternames op de juiste wijze plaats vindt. Een en ander is vastgelegd in NEN-EN 12350-1.

Op basis van een aantal willekeurig uitgevoerde monsternames, ook wel steekproeven genoemd, wordt een uitspraak gedaan over alle geleverde beton, de populatie. In de cursus BBT is dit uitgebreid aan de orde geweest. In de volgende paragraaf een korte samenvatting van deze statistische begrippen.

De rest van dit hoofdstuk (6) handelt vervolgens over de wijze waarop de conformiteitcontrole voor de verschillende betoneigenschappen moet plaatsvinden.

6.2 Statistische begrippen

Bij de conformiteitcontrole wordt gebruik gemaakt van statistiek. Een aantal begrippen is van belang.

6.2.1 Populatie

Met de populatie wordt in de statistiek alles bedoeld waarover een uitspraak wordt gedaan. In het geval van een conformiteitcontrole voor beton gaat het om alle betonspecie die geleverd is.

Om een uitspraak te doen over een eigenschap van een populatie, zoals over de gemiddelde lengte van de inwoners van Nederland, zou eigenlijk van elke inwoner de lengte bekend moeten zijn. Om iets te zeggen over bijvoorbeeld de druksterkte van de geleverde betonspecie, zou van alle geleverde betonspecie de druksterkte bekend moeten zijn. Dit zou echter betekenen dat van alle Nederlanders de lengte moet worden gemeten en van alle geleverde betonspecie kubussen gemaakt moeten worden die vervolgens allemaal moeten worden beproefd. Er zou dan geen betonspecie overblijven om daadwerkelijk te storten. Dat gaat natuurlijk niet. Toch willen we een uitspraak doen over de eigenschappen van de gehele populatie (Nederlanders of sterkte van het geleverde beton).

Verschillen in de resultaten

Wanneer van alle geleverde betonspecie de druksterkte zou worden bepaald, zullen er heel veel uitkomsten zijn. Sommige zullen hetzelfde zijn, maar de meeste zullen van elkaar verschillen. De grote verschillen, zoals bijvoorbeeld tussen 30,1 N/mm² en 67,5 N/mm², zijn verklaarbaar uit het feit dat verschillende mengselsamenstellingen worden gebruikt.

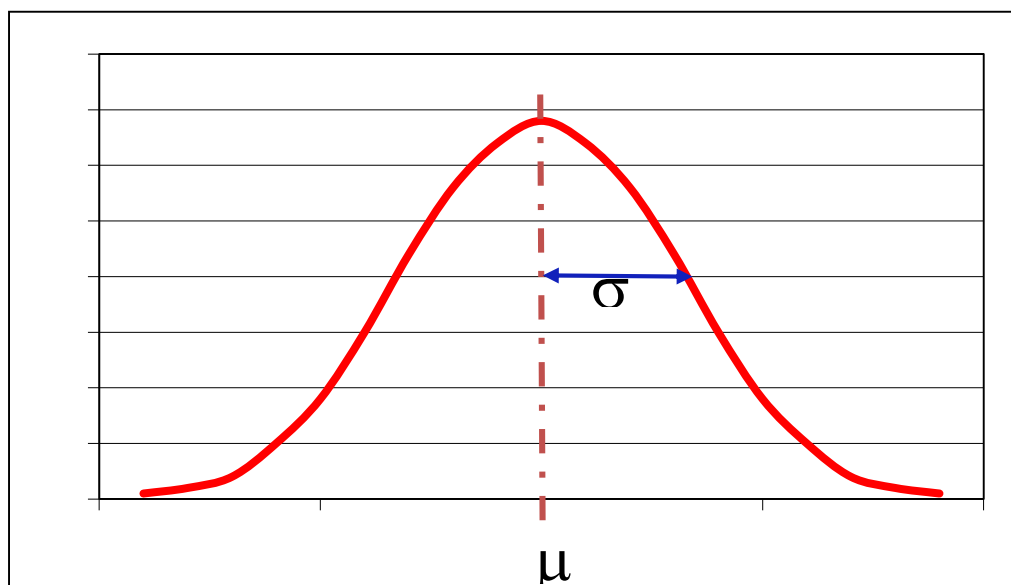
Sommige mengselsamenstellingen zijn immers ontworpen voor bijvoorbeeld een sterkteklasse C20/25 en andere bijvoorbeeld voor een sterkteklasse C45/55.

Het is dus van belang om binnen de populatie onderscheid te maken tussen de sterkteklassen. Later zal blijken dat ook tussen de sterkteklassen een verband bestaat, wat gebruikt wordt in het zogenoemde familieconcept.

Vooralsnog wordt uitgegaan van de resultaten per sterkteklasse. Ook deze verschillen onderling, bijvoorbeeld 26,7 N/mm² en 34,5 N/mm². Dergelijke onderlinge verschillen worden voornamelijk veroorzaakt door allerlei toevallige afwijkingen in het productieproces, zoals verschillen tussen batches in hoeveelheden water en cement. Echter, zelfs als meerdere kubussen gemaakt uit één mengerlading, waarbij dus sprake is van dezelfde hoeveelheid cement en water, zouden worden beproefd, dan nog zouden er verschillende uitkomsten zijn, bijvoorbeeld 28,4 N/mm² en 29,6 N/mm². Dit wordt veroorzaakt door afwijkingen in de proefstukken zelf en de gebruikte testapparatuur. Op zichzelf allemaal willekeurige verschillen in druksterkte. Toch blijken deze verschillen niet volstrekt willekeurig te zijn. In de cursusbeschrijving BBT (hoofdstuk 10.3.7) is dit aan de hand van een voorbeeld toegelicht.

Normale verdeling

Grafisch uitgezet blijken alle uitkomsten van een populatie zich vaak te verdelen volgens een zogenoemde normale verdeling, vaak weergegeven in de vorm van de Gauss-kromme. Hierbij is op de x-as de meetwaarde weergegeven, dus bijvoorbeeld de druksterkte, en op de y-as het aantal keren dat deze sterkte voorkomt: de frequentie.



Figuur 6.1 Normale verdeling met gemiddelde μ en standaardafwijking σ .

Bij een normale verdeling bevinden de meeste uitkomsten zich rond een bepaalde waarde: het gemiddelde van de populatie, aangeduid met het Griekse symbool μ . Dit is de waarde bij de top van de grafiek. Verder van het gemiddelde wordt het aantal uitkomsten steeds kleiner. Dit vindt zowel naar links als naar rechts van het gemiddelde op dezelfde wijze plaats.

Hoe de andere uitkomsten zich verhouden ten opzichte van het gemiddelde, komt tot uitdrukking in de zogenoemde standaardafwijking van de populatie, aangeduid met het Griekse symbool σ .

Van de resultaten van elke populatie kunnen een μ en σ worden berekend. Dus ook voor de druksterktes van alle geleverde betonspecie. Voor verschillende sterkteklassen zal met name de μ verschillen, bijvoorbeeld $33,0 \text{ N/mm}^2$ voor een C20/25 en $53,0 \text{ N/mm}^2$ voor een C35/45. De verschillen binnen een sterkteklasse zullen de waarde van σ bepalen.

Voor procesbeheersing is de σ van groot belang. Immers, hoe lager de waarde voor σ is, des te dichter liggen de uitkomsten bij het gemiddelde; oftewel, er is minder spreiding. Dit is gunstig als de uitkomst constant moet zijn. Hoe hoger de waarde voor σ is, des te verder de waarden van het gemiddelde af kunnen liggen, oftewel er is meer spreiding.

Dit is eigenlijk niet wenselijk omdat er dan ook grote uitschieters naar boven en naar beneden kunnen zijn. Het zou dus logisch zijn in de normen voor te schrijven dat door de producent zijn proces zo moet beheersen dat de door hem verkregen meetresultaten een zo klein mogelijke spreiding en daarmee een kleine standaardafwijking σ hebben. De echte waarde van het gemiddelde en de standaardafwijking kan alleen door het uitvoeren van veel metingen worden berekend. Uit oogpunt van economie en uitvoerbaarheid kunnen we dat eigenlijk nooit. Bij kleinere aantallen beschikbare meetresultaten kunnen we echter wel een bruikbare schatting van deze twee grootheden (μ en σ) verkrijgen. Daarover later meer.

Kansverdeling

Het feit dat de meeste meetresultaten een normale verdeling vertonen, geeft aanknopingspunten voor de procesbeheersing. De normale verdeling kan worden gezien als een kansverdeling.

Als μ en σ bekend zijn, kan worden berekend hoeveel procent van de proeven een bepaalde uitkomst zal hebben. Zo volgt uit de normale verdeling direct dat 50% van de proeven een uitkomst zal hebben die groter is dan het gemiddelde en 50% een uitkomst die kleiner is. Als

we dus 100 proeven (dus veel proeven) doen, zal normaal gesproken in de helft van de gevallen de uitkomst hoger zijn dan het gemiddelde, en in de andere helft van de gevallen lager. Veel belangrijker zijn de percentages waarnemingen die boven of onder een bepaalde waarde liggen. Die percentages kunnen met behulp van μ en σ worden berekend.

AQL (Acceptable Quality Limit)

In NEN-EN 206 is voorgeschreven hoeveel procent van de populatie een waarde mag hebben die buiten de gespecificeerde grenzen ligt om toch nog te worden gezien als een populatie die aan de eisen voldoet. Dit wordt aangeduid als de AQL (*Acceptable Quality Limit* = geaccepteerd kwaliteitsniveau. Het is dus het toegelaten percentage afwijkingen in een populatie waarbij de populatie nog steeds aanvaardbaar wordt geacht).

Voor de druksterkte van beton is in NEN-EN 206 een AQL 5% voorgeschreven. Dit betekent dat maximaal 5% van de druksterktes van de populatie, oftewel van alle geleverde betonspecie, een sterkte mag hebben die lager is dan de gespecificeerde karakteristieke sterkte f_{ck} . Het betekent ook automatisch dat 95% een sterkte moet hebben die groter dan of gelijk is aan f_{ck} . Om hieraan te kunnen voldoen zal de producent moeten zorgen dat de gemiddelde sterkte μ van alle geleverde betonspecie voldoende hoog is bij de σ die hij heeft voor zijn productieproces. Bij de conformiteitscontrole door de producent moet dit worden aangetoond.

Ook voor andere eigenschappen dan de sterkte, bijvoorbeeld voor de volumieke massa, wordt het principe van AQL gehanteerd. Hiervoor wordt een AQL van 4% gehanteerd. Bij de conformiteitcontrole moet worden aangetoond dat hieraan wordt voldaan.

Er kunnen dus proefresultaten zijn die buiten de gespecificeerde grenzen vallen. Om te voorkomen dat hierdoor ongewenste situaties ontstaan, worden er zogenoemde uiterste grenswaarden gehanteerd. Dit zijn waarden die in geen geval overschreden mogen worden.

6.2.2 Steekproef

In de praktijk is het niet mogelijk de gehele populatie, oftewel alle beton te beproeven. Er wordt daarom gebruikgemaakt van een steekproef. Dit is een beperkte serie meetresultaten op grond waarvan uitspraken kunnen worden gedaan over de populatie.

Van de steekproef kunnen het gemiddelde en de standaardafwijking worden berekend¹. De berekende waarde van het gemiddelde en de standaardafwijking worden weergegeven met resp. de symbolen \bar{x}_n en s_n , waarbij n het aantal waarnemingen weergeeft. Deze berekende waarden zijn een schatting van respectievelijk de μ en σ van de populatie. Hoe groter de steekproef des te beter de schatting.

