

BTO 2014.001 | maart 2014

BTO rapport

Betonnen leidingen:
inventarisatie,
conditiebepaling en
onderhoud

BTO

Betonnen leidingen: inventarisatie,
conditiebepaling en onderhoud

BTO 2014.001 | maart 2014

Opdrachtnummer
B222031-005

Projectmanager
Nellie Slaats

Opdrachtgever
BTO

Kwaliteitsborger
Mirjam Blokker

Auteur
Ronald van Eijk

Verzonden aan
Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is
openbaar.

Jaar van publicatie
2014

Meer informatie

T +31306069598
E ronald.van.eijk@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



BTO 2014.001 | maart 2014 © KWR

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd,
opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand,
of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze,
hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën,
opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande
schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenvatting

In Nederland ligt anno 2013 ongeveer 1280 kilometer aan betonnen buizen voor het transport van reinwater (drinkwater), ruwwater en industriewater. Ongeveer de helft van deze lengte wordt gebruikt voor het transport van ruwwater. Ongeveer 70 procent van de buizen betreft voorgespannen beton. Er is een grote variatie in type buizen en verbindingen, die niet bij alle bedrijven in kaart is gebracht. Meer dan de helft van de betonnen leidingen heeft een diameter van 1000 mm of groter. Gezien de grote diameters van betonnen leidingen hebben breuken en lekkages een groot effect op de omgeving. Conditiebepaling en een goede onderhoudsstrategie zijn dus belangrijk voor deze leidingen.

Het doel van dit rapport is om een overzicht te geven van materiaalkennis, relevante technieken en methoden om de conditie van deze leidingen te bepalen en technieken om onderhoud uit te voeren. De inhoud van dit rapport is gebaseerd op literatuur, informatie van fabrikanten en beoordelingsrichtlijnen. Daarnaast is gebruik gemaakt van interviews met beheerders, planvormers en uitvoerders die te maken hebben met beheer, onderhoud en vervanging van betonnen leidingen.

Er is veel bekend over beton en de conditie van betonnen constructies, maar nauwelijks over betonnen leidingen die onder de grond liggen. Een aantal degradatiemechanismen is bekend voor beton en wapening en een aantal mechanismen is bekend voor verbindingen. Belangrijke mechanismen zijn draadbreek, corrosie, uitloging, degradatie van rubberringen en toename van de voegwijdte tussen verbindingen.

Diverse technieken zijn beschikbaar om de conditie van betonnen buizen te bepalen. Dit betreft zowel destructieve, als niet-destructieve technieken en zowel gedetailleerd materiaalonderzoek aan beton en staalraden als volle schaal proeven op buisdelen. In dit rapport wordt beschreven welke methoden in welke situaties ingezet kunnen worden.

Een onderhoudsstrategie voor betonnen leidingen bestaat uit de volgende stappen:

1. Type betonnen leidingen en verbindingen in kaart brengen
2. Monitoren
3. Conditiebepaling
4. Onderhoud (vervanging of levensduurverlenging)

Om uit de resultaten van conditiebepaling een uitspraak te kunnen doen over de faalkans en restlevensduur dient een voorspellingsmodel te worden ontworpen en gevalideerd.

Inhoud

1	Introductie	5
2	Betonnen leidingen in Nederland	6
2.1	Historie aanleg betonnen leidingen	6
2.2	Type buizen	7
2.3	Jaar van aanleg	14
2.4	Diameters	14
2.5	Functie (reinwater, ruwwater, industriewater)	15
2.6	Storingservaringen	16
2.7	Samenvatting	17
3	Materiaaleigenschappen en degradatie	18
3.1	Inleiding	18
3.2	Cement, beton en uitharding	18
3.3	Eigenschappen van beton	18
3.4	Eigenschappen van de wapening	19
3.5	Eigenschappen verbindingen	20
3.6	Aantasting van beton	20
3.7	Aantasting van de wapening	23
3.8	Verdraaiing en degradatie van verbindingen	26
3.9	Interne en externe belasting	27
3.10	Conclusie	27
4	Conditiebepalingsmethoden	29
4.1	Visueel onderzoek	29
4.2	Bekloppen	29
4.3	Onderzoek wapening (niet-destructief)	29
4.4	Onderzoek wapeningsstaal (destructief)	31
4.5	Onderzoek aan beton (niet destructief)	31
4.6	Onderzoek aan beton (destructief)	32
4.7	Voegwijdte opmeten	34
4.8	Kruindrukproef	34
4.9	Waterdrukproef	34
4.10	Afpersen	34
4.11	Bodemonderzoek	35
4.12	Potentiaal tussen bodem en leiding	35
4.13	Lekdetectie	35
4.14	Akoestisch monitoren staaldraden	35
4.15	Storingsregistratie	35
4.16	Samenvatting conditiebepalingsmethoden	36
5	Onderhoud	38
5.1	Algemeen	38
5.2	Vervanging	38
5.3	Renovatie	38
5.4	Reparatie	39

6	Aanbevelingen conditiebepaling en onderhoudsstrategie	40
6.1	Huidige praktijk in Nederland en ervaringen Verenigde Staten	40
6.2	Strategie algemeen	40
6.3	Betonnen leidingen in kaart brengen	41
6.4	Monitoren	41
6.5	Conditiebepaling	41
6.6	Onderhoud (vervanging of levensduurverlenging)	41
7	Conclusie	42
8	Literatuur	43

1 Introductie

Een deel van het Nederlandse leidingnet is uitgevoerd in beton. Hoewel het aandeel betonnen leidingen in lengte beperkt is (minder dan 1 %), betreft het in de meeste gevallen vitale leidingen met grote diameters. Er is veel bekend over beton en de conditie van betonnen constructies, maar veel minder over ondergrondse betonnen leidingen.

Het doel van dit rapport is om een overzicht te geven van materiaalkennis, relevante technieken en methoden om de conditie van deze leidingen te bepalen en technieken om onderhoud uit te voeren. In dit project wordt gekeken naar betonnen leidingen voor transport van zowel ruwwater als drinkwater.

De inhoud van dit rapport is gebaseerd op literatuur, informatie van fabrikanten, en beoordelingsrichtlijnen. Daarnaast is gebruik gemaakt van interviews met beheerders, planvormers en uitvoerders die te maken hebben met beheer, onderhoud en vervanging van betonnen leidingen.

Dit rapport beschrijft de stand van zaken met betrekking tot betonnen leidingen in Nederland. In hoofdstuk 2 wordt een uitgebreide inventarisatie beschreven van het Nederlandse betonnen leidingnet, de type buizen die er liggen en de storingservaringen. Hoofdstuk 3 beschrijft de materiaaleigenschappen en degradatiemechanismen van betonnen leidingen. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van conditiebepalingsmethoden. Hoofdstuk 5 geeft een beschrijving van de mogelijkheden voor onderhoud en renovatie. Hoofdstuk 6 geeft aanbevelingen voor de toepassing van conditiebepalingsmethoden en een onderhoudsstrategie. Hoofdstuk 7 bevat de conclusies.

2 Betonnen leidingen in Nederland

2.1 Historie aanleg betonnen leidingen

Rond 1933 zijn de eerste betonnen leidingen ontwikkeld voor toepassing als drinkwaterleidingen. In het verleden viel de keuze op beton, omdat betonnen buizen beschikbaar waren in grote diameters. Betonnen buizen waren goedkoper dan stalen buizen en bij de aanleg ervan waren minder lasinrichtingen nodig vergeleken met de aanleg van staal. Vergeleken met grijs gietijzer is beton goedkoper en beter handelbaar. Voorgespannen betonnen buizen met grote diameters zijn vooral in de jaren 1950 tot 1980 toegepast.

Wanneer de kans op verzakking van het maaiveld groot was, zijn de buizen voorzien van een fundering, bestaande uit houten of betonnen palen. Vaak wordt de verbinding ondersteund door twee palen, voorzien van kespunten (houten dwarsliggers), waarbij de buis wordt vastgezet met een beugel.

Fabrikanten in Nederland

In Nederland zijn verreweg de meeste betonnen buizen voor transport van (voorgezuiverd) drinkwater geleverd door twee leveranciers:

- Bonna Vianen
- Betondak (later bekend onder de namen Beton-Arkel en Betonson)

De Firma Bonna was gevestigd in Vianen. Deze firma is later opgegaan in de firma Kijlstra beton. De vestiging Vianen is in 2009 opgeheven als productielocatie.

De firma Betondak was gevestigd in Arkel. Deze firma ging samen met Betonson, gevestigd in Son. De nieuwe naam werd eerst Baxon (Betondak Arkel Son) en later werden de namen Beton-Arkel en Betonson gebruikt. Betonson is sinds 1996 onderdeel van de Van Nieuwpoort groep. In 2009 werd de productielocatie in Arkel gesloten.

Een bedrijf dat anno 2014 betonnen buizen en reparatiestukken levert is De Hamer in Nijmegen.

Sinds 2000 worden in Nederland nauwelijks nog leidingen met grotere diameters aangelegd. Wanneer leidingen met grote diameters (van beton) worden vervangen of verlegd wordt voor de nieuwe leiding vrijwel altijd gekozen voor staal en in sommige gevallen voor nodulair gietijzer (NGIJ) of Glasvezel Versterkt Kunststof (GVK).

2.2 Type buizen

Betonnen leidingen kunnen op basis van de af- of aanwezigheid en eigenschappen van de wapening worden onderverdeeld in drie verschillende typen:

- Buizen van *ongewapend* beton
- Buizen van gewapend beton *zonder* voorspanning
- Buizen van gewapend beton *met* voorspanning

Deze typen en hun varianten worden beschreven in de volgende paragrafen.

2.2.1 Ongewapend beton

Ongewapend beton is voor de toepassing in drukbuizen niet geschikt, daar beton geen grote trekspanningen kan opnemen. Wel worden drukloze rioolbuizen van ongewapend beton vervaardigd.

Ongewapend beton kan ook uitstekend dienst doen als stempeling voor bochten en dergelijke. In dat geval wordt de ruimte tussen de buitenbocht en de sleufwand, of eventueel een damwand, opgevuld met beton. Hiermee worden spatkrachten die in de bocht ontstaan opgevangen.

2.2.2 Gewapend beton zonder voorspanning

Beton is veel meer drukvast dan trekvast. Door het aanbrengen van staalwapening kan de buis beter trekkrachten opnemen.

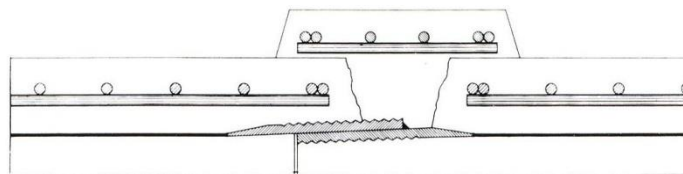
Lasbuizen (beton met stalen kern)

Buizen met plaatstalen kern hebben een lasverbinding (Figuur 1) en worden in het werk aan elkaar gelast. De leiding is dan ongeleed en heeft een starre verbinding. Om de lasverbinding wordt een ring gestort van gewapend beton. De buis bestaat uit de volgende elementen:

1. Een plaatstalen kernbuis met aangepaste verbindingseinden
2. Een binnenbekleding van gecentrifugeerd of hoogfrequent getrild beton, al dan niet voorzien van wapening
3. Een buitenbekleding van hoogfrequent getrild beton voorzien van een langs- en spiraalwapening

De binnen- en buitenbekleding fungeren als corrosiebescherming voor de plaatstalen kernbuis. Bij haarscheurtjes in de kernbuis beschermt het door het beton veroorzaakte alkalische milieu aantasting van de wapening.

Buizen van gewapend beton met plaatstalen kern worden gebruikt als lasbuizen, voor het samenstellen van kunstwerken en voor zinkers. Bij leidingen uit voorgespannen betonbuizen worden vaak hulpstukken gebruikt, die dan zijn vervaardigd uit beton met plaatstalen kern.



KONISCHE LASVERBINDING

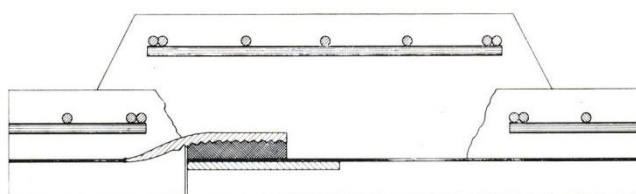
Figuur 1 Schematische weergave konische lasverbinding met omstorting. Stalen kern, lasverbinding, langs- en spiraalwapening en gewapende omstorting van de verbinding zijn weergegeven.

Globaal genomen tref je in leidingen van vóór 1970 à 1975 slechts stalen kern hulpstukken aan, waarbij bochtconstructies worden verankerd met bijvoorbeeld damwanden. In latere leidingsystemen zie je meer doorgelaste constructies van stalen kernbuizen verschijnen, waarmee het geheel trekvast werd gemaakt. Door ontwikkeling van beton met voorgespannen wapening is het gebruik van beton zonder voorspanning teruggelopen en beperkt tot leidingen waarin veel hulpstukken voorkomen.

Deze buizen zijn zowel door Bonna Vianen als door Beton Arkel / Betonson geleverd. Ze worden ook vaak lasbuizen genoemd of beton met stalen kern.

Bonna strik

Bonna Vianen heeft in de jaren 1920-1950 de zogenaamde Bonna striktouw buizen geleverd. Deze buizen worden gekenmerkt door de strikverbinding, waarbij de ruimte tussen spie en mof wordt gevuld met enige slagen lood- en striktouw (Figuur 2). In sommige gevallen werd hiervoor een asbestcement bevattend koord (het zogenaamde PC 4) gebruikt (Bonna, 1962). Strikverbindingen zijn star en dus niet geschikt voor zettingsgevoelige gebieden. De Bonna strik buizen hebben een dunne metalen kern, ook wel aangeduid als blikken kern.



STRIKVERBINDING

Figuur 2 Schematische weergave strikverbinding. Stalen kern, striktouw, langs- en spiraalwapening en gewapende omstorting van de verbinding zijn weergegeven.

Vianini

Er bestaan ook buizen van gewapend beton zonder plaatstalen kern. Dit zijn de zogenaamde Vianini buizen, geproduceerd door Betondak. Deze buizen zijn ook vaak nog voorzien van natuurrubber ringen.

Mantelbuizen

Mantelbuizen worden toegepast bij weg- en spoor kruisingen om de watervoerende buis te beschermen tegen bovenbelasting en bij eventuele lekkage het water af te voeren. Mantelbuizen kunnen niet in waterkeringen worden toegepast.

Boorbuizen

Boorbuizen worden gekenmerkt door een uitwendige diameter die overal gelijk is. Dit maakt het mogelijk om de buis met zo min mogelijk weerstand door bijvoorbeeld de bodem te persen. Bonna Vianen heeft boorbuizen geleverd, de zogenaamde Züblin buizen.

Bar-Wrapped Pipe (BWP)

In het buitenland wordt de zogenaamde Bar-Wrapped Pipe (BWP) volgens AWWA C303 toegepast. Deze bestaat uit een stalen kern, met daaromheen wapeningsstaal gewikkeld. De binnenkant wordt voorzien van een beton coating en de buitenkant wordt met mortel afgewerkt. Feitelijk is dit een stalen buis, waarbij het beton en het cement alleen ter bescherming van het staal is aangebracht. Het is vooral de stalen kern die de structurele sterkte bepaalt. De spiraalwapening in BWP is dikker en minder sterk dan die in Prestressed Concrete Cylinder Pipe buizen (PCPP, zie kader in paragraaf 2.2.3) en onder minder spanning gewikkeld. Dit verkleint de kans op draadbreek.

