

5

Hoofdstuk 5

uit het veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie A-afval in Dessel

Kennis van de fenomenologie van de kunstmatige barrières in hun omgeving



© CSTC/WP/CEB

Hoofdstuk 5

Kennis van de fenomenologie van de kunstmatige barrières in hun omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie A-afval te Dessel

Versie 1 en 2 van dit rapport werden geschreven door R. Gens (NIRAS), L. Wouters (NIRAS) en W. Wacquier (NIRAS).

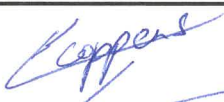
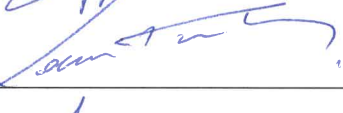

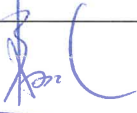

Het werd nagekeken door W. Cool (NIRAS) en E. Coppens (NIRAS).

Het werd goedgekeurd door R. Bosselaers (NIRAS).

Versie 3 van dit rapport werd geschreven door E. Coppens (NIRAS) en L. Wouters (NIRAS).

Het werd nagekeken door E. Weetjens (SCK), W. Bastiaens (NIRAS), K. Remeysen (Tractebel), E. Vermariën (NIRAS).

Het werd goedgekeurd door B. Van Assche (NIRAS), R. Bosselaers (NIRAS).

Goedkeuring document		
Goedkeuring	Datum	Handtekening
<i>Geschreven door:</i> ERIK COPPENS	30/1/2019	
LAURENT WOUTERS	30/01/2019	
<i>Nagekeken door:</i> EEF WEETJENS	30/01/2019	
<i>Goedgekeurd door:</i> BART VAN ASSCHE	30/01/2019	
RUDY BOSSELAERS	30/01/2019	

NIRAS

Kunstlaan 14

1210 Brussel

www.nirond.be

De gegevens, resultaten, conclusies en aanbevelingen in dit rapport zijn eigendom van NIRAS. Dit rapport mag worden geciteerd mits bronvermelding. Dit rapport wordt beschikbaar gesteld op voorwaarde dat het niet voor commerciële doeleinden wordt gebruikt. Voor alle commerciële doeleinden, met inbegrip van kopiëren en herpubliceren, is de voorafgaande schriftelijke toestemming van NIRAS vereist.

Documentgegevens			
Hoofdstuk 5: Kennis van de fenomenologie van de kunstmatige barrières in hun omgeving Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie A-afval te Dessel			
Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen NIRAS Kunstlaan 14 1210 Brussel			
Serie	Categorie A	Documenttype	NIROND-TR
Status	Open	Publicatiedatum	30 januari 2019
NIRAS rapportnummer	NIROND-TR 2011-05	Revisie nummer	versie 3
Sleutelwoorden	Fenomenologie, categorie A, veiligheid,		

Revisietabel																																		
Versie		Commentaar en overzicht van wijzigingen vergeleken met de vorige versie																																
Nummer	Datum																																	
1	30/11/2011	Versie voor peer review en overgemaakt aan het FANC																																
2	30/09/2012	Initiële versie ingediend bij het FANC samen met de vergunningsaanvraag tot oprichtings- en exploitatie (A1) van de oppervlaktebergingsinrichting voor categorie A-afval te Dessel																																
3	30/01/2019	<p>Herziene versie rekening houdend met de vragen van het FANC en Bel V op versie 2</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Vraag nr.</th> <th style="text-align: left;">Titel</th> <th style="text-align: left;">Nodige aanpassingen aan veiligheidsrapport</th> <th style="text-align: left;">Aangepaste §</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>HS05-001</td> <td>Informatie fenomenologie van de ontbrekende componenten</td> <td>Verwijzingen naar bijkomende tekstdelen</td> <td>5.1</td> </tr> <tr> <td>HS05-001</td> <td>Informatie fenomenologie van de ontbrekende componenten</td> <td>Tekst is integraal opgenomen als nieuwe paragrafen</td> <td>5.11 t.e.m. 5.16</td> </tr> <tr> <td>HS05-007</td> <td>Hydraulische geleidbaarheid van de afdekking</td> <td>Argumentatie permeabiliteit klei</td> <td>5.2.1.4</td> </tr> <tr> <td>HS05-002</td> <td>Keuze van het materiaal van de kleilaag</td> <td>Expliciete verwijzing naar BRE Special Digest voor thaumasiet</td> <td>5.3.2.2</td> </tr> <tr> <td>HS05-003</td> <td>Erosie van de afdekking</td> <td>Verduidelijking dat slechts beperkte erosie van de afdekking verwacht wordt zolang er begroeiing is.</td> <td>5.2.2.1</td> </tr> <tr> <td>HS14-001</td> <td>Beschrijving verwachte evolutie</td> <td> Aarden afdekking: Door nucleaire reglementaire controle geen blijvende degradatie tot 350 jaar. De functie blijft vervuld tot 1 000 jaar na plaatsen. Speciale granulometrie voor de bio-intrusie laag (NUREG 1623) </td> <td>5.2.2.1</td> </tr> <tr> <td>HS14-001</td> <td>Beschrijving</td> <td>Seismische verstoring van</td> <td>5.2.2.2</td> </tr> </tbody> </table>	Vraag nr.	Titel	Nodige aanpassingen aan veiligheidsrapport	Aangepaste §	HS05-001	Informatie fenomenologie van de ontbrekende componenten	Verwijzingen naar bijkomende tekstdelen	5.1	HS05-001	Informatie fenomenologie van de ontbrekende componenten	Tekst is integraal opgenomen als nieuwe paragrafen	5.11 t.e.m. 5.16	HS05-007	Hydraulische geleidbaarheid van de afdekking	Argumentatie permeabiliteit klei	5.2.1.4	HS05-002	Keuze van het materiaal van de kleilaag	Expliciete verwijzing naar BRE Special Digest voor thaumasiet	5.3.2.2	HS05-003	Erosie van de afdekking	Verduidelijking dat slechts beperkte erosie van de afdekking verwacht wordt zolang er begroeiing is.	5.2.2.1	HS14-001	Beschrijving verwachte evolutie	Aarden afdekking: Door nucleaire reglementaire controle geen blijvende degradatie tot 350 jaar. De functie blijft vervuld tot 1 000 jaar na plaatsen. Speciale granulometrie voor de bio-intrusie laag (NUREG 1623)	5.2.2.1	HS14-001	Beschrijving	Seismische verstoring van	5.2.2.2
Vraag nr.	Titel	Nodige aanpassingen aan veiligheidsrapport	Aangepaste §																															
HS05-001	Informatie fenomenologie van de ontbrekende componenten	Verwijzingen naar bijkomende tekstdelen	5.1																															
HS05-001	Informatie fenomenologie van de ontbrekende componenten	Tekst is integraal opgenomen als nieuwe paragrafen	5.11 t.e.m. 5.16																															
HS05-007	Hydraulische geleidbaarheid van de afdekking	Argumentatie permeabiliteit klei	5.2.1.4																															
HS05-002	Keuze van het materiaal van de kleilaag	Expliciete verwijzing naar BRE Special Digest voor thaumasiet	5.3.2.2																															
HS05-003	Erosie van de afdekking	Verduidelijking dat slechts beperkte erosie van de afdekking verwacht wordt zolang er begroeiing is.	5.2.2.1																															
HS14-001	Beschrijving verwachte evolutie	Aarden afdekking: Door nucleaire reglementaire controle geen blijvende degradatie tot 350 jaar. De functie blijft vervuld tot 1 000 jaar na plaatsen. Speciale granulometrie voor de bio-intrusie laag (NUREG 1623)	5.2.2.1																															
HS14-001	Beschrijving	Seismische verstoring van	5.2.2.2																															

Hoofdstuk 5: Kennis van de fenomenologie van de kunstmatige barrières in hun omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie A-afval te Dessel

		verwachte evolutie	de aarden afdekking	
HS14-001	Beschrijving verwachte evolutie	Na 1 000 jaar grote onzekerheid	5.2.2.3	
Fiche 13	AES	Toevoeging niet verwachte maar mogelijke processen die versnelde erosie kunnen veroorzaken	5.2.2.3	
HS05-009	Onderscheid tussen verschillende cementgebonden materialen	Opsplitsing per cementgebonden materiaal	5.7t.e.m. 5.10 5.5	
HS05-006	Lange termijnevolutie van een aantal eigenschappen	Data over permeabiliteit, porositeit, densiteit, en sortie	5.3.1.3	
HS05-005	Hydraulische geleidbaarheid van betoncomponenten	Initiële waarde permeabiliteit caisson en module	5.3.1.2	
HS05-005	Hydraulische geleidbaarheid van betoncomponenten	Initiële waarde permeabiliteit vulmortel	5.4.1.2.1	
HS05-010	Impact van de carbonatatie op de sortie	Effect van carbonatatie op sortie	5.3.1.3.2	
HS14-001	Beschrijving verwachte evolutie	Snelheid van carbonatatie geïllustreerd	5.3.1.3 5.3.2.6	
HS14-001	Beschrijving verwachte evolutie	Verwijzingen toegevoegd	5.3.2	
HS05-008	Sulfaatinhoud	Tekst die oorspronkelijk verwees naar OD-187 m.b.t. tot sulfaten verwijderd en vervangen.	5.3.2.2	
HS06- INV-14	Compatibiliteit Chemische inventaris	Compatibiliteit met aluminium beschreven	5.3.2.10.6	
HS14-001	Beschrijving verwachte evolutie	Aannames en randvoorwaarden bijgestuurd	5.3.2.14	
HS08-008	Samenstelling beton	Verwijdering van tekst “formulespreiding”	5.3	
HS14-001	Beschrijving verwachte evolutie	Carbonatatiesnelheden zijn geüpdatet & het effect van klimaatsverandering is toegevoegd	5.3.2.6.1	
HS05-005	Hydraulische geleidbaarheid van betoncomponenten	Permeabiliteit van opvulmateriaal inspectieruimte	5.8.1.2	
HS05-008	Sulfaatinhoud	Sulfaatinhoud van afval en interactie met beton en mortel	5.3.2.10.5	

HS08-008	Samenstelling beton	Beschrijving betonsamenstelling	van	5.3
HS08-008	Samenstelling beton	Toleranties op de betonsamenstelling en gelijkwaardigheid beton 1 en 2		5.3
HS05-004	Corrosie van de hijsogen van de monolieten	Compatibiliteit met hijsogen		5.3.2.12
HS14-001	Beschrijving verwachte evolutie	Compatibiliteit en interactie met afval is uitgebreider beschreven		5.3.2.10
HS07-007	Samenstelling van de vulmortel	Samenstelling van de vulmortel		5.4
HS14-088	Colloïden	Bijkomende tekst Bijkomende paragraaf		5.2.2.3 5.3.2.13
HS14-061	Verwachte evolutie(s) en initiële toestand qua scheuren, speleten en openingen.	Bijkomende tekst(delen)		5.3.2.7 5.4.2 5.17
HS08-006	Referentieoplossing ondoorlatende topplaat	Eenduidige beschrijving van de referentieoplossing voor de ondoorlatende topplaat.		5.5
HS08-011	Aantoonbaarheid van de permeabiliteit betonconstructiest	Zie HS 05-001 en HS05-005		-
HS08-018	Alkali-aggregaat reacties	ASTM C 1260 en 1293 expliciet vermeld alsook verwoorden “of equivalent”.		5.3.2.3
Overige aanpassingen:				
Nodige aanpassingen aan veiligheidsrapport				Aangepaste §
Evolutie in de betontechnologie is mogelijk Niras volgt deze op.				5.3.1.1
Verschillend type superplast voor caisson en modules				5.3
Verwachte evolutie op lange termijn coherent gemaakt met andere delen.				5.3
Informatie m.b.t. cellulose toegevoegd				5.3.2.10.4
Vezelbeton voor caisson vermeld				5.5
Informatie rond “aging” van vezelbeton toegevoegd				5.5.2.4
Metingen op carbonatatie zand-cement talud demonstratieproef				5.10.2
Integratie van REX vulproeven caissons 2016				5.4.2

Inhoudsopgave

5	Kennis van de fenomenologische aspecten van de kunstmatige barrières in hun omgeving	1
5.1	Inleiding en doelstellingen	1
5.2	De aarden afdekking	2
5.2.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	2
5.2.1.1	Rol van de aarden afdekking	2
5.2.1.2	Belangrijkste componenten van de aarden afdekking	3
5.2.1.3	De aarden afdekking en zijn beschermende functie van de onderliggende componenten	5
5.2.1.4	Waterinsijpeling in en doorheen de afdekking	6
5.2.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen; compatibiliteit en levensduur	9
5.2.2.1	Graduele degradatiemechanismen van de aarden afdekking	9
5.2.2.2	Seismische belasting van de aarden afdekking	14
5.2.2.3	Compatibiliteit en levensduur	14
5.2.2.4	Conclusies	16
5.2.3	Resterende onzekerheden	16
5.2.4	Performantie-indicatoren	17
5.2.4.1	De waterinsijpeling	17
5.2.4.2	De duurzaamheid van de aarden afdekking	18
5.3	Klassiek gewapend beton	19
5.3.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	21
5.3.1.1	Rol	21
5.3.1.2	Eigenschappen	23
5.3.1.3	Verwacht gedrag	31
5.3.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	34
5.3.2.1	Het binnendringen van chloride	36
5.3.2.2	Sulfaataantasting (externe en interne)	36
5.3.2.3	Degradatie door alkali-silica reacties (ASR)	38
5.3.2.4	Biodegradatie	39
5.3.2.5	Ontkalking (uitlogingsproces)	39
5.3.2.6	Carbonatatie	44
5.3.2.7	Scheurvorming en zelfdichting	51

5.3.2.8	Vries-dooi	54
5.3.2.9	Kruip	55
5.3.2.10	Compatibiliteit met het afval	55
5.3.2.11	Compatibiliteit met de vulmortel	68
5.3.2.12	Compatibiliteit met de hijsankers van de monoliet	68
5.3.2.13	Compatibiliteit met en effect op colloïden	69
5.3.2.14	Levensduurevaluatie	70
5.3.3	Resterende onzekerheden	72
5.3.3.1	Scheurvorming en zelfdichting	72
5.3.3.2	Overige onzekerheden	73
5.3.4	Performantie-indicatoren	73
5.4	Vulmortel	76
5.4.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	77
5.4.1.1	Rol	77
5.4.1.2	Eigenschappen	77
5.4.1.3	Verwacht gedrag	80
5.4.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	81
5.4.3	Resterende onzekerheden	82
5.4.4	Performantie-indicatoren	84
5.5	Staalvezelbeton	86
5.5.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	86
5.5.1.1	Rol	86
5.5.1.2	Eigenschappen	87
5.5.1.3	Verwacht gedrag	89
5.5.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	90
5.5.2.1	Het binnendringen van chloriden	90
5.5.2.2	Carbonatatieproces, effect op hydraulische geleidbaarheid en corrosie	90
5.5.2.3	Kruip	91
5.5.2.4	Mechanische eigenschappen en scheurgedrag	91
5.5.2.5	Compatibiliteit van het afval met de cementbarrières	92
5.5.2.6	Levensduurevaluatie	92
5.5.3	Resterende onzekerheden	92
5.5.3.1	Corrosie in agressieve omgevingen	92
5.5.3.2	Betonsamenstellingen	92

5.5.4	Performantie-indicatoren	93
5.6	Ruimte tussen monolieten	94
5.6.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	94
5.6.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	94
5.6.3	Resterende onzekerheden	94
5.6.4	Performantie-indicatoren	94
5.7	Opvulmateriaal van de inspectiegalerij	95
5.8	Opvulmateriaal van de inspectieruimten	96
5.8.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	96
5.8.1.1	Rol	96
5.8.1.2	Eigenschappen	96
5.8.1.3	Verwacht gedrag	97
5.8.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	97
5.8.3	Resterende onzekerheden	97
5.8.4	Performantie-indicatoren	98
5.9	Opvulmateriaal van het drainagesysteem	99
5.10	Zand-cement	100
5.10.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	100
5.10.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	101
5.10.3	Resterende onzekerheden	101
5.10.4	Performantie-indicatoren	101
5.11	Voegen	102
5.11.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	102
5.11.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	103
5.11.3	Resterende onzekerheden	103
5.11.4	Performantie-indicatoren	103
5.12	Drainagesysteem	104
5.12.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	104
5.12.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	104
5.12.3	Resterende onzekerheden	105
5.12.4	Performantie-indicatoren	105
5.13	Geosynthetische materialen	106

5.13.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	106
5.13.1.1	In de afdekking	106
5.13.1.2	In de funderingen	106
5.13.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	107
5.13.2.1	In de afdekking	107
5.13.2.2	In de funderingen	108
5.13.3	Resterende onzekerheden	108
5.13.4	Performantie-indicatoren	109
5.14	Vast stalen dak	110
5.14.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	110
5.14.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	110
5.14.3	Resterende onzekerheden	111
5.14.4	Performantie-indicatoren	111
5.15	Anti-badkuipsysteem (ABS)	112
5.15.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	112
5.15.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	113
5.15.3	Resterende onzekerheden	113
5.15.4	Performantie-indicatoren	113
5.16	Met bentoniet verrijkte grond (BES)	114
5.16.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	114
5.16.2	Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	115
5.16.3	Resterende onzekerheden	115
5.16.4	Performantie-indicatoren	115
5.17	Spletten, openingen en holtes	117
5.17.1	Rol, eigenschappen en verwacht gedrag	117
5.17.2	Degradatie en verouderingen: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur	118
5.17.3	Resterende onzekerheden	118
5.17.4	Performantie-indicatoren	118
5.18	Referenties	119
5.18.1	Referenties	119
5.18.2	Ondersteunde documenten	133
	Bijlage 5-1: Lijst van afkortingen	135

5 Kennis van de fenomenologische aspecten van de kunstmatige barrières in hun omgeving

5.1 Inleiding en doelstellingen

Dit hoofdstuk heeft als doel een beschrijving te geven van de fenomenologische aspecten en de verwachte langetermijnsevolutie van de kunstmatige barrières van het bergingssysteem: de aarden afdekking en de cementgebonden componenten, voegen, drainagesystemen, het vast stalen dak, het anti-badkuipsysteem en de met bentoniet verrijkte grond.

Dit hoofdstuk wordt ondersteund door de rapporten OD-011, OD-38, OD-039, OD-063, OD-065, OD-107, OD-108, OD-134, OD-158, OD-166, OD-167, OD-187, OD-206, OD-270 en OD-281.

Zoals uitgelegd in Hoofdstuk 1 [HS-1, §1.6], ondersteunt dit hoofdstuk voornamelijk de volgende hoofdstukken van het veiligheidsrapport: Hoofdstuk 7 en 8 voor de ontwikkeling van het ontwerp van de bergingscolli [HS-7] en de berging [HS-8] en Hoofdstuk 14 voor de beschrijving van de verwachte evolutie en de selectie van de parameterwaarden en hypothesen voor het uitvoeren van de langetermijnseveiligheidsvaluatie [HS-14]. Er bestaat eveneens een link met Hoofdstuk 2 Veiligheidsbeleid, veiligheidsstrategie en veiligheidsconcept [HS-2], met Hoofdstuk 16 Monitoring [HS-16], en met Hoofdstuk 10 dat handelt over de sluiting van de berging [HS-10].

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

- Paragraaf 5.2 behandelt de componenten van de aarden afdekking en beschrijft hun rol en hun langetermijnsevolutie en hoe de resterende onzekerheden verder worden geanalyseerd;
- Paragraaf 5.3 beschrijft de rol en de degradatie van kunstmatige barrières uit klassiek gewapend beton en geeft een evaluatie van het gedrag van deze componenten gedurende hun levensduur. Deze paragraaf beschrijft ook de relevante eigenschappen voor de langetermijnveiligheid en de algemene langetermijnsevolutie van deze cementgebonden materialen.
- Paragraaf 5.4 beschrijft de rol en de degradatie van kunstmatige barrières uit mortel. Het betreft meer specifiek de vulmortel die in de IPM in de caissons gegoten zal worden.
- Paragraaf 5.5 behandelt de kunstmatige barrières uit staalvezelbeton. Omwille van analogieën wordt vaak verwezen naar paragraaf 5.3.
- Paragraaf 5.6 beschrijft de werking en de eigenschappen van de tussenruimtes tussen de monolietstapels.
- Paragrafen 5.7 tot 5.17 beschrijven de rol en eigenschappen alsook de degradatie van de overige componenten, zijnde: de opvulmaterialen, het zand-cement, de voegen, het drainagesysteem, de geosynthetische materialen, het vast stalen dak, het anti-badkuipsysteem, de met bentoniet verrijkte grond en de eventueel aanwezige spleten, openingen en holtes.

Tot slot wordt in bijlage 1 een lijst met afkortingen gegeven.

5.2 De aarden afdekking

Deze paragraaf beschrijft de componenten van de aarden afdekking, haar functies en de graduele degradatieprocessen, alsook de mogelijke gevolgen van seismische belasting, die de performantie van de afdekking zullen beïnvloeden.

5.2.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

5.2.1.1 Rol van de aarden afdekking

De aarden afdekking draagt bij tot insluiting ([HS-2]; §2.8.2.2).

De aarden afdekking vormt samen met de ondoorlatende topplaat de afdekking (zie Figuur 5-1) en heeft tot doel om de modules aan “ingegraven omstandigheden” te onderwerpen. Door deze ingegraven omstandigheden op te leggen wordt/worden:

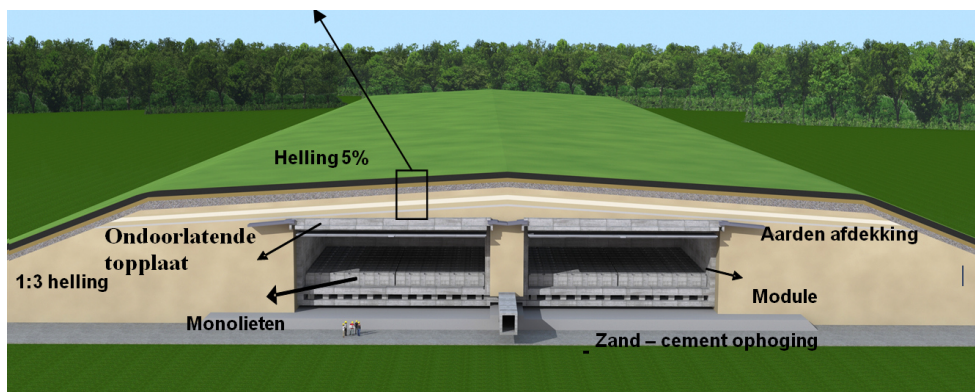
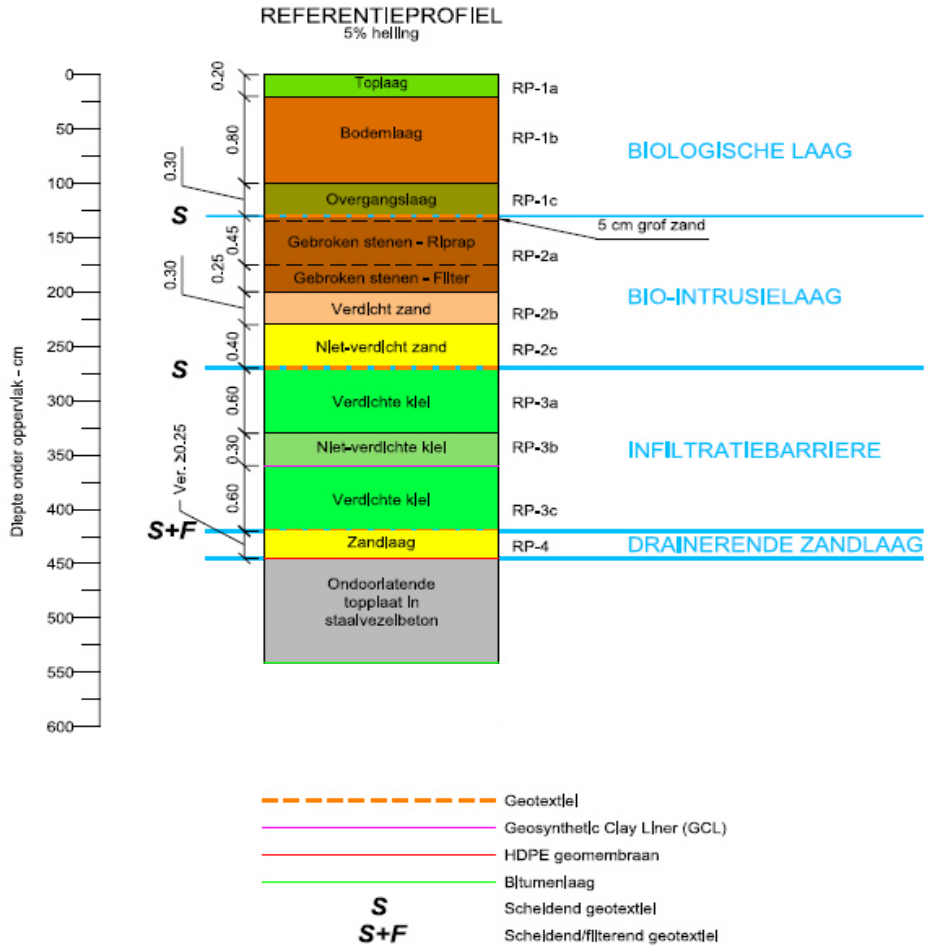
- Atmosferische carbonatatie van het beton vermeden;
- De onderliggende betonnen componenten beschermd tegen vries-dooi- en droog-nat-cycli;
- De waterinsijpeling naar de onderliggende betonnen componenten beperkt door:
 - ▶ de **capacitieve eigenschap** van de bodemlaag zoveel als mogelijk te bevorderen;
 - ▶ de aanleg van een **infiltratiebarrière die de** laterale drainage van water in de bovenliggende laag bevordert en waterinsijpeling naar de diepere lagen zoveel mogelijk beperkt.

De aarden afdekking zal eveneens de duurzaamheid van de onderliggende betonnen constructies niet in gevaar brengen (bijvoorbeeld door de invloed van de chemische samenstelling van deze afdekking).

De aarden afdekking draagt eveneens bij tot afzondering ([HS-2] §2.8.2.1).

De aarden afdekking bestaat uit een bodemlaag op steen-, zand- en kleilagen met een totale dikte van 4,45 m. Samen met de 70 cm dikke ondoorlatende topplaat uit vezelversterkt beton vormt dit een robuust geheel dat afzondering bevordert door de hoeveelheid/dikte van barrière materiaal, samenstelling en de mechanische eigenschappen ervan.

5.2.1.2 Belangrijkste componenten van de aarden afdekking



Figuur 5-1: De componenten van de bergingsinstallatie na de realisatie van de afdekking. Deze afdekking is samengesteld uit de ondoorlatende topplaat en de aarden afdekking. Het profiel van de aarden afdekking boven de modules is eveneens in detail weergegeven.

De aarden afdekking (met een dikte van ongeveer 4,45 m) bestaat uit een reeks natuurlijke materialen zoals zand, grind en klei. Op basis van literatuurgegevens werden hun hydraulische eigenschappen gedefinieerd: het residueel en gesatureerd watergehalte, de poriëngrootteverdeling, de hydraulische geleidbaarheid, de poriënconnectiviteit en een parameter gerelateerd aan de inverse van de 'air-entry suction' zijn vermeld in §4.1.5 van [OD-065]. Materiaal -en site-specifieke hydraulische eigenschappen zullen worden bekomen tijdens de bouw van de proefafdekking.

Vier functionele lagen zijn gedefinieerd:

- De **biologische laag** (met een dikte van ongeveer 1,3 m) met volgende belangrijke functies:
 - ▶ Laat infiltratie van neerslag toe. Daardoor, en samen met een kleine hellingsgraad van 5%, is de hoeveelheid afwatering via oppervlakkige afstroming beperkt, wat de kans op zware erosie (bijvoorbeeld geulerosie) vermindert.
 - ▶ Zorgt voor een duurzame groei van de vegetatie:
 - Om de toplaag tegen erosie te beschermen;
 - Om de overdracht van bodemwater naar de atmosfeer via wortelopname en transpiratie te bevorderen;
 - Om neerslag door plantenbladeren te laten opvangen, gevolgd door de verdamping van dit water.
 - ▶ Beschermde kleilaag (infiltratiebarrière) tegen vries-dooi- of droog-nat-cycli, en voorkomt zo de uitdroging en het barsten van de kleilaag.
- De **bio-intrusie laag** (met een dikte van ongeveer 1,4 m) heeft drie functies:
 - ▶ Beschermde onderliggende infiltratiebarrière tegen perturbaties, onder andere ten gevolge van wortelgroei en gravende dieren (zoals konijnen, vossen of dassen);
 - ▶ Door de specifieke samenstelling van deze laag met grotere, hoekige gesteentefragmenten zal een mogelijke geulvorming die zich volledig doorheen de biologische laag zou ontwikkelen, geïnhibeerd worden;
 - ▶ Dient eveneens als een extra buffer voor de infiltratiebarrière tegen wisselende weersomstandigheden, en beperkt dus het effect van droog/nat- of vries-dooi-cycli op de onderliggende lagen.
- de **infiltratiebarrière** (de kleilaag met dikte van 1,5 m) is alleen aanwezig in het deel van de afdekking gelegen boven de modules:
 - ▶ Ze bevordert, mede door de zachte helling (5% is voorzien), de laterale waterstroming in de laag boven de kleilaag.
 - ▶ De klei in de infiltratiebarrière ondersteunt het behoud van chemisch stabiele omstandigheden en beperkt zo de degradatie van het onderliggende beton. De klei in de infiltratiebarrière zal immers fungeren als een chemische buffer en de directe doorgang van agressieve elementen naar het beton verhinderen.
 - ▶ De beoogde hydraulische geleidbaarheid van deze laag bedraagt 1×10^{-9} m/s.

- De **drainerende zandlaag** met een dikte van minimum 0,25 m, die zorgt dat het weinige water dat door de infiltratiebarrière zou sijpelen, lateraal wordt afgevoerd bovenop de ondoorlatende topplaat.
 - ▶ Deze drainerende laag wordt gekenmerkt door een hydraulische geleidbaarheid van ongeveer 5×10^{-3} m/s.

De aarden afdekking rust op de ondoorlatende topplaat, die nog tot de afdekking behoort en die een tweede infiltratiebarrière vormt. De topplaat is ook bedekt door een geomembraan. Bijkomend zorgt de ondoorlatende topplaat voor een geomechanisch stabiele ondergrond voor alle bovenliggende lagen. Het is een niet-structurele betoncomponent van minimaal 70 cm dikte, versterkt met staalvezels (§5.5).

De **ophoging aan de zijdes** bestaat uit gecompacteerd zand, dit om alle leegtes en niveauverschillen tussen de modules te vullen. Dit gecompacteerd zand wordt bedekt door de doorlopende bio-intrusielaaag en de biologische laag (Figuur 5-1). De helling van deze ophoging aan de zijdes zal ongeveer 33% bedragen. De hydraulische geleidbaarheid van dit gecompacteerd zand zal ongeveer 1×10^{-4} m/s bedragen.

De performantie van de aarden afdekking zal worden geëvalueerd in de proefafdekking. Op basis hiervan kan het ontwerp van de finale afdekking desgewenst worden aangepast in het kader van de toepassing van het optimaliseringsprincipe (zie §2.4.2.2.2 van HS-2).

5.2.1.3 De aarden afdekking en zijn beschermende functie van de onderliggende componenten

De aarden afdekking heeft als voornaamste doel om “ingegraven omstandigheden” te bewerkstelligen voor de ondoorlatende topplaat en de onderliggende modules en caissons waardoor deze niet onderhevig zijn aan vries-dooi-cycli en de carbonatatie erin quasi tot stilstand komt (zie ook §5.3.2.6.1).

Ook de evolutie van de waterhuishouding in de cementgebaseerde barrières en afval wordt bepaald door de performantie van de aarden afdekking. Door de veiligheidsfunctie R2a (‘beperken van waterinsijpeling tot bij het afval’) van de afdekking en de trage saturatie van betonnen componenten zal in het afval weinig water beschikbaar zijn voor chemische reacties en uitloging van radionucliden.