Berekening gemiddelde en standaardafwijking van een steekproef

Het gemiddelde van een steekproef (\bar{x}_n) is gelijk aan de som van de meetresultaten ($\sum x_i$) gedeeld door hun aantal (n). In formule:

$$\bar{x}_n = \frac{\sum x_i}{n}$$

De berekening van de standaardafwijking van de steekproef is iets gecompliceerder. In formulevorm:

¹ Deze functies zitten op een rekenmachine met statistische functies.

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x}_n)^2}{n - 1}}$$

In woorden: van elke meetwaarde x_i moet het eerder berekende steekproefgemiddelde \bar{x}_n worden afgetrokken, het resultaat moet worden gekwadrateerd en de kwadraten moeten worden opgeteld. De som van de kwadraten wordt gedeeld door het aantal meetresultaten minus één en ten slotte wordt uit het quotiënt de wortel getrokken. Het gemiddelde van een steekproef van 15 waarnemingen wordt dus aangeduid als \bar{x}_{15} en de standaardafwijking berekend uit 15 waarnemingen met s_{15} . Als het gaat om de druksterkte van beton wordt het gemiddelde ook aangeduid met f_{cm} en de treksterkte met $f_{ctm,sp}$.

De steekproef moet aan een aantal belangrijke eisen voldoen.

- 1) Voor het tijdstip waarop monsters genomen moeten worden, geldt dat:
 - elk monster volstrekt willekeurig genomen moet worden;
 - een monster pas genomen mag worden nadat alle grondstoffen zijn toegevoegd, dus ook eventuele toevoegingen op de bouwplaats.
- 2) Voor de hoeveelheid monsters die genomen moeten worden geldt dat:
 - van de eerste 50 m³ beton, 3 monsters genomen moeten worden; en daarna:
 - bij een ongecertificeerd productieproces 1 monster per 150 m³ of 1 monster per dag, al naar gelang hetgeen het hoogste aantal oplevert;
 - bij een gecertificeerd productieproces tijdens aanvangsproductie (eerste 35 metingen) 1 per 200 m³ of 1 per 3 dagen en tijdens doorlopende productie (rest van de metingen) 1 per 400 m³ of 1 per 5 dagen, al naar gelang hetgeen het hoogste aantal oplevert.

Er moet echter niet meer dan 1 monster per 25 m³ worden genomen. Dit om autocorrelatie van de meetwaarden te voorkomen. Autocorrelatie wil zeggen dat geen van elkaar onafhankelijke resultaten worden verkregen. Deze resultaten liggen qua getalswaarde meestal erg dicht bij elkaar en suggereren mogelijk een lage standaardafwijking.

6.3 Conformiteitcontrole voor andere eigenschappen dan de sterkte

In deze cursusbeschrijving wordt de conformiteitscontrole op de eigenschappen van beton in twee aparte paragrafen besproken. In § 6.4 wordt de sterkte aan de orde gesteld en in deze paragraaf (§ 6.3) de overige eigenschappen van beton(specie).

Onder de overige eigenschappen vallen:

- de consistentie (verdichtingsmaat, zetmaat, schudmaat, vloeimaat);
- de overige eigenschappen voor zelfverdichtend beton (viscositeit, blokkeringsmaat, ontmenging);
- de duurzaamheid (water-bindmiddelfactor of water-cementfactor, minimaal bindmiddel- of cementgehalte, minimum luchtgehalte);
- het gehalte en de homogene verdeling van toegevoegde vezels;
- de volumieke massa van het beton (lichtbeton en zwaarbeton).

Deze eigenschappen (indien van toepassing) moeten van volstrekt willekeurig gekozen mengsels bepaald worden. Dus bijvoorbeeld niet altijd het eerste mengsel van de dag.

Hierdoor vormen de resultaten een representatieve steekproef zodat een uitspraak over de gehele populatie kan worden gedaan.

Voor elke individuele meetwaarde moet vastgesteld worden of deze voldoet aan de specificatie. Dit is het eerste deel van de conformiteitscontrole.

Vervolgens moeten de resultaten per eigenschap in een overzicht worden opgenomen. Dus bijvoorbeeld een overzicht van alle gemeten consistenties of water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor en die in een bepaalde periode, van maximaal een half jaar, bepaald zijn. Het mag ook korter zijn, bijvoorbeeld een maand of een kwartaal.

Tabel 6.1 Overzicht resultaten bepaling consistentie.

code	datum	gespecificeerde consistentie-klasse(n)	minimum waarde	maximum waarde	meetwaarde consistentie	voldoet
1	12-01-02	F4	490	550	540	ja
2	12-01-03	S2	50	90	50	ja
3	12-01-04	F5	560	620	620	ja
4	12-01-04	S3	100	150	120	ja
5	12-01-05	F5	560	620	580	ja
6	12-01-05	S3	100	150	100	ja
7	12-01-06	F4	490	550	540	ja

Tabel 6.2 Overzicht resultaten bepaling water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor.

code	datum	gespecificeerde milieuklasse(n)	minimum waarde	maximum waarde	meetwaarde wbf/wcf	voldoet
1	12-01-02	XC3	-	0,55	0,53	ja
2	12-01-03	XC4 / XD3 / XF4	-	0,45	0,44	ja
3	12-01-04	XC2	-	0,60	0,58	ja
4	12-01-04	XC4 / XA3	-	0,45	0,45	ja
5	12-01-05	XC2 / XA1	-	0,55	0,54	ja
6	12-01-05	XC4 / XD3 / XF4	-	0,45	0,43	ja
7	12-01-06	XC2	-	0,60	0,56	ja

Op basis van deze overzichten heeft vervolgens het tweede deel van de conformiteitcontrole plaats. Er zijn twee verschillende mogelijkheden.

Mogelijkheid 1: alle individuele meetwaarden voldoen aan de grenzen van de klasse

Dit is de meest eenvoudige situatie. Als alle individuele meetwaarden voldoen aan de grenzen van de gespecificeerde klasse(n) zoals in tabel 6.1 en 6.2, dan is automatisch sprake van conformiteit, ook voor de mengsels die in deze periode zijn geproduceerd en waarvan geen meetwaarden zijn bepaald.

Mogelijkheid 2: één of meer meetwaarden vallen buiten de grenzen van de klasse

Het kan voorkomen dat één of meer meetwaarden niet voldoen. Zie bijvoorbeeld tabel 6.3 voor de consistentie.

Tabel 6.3 Overzicht resultaten bepaling consistentie met meetwaardes buiten de klassegrenzen.

code	datum	gespecificeerde consistentie-klasse(n)	klassegrens minimum waarde	klassegrens maximum waarde	meetwaarde consistentie	voldoet
1	12-01-02	F4	490	550	540	ja
2	12-01-03	S2	50	90	50	ja
3	12-01-04	F5	560	620	620	ja
4	12-01-04	S3	100	150	90	nee
5	12-01-05	F5	560	620	580	ja
6	12-01-05	S3	100	150	100	ja
7	12-01-06	F4	490	550	570	nee

Dit hoeft niet onmiddellijk te betekenen dat het in deze periode geleverde beton niet meer conform de norm is. Statistisch gezien is het namelijk aannemelijk dat sommige meetresultaten in een willekeurige steekproef net iets buiten de grenzen vallen, ook bij een volledig beheerst productieproces. Wel moet natuurlijk vastliggen hoe vaak dat mag voorkomen, het zogenoemde aanvaardbare aantal (AQL), en hoeveel de afwijking maximaal mag zijn..

Voor het aanvaardbare aantal maken we onderscheid tussen betoneigenschappen

- waarbij voor elke meting een geringe overschrijding van de grenswaarde aanvaardbaar is en ook direct tot de conclusie kan worden gekomen dat de gemeten waarde al dan niet voldoet (groep 1);
- waarvoor slechts een beperkt aantal metingen mogen afwijken (groep 2).

6.3.1 Conformiteitscriteria en controle voor groep 1

Tot deze groep behoren de betoneigenschappen die bij de aflevering kunnen worden bepaald:

- de consistentie (verdichtingsmaat, zetmaat, schudmaat, vloeimaat);
- de overige eigenschappen voor zelfverdichtend beton (viscositeit, blokkeringsmaat, ontmenging);
- minimum luchtgehalte;
- de homogene verdeling van toegevoegde vezels.

In NEN-EN 206-1:2005 geldt voor de betoneigenschappen binnen deze groep nog een aanvaardbaar aantal afwijkingen dat is gebaseerd op een kwaliteitsniveau (AQL) van 15%. Dat betekent dat als van elke geleverde lading beton een meetwaarde zou worden bepaald, tot maximaal 15% van de metingen buiten de grenzen zou kunnen vallen. Dit wordt met de invoering van de NEN-EN 206:2014 aangepast naar de situatie dat voor elke meting een afwijking ten opzichte van de grenswaarde aanvaardbaar is. Er heeft dus een verruiming plaatsgevonden.

Omdat een afwijking aanvaardbaar is per individuele meetwaarde, kan de conformiteit direct worden vastgesteld. Daarbij gelden de afwijkingen in tabel 6.4 die zijn toegestaan ten opzichte van de grenswaarden van de desbetreffende klassen.

Tabel 6.4 Overzicht conformiteitscriteria voor consistentie, overige eigenschappen voor ZVB, luchtgehalte en homogene verdeling van vezels.

eigenschap	testmethode	toegestane afwijking t.o.v		opmerking
		ondergrens	bovengrens	
verdichtingsmaat	NEN-EN 12350-4	- 0,03	+ 0,03	algemeen
		- 0,04	+ 0,04	indien gemeten wordt bij begin lossen truckmixer
zetmaat	NEN-EN 12350-2	- 10 (mm)	+ 10 (mm)	algemeen
		- 20 (mm)	+ 20 (mm)	indien gemeten wordt bij begin lossen truckmixer
schudmaat	NEN-EN 12350-5	- 10 (mm)	+ 10 (mm)	algemeen
		- 20 (mm)	+ 20 (mm)	indien gemeten wordt bij begin lossen truckmixer
vloeimaat	NEN-EN 12350-8	geen afwijking toegestaan	geen afwijking toegestaan	bij zelfverdichtend beton is geen correctie voor de verdichting mogelijk door mid-del van gebruik van meer of minder verdichtingsenergie
viscositeit	NEN-EN 12350-8			
blokkeringsmaat	NEN-EN 12350-10			
	NEN-EN 12350-12			
ontmenging	NEN-EN 12350-11			
luchtgehalte van beton met lbv.	NEN-EN 12350-7	- 0,5%	+ 5,0%	ten opzichte van hetgeen is gespecificeerd.
homogene verdeling van vezels	NEN-EN 206, Bijlage B	0,80	-	individuele meting
		0,85	-	gemiddelde van 3 metingen

Als de consistenties in tabel 6.3 gemeten zijn bij het begin van het lossen van de truckmixer, geldt voor de conformiteitcontrole op basis van tabel 6.4 het volgende:

Tabel 6.5 Voorbeeld conformiteitcontrole consistentie.

code	datum	gespecificeerde consistentie-klasse(n)	minimum waarde		maximum waarde		meetwaarde consistentie	voldoet	
			KG	C	KG	C		KG	C
1	12-01-01	F4	490	470	550	570	540	ja	ja
2	12-01-01	S2	50	30	90	110	50	ja	ja
3	12-01-02	F5	560	540	620	640	620	ja	ja
4	12-01-02	S3	100	80	150	170	90	nee	ja
5	12-01-03	F5	560	540	620	640	580	ja	ja
6	12-01-03	S3	100	80	150	170	100	ja	ja
7	12-01-04	F4	490	470	550	570	570	nee	ja

Hoewel twee meetwaarden buiten de klassegrenzen (KG) vallen is toch sprake van conformiteit, omdat voor de conformiteitcontrole rekening gehouden mag worden met de conformiteitscriteria uit tabel 6.4 (C).