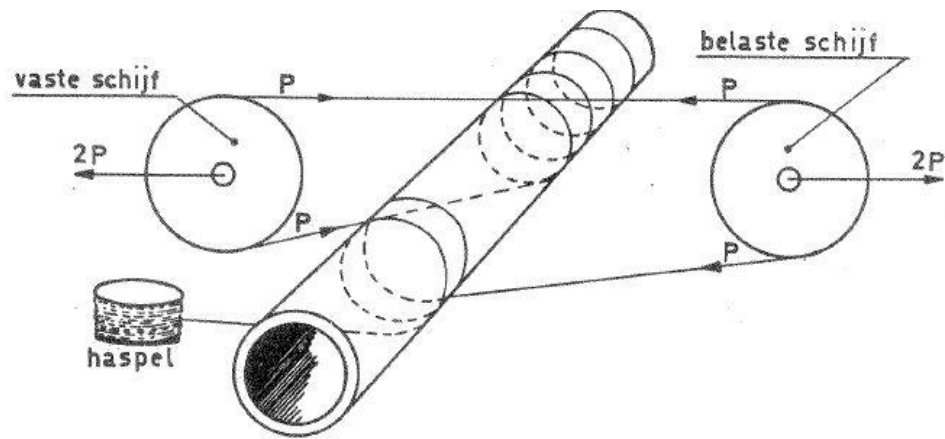
2.2.3 Gewapend beton met voorspanning

Door het aanbrengen van voorgespannen staalwapening kan de buis over een grotere lengte beter trekkrachten opnemen.

Globaal zijn twee methoden te onderscheiden om de voorspanning aan te brengen. Deze worden hier omschreven.

Buizen met gewikkelde spiraalwapening

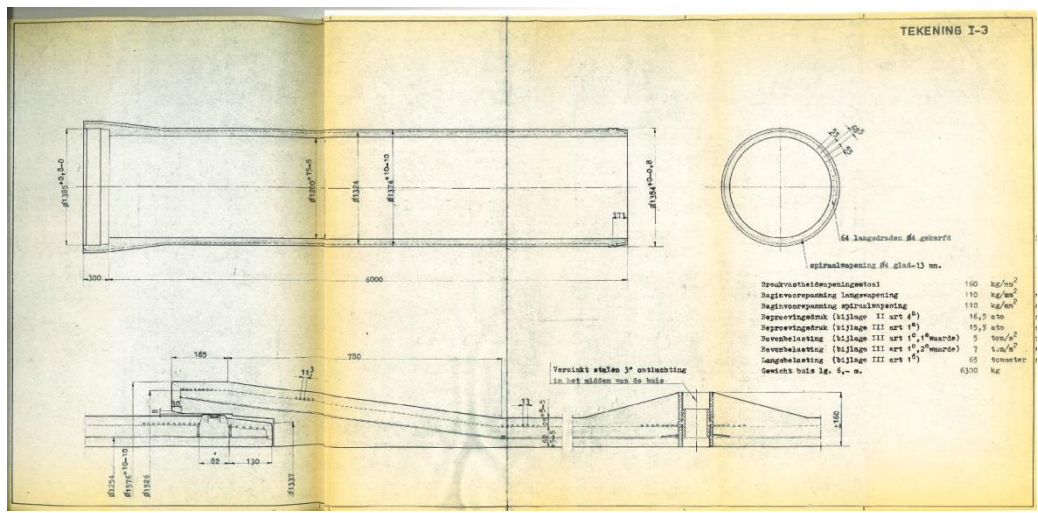
Eerst wordt door middel van centrifugeren een betonnen kernbuis gemaakt, waarin zich voorgespannen langswapening (4 mm, licht geprofileerd) bevindt. De kernbuis van wordt door middel van stomen verhard en daarna ontkist. Vervolgens wordt om de kernbuis spiraalwapening (5 mm, glad) gewikkeld. De spanning in de draad en de spoed waarmee wordt gewikkeld, bepalen de sterkte van de buis (Figuur 3). Ter bescherming van de spiraal wordt tenslotte een betonnen deklaag om de kernbuis gewikkeld (Betonson, 2003).



Figuur 3 Schematische weergave wikkelp proces voorgespannen spiraalwapening

De buizen zijn gefabriceerd met een inwendige diameter van 600 tot 1800 mm, meestal in lengtes van 6 meter. De ontwerpdruk is in veel gevallen 8 bar.

De buizen met een binnendiameter van bijvoorbeeld 1200 mm hebben een betonnen kernbuis met een wanddikte van 62 mm en een deklaag op de spiraalwapening van ongeveer 25 mm. De onderlinge afstand tussen de wikkelingen is 20 mm (Figuur 4).



Figuur 4 Tekening voorgespannen Arkelbuis en verbinding met specificaties (1962)

Deze buizen werden eerst door Betondak en later door Beton Arkel en Betonson gefabriceerd. Deze buizen worden daarom in de praktijk aangeduid als (voorgespannen) Arkelbuizen (Betonson, 2003).

Bonna Vianen heeft tot 1965/1966 ook buizen volgens dit procedé gefabriceerd, voordat zij overstapten op de Sentab methode (Bonna, 1966).

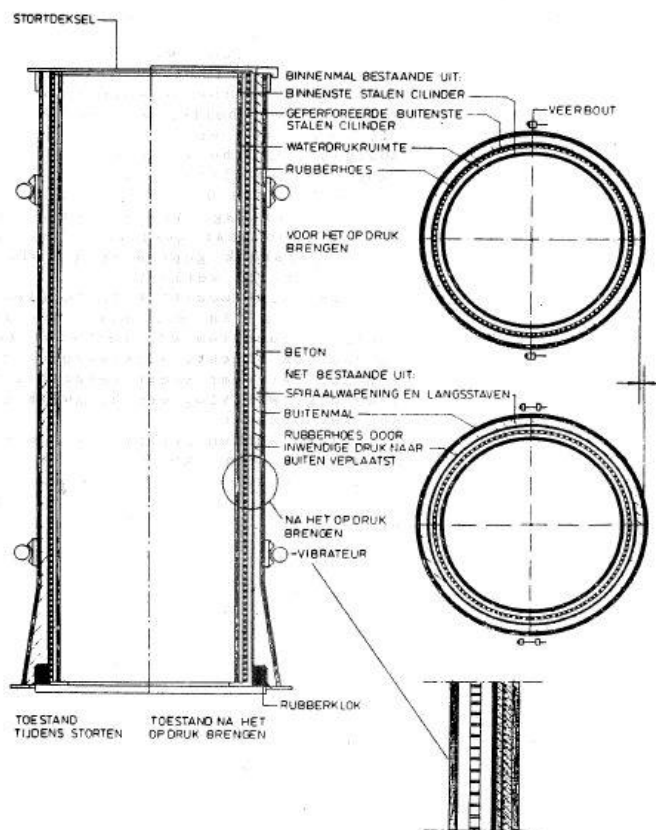
Deze buizen hebben meestal een rubberen glijverbinding. De buizen uit Arkel hadden verschillende verbindingstypen: 1e generatie en 2e generatie met eerst de lange mof en later de korte mof.

Om het beton te beschermen tegen invloeden van grondwater werden de buizen op verzoek van het waterbedrijf aan de buitenkant bestreken met Inertol-standaard, een bitumineus product. Ook werden de voegen afgesmeerd met mortel om contact met het grondwater te voorkomen.

Sentab buizen (verticaal gestort)

Deze buizen worden gefabriceerd met behulp van een speciale binnenmal. Dit is een stalen stortcilinder, die bestaat uit twee concentrische stalen cilinders, waarvan de buitenste geperforeerd is met daaroverheen gespannen een rubberhoes. Dit geheel wordt in een buitenmal geplaatst met daarin een nog spanningsloos spiraalvormig geprefabriceerd net van hoogwaardig staal en voorgespannen langsstaven. Het beton wordt verticaal gestort in de ruimte tussen binnen- en buitenmal en door trillen verdicht. De constructie wordt afgesloten en de binnenmal wordt met water op druk gebracht. Hierdoor wordt het verdichte beton radiaal verplaatst en het spiraalvormige stalen net opgespannen. In deze toestand wordt het beton verhard totdat deze voldoende sterkte heeft. Daarna wordt de waterdruk opgeheven en de binnen- en buitenmal gedemonteerd. Het resultaat is een in langs- en dwarsrichting (spiraalwapening) voorgespannen homogene betonbuis.

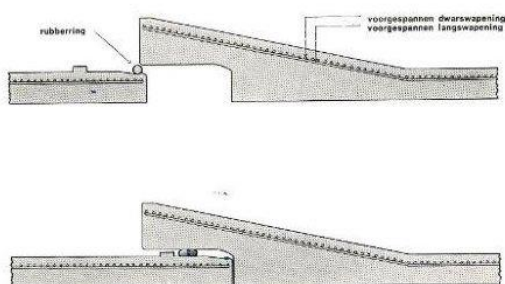
De buizen zijn gefabriceerd met een inwendige middellijn van 500 tot en met 2000. De buislengte bedraagt 5 meter voor de buizen met een middellijn van 500 mm en 6 meter voor de grotere middellijnen (Bonna, 1966).



Figuur 5 Productie van de Bonna Sentab buis

Deze buizen zijn destijds gefabriceerd door de firma Bonna te Vianen. De buizen worden Bonna Sentab buizen genoemd, waar Sentab naar de methode verwijst (Bonna, 1966). Deze buizen zijn geleverd vanaf begin jaren 60 tot in de jaren 70.

Deze buizen hebben meestal een rubberen rolverbinding (figuur 6) (Bonna, 1966).



Figuur 6 Rubberen rolverbinding inclusief voorgespannen dwars- en langswapening

In het buitenland wordt de zogenaamde Prestressed Concrete Cylinder Pipe (PCCP) volgens AWWA C301/C304 toegepast. Deze bestaat uit een betonnen kern, daaromheen een dunne stalen cilinder, waar draden van hoogwaardig staal onder voorspanning omheen zijn gewikkeld en voorzien van een mortel bekleding. Deze variant wordt Lined Cylinder Pipe genoemd (LCP). Vanaf 1952 bestaat de variant waarbij de stalen cilinder eerst nog wordt omhuld door beton, waarna dus de draadwapening om beton wordt gewikkeld in plaats van direct om de stalen kern. Deze variant wordt de Embedded Cylinder Pipe (ECP) genoemd.

2.2.4 Kwaliteitseisen in Nederland

Buizen met een stalen kern zonder voorspanning moesten vanaf 1959 voldoen aan de KIWA kwaliteitseisen nr.18. Deze eisen zijn een aantal keren aangepast. Tegenwoordig geldt BRL K260 voor buizen en hulpstukken van gewapend beton met plaatstalen kern voor het transport van drinkwater. De betonkwaliteit van nieuwe buizen moet voldoen aan C35/45 volgens NEN-EN 206-1 en het toe te passen cement moet voldoen aan NEN-EN 197-1. Eisen worden o.a. gesteld aan het plaatstaal, het wapeningsstaal en aan de spoed van de spiraalwapening. Er worden ook eisen gesteld aan de lasmethoden en aan de verbindingen (glijverbinding, rolverbinding, lasverbinding).

Voorgespannen buizen voor het transport van drinkwater (voor zover die nog worden geproduceerd in Nederland) moeten tegenwoordig voldoen aan BRL K263. Dat is de beoordelingsrichtlijn voor voorgespannen buizen voor het transport van drinkwater. De betonkwaliteit moet minimaal voldoen aan C45/55 volgens NEN-EN 206-1. Verder worden eisen gesteld aan het voorspanwikkeldraad en de geprofileerde voorspanlangsdraden.

2.2.5 Type buizen in betonnen leidingnet in Nederland

De drinkwaterbedrijven hebben informatie aangeleverd over de type buizen in het leidingnet. Een overzicht van de lengtes per type betonnen buis is weergegeven in Tabel 1. In totaal ligt er 1282 km aan betonnen leidingen in Nederland. Alleen de bedrijven PWN, Waternet, Dunea en Evides waren in staat om informatie over de typen buizen aan te leveren. Opvallend is dat van 246 km (19 %) het type betonnen leiding onbekend is. Ongeveer 70 procent van de buizen betreft voorgespannen beton. De voorgespannen Arkelbuis met gewikkelde spiraalwapening is het meest toegepast.

Tabel 1 Overzicht lengtes (in km) per type betonnen buis. BV = Voorgespannen Beton, BK = Beton met stalen Kern, BG = Gewapend Beton

Type buis	PWN	WN	Dunea	Evides	Vitens	BW	WbG	WML	Oasen	WMD	Tot.
BV Arkel	34	312	223	44	0	0	0	0	0	0	612
BV Bonna Sentab	146	13	10	58**	0	0	20	0	0	0	248
BK Arkel las	3	15	7	0	0	0	0	0	0	0	26
BK Bonna las	3	27	1	44	0	0	0	0	0	0	74
BK Bonna boor	0	0,2	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0,2
BK Bonna strik	70*	0	5	0	0	0	0	0	0	0	75
BG Vianini	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Onbekend	116	0	0	68	85	41	0	2	2	0	246
Totaal (km)	372	367	248	145	85	41	20	2	2	0	1282

* Schatting op basis van lengte betonnen buizen < 1950

** Globaal (40 % van totale lengte)

2.3 Jaar van aanleg

De drinkwaterbedrijven hebben informatie aangeleverd over het jaar van aanleg van buizen in het leidingnet. Een overzicht van de lengtes per jaar van aanleg is weergegeven in Tabel 2. Ongeveer 87 procent van de lengte is aangelegd vóór 1980. De meeste betonnen leidingen zijn aangelegd in de jaren 60 en 70. Dit komt vooral door de aanleg van de WRK II (1963-1966) en de WRK III (1978). De lengte in de jaren 90 is vooral afkomstig van de aanleg van de Tweede Bergambachtleiding (1996). Na 1999 zijn er nauwelijks meer betonnen leidingen aangelegd.

Tabel 2 Overzicht lengtes (in km) betonnen leiding per jaar van aanleg

Jaar van aanleg	PWN	WN	Dunea	Evides	Vitens	BW	WbG	WML	Oasen	WMD	Totaal
<1950	70	3	14	13	3	12	0	2	0	0	117
1950-1959	29	77	58	41	47	9	0	0	0	0	260
1960-1969	67	197	21	18	19	15	12	0	0	0	347
1970-1979	164	54	72	71	9	5	6	0	2	0	382
1980-1989	3	9	17	0	1	0	3	0	0	0	34
1990-1999	34	16	66	0	2	1	0	0	0	0	119
>1999	5	11	0	0	3	0	0	0	0	0	19
Totaal	372	367	248	142	83	41	20	2	2	0	1278

2.4 Diameters

De keuze voor beton als materiaal werd vooral gemaakt, omdat betonnen buizen in grote diameters beschikbaar waren. Betonnen buizen worden gebruikt voor transport over lange afstanden.

De drinkwaterbedrijven hebben informatie aangeleverd over de diameters van de buizen in het leidingnet. Een overzicht van de lengtes per diameter is weergegeven in Tabel 3. Meer dan de helft van de betonnen leidingen heeft een diameter van 1000 mm of groter. Alleen de

bedrijven PWN, Waternet, Dunea en Evides hebben leidingen met een diameter groter dan 1000 mm in bedrijf. De overige bedrijven hebben alleen betonnen leidingen met een diameter van 1000 mm of kleiner.