De invloed van de chemische samenstelling van de aarden afdekking op de onderliggende betonnen componenten werd bestudeerd in [OD-065, §3.2]. In het algemeen kan de duurzaamheid van beton negatief worden beïnvloed door water dat de volgende elementen/verbindingen bevat: chloride (§5.3.2.1), sulfaat (§5.3.2.2), carbonaat (§5.3.2.6) en lage pH-oplossingen (§5.3.2.5.1). De omgeving van de bergingssite is geen agressief milieu voor cementmatrices voor wat chloride- en sulfaatconcentraties betreft (§5.3.2.1 en §5.3.2.2), en carbonatatie wordt vrijwel vermeden door ingegraven omstandigheden op te leggen. Echter kan, door de eventuele oxidatie van pyriet die aanwezig zou kunnen zijn in de klei van de aarden afdekking, zwavelzuur vrijgesteld worden (zie ook §5.2.1.4). De impact van lage pH-poriënwateroplossingen op kunstmatige betonnen barrières is gerelateerd aan volgende processen:

- Lage pH-oplossingen versnellen het oplossen van portlandiet en andere mineralen.
- Sulfaat kan beton degraderen als gevolg van ettringiet- en thaumasietvorming, i.e. zogenaamde sulfaataantasting van beton (zie §5.3.2.2).

Om versnelde degradatie van beton te vermijden, worden geochemische eisen aan het materiaal opgelegd, zoals bijvoorbeeld voor de infiltratiebarrière [HS-8, Bijlage 1]. Zo zal een sulfaatarme klei worden gebruikt met een totaal zwavelgehalte van minder dan 1,2 gewichtsprocent (§5.3.2.2.1). Bij de aanleg van

de andere lagen worden inerte materialen gebruikt. Tevens zal voor het beton van de ondoorlatende topplaat en vlotplaten een cementtype gebruikt worden dat beter resistent is tegen zwavelzuuraantasting dan klassiek Portlandcement.

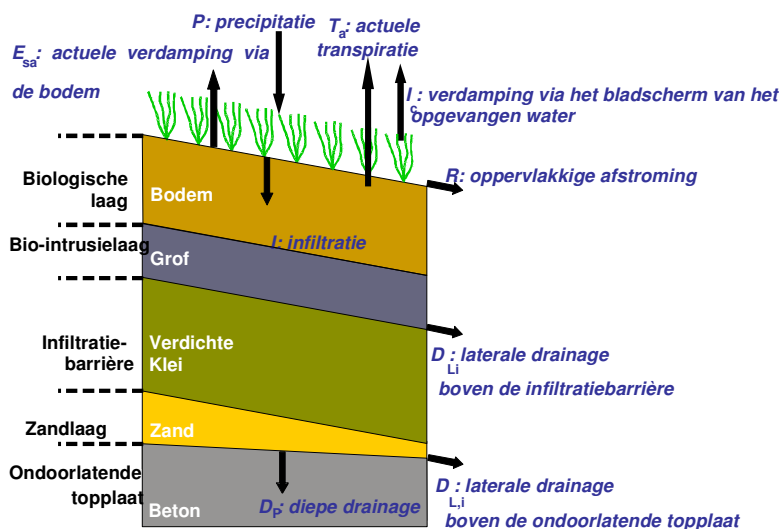
De (eventuele) degradatieprocessen worden ook gevolgd in de proefafdekking om gegevens aan te leveren voor meer gedetailleerde evaluaties en eventueel bijkomende eisen op te leggen betreffende de aarden afdekking [HS-8; §8.5.7]. Hiertoe worden in speciaal hiervoor voorziene nissen binnenin de proefafdekking het CO₂- en O₂-gehalte gemeten. Verder wordt instrumentatie voorzien (TDR, RH en temperatuur) in de ondoorlatende topplaat en in de structurele topplaat om mogelijke degradatiefenomenen op te volgen. De normen NBN EN 206-1:2001 [R5-3] en NBN B15-001:2004 [R5-4] delen grondwater op in verschillende agressiviteitsklassen in functie van bovenstaande bestanddelen (behalve chloriden). De analyseresultaten van het gecollecteerde, insijpelende water zullen worden vergeleken met deze klassen.

De minimum dikte nodig om te vermijden dat de kleilaag en de onderliggende betonnen componenten aan vorst worden blootgesteld, bedraagt ongeveer 0,5 m [HS-4, §4.4.2.5].

5.2.1.4 Waterinsijpeling in en doorheen de afdekking

Het conceptuele model van de waterinsijpeling in en doorheen de afdekking wordt weergegeven in Figuur 5-2 [OD-065, §3.1].

- Infiltratie (I) van neerslag op de aarden afdekking (P) wordt in eerste instantie beperkt door evapotranspiratieprocessen. Deze omvatten:
 - ▶ Verdamping van water vanaf het bodemoppervlak (E_{sa}).
 - ▶ Transpiratie door planten, waarbij wortels water uit de bodem halen en de huidmondjes dit vrijgeven aan de atmosfeer (T_a).
 - ▶ Verdamping van water dat opgevangen werd door het plantenscherm (I_c).



Figuur 5-2: Conceptueel model van de waterbalanscomponenten in de verschillende eenheden van de aarden afdekking. Merk op dat noch de ruimtelijke afmetingen of de grootte van de waterstromen op schaal zijn [OD-065, §3.1].

- Het proces van evapotranspiratie is een eerste proces om waterinsijpeling in het bergingssysteem te beperken. De hoeveelheid evapotranspiratie is, naast het klimaat, afhankelijk van de gebruikte bodemmateriële en het vegetatietype.
 - ▶ Een silt-leembodem (A) vertoont bijvoorbeeld 20% meer evapotranspiratie dan zandbodems (Z): als referentiebodem voor de afdekking werd een licht zandige leemgrond (P) gekozen met een gemiddelde evapotranspiratie die zich tussen A en Z-type bodems bevindt.
 - ▶ Er is voor een grasvegetatie gekozen (referentieprofiel voor de afdekking): Zulke vegetatie vermindert de erosiegevoeligheid en bevordert evapotranspiratie en heeft aldus een positieve invloed op de stabiliteit en dus op de “ingegraven omstandigheden” van de bergingsinstallatie.
- Ook oppervlakkige afstroming (R) zal de totale infiltratie verminderen. Oppervlakkige afstroming is afhankelijk van de regenintensiteit, de infiltratiecapaciteit van de bodem (die afhankelijk is van het watergehalte) en de eigenschappen van het bodemoppervlak (helling, oppervlakteruwheid). Voor een afdekking tracht men R (of toch ten minste hoge watersnelheden) te vermijden (aanwezigheid vegetatie, hoge waterinfiltratie, beperkte helling) vermits dit aanleiding kan geven tot verhoogde erosie.
- De neerslag vermindert met de evapotranspiratie en de oppervlakkige afstroming levert de effectieve infiltratie (I) op.
- Een deel van het water dat de bovenkant van de infiltratiebarrière bereikt, wordt zijdelings afgevoerd in de bio-intrusie laag (D_{Li}). De hoeveelheid laterale drainage is afhankelijk van het contrast van de hydraulische eigenschappen van de gecompacteerdde klei in de infiltratiebarrière en van de bio-intrusie laag, en van de helling van de bovengrens van de gecompacteerdde klei.

- Een deel van het water dat de bovenkant van de ondoorlatende topplaat bereikt, wordt afgevoerd doorheen de drainerende zandlaag (D_{Li}). De hoeveelheid laterale drainage is afhankelijk van de hydraulische eigenschappen van de ondoorlatende topplaat (en in mindere mate van de zandlaag) en van zijn helling die 1,5% bedraagt (zie ook §5.5.1.2.1).
- De resulterende “diepe drainage” is dus slechts een fractie van de initiële neerslag op de afdekking.

De invulling van de veiligheidsfunctie R2a van de aarden afdekking werd conservatief geschat in [OD-065, §4]. In deze simulaties werd het referentieprofiel [HS-8; §8.5.7.4] conservatief voorgesteld waarbij de bijdrage van de geosynthetische laag in de infiltratiebarrière niet wordt beschouwd. De volgende conclusies worden getrokken in [OD-065, §9]:

- De conservatieve numerieke simulaties met algemene hydraulische parameters van de verschillende materialen in de aarden afdekking leiden tot een afvoer naar de ondoorlatende topplaat van ongeveer
 - ▶ 60 mm/a wanneer de effectieve verzadigde hydraulische geleidbaarheid van de klei 10^{-9} m/s bedraagt en
 - ▶ 6,3 mm/a wanneer de effectieve verzadigde hydraulische geleidbaarheid van de klei 10^{-10} m/s bedraagt.

Het is mogelijk om zulke afdichtende barrières (met hydraulische geleidbaarheid $< 10^{-9}$ m/s) aan te brengen, en dit zelfs op oppervlakken met een grote helling (40%). Ook de Europese richtlijnen betreffende de implementatie van stortplaatsen verplichten het aanbrengen van een kleibarrière van minstens 1 m voor huishoudelijk afval en van minstens 5 m voor gevaarlijk afval met een hydraulische geleidbaarheid kleiner dan 10^{-9} m/s. Deze Europese richtlijnen werden overgenomen in VLAREM II (Art. 5.2.4.3.3 §4) [R5-5]. Beschikbare veldgegevens tonen aan dat dit doorlatendheids criterium doorgaans bereikt wordt indien de condities van ‘proctor optimum’¹ (zie lager) worden gerespecteerd. Historische toepassingsvoorbeelden tonen aan dat hydraulische geleidbaarheden tussen 4×10^{-10} m/s en 2×10^{-12} m/s haalbaar zijn [R5-6]. In de proefafdekking van ANDRA in het ‘Centre de l’Aube’ worden waterfluxen gemeten tussen $1,6 \times 10^{-12}$ m/s en 4×10^{-11} m/s voor een kleilaag van respectievelijk 1,5 m en 0,6 m dikte [R5-7]. Deze proefafdekking van ANDRA op het ‘Centre de l’Aube’ toont aan dat een infiltratiebarrière met een lage effectieve verzadigde hydraulische geleidbaarheid kan worden gebouwd met een waterinsijpeling door de kleilaag van 1 mm/a of minder. Om dergelijke waarden te bewerkstelligen dient het watergehalte van de klei aangepast te worden alvorens te verdichten. Dit kan, indien nodig, door mengen of infrezen van de laag tot een watergehalte bekomen wordt dat het proctor optimum benadert², dus waarbij het materiaal voldoende plastisch wordt. Het verdichten wordt met een wals uitgevoerd die voorzien wordt van zogenaamde ‘schapenpoten’.

¹ Een Proctor-compactietest is een experimentele laboratoriummethode om het optimale vochtgehalte te bepalen waarbij een grondmonster zijn maximale schijnbare droge dichtheid bereikt.

² Uit ervaring blijkt dat met een watergehalte van 1 à 7 % boven de proctor optimum, de beste verdichting wordt bekomen.

5.2.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen; compatibiliteit en levensduur

5.2.2.1 Graduele degradatiemechanismen van de aarden afdekking

Geen enkele van de hieronder opgesomde processen zal vóór het einde van de nucleaire reglementaire controlefase een blijvende degradatie van de aarden afdekking teweegbrengen. Tijdens deze periode zal immers actief onderhoud en remediëring worden verricht aan de afdekking. Na 350 jaar kan men echter niet meer vertrouwen op controlemaatregelen. Hierdoor kunnen volgende processen de integriteit van de aarden afdekking beïnvloeden [R5-113]:

- Erosie door water en wind;
- Scheurvorming in de klei veroorzaakt door uitdroging;
- Fysische aantasting van de bodem;
- Verstoring door vegetatie en wortelpenetratie (perturbatie door flora);
- Verstoring door bodemorganismen en grotere dieren (perturbatie door fauna);
- Het algemene proces van bodemvorming waardoor de initiële eigenschappen ervan zullen evolueren.

Desondanks zal de aarden afdekking geheel of gedeeltelijk haar rol blijven vervullen tot minstens 1 000 jaar na plaatsing.

De tekst hieronder gaat meer in detail over de aangehaalde degradatiemechanismen en de conclusies van de onderliggende studie [R5-113].

5.2.2.1.1 Regen- en winderosie

Erosie van de bodem kan worden veroorzaakt door water (bijvoorbeeld regenval en afvoer van regenwater) en/of wind (bijvoorbeeld verspreiding van deeltjes). Studies uitgevoerd voor de US Nuclear Regulatory Commission (NRC) tonen aan dat de effecten van wind- en watererosie kunnen worden getemperd door een afdekking van voldoende dikte te voorzien [R5-180, R5-181, R5-182]. Daarom werden de richtlijnen die in aanmerking konden worden genomen op basis van het ontwerp van de afdekking, toegepast om de stabiliteit van de afdekking te garanderen over een periode van ongeveer 1 000 jaar³ [R5-180]. In het huidige en mogelijke toekomstige klimaat kan men al zeker stellen dat watererosie als veel belangrijker kan worden beschouwd dan winderosie waar een permanente aanwezigheid van vegetatie wordt beschouwd [OD-065; §3.3.1].

Zolang de aarden afdekking begroeid is, en dat is minstens gedurende de nucleaire reglementaire controlefase, wordt de gemiddelde erosiesnelheid van de aarden afdekking geschat op 2,5 tot 5×10^{-3} cm/a. De erosiesnelheid kan iets hoger liggen in een toekomstig warm klimaat dat gekenmerkt wordt door frequentere hevige regenbuien. In deze omstandigheden wordt verwacht dat de erosiesnelheid in ieder geval gemiddeld kleiner blijft dan 10^{-2} cm/a [OD-65; §5.1.4].

Verwacht wordt dat de impact van intense neerslag op de aarden afdekking beperkt blijft als gevolg van een begroeide oppervlakte, de zachte helling van de bovenzijde en de relatief hoge infiltratiecapaciteit van

³ Naast bijlage D van [R5-180] betreffende de richtlijnen voor de aanleg van de bio-intrusielaag werd de toepasbaarheid van bijlage A (bodems) ook bekeken. Deze richtlijnen kwamen echter niet in aanmerking wegens de helling van de ophoging aan de zijdes.

de zandige ondergrond. Op basis van modelberekeningen zal lokale erosie (bijvoorbeeld geulvorming) beperkt blijven, omdat de afdekking zodanig ontworpen is dat geulvorming zal worden getemperd [OD-158 appendix 1 §4, R5-191]. Ten eerste is de hellingsgraad van de afdekking op de modules slechts 5% waardoor op dit deel weinig tot geen *sheetflow* zal optreden die zich zou kunnen kanaliseren en tot geulvorming leiden. Verder wordt de bodemlaag (toplaag) samengesteld om optimale condities te creëren voor plantengroei en meer bepaald voor grassen. Bij optreden van lokale erosie wordt verwacht dat alleen de bovenste biologische laag ter hoogte van de zijhelling van de ophoging weg erodeert. De maximale toelaatbare afstromingssnelheid op de zijhelling alvorens geulvorming kan optreden, werd bepaald op basis van de NRC-methode [R5-183] en bedraagt 0,61 m/s met een Bermudagrass bedekking en een gemakkelijk erodeerbare bodem. Deze snelheid komt overeen met een regenintensiteit van $5,16 \times 10^{-5}$ m/s (gedurende 10 minuten) die een retourperiode heeft van bijna 1500 jaar (op basis van de IDF-curve voor Ukkel [R5-192]). Indien toch geulvorming optreedt, wordt de ontwikkeling ervan verhinderd door de bio-intrusielaag die voor een deel uit grote gesteentefragmenten bestaat. Water-geïnduceerde erosie zal niet in staat zijn om deze laag te doen afkalven [R5-191].

Bij gehele of gedeeltelijke afwezigheid van vegetatie op de tumulus, veroorzaakt door aanhoudende droogte of brand, wordt verwacht dat de erosiesnelheid beduidend hoger zal liggen, waarbij een gemiddelde erosiesnelheid van minder dan 1 centimeter per jaar wordt vooropgesteld [OD-065, §3.3.1.1]. Een dergelijk situatie kan zich enkel voordoen na de nucleaire reglementaire controlefase, maar wordt ook dan als onwaarschijnlijk beschouwd onder het huidige en het toekomstige verwachte klimaat. Zelfs indien de vegetatie wordt verwijderd als gevolg van een gebeurtenis, zoals een brand, zal deze zich opnieuw snel herstellen [R5-214].

De gevoeligheid van de afdekking voor erosie verschilt aanzienlijk voor de verschillende lagen die zouden worden blootgesteld. Onder het huidige klimaat wordt verwacht dat de zandlagen, indien blootgesteld, gevoeliger zijn voor erosie dan de kleilaag vanwege de sterke cohesie tussen de deeltjes van deze laatste. De aanwezigheid van gebroken gesteentefragmenten in de bio-intrusielaag zal de erosiegevoeligheid van deze laag sterk verminderen. Hierbij speelt de dikte minder een rol⁴ dan wel de afmetingen van de grootste keien (bepaald door D_{50} of de mediane diameter), de korrelverdeling en de stapeling ervan. Er werd speciale aandacht gegeven aan de granulometrie van deze laag zodat de stabiliteit van de afdekking gedurende een periode van tenminste 1000 jaar gewaarborgd blijft [R5 – 180, bijlage D].

Bij zeer hevige regenval kan op de steilere delen van de afdekking geulvorming optreden. Deze zal beperkt blijven tot de biologische laag, omdat ook in het steilere deel van de afdekking de bio-intrusielaag voorzien is. Voor een terugkeerperiode van 350 jaar van de “*Probable Maximum Precipitation*”-intensiteit, kan geulerosie vermeden worden op de zijflanken indien een mediaan diameter (D_{50}) van 28 mm voor het materiaal van de bio-intrusielaag gebruikt wordt. Het grove deel van de bio-intrusielaag (laag 2a in Figuur 5-1) zal worden opgebouwd uit gebroken materiaal met een D_{50} van 45 tot 55 mm (fractie 0/120), welke voldoet voor een terugkeerperiode van 1225 jaar rekening houdend met een klimaatsverandering [HS-8, §8.5.7.2 DR9.e; R5-191], waardoor deze laag als erosieresistent kan worden beschouwd. Bijkomend werd een extra filterlaag aan het ontwerp toegevoegd, bestaande uit 25 cm

⁴ De dikte van de laag bestaande uit gebroken gesteentefragmenten is beduidend dikker dan wat minimaal aanbevolen wordt door het NRC.

gebroken stenen met afmetingen 6,3/63 die aan de basis van laag 2a wordt aangelegd, en dit om te vermijden dat de stenen in de infiltratiebarrière zouden worden geduwd (zie Figuur 5-1). Verder werd het ontwerp stabiel gemaakt door de voet van de helling te versterken. Op basis van ontwerpregels (§6, appendix D van [R5-180]) werden de minimale D_{50} , dikte en lengte voor de voet van de helling bepaald. Deze zal worden opgebouwd uit stenen met een $D_{50} \geq 100$ mm met een hoogte van minimaal 30 cm (zie figuur 3 in [R5-191]).

Een beperkte helling van de aarden afdekking, de aanwezigheid van vegetatie en de weloverwogen granulometrie van de bio-intrusie laag zijn voorzien om dit degradatieproces te beperken.

5.2.2.1.2 Fysische aantasting van de bodem

Uit de hieronder beschreven fenomenen van fysische aantasting mag duidelijk zijn dat enkel de oppervlakkige lagen, in het geval van de afdekking is dit dus de biologische laag, hieraan onderhevig kunnen zijn. De dieperliggende lagen van de afdekking zullen geen fysische aantasting ondervinden en worden bij deze bespreking niet verder beschouwd. Waar het voorgaande deel (§5.2.2.1.1) “afspoeling” behandelt, wordt in dit deel “massatransport” besproken. Bij massatransport wordt een beweging geïnduceerd zonder transporterend agens en wordt het fenomeen onder de noemer hellingprocessen gecatalogeerd. Op basis van het materiaal van de afdekking, haar helling en geometrie worden van alle hellingprocessen enkel afschuiving (*landslides*) en kruip (*creep*) in beschouwing genomen. Fysische aantasting van de afdekking kan plaatsvinden indien er zich een afschuiving voordoet ten gevolge van gravitatiekrachten. Dit kan ‘snel’ geschieden (enkele uren of dagen voor afschuiven) of op termijnen van ettelijke decennia (kruip; [R5-184]). Hellingprocessen zullen gemakkelijker plaatsvinden bij steilere dan bij zachtere hellingen. Wil een deeltje in beweging komen, dan moeten de wrijving ten opzichte van de ondergrond en de inwendige wrijving worden overwonnen. Deze wrijving is functie van het materiaal en neemt af naarmate meer water aanwezig is of de helling steiler.

Op de top van de tumulus, met een hellingsgraad van 5%, zal geen van deze fenomenen optreden omdat de helling te zwak is. Het steilere deel van de afdekking met een helling van 1 op 3 (of ongeveer 18°) zal meer effect ondervinden van gravitatiekrachten. Het is echter onmogelijk om de snelheid en de grootte van het massatransport erop te berekenen. Op fenomenologie gebaseerde modellen zijn voornamelijk toegepast op bodems opgebouwd uit zachte klei [R5 -185], maar klei komt niet voor in de zijhelling. Bijkomende argumenten die het effect van massatransport zullen beperken zijn het feit dat het huidige en toekomstige klimaat geen aanleiding zullen geven tot doorgedreven vries-dooi-cycli, dat de voorziene bodemsamenstelling voornamelijk zandig van aard is en dat vegetatie een stabiliserende werking heeft op bodembewegingen [OD-77 en OD-158]. Ook het volledig dichtslibben (*clogging*) van de drainagelaag boven de ondoorlatende topplaat wordt onwaarschijnlijk geacht. Immers zouden de aanwezigheid van geotextielen en het opleggen van filtercriteria (dit betreft de onderlinge afstemming van de granulometrie van het zand en de klei: voorbeelden van dergelijke criteria staan beschreven in EPA/600/R-02/099) massatransport naar de drainagelaag moeten beperken [HS-8, §8.5.7.2 DR10]. Zelfs bij degradatie van de geotextielen verwachten we een afdoende drainage omdat meerdere mogelijke niet-dichtgeslibde stromingspaden worden verwacht. Bijgevolg is er geen verhoogd risico op kruip of afschuiven.

5.2.2.1.3 Perturbatie door flora

De afdekking kan verstoord worden door wortelgroei en vervolgens door het omwaaien of rooien van de bomen.

Tijdens de nucleaire reglementaire controlefase zal een actief onderhoud worden voorzien van het plantendek (vaste grasmat) op de aarden afdekking. In het geval dat dit actief onderhoud zou komen stil te vallen, wordt verwacht dat een (semi)natuurlijke vegetatie uit de omgeving, grasland of boom- of bosvegetatie tot ontwikkeling zal komen. De belangrijkste wijzigingen in de aarden afdekking als gevolg van penetratie door wortels, zullen een toename van de macroporositeit en een verandering in de structuur van de afdekking zijn.

Boomwortels komen het meest courant voor tot ongeveer 1 tot 1,5 m diepte [R5-186]. Een vuistregel is dat volgroeide bomen met een echte kruin ongeveer 90% van hun wortels ontwikkelen in de bovenste 2,5 m. De worteldiepte van bomen en planten is echter afhankelijk van diverse factoren zoals:

- De ondergrond: hoe ‘zwaarder’ deze is hoe minder diep de beworteling;
- De soort: sommige soorten zijn oppervlaktewortelaars (bv. beuk), andere ontwikkelen een iets diepere penwortel (bv. zomereik)
- De grondwatertafel: hoe hoger deze staat, hoe minder diep de boom moet wortelen om aan een watervoerende laag te geraken.

In een onnatuurlijke omgeving waarbij de vochtregulatie afwijkend is (geen watertafel binnen bereik) en er bovendien een onnatuurlijk bodemprofiel voorkomt door een opeenvolging van artificiële lagen, kan er op een zandige ondergrond vanuit gegaan worden dat enkel zeer droogteresistente soorten zich kunnen ontwikkelen of handhaven. Klimaatwijziging gaat dit effect enkel maar versterken. Monitoring van de bossen van Europa heeft de effecten van klimaatwijziging op vitaliteit kunnen vaststellen [R5-187]. De boomsoorten die zich hier met grote waarschijnlijkheid kunnen vestigen door kieming vanuit zaad dat aangewaaid wordt, zijn pioniersoorten zoals berk en grove den. De verwachting is dat de bomen zich in die omstandigheden kunnen vestigen, maar dat de omstandigheden niet van dien aard zijn dat ze zich naar vol vermogen zullen kunnen ontwikkelen omwille van de droogtestress. Er zal hier eerder sprake zijn van dwerggroei. Typische heesters zoals struikheide of gewone brem maken meer kans om in deze omstandigheden goed te kunnen gedijen. Beworteling zal dus grotendeels beperkt blijven tot de biologische laag, en het is dan ook onwaarschijnlijk dat wortels de gecompacteerd kleilaag van de infiltratiebarrière zullen beschadigen, daar deze extra wordt beschermd door de ongeveer 1,5 m dikke bio-intrusie laag.

In het geval er zich toch een spontane verbossing op de afdekking zou ontwikkelen, dan zijn dergelijke bosbestanden zodanig stabiel dat ze in ieder geval al minder gevoelig zijn voor windval. Indien toch windval zou optreden, kan de depressie veroorzaakt door de omgevallen bomen (of boomontworteling), geulvorming initiëren [R5-188]. Zelfs indien er geen geulvorming optreedt, zal de kuil en hobbel microtopografie gedurende honderden jaren aanwezig blijven na de ontworteling. Observaties op beboste hellingen tonen aan dat de magnitude van sedimenttransport veroorzaakt door windval van bomen, tussen 1,5 en 2 mm/a, vergelijkbaar is met die van bodemkruip [R5-189, R5-190].

5.2.2.1.4 Perturbatie door fauna

Perturbatie door fauna, bijvoorbeeld verstoring door bodemorganismen of gravende dieren, komt alleen voor in de biologische laag. De infiltratiebarrière wordt beschermd tegen gravende dieren door de bio-intrusielaag, die het binnendringen van dieren afremt. De bio-intrusiecapaciteit van deze laag wordt bepaald door de dikte van de laag en door de afmetingen van de hoekige gesteentefragmenten (D50).

De belangrijkste effecten van verstoring door fauna zijn de verhoging van de porositeit, het mengen van bodemcomponenten en het wijzigen van de bodemstructuur (voornamelijk door regenwormen), die de erosiegevoeligheid van de bovenste grondlaag kan verminderen. Perturbatie door fauna kan ook het waterhoudende vermogen van de bodem vergroten, een positief effect aangezien daardoor het risico op oppervlakkige afstroming en erosie vermindert.

Perturbatie door dieren wordt niet beschouwd gedurende de nucleaire reglementaire controlefase en tot 1 000 jaar na plaatsen van de aarden afdekking. Het is immers zo dat de bio-intrusielaag minstens 1 000 jaar haar functie zal blijven vervullen.

5.2.2.1.5 Bodenvorming

Afhankelijk van de samenstelling van de biologische laag (laag 1 in Figuur 5-1) kunnen er zich twee bodenvormende processen voordoen op langere termijn. Een eerste is uitloging en migratie van organometallische complexen (podzol-vorming), een tweede is uitloging en migratie van klei (luvisol-vorming). Bij een textuur waarbij het silt- en kleigehalte minder dan ongeveer 20 massa% bedraagt, en indien er zeer weinig verweerbare mineralen voorkomen, zal onder de uitlogingshorizont een organischrijke Bh-horizont gevormd worden (Podzol). In het andere geval zal er een kleiige Bt-aanrijkingshorizont gevormd worden (Luvisol). Bovendien kan er in beide gevallen sprake zijn van de vorming van een ijzerpan, indien voldoende ijzer aanwezig is in het moedermateriaal.

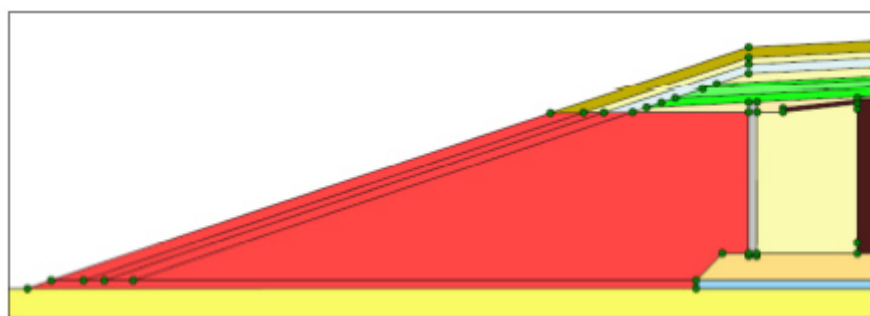
De aanrijkingshorizonten, meestal enkele dm diep en al dan niet met geassocieerde ijzerpan, zijn gekenmerkt door een vrij lage permeabiliteit en kunnen dus een hydraulische barrière vormen. Dit kan leiden tot een verminderde doorlaatbaarheid, wat uiteindelijk kan zorgen voor verzadigde condities tijdens hevige regenbuien in de bodemlagen boven deze aanrijkingshorizonten, en dus beschikbaar water voor oppervlakkige afstroming en erosie. De uitlogingshorizonten erboven verliezen meestal hun cohesie, zodat hun erodeerbaarheid verhoogt. Nochtans blijft het risico op erosie ten gevolge van bodenvorming gering zolang er vegetatie aanwezig is. Hierbij moet opgemerkt worden dat de vorming van significante inspoelingslagen (Bh of Bt, afhankelijk van moedermateriaal) minstens enkele honderden jaren, en eerder een duizendtal jaar (of zelfs meer) in beslag neemt.

Momenteel voorziet men voor de biologische laag een samenstelling bestaande uit een zand/silt/klei verhouding van 67/28/5. Telkens is er sprake van een maximale grindbijmenging van 10 vol%. De vegetatie zal bestaan uit gras. Als bodem zal dus eerder een Luvisol gevormd worden in plaats van de typische streekgebonden Podzol [OD-065 §6.2.1.3; HS-8, §8.5.7.2 DR9.e].

Bodenvorming kan de waterinsijpeling en watercompositie zowel positief als negatief beïnvloeden. Bodenvorming is echter een zeer langdurig proces en eventuele effecten worden niet verwacht binnen 1 000 jaar na plaatsen van de aarden afdekking.

5.2.2.2 Seismische belasting van de aarden afdekking

Om het gedrag van de aarden afdekking onder seismische belasting te begrijpen, werd de intrinsieke en globale stabiliteit van de aarden afdekking geëvalueerd [§3 van R5-8, HS-8, §8.5.7.3]. De beschouwde aardbeving in de verwachte evolutie van de afdekking heeft een terugkeerperiode van 1 225 jaar. Het model is zo opgebouwd dat zowel de stabiliteit van de volledige ophoging (aarden afdekking boven modules + zijflanken) als enkel de aarden afdekking boven de modules kan worden bestudeerd. Voor de bepaling van de intrinsieke stabiliteit wordt het rode gedeelte in Figuur 5-3 beschouwd als lineair elastisch. Er kan zich bijgevolg alleen schade voordoen in de andere delen van de afdekking, dit is het gedeelte dat zich boven de modules bevindt.



Figuur 5-3: Bodemlagen (rood) die voor de analyse van de intrinsieke stabiliteit een lineair elastisch gedrag vertonen.

Bij de evaluatie werd rekening gehouden met enerzijds een intacte aarden afdekking en anderzijds een configuratie zonder biologische laag, wat omhullend is voor de mogelijke gevolgen van erosie. Veiligheidsfactoren werden aan de hand van een pseudo-statische methode bepaald, met behulp van PLAXIS-software, conform de benadering beschreven in §8.5.7.3 van [HS-8]. Voor een aardbeving met een terugkeerperiode van 1225 jaar ($PGA = 0,09$ g), zijn de berekende veiligheidsfactoren groter dan 1,1, wat de stabiliteit bij dergelijke aardbevingen garandeert [OD-158 appendix 1 §4]. Op basis hiervan verwachten we in de eerste 1 000 jaar geen degradatie van de aarden afdekking vanwege seismische belasting en dus ook geen invloed op erosieprocessen.

5.2.2.3 Compatibiliteit en levensduur

Deze paragraaf geeft een inschatting van de langetermijnse evolutie van de componenten van de aarden afdekking en ondersteunt de langetermijnveiligheidsevaluatie besproken in [HS-14].