Voldoet de gemeten waarde ook niet aan de conformiteitscriteria, dan wordt de betreffende charge (truckmixerlading) als niet-conform beschouwd. Uiteraard moeten dan onmiddellijk corrigerende maatregelen worden genomen. De afwijkende meetwaarde mag echter bij een eventuele beoordeling van alle resultaten over een bepaalde periode buiten beschouwing worden gelaten.

6.3.2 Conformiteitscriteria en controle voor groep 2

Tot deze groep behoren de overige eigenschappen uit de lijst zoals weergegeven in § 6.3:

- de duurzaamheid (water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor en minimaal bindmiddel-/cementgehalte);
- het gehalte aan toegevoegde vezels;
- de volumieke massa van het beton (lichtbeton en zwaarbeton).

Voor deze eigenschappen is:

- een grenswaarde voor de afwijking van individuele meetresultaten van toepassing (tabel 6.7);
- een beperkt aantal afwijkingen in alle meetresultaten aanvaardbaar (tabel 6.6).

Voldoet de gemeten waarde (van een individuele meting) niet aan de conformiteitscriteria, dan wordt ook nu de betreffende charge (truckmixerlading) als niet-conform beschouwd. Uiteraard moeten ook in dit geval onmiddellijk corrigerende maatregelen worden genomen. De afwijkende meetwaarde mag echter bij de beoordeling van alle resultaten over een bepaalde periode op basis van de criteria in tabel 6.6 buiten beschouwing worden gelaten.

Tabel 6.6 Aanvaardbaar aantal afwijkingen (AQL = 4%).

aantal beproevingsresultaten	aanvaardbaar aantal afwijkingen
1 - 12	0
13 - 19	1
20 - 31	2
32 - 39	3
40 - 49	4
50 - 64	5
65 - 79	6
80 - 94	7
95 - 100	8
> 100	ISO 2859-1:1999, tabel 2-A

Het aanvaardbare aantal afwijkingen is gebaseerd op een zogenoemd aanvaardbaar kwaliteitsniveau (AQL) van 4%. Dit betekent dat zolang dit aantal niet wordt overschreden, statistisch minder dan 4% van alle geproduceerde beton (dus ook het beton waarvan geen meetwaarden zijn) buiten de grenzen valt. Dit wordt acceptabel geacht voor een beheerst productieproces.

Het bovenstaande kan worden toegepast op de meetwaarden voor de water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor in tabel 6.2. Er staan in deze tabel zeven meetwaarden. Het aanvaardbaar aantal afwijkingen volgens tabel 6.6 is dan nul (1-12). Voor conformiteit zullen dus alle meetwaarden moeten voldoen aan de gestelde grenswaarde voor de klasse, oftewel de maximale water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor voor de milieuklasse(n).

Als er meer meetwaarden komen, bijvoorbeeld 55 meetwaarden over een periode van een maand, zouden er maximaal vijf afwijkingen tussen mogen zitten, dus waarden die liggen tussen de grenswaarde van de klasse en de grenswaarde inclusief de toegestane afwijking genoemd in tabel 6.7.

Tabel 6.7 Overzicht conformiteitscriteria voor water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor, minimaal bindmiddel-/cementgehalte, volumieke massa en gehalte aan vezels.

eigenschap	testmethode	toegestane afwijking t.o.v	
		ondergrens	bovengrens
water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor	berekening	-	+ 0,02
minimaal bindmiddel-/cementgehalte	afweegstaat	- 10 kg	-
gehalte aan staalvezels	afweegstaat	- 5% (m/m)	-
gehalte aan polymeervezels	afweegstaat	- 10% (m/m)	-
volumieke massa lichtbeton	NEN-EN 12390-7	- 30 kg/m ³	+ 30 kg/m ³
volumieke massa zwaarbeton	NEN-EN 12390-7	- 30 kg/m ³	-

Bovenstaande betekent dus bijvoorbeeld voor de water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor dat elke afwijking die is toegestaan nooit groter mag zijn dan de maximale water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor voor de milieuklasse + 0,02. Dus bij een maximale water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor van 0,45 voor XA3 wordt dit 0,47 (0,45 + 0,02) en bij een maximale water-bindmiddelfactor en/of water-cementfactor van 0,65 voor XC1 wordt dit 0,67 (0,65 + 0,02).

Voor de conformiteit van de volumieke massa van lichtbeton betekent dit bijvoorbeeld het volgende:

Stel dat gevraagd wordt om een D2,0. Dan wordt dus beton gevraagd met een volumieke massa volgens NEN-EN 12390-7 tussen de 1800 en 2000 kg/m³.

Er worden 30 kubussen gemaakt, waarvan 28 kubussen een volumieke massa hebben tussen 1800 en 2000 kg/m³. Twee kubussen liggen daarbuiten met respectievelijk een volumieke massa van 1780 en 2030 kg/m³.

Voor de conformiteitcontrole geldt het volgende.

- De beide afwijkingen liggen binnen de toegestane afwijking volgens tabel 6.7 (respectievelijk -20 kg/m³ voor 1780 en +30 kg/m³ voor 2030).
- Twee afwijkingen op 30 meetwaarden is aanvaardbaar (zie tabel 6.6).

Er is dus sprake van conformiteit. Wanneer er drie of meer kubussen een afwijkende waarde zouden hebben of wanneer er een waarde kleiner dan 1770 kg/m³ of groter dan 2030 kg/m³ zou zijn, is er geen sprake van conformiteit. Uiteraard moeten ook nu, zodra dit duidelijk is, corrigerende maatregelen worden genomen zoals beschreven in 6.1.5.

6.4 Conformiteitcontrole voor de sterkte

De conformiteitcontrole voor de sterkte heeft betrekking op de druksterkte of de splijttreksterkte.

6.4.1 Druksterkte

Voor de druksterkte wordt de conformiteitcontrole gewoonlijk per druksterkteklasse uitgevoerd. Hiervan gaan we in eerste instantie uit.

Ook voor de druksterkte moet een onderscheid gemaakt worden tussen conformiteit voor het individuele meetresultaat en conformiteit voor het gemiddelde van een aantal meetresultaten.

Conformiteit voor een individueel meetresultaat

Het resultaat van een druksterkteproef na 28 dagen moet zo snel mogelijk na het uitvoeren van de meting worden getoetst.

Elke individuele meetwaarde moet voldoen aan de volgende eis: $f_{ci} \geq f_{ck} - 4$. Dit betekent dus bijvoorbeeld voor een C20/25 dat de druksterkte gemeten op elke kubus groter dan of gelijk moet zijn aan $25 - 4 = 21 \text{ N/mm}^2$. Wanneer de meetwaarde hieraan niet voldoet, wordt de betreffende charge waaruit het monster genomen is als niet-conform aangeduid en moeten corrigerende maatregelen worden genomen. Als de meetwaarde wel voldoet, bijvoorbeeld 24 N/mm^2 voor een C20/25, dan is voorlopig sprake van conformiteit.

Het lijkt vreemd dat een druksterkte lager kan zijn dan de karakteristieke sterkte en dat toch nog sprake is van conformiteit. Dit komt doordat de karakteristieke sterkte feitelijk de sterkte is waarvoor geldt dat 95% van de populatie groter dan of hieraan gelijk is. Dit betekent dus ook dat in 5% van de gevallen sprake kan zijn van een druksterkte lager dan de karakteristieke sterkte. Theoretisch kan ongeveer 1 op de 20 metingen dus lager uitkomen dan de karakteristieke sterkte.

Als er teveel metingen zijn die te laag uitkomen, ontstaat er een probleem. Immers, hoogstwaarschijnlijk voldoet de populatie dan niet aan de eis dat slechts 5% van de waarden lager mag zijn dan de f_{ck} . Dit wordt gecontroleerd bij de beoordeling van het gemiddelde.

Conformiteit voor het gemiddelde meetresultaat

Bij het beoordelen van het gemiddelde meetresultaat moet een onderscheid worden gemaakt tussen de zogenoemde aanvangsproductie (methode A) en de doorlopende productie (methode B).

Methode A: aanvangsproductie

De aanvangsproductie loopt vanaf het moment dat een nieuw mengsel in productie wordt genomen tot het moment dat 35 meetwaarden daarvan binnen een periode van 12 maanden zijn verzameld.

Tijdens de aanvangsproductie moet het gemiddelde van 3 opeenvolgende, wel- of niet-overlappende waarden, ook voldoen aan de eis: $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$. Er zijn dus twee mogelijkheden:

- het gemiddelde van 1 t/m 3, dan 4 t/m 6, 7 t/m 9, enz. wordt berekend en getoetst;
- het gemiddelde van 1 t/m 3, 2 t/m 4, 3 t/m 5, enz. wordt berekend en getoetst.

De tweede methode maakt het mogelijk om bij elk nieuw verkregen resultaat onmiddellijk de toetsing $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$ uit te voeren. In § 6.6 komen we hierop nog terug.

Indien echter één van drie de meetresultaten (erg) laag is, is het niet uitgesloten dat dan bij 3 opeenvolgende toetsingen een niet-conformiteit wordt vastgesteld. De te ondernemen acties in geval van een niet-conformiteit moeten hier wel rekening mee houden.

Als niet aan de eis wordt voldaan, is sprake van een niet-conformiteit. In eerste instantie moet worden nagegaan of er tijdens de productie omstandigheden zijn geweest die deze lage waarden kunnen hebben veroorzaakt (Een en ander zoals beschreven in 6.1.5). Op basis van de bevindingen moet het proces en/of de mengselsamenstelling worden aangepast. Vervolgens gaat de aanvangsproductie opnieuw in. Dit betekent dat opnieuw 35 meetwaarden nodig zijn binnen een periode van 12 maanden.

Als de aanvangsproductieperiode is verstreken, mag overgeschakeld worden naar beoordeling voor doorlopende productie. Dit is echter niet verplicht. Er mag ook blijvend volgens methode A worden beoordeeld.

Wanneer echter wordt overgeschakeld, moet de standaardafwijking van de 35 meetwaarden worden berekend. Deze waarde wordt dan verder aangeduid als de processtandaardafwijking σ . Deze waarde is een schatting van de standaardafwijking van de populatie σ zoals beschreven in 6.2.1. De norm gaat er vanuit dat met 35 meetwaarden een voldoende nauwkeurige schatting van de processtandaardafwijking wordt verkregen.

Methode B: doorlopende productie

Deze methode mag pas worden toegepast als de periode voor aanvangsproductie is verstreken en er dus 35 meetwaarden zijn verzameld binnen een periode van 12 maanden.

Eerst moet vastgesteld worden over welke periode de conformiteit wordt vastgesteld. Dit wordt de beoordelingsperiode genoemd. De tijdsduur van een beoordelingsperiode is afhankelijk van het aantal beproevingen dat door het bedrijf wordt uitgevoerd in een periode van 3 maanden:

- < 35 beproevingen: een beoordelingsperiode van maximaal een half jaar waarin ten minste 15 en ten hoogste 35 resultaten zijn verkregen.
- ≥ 35 beproevingen: een beoordelingsperiode kleiner of gelijk aan 3 maanden waarin ten minste 15 resultaten zijn verkregen.

Tijdens de gehanteerde periode moet het gemiddelde van de meetwaarden voldoen aan de volgende eis: $f_{cm} \geq f_{ck} + 1,48 \times \sigma$. Hierbij is σ de processtandaardafwijking: de standaardafwijking van de 35 waarden die tijdens de aanvangsproductie zijn verzameld.