Tabel 3 Overzicht lengtes (in km) betonnen leiding per diameter

Diameter	PWN	WN	Dunea	Evides	Vitens	BW	WbG	WML	Oasen	WMD	Totaal
300 mm	0	1	0	0	16	0	0	0	0	0	18
400 mm	18	3	0	16	11	9	0	0	0	0	57
500 mm	79	6	1	34	14	2	0	2	0	0	137
600 mm	31	4	7	2	17	6	0	0	0	0	66
700 mm	15	54	3	0	21	0	12	0	0	0	105
800 mm	34	30	33	3	6	0	6	0	0	0	112
900 mm	42	1	3	1	0	0	0	0	0	0	47
1000 mm	24	84	42	6	0	25	2	0	2	0	185
1200 mm	9	131	19	32	0	0	0	0	0	0	191
1400 mm	113	4	46	30	0	0	0	0	0	0	193
1500 mm	8	49	37	0	0	0	0	0	0	0	94
1600 mm	0	0	57	1	0	0	0	0	0	0	58
1800 mm	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Totaal	372	367	248	145	85	41	20	2	2	0	1282

Gezien de grote diameters van het merendeel van de betonnen buizen, en de daarmee gepaarde grote drukken en volumestromen, zijn de effecten van een breuk en lekkage aanzienlijk. Dergelijke incidenten leiden tot grote ontgrondingskuilen, kritieke situaties bij waterkeringen en aanzienlijke reparatiekosten. Daarnaast is er sprake van veel wateroverlast en waterverlies.

2.5 Functie (reinwater, ruwwater, industriewater)

Betonnen buizen worden vooral toegepast als transportleidingen en nauwelijks als distributieleiding. Ze kunnen worden gebruikt voor het transport van reinwater (drinkwater), ruwwater ((voorgezuiverd) rivierwater) of industriewater. Betonnen buizen zijn onder andere gebruikt in de ruwwater transportleidingen van Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland (WRK), namelijk in de WRK I (1500 mm), WRK II (dubbele leiding, 1200 mm), WRK III (dubbele leiding, 1400 mm) en de transportleidingen van Dunea (Bergambachtleiding (BAL) 1 en 2, Afgedamde Maas leiding).

De drinkwaterbedrijven hebben informatie aangeleverd over de functie van de buizen in het leidingnet. Een overzicht van de lengtes per functie (transport van reinwater, ruwwater of industriewater) is weergegeven in Tabel 4. Leidingen met reinwater kunnen zowel transport- als distributieleidingen zijn. Leidingen met ruwwater zijn altijd transportleidingen. De verdeling in lengte tussen rein- en ruwwater is ongeveer 50/50 procent. Ter informatie zijn ook de lengtes vermeld zoals opgegeven door VEWIN. Deze lengtes betreffen alleen leidingen voor transport van drinkwater (reinwater). In drie gevallen wijken de waarden van VEWIN af van door de het drinkwaterbedrijf opgegeven lengtes. Dit komt mede doordat een deel van het betonnen leidingnet is gesaneerd in de periode tussen 2010 en 2013. De lengtes die VEWIN opgeeft voor Waternet en Vitens zijn volgens opgave van de betreffende drinkwaterbedrijven onjuist.

Tabel 4 Overzicht lengtes (in km) betonnen leiding per functie

Functie	PWN	WN	Dunea	Evides	Vitens	BW	WbG	WML	Oasen	WMD	Totaal
Reinwater	199	141	92	58	83	39	20	2	2	0	637
Ruwwater	153	215	156	87	2	2	0	0	0	0	614
Industriewater	20	11	0	0	0	0	0	0	0	0	31
Totaal	372	367	248	145	85	41	20	2	2	0	1282
VEWIN 2010	203	197	92	68	130	40	21	2	2	0	755

2.6 Storingservaringen

Volgens de gegevens van USTORE (USTOREweb, 2013) zijn in de periode van 2009-2012 in totaal 25 storingen geregistreerd in betonnen leidingen. Het betreft drie drinkwaterbedrijven, namelijk PWN, Waternet en Waterbedrijf Groningen. Deze bedrijven hebben een storingsfrequentie van respectievelijk 0,012; 0,009 en 0,062 storingen/km/jaar in betonnen leidingen over de betreffende periode. De meeste storingen betroffen de buis (19) en in de overige gevallen betrof het de verbinding (6). Als oorzaken worden genoemd: inwendige aantasting (10), onbekend (9), uitwendige aantasting (3), door derden (2) en foute aanleg (1). Uit deze gegevens is niet duidelijk op te maken wat precies wordt bedoeld met inwendige en uitwendige aantasting. Uitwendige aantasting wordt in alle drie gevallen genoemd bij een storing in de verbinding. Inwendige aantasting wordt zowel bij de buis als bij de verbinding als oorzaak genoemd. In de opmerkingen wordt niets over de staat van de wapening of corrosie of andere vormen van aantasting genoemd.

Vitens registreert storingen niet in USTORE. Volgens eigen opgave zijn er in de periode 2009-2012 tien storingen opgetreden (ongeveer 0,03 storingen/km/jaar). Hier betrof het in 8 gevallen de buis en in 2 gevallen de bocht. Als belangrijkste oorzaak wordt slijtage genoemd (5 gevallen).

Evides registreert storingen niet in USTORE. Volgens eigen opgave zijn er in de periode 2005 t/m 2012 tien storingen opgetreden (ongeveer 0,008 storingen/km/jaar). Hiervan zijn zes storingen het gevolg van graafschade en vier waarschijnlijk het gevolg van zettingen.

Bij Brabant Water zijn in de jaren 1975 tot 1987 jaarlijks afpersproeven gedaan. De in totaal 39 lekken die daarbij ontstonden zijn direct gerepareerd. Naast deze lekken zijn drie lekken ontstaan in 1974 en 1981.

Uit gesprekken met medewerkers van PWN en een schadeonderzoek is gebleken dat de voorgespannen buizen met gewikkelde spiraalwapening van de firma Bonna gevoelig zijn voor waterstofbroosheid (Mesman, 2007). De productie door firma Bonna van buizen met het voorspanstaal waarin scheurvorming als gevolg van waterstofschaade voorkomt is gestopt in augustus 1965. De laatste buizen met dit type staal zijn geleverd tot half 1966 (Mesman, 2007 en Bonna, 1966).

Uit gesprekken met medewerkers van Waternet blijkt dat de WRK I (1500 mm, voorgespannen Arkel buis, aangelegd in 1954-1957) nauwelijks storingen heeft gegeven, terwijl de WRK II (1200 mm, dubbele leiding, zowel voorgespannen Arkel als voorgespannen Bonna Sentab, aangelegd in 1963-1966) wel meerdere keren heeft gestoord (Eggebrecht,

2012). Dit wordt gewijd aan de wijze van aanleggen, de gebruikte staalkwaliteit en de gebruikte wikkelspanning in de spiraalwapening. Een te hoge wikkelspanning levert een verhoogde kans op vroegtijdige breuk (TNO, 2008 en WRF, 2013). Mogelijk speelt hier ook mee dat juist staal met een hogere treksterkte gevoeliger is voor waterstofbroosheid en draadbreek. In de Verenigde Staten heeft dit in het verleden geleid tot een verbod op gebruik van stalen draadwapening met een te hoge treksterkte in betonnen buizen (WRF, 2013).

Uit alle gesprekken ontstaat een beeld dat storingen met name worden veroorzaakt door slechte verbindingen, draadbreek of zettingen. De kwaliteit van het beton en de deklaag wordt als goed beoordeeld. Aantasting door contact met de bodem of grondwater wordt niet als een issue gezien.

2.7 Samenvatting

In Nederland ligt anno 2013 ongeveer 1280 kilometer aan betonnen buizen voor het transport van reinwater (drinkwater), ruwwater en industriewater. Ongeveer de helft van deze lengte wordt gebruikt voor het transport van ruwwater. Ongeveer 70 procent van de buizen betreft voorgespannen beton. De voorgespannen Arkelbuis met gewikkelde spiraalwapening is het meest toegepast. Er is een grote variatie in type buizen en verbindingen, die niet bij alle bedrijven in kaart is gebracht. Ongeveer 87 procent van de lengte is aangelegd vóór 1980. Meer dan de helft van de betonnen leidingen heeft een diameter van 1000 mm of groter. Gezien de grote diameters van betonnen leidingen hebben breuken en lekkages groot effect op de omgeving.

Het aantal geregistreerde storingen in betonnen leidingen is laag. Storingen worden met name veroorzaakt door slechte verbindingen, draadbreek of zettingen. De kwaliteit van het beton en de deklaag wordt als goed beoordeeld. Aantasting door contact met de bodem of grondwater wordt niet als een issue gezien. Gezien de grote effecten (grote diameters) en de belangrijke functie van de leidingen is het van belang om storingen te voorkomen en een beeld te hebben van de conditie van betonnen leidingen.

3 Materiaaleigenschappen en degradatie

3.1 Inleiding

De restlevensduur van een betonnen leiding wordt door de volgende materiaalparameters bepaald:

1. Restkwaliteit beton
2. Restkwaliteit wapening
3. Staat verbindingen

In dit rapport ligt de focus op materiaaleigenschappen en daarom wordt vooral gekeken naar bepaling van de restkwaliteit van het beton en de wapening en de staat van de verbindingen. De kwaliteit van beton wordt bepaald door de sterkte, de porositeit en de inwendige pH van het poriewater. Een hoge inwendige pH en een dichte microstructuur van beton zorgen voor een betere bescherming tegen indringing van chloriden en zuren die de wapening kunnen aantasten. De kwaliteit van de wapening wordt bepaald door de treksterkte en de integriteit (aantal draadbreuken). De staat van de verbindingen wordt bepaald door de mate van afdichting en de voegwijdte.

Lekverlies en storingsen zijn ook belangrijk voor het bepalen van de restlevensduur. Echter, deze twee parameters zijn het gevolg van een slechte conditie van de buis en geven dus alleen indirect een beeld van de conditie.

Externe effecten spelen ook een rol bij het bepalen van de restlevensduur. Dit betreft bodemcondities (zuurgraad, geleidbaarheid), zettingen en waterdruk. Omdat het hier geen materiaaleigenschappen betreft vallen deze aspecten enigszins buiten de scope van dit rapport.

3.2 Cement, beton en uitharding

De samenstelling van cement en beton, het uithardingsproces, de eigenschappen van beton en de terminologie staan uitgebreid beschreven in handboeken (Reinhardt, 1985, Souwerbren, 1995, Taylor, 1997, ENCI, 2012). Een uitgebreide samenvatting wordt gegeven in Bijlage I.

3.3 Eigenschappen van beton

3.3.1 Sterkte

Een van de belangrijkste eigenschappen van beton is de druksterkte, zoals omschreven in NEN-EN 206-1. De sterkteontwikkeling van beton hangt af van cementsoort en sterkteklasse, water-cementfactor, spcietemperatuur, eventuele hulpstoffen en uiteraard de verhardingstijd. De snelheid waarmee de sterkte toeneemt is in het begin groot, maar neemt in de tijd gezien af, tot een zekere eindwaarde is bereikt. De sterkteklasse van beton is gebaseerd op druksterktemetingen volgens NEN-EN 206-1. De sterkteklasse wordt aangeduid met de letter C (Concrete) of B (Beton), gevolgd door 2 getallen, bijvoorbeeld C80/95. Het eerste getal staat voor de cilinderdruksterkte (gemeten aan een cilindervormig

proefstuk), het tweede getal voor de kubusdruksterkte (gemeten aan een kubusvormig proefstuk), na 28 dagen uitharding en weergegeven in N/mm².

3.3.2 Porositeit en permeabiliteit

Het cementsteen in beton bevat poriën. Ze zijn gevuld met gas en/of vloeistof. Poriën hebben invloed op de sterkte van het materiaal, transport van gassen, vloeistoffen en ionen door het materiaal en op de gevoeligheid voor zowel bevriezing als uitdroging. Onderscheid wordt gemaakt tussen gelporiën tussen de hydraatvezeltjes (tot 10 nm) en de capillaire poriën, waarin het overtollige aanmaakwater ligt opgesloten (100 - 1000 nm).

De permeabiliteit van beton is de mate van weerstand tegen indringing van gassen, vloeistoffen of ionen. De permeabiliteit hangt sterk af van de porositeit, maar ook van de vorm van de poriën en de mate waarin poriën met elkaar verbonden zijn.

Naast de poriën kan beton ook microscheuren, luchtbellen bevatten. Soms bevat beton ook toevallige holten, die ontstaan door slecht verdichten of slecht storten. Rondom stortnaden kunnen bijvoorbeeld lege ruimtes ontstaan.

3.3.3 Inwendige pH

De hoge inwendige pH van het poriewater in beton is belangrijk als bescherming van de wapening en buffer tegen indringing van zuren. In onaangetast beton is een alkalisch milieu aanwezig als gevolg van de aanwezigheid van Ca(OH)₂ en een hoge concentratie aan natrium en kalium. In beton dat is samengesteld uit Portland cement heerst een evenwichts-pH van 13,0 - 14,0. In beton waarin hoogovencement of vliegascement wordt toegepast ligt de pH lager.

3.4 Eigenschappen van de wapening

Beton zonder wapening is niet geschikt om te worden toegepast voor het transport van drinkwater, waarbij de inwendige druk, positief, negatief of nul kan zijn. Hoewel de druksterkte van beton voldoende is, is de treksterkte te gering om dergelijke druk te weerstaan. Het principe van wapening is het aanbrengen van stalen wapeningsstaven, een wapeningsnet of spiraalwapening in gebieden waar bij belastingen trekspanningen in beton worden verwacht. Omdat staal een hoge treksterkte heeft kan het deze trekspanningen opnemen.

Vloiegrens en rekgrens

De vloiegrens is een materiaalconstante die het punt in een spanning-rekdiagram beschrijft waarop een ductiel materiaal "begint te vloeien", ofwel het punt waarop er plastische vervorming begint op te treden. Bij sommige materialen is de overgang van elastisch naar plastisch gebied in het spanning-rekdiagram goed definieerbaar. Andere materialen (bijvoorbeeld zacht staal) hebben een veel geleidelijker overgang zodat een consequente definitie van de vloiegrens moeilijk is. Meestal wordt dan gewerkt met de 0,2%-rekgrens of kortweg de rekgrens. Dit punt treedt op wanneer er, naast de elastische rek bepaald door de elasticiteitsmodulus, een supplementaire rek van 0,2% optreedt.

De vloiegrens van roestvast staal (AISI 302) ligt op 520 MPa en de treksterkte bedraagt 860 MPa. Een typische rekgrens voor hoogwaardige staaldraden is 1580 MPa met bijbehorend een typische treksterkte van 1760 MPa. De rekgrens bij een dergelijke staaldraad ligt dus typisch op 90% van de treksterkte.

Men maakt onderscheid tussen hoofdwapening en verdeelwapening. Een deklaag kan ook versterkt worden door aanbrengen van krimpwapening. Deze wapening is dunner dan wapeningsstaal, bestaat uit een vlechtwerk en wordt aangebracht om scheurvorming ten gevolge van krimpspanningen in de deklaag te voorkomen.

De wapening kan tijdens het aanbrengen worden voorgespannen. In dat geval spreekt men van voorgespannen beton. Voorgespannen beton kan meer worden belast dan gewapend beton zonder voorspanning en er zijn grotere overspanningen mogelijk (in geval van liggers en bruggen). De spanning kan op diverse manieren worden aangebracht zowel voor als na de uitharding van beton.

In buizen voor transport van drinkwater kan de spanning op twee manieren worden aangebracht. Bij de ene methode wordt een stalen draad onder spanning om de betonnen kerncilinder of stalen kern gewikkeld. Deze wijze wordt gebruikt bij de voorgespannen buizen van Beton Arkel. Bij de andere methode wordt een wapeningsnet met behulp van waterdruk op spanning gebracht. Deze methode werd gebruikt bij Bonna Sentab buizen. De spiraalwapening wordt altijd beschermd door een betonnen deklaag (zie Figuur 7).