Gedurende de nucleaire reglementaire controlefase (fase III)

Tijdens de nucleaire reglementaire controlefase wordt aangenomen dat degradatieprocessen de doeltreffendheid van de aarden afdekking niet zullen beïnvloeden. De aarden afdekking zal efficiënt bijdragen aan insluiting en afzondering via de langetermijnveiligheidsfuncties R2a (beperken van watersinsijpeling tot bij het afval, [HS-2, §2.8.4.1]) en I1 (beperken van de waarschijnlijkheid en gevolgen van onopzettelijke menselijke intrusie, [HS-2 §2.8.4.6]).

- In het ontwerp werd rekening gehouden met een voldoende dikke aarden afdekking, een beperkte helling en de aanwezigheid van vegetatie, en een weloverwogen granulometrie van de bio-intrusielaaag om degradatieprocessen, zoals bodemerosie, te beperken.
- Inspectie en onderhoud (bijvoorbeeld verwijderen van invasieve planten) van de afdekking zullen worden uitgevoerd om een adequate doeltreffendheid ervan te waarborgen [HS-11; §11.2.2]. Potentiële schade aan de afdekking tijdens deze fase zal worden hersteld.

Na de nucleaire reglementaire controlefase tot duizend jaar (fase IV)

Na de nucleaire reglementaire controlefase kan de aarden afdekking onderhevig zijn aan degradatie. Er wordt verwacht dat de afdekking haar functie zal blijven vervullen tot minstens 1 000 jaar na constructie:

- Verzekeren van ingegraven omstandigheden;
- De betonnen constructies beschermen (voornamelijk de ondoorlatende topplaat en de modules) tegen vries/dooi- en droog-nat-cycli;
- Waterinsijpeling beperken door middel van evapotranspiratie, omdat verwacht wordt dat vegetatie aanwezig zal blijven of zich snel zal herstellen (bijdrage aan veiligheidsfunctie R2a);
- Waterinsijpeling beperken omdat de infiltratiebarrière in de periode van 1 000 jaar een bijdrage zal leveren tot de veiligheidsfunctie R2a;
- De afdekking in zijn geheel speelt ook na 350 jaar een cruciale rol in het vermijden van contact tussen het afval en de biosfeer en draagt dus bij tot afzondering (veiligheidsfunctie I1).

Toch kunnen afwijkingen niet formeel worden uitgesloten, al is de waarschijnlijkheid laag aangezien er meer dan 4 meter van de aarden afdekking door erosie zou moeten worden verwijderd om de omstandigheden lokaal te laten evolueren van ingegraven naar atmosferisch aan het oppervlak van de modules en/of topplaat. Door lokale erosie van de afdekking zouden de ondoorlatende topplaat en enkele modules kunnen worden blootgesteld aan atmosferische omstandigheden, en dit enkele honderden jaren na de nucleaire reglementaire controlefase.

Colloïden kunnen hypothetisch ontstaan in de klei van de infiltratiebarrière als gevolg van vertering van kleimineralen in de afdekking. Indien condities met lage ionische sterkte ontstaan, bijvoorbeeld door verdunning van het insijpelende (regen)water en lage concentratie aan divalente kationen, kunnen deze colloïddeeltjes ook stabiel zijn in deze omgeving. Het kan ook niet worden uitgesloten dat de mogelijke aanwezigheid van organische verbindingen deze colloïden kunnen stabiliseren [R5-172]. Deze eventuele, stabiele colloïden hebben geen direct effect op de sorptiecapaciteit van het bergingssysteem door de afwezigheid van radionucliden in de aarden afdekking, maar ze zullen wel getransporteerd worden naar de modules, caissons en eventueel het afval, waar ze wel in rekening moeten worden gebracht (§5.3.2.13).

Vanaf 1 000 jaar:

Vanwege de talrijke mogelijke gebeurtenissen (en hun interactie) die kunnen plaatsvinden en de bestaande heterogeniteiten, zal de aarden afdekking op zeer lange termijn naar verwachting op een niet-lineaire manier evolueren. Bijgevolg zouden meerdere evolutietrajecten van het systeem even aannemelijk zijn en tot vele mogelijke scenario's leiden. Belangrijk daarbij is dat we geen abrupt verlies van fysische eigenschappen verwachten – er kan geen proces of gebeurtenis worden geïdentificeerd die

aanleiding geeft tot een plotse, grootschalige verdwijning van de aarden afdekking en dus zou resulteren in een plotse, grootschalige blootlegging van de ondoorlatende topplaat en de modules.

Het feit dat de ophoging aan de flanken van de afdekking meer voor erosie vatbaar is dan het gedeelte van de afdekking bovenop de modules met een lichtere helling, maakt dat het bovenste gedeelte van de modulewanden en de ondoorlatende topplaat waarschijnlijk de eerste componenten zijn die lokaal blootgesteld kunnen worden aan atmosferische omstandigheden.

Niet verwacht, maar wel mogelijk, is de versnelde en verhoogde erosie door externe gebeurtenissen die krachtig genoeg zijn om de bio-intrusielaag aan te tasten, bijvoorbeeld door een aardbeving groter dan de aardbeving beschouwd in de verwachte evolutie (terugkeerperiode 1 225 jaar). In het geval dat de biologische laag sterk geërodeerd is (na 350 jaar kan niet langer gegarandeerd worden dat deze haar functie nog volledig kan vervullen, zie hoger) tonen stabiliteitsberekeningen voor een aardbeving met een terugkeerperiode van 8 575 jaar falen van de bio-intrusielaag, ter hoogte van de overgang naar de zijflanken van de afdekking [OD-158 appendix 1 §4]. Voor een aardbeving met een terugkeerperiode van 20 000 jaar, duiden stabiliteitsberekeningen op het falen van de stabiliteit resulterend in verplaatsingen. Afschuiving in het steile gedeelte van de afdekking kan aanleiding geven tot een vervroegde blootstelling van de modulewanden en ondoorlatende topplaat aan atmosferische carbonatatie en vries-dooi-cycli.

Ook kan de afdekking reeds vroeger gedegradieerd zijn dan wat verondersteld wordt in de verwachte evolutie (dus <1 000 jaar) door (combinatie van) processen en onverwachte gebeurtenissen die versnelde erosie kunnen teweegbrengen. Hiermee wordt rekening gehouden in de veiligheidsevaluatie.

5.2.2.4 Conclusies

Uit het voorgaande blijkt dat graduele erosieve processen in de verwachte evolutie beperkt zullen blijven tot de oppervlakkige lagen voor een periode van 1 000 jaar.

5.2.3 Resterende onzekerheden

Een proefafdekking op grote schaal (ongeveer 40 m × 60 m) en op lange termijn (ongeveer 30 jaar) [HS-16, §16.7; OD-065, §8] wordt opgezet om volgende zaken te valideren:

- De haalbaarheid om een afdekking uit meerdere lagen te realiseren;
 - ▶ het aanleggen en homogeen verdichten van de verschillende lagen;
 - ▶ de realisatie van een infiltratiebarrière met een lage effectieve permeabiliteit;
 - ▶ de verdere eisen voor het ontwerp van de finale afdekking te detailleren.
- De waterbalanscomponenten op te meten om de modellen te valideren of te verbeteren;
- Onderzoeken van langetermijnprocessen die de performantie van de aarden afdekking kunnen beïnvloeden;
- De (mechanische) stabiliteit van de aarden afdekking na te gaan door de erosie op te meten, gebruik makend van systeem- en site-specifieke parameters.

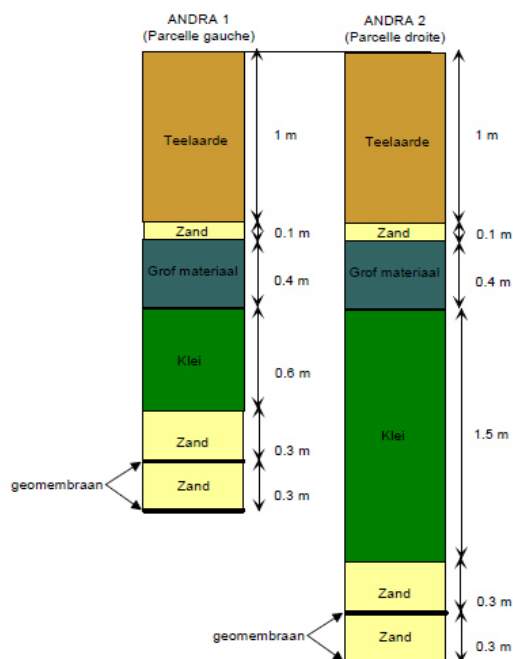
5.2.4 Performantie-indicatoren

De belangrijke parameters voor het opvolgen van de performantie van de aarden afdekking zijn de waterinsijpeling (i.e. drainage uit de infiltratiebarrière) en de fysieke duurzaamheid.

Performantie-indicatoren kunnen worden bekomen uit archeologische analogen, uit andere gelijkaardige proefopstellingen en bestaande afdekkingen [OD-065, §6.3, §6.4 en 8.4].

5.2.4.1 De waterinsijpeling

Op de oppervlaktebergingsite van ‘Centre de l’Aube’ in Frankrijk staat een proefafdekking sinds 1996. Hier worden twee verschillende multi-lagenprofielen getest (Figuur 5-4). Gemiddeld genomen werd een infiltratie doorheen de kleilaag geobserveerd tussen 1,28 mm/a en 0,05 mm/a voor respectievelijk het ANDRA 1 en ANDRA 2 profiel. De performantie van de kleilaag is verzekerd voor een relatief lange periode dankzij de dikte van de bovenliggende lagen van 1,5 m en een dikte van de klei van minstens 0,6 m.



Figuur 5-4: De twee profielen van de testafdekking in ‘Centre de l’Aube’ (ANDRA). De dikte van het ANDRA2 profiel (360 cm in totaal), en de opeenvolging van de lagen zijn vergelijkbaar met de profielen die voorzien zijn in de proefafdekking van het cAt-project [OD-065, §8.4.2].

UMTRAP (*Uranium Mill Tailings Remedial Action Program*) is de installatie voor radiumhoudend afval op de site van UMICORE te Olen. De aarden afdekking werd in 1986 geplaatst en is bijna 2,5 m dik aan de top. Ze bestaat van basis naar top uit een 1 meter dikke kleilaag (infiltratie (water)- en emanatie (radon)-barrière), siltig zand (bescherming van de kleilaag tegen uitdroging), steenslag (bio-intrusie laag), grof zand (tussenlaag) en een grondlaag (vegetatielaag). De zijkanten van de afdekking bevatten geen vegetatielaag, maar wel een laag uit hoekige *porfier*-blokken als bescherming tegen erosie. Na 25 jaar werking is de afdekking nog steeds in goede staat, op een lokale afschuiving na, die veroorzaakt werd

door slechte hydraulische eigenschappen van het gebruikte zand gecombineerd met langdurige regenval. Een zorgvuldige selectie van de materiaalkeuze is dus cruciaal. Verder werd ook aangetoond dat het mogelijk is om een kleilaag aan te brengen met een hydraulische geleidbaarheid van slechts 10^{-10} m/s.

In Frankrijk werd in het 'Centre de la Manche' een afdekking geplaatst tussen 1991 en 1997. Deze bestaat uit een beschermingslaag (60 cm vegetatielaag en 120 cm biologische barrière) en uit een infiltratiebarrière (20 cm drainagelaag, 6 mm dik bitumen-membraan en opnieuw 20 cm drainagelaag). Het bitumen-membraan⁵ vormt een efficiënte infiltratiebarrière: de percolatie doorheen de infiltratiebarrière bedraagt tussen de 0,008 en 0,011 % van de totale regenval.

5.2.4.2 De duurzaamheid van de aarden afdekking

Archeologische analogen komen onder andere voor onder de vorm van Romeinse grafheuvels of tumuli. De tumuli in de streek van Tongeren (2e eeuw na Christus) zijn nog dikwijls in een verrassend goede staat. Een recentere grafheuvel (1876) is die van Baron Coppens te Ten Aard (Geel). De grafheuvel vertoont nog geen tekenen van degradatie, waarbij ook de metersdikke aardlaag nog ongeschonden is. Deze veelal nog intacte "bouwsels" tonen aan dat afdeksystemen die niet verstoord worden door menselijke intrusie een zeer lange levensduur kunnen hebben.

⁵ In het cAt-concept wordt geen bitumen-membraan voorzien in de aarden afdekking, wel een bentonietmat (*geosynthetic clay liner*) en een geomembraan (zie Figuur 5-1).

5.3 Klassiek gewapend beton

De algemene referentiesamenstelling voor klassiek gewapend (koolstofstaal) beton wordt vermeld in [OD-011 §3.2, Tabel 2, concrete 2] en noemt men in dit document “Beton 2”. Alle vermelde betonsoorten zijn onderworpen aan testen en proeven, maar “Beton 2” is het meest intensief bestudeerd en benoemen we daarom als “de algemene referentiesamenstelling”. In [OD-134] is schijnbaar sprake van een ander beton, maar het enige verschil is de dosering aan superplastificeerder. Deze verschillende dosering wordt geïnduceerd door meerdere randvoorwaarden zoals de technische installatie of de cementbatch. In de courante doseringen heeft een superplastificeerder enkel een invloed op de verse staat van het beton; de eigenschappen van het beton in verharde toestand worden niet gewijzigd waardoor ceteris paribus een variatie van de superplastificeerder zich dus niet vertaalt in een ander beton.

Tabel 5-1: Samenstelling van beton voor de klassiek gewapende delen (caisson en modules)

Component	Gehalte (kg/m ³)	
	Beton 1	Beton 2
GEM I 42.5 N LA HSR LH ⁽¹⁾	360	350
Kalksteenmeel	40	50
Zand 0/4 (0/2) (kalksteen)	721	686
Gebroken kalksteen 2/6	417	455
Gebroken kalksteen 6/14	200	673
Gebroken kalksteen 6/20	472	0
Water	169	165
Rheobuild 1100 conc. 30%, NS type	6,5 ^(2,3)	ca. 6,5 à 7,0 ⁽²⁾
Glenium 27 conc. 20%, PC type	5 ^(2,3)	0
Water/cement (W/C)-verhouding ⁽⁴⁾	0,47	0,47

(1): LA: Low Alkali, HSR: High sulphate resisting, LH: Low Heat.

(2): Dient aangepast te worden in functie van de omgevingsfactoren zoals temperatuur, het type installatie, ...

(3): Of de ene, of de andere superplastificeerder dient gebruikt te worden. Mengen is niet toegestaan. Sommige delen van de modules kunnen eventueel gebouwd zijn met de ene superplast, terwijl andere delen gebouwd zijn met de andere superplast.

(4): exclusief het water van de superplastificeerders en het absorptiewater van de granulaten.

Gezien de grote gelijkheid tussen “Beton 1” en “Beton 2” zijn hun eigenschappen in verharde toestand gelijkaardig. Echter, omwille van technische redenen (afmetingen, wapeningsdichtheid, dikte van de wanden) is het beton dat men vooropstelt te gebruiken voor de caissons en voor de modules niet

hetzelfde. “Beton 2” is het beton voor de caissons terwijl “Beton 1” het beton voor de modules is. De samenstellingen van deze betontypes werden hernomen in Tabel 5-1.

Rekening houdend met de technische specificaties van de uitrustingen en de processen die zullen gebruikt worden tijdens de constructie van de modules en/of caissons zullen de samenstellingen nog verder geoptimaliseerd worden (bijvoorbeeld de nodige hoeveelheid superplastificeerder hangt onder andere af van de menginstallatie en de temperatuur). De materiaaltypes zullen echter niet wijzigen.

Net zoals elke aanpassing van de inhoud van het veiligheidsrapport zullen ook wijzigingen die betrekking hebben op de betonsamenstelling van de caissons en de modules voorafgaandelijk goedgekeurd dienen te worden door de Dienst Fysische Controle en de veiligheidsautoriteit.

De *industriële doseringen* zijn de doseringen, zoals ze zullen toegepast worden in een industriële productie-installatie. Deze kunnen voor wat betreft de kalksteenkalibers verschillen van de cijfers uit bovenstaande tabel omwille van een variatie in de kalksteengranulometrie, zelfs indien steeds dezelfde steengroeve wordt aangeboord. Om te compenseren voor deze variaties worden de doseringen aan 0/4 2/6 6/14 6/20 en indien nodig kalksteenfiller aangepast teneinde een granulometrie te bekomen die zo dicht als mogelijk bij de origineel beoogde ligt. Deze aangepaste cijferwaarden definieert men in deze tekst als de *industriële doseringen*.

“Beton 2” uit Tabel 5-1 (voor de productie van de caissons), werd onderworpen aan een gevoeligheidsstudie [OD-134]. In deze studie werden variaties opgelegd aan de betonsamenstelling, exclusief de superplastificeerder, teneinde de respons in de verharde staat van het beton op te meten (Tabel 5-2). Uit dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat de onderzochte duurzaamheidsparameters van dit beton niet significant beïnvloed worden door de opgelegde variaties. Voor wat betreft een industriële omgeving vertaalt zich dit in het feit dat de toegelaten afwijking op de *industriële doseringen* deze van de algemene betonnorm EN 206-1: 2000 (Tabel 21 [R5-3]) is. De afwijkingstoleranties zijn bijgevolg gekend. **“Beton 1” en “Beton 2” zijn gelijkaardig (zie verder) qua materialen, samenstelling en bijgevolg ook eigenschappen. Hierdoor zijn de conclusies van de gevoeligheidsstudie [OD-134] overdraagbaar naar “Beton 1”.**

Tabel 5-2: Opgelegde afwijkingen tijdens gevoeligheidstudie.

Betonmengsel	Variatie
B1	Geen variatie, referentie
B2	Geen variatie, referentie
B3	Geen variatie, referentie
B4	Andere batch zand en granulaten (zelfde leverancier)
B5	Andere cementsoort (cement CEM I 42,5 N HSR LA)
B6	Water: -3%
B7	Water: +3%
B8	Water: +6%
B9	Cement: +3%
B10	Cement: -3%
B11	Cement: -6%
B12	Zand: -3%
B13	Zand: +3%
B14	Ander zandtype en andere leverancier
B15	Ander zandtype en andere steengroeve (zelfde leverancier)

5.3.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

5.3.1.1 Rol

Materialen op basis van cement zoals klassiek gewapend beton in de kunstmatige barrières in het bergingssysteem kunnen de waterstroming beperken (veiligheidsfunctie R2a) en/of kunnen radionucliden chemisch adsorberen in het bergingssysteem (veiligheidsfunctie R3) en/of kunnen de diffusie van radionucliden in een poreus medium beperken (veiligheidsfunctie R4a).

De kunstmatige barrières uit klassiek gewapend beton zijn de caissons (voor de monolieten) en de modules.

NIRAS blijft de evoluties op het gebied van betontechnologie op de voet volgen en niets sluit uit dat andere betonsamenstellingen, bij voorkeur op basis van dezelfde materialen, zullen voorgesteld worden indien deze beter presteren. In het kader van de toepassing van het optimaliseringsprincipe verwijzen we naar §2.4.2.2.2 van [HS-2].

Ondanks het feit dat "Beton 1" en "Beton 2" uit Tabel 5-1 een licht verschillend skelet hebben blijven hun eigenschappen dankzij een gelijke water tot cement factor en quasi gelijke dosering aan cement zo goed als identiek. Inderdaad, de transport- en dus de duurzaamheidseigenschappen worden voornamelijk gekarakteriseerd door de dosering aan cement, de soort cement en alsook de verhouding water tot cement [R5-45]. De (druk)sterkte van een goed gecompacteerd betonmengsel is dan weer recht evenredig met de verhouding cement tot water, uiteraard in acht nemend dat gelijke materialen gebruikt worden, zo toonden Abrams [R5-46] en Féret [R5-47] onafhankelijk van elkaar aan.

De elektrische weerstand, een belangrijke duurzaamheidsindicator, werd bestudeerd door Hughes *et al.* [R5-48] voor verschillende betonsamenstellingen, alle op basis van een CEM I. Hieruit blijkt tevens dat deze elektrische weerstand voornamelijk bepaald wordt door de water-tot-cementverhouding en ook, maar in kleinere mate, door de dosering aan cement. De eerste koppeling is eenvoudig te begrijpen, aangezien de water-tot-cementverhouding een onmiddellijk verband heeft met de porositeit van de cementpasta. De tweede link kan dan weer verklaard worden doordat bij gelijke W/C (water/cement), maar hogere dosering aan cement de elektrische weerstand van de cementpasta an sich gelijk is, maar wanneer de pasta - die een lagere elektrische weerstand heeft dan de dense granulaten - een hogere volumetrische fractie van het totale betonmengsel inneemt, het beton zelf een iets lagere elektrische weerstand zal hebben.

Verschuillende auteurs bestudeerden bovendien de invloed van significante skeletvariaties op de duurzaamheidsparameters, zoals capillaire waterabsorptie en gaspermeabiliteit. Vele onderzoeken duiden op een detecteerbare invloed van de granulaatgrootte op deze parameters zoals:

- Torrijos *et al.* [R5-49], die de invloed op de duurzaamheidsparameters bestudeerden bij een verdubbeling van de D_{max} . De resultaten (tabel 5, Torrijos, M.C. *et al.* [R5-49]) duiden op een meetbare, doch beperkte invloed op de permeabiliteit. Deze invloed bleek bovendien kleiner te zijn voor gebroken dan voor gerolde granulaten en quasi verwaarloosbaar voor kwartsietgranulaten. De auteur wijt deze beperkte invloed van dit granulaat aan een uitstekende binding tussen de cementpasta en dit soort gesteente.
- Basheer *et al.* [R5-50] onderzochten de invloed van significante skeletvariaties, alle op basis van basalt, op onder andere de permeabiliteit, vries-dooi resistentie en carbonatatie-resistentie van een beton. Ondanks het feit dat verschillen op deze parameters opgemeten worden, blijven ze klein (sit: "*However, Table 6, indicates that only moderate variations in air permeability occurred*").) en zijn ze hoofdzakelijk toe te schrijven aan een gewijzigde effectieve water tot cement factor en niet zozeer aan een directe invloed van het gewijzigde skelet.

De resultaten van Pereira *et al.* [R5-51] bevestigen deze van Basheer en Torrijos. Duidelijke, doch beperkte verschillen in gaspermeabiliteit werden opgemeten wanneer andere granulaatcurven gebruikt werden bij gebruik van graniet. De invloed van de granulaatcurve is kleiner in het geval marmergranulaten gebruikt worden en is quasi verwaarloosbaar bij gebruik van kalksteen. Dit laatste kan, net zoals geopperd door Torrijos *et al.* voor wat betreft kwartsiet, verklaard worden door een goede binding tussen de cementsteen en het granulaat zelf. Immers, het gebruik van kalksteen vertaalt zich in een betere aanhechting van het granulaat aan het gehydrateerde cement dankzij een interactie tussen portlandcementpasta en de kalksteen (Ping *et al.* [R5-52]).

Ook Dhir *et al.* [R5-53] bestudeerden het effect op de permeabiliteit van de granulaatgrootte en dienden te constateren dat de opgemeten verschillen niet significant waren, echter zolang de D_{max} kleiner of gelijk is aan 20 mm.

We merken op dat in relatie tot de verschillen opgelegd in de aangehaalde studies de granulaatcurven van "Beton 1" met een D_{max} van 20 mm en "Beton 2" met een D_{max} van 14 mm slechts beperkt verschillend zijn. Bovendien zijn beide betonnen op basis van een kalksteen. Dit gesteente blijkt minder gevoelig te zijn voor een variatie in zijn zeefcurve voor wat betreft een wijziging in permeabiliteit.

Gebaseerd op bovenstaande besluit men dat de mechanische eigenschappen van beide betonnen zeer gelijkaardig zijn alsook hun permeabiliteit en hun duurzaamheid.

Bovendien, conform de Europese Algemene Betonnorm (EN 206-1:2000 [R5-3]), die de te gebruiken betonsoorten in functie van de omgeving beschrijft, wordt zowel de samenstelling van "Beton 1" als "Beton 2" als een zogenaamde "T(0.50)" geklasseerd⁶. Hierdoor kunnen beide betonsamenstellingen conform deze norm ingezet worden in dezelfde omgeving omdat aangenomen wordt dat hun duurzaamheid (carbonatatie-resistentie, vries-dooi, sulfaat-resistentie) niet significant verschillend is.

De argumenten en conclusies die in dit document worden gepresenteerd, zijn bijgevolg van toepassing zowel voor de caissons als voor de modules uit klassiek gewapend beton.

5.3.1.2 Eigenschappen

In wat volgt worden voor het klassiek gewapend beton de eigenschappen die belangrijk zijn voor de veiligheid op lange termijn voorgesteld.

5.3.1.2.1 Hydraulische geleidbaarheid – definities en conventies

Teneinde het vervolg te begrijpen wordt in dit deel de gehanteerde betekenis voor *geleidbaarheid* en *permeabiliteit* voorgesteld:

Permeabiliteit (k) is een materiaaleigenschap die – in geval van volledige verzadiging - onafhankelijk van het fluïdum is. De eenheid van permeabiliteit is m^2 . Vaak is deze grootte voorafgegaan door de term 'intrinsieke', duidend op zijn onafhankelijkheid vis-à-vis het fluïdum.

Geleidbaarheid (K), is in functie van het getransporteerde fluïdum doorheen de materie. De eenheid van geleidbaarheid is m/s .

De relatie tussen *permeabiliteit* en *geleidbaarheid* is:

$$K = k \times (\rho \times g) / \eta$$

Met K , de geleidbaarheid [m/s];

k , de permeabiliteit [m^2];

ρ , de dichtheid van het fluïdum [kg/m^3];

g , de gravitatieveldsterkte [N/kg];

η , de dynamische viscositeit [$Pa.s$].

In geval van watertransport is de relatie tussen K en k ongeveer een factor 10^7 . Tevens spreekt men in die context, in het geval water het fluïdum is, over *hydraulische geleidbaarheid*.

De permeabiliteit van een materiaal opgemeten met een vloeistof kan verschillen van deze opgemeten met behulp van een gas. Deze discrepantie wordt verklaard door *Knutsen-diffusie*, het glijden van het fluïdum ter hoogte van de wand van de porie. Terwijl de snelheid van een vloeistof aan de wand van de porie nul is, kan deze significant verschillend van nul zijn in het geval van een gas. Dit verklaart waarom men tevens het onderscheid maakt tussen *gaspermeabiliteit* en (*vloeistof*)*permeabiliteit*.

⁶ T(0,50) is een betonsamenstelling conform tabel F.1 uit EN 206-1 en zijn Belgische aanvulling B15-001 met een maximale water-cementfactor van 0,50 en een minimaal cementgehalte van $320 kg/m^3$ alsook een minimale druksterkteklasse gelijk aan C30/37.

5.3.1.2.2 Hydraulische geleidbaarheid – context en meettechniek

De hydraulische geleidbaarheid moet voldoende beperkt zijn, zodat het transport van radionucliden door diffusie gedomineerd is in de matrix en dat de advectie verwaarloosbaar is.

De permeabiliteit van beton wordt zeer sterk beïnvloed door zijn hydrologische toestand. Het beton zal, na het plaatsen van de aarden afdekking, immers traag evolueren naar een bijna volledige saturatie (zie ook §14.3.2.1.1 en Figuur 14-15 van [HS-14]). Hoewel modellen een theoretisch evenwicht van volledig gesatureerd beton berekenen, zal het beton in de praktijk nooit volledig verzadigd zijn. Het is zeer moeilijk, zelfs indien ze ondergedompeld zijn, om grote betonstructuren volledig te satureren [R5-70, R5-116]. Zie ook *case studies* vermeld in [OD-063 §3.3].

Zelfs voor bijna gesatureerd beton is capillariteit nog steeds het belangrijkste mechanisme voor waterstroming. De capillaire zuiging blijft immers zeer hoog [R5-117 en R5-118] waardoor gravitatie-effecten verschillende grootteordes kleiner zijn dan de capillaire effecten. Enkel bij degradatie (gebarsten beton, netwerk van doorgaande scheuren, ...) kan het permeatieproces, aangedreven door het gravitatieveld, een belangrijke rol spelen in de waterstroming [R5-70 en R5-119].

Voor de heersende hydrologische omstandigheden in de modules, te weten:

- initiële watersaturatiegraad van ~80% evoluerend tot dicht bij 100% op lange termijn,
- afwezigheid van een watertafel boven de betonnen componenten,

is de waarde voor de permeabiliteit zoals bepaald via inverse modellering van drogings- en bevochtigingsproeven de meest representatieve voor een initieel intact beton [R5-120, §3.3].

Drogingsproeven werden uitgevoerd op 10 proefstukken ontnomen tijdens de productie van de caisson-prototypes in 2010. Bij complete waterverzadiging van het beton werd door inverse analyse een waarde van ca 2×10^{-22} m² verkregen voor de vloeistofpermeabiliteit [R5-120, §3.3]. Dit correspondeert met een hydraulische geleidbaarheid van 2×10^{-15} m/s. Afhankelijk van het gebruikte wiskundige model voor de waterretentiecurve kunnen de waarden voor permeabiliteit bij verzadiging variëren tussen 2×10^{-22} en 4×10^{-21} m². Bij een watersaturatiegraad van minder dan 90% wordt de berekende permeabiliteitswaarde minder gevoelig aan het gebruikte model voor de waterretentiecurve. Bij een saturatiegraad van 80% bedraagt de waarde van de permeabiliteit ongeveer 3×10^{-23} m² [R5-120, Figuur 6].

5.3.1.2.3 Hydraulische geleidbaarheid – opschaling modules

De gemeten waarden dienen opgeschaald te worden om rekening te houden met het verschil tussen laboratorium- en industriële omstandigheden. Er werd voor de modules een opschalingsfactor van 10 vastgelegd tussen waarden voor beton gemaakt onder laboratoriumomstandigheden en onder industriële omstandigheden [R5-120, §5].

In wat volgt lijsten we kort de belangrijkste bronnen en argumenten op waarop men zich gebaseerd heeft [R5-120, §5]:

- Tests hebben aangetoond dat de wateropsorping van niet-geconsolideerd beton (dat niet voldoende is getrild) zeven keer groter is dan die van volledig getrild beton. Een verkeerde plaatsing van het beton heeft hierdoor een veel ingrijpender effect dan een belasting of thermische scheuren [R5-121]. Het QC-programma dat wordt geïmplementeerd zal een zulke imperfectie (gebrek aan consolidatie)

vermijden. Een gebrek aan consolidatie dient bijgevolg niet in de opschalingsfactor ingecalculleerd te worden.

- Kleine imperfecties zoals lokale grindnesten te wijten aan de hoge dichtheid aan wapening hebben geen invloed op de waterpermeabiliteit van de component in zijn geheel, omdat er voor kleine imperfecties geen volledig doorgaande hydraulische connectie is.
- Metingen die gedurende één jaar op een bouwterrein zijn uitgevoerd [R5-122] vertoonden een beperkte variatiecoëfficiënt op de gaspermeabiliteit van ongeveer 22% door variërende omstandigheden op de bouwterrein.
- Een belangrijke potentiële bron van degradatie van reële structuren is gelinkt aan structurele effecten [R5-123 en R5-124]. Het beton van de bergingsinstallatie kan in normale gebruiksomstandigheden echter niet onder zijn belasting doorscheuren door de quasi afwezigheid van buigmomenten. Het beton zal enkel op jonge leeftijd enigszins vervormen door thermische spanningen evenals autogene droogkrimp. De scheuren die daardoor mogelijk ontstaan, zullen geen grote impact hebben op de hydraulische geleidbaarheid van de betonstructuren: ze zijn immers dun en superficieel. Dit wordt gestaafd door metingen op een betonnen viaduct. Bij constructie van een betonnen viaduct werden metingen van de gaspermeabiliteit op het bouwwerk (mechanisch belast) vergeleken met metingen op (mechanisch onbelaste) proefstukken gemaakt in een laboratorium [R5-125]. De op de werf gemeten gaspermeabiliteit blijkt slechts beperkt groter dan de waterpermeabiliteit in het lab; de ratio tussen beide waarden schommelt tussen 0,9 en 3,9 [R5-125].
- Voor ontkalkt beton, beton dat onderhevig is geweest aan een extreme uitloging, wat onverwacht is in deze casus, wordt een verhoging van de permeabiliteit met slechts een factor 100 opgemeten [R5-126], [R5-127], [R5-128].

Een opschalingsfactor voor de modules groter dan de voorgestelde waarde van 10 zou bijgevolg onrealistisch zijn.

5.3.1.2.4 Hydraulische geleidbaarheid – opschaling caissons

De caissons zullen gemaakt worden in een specifiek voor caissons bestemde industriële installatie. In deze installatie zullen de constructie- en omgevingsparameters strikt gecontroleerd worden.