De betonproducent moet nagaan welke periode voor hem van toepassing is en dat vastleggen in zijn kwaliteitssysteem. Ook zal hij moeten kiezen bij welk aantal waarnemingen de toetsing wordt uitgevoerd indien gedurende de beoordelingsperiode meer dan 35 waarnemingen beschikbaar komen.

Gebruikelijk wordt de toetsing uitgevoerd zodra 15 nieuwe meetresultaten beschikbaar zijn. NEN-EN 206 geeft aan dat deze toetsing ook met 15 (of meer) overlappende resultaten kan worden uitgevoerd. Dat maakt het mogelijk om bij het verkrijgen van elk nieuw meetresultaat de toetsing uit te voeren over de laatste 15 metingen. In § 6.6 komen we hierop nog terug.

Indien gedurende de beoordelingsperiode minder dan 15 waarnemingen beschikbaar zijn, zal methode A (aanvangsproductie) moeten worden toegepast.

Als aan de eis wordt voldaan, is er sprake van conformiteit. Als niet aan de eis wordt voldaan, is er sprake van niet-conformiteit. De in paragraaf 6.1.5 genoemde maatregelen moeten genomen worden. Dit kan eventueel aanleiding zijn onderzoek uit te voeren aan de constructies waarin de betonspecie verwerkt is, bijvoorbeeld door het boren en beproeven van kernen.

Aan het eind van de beoordelingsperiode (dus op het moment dat de toetsing $f_{cm} \geq f_{ck} + 1,48 \times \sigma$ wordt uitgevoerd) moet tevens gecontroleerd worden of de standaardafwijking tijdens de beoordelingsperiode niet significant is afgeweken van de standaardafwijking tijdens de aanvangsproductieperiode.

Voor deze controle moet de standaardafwijking van de beoordeelde meetwaarden s_n worden berekend. Vervolgens moet getoetst worden of s_n aan de eisen in tabel 6.8 voldoet.

Tabel 6.8 Grenzen voor s_n .

Aantal meetwaarden	Grenzen voor s_n
15-19	$0,63 \sigma \leq s_n \leq 1,37 \sigma$
20-24	$0,68 \sigma \leq s_n \leq 1,31 \sigma$
25-29	$0,72 \sigma \leq s_n \leq 1,28 \sigma$
30-34	$0,74 \sigma \leq s_n \leq 1,26 \sigma$
35	$0,76 \sigma \leq s_n \leq 1,24 \sigma$

Wanneer de standaardafwijking significant afwijkt, dus buiten deze grenzen valt, wordt σ opnieuw berekend op basis van de laatste 35 meetwaarden. Dit wordt de nieuwe processtandaardafwijking σ voor de volgende beoordelingsperiode. Het is wel belangrijk vast te stellen waardoor deze afwijking is veroorzaakt.

6.4.2 Splijttreksterkte

De conformiteitcontrole voor de splijttreksterkte verloopt gelijk aan de conformiteitcontrole voor de druksterkte. Er worden alleen andere waarden gehanteerd in de eisen.

Conformiteit voor een individueel resultaat

Elke individuele meetwaarde moet voldoen aan de volgende eis: $f_{cti,sp} \geq f_{ctk,sp} - 0,5$

Conformiteit voor het gemiddelde resultaat

1. Aanvangsproductie

Tijdens de aanvangsproductie moet het gemiddelde van 3 opeenvolgende, wel- of niet-overlappende waarden, voldoen aan de volgende eis: $f_{ctm,sp} \geq f_{ctk,sp} + 0,5$

2. Doorlopende productie

Tijdens de gehanteerde beoordelingsperiode moet het gemiddelde van de waarden voldoen aan de volgende eis: $f_{ctm,sp} \geq f_{ctk,sp} + 1,48 \times \sigma$.

De eisen voor de standaardafwijking voor de splijttreksterkte zijn gelijk aan de eisen voor de standaardafwijking voor de druksterkte (zie tabel 6.8).

Voor een aantal betonproducten zoals betonstraatstenen wordt geen gebruik gemaakt van de bovenstaande conformiteitcontrole volgens de NEN-EN 206. In plaats daarvan wordt de conformiteitcontrole en vaak ook de wijze van beproeven geregeld in de desbetreffende productnorm. Zie voor betonstraatstenen bijvoorbeeld de NEN-EN 1338.

6.5 Familieconcept

6.5.1 Aanleiding

Tot nu toe is er vanuit gegaan dat de conformiteitcontrole per druksterkteklasse plaatsheeft. Dit is logisch omdat het zondermeer samenvoegen van de resultaten van bijvoorbeeld een C20/25 en een C35/45 zou leiden tot niet-conformiteit van de hoge sterkteklasse.

Immers het gemiddelde f_{cm} wordt door de lagere sterkteresultaten voor de C20/25 naar beneden gehaald. Daarnaast is er door de grote verschillen in de resultaten sprake van hoge standaardafwijkingen σ en s_n .

Het afzonderlijk beoordelen van de sterkteklassen heeft echter een groot nadeel. Er zijn dan namelijk voor elke sterkteklasse waarden nodig voor de processtandaardafwijking σ en de standaardafwijking s_n .

Al deze verschillende waarden zijn niet onafhankelijk van elkaar, ze worden immers allemaal bepaald door hetzelfde productieproces. Als deze allemaal samengevoegd zouden kunnen worden in één standaardafwijking σ en s_n , dan zou dit meer informatie opleveren over afwijkingen in het productieproces.

De oplossing hiervoor is het zogenoemde familieconcept. Uitgangspunt hierbij is dat alle geproduceerde betonspecie eigenlijk familie van elkaar is, omdat het geproduceerd wordt met dezelfde grondstoffen en in dezelfde installatie. Het maakt daarbij niet uit of sprake is van verschillende samenstellingen.

Het voordeel van dit concept is dat in plaats van elk familielid afzonderlijk te beoordelen, dus bijvoorbeeld elke sterkteklasse, een uitspraak gedaan kan worden over de familie als geheel. Dit levert één proces-standaardafwijking σ op. Dit is ook van belang als statistische procescontrole wordt toegepast (paragraaf 6.6).

6.5.2 Samenstelling van een familie

Het is van groot belang bij gebruik van het familieconcept vast te stellen welke betonsamenstelling tot de familie behoort en welke niet. Doelstelling is zoveel mogelijk mengsels bij elkaar te brengen die dezelfde invloed hebben op de standaardafwijking.

Dit levert de volgende voorwaarden voor de mengsels die tot een familie kunnen behoren:

- alleen mengsels waarin hetzelfde cement wordt gebruikt, dus bijvoorbeeld CEM I 52,5 R van dezelfde productielocatie;
- alleen mengsels waarin hetzelfde type toeslagmateriaal wordt gebruikt, dus bijvoorbeeld rivierzand en riviergrind;
- alleen mengsels waarin een type I vulstof wordt toegepast. Mengsels met type II vulstof moeten in een afzonderlijke familie worden ondergebracht;
- alleen mengsels waarin al dan niet een (super-)plastificeerder wordt toegepast. Mengsels met andere hulpstoffen zoals versnellers, vertragers of luchtbelvormers, moeten individueel worden beoordeeld;
- mengsels in alle consistentieklassen, met uitzondering van 'zelfverdichtend';
- mengsels in de sterkteklassen C8/10 t/m C55/67 voor normaal- en zwaarbeton en LC 8/9 t/m LC 55/60 voor lichtbeton. Mengsels voor hogere sterkteklassen moeten individueel worden beoordeeld. Let op: op basis van de eis dat hetzelfde type toeslag materiaal moet worden gebruikt, is het bijvoegen van lichtbeton, normaalbeton en zwaarbeton, in één familie niet toegestaan.

Een betoncentrale, die gebruik maakt van één soort cement afkomstig van dezelfde productielocatie, zand, grind, al dan niet een (super-) plastificeerder en die de normaal gangbare consistentie- en sterkteklassen levert, zal meestal alle mengsels in één familie kunnen onderbrengen. Een centrale die verschillende cementen al dan niet afkomstig van verschillende productielocaties, type II vulstoffen, of verschillende typen toeslagmateriaal, zoals lichtgewicht of kalksteen, gebruikt, zal meer families moeten samenstellen.

Als de centrale daarnaast ook andere hulpstoffen dan (super-)plastificeerders gebruikt, of mengsels levert voor zelfverdichtend beton of in een hoge sterkteklasse, zullen deze mengsels afzonderlijk moeten worden beoordeeld.

6.5.3 Omrekenen van familieleden

Als de familie is samengesteld moet eerst een referentiemengsel worden gekozen. Gewoonlijk is dit het mengsel dat het meest geproduceerd wordt. Dit wordt het referentiebeton genoemd.

Vervolgens moet vastgesteld worden hoe de andere mengsels naar het referentiebeton toegerekend kunnen worden. Daarvoor is een relatie nodig tussen de mengselsamenstelling en de druksterkte. Een dergelijke relatie is in dit dictaat al eerder aan de orde geweest, namelijk bij het mengselontwerp. Het is de relatie:

$$f_{cm} = 0,8 \times N_{28} + \frac{25}{wcf} - 45$$

Wanneer hetzelfde cement wordt toegepast, is de water-cementfactor de enige factor van de mengselsamenstelling die nog invloed heeft op de druksterkte. Verschillende mengsels met hetzelfde cement kunnen dus op basis van de water-cementfactor naar elkaar worden toegerekend.

Stel het referentiebeton is C30/37. De gemiddelde sterkte waarop het mengsel is ontworpen, f_{cm} , is dan $37 + 8 = 45 \text{ N/mm}^2$. Wanneer CEM I 32,5 R wordt toegepast ($N_{28} = 48 \text{ N/mm}^2$) zal dit mengsel een water-cementfactor hebben van 0,48.

De betoncentrale produceert ook C20/25. De gemiddelde sterkte waarop het mengsel is ontworpen, f_{cm} , is dan $25 + 8 = 33 \text{ N/mm}^2$. Wanneer CEM I 32,5 R wordt toegepast ($N_{28} = 48 \text{ N/mm}^2$) zal dit mengsel een water-cementfactor hebben van 0,63.

De betoncentrale produceert ook C35/45. De gemiddelde sterkte waarop het mengsel is ontworpen, f_{cm} , is dan $45 + 8 = 53 \text{ N/mm}^2$. Wanneer CEM I 32,5 R wordt toegepast ($N_{28} = 48 \text{ N/mm}^2$) zal dit mengsel een water-cementfactor hebben van 0,42.

Om de sterkte van respectievelijk een mengsel C20/25 en C35/45 naar het referentiebeton C30/37 om te rekenen, moeten we bij het gevonden resultaat voor de druksterkte, het verschil in druksterkte dat ontstaat door het verschil in water-cementfactor optellen. Voor de C20/25 is dit $(25/0,48 - 25/0,63) = +12,4 \text{ N/mm}^2$. Voor de C35/45 is dit $(25/0,48 - 25/0,42) = -7,4 \text{ N/mm}^2$.

In bovenstaande uitwerking wordt uitgegaan van de beoogde gemiddelde sterkte en de ontwerp water-cementfactor. Uiteraard kan bij het beschikbaar zijn van de werkelijk verkregen water-cementfactor van een specifiek monster deze waarde worden gebruikt voor de omrekening. Uiteraard moet die water-cementfactor wel zo nauwkeurig mogelijk worden bepaald.

6.5.4 Conformiteitcontrole voor een familie

Stel dat we beschikken over 15 meetresultaten voor de sterkte afkomstig uit verschillende sterkteklassen. Zoiets als weergegeven in tabel 6.9.

Als elke sterkteklasse individueel zou moeten worden beoordeeld, zijn er nog onvoldoende resultaten. Het is daarom handig hier uit te gaan van het familieconcept.