Figuur 7 Spiraalwapening zichtbaar na beproeving van voorgespannen betonnen buis. De deklaag is gebroken als gevolg van de beproeving.

3.5 Eigenschappen verbindingen

In betonnen leidingen komen diverse type verbindingen voor. De rol en glijverbindingen zijn voorzien van rubber ringen. Buizen met stalen kern hebben een lasverbinding of een striktouw verbinding. De staat van de verbinding wordt bepaald door de kwaliteit van het bindingsmateriaal (degradatie rubber) en door de voegwijdte (de vrije ruimte tussen de verbindingen).

3.6 Aantasting van beton

3.6.1 Uitloging

Cementhoudende producten kunnen uitlogen als gevolg van contact met drinkwater. Het makkelijkst uit te logen deel van cement is Ca(OH)_2 , terwijl de calciumsilicahydraten weinig oplosbaar zijn. De uitloging van Ca(OH)_2 verloopt sneller naarmate het water minder zouten bevat. Dit betekent dus dat zacht drinkwater, zacht regenwater, gletsjerwater of smeltwater eerder tot uitloging leiden dan rivierwater. Als het water door het beton kan stromen en telkens verversd wordt, zal meer uitloging plaatsvinden. Bij lage temperaturen treedt het proces versneld op doordat de oplosbaarheid van Ca(OH)_2 met afnemende temperatuur toeneemt. Omdat de oplosbaarheid van kalk in water gering is, zal aantasting pas optreden wanneer beton zich in een stroom van niet-kalkhoudend (zacht) water bevindt (Reinhardt, 1985).

De snelheid waarmee uitloging plaats vindt is afhankelijk van diverse parameters, waaronder de kwaliteit (porositeit) en geometrie (diameter) van het beton, de snelheid waarmee water door of langs het beton stroomt, de tijdsduur, de temperatuur en de samenstelling van het water (Taylor, 1997). In de praktijk wordt een veilige grens aangehouden op basis van de van de kalkverzadigingsindex SI (Saturation Index). Bij een SI groter dan -0,2 neemt bijvoorbeeld de kans op uitloging van asbestcement af (Slaats et al., 2013). Volgens Taylor (1997) neemt de snelheid van uitloging toe bij een lagere pH en in zacht water met een hoog aandeel "beschikbaar CO₂" dat wil zeggen CO₂ dat beschikbaar is om te reageren met Ca(OH)₂. Om de precieze snelheid te bepalen is een gedetailleerde berekening van de samenstelling van het water op basis van alle heersende evenwichtsreacties nodig.

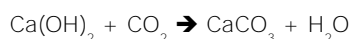
Als gevolg van uitloging nemen porositeit en permeabiliteit van beton toe. De sterkte van beton neemt af (Taylor, 1997).

Door uitloging van calciumhydroxide (Ca(OH)₂) uit cementhoudende materialen kan de samenstelling van drinkwater worden beïnvloed in de vorm van een stijging van de pH en een toename van de calciumconcentratie. Dit kan leiden tot ongewenste waterkwaliteitsveranderingen, zoals smaakklachten door de pH-verhoging en kalkafzetting. Deze ongewenste waterkwaliteitsveranderingen zijn in Nederland nog niet gerapporteerd (KWR, 2013).

Een aandachtspunt bij de toepassing van gecementeerde leidingen is de afgifte van aluminium door cement. De maximumwaarde voor aluminium in drinkwater bedraagt 200 µg/l. Concentraties aluminium in het drinkwater af pompstation hoger dan 30 µg/l dienen te worden gemeld aan de regionale inspecteur voor de volksgezondheid in verband met thuisdialyse van nierpatiënten (KWR, 2013). In Nederlands onderzoek is een maximale aluminiumconcentratie van 11 µg/l aangetroffen (Reijnen et al., 1996).

3.6.2 Carbonatatie (alleen in buitenlucht)

Carbonatatie is de inwerking van koolzuurgas uit de buitenlucht op de alkalische bestanddelen van beton. Ca(OH)₂ dat is gevormd bij de cementshydratatie reageert uiteindelijk met CO₂ uit de lucht. Hierbij wordt CaCO₃ gevormd, dat neerslaat in de poriën of op het grensvlak met de buitenlucht. De reactie is als volgt:



Carbonatatie is een langzaam voortschrijdend proces. Voor een deel komt dit door de lage concentratie van het gas in de buitenlucht en de grote reserve aan alkaliën in het beton. Een andere reden is echter dat koolzuurgas, evenals zuurstof zich alleen in uitgedroogde poriën met enige snelheid naar binnen kan bewegen. De reactie met alkaliën moet echter weer in een waterig milieu plaatshebben. Carbonatatie treedt dus op op het grensvlak van poriewater en lucht. De bij de cementshydratatie gevormde overmaat aan vrije kalk vormt een buffer die carbonatatie tegenwerkt.

Deze reactie verloopt bij aanwezigheid van een kleine hoeveelheid water. Bij een vochtgehalte van 50 à 60% verloopt de reactie het snelst. Droog beton carbonateert niet en beton dat continu vochtig is, carbonateert langzaam omdat CO₂ slechts langzaam door de met water gevulde poriën kan indringen (Reinhardt, 1985).

Het carbonatatiefront kan pas verder naar binnen dringen wanneer alle kalk lokaal is omgezet in calciumcarbonaat en het gevormde water is verdampt. Zodra lokaal de voorraad Ca(OH)₂, KOH en NaOH op is, zal de pH-waarde gaan dalen tot circa 8,3 bij volledige

carbonatatie. De indringsnelheid neemt steeds verder af omdat de af te leggen weg langer wordt naarmate de carbonatatie voortschrijdt. De pH van het gecarbonateerde beton is circa 8,3; dat van nog niet gecarbonateerd beton circa 13 (Souwerbren, 1995).

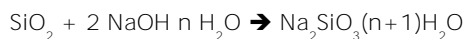
Carbonatatie heeft geen nadelige effecten op de druk- en treksterkte van beton en zal deze zelfs doen toenemen (Taylor, 1997). Het leidt echter wel tot uitdrogingskrimp en microscheurtjes (Taylor, 1997). Het belangrijkste nadelige gevolg van carbonatatie is de verlaging van de pH, waardoor de kans op corrosie van de wapening toeneemt.

Gezien de specifieke omstandigheden waarin carbonatatie optreedt, is het niet aannemelijk dat dit proces optreedt in ondergrondse betonnen leidingen. Drinkwaterleidingen zijn volledig met water gevuld en komen niet in contact met de buitenlucht. De concentratie CO_2 in drinkwater is laag.

In betonnen leidingen kan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wel uit beton verdwijnen als gevolg van uitloging, waarbij CO_2 mogelijk een rol speelt (zie paragraaf 3.6.1).

3.6.3 ASR

Bij de alkali-silicareactie (ASR), of alkali-toeslagreactie reageert in toeslagmateriaal aanwezig reactief silica (kwarts) met alkaliën in het poriewater als volgt:



Bij deze reactie wordt alkalisilicaat (waterglas) gevormd met een circa 2 maal zo groot volume als de uitgangsstoffen. Dit veroorzaakt hoge inwendige spanningen. Bepaalde soorten toeslagmateriaal bevatten reactief silica en zijn dus gevoelig voor deze reactie. De kans op schade wordt beperkt door eisen te stellen aan het gebruikte grind en aan het maximale alkaligehalte, welke wordt bepaald aan de hand van de concentratie Na_2O en K_2O in cement. Deze eisen bestonden nog niet in de tijd waarin de buizen zijn aangelegd.

ASR is zichtbaar aan het betonoppervlak als een grillig patroon van haarscheurtjes en barstjes (craquelévormig), vaak in combinatie met witte uitbloei. In Nederland is deze schade nog nooit aangetroffen in leidingen. In de Verenigde Staten zijn wel een aantal grote schadegevallen bekend (AwwaRF, 2008).

3.6.4 Sulfaataantasting (uitgestelde ettringietvorming)

Sulfaten afkomstig van bijvoorbeeld zeewater of sommige soorten grondwater kunnen beton binnendringen. Sulfaten kunnen ook al aanwezig zijn in vers beton, wanneer er sprake is van een overmaat die niet volledig heeft gereageerd. In beide gevallen kan een verbinding worden gevormd tussen sulfaten en het calciumaluminaat uit het portlandcement. Hierbij wordt ettringiet gevormd, een volumineuze verbinding met een groot aantal moleculen kristalwater. De met deze reactie gepaard gaande uitzetting vormt in plastisch beton geen probleem. Als de reactie echter plaatsvindt in uitgehard beton, spreekt men van uitgestelde ettringietvorming en deze leidt tot spanningen, scheurvorming, toename van de porositeit in cementsteen en uiteindelijk verbrossing van het beton. Deze aantasting geeft een onregelmatig scheurenpatroon in het betonoppervlak, vaak met witte uitbloei.

3.6.5 Biogene zwavelzuuraantasting (alleen riolering)

Bij aantasting van beton door zwavelzuur is in vrijwel alle gevallen sprake van zogenoemde biogene zwavelzuuraantasting. Dit is een aantasting van het betonoppervlak door zwavelzuur dat is ontstaan door bacteriële omzetting van sulfiden in zwavelzuur. Deze vorm van aantasting kan voorkomen in rioolstelsels en waterzuiveringsinstallaties.

Hierbij zijn de volgende processen te onderscheiden:

1. Omzetting van zwavelverbindingen in het rioolwater naar sulfiden door anaërobe bacteriën;
2. Ontgassing van het rioolwater, waarbij de overdracht plaatsheeft van de sulfideverbindingen die in het water zijn opgelost naar gasvorm in de rioolatmosfeer;
3. Omzetting van sulfiden naar zwavelzuur door aërobe bacteriën, die zich op de vochtige wanden van de buis boven het gemiddelde waterpeil bevinden;
4. Aantasting van de cementsteen door het geconcentreerde zwavelzuur bij een pH-waarde die beneden 1 kan dalen. De uiteindelijke aantasting van de cementsteen heeft plaats door oplossing. Aan het oppervlak wordt gips gevormd dat vaak als een korst op het oppervlak achterblijft. Deze korst heeft een bufferende werking voor verdere aantasting.

Door het oplossen van de cementsteen verliest het beton haar samenhang en wordt poreus.

Aantasting van de *buitenkant* van rioolbuizen door agressief grondwater (pH < 5,5) is ook mogelijk (Polder, 1987). In de praktijk is dergelijke schade bij drinkwaterleidingen niet bekend.

3.6.6 Aantasting door zouten (alleen riolering)

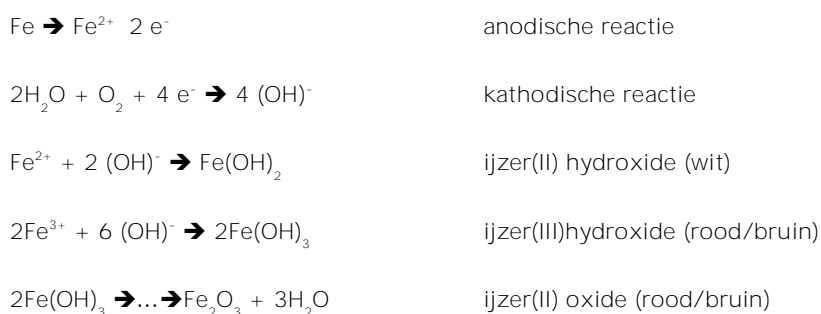
Beton kan worden aangetast door bepaalde zouten. Voorbeelden zijn kunstmest (ammoniumzouten) en zeewater (magnesiumzouten). Ammoniumzouten (NH₄Cl), die in afvalwater en kunstmest voorkomen, kunnen met Ca(OH)₂ in een uitwisselingsreactie CaCl₂ vormen dat goed in water oplost. Het beton wordt daardoor poreus en verliest aan sterkte. Overigens zijn dit langzame processen, waar relatief grote concentraties zouten aanwezig moeten zijn. Deze processen zullen dus in drinkwaterleidingen niet voorkomen.

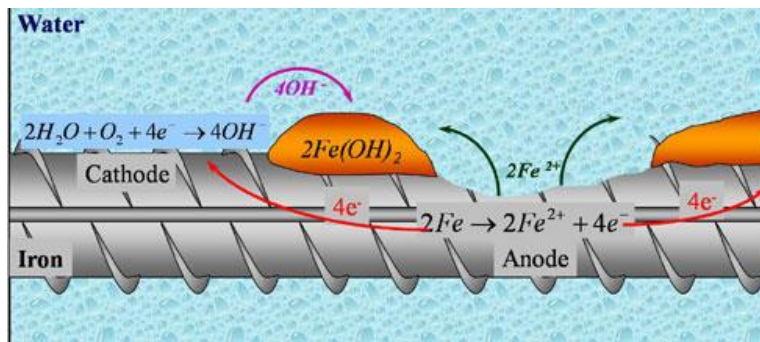
3.7 Aantasting van de wapening

3.7.1 Wapeningscorrosie (algemeen)

Corrosie van wapeningsstaal betekent in de meeste gevallen de vorming van roest. Omdat ijzerroest een veel groter volume inneemt dan het oorspronkelijke staal ontstaat een drukopbouw in het beton die ter plaatse kan leiden tot scheuren of het afdrukken van de dekking op de wapening.

Corrosie van gewapend beton is een elektrochemisch proces (Figuur 8). Bij gewapend beton is het staal de elektrische geleider en het water in de poriën de elektrolyt. In formulevorm treden de volgende reacties op (Reinhardt, 1985):





Figuur 8 Wapeningscorrosie

In een chloride-arm, sterk alkalisch milieu worden de oxidatieproducten van het staal niet in de vorm van volumineuze roest afgezet, maar in de vorm van een uiterst dicht laagje Fe_2O_3 . Dit laagje verhindert dat ijzerionen het staal kunnen verlaten. Het onderbreekt daardoor de stroomkring en maakt het staal "roestvrij". We noemen dit door een oxidehuidje beschermd staal gepassiveerd en het proces passivering.

Wanneer de alkaliteit afneemt, bijvoorbeeld als gevolg van carbonatatie, en tegelijkertijd de chlorideconcentratie te hoog is, zal passivering niet meer optreden en is de gevormde passiverende laag niet meer stabiel.

Chloriden kunnen al in vers beton aanwezig zijn, via het cement, aanmaakwater, de toeslagstoffen, zoals zand en grind of door toevoegen van versnellers, zoals $CaCl_2$. Bij de samenstelling van beton kan de chlorideconcentratie in het poriewater in de hand worden gehouden. Chloriden kunnen echter ook achteraf het beton binnendringen. Grote bronnen van chloriden zijn zeewater, dooizouten en spatwater, maar chloriden kunnen ook vanuit grondwater of drinkwater binnendringen.

Wapeningscorrosie kan zowel door chloride als carbonatatie geïnitieerd zijn. In beide gevallen is de schade herkenbaar. Roesten van de wapening veroorzaakt ter plaatse scheuren en/of afdrucken van het betonoppervlak. Bij chloride geïnitieerde wapeningscorrosie is uitbloei van bruin/zwarte vlekken te zien en kan op de wapening putcorrosie optreden, waarbij de wapening plaatselijk wordt opgelost. Dit komt voor in zowel betonconstructies als in betonnen leidingen.

Corrosie van spiraalwapening in een betonnen buisdeel kan lijden tot breuken, die in dat geval zichtbaar zijn in clusters van naast elkaar gelegen draden.

3.7.2 Spanningscorrosie

Spanningscorrosie is een degradatiemechanisme als gevolg van de gelijktijdige werking van een corrosieve omgeving en een trekspanning in het staal. Dit is een lokaal proces, dat plaatsvindt in een scheur, put of spleet en leidt uiteindelijk tot een brose breuk. Breuk als gevolg van trekspanning zonder corrosie zou tot een taai breuk leiden.