Een opschalingsfactor van 5 is van toepassing op de caissons.

Deze factor is gebaseerd op een studie uitgevoerd door CEA en ANDRA. In deze studie werd de gaspermeabiliteit van twee types proefstukken gemeten. De eerste set proefstukken is in het lab geproduceerd, terwijl de tweede set is uitgeoord uit een afvalcontainer (geproduceerd in opdracht van ANDRA) die in industriële omstandigheden (maar met dezelfde betonsamenstelling) is geproduceerd. De studie toonde dat de gaspermeabiliteit in dit laatste geval een factor 3,4 hoger lag [R5-129].

We herhalen dat voor ontkalkt beton, beton dat onderhevig is geweest aan een extreme uitloging, wat onverwacht is in deze casus, een verhoging van de vloeistofpermeabiliteit met slechts een factor 100 opgemeten wordt [R5-126], [R5-127], [R5-128].

Een factor 5 toepassen is bijgevolg een eerder voorzichtige benadering.

5.3.1.2.5 Hydraulische geleidbaarheid – geselecteerde waarden

NIRAS heeft, rekening houdend met de metingen en met de opschaling, de volgende waarden geselecteerd voor de hydraulische geleidbaarheid van het beton van de modules, “Beton 1”:

- Bij bijna-watersaturatie (waarden gebruikt als startpunt van waterretentiecurve): minimum 2×10^{-14} m/s, maximum 4×10^{-13} m/s, geen beste schatting;
- Bij 80% watersaturatie: beste schatting 3×10^{-15} m/s. Range: minimum 3×10^{-16} , maximum 3×10^{-14} m/s. (Een factor 10 werd genomen om onzekerheden in rekening te brengen).

NIRAS heeft, rekening houdend met de metingen en met de opschaling, de volgende waarden geselecteerd voor de hydraulische geleidbaarheid van het beton van de caissons, “Beton 2”:

- Bij bijna-watersaturatie (waarden gebruikt als startpunt van waterretentiecurve): minimum 1×10^{-14} m/s, maximum 2×10^{-13} m/s, geen beste schatting;
- Bij 80% watersaturatie: beste schatting $1,5 \times 10^{-15}$ m/s. Range minimum $1,5 \times 10^{-16}$, maximum $1,5 \times 10^{-14}$ m/s. (Een factor 10 werd genomen om onzekerheden in rekening te brengen).

5.3.1.2.6 Porositeit

De porositeit van beton (en mortel) hangt vooral af van het cementgehalte en van de water/cement verhouding.

Voor beton werd de porositeit door middel van een MIP (*Mercury Intrusion Porosimetry*) techniek gemeten op verschillende kandidaat materialen [§4.2.3 van R5-35], resulterend in waarden tussen 8,31% en 8,86% voor water/cement-verhoudingen variërend tussen 0,47 en 0,54. In de gevoeligheidsstudie [OD-134] werd door middel van een test van wateropsorping bij onderdompeling de porositeit bepaald van het beton van de caissons, “Beton 2”. De watertogankelijke porositeit voor de verschillende mengsels varieerde tussen 9,5% en 11% (zie Tabel 12 van [OD-134]), met een gemiddelde van 9,7% voor de drie referentiemengsels.

In de literatuur worden er voor beton met een water/cement verhouding tussen 0,4 en 0,5 waarden gevonden tussen 7% en 12% (zie Tabel 17 van [OD-108]).

Op basis hiervan zijn de gekozen waarden [OD-108, §8.4.1]: Beste schatting 10% ; Range: 7% - 12%.

Deze waarden werden voor het beton van de modules, “Beton 1”, bevestigd door metingen op labo proefstukken van de demonstratieproef: gemiddeld: 11%, range: 9% - 12% [R5-15].

5.3.1.2.7 Droge bulkdichtheid

De droge bulkdichtheid is nauw verbonden met de porositeit. Proefstukken [R5-55] werden gebruikt voor het bepalen van de droge bulkdensiteit.

De waarden voor intact beton zijn [OD-108, §9.2.1]:

- Beste schatting 2313 kg/m³ (range 2310 – 2330 kg/m³)

5.3.1.2.8 Dispersiviteit

Er zijn geen studies gevonden betreffende dispersiviteit van beton (of mortel).

5.3.1.2.9 Sorptie

Chemische retentie van radionucliden op cementgebonden barrières is een belangrijk aspect van de werking van dergelijke barrières (veiligheidsfunctie R3).

Het sorptieproces kan worden gekwantificeerd door middel van de K_d constante indien experimenteel is aangetoond dat sorptie lineair en omkeerbaar is. In het merendeel van de gerapporteerde experimentele studies werd echter noch de lineariteit noch de omkeerbaarheid getest. Bijgevolg moeten de gerapporteerde sorptiewaarden beschouwd worden als een distributieverhouding R_d (L/kg):

$$R_d = \frac{\text{Hoeveelheid van element verwijderd uit waterfase per eenheid van sorberende massa}}{\text{Concentratie van element in waterfase}} = \left(\frac{C_0 - C_l}{C_l} \right) \frac{V}{m}$$

waarbij C_0 de oorspronkelijke opgeloste stofconcentratie is vóór sorptie, C_l de opgeloste stofconcentratie op het einde van het sorptie-experiment, V het volume van de waterfase, en m de massa van de sorberende vaste stof.

Uit de definitie K_d ($K_d = C_s/C_l$) is het duidelijk dat C_s de concentratie is van het element gesorbeerd op de sorberende vaste stof. In de praktijk echter wordt C_s bijna nooit rechtstreeks bepaald. Een typisch batch sorptie-experiment meet alleen de afname van de concentratie aan opgeloste stof in de waterfase.

Voor de conceptuele modellen die gebruikt worden in de veiligheidsevaluatie wordt de omkeerbare en lineaire sorptie (het K_d concept) gebruikt, voornamelijk omdat de radionuclidenconcentraties relatief laag zijn en omdat het toepassen van een benadering, die een langzame desorptiekinetiek negeert, conservatief is. R_d -waarden worden gebruikt om de K_d -waarden te definiëren in deze berekeningen.

Op de betonsamenstellingen (en de andere materialen op basis van cement) zijn geen sorptie-experimenten uitgevoerd. Doch, met de bedoeling een *state-of-the-art* overzicht van sorptie waarden voor onze materialen te leveren, heeft een internationaal panel van deskundigen de nieuwste wetenschappelijke basis voor sorptiewaarden op cementgebonden materialen in de kunstmatige barrières beoordeeld [OD-038, §4 en OD-107 en OD-270 §2, §3 en §5].

- Sorptiegegevens werden verkregen voor de vier degradatietoestanden van beton (zie §5.3.2.5).
- Voor de degradatietoestanden I, II en III wordt een calcium-silicaat-cement beschouwd als basis voor de cementgebonden barrières. Dit referentiecement is een zuiver calcium-silicaat-cement, zonder effecten van organische stoffen, hoge chloridegehalten of andere ionen. Effecten van organische en andere storende componenten worden afzonderlijk besproken in het veiligheidsdossier.
 - ▶ Voor toestand III worden pH-waarden rond 11 genomen, bij benadering een middenwaarde. In toestand III neemt de pH af in functie van de tijd en daardoor verhoogt dus de onzekerheid.
 - ▶ Sorptiegegevens van gebroken beton en mortel werden afgewezen omdat aggregaatmaterialen in beton en mortel sorberende minerale oppervlakken kunnen bevatten, vooral na het slijpen, die normaal niet aanwezig zijn in de mortel of het beton. Extra oppervlakken ontstaan door het slijpen en de verkregen sorptiewaarden kunnen hoger liggen dan op cementpasta's. Sorptiewaarden gemeten op pure cementmaterialen genieten de voorkeur boven die van beton en mortel;

- ▶ Waar mogelijk krijgen sorptiewaarden op amorfe C-S-H de voorkeur: de gemeten sorptiewaarden op kristallijne C-S-H fasen zijn niet representatief voor reële cementsoorten waar C-S-H aanwezig is als een gelachtig, amorf materiaal.
- ▶ Voor amorfe materialen werd een range van R_d -waarden in acht genomen. Men dient echter te beseffen dat weinig kristallijne materialen zoals C-S-H-fasen niet tot één eenduidige waarde leiden, maar dat eerder een range voor deze R_d -waarden van 1 tot 2 grootteorden moet aangenomen worden.
- Voor toestand IV worden gegevens van calciet gebruikt.
- Voor redoxgevoelige elementen werden sorptiewaarden voor zowel oxiderende als reducerende omstandigheden geëvalueerd voor zover de gegevens dit toelaten.

De mogelijke mechanismen die de sorptieprocessen verklaren worden besproken. Hierbij werd gezocht naar consistentie tussen chemisch-gelijkaardige elementen.

Voor elk radioelement werden de meest waarschijnlijke sorptiewaarden afgeleid voor elk van de vier degradatietoestanden, samen met een boven- en ondergrenswaarde. Voor sommige elementen waren onvoldoende gegevens beschikbaar om een beste schattingswaarde te bepalen. In dergelijke gevallen werd, waar mogelijk, informatie van een chemisch analoog element gebruikt. Het gevaar bestaat dat er voor elementen waar er een grote hoeveelheid gegevens voorhanden is (die doorgaans een grote spreiding vertonen) grote onzekerheidsintervallen worden gegeven (of ver uit elkaar liggende boven- en ondergrenzen), terwijl er voor elementen met een lager aantal gegevens (met in vergelijking een kleinere spreiding) er kleinere onzekerheidsintervallen worden gedefinieerd. Het onzekerheidsinterval, vermeld in dit rapport, moet daarom met omzichtigheid worden gebruikt, want de afwijking wordt meer bepaald door visuele analyses van samenvattende plotgegevens dan op basis van een statistische benadering.

Een samenvatting van de beste schattings- en boven- en ondergrenswaarden voor sorptie voor verharde cementpasta wordt gegeven in Tabel 5-3. Wanneer er onvoldoende gegevens beschikbaar waren om de beste schattingswaarden af te leiden, samen met hun boven- en ondergrenswaarden, dan werden zogenaamde aanvullende waarden afgeleid. Aanvullende waarden worden meestal niet ondersteund door een grote hoeveelheid goed onderbouwde literatuurgegevens, maar zijn gebaseerd op chemische analogie en interpretatie van experts. Niet in alle gevallen was het mogelijk om aanvullende waarden af te leiden. In de veiligheidsevaluaties zullen daarom naast aanvullende waarden ook nog afgeleide waarden gebruikt worden daar waar nog hiaten zijn in de data, dit is bijvoorbeeld het geval voor curium (Cm) waar de analogie met americium (Am) wordt ingeroepen. Voor meer informatie wordt verwezen naar §14.3.6.1.18 van [HS-14] en §10.2.2 van [OD-108].

Merk op dat de waarden in toestand I, II en III bij een eventueel gebruik in de veiligheidsevaluaties, nog herschaald dienen te worden voor de gewichtsfractie aan uitgeharde cementpasta in het beton (of mortel).

Tabel 5-3: Sorptiewaarden voor uitgeharte cement (toestand I, II en III) en calciet (toestand IV) [OD-038 §7, OD-107, R5-167 §2, §3, §5].

Element		R _d [L/kg] BE (LL, UL)			
		Toestand I	Toestand II	Toestand III	Toestand IV
Ag	Aanvullende waarden	1 (0 - n.v.p.)	1 (0 - n.v.p.)	1 (0 - n.v.p.)	1 (0 - n.v.p.)
Am		10 000 (100 - 5×10 ⁶)	10 000 (1 000 - 5×10 ⁶)	10 000 (3000 - 5×10 ⁶)	10 000 (3000 - 5×10 ⁶)
Be		i.d. (i.d. - i.d.)	i.d. (i.d. - i.d.)	i.d. (i.d. - i.d.)	i.d. (i.d. - i.d.)
C (anorganisch)		2 000 (700 - 3 000)	5 000 (2 000 - 20 000)	2 000 (i.d. - i.d.)	1 000 (100 - n.v.p)
Ca		7 (2 - 23)	1 (0,3 - 3)	10 (3 - 30)	40 (13 - 130)
Cl	Conc Cl ≤ 1 mmol	20 (5 - 50)	50 (10 - 200)	20 (2 - 200)	0 (0 - 0)
	Conc Cl > 1 mmol	1 (0,2 - 10)	1 (0,2 - 10)	1 (0,2 - 10)	0 (0 - 0)
Cs		i.d. (0,1 - 10)	2 (0,1 - 50)	20 (1 - 300)	i.d. (i.d. - i.d.)
Cm	Afgeleide waarde	10 000 (100 - 5×10 ⁶)	10 000 (1 000 - 5×10 ⁶)	10 000 (3 000 - 5×10 ⁶)	10 000 (3 000 - 5×10 ⁶)
H		0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
I	Conc Cl ≤ 1 mmol	1 (0 - 300)	10 (0 - 1 000)	1 (0 - 500)	0,4 (0 - 4)
	Conc Cl > 1 mmol	1 (0 - 10)	1 (0 - 10)	1 (0 - 10)	0 (0 - 0)
Mo	Ettringiet aanwezig	3 (0,3 - 33)	3 (0,3 - 33)	3 (0,3 - 33)	0,1 (0,01 - 0,3)
	Ettringiet afwezig	3 (0,3 - 33)	3 (0,3 - 33)	0,1 (0,01 - 0,3)	0,1 (0,01 - 0,3)
Nb		50 000 (1 000 - 10 ⁶)	50 000 (1 000 - 10 ⁶)	50 000 (1 000 - 10 ⁶)	500 (50 - 5 000)
Ni		65 (30 - 730)	400 (160 - 4 500)	400 (160 - 4 500)	5 (i.d.-i.d.)
Pd	Aanvullende waarden	300 (10 - 1 000)	3 000 (100 - 10 000)	30 000 (100 - 100 000)	800 (20 - 2 000)
Ra		300 (100 - 1 000)	100 (10 - 1 000)	800 (80 - 8 000)	1 (0,1 - 30)
Se	Se (IV) Aanvullende waarden	200 (10 - 6 000)	200 (10 - 6 000)	200 (10 - 6 000)	3 (1 - 10)
	Se(VI) Ettringiet aanwezig	3 (1 - 20)	3 (1 - 10)	3 (1 - 10)	0,1 (0,01 - 0,3)
	Se(VI) Ettringiet afwezig	3 (1 - 20)	3 (1 - 10)	0,1 (0,01 - 0,3)	0,1 (0,01 - 0,3)
	Se(II) Aanvullende waarden	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)

Element		R_d [L/kg] BE (LL, UL)			
		Toestand I	Toestand II	Toestand III	Toestand IV
Sn	Aanvullende waarden	20 000 (10 000 – 2×10^5)	20 000 (10 000 – 2×10^5)	3 ($0,3 - 2 \times 10^5$)	3 ($0,3 - 30$)
Sr		100 (30 – 300)	30 (5 – 100)	100 (10 – 3 000)	1 (0,1 – 30)
Tc	Tc(IV)	3 000 (700 – 20 000)	3 000 (700 – 20 000)	3 000 (700 – 20 000)	i.d. (i.d. – i.d.)
	Tc(VII)	1 (i.d. – i.d.)	1 (i.d. – i.d.)	1 (i.d. – i.d.)	1 (i.d. – i.d.)
Zr			10 000 (100 – 100 000)	100 000 (1 000 – 5×10^6)	
	Aanvullende waarden	n.v.p. (100 – 100 000)			n.v.p. ($0,3 - 10^6$)
U	U(IV)	30 000 (i.d. – i.d.)	30 000 (i.d. – i.d.)	30 000 (i.d. – i.d.)	30 000 (i.d. – i.d.)
	U(VI)	2 000 (400 – 10 000)	30 000 (3 000 – 300 000)	30 000 (10 000 – 300 000)	50 (5 – 500)
Th		30 000 (1 000 – 10^6)	30 000 (1 000 – 10^6)	30 000 (1 000 – 10^6)	30 000 (30 – 10^6)
Pu	Pu(IV)	5 000 (1 000 – 10^6)	30 000 (1 000 – 10^6)	30 000 (1 000 – 10^6)	300 (30 – 10 000)
	Pu(VI)	2 000 (i.d. – i.d.)	30 000 (1 000. – i.d.)	30 000 (i.d. – i.d.)	50 (i.d. – i.d.)
Np	Np(IV)	30 000 (1 000 – 10^6)	30 000 (1 000 – 10^6)	30 000 (1 000 – 10^6)	300 (10 – 10 000)
	Np(V)	i.d. (100 – i.d.)	i.d. (100 – i.d.)	i.d. (100 – i.d.)	i.d. (100 – i.d.)
Pa	Pa(IV)	30 000 (i.d. – i.d.)	30 000 (i.d. – i.d.)	30 000 (i.d. – i.d.)	30 000 (i.d. – i.d.)
	Pa(V)	10 000 (500 – 10^7)	10 000 (500 – 10^7)	10 000 (500 – 10^7)	300 (10 – 10 000)

BE = beste schatting, LL = ondergrenswaarde, UL = bovengrenswaarde, i.d. (*insufficient data*) onvoldoende gegevens, n.v.p. (*no value provided*) geen waarde gedefinieerd.

De aanwezigheid van organische producten kan een invloed hebben op de **radionuclidenretentie**. Het organische product kan de retentie beïnvloeden, maar ook door biodegradatie kunnen additieven of andere kleinere organische moleculen vrijgesteld worden die op hun beurt een mogelijke impact kunnen hebben.

Voor wat betreft **hulpstoffen in de vulmortel van de monolieten en het klassiek gewapend beton** (alsook het staalvezelbeton), wordt verwacht dat de effecten van het gebruik van superplastificeerders van het type naftaleen-sulfoaat of polycarboxylaat op de sorptie te verwaarlozen zullen zijn. Het effect op de oplosbaarheid van die toevoegsels is voor de meeste elementen eveneens te verwaarlozen. Een kleine toename van oplosbaarheid is mogelijk voor plutonium (Pu), al wordt niet verwacht dat Pu oplosbaarheidsgelimiteerd is [OD-038, §5.3.2.5], [R5-82, R5-83].

Voor wat betreft **hulpstoffen in de conditioneringsmatrices op basis van cement**, wordt er naast naftaleen-sulfonaat en polycarboxylaateveneens gebruik gemaakt van melanine-sulfonaat. Ook hiervoor wordt geen tot weinig invloed gemeten op de sorptiecapaciteit [R5-165].

5.3.1.2.10 Gewichtsfractie uitgeharde cement

Beton (en mortel) bestaat voornamelijk uit granulaten en uitgeharde cement (*hardened cement paste, HCP*). De uitgeharde cement draagt in belangrijke mate bij aan de sorptiecapaciteit van componenten uit beton of mortel. De gewichtsfractie aan uitgeharde cement is dan ook een belangrijke input voor de veiligheidsevaluaties.

De stoichiometrische massaverhouding tussen water en portlandcement is ongeveer 0,4. Dit betekent dat voor een beton met een water tot cement verhouding van meer dan 0,4 de hoeveelheid HCP per m³ beton als volgt kan berekend worden:

$$\text{HCP} = C(1+0,4), \text{ met } C \text{ het aantal kilogram cement per m}^3 \text{ beton.}$$

Voor een beton met 350 kg/m³ cement en een W/C van 0,47 geeft dit bijgevolg 490 kg/m³, oftewel 21 gew.% (= 490 / 2313).

5.3.1.2.11 Diffusiecoëfficiënt

In het algemeen is de diffusiecoëfficiënt afhankelijk van de samenstelling van het beton (of mortel). Er bestaan verschillende methoden om de diffusiecoëfficiënt op beton of mortel te bepalen in het labo. Dergelijke proeven geven de *schijnbare diffusiecoëfficiënt*, indien gedurende de proefuitvoering sorptie volledig genegeerd is, en/of de *effectieve diffusiecoëfficiënt* als meetresultaat.

Zeer interessant is de studie van Yssorche [R5-205] in dewelke tien verschillende betonsamenstellingen onderworpen werden aan chloride-electromigratietesten waarna de schijnbare diffusiecoëfficiënt werd berekend. De meetresultaten variëren van $4,50 \times 10^{-15}$ m²/s (voor ultrahoge sterkte beton) tot $1,56 \times 10^{-11}$ m²/s (voor klassiek beton). Metingen op "Beton 2" uitgevoerd door het IETcc geven een meetwaarde van $10,8 \times 10^{-12}$ m²/s [§4.5.2 van R5-35]. WTCB beproefde de schijnbare chloridediffusiecoëfficiënt via een andere methode en verkreeg een meetwaarde die licht lager lag, van $5,7$ à $7,9 \times 10^{-12}$ m²/s [OD-134, §3.4.12].

De metingen van IETcc [§4.5.2 van R5-35] lieten toe de effectieve chloridediffusiecoëfficiënt te berekenen, wat leidde tot $1,79 \times 10^{-12}$ m²/s. NIRAS selecteert daarom deze waarde als de beste schatting voor de effectieve chloridediffusiecoëfficiënt voor klassiek gewapend beton. Zie ook [OD-108, §6.2.4.3].

In saturatie kan de poriëndiffusiecoëfficiënt berekend worden door de effectieve chloridediffusiecoëfficiënt te delen door de porositeit. Voor het klassiek gewapend beton selecteert NIRAS daarom $2,11 \times 10^{-11}$ m²/s als een beste schatting. Zie ook [OD-108, §6.5.1].

5.3.1.3 Verwacht gedrag

Op **korte termijn** (totdat de aarden afdekking geplaatst is) zal zelfuitdroging van het beton het voornaamste proces zijn dat zich afspeelt. Dit proces zal resulteren in krimp (zie ook §5.3.2.7); vooral bij beton met een zeer lage W/C [R5-86 en R5-87]. Alle beschouwde betonsamenstellingen hebben echter

een W/C van circa 0,5. Bij dergelijke waarden is zelfuitdroging niet relevant en is de ermee gepaard gaande krimp beperkt.

Ook de gebruikte constructietechniek, die gevaloriseerd is in de demonstratieproef, beperkt kripscheuren tot een minimum. Voor de constructiesequentie van de modules (en demonstratieproef) werden verschillende opties vergeleken en geëvalueerd. De sequentie werd geoptimaliseerd om het ontstaan van kripscheuren zo veel mogelijk te voorkomen. Op de demonstratieproef, een schaalmodel op 1/8 van een werkelijke module, maar met gelijke wanddikte, zijn geen macroscheuren aangetroffen. Ook bijkomende grootschalige testwanden vertonen geen dergelijke scheuren.

Indien in het jonge beton van de modules toch scheuren zouden ontstaan, is de verwachting dat zij geen negatief effect zullen hebben op de gebruiksduur van de modules. Immers, het risico op door carbonatatie veroorzaakte corrosieschade is verwaarloosbaar voor scheurtjes tot 300 µm in overdekte structuren zoals de modules [R5-88 en R5-204]. Voor scheurtjes van maximaal 300 µm die beschut zijn tegen regen, overheerst passieve corrosie. Er kunnen slechts enkele, zeer oppervlakkige corrosieplekken ontstaan, die in feite een initiatie zijn van corrosie maar die niet propageren (§2.3.2.5 van [OD-187]).

Ook voor de caissons is aangetoond tijdens de productie van de prototypes dat het haalbaar is om deze zonder macroscheuren te produceren (zie § 7.4.2.1 (DR5.b) van [HS-7]).

Het belangrijkste proces voor de evolutie van het beton op lange termijn is **carbonatatie**. Dit proces wordt uitvoerig besproken in § 5.3.2.6 van deze tekst.

Carbonatatie van op cement gebaseerd materiaal zoals beton resulteert in [R5-18, R5-11, R5-24]:

- Een vermindering van porositeit in verhouding tot de hoeveelheid cement. Dus cementpasta kent de grootste vermindering, dan mortel en dan beton;
- Veranderingen aan de microstructuur, in het bijzonder een wijziging in distributie van poriëngrootte.

Bij carbonatatie vinden twee processen plaats met tegengestelde effecten op de hydraulische geleidbaarheid [R5-18]. Enerzijds vullen de poriën zich met het calciëterresoxide resulterend uit de carbonatatie, anderzijds ontstaan er ook microscheuren als gevolg van dit proces.

Doordat de inspectieruimte het langst blootgesteld wordt aan atmosferische condities zal de maximale carbonatatediepte van het beton zich hier manifesteren. We verwachten voor deze betondelen carbonatatediepten van (zie ook § 5.3.2.6):

- Maximaal 16,8 mm na 350 jaar;
- Maximaal 17,5 mm na 1 000 jaar.

Dit proces zal een significant effect op de sorptie en porositeit van het beton hebben. Het effect op de hydraulische geleidbaarheid is verwaarloosbaar voor beton op basis van een CEM I (zie §5.3.1.3.1).

Tevens **evolueren op lange termijn de betonbarrières van een saturatiegraad** van ongeveer 80% naar een bijna-gesatureerd systeem (zie ook §14.3.2 van [HS14]).

5.3.1.3.1 Hydraulische geleidbaarheid

Door het ontstaan van microscheuren als gevolg van de carbonatatie van de C-S-H fasen in het beton verhoogt de hydraulische geleidbaarheid. Bij een materiaal gebaseerd op CEM I cement, zoals het beton

van de modules en caissons, domineert echter het effect van opvullen van de poriën op de microscheuren wegens de grote hoeveelheid portlandiet ten opzichte van C-S-H en de hoge Ca/Si verhouding in de C-S-H fasen. Voor het beton van de modules en caissons zal hierdoor de hydraulische geleidbaarheid in de gecarbonateerde zone afnemen.

De door NIRAS gekende gegevens laten niet toe een numerieke schatting te maken van de verminderingfactor van de hydraulische geleidbaarheid, maar een vermindering van de hydraulische geleidbaarheid zou een verbetering van de performantie impliceren. NIRAS heeft daarom als voorzichtige aanpak de waarden van hydraulische geleidbaarheid voor intact beton behouden voor een deels gecarbonateerd beton.

Wanneer het carbonatatiefront de wapening bereikt, zal de corrosie van de wapening niet langer beperkt blijven tot passieve corrosie omwille van een verlaging van de pH van het betonporiënwater en zal er na verloop van tijd snellere, actieve corrosie van de wapening starten. Dit resulteert op termijn in scheurvorming in het beton door opbouw van de reactieproducten van de corrosie.

De degradatie van gewapend beton zal voornamelijk gekenmerkt worden door scheuren te wijten aan deze corrosie van de wapening. In een dergelijke schadegeval wordt een diffuus net van scheuren ontwikkeld. Maar door het optreden van een belangrijke mechanische belasting, zoals een seïsme kunnen doorgaande scheuren en/of een percolatienetwerk ontstaan. Hoewel effectieve hydraulische geleidbaarheid toepasbaar is op een diffuus net van scheuren, is dit niet het geval voor doorgaande scheuren of defecten (zie §6.1 van [OD-187]). In aanwezigheid van doorgaande scheuren of een percolatienetwerk, kan de hydraulische geleidbaarheid van betonnen componenten niet langer betrouwbaar gekwantificeerd worden [R5-12]. In dat geval dienen de betonmatrix en de scheuren apart behandeld te worden.

Initieel zal het beton zich in een toestand met saturatiegraad van ongeveer 80% bevinden. De evenwichtstoestand van een intact ingegraven beton is een toestand van bijna-saturatie op zeer lange termijn (§14.3.2.1.1 van [HS-14]). Hierdoor zal de geleidbaarheid een factor 20 tot 100 toenemen [R5-89].

5.3.1.3.2 Sorptie

Uit een analyse uitgevoerd door NDA [R5-13] blijkt dat in de literatuur zeer weinig studies bestaan over het effect van carbonatatie op de sorptie van radionucliden (§12 van R5-13). De weinige gegevens die daarover gepubliceerd zijn, tonen, zoals verwacht, aan dat de sorptie van neptunium (Np) en plutonium (Pu) kleiner is op gecarbonateerd cement dan op vers cement [R5-14]. De gerapporteerde waarden voor Np en Pu op gecarbonateerd cement zijn van dezelfde grootteorde als de waarden vermeld voor calciet [R5-16]. Hierbij moet worden onderstreept dat de opname van actiniden op calciet met een hoge pH zeer sterk is [Tits *et al.* geciteerd in R5-17 p56]. Senoo *et al.* namen ook een sterke toename van de sorptie van Np en Pu op gecarbonateerd cement met hoge pH waar [R5-14].

Onder invloed van carbonatatie zal een dense laag van calciet (calciumcarbonaat) gevormd worden op het portlandiet dat de onderliggende structuur efficiënt afschermt [R5-90]. Daarnaast is ook aangetoond dat een gelijkaardige laag zich vormt op betonoppervlak in contact met carbonaatrijk water [R5-112]. Voor dit laatste geval is aangetoond dat deze laag de uitwisseling van calcium (Ca) tussen de cementfasen en het omringende water sterk afremt. Deze lagen zijn verantwoordelijk voor het feit dat men in

gecarbonateerd beton het calciumcarbonaat beschouwt als de dominante sorptiefase [p41 van R5-19 en geciteerde referenties]. Voor de volledigheid merkt men op dat de coprecipitatie van bepaalde radionucliden (aanwezig in sporen) met calciumcarbonaat in hoge mate kan bijdragen tot de retentie van radionucliden [p41 van R5-19].

Er wordt ook gemeld dat elementen zoals cesium (Cs), strontium (Sr) en zware metalen steviger gebonden zijn op gecarbonateerd beton, door incorporatie als een 'solid solution' of door sorptie op een oppervlak van amorfe silica ten gevolge van de carbonatatie van C-S-H [p17 van R5-20 en geciteerde referenties, R5-21, R5-22].

De verhoogde sorptie van zware metalen met actieve kationen wordt toegeschreven aan de hoge kationen-uitwisselingscapaciteit van amorfe, sterk gepolymeriseerde silicagel gevormd door carbonatatie van C-S-H [R5-22]. De carbonatatie van C-S-H vormt een Ca-gemodificeerde silicagel die aan het gecarbonateerde betonoppervlak een elektrisch negatieve lading verleent [R5-23].

Er wordt daarom aangenomen in voorliggende casus dat de sorptie-eigenschappen voor een volledig gecarbonateerd front van het beton de sorptiewaarden van toestand IV (Tabel 5-3) zijn.

5.3.1.3.3 Porositeit

Een modellering door het CEA van het beton van de modules en caissons resulteert in een vermindering van ongeveer 2 % van de porositeit door carbonatatie [R5-229, §4.1 en §4.3]. Deze waarden liggen in de lijn van gepubliceerde experimentele gegevens voor gelijkaardig beton [R5-26, R5-27, R5-28, R5-29, R5-30].

5.3.1.3.4 Droge bulkdichtheid

De evolutie van de bulkdichtheid zal de evolutie van de porositeit volgen.

5.3.1.3.5 Diffusiecoëfficiënt

Bij gebruik van een CEM I zal carbonatatie leiden tot verlaging van de poriëndiffusiecoëfficiënt ten opzichte van niet-gecarbonateerd materiaal; bij een CEM III zal de poriëndiffusiecoëfficiënt echter verhogen door carbonatatie [R5-218].

5.3.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

Het ontwerp en de veiligheidsevaluatie van de bergingsinstallatie houden rekening met de evolutie van de performantie van de cementgebonden kunstmatige barrières. De degradatiemechanismen van dergelijke materialen zijn vanuit dit oogpunt bijzonder belangrijk. De voornaamste mechanismen die in de literatuur worden vermeld, worden in deze paragraaf besproken. Tevens wordt er een verantwoording gegeven voor het uitsluiten van een aantal van deze mechanismen voor de inschatting van de levensduur en langetermijnsevolutie.

Het overzicht in dit hoofdstuk is voornamelijk gebaseerd op de volgende documenten: [R5-1], [R5-2], [OD-038], [OD-063], [R5-229], [OD-107], [OD-187] en [OD-206].

De verschillende degradatiemechanismen van betonconstructies kunnen ingedeeld worden in chemische en fysische processen. De chemische en fysische mechanismen kunnen zich ook op synergetische manier

uiten, de degradatie van op cement gebaseerde materialen kan zelden worden toegeschreven aan één geïsoleerd proces.

De belangrijkste chemische degradatieprocessen die hier besproken worden zijn:

- het binnendringen van chloride;
- sulfaataantasting (extern en intern);
- alkali-silicareacties (ASR);
- biodegradatie;
- ontkalking (uitlogingsproces);
- carbonatatie.