Tabel 6.9 15 meetresultaten.

nummer	mengsel	water- cementfactor	druksterkte f_{ci} (N/mm ²)
1	C30/37	0,48	46,0
2	C20/25	0,63	29,8
3	C35/45	0,42	52,7
4	C30/37	0,48	47,2
5	C30/37	0,48	46,1
6	C30/37	0,48	44,3
7	C20/25	0,63	30,6
8	C20/25	0,63	32,4
9	C20/25	0,63	31,0
10	C30/37	0,48	44,2
11	C35/45	0,42	52,6
12	C35/45	0,42	54,1
13	C30/37	0,48	44,4
14	C30/37	0,48	42,1
15	C30/37	0,48	45,9

Stap 1 – beoordelen individuele meetresultaten

De eerste stap in de controle is te kijken of elk individueel meetresultaat voldoet aan de eis $f_{ci} \geq f_{ck} - 4$. Dit moet direct gebeuren als de druksterkte is bepaald, dus reeds voordat alle 15 meetwaarden zijn verzameld. Als een druksterkte niet voldoet, wordt de betreffende charge niet-conform verklaard.

Tabel 6.10 Eerste beoordeling van de 15 meetresultaten.

nummer	mengsel	water- cementfactor	druksterkte f_{ci} (N/mm ²)	$f_{ck} - 4$ (N/mm ²)	$f_{ci} \geq f_{ck} - 4$ (N/mm ²)
1	C30/37	0,48	46,0	33	Ja
2	C20/25	0,63	29,8	21	Ja
3	C35/45	0,42	52,7	41	Ja
4	C30/37	0,48	47,2	33	Ja
5	C30/37	0,48	46,1	33	Ja
6	C30/37	0,48	44,3	33	Ja
7	C20/25	0,63	30,6	21	Ja
8	C20/25	0,63	32,4	21	Ja
9	C20/25	0,63	31,0	21	Ja
10	C30/37	0,48	44,2	33	Ja
11	C35/45	0,42	52,6	41	Ja
12	C35/45	0,42	54,1	41	Ja
13	C30/37	0,48	44,4	33	Ja
14	C30/37	0,48	42,1	33	Ja
15	C30/37	0,48	45,9	33	Ja

Alle individuele waarden voldoen aan de eis.

Stap 2 – beoordelen of alle leden tot de familie behoren

De volgende stap in de controle is te kijken of elk lid, dus elk mengsel (sterkteklasse), wel deel uitmaakt van de familie. Hiervoor gebruiken we de volgende tabel uit de NEN-EN 206.

Tabel 6.11 Criteria voor een familielid.

aantal resultaten "n" voor een familielid	gemiddelde f_{cm} van "n" resultaten voor een familielid
2	$\geq f_{ck} - 1,0$
3	$\geq f_{ck} + 1,0$
4	$\geq f_{ck} + 2,0$
5	$\geq f_{ck} + 2,5$
6	$\geq f_{ck} + 3,0$
7, 8, 9	$\geq f_{ck} + 3,5$
10, 11, 12	$\geq f_{ck} + 4,0$
13, 14	$\geq f_{ck} + 4,5$
≥ 15	$\geq f_{ck} + 1,48 \cdot \sigma$

- Voor de C20/25 geldt dat er 4 meetwaarden zijn met een gemiddelde sterkte f_{cm} van 31,0 N/mm². Hiervoor moet volgens tabel 6.11 gelden dat $31,0 \geq 25 + 2,0 = 27$ N/mm². Hieraan wordt voldaan en dit mengsel behoort dus tot de familie.
- Voor de C30/37 geldt dat er 8 meetwaarden zijn met een gemiddelde sterkte f_{cm} van 45,0 N/mm². Hiervoor moet volgens tabel 6.11 gelden dat $45,0 \geq 37 + 3,5 = 40,5$ N/mm². Hieraan wordt voldaan en dit mengsel behoort dus ook tot de familie.
- Voor de C35/45 geldt dat er 3 meetwaarden zijn met een gemiddelde sterkte f_{cm} van 53,1 N/mm². Hiervoor moet volgens tabel 6.11 gelden dat $53,1 \geq 45 + 1,0 = 46$ N/mm². Hieraan wordt voldaan en dit mengsel behoort dus ook tot de familie.

Als een mengsel niet voldoet, moet deze uit de familie worden verwijderd en individueel worden beoordeeld. Het mengsel kan pas weer terugkeren in de familie als het weer aan de eisen genoemd in tabel 6.11 wordt voldaan.

Stap 3 – omrekenen familieleden naar referentiebeton

De derde stap is alle meetresultaten terug te rekenen naar het referentiemengsel. Hiervoor wordt het berekende verschil op basis van de water-cementfactor bij het resultaat opgeteld. Dit levert een gecorrigeerde waarde op (zie tabel 6.12).

Er zijn nu 15 gecorrigeerde meetresultaten voor het referentiebeton C30/37 in een familie die we aanduiden als 'familie I'. Deze kunnen nu gecontroleerd worden.

Tabel 6.12 15 meetresultaten voor familie I.

nummer	mengsel	water- cement- factor	druksterkte f_{ci} (N/mm ²)	$f_{ck} - 4$ (N/mm ²)	$f_{ci} \geq f_{ck} - 4$ (N/mm ²)	correctie (N/mm ²)	gecorrigeerd (N/mm ²)
1	C30/37	0,48	46,0	33	Ja	0,0	46,0
2	C20/25	0,63	29,8	21	Ja	+12,4	42,2
3	C35/45	0,42	52,7	41	Ja	-7,4	45,3
4	C30/37	0,48	47,2	33	Ja	0,0	47,2
5	C30/37	0,48	46,1	33	Ja	0,0	46,1
6	C30/37	0,48	44,3	33	Ja	0,0	44,3
7	C20/25	0,63	30,6	21	Ja	+12,4	43,0
8	C20/25	0,63	32,4	21	Ja	+12,4	44,8
9	C20/25	0,63	31,0	21	Ja	+12,4	43,4
10	C30/37	0,48	44,2	33	Ja	0,0	44,2
11	C35/45	0,42	52,6	41	Ja	-7,4	45,2
12	C35/45	0,42	54,1	41	Ja	-7,4	46,7
13	C30/37	0,48	44,4	33	Ja	0,0	44,4
14	C30/37	0,48	42,1	33	Ja	0,0	42,1
15	C30/37	0,48	45,9	33	Ja	0,0	45,9

Stap 4 – Conformiteitcontrole voor de familie

Uitgangspunt is ook hier dat er reeds een processtandaardafwijking voor de familie is vastgesteld voor de eerste 35 meetresultaten behorend bij de familie. Deze bedraagt bijvoorbeeld 3,5 N/mm². Hoewel er sprake is van verschillende sterkteklassen, levert het familieconcept dus uiteindelijk maar één waarde op voor de processtandaardafwijking σ .

Het gemiddelde van de 15 gecorrigeerde meetwaarden is 44,7 N/mm². Beoordeeld moet dus worden of: $44,7 \text{ N/mm}^2 \geq 37 + 1,48 \times 3,5 = 42,2 \text{ N/mm}^2$. Dit voldoet en er is dus sprake van conformiteit voor de familie.

De standaardafwijking voor de 15 meetresultaten $s_{15} = 1,6 \text{ N/mm}^2$. Dit moet getoetst worden aan de eis: $0,63 \times \sigma \leq s_{15} \leq 1,37 \times \sigma$ (zie tabel 6.8). Ingevuld: $2,2 \leq 1,6 \leq 4,8$. Dit voldoet niet. Er moet dus een nieuwe processtandaardafwijking berekend worden over de laatste 35 meetwaarden. Die standaardafwijking wordt vervolgens bij de toetsing van de volgende 15 waarnemingen gebruikt.

6.6 Statistische procesbeheersing (methode C)

Het principe van statistische procesbeheersing is dat niet meer achteraf een controle wordt uitgevoerd op een serie resultaten zoals bij de conformiteitcontrole, maar dat elk meetresultaat direct wordt gebruikt om te kijken of het productieproces afwijkingen vertoont die buiten de normaal te verwachten afwijkingen vallen. Dat is al even aan de orde geweest bij het toepassen van de toetsing op overlappende beoordelingsperioden.

Feitelijk gaat het hierbij dus niet alleen meer om conformiteitcontrole, maar ook om controle van het productieproces zodat dit beheerst plaatsvindt.

Om gebruik te kunnen maken van statistische procesbeheersing moeten de meetresultaten in een grafiek worden geplaatst.

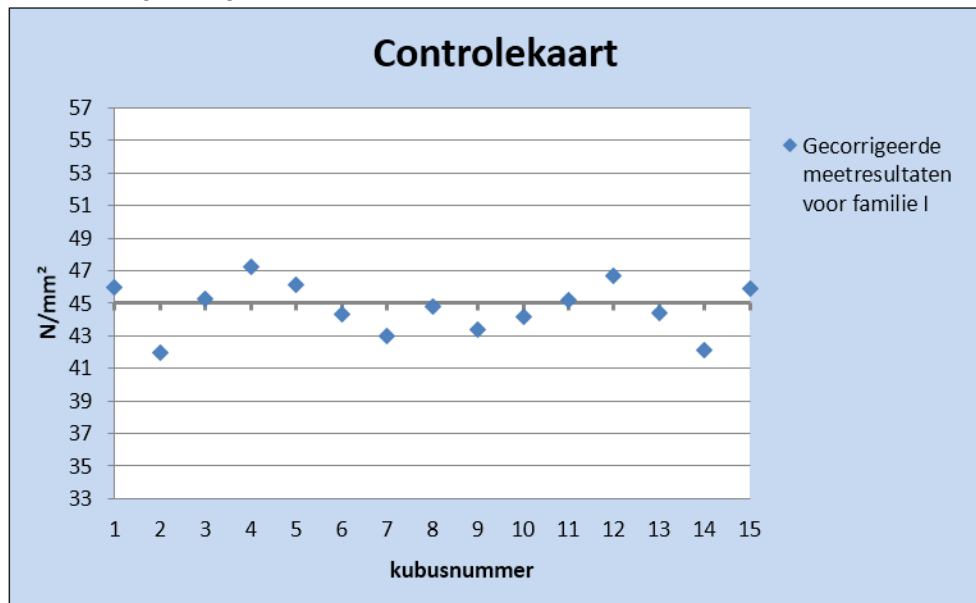
Daarnaast moeten waarschuwings- en actiegrenzen worden aangebracht die gebaseerd zijn op de statistische achtergrond genoemd in NEN-EN 206.

Daarbij is het van belang dat gekozen wordt voor het percentage afwijkingen in de populatie dat nog steeds aanvaardbaar wordt geacht. Dit percentage (AQL) mag bijvoorbeeld 5% zijn. Het wordt ook wel aangeduid met $AQL = 5\%$, waarbij AQL staat voor: Acceptable Quality Limit.

Er zijn twee methoden die in de NEN-EN 206 worden genoemd onder de verzamelnaam methode C. Deze methoden zullen hier kort worden behandeld. Uitgangspunt bij deze methoden is dat wanneer de productiecontrole voor de druksterkte binnen bepaalde grenzen blijft, ook de conformiteit is gewaarborgd.

6.6.1 Controlekaarten (Shewhart)

Een controlekaart bestaat uit een horizontale lijn in een grafiek die de beoogde gemiddelde sterkte weergeeft. Dit is de f_{cm} die bij het mengselontwerp wordt gebruikt ($= f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2$) of de beoogde gemiddelde sterkte voor het referentiebeton bij gebruik van het familieconcept (45 N/mm^2 voor familie I in genoemd voorbeeld). Op de verticale as staat de sterkte in N/mm^2 . Uitgezet zijn de individuele meetresultaten voor een bepaalde sterkteklasse of de individuele gecorrigeerde meetresultaten voor een familie.