Chloride ionen kunnen de passiveringslaag van staal verbreken, waardoor putten ontstaan. Dit initieert dan spanningscorrosie. Om te zien of chloride een rol heeft gespeeld in een schadegeval moet het chloridegehalte in het beton worden bepaald.

3.7.3 Waterstofbrosheid

Waterstofbrosheid is het bros worden van metalen doordat waterstof het materiaal binnendringt. De exacte fysische achtergrond van dit proces is nog steeds niet volledig begrepen. Waarschijnlijk komt waterstof terecht in haarscheurtjes in het metaal, raakt opgesloten en zorgt op termijn voor verbrossing van het staal. Hierdoor neemt de kans op brosse breuken toe. Het fenomeen komt vooral voor in staal van hoge treksterkte (Mietz en Isecke, 1998).

Waterstofverbrossing kan plaatsvinden onder verschillende omstandigheden (temperatuur, bron van het waterstof, belastingsnelheid) en is afhankelijk van de microstructuur van het staal. Waterstof kan bij de productie van het staal, bij het lassen of bij het verzinken al worden geïntroduceerd. Waterstof kan ook pas tijdens de gebruiksduur worden geïntroduceerd, bijvoorbeeld in een zuur milieu. Zwerfstromen worden ook genoemd als bron van waterstof, maar dit kon niet worden bevestigd na onderzoek (KIWA, 1991).

Opgetreden waterstofbrosheid kan leiden tot scheuren. Het breukvlak laat in dat geval geen insnoering zien. Er is dus sprake van een brosse breuk. Na de breuk ontstaat corrosie op het breukvlak.

Waterstofverbrossing is vaak een lokaal proces en wordt dus gekenmerkt door willekeurige draadbreuken die verspreid liggen over de lengte en de omtrek van de buis.

3.7.4 Waterstof scheurvorming

Stress orientated hydrogen induced cracking (SOHIC) of step-wise cracking is de naam van het mechanisme waarbij draden spontaan breken als gevolg van waterstofschade. Dit proces kan optreden in voorspanstaal van hoge hardheid. De herkomst van de hiervoor benodigde waterstof is hoogstwaarschijnlijk de bodem waar allerlei reductieprocessen plaatsvinden waarbij waterstof kan vrijkomen.

Atomair waterstof wordt opgenomen en verzamelt zich op locaties waar niet-metallische (mangaansulfide) insluitels zich bevinden. Op deze locaties wordt de waterstof omgezet in moleculair waterstof en worden de insluitels opgedrukt ten gevolge van de ontstane druk. Hierna ontstaan trekkrachten en uiteindelijk de scheuren. Als het materiaal een hoge hardheid heeft (>> 380 HV (Vickers Hardheid)) is dit gevoelig voor de opname van waterstof.

Microscopisch onderzoek kan aantonen dat mangaansulfide insluitingen in het basismateriaal wijd open staan. Op de doorsnede van het breukvlak zijn grillig verlopende, stapsgewijze scheuren waar te nemen. Deze scheuren verspringen van mangaansulfide naar mangaansulfide insluiting.

3.7.5 Combinatie van spanningscorrosie en waterstofverbrossing

Corrosie van staal is een degradatiemechanisme waarbij ijzer reageert met zuurstof en water. Spanningscorrosie is een degradatiemechanisme dat plaatsvindt door de gelijktijdig werking van een corrosieve omgeving en een trekspanning in het staal. Het uiteindelijke falen treedt op met weinig plastische vervormingen. De breukvorm wordt daarom ook wel als brosse gekenmerkt. In afwezigheid van de corrosieve omgeving treedt taai breuk op. De brosse breuk ontstaat doordat het degraderen van het staal zeer lokaal plaatsvindt: er vindt scheurvorming plaats. In de scheur ontstaat vanwege het slechte massatransport naar de omgeving een milieu dat steeds zuurder wordt. Hierdoor kan het ijzer in oplossing gaan. Het blijkt dat in aanwezigheid van een put, kerf, of scheur spanningscorrosie eerder optreedt en leidt tot kortere levensduren.

In de literatuur wordt beschreven dat pre-scheuren kunnen ontstaan bij het wikkelp proces (EPA, 2012). Scheurtjes in de wapening kunnen dus al ontstaan in het fabricageproces. Tijdens het wikkelp proces ontstaan grote spanningen in de draad. Als de ductiliteit (plastische vervormbaarheid) lokaal onvoldoende is, ontstaan dwarsscheurtjes. Na het wikkelen wordt de buis getest met een proefdruk. Hierdoor kunnen nog meer scheurtjes ontstaan.

In de dwarsscheuren ontstaat lokaal een zuurstofloos milieu en een lage pH. Doordat lokaal de zuurgraad verlaagd wordt, kan waterstof een rol spelen. Dit waterstof kan worden opgenomen door het staal waardoor het staal verbrost kan worden. Door de lokale aantasting, vorming van waterstof en de brosse breuk, is waterstofverbrossing gerelateerd aan spanningscorrosie. Voor het optreden van waterstofverbrossing is uiteraard waterstof nodig en een trekspanning. De aantasting van het staal is lokaal en bezwijken treedt op zonder vervorming op macroschaal. De scheurvorm kan men als bros beschouwen.

3.7.6 Draadbreek en sterkte

Voorgespannen beton met spiraalwapening bevat een groot aantal omwindingen. Een buis van 6000 mm lang, een buitenomtrek van 1320 mm, waaromheen wapening met een spoed van 20 mm is gewikkeld, bevat in totaal 300 windingen met een totale lengte van 1,3 km. Zelfs bij een groot aantal draadbreken (tientallen) voldoet de buis nog ruim aan de ontwerpdruk (TNO, 2007).

3.7.7 Zwerfstromen

Zwerfstromen in de grond ontstaan vanaf de kathodische bescherming van een stalen leiding of een treinspoor. Deze stromen kunnen in theorie worden opgenomen door stalen objecten en dus ook door gewapend beton. Hierbij kan atomair waterstof ontstaan dat kan reageren tot waterstof of kan worden opgenomen door het staal. Hier kan het corrosie veroorzaken.

Zwerfstromen in beton kunnen worden gemeten met behulp van potentiaalmetingen. Voor beton dat niet is aangetast en dus nog een zuurgraad kent van minimaal 12,5 is er geen kans op waterstofontwikkeling. Het is dus niet aannemelijk dat zwerfstromen tot corrosie van betonnen leidingen zullen leiden.

KIWA heeft een 24-uurs meting van de grondweerstand uitgevoerd nabij een spoor. Door continue meting wordt het effect van een passerende trein meegenomen. Hieruit werd geconcludeerd dat ter plekke geen zwerfstromen zijn (KIWA, 1991).

3.7.8 Spanningsrelaxatie

Spanningsrelaxatie is spanningsafname onder een constante rek. Hierdoor zal de voorspanning afnemen in de loop van de tijd. De sterkte van het beton neemt juist toe in de tijd. Hierdoor zal spanningsrelaxatie geen probleem zijn voor de sterkte van de buis.

3.8 Verdraaiing en degradatie van verbindingen

3.8.1 Hoekverdraaiing

Als gevolg van belastingen kan er ruimte ontstaan tussen de verbindingen. Hierbij ontstaan voegwijdtes tussen de spie en mofdelen van de buizen en een hoekverdraaiing van de buizen zelf. Verbindingen die zijn voorzien van een rubberen ring staan, afhankelijk van de diameter, een hoekverdraaiing toe van ongeveer 1 a 2 graden. Strik- en lasverbindingen zijn star en laten nauwelijks een hoekverdraaiing toe.

3.8.2 Degradatie

In oudere betonnen leidingen (< 1965) komen natuurrubber verbindingen voor. Deze zijn gevoelig voor degradatie als gevolg van microbiologische aantasting (KIWA, 1961). Ringen van synthetisch rubber, zoals SBR (Styreen-Butadieen Rubber), zijn hier niet gevoelig voor.

3.8.3 Verkeerd geplaatste ringen

Rubberen ringen kunnen ook bij de aanleg al verkeerd zijn geplaatst. Dit betekent dat de ring niet de juiste vorm heeft en niet op de juiste plaats in de verbinding ligt (slipring). Dit komt veel vaker voor bij rolverbindingen, zoals toegepast in de Bonna Sentab buizen, dan bij glijverbindingen (Mesman, 2001).

3.8.4 Elasticiteitsvermindering bij lage temperaturen

Bepaalde soorten rubber kunnen extra gevoelig zijn voor lage temperaturen (vriespunt). Dit rubber is dan minder elastisch en minder goed in staat om vormveranderingen in de verbinding te volgen, waardoor lekkages optreden. Dit probleem komt voor in Bonna Sentab secties van na 1979 (DHV, 1995).

3.9 Interne en externe belasting

Naast de bovengenoemde degradatiemechanismen spelen ook andere factoren een rol bij achteruitgang van de conditie van beton. Interne spanningen als gevolg van waterdruk of waterslag kunnen de kans op scheuren of draadbreek doen toenemen.

Als gevolg van erosie en spanningen kan de deklaag scheuren vertonen en afbladderen. Dit wordt delaminatie genoemd.

Als gevolg van grondbewegingen en zettingen kunnen extra spanningen in de buis en verbindingen ontstaan of kan de fundering haar functie verliezen.

3.10 Conclusie

Beton in het algemeen, en specifiek gewapend beton kan op diverse manieren worden aangetast. Niet alle degradatiemechanismen zijn relevant voor betonnen leidingen voor transport van ruwwater en drinkwater. Aantasting door zouten of zuren is niet aannemelijk, gezien de ligging in de bodem van en de functie van de leidingen: transport van ruwwater en drinkwater. Drinkwaterleidingen komen niet langdurig in contact met de buitenlucht, waardoor carbonatatie alleen zou kunnen plaatsvinden als gevolg van CO₂ dat is opgelost in het drinkwater. Gezien de lage concentraties opgelost CO₂ is dat niet aannemelijk. ASR komt alleen voor bij specifieke grondstoffen en betonrecepturen en is in Nederland nog nooit aangetroffen bij drinkwaterleidingen.

Uit de gesprekken met beheerders en de ervaringen van waterbedrijven blijkt dat de betonkwaliteit in het algemeen zeer goed is. De sterkte van het beton is in de loop van de jaren alleen maar toegenomen. Voor zover bekend is er nooit onderzoek gedaan naar uitloging van beton of sulfaataantasting (ettringietvorming) in drinkwaterleidingen. Het is dus onduidelijk of en in welke mate deze processen optreden en hoe belangrijk ze zijn voor de reststerkte en restlevensduur.

Uit de ervaringen en de literatuur blijkt dat storingen vrijwel altijd ontstaan als gevolg van draadbreek, wapeningscorrosie of problemen met verbindingen, zoals degradatie van rubberringen en hoekverdraaiingen. Hierop moet dus de focus liggen bij de keuze voor conditiebepalingmethoden.

De storingsgevoeligheid van betonnen buizen is sterk afhankelijk van het buis- en verbindingstype en de jaargangen van de buisdelen (andere productiemethoden, andere typen draad- en wapeningsstaal, andere typen verbindingen). Niet alle bedrijven hebben dit in kaart voor hun betonnen leidingsysteem.

4 Conditiebepalingsmethoden

4.1 Visueel onderzoek

Visueel onderzoek kan zowel aan de buiten- als aan de binnenkant van de leiding plaatsvinden. De staat van zowel het beton als de wapening (indien zichtbaar) kunnen worden vastgesteld. Bij onderzoek aan de buitenkant dient de leiding vrij te worden gemaakt. Bij onderzoek aan de binnenkant dient de buis ontwaterd te worden en toegang te worden verkregen. Bij visueel onderzoek kan gebruik worden gemaakt van videocamera's (WRF, 2013).

Delaminatie en scheurvorming van de cementcoating kunnen visueel worden vastgesteld. Cement coating aan de buitenkant kan gedeeltelijk worden verwijderd om de staat van de wapening (corrosie, brosheid) nader te inspecteren.

Scheuren als gevolg van corrosie of ASR kunnen visueel worden vastgesteld. Hierbij wordt de geometrie van de scheur (axiaal of longitudinaal), de lengte en diepte van de scheur en het aantal scheuren vastgelegd.

4.2 Bekloppen

Door het betonoppervlak te bekloppen met een hamer kunnen loszittende stukken deklaag of holle ruimtes worden ontdekt. Dit geeft een zeer globale indruk van de staat van de buis.

4.3 Onderzoek wapening (niet-destructief)

4.3.1 Ligging en dekking van de wapening

De ligging en betondekking van de wapening kan worden gemeten met behulp van elektromagnetische technieken. Via een inductiespoel wordt een magnetisch veld opgewekt, dat wordt beïnvloed door het aanwezige staal. Deze techniek is beschikbaar in verschillende draagbare meetapparaten. Een dekkingsmeter wordt gebruikt om de dekking van beton op het staal te bepalen. Een ferroscaan-meter wordt gebruikt om de afstand tussen wapeningsdraden en de diameter te bepalen. Beide apparaten worden voornamelijk gebruikt op het buitenoppervlak van een betonnen constructie.

4.3.2 Elektrische weerstand wapeningsdraden

Een breuk in een draad kan worden vastgesteld door middel van een weerstandsmeting over blootgelegde wapeningsdraden. Deze meting wordt uitgevoerd met een multimeter. De weerstand wordt gemeten over twee naast elkaar liggende draden. Het is dus niet mogelijk om in één stap het aantal breuken over een geheel buisdeel te bepalen. Een eventuele breuk leidt tot een sterke verhoging van de weerstand. Deze methode werkt niet als de draden verbonden zijn via contact met de stalen kern.

4.3.3 Elektromagnetisch onderzoek

De P-wave methode is een elektromagnetische inspectie methode die is ontwikkeld door het Canadese bedrijf Pure Technologies (Figuur 9). Het systeem brengt een elektromagnetisch veld, een zogeheten Remote Field Eddy Current, in de leiding waarvan de respons direct worden gemeten. Bij onregelmatigheden in de wikkeldraden wordt er een verandering in de respons gemeten. Vanuit deze veranderingen in de respons wordt, middels de resultaten van te voren uitgevoerde kalibratiemetingen, het aantal draadbreuken bepaald. Het systeem

bestaat uit een zender, ontvanger, datalogger, stroomvoorziening en odometer (afstandsmeter) om de afgelegde afstand op te meten. Het instrument wordt binnen of buiten langs de buiswand bewogen. Uit de praktijk blijkt dat de resolutie van dit systeem laag is en dat er alleen een schatting gemaakt kan worden van het aantal breuken per buisdeel. Het signaal wordt sterk verzwakt en verstoord door de aanwezigheid van een stalen kern (WRF, 2013 en TNO, 2007).



Figuur 9 P-Wave elektromagnetisch meetinstrument (Pure Technologies)

PipeScanner maakt gebruik van near-field elektromagnetisme. Van buitenaf wordt een zender over de leiding bewogen. Het signaal wordt versterkt door de draadwapening. Dit versterkte signaal wordt opgevangen. Een gebroken draad verstoort dit signaal. Dit systeem heeft als groot voordeel dat de leiding van buitenaf wordt geïnspecteerd en dus in bedrijf kan blijven.

Breedband elektromagnetische metingen maken gebruik van verschillende frequenties en geven informatie over de wanddikte en de locatie van staaldraden.