De fysische mechanismen die hier besproken worden:

- krimp;
- thermische scheuren;
- door corrosie geïnduceerde scheuren;
- vries-dooi-cycli;
- kruip;
- mechanische belasting die de draagkracht van het ontwerp overstijgt (bv. een seïsme).

Sommige chemische degradatiemechanismen kunnen leiden tot de initiatie van actieve corrosie van de wapeningsijzers. Actieve corrosieprocessen leiden tot corrosieproducten die op hun beurt, omwille van hun volume, leiden tot mechanische spanning om zo het beton beschadigen.

Deze degradatieprocessen kunnen geïnitieerd worden door een interactie met de omgeving (zoals water en lucht), maar ook door interactie met het afval. De belangrijkste aspecten met betrekking tot de verschillende degradatieprocessen worden hierna behandeld. In een aparte paragraaf zal de compatibiliteit met het afval worden toegelicht.

De kinetiek van de belangrijkste aantastingsmechanismen wordt sterk gereduceerd wanneer het beton goed nabehandeld is. Daarom zal het beton van de modules minstens één week beschermd blijven door zijn bekisting (en/of water en/of een *curing-compound*⁷). In geval van een trage hydratatiereactie door lage temperaturen zal deze periode nog verlengd worden tot een maturiteit van 3360°C_h (20°C × 24 h/d × 7 d) bereikt is. Tevens zal de buitenbekisting van de modules bekleed zijn met een *CPF-liner*, hetgeen de resistentie tot degradatie door carbonatatie en vries-dooi verder verbetert [R5-151, R5-42].

Het beton van de caissons, zal tot een leeftijd van 28 dagen beschermd worden, eerst door zijn bekisting (en/of folie en/of *curing-compound*) en later door het in een vochtige kamer te plaatsen.

Een seïsme BDBE (*Beyond Design Basis Earthquake*) kan aanleiding geven tot belastingen die de capaciteit van het (klassiek gewapend) beton overstijgen. Hierdoor kunnen doorgaande scheuren gevormd

⁷ Een beschermingsmiddel dat op het stortoppervlak van beton wordt verneveld ter bescherming tegen uitdroging.

worden. Voor meer informatie zie [§4.5.4 van HS-4] en [§7.4.2.1 DR12a e, DR12b van HS-7] en [§8.3.2.2 van HS-8].

5.3.2.1 Het binnendringen van chloride

Het binnendringen van chloride (Cl) omvat de penetratie en verspreiding van chloride in beton. De twee grote effecten van chloride op het gewapende beton en zijn veiligheidsfuncties zijn:

- Een reductie in sorptie van radionucliden door ondermeer complexvorming van elementen en competitie als gevolg van een grotere ionsterkte met andere elementen;
- Initiatie van actieve corrosie – bij hoge pH beschermt een passieve film van ijzeroxide (Fe_2O_3) het wapeningsijzer. Lokale hoge Cl-concentraties vernietigen de beschermende laag wanneer een drempelconcentratie is bereikt, waarna actieve corrosie start. Een totale hoeveelheid chloride van 0,4 gew.% ten opzichte van de totale hoeveelheid cement kan als een conservatieve waarde worden beschouwd waarbij corrosie niet aanzienlijk wordt versneld. [OD-187, §2.2.5].

Er wordt algemeen aangenomen dat de penetratie van chloride-ionen in cementgebonden materialen niet leidt tot de vorming van nadelige vaste fasen die expansie en scheurvorming kunnen veroorzaken [OD-187, §2.2.5.1]. Bij zeer hoge chloridenconcentraties (4 M of 140 g/L) kan dit wel het geval zijn. Bij dergelijk hoge concentraties worden cementfasen aangetast [R5-91, R5-212, R5-213]. Meer details zijn te vinden in [R5-1, R5-2], [OD-038, §4.1.2], [OD-107, §5] en [OD-187, §2.2.5.1].

Het milieu in Dessel is niet agressief op het vlak van chloriden. Chloriden aanwezig in sommige afvalfamilies zijn echter een punt voor verdere aandacht. Dit wordt behandeld in §5.3.2.10.3.

5.3.2.2 Sulfaataantasting (externe en interne)

5.3.2.2.1 Externe sulfaataantasting (ESA)

Materialen op basis van calcium-silicaat-cement (zoals Portlandcement), die worden blootgesteld aan een omgeving met sulfaten, kunnen een significante degradatie ondergaan afhankelijk van de agressiviteit van het milieu. Sulfaat-ionen reageren met ionen in de interstitiële oplossing van de cementmatrix om *ettringiet* en/of *thaumasiet*⁸ te vormen. Indien van toepassing kan de vorming van deze fasen ernstige schade veroorzaken (scheuren en/of verlies van cohesie).

Het Desselse milieu is echter geen agressief milieu voor cementmatrices (de sulfaatconcentraties zijn lager dan de grenswaarden vermeld in de normen EN 206-1:2001 [R5-3] en B15-001:2004 [R5-4] met betrekking tot een licht agressief chemisch milieu), maar door de eventuele oxidatie van pyriet die aanwezig zou kunnen zijn in de kei van de aarden afdekking kan zwavelzuur vrijgesteld worden (zie ook §5.2.1.3). Dit zuur zal evenwel geneutraliseerd worden door de ondoorlatende topplaat (zie ook §5.5). Verhoogde concentraties aan sulfaten zouden evenwel de modulewanden kunnen bereiken. Daarom zullen de materialen die geselecteerd zijn voor de aarden afdekking moeten voldoen aan strenge specificaties op het vlak van pyrietinhoud [HS-8, §8.5.7.2, DR10] om zo de potentiële concentratie van sulfaten aan de wanden te minimaliseren.

⁸ Thaumasiëtvorming vereist ook de aanwezigheid van carbonaten.

Bovendien wordt de uitsluiting van dit degradatietype verder verzekerd door:

- De samenstelling van het beton, die voldoet aan de vastgelegde criteria voor de zogenaamde ‘matig agressieve’ milieus uit EN 206-1 [R5-3], met onder meer volgende vereisten:
 - ▶ Voldoende lage verhouding water tot cement (max. 0,50);
 - ▶ Voldoende dosering cement (min. 320 kg/m³);
 - ▶ Gebruik van zogenaamde sulfaatresistente cement.
- Daarnaast voldoet het beton aan de vereisten van de omgevingsklasse DS-3 zoals beschreven in tabel C1 uit BRE Special Digest [R5-225] voor statische grondwatercondities met een pH > 3,5. Ter verduidelijking, deze klasse DS-3 representeert onder meer kleigronden met een totaal potentieel sulfaatgehalte van 1,2 gew.%.
- Het beton is ook uitgebreid getest in laboratoria om de gevoeligheid van het beton tot sulfaataantasting te onderzoeken. De gerapporteerde resultaten tonen aan dat het beton een hoge mate van weerstand biedt tegen dit aantastingsmechanisme [§2.2.1.2 van OD-187; §4.3.4 van R5-35 en R5-227⁹]. Ook de vulmortel laat excellente resultaten neerzetten in de zogenaamde Koch-Steiner test [R5-37].

Uit bovenstaande blijkt dat externe sulfaataantasting, geïnduceerd door interactie met de omgeving, geen potentieel kritisch proces is dat de levensduur van de kunstmatige barrières uit klassiek gewapend beton beperkt.

De uitloging van bepaalde afvalstromen kan aanleiding geven tot de vrijgave van sulfaten. De interactie van deze sulfaten met de betonbarrières wordt behandeld in paragraaf §5.3.2.10.5.

5.3.2.2.2 Interne sulfaataantasting (ISA)

Interne sulfaataantasting is een endogene pathologie van het beton die kan leiden tot zwellen en scheuren. De oorzaak is een vertraagde vorming van *ettringiet* in de cementmatrix, verschillende maanden (tot meerdere jaren) na de binding van het cement en zonder externe bron van sulfaten. Dit type van pathologie wordt in de literatuur algemeen genoemd onder de titel *Delayed Ettringite Formation* (DEF).

De meest voorkomende scenario's hebben betrekking op massieve structuren waarbij de warmte door hydratatie slechts gedeeltelijk afgevoerd wordt. Dit leidt tot een aanzienlijke stijging van de temperatuur van het beton tijdens het uitharden. Wanneer deze structuren vervolgens onderworpen zijn aan een vochtige omgeving, gedurende meerdere jaren, riskeert men dergelijk aantastingsmechanisme.

De temperatuursdrempel die vereist is om DEF te veroorzaken bedraagt ongeveer 65°C-70°C [OD-187, §2.2.1.1]. Naast een verhoogde temperatuur en water (ter ondersteuning van de reactie) moeten eveneens tricalciumalumiinaat (C₃A) en sulfaten in voldoende hoeveelheden in het cement aanwezig zijn. Een laag alkaligehalte verhoogt deze temperatuursdrempel [R5-102].

⁹ [R5-227] beschrijft beproevingen op beton en ook op een mortel. De mortel uit [R5-227] is voor die beproevingen, omwille van ondermeer zijn granulaatype (dolomiet), niet vergelijkbaar met de vulmortel uit §5.4 van dit document die op basis van kalksteen is. De beproevingen op beton zijn representatief voor de betonsamenstelling uit §5.3 van dit document.

De nodige aanwezigheid van tricalciumalumiinaat lijkt triviaal voor dit aantastingsmechanisme omdat ettringiet een aluminaatverbinding is. Daarom zou men verkeerdelijk kunnen verwachten dat de aanwezigheid van alumino-ferriet (C_4AF) ook kan leiden tot dit aantastingsmechanisme. Dat strookt echter niet met de literatuur. De aanwezigheid van C_4AF lijkt juist een positieve invloed te hebben op de gevoeligheid van beton tot DEF [R5-144, R5-145].

De maximumtemperatuur die in de modulewanden bereikt wordt¹⁰ zal lager liggen dan de kritieke temperatuurdrempel noodzakelijk voor DEF. De temperatuur van de modules zal gemonitord worden tijdens uitharden om te controleren of deze niet te sterk oploopt. We merken op dat tijdens de constructie van de demonstratieproef en testwanden deze temperatuur niet overschreden werd. Alsook zal met behulp van een modelisatie, voorafgaand aan de betonstort, een predictie van de maximale temperatuur gemaakt worden zodat eventuele mitigerende maatregelen kunnen genomen worden. Tevens is het risico op DEF onderzocht op de *half-scale test*¹¹, waar temperaturen verlopen tot ongeveer 90°C. Het in deze test gebruikte beton heeft een gelijkaardige samenstelling als het beton gebruikt in deze casus en er konden geen sporen van ettringietvorming (DEF) opgemerkt worden [R5-92].

Voor caissons treedt het probleem van DEF niet op vanwege de beperkte wanddikte (de temperatuur in het centrum van de wand (het warmste punt) blijft onder de kritische drempelwaarde [R5-98]).

Als resultaat hiervan werd **de interne sulfaataanval niet beschouwd als een potentiële oorzaak van degradatie van het beton.**

5.3.2.3 Degradatie door alkali-silica reacties (ASR)

De alkali-silica reactie is het resultaat van de inwerking van oplosbare alkali, aanwezig in het beton, op een bepaalde vorm van reactief silica aanwezig in de granulaten van het beton, en in de aanwezigheid van water. Het precieze reactiemechanisme is een punt van discussie, maar de pathologie uit zich in aanwezigheid van calcium (Ca) (klassiek beton is een grote bron van Ca) in de vorming van expansieve vervormingen en microscheuren, voornamelijk in de kern van het beton [R5-210].

Kalksteengranulaten met een laag gehalte aan silica worden gebruikt om dit type van degradatie te vermijden [OD-187, §2.2.3.2]. Een eventuele dedolomitisatiereactie, van het eventueel aanwezige dolomiet¹², leidt niet tot scheuren (geen vorming van expansieve fasen). We merken op dat in Frankrijk¹³ geen pathologie geconstateerd werd door de dedolomitisatiereactie van kalksteen-dolomietgranulaten, in verband met het gebruik van dolomitische kalkhoudende aggregaten [OD-187, §2.2.3.2]. Echter, in overeenstemming met het voorzorgsbeginsel, zullen we alleen gebruik maken van kalkhoudende toeslagstoffen (geen dolomitische kalkhoudende aggregaten).

De beoogde kalksteengranulaten worden in overeenstemming met de norm NF P18 542 [R5-222] geclassificeerd als niet ASR-gevoelige granulaten. Dit werd bevestigd met een petrografisch onderzoek en beproevingen uitgevoerd [R5-93] conform de normen ASTM C 1260 [R5-223] en NF P 18 594 [R5-224]. Ook beproevingen te IETcc resulteren in gelijkaardige bevindingen [§5.4 van R5-228]. Het

¹⁰ Een cement met lage hydratatiewarmte wordt gebruikt. De resultaten van de demonstratieproef tonen aan dat de maximale temperatuur tijdens hydratatie beperkt blijft. [OD-187, §2.2.1.2]

¹¹ Een testopstelling gebouwd in het kader van de ontwikkeling van de berging van categorie B en C.

¹² In de afwezigheid van reactieve silica en kleimineraleninsluitels.

¹³ Bron AFGC (Franse vereniging voor burgerlijke bouwkunde).

kwaliteitsprogramma dat gedurende de bouw van de modules (en de productie van de caissons) zal geïmplementeerd worden zal eveneens voorzien in proeven conform ASTM C 1260, ASTM C 1293 of equivalent teneinde enig risico verder uit te sluiten.

5.3.2.4 Biodegradatie

De biologische degradatie van materialen met cement is een verschijnsel dat algemeen voorkomt in specifieke omstandigheden waar het beton in contact komt met oplossingen die rijk zijn aan organisch materiaal en zwavelverbindingen (riolen, afvalwater-behandelingsinstallaties, voedingsmiddelenindustrie, enzovoort). De ernst van de aanvallen houdt in het algemeen verband met de vorming van zwavelzuur (zwavelcyclus, een combinatie van sulfaatreductie en zwavel-oxiderende bacteriën).

De specifieke omstandigheden die vereist zijn om dit type van degradatie te starten en te onderhouden zullen zich niet voordoen op de site van Dessel. De geselecteerde materialen (voornamelijk voor de afdekking) zullen moeten voldoen aan strikte specificaties voor wat betreft de aanwezigheid van onzuiverheden, in het bijzonder het zwavelgehalte [OD-187, §2.2.4.2].

Biodegradatie lijkt geen potentieel kritisch proces te zijn dat de levensduur van de kunstmatige barrières beperkt.

5.3.2.5 Ontkalking (uitlogingsproces)

In contact met extern water (dat niet in evenwicht is met de cementfasen), hetzij door insijpeling van water doorheen de aarden afdekking of door diffusie, zullen het portlandiet en de C-S-H fasen in gehydrateerde cementsystemen oplossen. Deze oplossing zal leiden tot:

- Een toename van de porositeit. Dit resulteert in een verandering van de permeabiliteit en de diffusie van de opgeloste elementen en/of in nadelige mechanische invloeden;
 - Veranderingen in de poriënwatersamenstelling en daling van de pH-waarden, wat mogelijk kan leiden tot de initiatie van actieve corrosie van het wapeningsijzer;
 - Veranderingen in de sorptie van radionucliden (bijvoorbeeld oplossen van C-S-H-fasen verlaagt de sorptie).
1. Een belangrijk gevolg van uitloging is de pH-evolutie van cementporiënwater. Deze parameter geeft een indicatie van de betonevolutiestadia en kan worden gekoppeld aan de evolutie van zowel fysische (porositeit) als chemische (sorptie) parameters die de betonperformantie bepalen. Voor cement worden typisch vier degradatietoestanden gedefinieerd (zie Figuur 5-5):
- Toestand I met een pH van 13,8 (bij 10°C) die gebufferd wordt door de aanwezigheid van alkali elementen (Na en K);
 - Toestand II met een pH van 13 die wordt gebufferd door portlandiet, Ca(OH)_2 ;
 - Toestand III waarbij de pH daalt van 12,5 tot 10, ten gevolge van het evenwicht tussen het infiltrerende water en de C-S-H-fase die steeds armer aan Ca wordt. Het einde van deze toestand wordt bereikt wanneer de C-S-H fasen volledig zijn opgelost door uitloging;
 - Toestand IV met een pH < 10 waarin enkel calciet (CaCO_3) een bufferende capaciteit heeft.

De chemische evolutie van cementporiënwater is onderzocht in [OD-039] op basis van een *state-of-the-art* thermodynamische databank voor cementmineralen die eerst werd gecontroleerd en vervolgens werd aangepast aan de omstandigheden in Dessel in [R5-197].

Een niet-sitespecifieke methode wordt gebruikt om typische bodem- en kleiwatersoorten, afkomstig van de interactie van regenwater met minerale bodems, af te leiden. Immers, percolerend regenwater zal vooreerst in contact komen met de aarden afdekking en in contact zijn met zand en klei alvorens in contact te komen met de barrières uit beton. Sommige biochemische reacties in de bodemlaag worden in rekening gebracht, bijvoorbeeld (micro)biologische gasstofwisselingsprocessen (die leiden tot een hogere partiële CO₂-druk in de bodem vergeleken met de atmosfeer), nitrificatie- en denitrificatiereacties en vertering van bodemmineralen. De kleilagen worden verondersteld waterverzadigde lagen te zijn waarin er slechts geochemische reacties plaatsvinden (minerale vertering); microbiologische activiteit is beperkt tot de biologische laag. Vanwege de onzekerheden betreffende de materialen voor de aarden afdekking en de langetermijnse evolutie van de chemische samenstelling van het drainagewater, werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd gebaseerd op watersoorten met een sterk verschillende samenstelling:

- Twee samenstellingen voor regenwater, gebaseerd op enkel natte depositie of natte en droge depositie, beiden met een hoge gedeeltelijke CO₂ druk (typisch voor bodemlucht in de biologisch actieve zone, PCO₂ = 10-2,3 atm) en een lage druk (typisch bij atmosferische omstandigheden, PCO₂ = 10-3,5 atm),
- Twee bodemwatersamenstellingen (een eerste variant gaat ervan uit dat de aluminium (Al)-concentratie in evenwicht is met het bodemmineraal gibbsiet (Al(OH)₃), de andere variant relateert de hoeveelheid Al tot de verteringssnelheid van de basische kationen - de hoeveelheid Al bedraagt twee keer de hoeveelheid van de verwerde basische kationen),
- Vier kleiwatercomposities (twee zonder silicium (Si) en twee met Si, vertering van kleimineralen).

Zure pH-waarden werden verkregen voor de regen- en bodemwatersoorten (tussen 3,35 en 4,41), terwijl alkalische pH-waarden (boven 9) werden verkregen voor de kleiwatersoorten. Het pH-bereik van 3,35 tot 9 werd als een voldoende ruime schatting beschouwd van mogelijke pH-waarden en verschaft dus een geschikte range voor evaluaties.

De chemische aantasting van het beton door uitloging werd gesimuleerd aan de hand van een simulatie in een batch-type reactor met het consistente thermodynamisch model voor de cementfasen bij 10°C, de temperatuur in de modules na sluiting [OD-065, §3.2.1]. Uiteraard is deze modellisatie uiterst conservatief: ze houdt immers geen rekening met de kinetiek van het proces en veronderstelt dat de reacties ogenblikkelijk verlopen. In dit model werd een volume van 1 L beton uitgeloozd met 10 000 kg water van elk bovenstaand watertype. De berekeningen werden uitgevoerd voor een betonsamenstelling 350 g cement CEM I, 1 828 g kalkhoudende aggregaten en 175 g water, gelijkaardig aan het beton van zowel de caissons als de modules. Veranderingen in pH, poriënwatersamenstelling, samenstelling van de vaste fase en porositeit werden berekend. Deze resultaten worden weergegeven in Figuur 5-5 [OD-039, §7.3]:

- Toestand I: De pH is in deze fase gebufferd door de alkalimetalen, natrium (Na) en kalium (K). Deze toestand eindigt na ongeveer 0,35 kg cumulatief gereageerd water. De zeer alkalische

omstandigheden die typisch zijn voor toestand I, kunnen de sorptie van bepaalde radionucliden, zoals de isotopen van cesium (Cs) en strontium (Sr), beïnvloeden.

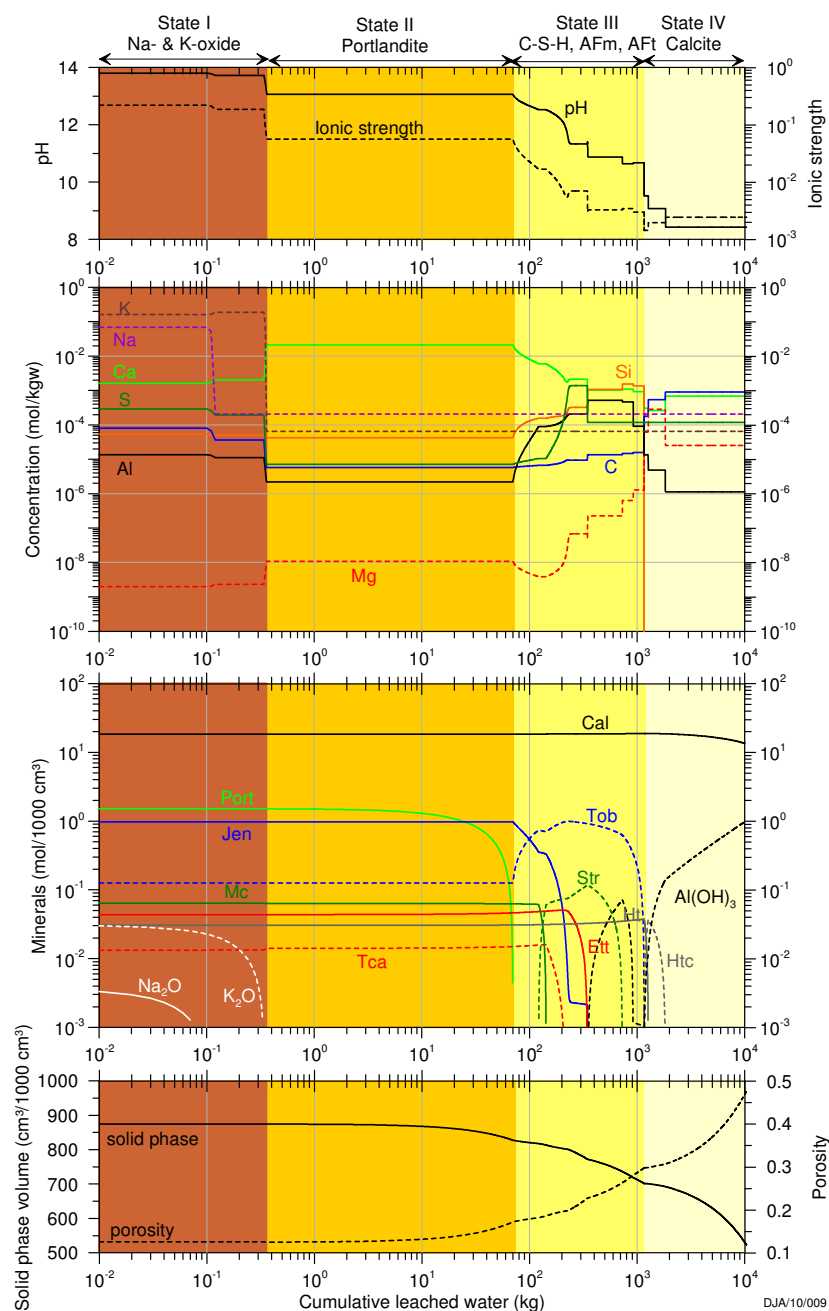
- Toestand II: De pH wordt gebufferd door het oplossen van portlandiet. De concentraties van alle elementen met uitzondering van Na en K worden bepaald door de cementfasen en blijven constant als gevolg van de constante pH. Deze toestand eindigt na ongeveer 70 kg cumulatief gereageerd water.
- Toestand III: Deze toestand is de meest complexe. De pH en de concentraties van de elementen (met uitzondering van Na en K) worden bepaald door een opeenvolging van oplos- en neerslagreacties van C-S-H, AFm¹⁴ en AFt¹⁵ fasen. Deze toestand eindigt wanneer deze fasen niet meer aanwezig zijn. Daarna worden de sulfaat- en siliciumconcentraties niet meer bepaald door de cementmineralen maar door het infiltrerende water. Deze toestand eindigt na ongeveer 1 200 kg cumulatief gereageerd water.
- Toestand IV: Na uitputting van de hydrotalciet-fasen is de pH deels gebufferd door de ontbinding van calciet. Voor de simulatie met grondwater wordt $6,2 \times 10^{-4}$ mol calciet opgelost per kg bodemwater. Om al het calciet dat aanwezig is bij het begin van toestand IV op te lossen (initieel calciet uit het cement, calciet afkomstig van carbonatatie en calciet in de kalkrijke aggregaten) is ongeveer $3,2 \times 10^4$ kg cumulatief gereageerd water nodig. Na uitputting van de hydrotalcietfasen (door uitloging) wordt de magnesium (Mg) concentratie bepaald door het infiltrerende water.

Tijdens de chemische degradatieprocessen van het beton door uitloging vergroot de berekende porositeit gevoelig van 12% als modelaannname voor een 'intact' beton naar ongeveer 30% op het einde van fase III en dit voor alle berekeningsgevallen. De porositeitstoename zet zich verder door in fase IV. [OD-039, §7.1, §7.2, §7.3, §7.4].

De studie [OD-039, §9] concludeert verder dat de hoeveelheid water die nodig is om toestand I en II te beëindigen relatief ongevoelig is aan de samenstelling van het infiltrerende water, terwijl de evolutie van toestand III meer wordt beïnvloed door de samenstelling van het infiltrerende water (met een variatie tussen circa 1 200 en 1 800 kg van cumulatief uitgelopen water) [OD-039, §7.5].

¹⁴ Een groep calcium-sulfoaluminaathydraten met de generieke formule $[\text{Ca}_3(\text{Al,Fe})(\text{OH})_6 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}]_2 \cdot \text{X}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ waarin X een tweewaardig anion is of, soms twee enkelwaardige anionen. Ettringiet is het belangrijkste lid van deze groep, waarbij X een sulfaatgroep is.

¹⁵ Een andere groep calcium-sulfoaluminaathydraten met de generieke formule $[\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})(\text{OH})_6] \cdot \text{X} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ waarin X een enkelwaardig anion representeert (of een half tweewaardig anion).



Figuur 5-5: Geochemische veranderingen tijdens de uitloging van 1 L beton met extern bodemwater bij 10°C voor geval 3 (evenwichtstoestand met gibbsiet). Port: Portlandiet; Jen: Jenniet; Tob: Tobermoriet; Mc: Monocarboaluminaat; Cal: Calciet; Str: Strätlingiet; Tca: Tricarboaluminaat; Ett: Ettringiet; Ht: OH-hydratcalciet; Htc: CO₃-hydratcalciet. De ingekleurde vlakken verwijzen naar de opeenvolgende betondegradatietoestanden I tot IV. [OD-039, §7.3]

5.3.2.5.1 De kinetiek van het ontkalkingsproces

De ontkalking van cementgebonden materialen [zie OD-187, §2.2.6] is bijzonder ernstig in contact met relatief neutrale of zure oplossingen. Bij contact met een dergelijk water worden immers diffusie (transport van materiaal) en chemische reacties (oplossen en precipiteren van mineralen) gecombineerd. De belangrijkste verbindingen die de evolutie van het beton bepalen zijn portlandiet en gehydrateerde calciumsilicaten (C-S-H). De omvang van dit degradatieproces is afhankelijk van vele parameters die verband houden met zowel de intrinsieke eigenschappen van het cementmateriaal (type cement en aggregaten, water/cement verhouding, snelheid van optreden van scheuren,...) als omgevingsfactoren (samenstelling van de waterfase, temperatuur, dynamische of statische voorwaarden,...).

Deze gevoeligheid ten opzichte van de hierboven benoemde beïnvloedende parameters kan relevant zijn, omdat het water dat in contact zal komen met de modules, eerst doorheen de aarden afdekking kwam, waarin zand en klei aanwezig is. Hierdoor zal het (behalve geneutraliseerd door contact met de ondoorlatende topplaat) mogelijk verrijkt zijn in silicium (Si). Simulaties van kleiwater (met verhoogd Si gehalte) [OD-039, §7.5 Tabel 36] toonden aan dat:

- Silicium geen significante impact heeft op de degradatiesnelheid voor de betontoestanden I en II (minder dan ~ 5%);
- Silicium een kleine invloed heeft op de degradatiesnelheid voor de betontoestanden III (~ 10%).

Tevens bleek dat het kleiwater minder agressief was in relatie tot dit aantastingsmechanisme dan het bodemwater te Dessel, dat eveneens gesimuleerd werd.

Doch, onafhankelijk van het gebruikte uitloogwater is dit proces gekenmerkt door een zeer langzame kinetiek. Het is immers een door diffusie gecontroleerd proces. Door zijn zeer langzame kinetiek is het nog maar de vraag of dit proces überhaupt kan leiden tot een vervroegd falen van de structuur, door bijvoorbeeld depassivatie van de wapening. In dit verband zijn de *in situ*-studies op constructies, die een natuurlijke degradatie ondergaan in soortgelijke omstandigheden als deze die zullen heersen op de site van Dessel, van bijzonder belang. Naast andere zaken linken deze studies de testen die (vaak versneld) uitgevoerd werden in het labo met de observaties en de mechanistische modellen die hiervan zijn afgeleid. In [OD-187, §2.2.6.1] worden meerdere studies besproken, hieronder vatten we deze nog eens samen.

Een eerste studie [R5-94] heeft betrekking op constructies (waterreservoirs en bruggen) variërend van enkele tientallen jaren tot ongeveer honderd jaar oud in de regio rond Stockholm. De uitloogdiepten bevinden zich op intervallen tussen 4 mm en 10 mm, afhankelijk van het type beton en de blootstellingstijd. De extrapolatie van deze gegevens over een periode van 1 000 jaar geeft een penetratiediepte van het uitloogfront tussen 8 mm en 20 mm. Ook werd vastgesteld dat de C-S-H in staat was om een aanzienlijke hoeveelheid Ca te verliezen zonder dat deze ontkalking gepaard ging met krimp.

In een andere studie [R5-95] onderzochten de auteurs ook stalen van in gebruik zijnde constructies, eveneens met een leeftijd variërend van enkele tientallen jaren tot een eeuw. De stalen komen van waterdistributie- en waterzuiveringsinstallaties, funderingen en stuwdammen uit verschillende plaatsen in Japan.

We stellen een brede spreiding van de resultaten vast afhankelijk van het type beton en de blootstellingsomstandigheden. Geschat wordt dat de ontkalkingsdiepte, die verband houdt met het

portlandiet, zich bevindt in het interval 10 mm tot 100 mm. De uitloging van C-S-H blijft echter zeer beperkt en bedraagt in alle gevallen minder dan 5 mm. De ontwikkelde modellen, die een onderdeel zijn van deze studie, voorspellen ontkalkingsdieptes tussen 20 mm en 70 mm over een periode van 1 000 jaar. Deze modelleringen zijn uitgevoerd met conservatieve randvoorwaarden zoals een met water verzadigde omgeving en een Ca-concentratie op het betonoppervlak gelijk aan nul.

Het is belangrijk op te merken dat het ontkalkingsfront verbonden met de C-S-H, slechts een diepte bereikt van in de grootteorde van 20 mm na 1 000 jaar, afhankelijk van de toegepaste modellen. Dit betekent dat voor een betondekking van 4 cm de pH ter hoogte van de wapening, die wordt opgelegd door de drempelwaarden van de C-S-H (in de veronderstelling van een uitloging van portlandiet), tenminste ongeveer 11,5 zal bedragen. Deze waarde is nog steeds groter dan de drempelwaarde¹⁶ (pH ~ 10,5) waaronder een depassivatie van de wapening mogelijks kan optreden.

Een derde studie [R5-96] is bijzonder relevant omdat het gaat om de oppervlaktebergingsinstallatie die in El Cabril door ENRESA werd gerealiseerd. Een belangrijke O&O- en toezichtsprogramma werd geïmplementeerd op deze site. Deze experimentele processen worden gecombineerd met belangrijk modelleerwerk. Dit voorbeeld is des te meer relevant omdat het ontwerp vergelijkbaar is met dat wat ontwikkeld is in het kader van het Belgische project te Dessel. Huidige schattingen resulteren in een uitlogingsdiepte van 2 mm over een periode van 80 jaar.