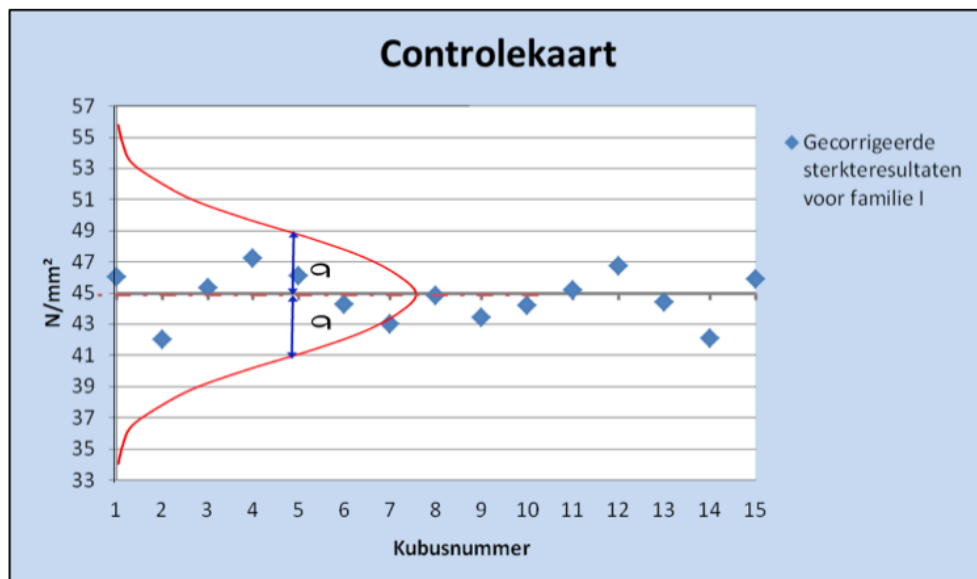


Figuur 6.2 Gecorrigeerde meetresultaten voor familie I in een controlekaart.

Uit figuur 6.2 blijkt echter nog niet duidelijk of het proces beheerst verloopt en of sprake is van conformiteit. Om hierover een uitspraak te doen, moeten in de controlekaart zogenoemde waarschuwingsgrenzen en actiegrenzen worden opgenomen. Voor de sterkte is het eigenlijk alleen nodig grenzen voor de onderkant op te nemen, de zogenoemde onderste waarschuwingsgrens (OWG) en onderste actiegrens (OAG). Echter ook een te hoge sterkte is niet goed. Er worden daarom vaak ook grenzen voor de bovenkant opgenomen, de zogenoemde bovenste waarschuwingsgrens (BWG) en bovenste actiegrens (BAG).

De vraag is nu waar deze grenzen komen te liggen. Hiervoor kan de normale verdeling van de populatie (figuur 6.1) worden gebruikt. Deze verdeling geeft aan hoe de verdeling van de

resultaten is rondom het gemiddelde. Om de ligging van de grenzen te bepalen wordt de normale verdeling 90 graden gedraaid en over de controlekaart heen gelegd (figuur 6.3).



Figuur 6.3 Controlekaart in combinatie met de normale verdeling.

De kansverdeling volgens de normale verdeling kan nu als basis voor de ligging van de grenzen worden gebruikt.

1) Actiegrenzen

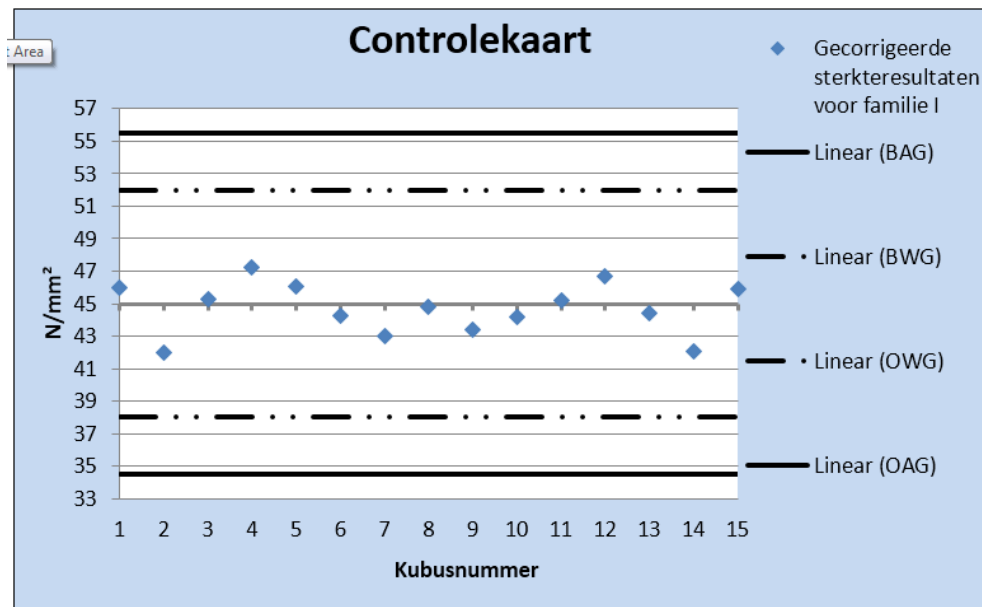
De kans dat een individueel meetresultaat kleiner is dan het gemiddelde μ minus 3 keer de standaardafwijking σ , dus $\mu - 3 \times \sigma$ is 0,13%. Hetzelfde geldt voor een individueel meetresultaat groter dan $\mu + 3 \times \sigma$. Omdat de kans hierop zo klein is, moet onmiddellijk actie worden ondernomen als een dergelijk resultaat wordt gevonden. Dit zijn dus de actiegrenzen. Voor het voorbeeld, waarbij we uitgingen van een processtandaardafwijking σ van 3,5 N/mm², zouden de actiegrenzen dus uitkomen op $45 - 3 \times 3,5$ N/mm² = 34,5 N/mm² voor de onderste actiegrens en op $45 + 3 \times 3,5$ N/mm² = 55,5 N/mm² voor de bovenste actiegrens. Dit is iets strenger dan de eis dat elke meetwaarde groter moet zijn dan $f_{ck} - 4$ N/mm². Die grens ligt in bovenstaande grafiek op $45 - 8 - 4 = 33$ N/mm².

2) Waarschuwingsgrenzen

De waarschuwingsgrenzen geven aan dat actie noodzakelijk kan worden. Zij liggen dichterbij het gemiddelde dan de actiegrenzen. Hiervoor wordt vaak het gemiddelde minus 2 keer de standaardafwijking σ gebruikt. De kans dat een individueel sterkerresultaat kleiner is dan deze grens, is 2,3%. Hetzelfde geldt voor de kans dat een individueel sterkerresultaat groter is dan het gemiddelde plus 2 keer de standaardafwijking. Dit is op zichzelf nog een redelijke kans. Echter de kans dat twee opeenvolgende resultaten of groter of kleiner zijn dan de waarschuwingsgrens, is $0,023 \times 0,023 = 0,0005$ of wel 0,05%. In dat geval is dus echt actie nodig.

Voor het voorbeeld, waarbij we uitgingen van een processtandaardafwijking σ van 3,5 N/mm², zouden de waarschuwingsgrenzen dus uitkomen op $45 - 2 \times 3,5$ N/mm² = 38 N/mm² voor de onderste waarschuwingsgrens en op $45 + 2 \times 3,5$ N/mm² = 52 N/mm² voor de bovenste waarschuwingsgrens.

Dit levert de volgende controlekaart.



Figuur 6.4 Controlekaart met waarschuwings- en actiegrenzen voor familie I.

Alle waarden vallen ruim binnen de waarschuwingsgrenzen. Het proces is dus beheerst. Als twee opeenvolgende individuele meetwaarden buiten de waarschuwingsgrenzen, maar binnen de actiegrenzen vallen, moet toch actie worden ondernomen. Als een individuele meetwaarde buiten de actiegrenzen valt, moet direct actie worden ondernomen. In eerste instantie moet worden nagegaan of er tijdens de productie omstandigheden zijn geweest die deze lage waarden kunnen hebben veroorzaakt. (Een en ander zoals beschreven in 6.1.5.) Op basis van de bevindingen moet het proces en/of de mengselsamenstelling worden aangepast.

6.6.2 Aangepaste Shewhart-kaart

Als de controlekaart niet alleen gebruikt wordt voor de procesbeheersing, maar ook voor de conformiteitscontrole, dan is een aangepaste Shewhart-kaart nodig. Deze kaart berust op hetzelfde principe als de controlekaart, echter worden nu niet de individuele meetresultaten, maar het voortschrijdend gemiddelde meetresultaat uitgezet. Bij de berekening van het voortschrijdend gemiddelde over bijvoorbeeld 15 waarnemingen wordt bij het verkrijgen van een volgende waarneming de oudste waarneming weggelaten en het gemiddelde opnieuw berekend over de laatste 15 waarnemingen. Voorbeeld: bij het beschikbaar komen van waarneming 16 wordt het gemiddelde berekend over waarneming 2 t/m 16. Er is dus altijd sprake van het gemiddelde over 15 waarnemingen. Bij waarneming 17 wordt dus het gemiddelde berekend over waarneming 3 t/m 17, enz. We maken dus gebruik van overlappende beoordelingsperioden.

In plaats van een onderste actiegrens, wordt een lijn gebruikt die aangeeft wanneer geen sprake meer is van conformiteit. Voor 15 metingen ligt deze lijn op: $f_{ck} + 1,48 \times \sigma$. Voor familie I komt de lijn voor de conformiteit te liggen bij $37 + 1,48 \times 3,5 \text{ N/mm}^2 = 42,2 \text{ N/mm}^2$ (de processtandaardafwijking was $3,5 \text{ N/mm}^2$). Belangrijk is dat de gebruikte waarde voor de processtandaardafwijking σ altijd groter dan of gelijk is aan $3,0 \text{ N/mm}^2$, zelfs als berekend is dat deze lager is. Dit is om te voorkomen dat bij relatief kleine afwijkingen de processtandaardafwijking moet worden herzien.

Voordat we op deze manier kunnen toetsen, moet dus eerst de processtandaardafwijking over 35 waarnemingen worden berekend. Vanaf waarneming 36 kan vervolgens het voortschrijdend gemiddelde over de laatste 15 waarnemingen worden berekend en getoetst.

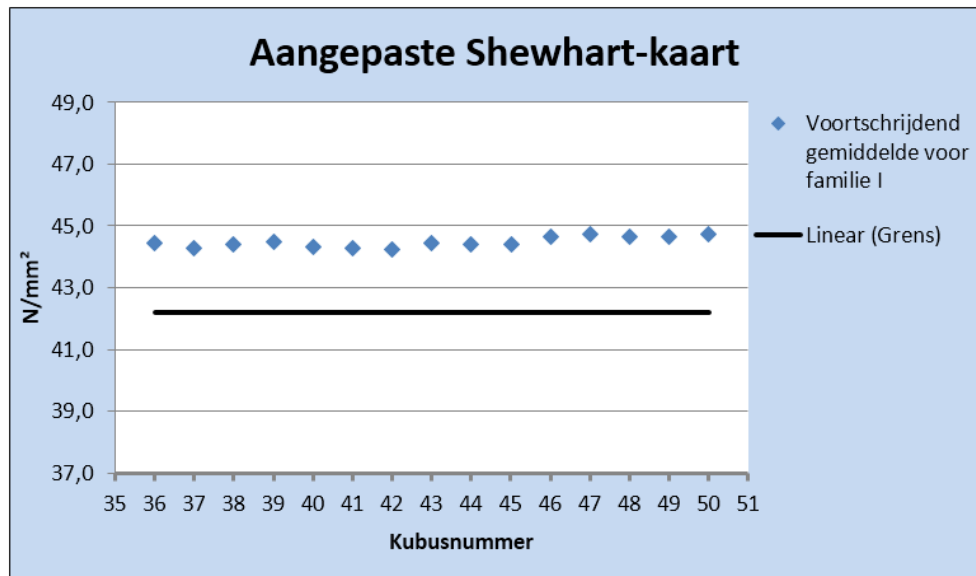
Om het voortschrijdend gemiddelde voor de eerste waarneming in die tabel te kunnen berekenen, moeten we dus beschikken over de voorgaande 14 waarnemingen. In tabel 6.13 worden daarom nu de waarnemingen 20 t/m 50, de gecorrigeerde sterkte voor familie I en het voortschrijdend gemiddelde daarvan (vanaf waarneming 36) weergegeven.