4.3.4 Röntgenonderzoek

Het aantal draadbreuken binnen een bepaald oppervlak kan worden vastgesteld door middel van het maken van een röntgenopname. Röntgengevoelig materiaal wordt aan de buitenkant van de leiding aangebracht. De leiding moet hiervoor deels worden ontgraven. De röntgenbron wordt in de leiding gebracht en de straling op de binnenomtrek van de leiding gestuurd. Op de foto-opnamen wordt de wapening zichtbaar. De resolutie van de foto's is laag, waardoor de breuken op de **foto's niet altijd duidelijk** zichtbaar zijn. Breuken op de kruising van langs- en spiraalwapening worden niet zichtbaar (TNO, 2007).

4.3.5 Actieve corrosiemetingen

Bij half-cel potentiaalmetingen wordt het potentiaalverschil tussen de cement coating en het staal gemeten. Deze meting berust op de aanname dat de oplossing van ijzer uit een wapeningsstaaf de potentiaal van het betonoppervlak beïnvloed. Het oppervlak van de constructie zal worden afgetast met een referentie-elektrode en zal het potentiaalverschil tussen de wapening en het beton, ten opzichte van de elektrode, worden gemeten. De wapening en de referentie-elektrode zijn beiden verbonden met één pool van een hoog-ohmige voltmeter. Er moet een elektrolytbrug aanwezig zijn op het betonoppervlak, hiervoor wordt een natte spons gebruikt. Uit de resultaten (de gemeten potentiaalverschillen in mV) kan worden afgeleid of corrosie waarschijnlijk, mogelijk of onwaarschijnlijk aanwezig is.

Lineaire polarisatiemetingen en galvanostatische (constante stroom) pulsmetingen kunnen worden gebruikt om de actieve corrosiesnelheid te bepalen. Door middel van een tegenelektrode wordt op het betonoppervlak een kleine verstoring van de potentiaal opgelegd. De stroom die hiervoor nodig is wordt opgemeten. Uit de polarisati weerstand wordt dan uiteindelijk de corrosiesnelheid berekend.

4.4 Onderzoek wapeningsstaal (destructief)

4.4.1 Mechanisch onderzoek

De rekgrens, treksterkte en insnoering van wapening kunnen worden onderzocht door de wapening uit de betonnen leiding te nemen en hierop trekproeven uit te voeren. Daarnaast kan ook de insnoering van reeds gebroken draden worden onderzocht op de af- of aanwezigheid van insnoering.

4.4.2 Gevoeligheid voor waterstofbroosheid

De gevoeligheid van voorspanstaal voor waterstofbroosheid kan worden onderzocht door de FIP test met ammoniumthiocyanaat (NH_4SCN) (ASTM A1032). Deze test duurt drie weken. Een test die meer representatief is voor de praktijk is de zogenaamde DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) test. Hierbij wordt een trekspanning aangelegd in een agressief milieu en de tijd tot breuk wordt geregistreerd (standtijd). De als veilig beschouwde grens is 2000 uur (bijna drie maanden) (TNO, 2002).

4.4.3 Microscopisch onderzoek

De structuur van de draden en met name het breukvlak kunnen microscopisch worden onderzocht. Hieruit volgt of het breukvlak vers dan wel oud en gecorrodeerd is. Breukinitiaties en restbreuken zijn te onderscheiden. Ook is te zien of het brosse of taai breuken betreft.

4.4.4 Chemisch onderzoek

De wapening kan worden onderzocht op chemische samenstelling. De gehalten aan de elementen C, Si, Mn, P, S, Cr, Mo, Ni, Al, Cu, Ti, V en N worden bepaald. De samenstelling zegt iets over de uitgangskwaliteit van het staal. Het gehalte stikstof zegt iets over sterkte van het oorspronkelijke staal. In EN 10025 wordt voor lage-sterkte staal een grens van maximaal 70 ppm stikstof (N) aangehouden.

4.5 Onderzoek aan beton (niet destructief)

4.5.1 Hardheid-onderzoek (Schmidthamer)

Een Schmidthamer, terugslaghamer of betonproefhamer is een handgereedschap dat gebruikt wordt om op niet-destructieve en eenvoudige wijze de hardheid van een materiaal te controleren. Het gereedschap bestaat uit een huls, waarin zich een veer met een lange slagpin bevinden, en een afleesmogelijkheid voor het meetresultaat. Hoe harder (en sterker) het materiaal, hoe hoger de terugslagwaarde. Op deze manier wordt de staat van het beton in de deklaag bepaald.

4.5.2 Resistiviteit (soortelijke weerstand)

De resistiviteit of soortelijke weerstand van beton kan worden bepaald volgens de vier-elektroden methode van Wenner. Vier elektroden worden op het oppervlak van het beton geplaatst, een wisselstroom wordt aangebracht tussen de buitenste elektroden en de spanning wordt gemeten over de twee binnenste elektroden. Uit de gemeten waarden wordt de resistiviteit berekend. De meting zegt alleen iets over het beton en niet over de wapening. De elektroden mogen niet te dicht in de buurt van wapening worden geplaatst. De resultaten

worden sterk beïnvloed door het vochtgehalte in het beton. Globaal geldt dat chloriden sneller binnendringen in betonoppervlak met een lage weerstand. De corrosiesnelheid is daar dus hoger.

4.5.3 Ultrasoon onderzoek (lokaal)

Door een ultrasone meting uit te voeren, kunnen de sterkte, de homogeniteit van het beton en de diepte van de scheuren bepaald worden. Deze meting wordt met een betontester uitgevoerd. Dit apparaat bestaat uit een zender en een ontvanger. Een trillingsimpuls wordt voortgebracht en geregistreerd bij middel van een zendtransducent, die op het oppervlak van het beton wordt aangebracht. Na in het beton een gekende weglengte (a) te hebben afgelegd wordt de trillingsimpuls door een tweede transducent, de ontvangstransducent, opgevangen en omgezet in een elektrisch signaal. Met een elektrische tijdmeter wordt de voortplantingstijd (t) van de impuls over de afstand (a) gemeten.

4.5.4 Echopuls metingen

In Nederland is recent de Echopulse techniek geïntroduceerd door het Canadese bedrijf Echologics. Met deze techniek is het mogelijk om door geluidsmetingen de gemiddelde stijfheid te bepalen van het leidingsegment tussen twee meetpunten. Op basis van de verhouding beton versus staal wordt een schatting gemaakt van de oorspronkelijke stijfheid. Door de gemeten stijfheid te vergelijken met de oorspronkelijke stijfheid wordt een maat van de degradatie van de leiding verkregen.

4.5.5 Radartechnieken

Bij radar technieken worden radargolven gebruikt om d.m.v. demping en reflecties inzicht te krijgen in zowel bodem- als materiaaleigenschappen. Het voordeel van deze techniek is dat het niet nodig is om de waterlevering te onderbreken. Het is wel nodig om de grond tot aan de onderkant van de leiding te ontgraven.

Grondradar (Ground Penetrating Radar, GPR) is geschikt om de ligging van een leiding te bepalen. De techniek is beperkt toepasbaar om in (natte)kleigrond een met water gevulde betonnen leiding te detecteren. Door dicht op het oppervlak van de leiding te meten kan de aanwezigheid van scheuren, grindnesten, beschadigde deklagen en holten worden onderzocht.

Georadar is geschikt om de effectieve (niet uitgelopen) wanddikte van betonnen leidingen te bepalen. Uit de gemeten waarden kan de opbouw van de onderzochte leidingwand worden bepaald. De metingen kunnen zowel uit- als inwendig worden uitgevoerd. Bij een uitwendige inspectie wordt de antenne met de hand over de meetraaien voortbewogen. Op een bepaald leidingsegment wordt een grid geplaatst van lengteprofielen tot 2 m lengte met onderlinge afstanden van 20 tot 25 cm. Afhankelijk van de aanwezige aantasting (plaatselijk sterk verschillend of egaal aangetast) is deze dichtheid van meten voldoende of niet. Een sterk variërende aantasting vraagt een dicht meetnet. Bij een inwendige inspectie wordt de radar op een voertuig bevestigd en in de leiding gebracht. De leiding moet droog zijn.

4.6 Onderzoek aan beton (destructief)

4.6.1 Sterkte-onderzoek

De mechanische sterkte van beton kan worden bepaald door een proefstuk uit te boren en de kubusdruksterkte of cilinderdruksterkte te bepalen met behulp van een drukbank. Naast de kubus- of cilinderdruksterkte kan ook de buigtreksterkte (4-punts belasting van een balkvormig proefstuk), splijttreksterkte (belasting van een kubus- of cilindervormig proefstuk met behulp van twee splijtlatjes) en 2-assige treksterkte (trekbelasting van een

balkvormig proefstuk dat aan de kopse kanten in de houder wordt vastgelijmd) worden bepaald. De proeven verschillen in de geometrie van de proefstukken en opgelegde belasting. De resultaten zijn niet gelijk, maar wel sterk aan elkaar gerelateerd. Voor alle proeven moeten boorkernen uit de buis worden genomen en worden voorbereid tot de juiste vorm.

De kubusdruksterkte van voorgespannen betonnen drinkwaterbuizen uit de WRK II bleek rond de rond de 150 MPa te liggen (TNO, 2008). Dit ligt ver boven de ontwerpsterkte en zelfs boven de grens van hoge sterkte beton (> 65 MPa).

4.6.2 Porositeit-onderzoek

De dichtheid en de weerstand tegen waterindringing kunnen worden bepaald met de waterindringingsproef. De resultaten worden vertaald naar de weerstand tegen indringing van chloriden en andere ionen. Voor deze proef zijn cilindervormige kernen nodig. Hiermee wordt de gevoeligheid van het beton voor indringing van chloriden en zuren en daarmee de weerstand tegen wapeningscorrosie bepaald.

4.6.3 Chlorideprofiel en sulfaten

De aanwezigheid van chloriden of sulfaten in het beton, danwel in de cement deklaag kan worden bepaald. Dit is destructief onderzoek, waarbij monsters moeten worden uitgeoord (boorkernen). De chloride- en sulfaat concentratie worden meestal uitgedrukt als percentage van zowel de monstermassa als de cementmassa. Door chloriden te meten op verschillende dieptes in de boorkern kan een chlorideprofiel worden vastgesteld. Op basis van dit profiel kan een uitspraak worden gedaan over de resterende tijd tot het moment waarop het chloridefront de wapening zal bereiken.

4.6.4 Weerstand tegen chloridenindringing

De weerstand van beton tegen chloridenindringing kan worden bepaald met behulp van de zogeheten Rapid Chloride Migration (RCM) test. Dit is een versnelde chloriden-indringingsproef. Het proefstuk wordt in een oplossing van chloriden onder een elektrische spanning gebracht gedurende 1 tot 3 dagen. Vervolgens wordt het proefstuk gespleten, het chloridefront zichtbaar gemaakt en de gemiddelde indringdiepte opgemeten. Uit de resultaten van de proef wordt de RCM diffusiecoëfficiënt berekend, die direct is gerelateerd aan de weerstand tegen chloridenindringing. Met de uitslag van deze proef kan een uitspraak worden gedaan over de verwachte levensduur van gewapend beton (CUR, 2009).

4.6.5 Carbonatatie- of uitlogingsonderzoek

De mate van carbonatatie of uitloging kan worden vastgesteld met behulp van een indicatorvloeistof, zoals fenolftaleïne. Deze kan worden aangebracht in een boorgat of op het verse breukvlak van een gespleten boorkern. Daar waar het beton nog niet is gecarbonateerd of uitgelooogd kleurt de indicator paars (pH > 8,3). Hoe hoger de uitloging, hoe lager de sterkte en hoe hoger de kans op wapeningscorrosie.

4.6.6 Microscopisch onderzoek

Hierbij worden boorkernen geboord waaruit dunne doorsneden of slijpplaatjes worden geprepareerd voor microscopisch onderzoek. Deze kunnen worden onderzocht met polarisatie en fluorescentie microscopie (PFM). Bij onderzoek met gepolariseerd licht kunnen uitspraken worden gedaan over de mineralogische samenstelling van de bestanddelen van het beton. Hieruit volgt informatie over toeslagmateriaal, cementsoort, hydratatiegraad en aanwezigheid van vulstoffen zoals vlieg-as, kalksteenmeel en mogelijke toepassing van een luchtbelvormer. Er kan een schatting worden gemaakt van de water-cementfactor en het luchtgehalte. De hechting tussen cementsteen en toeslagkorrel kan ook worden bekeken.

Ook kunnen veroudering (carbonatatie) en chemische aantasting (bijvoorbeeld als gevolg van alkali-silicareactie of sulfaataantasting) worden aangetoond. Onder UV-licht (waarbij fluorescentie optreedt) kunnen holtes en (micro)scheuren worden waargenomen.

4.7 Voegwijdte opmeten

Hoekverdraaiingen in leidingen kunnen worden vastgelegd door het opmeten van de voegwijdte op verschillende punten van de omtrek van de buis. Deze voegmetingen worden handmatig gedaan. Een leidingsectie wordt leeg gezet, een bemand voertuig gaat de leiding in en de voegen worden met een schuifmaat opgemeten. Na een aantal jaar wordt de meting herhaald om te controleren of de ligging van de leiding is gewijzigd.

Arsénio (2013) heeft aangetoond dat hoekverdraaiingen in PVC leidingen ook met cameratechnieken, zoals CCTV, goed te bepalen zijn. Hierbij wordt bij elke verbinding op 4 punten (klokstanden) de voeg in beeld gebracht en opgemeten. Een vergelijkbare techniek voor grote betonnen leidingen, mogelijk in combinatie met laser of tiltmeter moet nog worden ontwikkeld.

4.8 Kruindrukproef

Dit is een volle schaalproef waarbij een volledig buisdeel onder toenemende druk aan de bovenkant (kruin) wordt belast tot bezwijking. Deze proef wordt in een laboratorium uitgevoerd (zie Figuur 10).



Figuur 10 Opstelling kruindrukproef

4.9 Waterdrukproef

Dit is een volle schaalproef waarbij een volledig buisdeel onder toenemende waterdruk wordt belast tot bezwijking. Die druk waarbij dat gebeurt is de barstdruk. Deze proef wordt in een laboratorium uitgevoerd.

4.10 Afpersen

De druk in een leidingsectie wordt verhoogd tot bijvoorbeeld anderhalf keer de bedrijfsdruk. De eventuele lekken die hierbij ontstaan worden opgezocht en gerepareerd. Opgemerkt wordt dat het afpersen van transportleidingen een gedegen voorbereiding vereist.

In de “**VEWIN Richtlijn Drinkwaterleidingen buiten gebouwen, Ontwerp, aanleg en beheer** (gebaseerd op NEN-EN 805:2000)’ van december 2010” wordt in hoofdstuk 11 “Testing of pipelines/ **Beproeving van leidingen**” een procedure beschreven voor het beproeven of afpersen van leidingen (Meerkerk en Mesman, 2010). In deze publicatie en in de voorgaande versie uit 2003 ontbreken de achtergronden van de geformuleerde eisen en wordt geen inzicht gegeven in de consequenties van verschillende gebruikte buismaterialen, luchtinsluitingen en de aanwezige lekken in een te beproeven sectie. Daarom is in 2006 een afpersprotocol ontwikkeld (Mesman, 2006). Hierin staan concrete aanbevelingen voor nieuwe protocollen voor het afpersen van nieuwe en bestaande leidingen en een spreadsheet waarin bepaald wordt hoe groot de verliezen in volume en in druk bij het afpersen kunnen zijn.

4.11 Bodemonderzoek

De bodem in de directe nabijheid van een leiding kan worden onderzocht om vast te stellen of de bodemcondities een verhoogde kans op aantasting van zowel beton als wapening geven. De pH, resistiviteit, geleidbaarheid en de concentraties chloriden, sulfaten en koolzuur kunnen worden bepaald. De bepaling kan worden uitgevoerd aan een bodemonmonster of op locatie. De resistiviteit kan bijvoorbeeld met de vier-elektrode methode van Wenner worden bepaald.