Ook werden uitloogtesten uitgevoerd op het referentiebeton voor de caissons als onderdeel van het karakterisatieprogramma [§4.3.6 van R5-35]. De verkregen resultaten tonen aan dat het beton een goede weerstand heeft tegen uitloging.

Gebaseerd op de gegevens in de literatuur en de resultaten van de uitlogingsproeven blijkt dat het uitlogingsproces niet het bepalende fenomeen is voor de levensduur van de constructies tot een periode van ongeveer duizend jaar. Het uitlogingsfenomeen zal gedurende deze periode niet leiden tot een depassivatie van de wapening. Het SCK-CEN heeft ook de chemische degradatie van beton als gevolg van uitloging gemodelleerd [OD-039]. De verkregen resultaten bevestigen deze conclusies en tonen aan dat dit degradatiemechanisme de levensduur van de kunstmatige barrières niet aantast zolang de aarden afdekking zijn functie vervult.

In conclusie: Enkel over een zeer lange termijn, na meer dan duizend jaar, kan het uitlogingsfenomeen een belangrijke rol spelen in de evolutie van het bergingssysteem. Onder andere heeft het een invloed op de pH van het systeem, een belangrijke parameter waarmee rekening moet worden gehouden om de sorptie van radionucliden te kwantificeren.

5.3.2.6 Carbonatatie

In dit degradatieproces reageren de cementfasen portlandiet en C-S-H met opgeloste carbonaten, wat resulteert in carbonaatneerslag zoals calciëet. CO₂ is aanwezig in de atmosfeer maar wordt ook geproduceerd in de biologische laag van de aarden afdekking door (micro)biologische processen. Carbonatatie is op zich niet schadelijk. Maar het zal als voornaamste negatieve effect een daling van de pH veroorzaken dat leidt tot een depassivatie van de wapening (en dus degradatie van gewapend beton).

¹⁶ De pH-waarden voor depassivatie zijn afhankelijk van de samenstelling van de oplossing (10,5 heeft betrekking op de bovenste limiet).

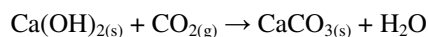
Carbonatatie wordt beschouwd als een belangrijk degradatiemechanisme voor beton voor de evaluatie van de levensduur van de kunstmatige barrières (corrosie van het wapeningsijzer).

Hieronder volgt een detailbeschrijving van het carbonatatieproces van cementmatrices:

Carbonatatie in atmosferische omstandigheden domineert in deze casus omdat de diffusie van CO₂ 10 000 keer sneller gaat in de gasfase dan in oplossing. Atmosferische carbonatatie is het proces waarbij koolstofdioxide uit de omgeving het beton in gasvorm binnendringt en oplost in de interstitiële waterfase in de matrixporiën. Het reageert vervolgens met de hydratatieproducten van het cement. Deze reacties resulteren in de vorming van calciumcarbonaat.

Portlandiet en gehydrateerde calciumsilicaten (C-S-H) vormen het grootste deel van het carbonateerbare materiaal. Bovendien is het portlandiet hoofdzakelijk verantwoordelijk voor het bufferende vermogen van de cementmaterialen. De verhouding portlandiet tot C-S-H en de hoeveelheid portland-klinker in het materiaal zijn de belangrijkste parameters die de carbonatatie van cementgebonden materialen bepalen.

De carbonatatie van portlandiet kan op een vereenvoudigde manier worden beschreven volgens de globale heterogene reactie:



Deze reactie geeft duidelijk weer, dat de carbonatatie samengaat met het vrijkomen van water. De carbonatatie van het portlandiet resulteert in de vorming van calciëet (niet van instabiele polymorfe tussenproducten). Hoewel portlandiet wordt beschouwd als het meest gevoelige hydraat (het carbonateert als eerste), reageert de C-S-H eveneens met koolstofdioxide volgens een gelijkaardig reactieschema [R5-96]:



De carbonatatie van C-S-H resulteert uiteindelijk in de vorming van een silicagel (gehydrateerde siliciumachtig materiaal) en calciumcarbonaat.

De vorming van calciëet, vateriet en aragoniet (drie verschillende kristalvormen van CaCO₃) wordt waargenomen bij de carbonatatieprocessen van cementmaterialen. De vorming van de twee minst stabiele polymorfen (vateriet, aragoniet) wordt toegeschreven aan de carbonatatie van de C-S-H. Het vateriet en het aragoniet veranderen geleidelijk aan in calciëet door oplossings-/neerslagreacties.

De carbonatatie diepte wordt traditioneel geschat met behulp van een pH-indicator, fenolftaleïne, met een pH-omslag gebied van circa 9. Doch, in werkelijkheid is het carbonatatiefront niet duidelijk afgelijnd. Vijf zones worden gedefinieerd [R5-111]:

- De zone met het niet-gecarbonateerde materiaal;
- Een zone waarin carbo-alluminaten zich vormen, terwijl de hoeveelheid portlandiet constant blijft;
- Een zone waarin geleidelijk aan de hoeveelheid portlandiet vermindert, maar C-S-H quasi stabiel is;
- Een zone waarin geleidelijk aan ook C-S-H gecarbonateerd wordt met als gevolg een daling van de verhouding Ca tot Si in deze fase;
- Een zone die volledig gecarbonateerd is.

De residuele aanwezigheid van portlandiet in het gecarbonateerde gebied wordt verklaard door de vorming van een dichte beschermlaag van calciumcarbonaat rond de portlandietkristallen die de uitwisselingen beperken en bijgevolg de carbonatatiereactie van het portlandiet.

Zowel de omgevingsfactoren als de samenstelling van het beton beïnvloeden het carbonatatieproces. Twee parametertypes hebben een bijzondere invloed op de carbonatatiemechanismen: parameters die het transport (toegankelijkheid) van koolstofdioxide in het beton bepalen en de hoeveelheid carbonateerbaar materiaal.

Naast de koolstofdioxideconcentratie, die een belangrijke parameter is om de voortgang van carbonatatie te bepalen, is er de saturatiegraad van het materiaal, die bepaald wordt door de relatieve vochtigheid van de buitenomgeving. Een relatieve vochtigheid (RV) van ongeveer 50% tot 70% (afhankelijk van de betonformule¹⁷) geeft de maximale carbonatatiesnelheid. Voor lagere RV-waarden is de kinetiek van de chemische reacties beperkt, terwijl het transport van koolstofdioxide in de gasfase aanzienlijk wordt beïnvloed bij een hogere RV (de diffusiecoëfficiënt wordt zeer klein).

Externe oppervlakken (direct blootgesteld aan de buitenomgeving) zijn minder gecarbonateerd dan deze die onder een afdak staan. De verklaring hiervoor is dat regen het uitdrogen van het betonoppervlak beperkt. Droog-nat-cycli verhogen de carbonatatie. De bevochtigingstijd, de frequentie en de duur van de cycli zijn belangrijke factoren. Minder frequente en langere bevochtigingsperioden leiden tot minder carbonatatie.

Bij constante temperatuur en vochtigheid (voor een gegeven betonsoort) is de voortgang van carbonatatie evenredig met de vierkantswortel van de tijd (carbonatatie is een door diffusie gecontroleerd proces - er wordt geen initiatiefase beschouwd). Logischerwijs neemt de carbonatatiesnelheid toe met de CO₂-concentratie van de externe omgeving (grotere concentratiegradiënt).

Na het ontkisten kan het beton dicht bij het oppervlak snel zijn water verliezen door uitdroging, waardoor de hydratatie van deze laag beperkt wordt. De mate van hydratatie is hierdoor kleiner en de porositeit hoger, wat de carbonatatie in deze zone vergemakkelijkt. Bovendien worden tijdens het storten van het beton sommige aggregaten geïmmobiliseerd tegen de bekistingwanden. Dit verschijnsel bepaalt gedeeltelijk de microstructuur van het beton dicht bij het oppervlak, welke rijker is aan fijne deeltjes en cementpasta. Dit gebied is meer poreus, waardoor de penetratie van koolstofdioxide vergemakkelijkt wordt, maar is eveneens rijk aan hydraten, die de neiging hebben om de voortgang van carbonatatie te vertragen en een hogere pH voor een langere tijd te behouden. Deze verschijnselen spelen een belangrijke rol in de duurzaamheid van beton, maar deze in rekening brengen bij rekenmodellen is moeilijk.

Om schadelijke gevolgen te voorkomen en de carbonatatie van de betonnen structuren te beperken, zal er bijzondere aandacht besteed worden aan de uithardingsvoorwaarden en de nabehandeling.

De parameters die het transport van koolstofdioxide (microstructuur, porositeit) en de reactiviteit van de gevormde hydraten beïnvloeden, hebben een effect op de kinetiek van het carbonatatieproces. Het is algemeen aanvaard dat het gebruik van een CEM I type cement in beton gunstig is omdat de hydratatie van dit cementtype aanzienlijke hoeveelheden zeer reactieve portlandiet genereert. Naast de water/cement-verhouding bepalen de uithardingsvoorwaarden (uitharding en/of nabehandeling) in

¹⁷ Voor dezelfde relatieve vochtigheid kunnen twee materialen gekarakteriseerd worden door een verschillende mate van saturatie.

belangrijke mate de eigenschappen van het uitgeharde beton. De water/cement-verhouding beïnvloedt in belangrijke mate de carbonatatie. Carbonatatie is meer uitgesproken wanneer de water/cement-verhouding vergroot.

Carbonatatie heeft geen negatieve invloed op de eigenschappen van de cementmatrices an sich, maar er vinden twee processen plaats met tegengestelde effecten op de hydraulische geleidbaarheid [R5-18, R5-11]

- Enerzijds vullen de poriën zich met het calciëet resulterend uit de carbonatatie. Dit heeft als effect een vermindering van de hydraulische geleidbaarheid;
- Anderzijds ontstaan microscheuren als gevolg van de carbonatatie van de C-S-H fasen in het beton. Dit heeft als effect een verhoging van de hydraulische geleidbaarheid.

Via deze twee processen heeft het carbonatatieproces een effect op zowel de permeabiliteit als de porositeit van het beton. Terwijl het netto-effect van deze processen op de porositeit steeds hetzelfde is voor ieder beton, namelijk een verlaging, is het netto-effect van een carbonatatieproces op de permeabiliteit afhankelijk van de betonsoort [R5-18]:

- Bij een materiaal gebaseerd op een CEM III cement domineert het effect van de microscheuren op het effect van het opvullen van de poriën. Daarom wordt, in tegenstelling tot bij een CEM I, een (plaatselijke) toename van de hydraulische geleidbaarheid verwacht bij carbonatatie van een op CEM III gebaseerd materiaal;
- Bij een gecarbonateerd beton op basis van een CEM I, is het effect van het opvullen van de poriën dominerend op de creatie van microscheuren. Hierdoor zal voor een dergelijk beton de hydraulische geleidbaarheid in de gecarbonateerde zone dus afnemen (zie ook §5.3.1.3.1).

Dit kan ogenschijnlijk contradictorisch lijken, maar wordt verklaard door een verschuiving in de poriëngrootteverdeling ten gevolge van het carbonatatieproces [R5-18, R5-96]. Voor de betoncomponenten zal het diffusieve transport niet aangetast worden door de verandering van permeabiliteit als gevolg van de carbonatatie.

Wanneer de carbonatatie van de C-S-H fasen domineert op het porievullend effect, zal carbonatatie vergezeld gaan van een krimpfenomeen dat mogelijk kan leiden tot scheuren. Significante effecten treden pas op als de Ca/Si verhouding van de C-S-H een waarde bereikt kleiner dan 1,2. Bij gemengde cementsoorten (met het toevoegen van bijvoorbeeld slakken en/of vliegashoudend materiaal zoals in een CEM III, CEM IV of CEM V) worden de meest duidelijke effecten gerapporteerd. Dit lijkt de overheersende rol van C-S-H bij dit fenomeen te bevestigen. Bovendien is aangetoond [R5-198] dat de scheuren zich beperken tot het gecarbonateerde gedeelte (afwezigheid van scheuren in het niet-gecarbonateerde gedeelte van het materiaal).

Gezien deze literatuurgegevens, voor een op CEM I gebaseerde beton, zal het krimpfenomeen dat gerelateerd is met de carbonatatie geen invloed hebben op de levensduur van de kunstmatige barrières uit klassiek gewapend beton.

Op CEM I cement gebaseerde gecarbonateerde cementmaterialen (alle klassiek gewapende elementen, zoals de modules en de caissons) zien hun mechanische eigenschappen dus enkel maar verbeteren (verhoging van de druk- en treksterkte na consolidatie van de microstructuur van calciëet). We herhalen

dat calciumcarbonaat een goed bindmiddel is dat aan kalkmortel de belangrijkste bijdrage tot de druksterkte levert. Naast deze toename in druksterkte wordt het gecarbonateerde materiaal gekenmerkt door een zwakkere plasticiteit (ductiliteit). De breukenergie van gecarbonateerd beton ligt ongeveer 30% lager in vergelijking met deze van niet gecarbonateerd beton, wat een hogere broosheid van het materiaal aangeeft. Ook de elasticiteitsmodulus vergroot voor gecarbonateerd beton.

De wapening in klassiek gewapend beton kan echter wel sterk beïnvloed worden door carbonatatie. Wanneer het carbonatatiefront de wapening bereikt, zal de corrosie van de wapening niet langer beperkt blijven tot passieve corrosie, maar zal er door de verlaging van de pH van het betonporiënwater snellere, actieve corrosie van de wapening starten. Dit resulteert op termijn in scheurvorming in het beton door de reactieproducten van de corrosie.

5.3.2.6.1 De kinetiek van het carbonatatieproces

Om de carbonatatie van beton te evalueren is het proces als volgt:

- Het gebruik van de vereenvoudigde uitdrukking $x(t) = K\sqrt{t}$ met $x(t)$: gecarbonateerde dikte op tijdstip t , K : carbonatatiesnelheidsconstante ($\text{mm/a}^{0,5}$) (deze constante dekt de eigenschappen van het beton, afhankelijk van de samenstelling en de blootstellingsomstandigheden aan de omgeving. Deze waarde wordt bepaald, gebaseerd op empirische vergelijkingen of op basis van theorie.), t : tijd (jaar);
- Conservatieve omhullende K -waarden, worden gebruikt daar waar geen nauwkeurige K -waarden konden geïdentificeerd worden door een meting. Tot op zekere hoogte omvatten deze conservatieve omhullende waarden variaties in omgevingsomstandigheden;
- Daar waar nauwkeurige K -waarden, konden geïdentificeerd worden door een meting worden deze gebruikt. Dit is het geval voor het interne gedeelte van de modules tot de sluiting en het aanbrengen van de afdekking.

Zoals eerder vermeld is de kinetiek van de carbonatatie evenredig met de vierkantswortel van de tijd wanneer dit proces wordt gestuurd door diffusie van koolstofdioxide. De diffusie van CO_2 is de snelheidsbepalende stap (de chemische reacties worden verondersteld sneller te zijn dan de diffusie van CO_2). In principe geldt deze uitdrukking voor een specifiek beton in een specifiek milieu (met een constante relatieve vochtigheid¹⁸ in het bijzonder). Tijdens de exploitatiefase Ia zullen de modules beschut staan (geplaatst onder een vaste structuur). Vervolgens zullen de modules beschermd worden door een afdekking van verschillende meters dik. De modules (en monolieten) zullen daarom aan relatief gelijkblijvende omstandigheden blootgesteld worden, wat verder het gebruik van een vereenvoudigde uitdrukking zoals hier voorgesteld, rechtvaardigt (evenals het toepassen van specifieke K -waarden voor de exploitatiefase Ia en voor na de realisatie van de afdekking).

De geselecteerde K -waarden zijn de volgende (voor CEM I):

- in afwezigheid van de afdekking: $1,6 \text{ mm.a}^{-0,5}$;
- in aanwezigheid van de afdekking: circa $0,05 \text{ mm.a}^{-0,5}$;

¹⁸ Verschillen met deze vereenvoudigde regel worden waargenomen wanneer het beton onderworpen wordt aan droog-nat-cycli.

- in ingegraven omstandigheden, maar in afwezigheid van de afdekking: $0,75 \text{ mm.a}^{-0,5}$.

De waarde van $1,6 \text{ mm.a}^{-0,5}$ is een beste schatting voor de atmosferische carbonatatie, aangezien een waarde van $1,4 \text{ mm.a}^{-0,5}$ werd gemeten op stalen van de demonstratieproef, zonder CPF-liner [R5-199] en dat onder de verwachte omgevingsomstandigheden (relatieve vochtigheid > 70%) een waarde van $1,6 \text{ mm.a}^{-0,5}$ wordt voorspeld (voor een beton met 350 kg/m^3 CEM I en een gemiddelde druksterkte op 28 dagen bij 20°C van 65 MPa), gebaseerd op een statistische analyse van een grootschalige studie voor meer dan 960 stalen [R5-43]. Rekening houdend met het feit dat de buitenste lagen van beton onder ingegraven omstandigheden vrij snel zullen evolueren naar nagenoeg gesatureerde condities, geldt de waarde van $0,05 \text{ mm.a}^{-0,5}$, afgeleid van de modellering door het CEA voor 90% saturatie [R5-229, §4.3], als beste schatting voor carbonatatie onder ingegraven omstandigheden. De omhullende waarde van $0,75 \text{ mm.a}^{-0,5}$ die in [OD-187, §2.3.2.14] wordt gegeven, leidt tot een overschatting van de carbonatatiesnelheid. Doch, deze laatste wordt geselecteerd voor ingegraven omstandigheden in afwezigheid van de afdekking.

Het effect van klimaatsverandering op carbonatatie kan in rekening worden gebracht en is beperkt. Volgens het scenario A1B van het IPCC, wat niet verwacht is, maar wel mogelijk, [R5-44] zou de huidige waarde van de partiële druk van koolstofdioxide (p_{CO_2}) van 389 ppmv tegen 2050 toenemen tot ongeveer 540 ppmv en tegen 2100 tot 700 ppmv. Een dergelijke toename in koolstofdioxide zou over een periode van 1 000 jaar slechts leiden tot een matige toename van de atmosferische carbonatatie snelheid met een factor 1,34 (de carbonatatiesnelheid is evenredig met de vierkantswortel van p_{CO_2}).

De concentratie aan koolstofdioxide in contact met de monolieten en de binnenwanden van de modules moet beduidend lager zijn dan deze waarden. Inderdaad, de aanwezige koolstofdioxide in de modules zal stapsgewijs geconsumeerd worden na de sluiting en plaatsing van de afdekking (50 jaar na constructie). Dit zal leiden tot een atmosfeer arm aan CO_2 in de module. De modellering die door het CEA werd uitgevoerd, illustreert duidelijk de belangrijke invloed van p_{CO_2} op de carbonatatie diepte. Een daling van p_{CO_2} resulteert in een daling van de kinetische constante (K) [R5-229, §4.2.1]. De p_{CO_2} in de modules moet daarom, op relatief korte termijn, een belangrijke factor zijn die de carbonatatie van het beton limiteert.

In conclusie worden volgende carbonatatie diepten verwacht:

- Voor een leeftijd van **50 jaar** wordt de carbonatatie diepte in de inspectieruimtes, galerijen en de buitenzijden van de modulewanden, geschat op maximaal 11 mm. De carbonatatie diepte van de monoliet en de binnenzijde van de modulewanden (boven de inspectieruimte) wordt geschat op 5 mm, in veronderstelling van een sluiting van de modules na 10 jaar.
- Voor **100 jaar** na constructie van de modules worden deze waarden geschat op 16 mm in de inspectieruimtes en galerijen, 12 mm in de buitenzijden van de modulewanden en 6 mm in de monoliet en de binnenzijde van de modulewanden (boven de inspectieruimte). De ondoorlatende toplaar zal over een diepte van minder dan 1,4 mm gecarbonateerd zijn.
- Voor **350 jaar** na constructie van de modules worden deze waarden geschat op respectievelijk 17 mm, 12 mm, 6 mm en 3,5 mm.

- Voor **1 000 jaar** na constructie van de modules worden deze waarde geschat op respectievelijk 18mm, 13 mm, 7 mm en 6 mm, in de veronderstelling dat de aarden afdekking tot 1 000 jaar na datum haar beschermende rol blijft vervullen.

Deze carbonatatie diepten zijn veel kleiner dan de betondekking, die gemiddeld 45 mm bedraagt (45 mm ± 5 mm) voor het klassiek gewapend beton. De minimale dikte van de ondoorlatende topplaat bedraagt 70 cm. De carbonatatie diepte van deze laatste wordt dus verwacht niet significant te zijn in verhouding tot zijn dikte. Schematisch wordt deze informatie weergegeven in Tabel 5-4.

Gebaseerd op de verkregen gegevens en de ontwikkelde argumenten blijkt dat de initiatiefase voor wapeningscorrosie, en daarmee de levensduur van de constructies, tenminste een periode van 1 000 jaar zal overbruggen.

Tabel 5-4: Verwachte carbonatatie diepten en snelheden voor de (onderdelen van de) modules en de monolieten.

	Inspectieruimte opgevuld									
	Afdekking geplaatst									
	Exploitatiefase		Structureel gesloten							
	0 – 10 jaar		10 – 50 jaar		50 – 100 jaar		100 – 350 jaar		350 – 1 000 jaar	
	K [mm.a ^{0.5}]	Finale diepte [mm]	K [mm.a ^{0.5}]	Finale diepte [mm]	K [mm.a ^{0.5}]	Finale diepte [mm]	K [mm.a ^{0.5}]	Finale diepte [mm]	K [mm.a ^{0.5}]	Finale diepte [mm]
Ondoorlatende topplaat	n.v.t	n.v.t	n.v.t	n.v.t	< 0,2 ¹⁹	< 1,4	< 0,2	< 3,5	< 0,2	< 6,2
Buitenwand module	1,6	5,1	1,6	11,3	< 0,05	< 11,7	< 0,05	< 12,2	< 0,05	< 12,8
Inspectieruimte §	1,6	5,1	1,6	11,3	1,6	16,0	< 0,05	16,8	< 0,05	17,5
Binnenwand module en vloer §§	1,6	5,1	< 0,05	< 5,4	< 0,05	5,6	< 0,05	6,0	< 0,05	6,6
Structurele topplaat, onderzijde	n.v.t	n.v.t	< 0,05	< 0,3	< 0,05	0,5	< 0,05	0,9	< 0,05	1,6
Structurele topplaat, bovenzijde	n.v.t	n.v.t	1,6	10,1	< 0,05	10,6	< 0,05	11,0	< 0,05	11,7
Funderingsplaat, onderzijde	0,75	2,37	0,75	5,3	< 0,05	< 5,7	< 0,05	< 6,2	< 0,05	< 6,8
Monolieten	1,6	5,1	< 0,05	< 5,4	< 0,05	< 5,5	< 0,05	< 6,0	< 0,05	< 6,6

§: Omvat de volgende elementen: Ondervlak van de ondersteunende topplaat, bovenvlak van de funderingsplaat, kolommen en onderste deel van de binnenwand van de module.

§§: Omvat de volgende elementen: Binnenwand van de module boven de ondersteunende plaat en de bovenzijde van deze ondersteunende plaat.

¹⁹ K-waarde geselecteerd voor beton op basis van een cement verschillend van een CEM I (zie ook §5.5.1.3)

5.3.2.7 Scheurvorming en zelfdichting

De normen en voorschriften met betrekking tot de beperking van scheurvorming kunnen aanleiding geven tot een aantal vragen [OD-187, §2.3.2.1 en §2.3.2.2 en §2.3.2.3 en §2.3.2.4 en §2.3.2.5]. Zo wordt bijvoorbeeld steeds gewag gemaakt van een scheuropening (breedte) maar (bijna) nooit spreekt men over een scheurdiepte. Nochtans, de scheuropeningen ter hoogte van de wapening worden in hoofdzaak bepaald door de spanning op deze wapening, maar deze scheuropeningen zullen aanzienlijk verminderen van het betonoppervlak tot de wapening. Hoe groter de dekking, hoe meer de scheur aan het betonoppervlak zal openstaan.

Studies tonen dan ook aan dat de scheuropeningen aan het oppervlak slechts in zeer geringe mate verband houden met de blootstellingsvoorwaarden die gelden voor de wapening. Ook in de literatuur [OD-187, § 2.3.2.1 en §2.3.2.2 en §2.3.2.3 en §2.3.2.4 en §2.3.2.5] variëren de waarden voor de maximaal toelaatbare opening van oppervlaktescheuren tussen ongeveer tien en enkele honderden micrometer (μm). Het effect van scheurvorming op corrosie van de wapening staat nog steeds ter discussie. Het ontbreken van een consensus over dit onderwerp wordt tevens verklaard door het feit dat vele andere parameters, behalve de dekking, een invloed hebben op de corrosie van de wapening, zoals de kwaliteit, samenstelling van het beton, de kwaliteit van het raakvlak tussen beton en wapeningsijzer, omgevingstoestand, de aard van de scheuren, mechanische beperkingen, verschijnselen die scheurvorming veroorzaken (en de ontwikkeling ervan in tijd), de levensduur van de constructies, enzovoort. Deze verscheidenheid van bevindingen weerspiegelt de complexiteit van de processen en in het bijzonder het specifieke karakter dat inherent is aan elk geval. Een waarde voor de scheuropening kan niet worden geïnterpreteerd zonder inachtneming van de context waarin deze is bepaald.

Scheuren vertegenwoordigen preferentiële transportwegen voor agressieve stoffen (chloriden, koolstofdioxide) en zijn in staat om vroegtijdige corrosie van de wapening te veroorzaken.

Dwarse scheuren kunnen leiden tot corrosie van het wapeningsijzer door het bevorderen van uitwisseling met de externe omgeving (met inbegrip van het transport van agressieve agentia naar de wapening). De uitgeoefende druk door corrosieproducten op het beton kan eveneens scheurvorming in de lengterichting veroorzaken. Deze scheuren langs de wapening vergroten het oppervlak toegankelijk voor agressieve elementen, waardoor de corrosie over een groter segment wordt uitgespreid.

Tevens hebben studies, in het labo maar ook op werkelijke bouwwerken, aangetoond dat het niet zozeer de scheuropening aan de betonhuid is die de bepalende factor is, maar of deze wel of niet doorgaand is, op voorwaarde althans dat de scheuropening minder dan $\sim 300 \mu\text{m}$ bedraagt [R5-204]. Indien een niet-doorgaande scheur de wapening bereikt, dan ontstaat corrosie van de wapening onderaan de scheur en dit wordt snel gevolgd door een inactieve fase. Deze fase resulteert in een zelfdichtend fenomeen. De belangrijkste mechanismen die gebruikt worden om zelfdichting uit te leggen zijn:

- De vorming van corrosieproducten onderaan de scheur die een verstopping veroorzaken;
- Neerslag van calciet;
- Verstopping van de scheur door afzetting van aangevoerde deeltjes alerhanden;
- Hydratatie door watervrije cementkorrels die aanwezig zijn gedurende verschillende jaren.

De swelling van de hydraterende fasen in contact met water kan eveneens bijdragen tot de zelfdichting. Hoewel de zelfdichting van ouder beton voornamelijk het gevolg lijkt van neerslag van calciëet, blijkt de hydratatie van watervrije cement het proces te zijn dat hoofdzakelijk verantwoordelijk is voor de zelfdichting van jong beton (en dit zolang geschikte hydratatie-omstandigheden worden gehandhaafd). We zien dus dat het effect (of het gebrek aan effect) van scheuren op wapeningscorrosie in verband staat met zelfdichtende fenomenen. Deze regelen zichzelf door een aantal parameters eigen aan de intrinsieke eigenschappen van het beton en de omgevingsomstandigheden. Hierdoor is het niet verwonderlijk dat ook in dit geval het interval voor de waarden die gerapporteerd worden in de literatuur voor de maximaal toelaatbare opening waarvoor 'gegarandeerde' zelfdichting van scheuren optreedt, varieert tussen ongeveer tien micrometer en enkele honderden micrometer.

Het zelfdichtende proces beperkt de toegankelijkheid, niet alleen voor de agressieve agentia maar eveneens, tot op zekere hoogte, voor zuurstof. Indien, zoals vaak het geval is, de scheur onderaan verzadigd is met water, dan is er een repassivatie van de aangetaste zone (basische oplossing). Deze waarnemingen werden gemaakt op verschillende constructies die tientallen jaren oud zijn.

De extrapolatie en de relevantie van de zelfdichting van eventuele scheuren over periodes van enkele honderden jaren is nog onzeker. Hoewel de vele onderzoeken die reeds werden uitgevoerd er niet in slagen een consensus te bereiken over de maximaal toegestane opening voor scheuren, leiden ze echter wel naar bepaalde trends:

- De zelfdichting kan blijkbaar plaatsvinden in heel variërende omgevingen, van omstandigheden zoals deze die zich voordoen bij ondergedompelde constructies of deze die blootgesteld worden aan droog-nat-cycli. De aanwezigheid van water is echter een dominante factor voor zelfdichting.
- Het blijkt dat er een drempel (circa 300 µm) is voor de maximaal toelaatbare opening voor scheuren waarvoor geen significant effect wordt waargenomen bij de corrosie van wapeningsijzer, althans voor niet-doorgaande scheuren. De maximaal toelaatbare opening is onder andere afhankelijk van het structuurtype en de blootstellingsomstandigheden.

Een onderzoek van NIRAS bij CEA confirmeerde eind 2018 dat een scheuropening van 300 µm geen negatieve effecten heeft op de integriteit van de betonstructuur [R5-230]. In dit onderzoek werden gewapende proefstukken uit een beton dat representatief is voor de modules, gescheurd (300 µm) waarna ze werden gecarbonateerd en corrosie werd uitgelokt. Daarna werd het raakvlak tussen beton, scheur en staal onderzocht op verschillende momenten. De resultaten confirmeren de initiatie van corrosie gevolgd door een evenwichtstoestand waarbij de corrosie niet verder propageerd en aldus geen negatieve consequenties heeft.

In wat volgt onderscheiden we krimp-scheuren, thermische scheuren en scheuren geïnduceerd door corrosie.

5.3.2.7.1 Krimp-scheuren

Cementgebonden materialen ondergaan een volumetrische verandering tijdens hun uithardingsproces. Verlies van water aan het oppervlak van het cementhoudende materiaal dat zich nog in plastische toestand bevindt, kan leiden tot een contractie die plastisch krimpen wordt genoemd. Scheuren door plastische krimp worden beperkt door het voorkomen van evaporatie onmiddellijk na het storten van het

cementhoudende materiaal. Volumetrische krimp ten gevolge van chemische krimp (gehydrateerd cement is minder volumineus dan de reagentia water en ongehydrateerd cement) treedt ook op, maar bij normale waarden voor de water/cement ratio (0,45 tot 0,60) is deze kleiner dan de krimp door droging.

De maximale theoretische scheurwijdte onder quasi-permanente belasting bedraagt 0,2 mm voor de monolieten [HS-7, §7.4.2 DR9.g] en 0,3 mm voor de modules [HS-8, §8.5.1.3]. Deze maximaal toegelaten scheurwijdte bepaalt in sterke mate de wapeningsdensiteit van de klassiek gewapende betoncomponenten. Ook hier kan door een goede uitvoering en nabehandeling de scheurwijdte verder teruggedrongen worden. De scheurwijdtes zijn in de praktijk dan ook veel lager, wat wordt bevestigd door observaties in de praktijk, voornamelijk de prototype caissons [R5-9] en de demonstratieproef.

Met krimp wordt rekening gehouden bij het ontwerp van de klassiek gewapend beton componenten en bij de eisen van de bouwtechnieken [HS-8, §8.5.1.2 en HS-7, §7.4.2.1].

5.3.2.7.2 Thermische scheuren

De hydratatie van cement is exotherm, wat in dikkere elementen kan leiden tot een opwarming van de structuur. De resulterende thermische belasting kan scheuren veroorzaken. Het toepassen van cementsoorten met een lage hydratatiewarmte garandeert een lage thermische belasting en minimaliseert dit risico. Wat betreft de caissons zijn de dimensies voldoende klein om een significante thermische belasting en bijgevolg een mogelijk scheurrisico uit te sluiten (zie ook [R5-98]). Voor de modules, waar de wanden en vloeren een significante dikte hebben en men portlandcement gebruikt, (en de ondoorlatende topplaat die zeer massief is), is een specifiek opvolgingsprogramma met betrekking tot de temperatuur gepland. Dat **door juiste ontwerpmaatregelen de thermische scheuren zoveel mogelijk kunnen worden vermeden [HS-8, §8.6.1.2]**, is geïllustreerd tijdens de bouw van de proefconstructies zoals de demonstratieproef en testwanden waarmee aangetoond werd dat de thermische belasting niet resulteerde in scheurvorming.