Van de waarnemingen 22 t/m 35 is geen voortschrijdend gemiddelde berekend omdat daarvoor (in dit geval) niet de waarnemingen 1 t/m 21 beschikbaar zijn.

Tabel 6.13 Gecorrigeerde druksterkte voor familie I.

kubus-nummer	mengsel	water-cement-factor	druksterkte f_{ci} (N/mm ²)	correctie (N/mm ²)	gecorrigeerd (N/mm ²)	voortschrijdend gem. (N/mm ²)
22	C30/37	0,48	45,0	0,0	45,0	
23	C20/25	0,63	30,8	+12,4	43,2	
24	C35/45	0,42	53,7	-7,4	46,3	
25	C30/37	0,48	48,2	0,0	48,2	
26	C30/37	0,48	45,1	0,0	45,1	
27	C30/37	0,48	43,3	0,0	43,3	
28	C20/25	0,63	29,6	+12,4	42,0	
29	C20/25	0,63	31,4	+12,4	43,8	
30	C20/25	0,63	32,2	+12,4	44,6	
31	C30/37	0,48	41,5	0,0	41,5	
32	C35/45	0,42	52,9	-7,4	45,5	
33	C35/45	0,42	52,6	-7,4	45,2	
34	C30/37	0,48	42,5	0,0	42,5	
35	C30/37	0,48	44,6	0,0	44,6	
36	C30/37	0,48	46,0	0,0	46,0	44,5
37	C20/25	0,63	29,8	+12,4	42,2	44,3
38	C35/45	0,42	52,7	-7,4	45,3	44,4
39	C30/37	0,48	47,2	0,0	47,2	44,5
40	C30/37	0,48	46,1	0,0	46,1	44,3
41	C30/37	0,48	44,3	0,0	44,3	44,3
42	C20/25	0,63	30,6	+12,4	43,0	44,3
43	C20/25	0,63	32,4	+12,4	44,8	44,4
44	C20/25	0,63	31,0	+12,4	43,4	44,4
45	C30/37	0,48	44,2	0,0	44,2	44,4
46	C35/45	0,42	52,6	-7,4	45,2	44,6
47	C35/45	0,42	54,1	-7,4	46,7	44,7
48	C30/37	0,48	44,4	0,0	44,4	44,7
49	C30/37	0,48	42,1	0,0	42,1	44,6
50	C30/37	0,48	45,9	0,0	45,9	44,7

Het resultaat is weergegeven in figuur 6.5.



Figuur 6.5 Conformiteitcontrole voor familie I met behulp van aangepaste Shewhart-kaart.

Wat direct opvalt is dat de berekende waarden van het voortschrijdend gemiddelde in dit geval niet veel variatie vertonen. Dat is logisch omdat eventuele afwijkende individuele waarden elk maar voor 1/15 gedeelte meetellen in het resultaat. Pas wanneer meerdere waarnemingen (sterk) naar boven of beneden afwijken, zal ook het voortschrijdend gemiddelde naar boven of beneden gaan. Vandaar dat steeds getoetst moet worden of de individuele waarden voldoen aan de eis: $f_{ci} > f_{ck} - 4 \text{ N/mm}^2$.

Het voortschrijdend gemiddelde voldoet in het onderhavige voorbeeld tijdens de beoordeelde periode ruimschoots aan de conformiteitseis. Bij elke nieuwe waarneming wordt deze toetsing opnieuw uitgevoerd. Daardoor ontstaat al snel het beeld of ook het proces nog goed beheerst wordt. Uiteraard kan ook in deze grafiek boven de ingetekende afkeurgrens ook een waarschuwingsgrens worden aangebracht.

6.6.3 CUSUM

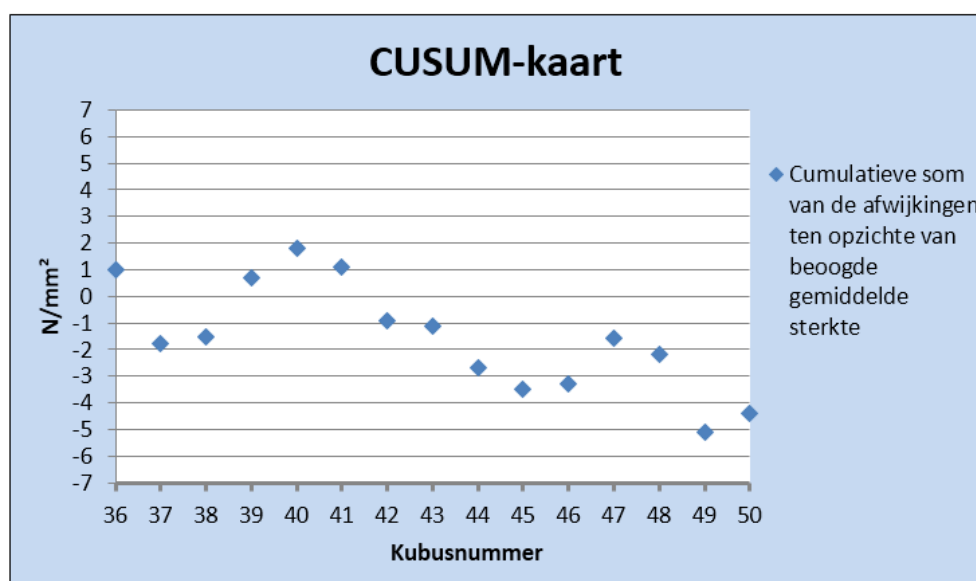
De CUSUM-methode is een verder ontwikkeld systeem op basis van controlekaarten. De naam is een afkorting van "cumulatieve som", of in het Engels "cumulative sum". In een CUSUM-kaart is de horizontale lijn niet de beoogde gemiddelde sterkte zoals in een controlekaart, maar het nulpunt voor de cumulatieve afwijking van de sterkte ten opzichte van de beoogde gemiddelde sterkte.

In tabel 6.14 zijn voor familie I de waarden voor de cumulatieve som (cusum) berekend. Hiervoor is eerst de beoogde gemiddelde sterkte afgetrokken van de gecorrigeerde sterkte. Dit is de afwijking. Vervolgens zijn de afwijkingen vanaf de eerste waarneming voor elke nieuwe waarneming bij elkaar opgeteld (gecumuleerd).

Tabel 6.14 CUSUM voor familie I.

kubus nummer	mengsel	gecorrigeerd (N/mm ²)	beoogde f_{cm} (N/mm ²)	afwijking (N/mm ²)	CUSUM (N/mm ²)
36	C30/37	46,0	45,0	+1,0	+1,0
37	C20/25	42,2	45,0	-2,8	-1,8
38	C35/45	45,3	45,0	+0,3	-1,5
39	C30/37	47,2	45,0	+2,2	+0,7
40	C30/37	46,1	45,0	+1,1	+1,8
41	C30/37	44,3	45,0	-0,7	+1,1
42	C20/25	43,0	45,0	-2,0	-0,9
43	C20/25	44,8	45,0	-0,2	-1,1
44	C20/25	43,4	45,0	-1,6	-2,7
45	C30/37	44,2	45,0	-0,8	-3,5
46	C35/45	45,2	45,0	+0,2	-3,3
47	C35/45	46,7	45,0	+1,7	-1,6
48	C30/37	44,4	45,0	-0,6	-2,2
49	C30/37	42,1	45,0	-2,9	-5,1
50	C30/37	45,9	45,0	+0,9	-4,2

De CUSUM wordt vervolgens uitgezet in een kaart.



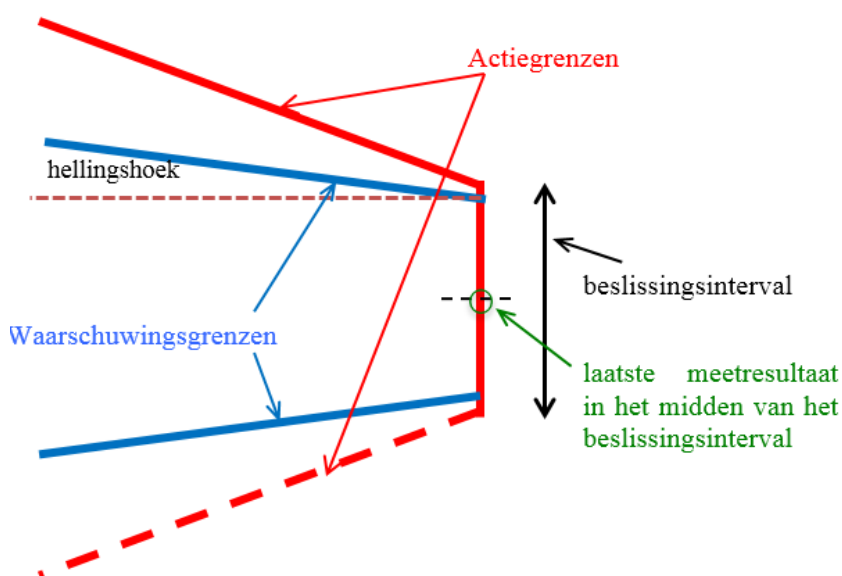
Figuur 6.6 CUSUM-kaart voor familie I.

Zolang de cumulatieve afwijking rond de nullijn blijft, is sprake van geringe afwijkingen van de beoogde sterkte die soms positief en soms negatief zijn maar gemiddeld daarmee overeenkomen. Er is dan sprake van een beheerst proces. Als de cumulatieve afwijking zich naar boven of beneden blijft bewegen, is dat het gevolg van het feit dat de afwijkingen ten opzichte van de beoogde sterkte respectievelijk meer positief of meer negatief zijn. De gemiddeld gevonden sterkte komt dus niet meer overeen met de gewenste. De CUSUM voor familie I lijkt zich na kubusnummer 41 naar beneden te bewegen. Deze trend is niet of nauwelijks waarneembaar in een controlekaart volgens Shewhart (zie figuur 6.2).

Deze grotere gevoeligheid voor het aantonen van ook kleine systematische afwijkingen en trends is de grote kracht van een cusum-methode.

Belangrijk is nu de vraag: wanneer is de cusum zodanig dat actie ondernomen moet worden. Of: wanneer is de geconstateerde afwijking van de cusum significant. (Significant wil zeggen: is het geconstateerde verschil sterker werkelijkheid of is het maar toevallig).

Hiervoor worden, net als bij de controlekaart, een onderste- en bovenste actiegrens en een onderste en bovenste waarschuwingsgrens gehanteerd. Bij de cusum-methode worden echter geen horizontale lijnen getrokken in de kaart, maar wordt een zogenoemd V-masker op het laatste meetresultaat gelegd.