4.12 Potentiaal tussen bodem en leiding

De potentiaal tussen de bodem en de leiding kan worden bepaald om gebieden met actieve corrosie te detecteren. De potentiaal wordt gemeten met een voltmeter, waarbij één kabel wordt verbonden met de leiding en een andere kabel op verschillende locaties langs de leiding in de bodem wordt geplaatst.

4.13 Lekdetectie

Grote lekken kunnen worden opgespoord door langs de leiding te lopen en lekken op te sporen. Deze lekken zijn zichtbaar aan het oppervlak of in geval van ondiep liggende leidingen en afwezige omgevingsgeluiden te horen.

Lekken kunnen worden opgespoord met behulp van hydrofoons, noise loggers, leak noise correlators. De technieken zijn niet alleen voor beton, maar voor alle materialen toepasbaar.

De SmartBall van Pure Technologies is een inwendig inspectietool, dat met de waterstroom mee wordt gevoerd en lekken detecteert met behulp van een ingebouwde hydrofoon.

4.14 Akoestisch monitoren staaldraden

Het springen van een staaldraad kan worden gedetecteerd door sensoren die in de leiding moeten worden aangebracht.

4.15 Storingsregistratie

De conditie van een leiding kan worden gemonitord door het registreren van storingen. Nederlandse drinkwaterbedrijven kunnen hiervoor gebruik maken van USTORE (USTOREweb, 2013). Leidingen met een te hoge storingsfrequentie kunnen worden geselecteerd voor nader onderzoek, renovatie of vervanging. Gezien de grote diameters van betonnen leidingen zijn storingen ongewenst. Gezien de relatief beperkte lengte vergeleken met andere materialen is het aantal storingen gering. Dit betekent dat storingsregistratie slechts een globaal beeld geeft van de conditie.

4.16 Samenvatting conditiebepalingsmethoden

Methode	Doel	Voordelen	Beperkingen	Destructief	Kosten (relatief)
Visueel onderzoek	Identificeren van leidingsegmenten met schade	Direct resultaat	Alleen ernstige, oppervlakkige schade is zichtbaar. Draadbreek niet zichtbaar, tenzij deklaag wordt verwijderd. Ervaring vereist. Oordeel subjectief.	Nee	€€
Bekloppen	Onderzoek naar staat deklaag	Direct resultaat Eenvoudige uitvoering	Geeft beperkte globale indruk	Nee	€
Wapening	Onderzoek naar ligging, draadbreek, corrosie wapening	Geeft inzicht in locatie draadbreken en corrosie	Interpretatie resultaten complex. Grote kans op fouten in metingen (elektromagnetisch).	Nee	€€€€
Wapeningsstaal	Onderzoek kwaliteit staal	Geeft inzicht in staat van de wapeningsdraden	Wapening moet worden uitgenomen	Ja	€€
Beton (niet destructief, on-line)	Onderzoek naar staat beton	Geeft globaal inzicht in staat van beton	Alleen globaal inzicht. Indirecte technieken.	Nee	€€
Beton (destructief)	Onderzoek naar kwaliteit beton	Geeft inzicht in sterkte beton en bescherming tegen corrosie	Proefstukken moeten worden uitgeboord (boorkernen)	Ja	€€
Voegwijdte opmeten	Identificeren hoekverdraaiingen	Geeft direct inzicht in staat van verbindingen	Alleen handmatig	Nee	€€
Kruindrukproef	Onderzoek reststerkte buisdeel	Geeft inzicht in reststerkte volledig buisdeel	Buisdelen uitnemen	Ja	€€
Waterdrukproef	Onderzoek naar weerstand tegen waterdruk	Barstdruk wordt bepaald	Buisdelen uitnemen	Ja	€€
Afpersen	Identificeren zwakke verbindingen	Leiding blijft in bedrijf	Kosten onzeker (afhankelijk aantal benodigde reparaties)	Ja	€/€€
Bodemonderzoek	Identificeren gebieden met verhoogde kans op degradatie	Eenvoudig	Geeft geen beeld van de staat van de leiding	Nee	€
Potentiaal bodemleiding	Identificeren gebieden met kans corrosie	Actieve corrosie wordt herkend	Geeft geen beeld van de staat van de leiding	Nee	€

Lek-detectie	Identificeren lekken	Leiding blijft in bedrijf	Nauwkeurigheid hangt af van omgevingsgeluid en diameter leiding. Niet preventief.	Nee	€€ (visueel, akoestisch)
Akoestisch monitoren staaldraden	Detectie springen van staaldraad	Continue monitoring	Sensoren moeten in leiding worden aangebracht	Nee	€€€ (inwendig, sensoren)
Storings-registratie	Globaal beeld conditie van de leiding	Eenvoudig	Storingen in grote leidingen hebben veel effect op de omgeving en zijn niet gewenst	Nee	€

5 Onderhoud

5.1 Algemeen

Voor het vervangen, renoveren en repareren van betonnen leidingen zijn diverse mogelijkheden en technieken beschikbaar. Deze technieken worden voor alle leidingmaterialen uitgebreid beschreven in BTO 2014.010 (van Eijk, 2014). Een uitgebreid overzicht wordt ook gegeven door EPA (EPA, 2013). De voor beton relevante technieken worden in dit hoofdstuk kort beschreven.

5.2 Vervanging

Betonnen leidingen kunnen worden vervangen door leidingen van andere materialen. Als slechts enkele buisdelen worden vervangen of verlegd, is het mogelijk hiervoor specifieke buisdelen te laten produceren. Als de vervanging of verlegging over een grotere lengte plaatsvindt, wordt vrijwel altijd gekozen voor staal of in sommige gevallen voor nodulair gietijzer (NGIJ) of Glasvezel Versterkt Kunststof (GVK). Een belangrijk aandachtspunt bij vervanging is de aansluiting van het nieuwe materiaal of de nieuwe betonnen tussenstukken op de bestaande betonnen leiding. De hulpstukken die hierbij nodig zijn moeten op maat worden geproduceerd. Kennis over de maatvoering van de bestaande betonnen buis is hiervoor vereist.

5.3 Renovatie

Bij sliplining wordt de bestaande leiding toegankelijk gemaakt en een nieuwe, geprefabriceerde leiding ingevoerd. De gebruikte buisdelen bestaan uit PE, PVC, GVK of staal. De holle ruimte tussen oude en nieuwe buis wordt opgevuld met een krimparme mortel.

Bij close-fit lining wordt een PE of PVC buis nauwsluitend (close-fit) met de buitenwand tegen de bestaande binnenwand van de oude buis ingebracht. De meest toegepaste variant is de zogenaamde subline methode. Bij deze methode worden op locatie samengestelde buislangtes ter plaatse gevouwen (en voorzien van kunststof strips) en vervolgens ingebracht. De leiding wordt op druk gebracht waarbij de strips knappen en de buis uitvouwt. Deze methode wordt als een semi-structurele oplossing beschouwd.

In de Verenigde Staten zijn diverse wraps beschikbaar, die lokaal worden aangebracht, aan de binnen- of aan de buitenkant van de leiding (zie Figuur 11). Deze wraps bestaan uit banden of platen voorzien van epoxhars, glas- of koolstofvezel (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP). Ze kunnen handmatig of met een robot worden aangebracht (EPA, 2013).



Figuur 11 Aanbrengen van een wrap in een betonnen leiding

Spuitsbeton of ferrocement wordt aangebracht op een wapeningsnet aan de binnenwand van de leiding. Ferrocement is een bouw materiaal, samengesteld uit cement en één of meerdere lagen relatief fijnmazige wapening. Ferrocement is vooral populair vanwege de betrekkelijk lage materiaalkosten in relatie tot een acceptabele sterkte bij een relatief kleine wanddikte.

Bij rioolrenovatie wordt vaak gebruik gemaakt van de kousmethode. Hierbij wordt een flexibele kous, die fabrieksmatig of op locatie is geïmpregneerd met een kunstharproduct op basis van epoxy in de te renoveren leiding gebracht. Technieken op basis van polyester en vinylester zijn ook mogelijk. Door vervolgens de lucht of het water te verwarmen of stoom te gebruiken dan wel d.m.v. UV-straling wordt de hars uitgehard en ontstaat er een kunststof binnenbekleding.

Voor drukleidingen voor proces- en drinkwater kan glasvezelversterkt polyester vilt met een PE coating, samen met een speciaal ontwikkelde hars, worden toegepast. Deze techniek is nog niet toegepast in Nederland. Recentelijk is BRL K-17201 (2013) verschenen voor de toepassing van kousmethoden in drinkwaterleidingen. Op basis van deze beoordelingsrichtlijn kunnen zowel het ontwerp- en installatieproces als de betrokken producten worden gecertificeerd.

5.4 Reparatie

Lekkende verbindingen kunnen worden gerepareerd door het aanbrengen van reparatieringen. Dit zijn rubber slabben, die zijn voorzien van speciale RVS profielen (Figuur 12). De ringen worden gebruikt voor de afdichting van een verbinding op de binnenkant van de buis. Hierbij wordt de volledige verbinding door het rubber afgedekt. De ringen moeten van binnenuit worden aangebracht en zijn dus alleen toepasbaar bij grote diameters.



Figuur 12 Reparatering

Een reparatiemanchet wordt aangebracht aan de buitenkant van de leiding. Dergelijke manchetten moeten op maat worden aangeleverd. Deze oplossing is alleen geschikt bij kleine lekken en scheuren. Voor het repareren van een volledig lekke verbinding is de manchet niet geschikt. In dat geval moet een reparatiering worden aangebracht of de volledige verbinding worden uitgenomen en vervangen.

6 Aanbevelingen conditiebepaling en onderhoudsstrategie

6.1 Huidige praktijk in Nederland en ervaringen Verenigde Staten

Drinkwaterbedrijven kiezen op dit moment voor verschillende onderhoudsstrategieën. Voor leidingen waarbij een breuk kan leiden tot grote externe effecten of voor leidingen die niet langdurig buiten gebruik mogen kiest bijvoorbeeld Waternet voor een pro-actieve strategie. Dat houdt in dat het bedrijf regelmatig de leiding onderzoekt op de aanwezigheid van lekken en regelmatig voegmetingen uitvoert. Een andere werkwijze is het afpersen van een leidingsectie en direct repareren van optredende lekken. Een reactieve strategie houdt in dat alleen reparaties worden uitgevoerd naar aanleiding van een storing. In dat geval is het van belang om snel de beschikking te kunnen hebben over reparatiestukken.

In de Verenigde Staten ligt ongeveer 30 000 kilometer voorgespannen betonnen leidingen (PCCP) en is veel ervaring met conditiebepaling van en onderhoud aan voorgespannen betonnen buizen met grote diameters. Deze ervaringen zijn verzameld en vertaald naar praktische richtlijnen en best practices (WRF, 2012). In het rapport worden de volgende aanbevelingen gedaan, die ook voor Nederland relevant zijn:

1. Breng in kaart welke leidingen het meest kritiek zijn, op basis van functionaliteit van de leiding in het systeem, faalkans en gevolgen van falen
2. Pas de frequentie van inspecteren en de conditiebepalingsmethode aan op basis van hoe kritisch leiding is
3. Houd rekening met fouten en onzekerheden in de meetmethoden, met name bij niet-destructieve technieken, zoals elektromagnetische en akoestische technieken
4. Gebruik niet-destructieve methoden om mogelijke schadelocaties te identificeren en pas op die locaties andere (destructieve) technieken toe ter verificatie en nader onderzoek
5. Voer periodiek conditiebepalingen uit en identificeer de leidingsegmenten, die een onacceptabele faalkans hebben.
6. Vervang de leiding, maar overweeg eerst de mogelijkheden om niet de gehele leiding te vervangen, zoals: het repareren op de meest kritieke punten, het vervangen van specifieke buisdelen, (structureel) relinen of de werkdruk verlagen.

6.2 Strategie algemeen

Op basis van de in dit onderzoek verzamelde kennis en ervaringen wordt voor Nederlandse drinkwaterbedrijven een onderhoudsstrategie aanbevolen met daarin de volgende stappen:

1. Type betonnen leidingen en verbindingen in kaart brengen
2. Monitoren
3. Conditiebepaling
4. Onderhoud (vervanging of levensduurverlenging)

Deze stappen worden in de volgende paragrafen besproken.

6.3 Betonnen leidingen in kaart brengen

Uit de praktijk van Nederlandse waterbedrijven blijkt dat bepaalde type betonnen buizen en bepaalde type verbindingen een verhoogde kans op storingen hebben. Het is derhalve gewenst om naast het registreren van het leidingmateriaal (i.c. beton) ook aspecten te benoemen als fabrikant, jaar van fabricage, type verbinding, type wapening, aanwezigheid van stalen kern of gewikkelde spiraalwapening, staalkwaliteit, en stortkwaliteit.

6.4 Monitoren

Periodieke monitoring kan bestaan uit visuele inspectie, opmeten van voegwijdtes en afpersen van een leiding. Lekdetectiemethoden, zoals de SmartBall kunnen ook worden ingezet. De periode tussen inspectie kan variëren tussen 1 en 10 jaar en hangt af van de locatie en mogelijke gevolgen van schade op de omgeving (BEEL: Beoordeling Externe Effecten Leidinglekkage), de storingshistorie van de leiding en de te verwachten veranderingen in de omgeving, bijvoorbeeld als gevolg van groundbewegingen.

6.5 Conditiebepaling

In dit rapport zijn diverse methoden beschreven om de conditie van betonnen leidingen te bepalen. In de praktijk is het niet zinvol en niet kosten-efficiënt om alle methoden in alle situaties toe te passen. Bij het kiezen van een conditiebepalingmethode is het belangrijk om eerst vast te stellen wat de relevante faalmechanismen zijn. In het geval van voorgespannen betonnen buizen betekent dit dat de focus moet liggen op onderzoek naar draadbreek, corrosie, uitloging en voegwijdte tussen verbindingen.

Aangezien de kwaliteit van het beton goed is, en de wanddikte overgedimensioneerd is en de dikte van de deklaag altijd moest voldoen aan kwaliteitscriteria, zijn druksterktemetingen, niet zinvol. In sommige gevallen kunnen stornaden en holle ruimten in het beton wel leiden tot versnelde corrosie. Omdat aantasting vanuit de bodem niet wordt aangetroffen, lijkt het niet zinvol om de focus te leggen op bodemmetingen. Aandacht besteden aan uitloging of ASR is alleen zinvol als de rol in het faalmechanisme helder is. Onderzocht moet worden of, en in welke specifieke situaties deze mechanismen mogelijk een rol spelen.

Niet-destructieve methoden worden ingezet om een globaal beeld van de leiding te krijgen. Hiervoor zijn radartechnieken, akoestische technieken, elektromagnetische metingen of lekopsporingmethoden beschikbaar. Wanneer de locaties zijn geïdentificeerd die mogelijk een slechte conditie hebben (beton aangetast, draadbreken, lekkende voegen) kunnen deze nader worden onderzocht, bijvoorbeeld met destructieve technieken of technieken die lokaal worden ingezet. Deze technieken zijn ook geschikt voor een gedetailleerd onderzoek naar de restlevensduur van een specifieke deel van een leiding.

6.6 Onderhoud (vervanging of levensduurverlenging)

De keuze tussen het vervangen of renoveren van een betonnen leiding hangt af van vele aspecten, zoals kosten, overlast en de mogelijkheden om een nieuw tracé te gebruiken. Deze aspecten en de afwegingen worden elders in detail beschreven (Van Eijk, 2014). Omdat betonnen leidingen vaak in grote diameters zijn uitgevoerd en het verleggen van een tracé aanzienlijke inspanning vereist, is het in veel omstandigheden verstandig om te overwegen om de levensduur te verlengen.