5.3.2.7.3 Door corrosie geïnduceerde scheuren

Onder de heersende omstandigheden verwachten we een veredeling van de corrosiepotentiaal door de toenemende bescherming in de tijd van de passieve film, hetgeen resulteert in een sterke afname van de passieve corrosiesnelheid [R5-154, R5-155].

Bij corrosie van wapeningsijzer creëert de chemische reactie corrosieproducten die meer volume innemen dan het oorspronkelijke wapeningsijzer. Hierdoor ontstaan uitzettingsspanningen radiaal rondom de wapening.

De passieve corrosiesnelheid is echter te laag om zelfs over een tijdschaal van duizend jaar corrosieschade te veroorzaken. Voor een betondekking van 4 cm is immers een 50 µm dikke laag van corrosieproducten vereist om slijtscheuren te veroorzaken (§4.5 van [R5-70]). Dergelijke dikte zal lang niet worden bereikt in het geval van passieve corrosie over een periode van 1 000 jaar [R5-156, R5-154, R5-157]. Ook het modelleringswerk dat door CEA is uitgevoerd, heeft aangetoond dat de monolieten in het geval van passieve corrosie hun integriteit tenminste duizend jaar lang zouden moeten behouden. Het model voorspelt slechts kleine, niet doorgaande scheurtjes van ongeveer 150 µm op duizend jaar na datum [OD-206, §3.2 en §4].

Actieve corrosie van het wapeningsijzer is één van de belangrijkste problemen die de duurzaamheid van betonnen constructies kunnen aantasten. Dit resulteert in lokale radiale scheuren die leiden tot het splijten van het beton. Doorgaans ontstaan één of twee scheuren in de lengterichting (direct tussen de staven en het oppervlak, dan wel in een V-vorm tussen het oppervlak en de staaf) wanneer het staal corrodeert en uitzet, afhankelijk van de geometrie van het materiaal (dit wil zeggen afmetingen van staven, dikte van de betondekking en sterkte van het beton). De scheurvorming vindt doorgaans plaats tussen de staaf en het oppervlak en leidt niet tot belangrijke scheurvorming in de kern van het gewapende element [R5-70]. De scheurtjes zullen niet propageren over de hele betondikte.

Een eerste evaluatie van de timing en geometrie van de scheuren binnenin de monolieten als gevolg van corrosie werd uitgevoerd [OD-206]. Deze evaluatie voorspelt dat, zolang het gecarbonateerde front de wapening niet bereikt (wat niet verwacht wordt de eerste duizend jaar), de eerste micro-scheurtjes kunnen ontstaan na 60 jaar. Deze hebben evenwel geen impact op de performantie van de monoliet. Deze scheurtjes zullen immers niet doorgaand zijn en radiaalgericht rond de wapening. Na 5 000 jaar zijn de scheuren maximaal 370 µm breed en nog steeds niet doorgaand. In geval van actieve corrosie wordt een veel snellere degradatie voorspelt. Een belangrijke onzekerheid in deze evaluaties is de evolutie van de mechanische eigenschappen van gewapend beton dat processen zoals carbonatatie en uitloging heeft ondergaan (welke de modulus van Young, de treksterkte, de Poisson-factor, de scheurenergie, de eigenschappen van de ijzer-beton-interface beïnvloeden).

Het ontstaan van actieve corrosie is het belangrijkste proces dat de levensduur van betonnen componenten bepaalt (zie §5.3.2.14). Echter is er een grote onzekerheid met betrekking tot de Young-modulus van de gevormde corrosieproductie, waardoor het effect op het beton, zoals de vorming en propagatie van scheuren, moeilijk ingeschat kan worden [R5-99]. Daarom wordt in de praktijk **de levensduur van de betonnen componenten conservatief gelijkgesteld met de duur tot de passieve corrosie overgaat in een actieve corrosie.**

5.3.2.8 Vries-dooi

Degradatiemechanismen van beton kunnen ook gerelateerd zijn aan herhaalde vries/dooi-cycli. De kans op schade is groter wanneer er een significante graad van waterverzadiging in het beton aanwezig is [R5-152]. Er zijn twee soorten degradatie door vries-dooi: microscheuren die over de hele betonmassa zijn verdeeld en/of de afbrokkeling van het oppervlak (delaminatie).

Zoals reeds hoger vermeld is de saturatiegraad van het beton een sleutelparameter voor zijn vries-dooi resistentie. Er blijkt een kritische saturatiegraad te zijn waaronder geen schade door vries-dooi wordt opgemerkt [R5-116]. Hoe jonger een beton, hoe lager deze kritische drempelwaarde. De evolutie van deze drempelwaarde gebeurt voornamelijk gedurende de eerste we(e)k(en).

In overeenstemming met de goede praktijk zal vers gestort beton, hetzij voor modules of caissons, niet worden blootgesteld aan vorst tijdens de eerste week, de periode waarin het beton hiervoor gevoeliger is.

De omgevingsfactoren aan de binnenzijde van de modules zijn zodanig dat het materiaal zelden blootgesteld zal zijn aan vorst door de aanwezigheid van een isolerend dak [HS-8, §8.5.6.4]. Het is echter niet uitgesloten dat de buitenzijden van de modules gedurende een korte periode vóór de realisatie van de afdekking zullen worden blootgesteld aan vorst. Deze periode moet echter relatief kort zijn. Het beton voldoet eveneens aan de vereisten vermeld in de betreffende normen om resistent te zijn aan dergelijke

omstandigheden. (Milieuklasse EE3 in overeenstemming met de normen NBN EN 206-1 [R5-3] en NBN B15-001 [R5-4]). Na de exploitatiefase Ia zullen de constructies beschermd worden door een aarden afdekking en zullen deze niet langer blootgesteld zijn aan vorst.

Ook tonen *peeling*-testen aan dat het beton goed stand houdt onder vries/dooi-cycli in afwezigheid van dooizouten. Proeven op het beton bij IETcc [§5.6 van R5-228] en WTCB [R5-202] in zeer penaliserende omstandigheden (volledige verzadiging van het beton) tonen aan dat het beton resistent is tot dit aantastingsmechanisme. Na 56 cycli werd er slechts een gemiddeld massaverlies van respectievelijk 0,02 en 0,08 kg/m³ opgemeten. Men kan deze waarden vergelijken met de aanbevelingen van het voormalige LCPC (*Laboratoire central des ponts et chaussées*) die dicteren dat een beton met een gemiddeld massaverlies van maximaal 0,6 kg/m³ in een dergelijke test resistent is tot vries-dooi-cycli [R5-203] [zie ook OD-187, §2.2.2.2].

Vries-dooi-cycli lijken geen potentieel kritisch proces te zijn dat de levensduur van de kunstmatige barrières beperkt zolang de aarden afdekking haar functie vervult.

5.3.2.9 Kruip

Kruip is de tijdsafhankelijke stijging van vervorming van een materiaal onder aanhoudende constante belasting. Kruip kan worden onderverdeeld in een drogende en een niet-drogende component. De drogende component is een bijkomende kruip die optreedt tijdens blootstelling aan een milieu met lagere relatieve vochtigheid tijdens het uitharden. Niet-drogende kruip wordt de basiskruip genoemd en is de vervorming onder aanhoudende constante belasting die plaatsvindt in een betonnen proefstuk waarvoor uitwisseling van water met de omgeving wordt voorkomen.

Mechanismen en theorieën die kruip van beton beschrijven, zijn complex en niet volledig ontwikkeld of begrepen.

De effecten van kruip kunnen negatief zijn en op lange termijn resulteren in falen van de constructie. **Echter, in deze casus waarin de mechanische belastingen die opgelegd worden aan de kunstmatige barrières relatief klein zijn, is kruip geen potentieel kritisch proces dat de levensduur van de kunstmatige barrières beperkt [HS-8 §8.5.1.3, OD-187, §2.3.2 en §2.3.1].**

Bovendien kunnen de effecten van kruip ook positief zijn. Door relaxatie van het materiaal verminderen trekspanningen (die bijvoorbeeld opgebouwd zijn door krimp) waardoor de kans op (krimp)scheuren verkleint. Een dergelijk effect is uitgebreid geïllustreerd in [R5-100].

5.3.2.10 Compatibiliteit met het afval

Na plaatsing van de afdekking zullen het beton van de modules en later ook de monolieten progressief evolueren naar een bijna gesatureerd systeem (dit wil zeggen saturatiegraad hoger dan 99%, maar geen positieve waterdruk). Modelberekeningen tonen aan dat de ondoorlatende topplaat, de structurele topplaat en de modulewanden bijna gesatureerd zijn na ongeveer 100 jaar [R5-200]. Zodra water beschikbaar is, kunnen in het afval verschillende reacties optreden. Het is belangrijk er zich van te vergewissen dat deze reacties geen (negatieve) invloed hebben op de kunstmatige barrières rondom het afval (de vulmortel, de caisson, de module, ...). Zolang de monolieten hun fysieke integriteit behouden zal de veroudering van het afval door eender welk proces geen nadelige gevolgen hebben op hun mechanische performantie of hun transporteigenschappen. Er kan echter niet uitgesloten worden dat er bepaalde afvalcolli kunnen zijn

die, als gevolg van een interne chemische instabiliteit, bepaalde expansieve reacties gaan vertonen die op hun beurt de monoliet-barrières zouden kunnen aantasten. De controles in het kader van het aantonen van de conformiteit vooraleer colli te bergen, zullen dusdanig zijn dat men slechts zeer geringe aantallen van deze instabiele afvalvormen zal kunnen verwachten.

Het is tevens belangrijk te vermelden dat ontmantelingsafval goed is voor ongeveer 46% van het volume van de afvalinventaris (zie ook [HS-6, §6.4.4.1]). Dit afval bestaat voornamelijk uit beton en staal, en is dus – in afwezigheid van een interne pathologie die kan resulteren in een zwelling - inherent compatibel met de cementgebaseerde kunstmatige barrières.

Waterverversing is nodig om een significante reactie uit te lokken in het afval of tussen het afval en de barrières. Bijgevolg verwachten we dat wisselwerkingen tussen cementgebaseerde barrières en afval vooral zouden optreden nadat de kunstmatige barrières al aanzienlijke schade hebben opgelopen en dus geen bepalende factor vormen in de degradatie van de cementgebaseerde barrières. Dit is ook de conclusie van Snyder *et al.* [R5-153] bij de evaluatie van interne factoren die de duurzaamheid van cementgebaseerde kunstmatige barrières beïnvloeden in het kader van de mogelijkheid tot ingraven van nucleair ontmantelingsafval in de Verenigde Staten. Zij stellen dat over het algemeen een externe verstoring (in het bijzonder waterinsijpeling) noodzakelijk is opdat interne factoren de duurzaamheid van de kunstmatige barrières kunnen beïnvloeden en leiden tot schadelijke effecten. Beperking van de beschikbaarheid en verversing van water kan er zelfs toe leiden dat reacties vrijwel tot stilstand komen, zoals dat is gerapporteerd voor Alvoor statische omstandigheden in situaties met een hoge blootgestelde oppervlakte in verhouding tot het volume van de oplossing [R5-41].

Gelet op de late fase (meer dan 1 000 jaar) en de mettertijd toenemende onzekerheden alsook de mogelijke synergetische effecten tussen de verschillende degradatieprocessen zijn kwantitatieve evaluaties zeer onbetrouwbaar en is alleen een kwalitatieve evaluatie van de gevolgen van een reactie of het uitsluiten ervan mogelijk.

Voor meer informatie omtrend compatibiliteit met het afval verwijzen we naar [OD-187, §4]. Voor een beschrijving van het afval verwijzen we naar [HS-6, §6.4]. De compatibiliteit van het afval met de cementgebaseerde barrières zal aangetoond worden in de conformiteitsdossier, familie per familie [HS-6, §6.3.3].

5.3.2.10.1 Impact van temperatuur en bestraling

Radiolyse en hydrolyse binnen de afvalvorm kunnen gevolgen hebben voor de barrières. Het stralingsniveau in afval van categorie A is echter te laag om de goede werking van de barrières in het gedrang te brengen [OD-187, §5.4]. Radiolyse van organische componenten is in het bijzonder het belangrijkste mechanisme dat de biodegradatie stimuleert.

5.3.2.10.2 Impact van het zwellen van het afval (hygroscopisch, ASR, DEF, ...)

Er zijn verschillende fysicochemische redenen waarom afval zou kunnen beginnen zwellen:

- Geconditioneerde harsen zouden kunnen zwellen door interactie met cement en water;
- Cementeuze materialen kunnen beginnen zwellen door pathologieën zoals ASR of DEF.

NIRAS heeft tot nu geen eenduidige link tussen enerzijds de criteria voor geconditioneerd afval (ACRIA-GA) en anderzijds DEF, ASR of een andere zwelreactie gehanteerd. In het verleden was de enige vereiste die ondermeer hiermee gelinkt was, de “stabiliteit van de afvalvorm”, die enige reactie zoals ASR en/of DEF diende uit te sluiten. Er werden geen specifieke testen op gedaan ter verificatie hiervan, maar men beperkte evenwel deze risico's door onder meer:

- Gebruik te maken van hoogovencement (ter vermindering van het ASR risico en/of beperking van het effect, zelfs indien de granulaten reactief zijn tot ASR) [R5-101];
 - ▶ Het merendeel van de cementmatrices gebruikt voor heterogene en/of homogene cementering is op basis van hoogovencement (CEM III), zoals ondermeer: CILVA en DCM (beide processen van heterogene cementering op Belgoproces), TB01 (homogene cementering van harsen op Tihange), WB01 (homogene cementering van concentraten op Doel), WB05 (heterogene cementering van filters op Doel), ...
 - ▶ De conditionering van harsen bij Doel en Tihange gebeurde in het verleden met behulp van een hoogovencement (equivalent CEM III/B). Door het gebruik van dit cement konden zwellingsprocessen uitgesloten worden, zoals aangetoond werd door proeven. Uitloogtesten uitgevoerd op stalen van een verwerking- en conditioneringscampagne van Doel tonen het goede gedrag van dit type afval in contact met water aan [OD-187, §4.2].
- De maximale temperatuur van het afvalcollo te beperken (ter vermindering van het DEF risico).
 - ▶ Voor heterogeen gecementeerd afval is dit risico quasi nihil, onafhankelijk van de gebruikte mortel of cement. Door de kleine volumes aan beton of mortel worden deze vaten tijdens uitharding in het algemeen niet warmer dan 60°C, wat zowat de ondergrens is voor destabilisatie van ettringiet [R5-102] en dus DEF op latere leeftijd onmogelijk maakt (zie ook §5.3.2.2).

Ook heeft NIRAS, behalve WB01 (de conditioneringslijn waarop gelvorming ten gevolge van ASR is waargenomen), die momenteel niet beschouwd wordt voor de oppervlakteberging te Dessel, geen weet van een pathologie die zich met zekerheid voordoet in de tot nu toe geproduceerde afvalvaten die gestockeerd zijn en regelmatig visueel worden geïnspecteerd [R5-84, R5-85]. Voor al het geproduceerde afval zal het ASR en/of DEF risico geval per geval geanalyseerd worden.

Als gevolg hiervan worden de afvalcriteria aangepast en uitgebreid. Deze uitbreiding van het geheel van criteria met betrekking tot de conditioneringsmortel/beton is in het document 2015-0543 [R5-103] beschreven en voorziet onder meer in de specifieke tests tot het voorkomen van ASR of DEF maar ook van zwelreacties van harsen. Van de producenten wordt geëist dat ze zo snel mogelijk in regel zijn met deze nieuwe vereisten zodat enige vorm van ASR en/of DEF in toekomstig afval absoluut uitgesloten is.

5.3.2.10.3 Impact van de aanwezigheid van chloriden

Geconditioneerde afvalfamilies met mogelijk hoge chlorideconcentraties hebben volgende mogelijke impact:

- Een depassivatie van de wapening. Deze impact kan vandaag niet uitgesloten worden en specifieke oplossingen zullen hiervoor ontwikkeld worden;

- Een impact op de sorptie van radionucliden (verstoring van de veiligheidsfunctie R3) door complexatie of alteratie van de C-S-H-fase.

Meer specifiek rond deze impact van chloriden op de sorptie, werd een kwalitatieve evaluatie uitgevoerd [OD-107 §5] naar de invloed van chloride op sorptie van andere chemische elementen. De elementen werden gegroepeerd naargelang een hoge, middelmatige of lage invloed van chloriden op sorptie te verwachten valt. De beschouwde chlorideconcentraties gaan tot zeewaterconcentratie.

- Hoge invloed: Cs, Sr, Ra, Ag, Pb, Pd
 - ▶ Cs, Sr en Ra (radium) hoofdzakelijk door de competitie met Na^+ voor sorptieplaatsen. Voor Cs, Sr en Ra is de sorptie veel lager als resultaat van een hogere ionische sterkte die voor de competitie verantwoordelijk is.
 - ▶ Ag (zilver), Pb (lood), Pd (palladium). Qua chloorcomplexatie hebben deze elementen een gelijkaardige chemie en met Ag als voorbeeld wordt verwacht dat de groep een grote invloed zal ondervinden omdat Ag stabiele complexen en vaste stoffen vormt met chloride-ionen in water, in het bijzonder onder reducerende omstandigheden (Toestanden I-IV). Bij oxiderende omstandigheden zijn de effecten alleen van betekenis in de toestanden III en IV. In lijn met de analogie tussen Pd en Pb, waarnaar gerefereerd werd in de evaluatie van het sorptiegedrag, wordt Pd in dezelfde invloedsgroep geplaatst als Pb.
- Middelmatige invloed: Tc(IV), Mo, Se(VI), Ni, $^{36}\text{Cl}^-$, I
 - ▶ Tc(IV) (technetium) omwille van evidentie voor complexvorming met Cl^- , Ni (nikkel) als gevolg van zijn plaats in het periodiek systeem, $^{36}\text{Cl}^-$ en I (jodide) als gevolg van directe concurrentie met Cl^- .
 - ▶ Mo (molybdeen), Se(VI) (selenium). Molybdeen en selenaat worden verondersteld een middelmatige invloed te ondergaan door competitie met chloride.
- Lage invloed: U(VI), U(IV), Pu(VI), Th, Np(IV), Pa(V), Be, Ca, Se(IV), Sn, Zr
 - ▶ op basis van voorlopige berekeningen voor U(VI) (uranium), in een sterk vereenvoudigd systeem, werd gevonden dat de invloed laag zijn. Een gelijkaardig gedrag wordt toegeschreven aan U(IV), Pu(VI) (plutonium), Th (thorium), Np(IV) (neptunium) en Pa(V) (protactinium), gebaseerd op overeenkomsten in speciatie²⁰ onder alkalische omstandigheden. Gedacht werd dat Nb (niobium) (maar ook Cl) waarschijnlijk een *outer orbital complex* vormt maar geen *inner orbital complex*, met een aanwezig natriumeffect (sterk ionisch effect) maar zonder sterke complexatie met chloride.
 - ▶ Be (beryllium), Ca, Se(IV), Sn (tin), Zr (zirconium). De invloed op Be wordt verondersteld analoog te zijn aan die van de actiniden. Een lage invloed wordt ook verwacht voor Ca in de veronderstelling dat de chlorideconcentratie de vaste fase en daarmee de toegankelijkheidsfactor niet wijzigt. Sn(IV) en Zr vertonen hetzelfde gedrag als Th en andere tetravalente actiniden. Se(IV) heeft een meer robuuste sorptie dan Se(VI) omdat er geen specifiek opnamemechanisme

²⁰ *Speciatie* refereert naar de variërende concentraties van bindingsvormen van eenzelfde element in een variërende omgeving.

is (sorptie komt voor op alle minerale fasen die van belang zijn in het uitgeharde cement); daarom wordt verwacht dat de invloed van Cl^- op Se(IV) laag zal zijn.

Conformiteitscriteria met betrekking tot chloridegehalten zullen worden opgesteld zodat de hoeveelheid aan deze elementen zal beperkt worden opdat ze geen negatief effect zullen hebben [HS-15, §15.4.2.2]. Er wordt daarom geen afval beschouwd met een chloridegehalte hoger dan 0,4 gew.% ten opzichte van het cement in de conditioneringsmatrix.

5.3.2.10.4 Impact van de aanwezigheid van organische stoffen

Biodegradatie van organische stoffen zal leiden tot **de vorming van CO_2** . We verwachten echter dat deze vrijgaven aan CO_2 zeer traag zal gebeuren en voornamelijk na het falen van de barrières. De gasgeneratie uit organische stoffen kan dus **niet leiden tot een drukopbouw** die het functioneren van de monolietbarrières zou verstoren [OD-187, §5.4]. Evenmin wordt een drukopbouw verwacht in accidentele omstandigheden. Immers, indien er door openingen in de barrières toch in overvloedige mate vrij water aanwezig zou zijn, kan het geproduceerde gas ook ontsnappen via deze openingen.

De geproduceerde CO_2 zal weliswaar bijdragen aan de **carbonatatie** van de op cement gebaseerde materialen. Dit aspect is geëvalueerd voor volgende afvalstromen:

- supergecompacteerd afval (Codering SCOMP)
- gecementeerde harsen (Codering RESIN)

Gebaseerd op penaliserende hypothesen voor de productie van CO_2 bij biodegradatie van organische componenten in het afval [OD-187, §5.4] wordt aangetoond dat de buffercapaciteit van de monolieten groot genoeg is voor de supergecompacteerde persschijven van niet-brandbaar afval en de harsen geconditioneerd in een standaard cementmatrix.

Tijdens de **degradatie van PVC (polyvinylchloride)** zullen **chloriden vrijkomen**. Studies op klassiek huishoudelijk afval tonen aan dat PVC-degradatie een zeer langzaam proces is. Opmerkelijk is een studie [R5-147] waarin PVC gedurende vier jaar onderworpen werd aan een compostering op verhoogde temperatuur. Na deze periode werd geen aantasting van de PVC-ruggengraat geobserveerd, waardoor de vorming van waterstofchloride uitgesloten is. Referentie [R5-146] demonstreert de zeer beperkte chloride-uitloging in alkalisch milieu en de afwezigheid van enige impact op de pH van cementporiënwater bij kamertemperatuur. Dezelfde referentie, waarin het effect van bestraling wordt onderzocht, toont aan dat bij kamertemperatuur tot een geïntegreerde γ -dosis van 10^4 Gy geen significante hoeveelheden chloor vrijkomen [R5-146]. Ook andere studies rapporteren resultaten in dezelfde richting: Labed *et al.* [R5-168] rapporteerden een beperkte productie van waterstofchloride. In deze studie worden twee soorten PVC bestraald, harde en flexibele. De bestraling gebeurde met behulp van een ^{60}Co (cobalt)-bron bij verschillende vochtigheden en temperaturen. Op kamertemperatuur werd een maximaal cijfer voor $G(\text{HCl})$ van 13,5 moleculen /100 eV gerapporteerd²¹. Dit betekent dat voor een geïntegreerde γ -dosis van 10^4 Gy slechts 0,3 gram HCl per kilogram PVC geproduceerd wordt. In dezelfde studie wordt nog een referentie geciteerd waarin PVC onderworpen wordt aan alfa-radiatie, wat bij kamertemperatuur resulteerde in nog lagere opbrengsten, circa 0,3 moleculen/100 eV.

²¹ $G(X)$ is de opbrengst coëfficiënt van een gas 'X' ten gevolge van radiatie.

Gezien de verwachte condities (lage temperatuur, reducerende omgeving, lage geïntegreerde dosis) wordt niet verwacht dat de aanwezigheid van PVC resulteert in een verhoogd corrosierisico of een verlaagde sorptiecapaciteit van de monolieten. Met behulp van verder onderzoek zal voornamelijk dit tweede aspect verder bevestigd dienen te worden. Wat betreft het corrosierisico, duiden de meetresultaten van IETcc erop dat een significante toename van de chlorideconcentratie vereist is alvorens corrosie van de wapening wordt geïnduceerd. Vanaf circa 0,28 gew.% aan chloriden wordt actieve corrosie van de wapening geïnduceerd [§3.3.4.3 van R5-35]. Deze cijferwaarden geven niet de exacte benodigde hoeveelheid chloriden voor chloride-geïnduceerde corrosie, maar indiceren wel dat een zeer belangrijke toename van het chloorgehalte noodzakelijk is om een corrosie te induceren. Aan het einde van de test was het gehalte aan chloriden verhoogt van circa 1,4 kg Cl⁻ per m³ beton (0,40% x 350 kg cement per m³ beton) tot 6,72 kg Cl⁻ per m³ beton. Op het niveau van een monoliet zou zich dit manifesteren in een totale toename van ongeveer 10 kg aan chloriden. De resultaten uit de hoger aangehaalde studies [R5-146, R5-147, R5-168] indiceren dat een dergelijke toename aan chlorideconcentratie door degradatie van PVC onmogelijk is in de verwachte omstandigheden.

Behalve chloriden kan de uitloging- en **degradatie van PVC, organische stoffen** vrijzetten zoals bijvoorbeeld ftalaten. Dergelijk organische producten kunnen leiden tot een mogelijke complexatie van radionucliden (verhoging van hun mobiliteit, verstoring van de veiligheidsfunctie R3). Dit is bijvoorbeeld aangetoond door onderzoek uitgevoerd in opdracht van NIRAS [R5-167]. In deze studie wordt de cementsorptie van enkele radionucliden in aanwezigheid van de degradatieproducten en/of uitlogingsproducten van PVC na bestraling tot een geïntegreerde dosis van 10⁶ Gy gemeten. Er wordt een significante invloed opgemerkt. Doch, deze studie wordt niet beschouwd als realistisch voor deze casus gezien de hoge geïntegreerde dosis (10⁶ Gy), die meer is dan verwacht wordt, en de hoge verhouding PVC tot verharde cement. De verhouding PVC tot uitgehard cement bedraagt in die referentie [R5-167] ongeveer 50 g PVC per gram verharde cement. Ter vergelijking bevat een hypothetisch 400-litercollo dat volledig gevuld is met PVC ongeveer 38 gew.% PVC oftewel 2 g PVC voor iedere gram uitgeharde cementsteen²². Opmerkelijk en enigszins tegenstrijdig zijn dan weer de bevindingen van Colombani *et al.* [R5-170], die aantoonde dat bestraalde PVC minder gevoelig is voor uitloging van organische producten dan niet-bestraalde PVC. Dit wordt toegeschreven aan de vorming van cross-links waardoor de microstructuur van het materiaal dener wordt en *grafting* optreedt van ftalaten op de PVC-ruggengraat waardoor deze immobiel worden. De studie van Bradshaw *et al.* [R5-171] is zeer representatief voor een werkelijk afvalcollo. In deze studie wordt onder meer PVC gecoat met *reactor-grade-PuO* waarna het in cement wordt ingebed. De incorporatiegraad van het PVC bedroeg 20 gew.%, wat in dezelfde grootteorde is als een werkelijk afvalvat met een significante hoeveelheid PVC (gezien de omhulling pure cementsteen was, bedroeg de verhouding PVC tot cementsteen weliswaar circa 2 g PVC per 8 g verharde cement). Het cementblokje werd gedurende 70 dagen in water geplaatst. De hoeveelheid Pu in oplossing was na deze 70 dagen – wanneer het PVC een berekende dosis van circa 10⁵ Gy heeft geabsorbeerd – slechts een grootteorde hoger dan de oplosbaarheidslimiet in cementporiënwater (10⁻⁹ M tot 10⁻¹⁰ M). Ter vergelijking: hetzelfde experiment met cellulose (zie lager) in plaats van PVC leidt bij een lagere incorporatiegraad van slechts 12 procent tot hogere plutoniumconcentraties van 10⁻⁷ M. Men besluit dat er

²² Veronderstel een incorporatiegraad van 50vol.-% in een 400 L-vat. 200 L PVC = 290 kg PVC. 200 L mortel is ongeveer 150 kg uitgeharde cement. 290 / 150 = ongeveer 2/1. (50 vol.-% PVC in een 400 L-vat is ongeveer 39 gew.% PVC)

geen significante impact wordt verwacht op de sorptiecapaciteit van cement door de aanwezigheid van PVC [zie ook OD-187, §4.3] in de verwachte omstandigheden. Voor de specifieke afvalfamilies met PVC worden deze aspecten verder behandeld in het conformiteitsdossier [HS-6, §6.3.3].

De meeste bronnen in de literatuur tonen aan dat de degradatieproducten van **degraderende ionenuitwisselingsharsen** geen of weinig invloed hebben op de oplosbaarheid van radionucliden. Eén studie duidt op een verhoogde oplosbaarheid van Ni. Doch, gezien de beschikbare studies steeds gebruik maakten van redelijk zwaarbeladen harsen (circa 10%), worden deze penaliserend geacht voor het reële afval (waarin de belading slechts circa 0,17 % bedraagt) en wordt er geen invloed van de degradatie van ionenuitwisselingsharsen verwacht op de sorptiecapaciteit van de cementgebaseerde materialen [OD-038 §5.3.2.3].

Op **cellulose** gebaseerde organische materialen, zoals papier en hout, zullen onder alkalische condities binnen de cementgebaseerde barrières degraderen tot wateroplosbare verbindingen. Onder anaerobe omstandigheden en in aanwezigheid van Ca^{2+} is isosaccharinezuur (ISA) het belangrijkste degradatieproduct. ISA kan stabiele complexen vormen met verschillende radionucliden, wat aanleiding kan geven tot een verhoging van de mobiliteit van deze radionucliden door verlaging in effectieve sorptie en verhoging qua oplosbaarheid. Een verlaging van sorptie wordt verwacht vanaf ongeveer 10^{-5} à 10^{-4} M ISA. NIRAS zal een specifieke strategie uitwerken voor de cellulose-houdende colli, i.e. colli die zouden kunnen resulteren in een cellulosegehalte van meer dan 0,4 kg in één monoliet. Dit zal onder meer inhouden dat de activiteit van deze colli voorlopig wordt meegeteld bij het vastleggen van de operationele limieten [HS-6, §6.4.5], en dat de principes van een oplossing reeds worden uitgelegd, zijnde het opstellen van een specifiek dossier in de toekomst dat de afwijking van de criteria voor deze colli zal rechtvaardigen, waarbij deze colli in specifieke modules worden geborgen en er voor de veiligheidsevaluatie voor deze modules een verminderde K_d voor bepaalde radionucliden zal worden beschouwd, zodat het mogelijk effect op naburige colli en monolieten in rekening wordt gebracht [HS-15].

5.3.2.10.5 Impact van de aanwezigheid van sulfaten – externe sulfaataantasting

Met betrekking tot sulfaten die aanwezig zijn in bepaalde zeer specifieke afvalsoorten [HS-6, §6.4] zullen de voorwaarden afgetoetst worden via de conformiteitsdossiers. In functie van de sulfaatvorm worden volgende gevallen beschouwd:

■ **Afval dat geen sulfaat bevat, in gelijk welke afvalvorm:**

In dit geval is er geen risico van sulfaataantasting omdat er geen sulfaten zijn. Het betreft de meerderheid van de afvalfamilies/variëteiten. Voor dit geval worden geen bijkomende voorwaarden gedefinieerd op niveau van de primaire colli.

■ **Afval dat sulfaten in oplosbare vorm kan bevatten, homogeen of heterogeen gecementeerd:**

Het sulfaatgehalte, afkomstig van het niet-geconditioneerde afval, is beperkt tot 12 g/kg voor oplosbare vormen van sulfaten. Voor een beargumentering van deze limiet en benadering, zie lager. Deze categorie kan opgesplitst worden in concentraten enerzijds en heterogeen gecementeerd afval van verschillende oorsprong anderzijds. Voor beide wordt de totale inventaris aan sulfaten uit het niet-geconditioneerd afval in acht genomen voor de berekening van bovenstaande limiet.

■ **Afval dat sulfaten in niet oplosbare vorm kan bevatten:**

In dit geval is er geen risico van sulfaataantasting omdat er quasi geen sulfaten kunnen vrijgesteld worden. Het betreft de afvalfamilies/variëteiten die zijn (voor)behandeld met voldoende barium (Ba) om al het sulfaat neer te slaan in bariet. Voor een dergelijk geval worden geen bijkomende voorwaarden gedefinieerd op niveau van de primaire colli.