Figuur 6.7 Voorbeeld van een V-masker voor de cusum-methode.

Een V-masker bestaat in de basis uit een verticale lijn met aan beide uiteinden een schuine lijn die onder een hellingshoek naar links loopt. Dit zijn de doorgetrokken lijnen in figuur 6.7. Eventueel zijn twee extra schuine lijnen opgenomen als waarschuwingsgrenzen. Dit zijn de onderbroken lijnen in figuur 6.7.

De exacte afmetingen van het masker zijn belangrijk. Deze bepalen wanneer de geconstateerde afwijking significant is en dus tot actie moet leiden. De afmetingen van het masker zijn als volgt vastgelegd. Voor de lengte van de verticale lijn, oftewel het beslissingsinterval, geldt dat deze gelijk is aan een bepaald aantal malen (a) de processtandaardafwijking, oftewel $a \times \sigma$. Voor de hellingshoek geldt dat deze gelijk is aan de processtandaardafwijking gedeeld door een getal (b), oftewel σ / b .

In NEN-EN 206 zijn de volgende waarden gegeven voor het masker dat gebruikt moet worden bij de conformiteitcontrole.

- De lengte moet zodanig zijn dat 35 waarnemingen kunnen worden beoordeeld.
- De gebruikte processtandaardafwijking σ moet altijd groter dan of gelijk zijn aan 3,0 N/mm². Als σ dus in werkelijkheid lager is, bijvoorbeeld 2,5 N/mm², wordt toch uitgegaan van 3,0 N/mm².

- Het beslissingsinterval heeft een lengte van $9 \times \sigma$.
- Alleen de bovenste arm hoeft gebruikt te worden, met een hellingshoek van $\sigma / 2$. (Reden: er is geen conformiteitscriterium voor een bovengrens voor de sterkte).
Bij het lager worden van de gemeten sterkte zal de cusum waarde ook steeds lager worden waardoor het masker naar beneden schuift en de lijn van de cusum-lijn de waarschuwings- en/of actiegrens bereikt).

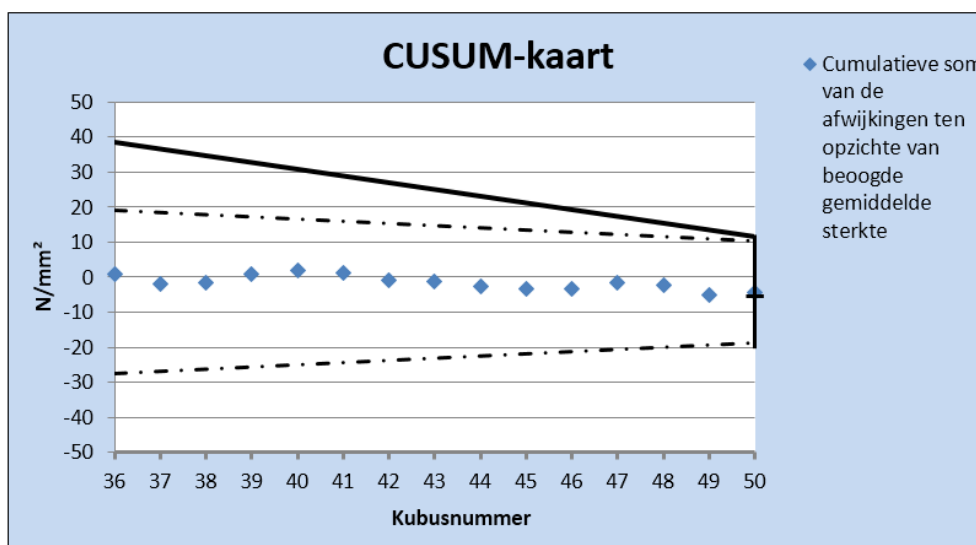
Voor de bijbehorende waarschuwingsgrenzen geldt het volgende.

- Het beslissingsinterval heeft een lengte van $8,1 \times \sigma$.
- Beide armen worden gebruikt met een hellingshoek van $\sigma / 6$.

Voor het masker voor familie I met een σ van $3,5 \text{ N/mm}^2$, geldt dus een lengte van het beslissingsinterval van $9 \times 3,5 = 31,5 \text{ N/mm}^2$ voor de conformiteitcontrole en $8,1 \times 3,5 = 28,4 \text{ N/mm}^2$ voor de waarschuwingsgrenzen.

De hellingshoek bedraagt $3,5 / 2 = 1,8 \text{ N/mm}^2$ voor de conformiteitcontrole en $3,5 / 6 = 0,6 \text{ N/mm}^2$ voor de waarschuwingsgrenzen.

In figuur 6.8 is het masker dat hieraan voldoet, over de resultaten voor familie I gelegd. Daarbij is wel de y-as van -7 tot $+7$ aangepast naar -50 tot $+50$ zodat de grenslijnen volledig in de grafiek passen. Hieruit blijkt dat de lichte neergaande trend nog niet leidt tot het kruisen van de cusum-lijn met de waarschuwings- en/of actiegrenzen. Er is dus sprake van conformiteit. Het proces is dus beheerst en er is geen actie nodig.

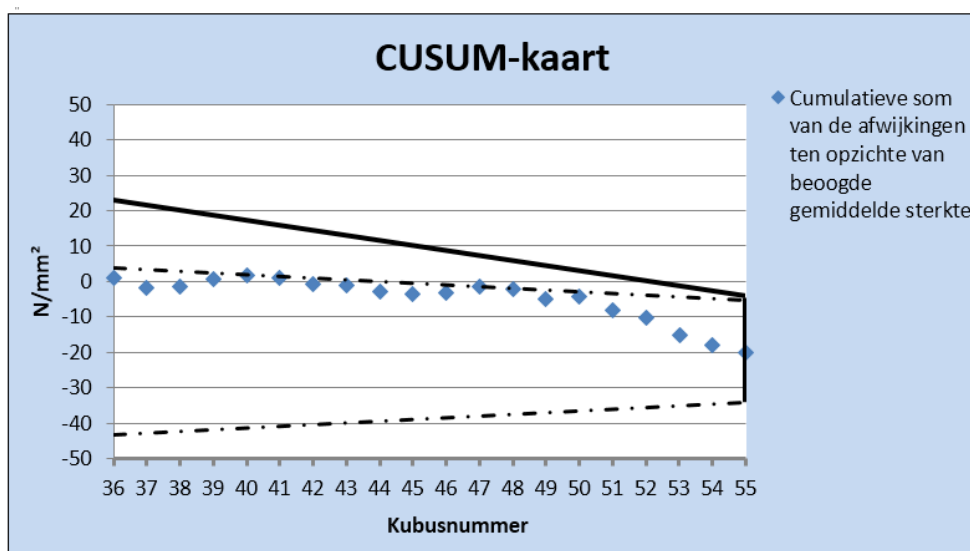


Figuur 6.8 Resultaten voor familie I in een CUSUM-kaart met een masker conform NEN-EN 206.

Stel dat vervolgens voor Familie I de volgende aanvullende meetwaarden (nummers 51 t/m 55) worden gevonden.

Tabel 6.15 20 meetresultaten voor familie I.

nummer	mengsel	gecorrigeerd (N/mm ²)	beoogde f_{cm} (N/mm ²)	afwijking (N/mm ²)	CUSUM (N/mm ²)
36	C30/37	46,0	45,0	+1,0	+1,0
37	C20/25	42,2	45,0	-2,8	-1,8
38	C35/45	45,3	45,0	+0,3	-1,5
39	C30/37	47,2	45,0	+2,2	+0,7
40	C30/37	46,1	45,0	+1,1	+1,8
41	C30/37	44,3	45,0	-0,7	+1,1
42	C20/25	43,0	45,0	-2,0	-0,9
43	C20/25	44,8	45,0	-0,2	-1,1
44	C20/25	43,4	45,0	-1,6	-2,7
45	C30/37	44,2	45,0	-0,8	-3,5
46	C35/45	45,2	45,0	+0,2	-3,3
47	C35/45	46,7	45,0	+1,7	-1,6
48	C30/37	44,4	45,0	-0,6	-2,2
49	C30/37	42,1	45,0	-2,9	-5,1
50	C30/37	45,9	45,0	+0,9	-4,2
51	C35/45	41,1	45,0	-3,9	-8,1
52	C30/37	43,0	45,0	-2,0	-10,1
53	C30/37	40,0	45,0	-5,0	-15,1
54	C30/37	42,2	45,0	-2,8	-17,9
55	C20/25	43,0	45,0	-2,0	-19,9



Figuur 6.9 Overschrijding van de waarschuwingsgrens.

Pas bij waarneming 55 blijkt dat bij het plaatsen van het V-masker de cusum-lijn de waarschuwingsgrens bereikt. We weten op dat moment dat sprake is van een significante afwijking. Omdat de actiegrens nog niet wordt bereikt door de cusum-lijn voldoet de populatie echter nog steeds.

De vraag die nu moet worden beantwoord is: wanneer is deze verandering opgetreden? Daarvoor moeten we kijken naar de plek waar een duidelijke knik in de cusum-lijn plaats vond. (Een knik duidt op een systematische verandering in het niveau van de meetresultaten).

Dat is bij meting 51. Vanaf dat moment moest ook het V-masker bij elke nieuwe meting naar beneden worden verplaatst. Blijkbaar is er vanaf dat moment een afwijking in het proces opgetreden. Dat vergemakkelijkt het zoeken naar de oorzaak van de verandering.

Er is in figuur 6.9 nog steeds sprake van conformiteit, omdat de conformiteitsgrens niet is overschreden. Er is echter wel actie vereist om te voorkomen dat de cusum verder daalt.

Ook bij het hanteren van de cusum-methode moet bij het vaststellen van een niet-conformiteit in eerste instantie worden nagegaan of er tijdens de productie omstandigheden zijn geweest die deze lage waarden kunnen hebben veroorzaakt. (Een en ander zoals beschreven in 6.1.5) Op basis van de bevindingen moet het proces en/of de mengsel-samenstelling worden aangepast.

In alle gevallen moet men daarbij bedenken dat het de meting van de sterkte na 28 dagen betrof. Tellen we daarbij nog een aantal dagen bij die nodig waren om vast te stellen dat de afwijking echt significant was, dat betekent het nemen van actie altijd dat we zeker een maand achter de feiten aanlopen.

Een gebruikelijke actie is de hoeveelheid cement te verhogen, dat wil zeggen: de watercementfactor te verlagen waardoor de gemiddelde sterkte omhoog zal gaan. Hierdoor zal de cusum uiteindelijk weer gaan stijgen en het masker omhoog schuiven. Wanneer geen actie wordt ondernomen, zal de cusum verder kunnen dalen en zal het masker verder naar beneden schuiven. Dit zal uiteindelijk leiden tot niet-conformiteit wanneer de actiegrens door de cusum-lijn wordt overschreden.

Het bovenstaande is slechts een eenvoudige uitwerking van de cusum-methode. Gewoonlijk zal een cusum gebaseerd zijn op de gemiddelde sterkte na 7 dagen in plaats van de gemiddelde sterkte na 28 dagen, om een mogelijke afwijking eerder te kunnen constateren. Verder moet volgens NEN-EN 206 naast de cusum voor de gemiddelde sterkte (cusum M) ook een cusum worden gemaakt voor de processtandaardafwijking (cusum R) en wanneer gebruik wordt gemaakt van de 7-daagse gemiddelde sterkte, ook van de correlatie tussen de 7- en 28-daagse sterkteresultaten (cusum C). Dit wordt hier verder niet behandeld.

Voor aanvullende informatie zie Betoniek 15/03 "Sturen op cijfers" en het ERMCO-rapport "Use of control charts in the production of concrete".