7 Conclusie

In Nederland ligt ongeveer 1280 km aan betonnen leidingen. Het betreft leidingen met grote diameters, die een belangrijke transportfunctie hebben. Storingen in deze leidingen komen niet vaak voor, maar hebben wel een groot effect.

Uit interviews blijkt dat de kennis over betonnen leidingen zich concentreert bij een beperkt aantal personen. Bij vragen over beton worden derden benaderd, bijvoorbeeld TNO, Grontmij, betonleveranciers (Betonson en De Hamer) of soms zelfs ex-medewerkers van betonfabrieken. Bij een aantal drinkwaterbedrijven is veel documentatie over leidingen aanwezig. Dit zijn leveringscontracten, technische tekeningen en productcatalogi. Andere drinkwaterbedrijven geven juist aan over weinig informatie te beschikken. Voorgespannen betonnen buizen en hulpstukken voor drinkwaterleidingen worden in Nederland alleen nog op speciaal verzoek geproduceerd.

De restlevensduur van een betonnen leiding wordt bepaald door de restkwaliteit van het beton, de restkwaliteit van de wapening en de staat van de verbindingen. Er is een grote variatie aan type betonnen buizen en verbindingen toegepast. Uit de ervaringen blijkt dat er bij specifieke buistypen en verbindingen een verhoogde kans is op storingen. Dit geldt bijvoorbeeld voor buizen met gewikkelde spiraalwapening (kans op waterstofbroosheid en draadbreuken) en voor natuurrubber- en strikverbindingen. Om de storingsgevoelige leidingen in kaart te brengen wordt aan de drinkwaterbedrijven aanbevolen om gericht een inventarisatie te maken van type betonnen buizen, type verbinding en jaar van aanleg. Hierbij is het van belang ook aandacht te schenken aan de aard van de storingen en de bijbehorende consequenties.

Een groot aantal degradatiemechanismen is bekend voor beton en wapening en een aantal mechanismen is bekend voor verbindingen. Deze mechanismen zijn niet allemaal relevant voor drink- en ruwwaterleidingen. Belangrijke mechanismen zijn draadbreek, corrosie, uitloging en toename van de voegwijdte tussen verbindingen. Het effect van sommige mechanismen, zoals ASR en uitloging, op het falen van de leiding is nauwelijks onderzocht. Volgens de ervaringen zijn deze mechanismen in Nederland echter van beperkte relevantie.

Om uit de resultaten van conditiebepaling een uitspraak te kunnen doen over de faalkans en restlevensduur dient een voorspellingsmodel te worden ontworpen en gevalideerd. Hierin moet bijvoorbeeld rekening worden gehouden met het feit dat draadbreek, corrosie of uitloging niet direct tot een verhoogde faalkans leiden. Een leiding met een beperkt aantal draadbreuken, lichte uitwendige corrosie of traag verlopende uitloging kan nog vele jaren voldoen. Gezien de geringe omvang van de betonnen drinkwaterleidingen in Nederland, is het niet te verwachten dat een dergelijk model binnen het BTO ontwikkeld zal worden. Het is derhalve aan te bevelen de ontwikkelingen in het buitenland (met name de Verenigde Staten) en bij het transport van afvalwater te blijven volgen.

8 Literatuur

Arsénio, A.M. (2013). Lifetime prediction of PVC push-fit joints. PhD Thesis. TU Delft.

AwwaRF (2008). Failure of Prestressed Concrete Cylinder Pipe. Awwa Research Foundation and US EPA, 2008.

Betonson (2003). Betonson productgroep buizen. Leveringsprogramma. April 2003.

Bonna (1966). Bonna Vianen. Catalogus, 1966.

CUR, 2009. CUR Leidraad 1. Duurzaamheid van constructief beton met betrekking tot chloride-geïnitieerde wapeningscorrosie. CUR Bouw & Infra, Rotterdam, 2009.

DHV (1995). NV Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland III. Risico analyse lekkage problematiek WRK III transportleidingen.

Eggebrecht (2011). Integrated Monitoring Strategy of large diameter pre-stressed concrete water-transport mains - A case study at Waternet, the Netherlands. Margit Felicitas Eggebrecht. Masters Thesis TU Dresden, 2011.

Eijk, R.J. van (2014). Levensduurverlenging leidingen. BTO 2014.010, KWR, Nieuwegein; In voorbereiding.

ENCI (2012). Betonpocket 2012. Een uitgave van ENCI, Mebin en Sagrex. 's-Hertogenbosch, 2012.

EPA, 2013. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). State of Technology for Rehabilitation of Water Main Distribution Systems. EPA/600/R-13/036. March 2013.

KIWA (1961). Aantasting van rubberringen voor waterleidingbuizen. Rapport van de commissie Rubberringen. KIWA N.V. November 1961.

KIWA (1991). Breukonderzoek aan voorgespannen Arkelbuizen. KIWA, Rijswijk, december 1991.

KIWA Kwaliteitseisen nr. 18: Waterleidingbuizen en hulpstukken van beton voorzien van een stalen kernbuis en een spiraalwapening zonder voorspanning (1959).

KIWA BRL K260. Beoordelingsrichtlijn voor het KIWA productcertificaat voor Buizen en hulpstukken van gewapend beton met plaatstalen kern voor het transport van drinkwater. KIWA. 1 september 2007.

KIWA BRL K263. Beoordelingsrichtlijn voor het KIWA productcertificaat voor Voorgespannen buizen voor het transport van drinkwater. KIWA. 1 september 2007.

KIWA BRL 5231. Nationale Beoordelingsrichtlijn voor het KOMO@ attest -met-productcertificaat voor Buizen en hulpstukken van gewapend beton met plaatstalen kern voor het transport van afvalwater. KIWA. 1 september 2007.

KIWA BRL-K17201, **deel 1 “Renovatie van drinkwaterleidingen – Deel 1 Ontwerpen en installeren van ter plaatse uithardende buis (CIPP) – fabrieksmatig geïmpregneerde linersystemen”**

KIWA BRL-K17201, **deel 2 “Renovatie van drinkwaterleidingen – Deel 2 Producten voor ter plaatse uithardende buis (CIPP) – fabrieksmatig geïmpregneerde linersystemen”**

Meerkerk, M.A. en Mesman, G.A.M. (2010). Richtlijn drinkwaterleidingen buiten gebouwen; Ontwerp, aanleg en beheer (gebaseerd op NEN-EN 805:2000). KWR 2010.094, KWR, Nieuwegein.

Mesman, G.A.M. (2001). Conditiebepaling verbindingen – mogelijkheden conditiebepaling en storingsregistratie verbindingen, BTO 2001.205 (c), KIWA, Nieuwegein.

Mesman, G.A.M. (2006). Afpersprotocol leidingen. KWR06.058, KWR, Nieuwegein.

Mesman, G.A.M. (2007). Oorzaak breuk 800 mm beton Hoorn. KWR 07.090. KWR, Nieuwegein.

Mietz, J., Isecke, B. (1998). Hydrogen-induced stress corrosion cracking of prestressing steels. International Conference on Corrosion and rehabilitation of reinforced concrete structures. December 7-11, Orlando, Florida.

NEN-EN 197-1:2000. Cement – Deel 1: Samenstelling, specificaties en conformiteitscriteria voor gewone cementsoorten, NEN, Rijswijk.

NEN-EN 206-1: 2001. Beton – Deel 1: Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit.

NEN-EN 639:1994. Algemene eisen voor betonbuizen voor drukleidingen inclusief verbindingen en hulpstukken.

NEN-EN 641: 1994. Buizen van gewapend beton met plaatstalen kern voor drukleidingen inclusief verbindingen en hulpstukken.

Polder, R.B. (1987). Duurzaamheid rioolleidingen. Een literatuurstudie naar aantastingsmechanismen. TNO, 1987.

Reijnen GK (1996) Afgifte van aluminium door cementshoudende drinkwaterleidingen Kiwa-rapport SWE 96.015, KWR Nieuwegein

Reinhardt, H.W. (1985). Beton als constructiemateriaal: eigenschappen en duurzaamheid. Delftse Universitaire Pers, 1985.

Slaats, P.P.G., M.A. Meerkerk en C.H.M. Hofman-Caris (2013). Conditionering: de optimale samenstelling van drinkwater. Een update van KIWA-mededeling 100 uit 1988. KWR 2013.069, KWR, Nieuwegein.

Souwerbren, C. (1995). *Betontechnologie*. Studieboek voor de cursus betontechnoloog van de Betonvereniging. **BetonPrisma**. 's-Hertogenbosch, 1995.

Taylor, H.F.W. (1997). *Cement Chemistry*. Second Edition. Thomas Telford Publishing, London, 1997.

TNO (2002). TNO rapport. 2002-CI-R2061. Duurzaamheid van voorgespannen waterleidingbuizen van Waterbedrijf Europoort - vervolgonderzoek voorspanning.

TNO (2008). TNO rapport. Onderzoek naar de Draadbreuken in de Betonbuizen van de Waterleiding WRK II t.b.v. de Restlevensduur. Internal report 2007-D-R0331/A, TNO, Eindhoven (2008).

USTOREweb, 2013. Geraadpleegd 1 november 2013.

WRF (2012). *Best Practices Manual for Prestressed Concrete Pipe Condition Assessment: What Works? What Doesn't? What's Next?* **Water Research Foundation and U.S. Environmental Protection Agency**, 2012.

Bijlage I Cement, beton en hydratatie

Cement

Beton en cementmortel bestaan voor een belangrijk deel uit cement, dat als bindmiddel fungeert voor respectievelijk grind/zand en zand. Normaal (niet zwaar of licht) beton heeft typisch een dichtheid van 2350 kg/m^3 en de hoeveelheid cement die wordt gebruikt is laag (250 à 400 kg per m^3 beton). Toch worden de meeste eigenschappen van beton duidelijk door het cement bepaald. Vooral chemische eigenschappen, zoals de bescherming van de wapening en de gevoeligheid voor aantasting door een agressief milieu worden door het gebruikte cement bepaald. De porositeit en daarmee de sterkte en doorlatendheid hangen af van het gebruikte cement en de hoeveelheid water.

Cement bevat een groot aantal verbindingen. De belangrijkste zijn: C_3S ($= 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), C_2S ($= 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), C_3A ($= 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), C_4AF ($= 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) en kleine hoeveelheden andere verbindingen, waaronder natrium- en kaliumsulfaten en magnesium- en calciumoxide.

Speciale cementen zijn sulfaatbestendige cementen (C_3A -arm), witte cementen (C_4AF -arm, ofwel ijzerarm) en cementen met een laag alkaligehalte. Aluminiumcement bevat voornamelijk calciumaluminaten en reageert veel sneller met water dan de andere cementen.

Cementsoorten worden aangeduid met CEM gevolgd door een Romeins cijfer (ENCI, 2012). Voor toepassingen in de drink- of warmtapwatervoorziening mogen uitsluitend producten en materialen op basis van Portland- en hoogovencement, respectievelijk CEM I en CEM III, worden gebruikt (NEN-EN 197-1:2000). Het toegepaste cement voor de fabricage van betonnen buizen is voor zover bekend altijd Portlandcement (CEM I) geweest. Hoogovencement (CEM III) mag om bouwtechnische redenen uitsluitend voor de toepassing in voorraadsystemen worden gebruikt. Aluminiumcement valt niet onder NEN-EN 197-1 waarmee het gebruik daarvan in de Nederlandse drinkwatersector is uitgesloten.

CEM I staat voor Portlandcement en bestaat volledig uit Portlandcementklinker. CEM III staat voor hoogovencement wat bestaat uit portlandcementklinker waaraan meer dan 35 % hoogovenslak is toegevoegd.

De huidige sterkteklassen voor cement worden gedefinieerd in NEN-EN 197-1. Deze norm kent drie sterkteklassen en geeft voor elke klasse grenswaarden waarbinnen de normsterkte moet liggen. Het gaat om de klassen 32,5; 42,5 en 52,5, waarbij het getal staat voor de minimale normsterkte in N/mm^2 , die moet worden bereikt na 28 dagen uitharden. De aanduiding R duidt op een hogere beginsterkte (na 2 dagen uitharding). De sterkteklasse wordt vermeld na de naam van het cement, bijvoorbeeld CEM I 52,5R.

Beton

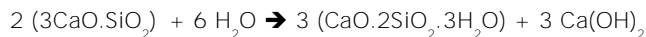
Beton is het verharde product dat ontstaat wanneer naast cement, water en fijn toeslagmateriaal (zand, 0 - 4 mm) ook grof toeslagmateriaal (grind, > 4 mm) is toegevoegd. Het vloeibare uitgangsmengsel wordt dan betonspecie genoemd. Hulpstoffen worden aan

een betonspecie toegevoegd om eigenschappen van de specie of het beton te beïnvloeden. Voorbeelden zijn superplastificeerders (om de verwerkbaarheid van de specie te verbeteren), luchtbelvormers, vertragers en versnellers. Vulstoffen worden toegevoegd ter aanvulling van de hoeveelheid fijn materiaal. Dit kunnen zowel inerte als puzzolane (met $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reagerende) stoffen zijn, zoals poederkoolvliegias, tras (of andere natuurlijke puzzolanen), steenmeel of silica fume. Al deze vulstoffen zorgen uiteindelijk voor een dichtere poriënstructuur.

Hydratatie en uitharding

Wanneer cement en water worden gemengd zullen de cementverbindingen een reactie aangaan met water. Dit wordt hydratatie genoemd. Hierbij ontstaan onoplosbare verbindingen en uiteindelijk een verhard product. De massaverhouding water/cement wordt de water-cementfactor (met als gebruikelijke afkorting wcf) genoemd. De water-cementfactor is een van de belangrijkste factoren die bepalend is voor zowel de sterkte-ontwikkeling als voor de duurzaamheid. Een mengsel met een hogere wcf bevat bij aanvang van de uitharding meer water en het uitgeharde product zal uiteindelijk meer capillaire porositeit bezitten en daarmee ook een hogere permeabiliteit en een lagere duurzaamheid.

Voor sterkteontwikkeling en materiaaleigenschappen van beton zijn vooral de hydratatie van C_3S en C_2S van belang. Hierbij ontstaan calciumsilicaathydraten (CSH) en portlandiet (CH ofwel $\text{Ca}(\text{OH})_2$). De vereenvoudigde reactievergelijking voor C_3S is:



Bij de hydratatie van C_3A en C_4AF worden ook hydraten gevormd. Deze dragen echter nauwelijks bij aan de sterkte. Het reactiemechanisme van deze twee verbindingen is ingewikkelder dan dat van C_3S en C_2S en hangt ook af van de aanwezigheid van sulfaten. Sulfaten zijn bijvoorbeeld afkomstig van gips ($\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dat bij het malen van cement wordt toegevoegd als bindtijdregelaar. C_3A reageert met gips, waarbij het volumineuze mineraal ettringiet ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) wordt gevormd. De reactie luidt als volgt:



De vorming van ettringiet vormt geen probleem zolang deze plaatsvindt in de plastische fase van beton. Wel ontstaan problemen als deze reactie plaatsvindt in uitgehard beton.

De calciumsilicaathydraten (CSH) zijn verantwoordelijk voor de sterkte en worden ook wel cementsteen genoemd. Het zijn laagvormig opgebouwde kristallen, waartussen zich water kan bevinden. Deze kristallen vormen vellen, die op hun beurt door oprollen naalden of vezels vormen. De microstructuur en chemische samenstelling van CSH zijn bepalend voor het gedrag van verhard cement.