Voor eventuele afvalcolli waar slechts een gedeelte van het sulfaat neergeslagen is in bariet, wordt het neergeslagen sulfaat in mindering gebracht voor de bepaling van het vrije sulfaatgehalte en geldt bovenvermelde limiet op het resterende sulfaatgehalte.

■ **Afval dat sulfaten in gebonden vorm kan bevatten:**

Deze categorie betreft geconditioneerde harsen. We nemen volgende potentiële vrijstelling van sulfaten in acht:

- ▶ De hypothetische, volledige belading met SO_4^{2-} voor anionische harsen;
- ▶ De potentieel degraderende sulfongroepen voor kationische harsen.

Sulfaataantasting van de monoliet (beton en mortel) kan uitgesloten worden zolang minder dan 12 g/kg sulfaat, dat zijn oorsprong vindt in het afval, aanwezig is. Externe sulfaataantasting, geïnduceerd door een interactie met het afval is geen potentieel kritisch proces dat de levensduur van de kunstmatige barrières beperkt, mits inachtnaam van bovenstaande limiet.

Homogeen gecementeerde concentraten en heterogeen gecementeerd afval:

Het is belangrijk te evalueren of het vrijkomen van sulfaat zou kunnen leiden tot een aantasting van de betonbarrières. Het betreft hier homogeen gecementeerd afval of heterogeen gecementeerd afval met vrije sulfaten.

De volgende conservatieve aanname wordt gemaakt: De afvalvorm heeft na uitharding dezelfde transporteigenschappen als grond. Deze aanname laat ons toe te verwijzen naar NBN EN 206-1:2001 [R5-3] en zijn Belgische Bijlage ter bepaling van de milieuklasse overeenkomstig een dergelijk gecementeerd concentraat. Tevens is het evident dat deze hypothetische grond te allen tijde in basische conditie zal zijn ($\text{pH} \gg 7$). Dit maakt dat het gebruik van opmerking b uit Tabel 2 van NBN EN 206-1 [R5-3] niet enkel gejustificeerd is, maar ook aangewezen²³. Een klassieke extractie met zoutzuur ter bepaling van het sulfaatgehalte zal immers tot een extreme overschatting leiden van het sulfaatgehalte dat potentieel beschikbaar is voor aantasting van de betonbarrières. We merken op dat dit in tegenstelling is tot een omgeving van werkelijke grond, waar grondwaters vaak een pH significant lager dan 7 hebben.

Omwille van de chemische resistentie van het beton en de vulmortel (zie lager) is de sulfaataantasting van deze materialen zelfs bij rechtstreeks contact tussen de vulmortel of het beton met het geïmmobiliseerde afval en in gesatureerde condities uitgesloten zolang minder dan 12 g/kg sulfaten afkomstig uit niet geconditioneerd afval in de geconditioneerde afvalvorm verrat zijn. Immers, de sulfaten bijgedragen door het cement, worden geacht immobiel te zijn en te blijven zolang de vulmortel en de caisson door uitloging niet gedetorieerd zijn, maar wel eventueel gesatureerd. Deze sulfaten zijn immers voornamelijk verrat in

²³ “De beproevingsmethode schrijft de extractie van SO_4^{2-} voor door middel van zoutzuur; als alternatief mag de extractie met behulp van water worden toegepast, indien op de plaats van het beton ervaring beschikbaar is.”

ettringiet dat, zelfs in aanwezigheid van *competing species*²⁴, stabiel is in pH-waarden van meer dan circa 10,5 [R5-34].

Dit maakt, voor geconditioneerde concentraten, dat sulfaataantasting van het beton en de vulmortel uitgesloten kan worden voor verwerkte concentraten met een sulfaatgehalte lager dan 50 g/L (12 g/kg × 800 kg / 185 L)²⁵.

Ionenuitwisselingsharsen:

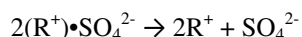
In dit geval is er geen risico zolang de drager het sulfaat vervat. Men beschouwt anionharsen en kationharsen.

Anionharsen

Deze producten kunnen tijdens het cementatieproces of na uitharding hun lading (eventueel gebonden sulfaten) wisselen tegen andere ionen aanwezig in het (jonge) cementwater (bijvoorbeeld hydroxylionen). Echter, zelfs indien men conservatief aanneemt dat een campagne enkel bestaat uit anionische harsen en deze, opnieuw conservatief, volledig verzadigd zijn met sulfaten en dat deze allen zullen uitgewisseld worden tegen hydroxylionen is er geen gevaar voor sulfaataantasting.

Ook hier wordt dezelfde conservatieve aanname gemaakt dat het homogeen geïmmobiliseerde hars na uitharding dezelfde transporteigenschappen heeft als grond.

De incorporatiegraad van een dergelijk afval per 400-litercollo bedraagt maximaal ongeveer 25 vol.-% (deductie van de gegevens uit [R5-25]). De gebruikte anionische harsen hebben een typische capaciteit van ongeveer 1 eq/L (wat gecontroleerd dient te worden in het kader van het conformiteitsdossier), wat het totaal equivalenten per 400-litercollo op 100 brengt. Dit betekent dat slechts 50 mol SO₄²⁻ (5 kg) vrij kan komen in dit systeem (zie de schematische, niet fenomenologische vergelijking hieronder).



5 kg sulfaten / 400-litercollo resulteert in ongeveer 5 000 000 mg / 660 kg = 7 576 mg/kg cementmatrix, wat minder is dan 12 g/kg, waar het beton en de vulmortel resistent aan is (zie lager). Hier worden de volgende hypothesen gemaakt:

- Bulkdichtheid van de conditioneringsmortel: 2 200 kg/m³;
- Volume van de mortel: 75 vol.-% van het 400-litercollo;
- Gewicht van de harsen wordt niet in rekening gebracht.

Kationharsen

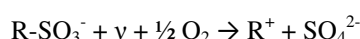
Kationharsen vervatten (meestal) een sulfongroep als actieve uitwisselingssite. De incorporatiegraad van een dergelijk afval per 400-litercollo bedraagt maximaal ongeveer 25 vol.-% (deductie van de gegevens uit [R5-25]). De dichtheid van de harsen wordt geschat op 1 kg/L. Dit betekent dat ongeveer 100 000 g harsen vervat zitten in één vat.

²⁴ Species die de plaats van sulfaat in ettringiet zouden kunnen innemen en aldus met sulfaat in competitie gaan hiervoor.

²⁵ 185 L, is het typische volume aan niet-geconditioneerd concentraat in een 400-litercollo. Voor het homogeen gecementeerde afval wordt een gemiddelde dichtheid van 2000 kg/m³ verondersteld (een conservatieve schatting), en dus een massa van 800 kg per 400 litercollo.

Onder invloed van ioniserende straling en in aanwezigheid van water zullen deze sulfongroepen gedissocieerd worden van de drager en vrijkomen in de cementmatrix. De enige gevonden en bruikbare verslaggeving van metingen op bestraalde harsen tot 10^7 Gy hebben aangetoond dat tot $1 \text{ à } 2 \times 10^{-3}$ mol/ 2 g hars aan sulfaat kan vrij komen ten gevolge van deze geadsorbeerde dosis (Figuur 3.13 uit [R5-31]).

Deductie van de gegevens uit de databank van NIRAS (IRA3-2013) tonen aan dat na duizend jaar een geïntegreerde dosis van maximaal 2×10^6 Gy ontvangen kan worden in de harsen [R5-130] waardoor minder dan $0,5 \times 10^{-3}$ mol/ g hars aan sulfaat vrijkomt (Figuur 3.13 uit [R5-31]). Dit betekent dat slechts 50 mol SO_4^{2-} (4,8 kg) vrij kan komen in dit systeem (zie onderstaande schematische, niet fenomenologische vergelijking).



4,8 kg sulfaten / 400-litercollo resulteert in ongeveer $4\ 800\ 000 \text{ mg} / 660 \text{ kg} = 7\ 273 \text{ mg/kg}$ cementmatrix, wat minder dan 12 g/kg is waaraan het beton en de vulmortel resistent is. Hier worden de volgende hypothesen gemaakt:

- Dichtheid van de mortel: 2 200 kg/m³;
- Volume van de mortel: 75 vol.-% van het 400-litercollo;
- Gewicht van de harsen wordt niet in rekening gebracht.

Deze hypothesen resulteren in een massa van 660 kg per 400-litercollo ($0,75 \times 0,400 \times 2\ 200$).

Chemische resistentie van het beton en de vulmortel

De verwachte evolutie van het bergingssysteem is zo dat de omgeving waaraan de mortel en het beton van de monoliet blootgesteld wordt, bijzonder is in de zin dat uitloging quasi niet zal plaatsvinden. Dit komt door de afwezigheid van insijpelend water dankzij de goede werking van de aarden afdekking en de ondoorlatende topplaat. Zolang er geen water kan infiltreren in het bergingssysteem, is er te weinig water beschikbaar om de reactie (sulfaataantasting van de barrières) te laten doorgaan en van zodra water kan binnendringen ontstaat er (geleidelijk aan) een scheurnetwerk.

De onwaarschijnlijkheid van een sulfaataantasting van zowel mortel als beton door uitloging uit de afvalvorm, zolang de bovenvermelde limieten worden gerespecteerd, wordt in onderstaande verder geargumenteed aan de hand van drie benaderingen:

- Vanuit normen wordt geargumenteed dat het beton en mortel voldoende resistent zijn tot sulfaataantasting om compatibel te zijn met een afvalvorm die aan bovenstaande limiet voldoet;
- Vanuit laboresultaten verkregen door beproeven van de referentiemortel en –beton wordt deze normatieve inschaling verder ondersteund;
- Uit de reactiemechanismen van expansieve ettringietvorming zoals beschreven in literatuur kan men concluderen dat de monoliet niet aan de condities blootgesteld wordt die een dergelijke aantasting favoriseren.

Voor een uitgebreide terugkoppeling tussen het verwachte evolutiegedrag en de argumenten die pleiten voor de afwezigheid van enige aantasting, zie lager in deze paragraaf alsook NIRAS-nota 2017-1893 [R5-131].

Normatieve inschaling

Het **caissonbeton** werd niet ontwikkeld volgens de vereisten van een duurzaamheidsklasse. De gebruikte samenstelling houdt het midden tussen uitvoerbaarheid en duurzaamheid, zoals aangetoond is in verschillende studies [R5-35, R5-228, R5-227, R5-202 en OD-134]. Ondanks het feit dat ze niet ontwikkeld is met een XA2-klasse (uit EN 206-1 [R5-3]) voor ogen, voldoet de samenstelling van het beton aan de minimale vereisten van XA2. Daarom schalen we het beton dan ook in deze klasse in.

Baseren we ons op de BRE Special Digest 1:2005 [R5-225], dan kunnen we de resistentie van het **beton tot thaumasiet aantasting** inschatten. Deze norm beschrijft de procedure om de ontwerpsulfaatklasse (DS Class) te determineren. Hierin wordt een classificatie gehanteerd betreffende ACEC-waardes (*Agressive Chemical Environment for Concrete*) verbonden aan een DC-klasse (*Design Chemical Class*). Hier gaan we de resistentie van het beton na tot de omgevingsklasse DS-3 uit tabel C1 van de BRE Special Digest 1:2005 [R5-225]. Deze omgevingsklasse kenmerkt zich in een sulfaatconcentratie van maximaal 3000 mg/L in het grondwater (wat de bovenlimiet is van XA2 volgens EN 206-1 [R5-3]) of een *total potential sulphate content* van 12 g/kg in een klei-omgeving. We veronderstellen verder statische grondwatercondities, een pH van het water hoger dan 3,5, en dat men een beton dient te gebruiken dat minstens beantwoordt aan de vereisten voor een gebruiksduur van minimaal 100 jaar. Dit betekent dat het beton minstens aan de kwaliteitsklasse DC-2 dient te beantwoorden. Onafhankelijk van de grootte van de gebruikte granulaten voldoet het voorgestelde beton met een poedergehalte (cement en kalksteenmeel, bindmiddelklasse B²⁶) van minstens 400 kg en een waterdosering van minder dan 180 kg/m³ aan deze vereisten.

Referentie maken naar de *Total Potential Sulphate Content* om de bovenste limiet van sulfaatconcentratie in een geïmmobiliseerd afval te bepalen is conservatief. Immers, de oxidatie van pyriet zal in werkelijkheid leiden tot een verzuring van de omgeving, terwijl in deze casus de pH steeds alkalisch zal zijn.

De **vulmortel** voldoet met zijn hoge gehalte aan CEM III/C en zijn uiterst lage W/C (van circa 0,36, zie §5.4) veruit aan de vereisten van een T(0,45)-beton, het welke volgens NBN EN 206-1 [R5-3] in een **XA3 klasse** wordt aangeraden. De BRE Special Digest 1:2005 [R5-225] laat niet toe de mortel in te schalen omwille van de granulaatgrootte, die slechts maximaal 2 mm bedraagt.

Beproevingen

Proeven toegewijd aan **klassieke sulfaataantasting** op dit **beton** met 30 g/L niet-geïmmobiliseerd sulfaat (met Na als tegenion) hebben geen aantasting aan het licht gebracht [§4.3.4 R5-35]. Ter vergelijking: het toegelaten sulfaatgehalte voor de klassen XA2 en XA3 is respectievelijk 3 g/L en 6 g/L vrij sulfaat in water. Dit toont aan dat de uitgevoerde testen (30 g/L vrij sulfaat in water) conservatief zijn.

Ook laat dit beton **uitmuntende prestaties** opmeten voor een **beton** dat volgens de norm 'slechts' conform de XA2-vereisten is (onder andere in termen van permeabiliteit alsook klassieke sulfaataantasting), wat te verklaren is door de toevoeging van kalksteenmeel en als zodanig strookt met de literatuur (onder meer [R5-132, R5-133 en R5-134]).

²⁶ Gebaseerd op ervaring van het FILLTECH project te WTCB wordt niet verwacht dat een dosering van maximaal 15gew.% kalksteenmeel tot een verlaging van de druksterkteklasse zal leiden. (Cfr WTCB FILLTECH – Rapport final, Tâche 6.2 P9/18)

Proeven, toegewijd aan **thumasietvorming** uitgevoerd **op het beton** (p28-p71 van [R5-135]), illustreren de resistentie van het beton tot dit aantastingsmechanisme. De opgelegde chemische condities waren zeer agressief: tot 18 000 ppm sulfaat en 4 500 ppm Mg. De blootstelling van de proefstukken aan deze condities werd uitgevoerd bij kamertemperatuur en bij 5°C om thumasietvorming te favoriseren. Eén jaar later werden de proefstukken ondergedompeld in een waterglas-oplossing gedurende 12 maanden. Het resultaat van de proeven toont aan dat het beton zeer resistent is tot thumasietvorming. Er was immers in geen enkel geval sprake van enige algemene degradatie van het proefstuk. De vorming van thumasiet is enkel vastgesteld bij de proefstukken bewaard op lage temperatuur en beperkte zich tot zeer lokale puntobservaties. Bij proefstukken bewaard op kamertemperatuur kon enkel de vorming van vaste mengsels thumasiet-ettringiet worden gedetecteerd, wat duidt op een indirecte vorming van thumasiet door uitwisseling van ionen.

Het gedrag van de **vulmortel** in combinatie met (geconditioneerde) concentraten werd onderzocht door IETcc [§4.5.3 van R5-37]. Proefstukken van deze mortel werden gedurende één jaar bewaard in een oplossing van 118 g/l Na₂SO₄, 264 g/l NaCl en 21 g/l Al(NO₃)₃.9H₂O ter simulatie van een niet geconditioneerd concentraat. Dit gebeurde zowel op kamertemperatuur als bij 5°C. De expansie van de proefstukken werd opgevolg en de buigsterkte werd gemeten en vergeleken met proefstukken bewaard in water. De resultaten tonen aan dat de mortel duurzaam is in dit milieu.

Literatuur

Ook in de literatuur wordt bewijs geleverd dat de voorgestelde **beton en mortel ongevoelig zullen zijn voor sulfaataantasting in hun verwachte omgeving, in nauw contact met conforme afvalvormen.**

Het feit dat uitloging niet zal plaatsvinden tenzij op zeer lange termijn, is in tegenstelling tot de meeste civiele betonstructuren die in contact komen met vrij water op een neutrale of zure pH. Het caissonbeton echter staat in contact met het gecementeerde afval en met de mortel, beide op hoge pH en in afwezigheid van vrij water. Ook wordt de monoliet niet onderworpen aan droog-nat-cycli, waaraan de meeste betonstructuren wel onderhevig zijn. Dit alles maakt dat het poriënwater van het caissonbeton en de mortel op relatief hoge pH blijft en dat hoge concentraties aan sulfaten vereist zijn om gesatureerd te zijn in gips [R5-136].

Door deze afwezigheid van vrij water is een uitloging die van een dergelijke aard is dat ze deze hoge concentraties kan bewerkstelligen, zeer onwaarschijnlijk. Ook bemoeilijkt de aanwezigheid van raakvlakken (caisson/mortel, afval/caisson, afval/mortel) en dense cementgebonden materialen (de mortel) een dergelijk transport (zie onder andere [R5-110]). Door de afwezigheid van droog-nat-cycli in de monoliet is de (plaatselijke) opconcentratie van sulfaten onmogelijk. De expansieve kristalvorm van ettringiet (ettringiet dat zich vormt in de kleine poriën in het C-S-H), vereist een hoge supersaturatie van het poriënwater om te kunnen vormen en groeien. **Een dergelijk hoge concentratie aan sulfaat en calcium is hoogst onwaarschijnlijk in afwezigheid van gips [R5-137, R5-138, R5-139, R5-140] en wordt dus zeer onrealistisch geacht voor zowel de mortel als het beton. Schade ten gevolge van ettringietaantasting is daardoor onwaarschijnlijk.** Hierdoor zal een verdere penetratie van sulfaten doorheen de mortel en beton stevig afgeremd worden en wordt ook eventuele **thumasietvorming bemoeilijkt.**

Thumasietvorming kan zich op de verwachte temperatuur van ongeveer 10°C enkel manifesteren via de indirecte route, over ettringiet. Thumasietaantasting van een op cement gebaseerd materiaal blijkt

daardoor een finaal aantastingsstadium [R5-141, R5-142]. Doch, in deze casus is het belangrijk op te merken dat thaumasiet enkel stabiel is indien de molaire verhouding SO_3 (het meetresultaat uit ICP-analyse (inductie gekoppeld plasma), waarin één mol SO_4^{2-} resulteert in een meetwaarde van 1 mol SO_3) tot Al_2O_3 meer dan drie bedraagt [R5-143]. Deze situatie kan zich alleen maar voordoen, indien al het geconditioneerde sulfaat (12 g/kg) uit de afvalvorm migreert zonder enige verdunning/verspreiding naar het beton. Om een thaumasietaan-tasting te geven in de mortel is zelfs een opconcentratie nodig. **Dergelijke situaties zijn hoogst onwaarschijnlijk tot onmogelijk.**

In de verwachte evolutie van het systeem, met een correcte werking van de aarden afdekking en de ondoorlatende topplaat, is er geen insijpelend water in de bergingsmodules. Daardoor is het zeer onwaarschijnlijk dat ettringiet, thaumasiet of gipsvorming zich zal voordoen in de monolieten ten gevolge van een interactie met conforme afvalvormen. Voor een uitgebreidere en gedetailleerde argumentatie wordt verwezen naar NIRAS-nota 2017-1893 [R5-131].

5.3.2.10.6 Impact van de corrosie van metalen

Wegens de zeer lage corrosiesnelheid van staal in een gecementeerde omgeving wordt er geen impact verwacht op de cementgebonden barrières [OD-187, §5.1]. (Zie ook §5.3.2.7.3.) Deze lage corrosiesnelheid **van staal** impliceert ook dat de verpakking van de primaire collo, zelf als ze niet volledig waterdicht is, een belangrijke bijdrage zal leveren aan het beperken van het vrijkomen van radionucliden en agressieve species [R5-36 en OD-187, §4.1]. Maar zelfs in het geval van een actieve corrosie zal de corrosiesnelheid beperkt blijven. Dit komt door de zeer hoge specifieke elektrische weerstand van de vulmortel ($>3 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ in $>95\%$ relatieve vochtigheid [§4.3.3 van R5-37]) [R5-38 en R5-39]. Wanneer de kunstmatige barrières (gedeeltelijk) zijn gedegradeerd, zullen de corrosieproducten van deze processen zich snel accumuleren en op een zeker ogenblik kunnen leiden tot scheurvorming door expansie.

Voor **aluminiumhoudend afval** wordt er geen impact verwacht [OD-187, §5.2]. Wanneer het Al met behulp van een cementmatrix geïmmobiliseerd wordt, zowel bij persschijven als bulkaluminium, wordt er steeds lithiumnitraat (LiNO_3) toegevoegd aan de vulmortel. In die omstandigheden vormt zich, bij enig contact tussen de mortel en het Al, aan het contactoppervlak een lithium-aluminiumlaag (Li-Al-laag) die het metaal beschermt tegen corrosie. Aangetoond is dat deze bescherming efficiënt is zolang door uitloging de pH van het systeem en/of de concentratie aan Li^+ voldoende hoog blijft [R5-40]. Zolang geen significante uitloging van de cementgebaseerde barrières en het afval plaatsvindt, zijn deze condities vervuld. Aluminium in het interne van een persschijf, zonder contact met de vulmortel, zal initieel passiveren. Echter, indien op een later tijdstip, in de berging, door diffusie enige alkalische oplossing in contact zou komen met het aluminiumafval, zal dit leiden tot een snelle, maar beperkte reactie, te wijten aan het beperkte volume aan elektrolyt en de geringe hernieuwing hiervan, ondanks het feit dat eventueel een groot oppervlak aan aluminium aanwezig kan zijn. Aan de reactiesites zullen de reactieproducten immers accumuleren en de reactie zal stilvallen [R5-41]. Corrosie van Al kan alleen ontstaan indien er hoge pH water door advectie (bijvoorbeeld in aanwezigheid van doorgaande scheuren) in contact komt met Al. Daardoor kan de beschermende Li-Al laag mogelijk zijn functie niet meer vervullen, reactieproducten worden snel geëvacueerd van de reactiesites en grote hoeveelheden elektrolyt zijn voorhanden. Het aluminium zal in deze omstandigheden corroderen en waterstofgas zal ontstaan. Dit

waterstofgas zal diffunderen via de wegen langs waar het water binnengedrongen was. Bijgevolg zal er geen drukopbouw zijn ten gevolge van deze corrosie.

5.3.2.11 Compatibiliteit met de vulmortel

Twee cementgebonden materialen op basis van een gewone cementsoort (CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V) zijn steeds compatibel omwille van hun gelijkaardige chemie.

Zowel de vulmortel (zie §5.4) als het klassiek gewapend beton is op basis van een klassieke cementsoort, een calcium-silicaat-cement.

5.3.2.12 Compatibiliteit met de hijsankers van de monoliet

De caissons uit klassiek gewapend beton zullen voorzien zijn van hijsankers uit laag gelegeerd staal. Deze hijsankers zullen blootgesteld worden aan de atmosfeer waardoor corrosie zal optreden. De verwachte corrosiesnelheden en de materiaalsoort worden beschreven in [HS-7].

De corrosie van de hijsankers van de monolieten zal de monolieten zelf niet mechanisch beschadigen. De argumentatie is gebaseerd op de resultaten van corrosie-experimenten van IETcc (de zogenaamde “*protubing tests*”) [R5-71]. Ze tonen aan dat:

- Ook al corrodeerde het stalen gedeelte dat aan de atmosfeer was blootgesteld, het gedeelte dat in het beton lag, niet aan corrosie onderhevig was en goed beschermd bleek (gepassiveerd). Het buitenste gedeelte heeft de functie van anode en wordt als het ware opgeofferd om zo het ingebedde staal tegen corrosie te beschermen;
- Tijdens de carbonatatie aan de interfase lucht/beton, corrosieproducten ontstaan rond het oppervlak van het staal in deze gecarbonateerde zone. Een belangrijke conclusie van de IETcc-studie [R5-71] is dat wanneer de verhouding van de dikte van de betondekking tot de diameter van het wapeningsijzer boven een drempelwaarde (> 1) ligt, geen scheuren in het beton zullen ontstaan ten gevolge van dit corrosieproces. In het geval van een monoliet bedraagt deze verhouding van de dikte van de betondekking tot de dikte van de ankers ongeveer 2 en ligt deze bijgevolg ver boven de drempelwaarde. Hierdoor zal de vorming van eventuele corrosieproducten in de gecarbonateerde zone geen mechanische schade aan de monoliet induceren.

Het bestaan van deze drempelwaarde is aangetoond voor een carbonatatediepte van enkele mm. Bij een exploitatiefase van 10 jaar waarin de monolieten aan beschutte atmosferische omstandigheden blootgesteld worden, zal de carbonatatediepte van de oudste monolieten ongeveer 5 mm bedragen (zie §5.3.2.6.1). Bijgevolg zullen er gedurende die periode geen scheuren optreden. Na deze periode worden de modules gesloten, wat betekent dat er geen atmosferische hernieuwing zal plaatsvinden, waardoor de bijkomende carbonatatediepte tot een periode van 350 jaar beperkt zal blijven tot enkele μm . Indien er toch vernieuwing zou zijn van de atmosfeer, zal de bijkomende carbonatatediepte na 350 jaar nog steeds minder dan 1 mm zijn (verwachte waarde van $K \leq 0.05 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-0.5}$, zie §5.3.2.6.1), dit gezien de hoge relatieve vochtigheid die snel na de sluiting van de modules bereikt wordt ($\geq 90\%$), wat de carbonatatiesnelheid sterk vermindert. Ankercorrosie zal dus geen scheuren in het beton teweegbrengen in de verwachte evolutie tot 1 000 jaar. Deze corrosie-experimenten van IETcc zijn een conservatieve benadering voor de corrosie van de hijsankers omdat:

- De beproevingen weliswaar specifiek gericht waren op deels ingebedde wapening, maar de proeven onder de minst gunstige omstandigheden uitgevoerd werden. Zo werden de betonproefstukken eerst atmosferisch verweerd en daarna onderworpen aan droog-nat-cycli waarna ze tevens ondergedompeld werden in een chloride-oplossing. De monolieten zullen echter niet aan dergelijke ongunstige omstandigheden worden blootgesteld. Immers, de modules (en dus ook de monolieten) zijn tijdens de exploitatiefase tegen regen beschermd en na sluiting is het geheel afgedekt door een aarden afdekking. Dit maakt dat er aan de interfase van beton/atmosfeer/hijsanker slechts een zeer kleine hoeveelheid of zelfs helemaal geen elektrolyt aanwezig is, wat enig corrosieproces sterk bemoeilijkt;
- Koolstofstaal, zoals gebruikt in de beproevingen, een hogere corrosiesnelheid dan laaggelegeerd staal heeft, zoals gebruikt voor de hijsankers. Hierdoor zal de laag van corrosieproducten dikker zijn in dit eerste geval en bijgevolg resulteren in meer scheuren.

5.3.2.13 Compatibiliteit met en effect op colloïden

Cementporiënwater van beton in toestanden I en II heeft een relatief hoge ionische sterkte, gecombineerd met een relatief hogecalciumconcentratie. Een dergelijke omgeving werkt zeer destabiliserend op colloïden. De relevantie van deze parameters op zowel kleicolloïden als cementcolloïden wordt aangetoond in [R5-173]. Voor colloïdale deeltjes van 300 nm diameter van *High Fly-ash and Silica fume-content Cement* (HFSC) werd geobserveerd dat 5×10^{-4} M Ca^{2+} voldoende was om de colloïden te destabiliseren [R5-173]. Deze waarde is veel lager dan deze die wordt verwacht in het poriënwater van beton in toestanden I of II. Het Europese project BELBaR [R5-174, R5-175, R5-176] kwam tot een gelijkaardige conclusie, namelijk dat het divalente calciumkation (Ca^{2+}) een sterk inhiberend effect heeft op bentonietcolloïden.

Tot een periode van 1 000 jaar wordt niet verwacht dat er grote delen van het bergingssysteem zich in een andere toestand dan I of II bevinden. Doch, indien dit zo zou zijn, is het aannemelijk dat dergelijke toestanden zich bovenaan de module bevinden. Indien deze zones überhaupt aanwezig zijn en er überhaupt colloïden gevormd worden, is het dus zeer plausibel dat de colloïden via advectie worden getransporteerd naar lageregelegene zones - waar toestand I of II overheerst -, wat de colloïden destabiliseert.

Toch worden ook in toestand IV slechts lage concentraties aan colloïden verwacht, hoewel geen experimenten ter ondersteuning kunnen worden ingeroepen. In een cementporiënwater van toestand IV wordt een dominantie van divalente kationen (Ca^{2+} en Mg^{2+}) verwacht over Na^+ [R5-177] wat de colloïden destabiliseert.

In [R5-173] wordt erop gewezen dat aanwezigheid van organisch materiaal zou kunnen zorgen voor een stabiliserend effect op cementcolloïden. Fulvuszuur-achtige materialen staan bekend om hun colloïdestabiliserend effect. In een experimentele opstelling [R5-178] met 10 mg/L bentonietcolloïden en 2,5 mg/L fulvuszuren kon worden aangetoond dat er in aanwezigheid van 0,1 M NaClO_4 (zonder andere kationen) een invloed was van de fulvische zuren op de colloïdenstabiliteit. Echter, in aanwezigheid van andere kationen (Ca of Mg) kon, onafhankelijk van de concentratie, geen effect worden vastgesteld. Dit leidde tot de conclusie dat zelfs zeer kleine concentraties aan Ca of Mg, het mogelijks stabiliserende effect van organische stoffen teniet kunnen doen.

ISA, volgend uit concentraties cellulose die in lijn zijn met de conformiteitscriteria, lijkt geen significant effect te hebben op de concentraties van colloïden in cementomgeving op lange termijn [R5-179]. In cement worden vaak organische additieven toegevoegd om bepaalde eigenschappen van cement te verbeteren. In een lopend onderzoek van NIRAS met AMPHOS 21 [R5-235] lijken dergelijke superplastificeers (PCE/Glenium) in *cement leachates* bij relevante concentraties geen effect te hebben op sorptie van radionucliden. Dit impliceert dus ook dat ze geen relevante invloed hebben op de colloïdenstabiliteit waardoor significante colloïde-radionuclide interactie zou optreden. Er wordt dus verondersteld dat organisch materiaal geen invloed zal hebben op de colloïdenconcentratie.

Op basis van bovenstaande wordt geconcludeerd dat de aanwezigheid van cement de destabilisatie van colloïden (die al dan niet hun oorsprong vinden in het cement) favoriseert waardoor deze verder buiten beschouwing mogen gelaten worden. Een uitgebreidere argumentatie kan men vinden in [R5-172].

5.3.2.14 Levensduurevaluatie

De voorziene levensduur van de betonnen barrières is belangrijk voor zowel het ontwerp als de langetermijnsveiligheidsevaluatie van de bergingsinstallatie.

Voor de tijdschalen in kwestie (verschillende eeuwen) zijn er geen gevalideerde modellen die gebruikt kunnen worden om de levensduur van de kunstmatige barrières te voorspellen. De doelstelling is om de elementen en de kwalitatieve (zelfs semi-kwantitatieve) argumenten²⁷ te geven die gebruikt kunnen worden om de grootteorde te bepalen. Hieronder geven we de kernboodschappen:

Gebaseerd op de eigenschappen van het Dessels milieu enerzijds en de geselecteerde betonformule anderzijds, kunnen bepaalde degradatieprocessen te allen tijde worden geëlimineerd omdat ze als irrelevant worden beschouwd.

Carbonatatie wordt verwacht de grootste impact te hebben op de toestand van de berging. Na duizend jaar, wanneer een (deel) van de aarden afdekking gedegradéerd is kan ook vries-dooi optreden. Gezien de lange tijdschalen is het nuttig ook uitloging te bespreken. Carbonatatie en uitloging kunnen, behalve hun impact (indien aanwezig) op de overige eigenschappen van het beton, leiden tot een geleidelijke daling van de pH in het materiaal dat uiteindelijk kan leiden tot een depassivatie van de wapening. Wapeningscorrosie is een van de voornaamste oorzaken van degradatie van gewapend beton en is bepalend voor zijn levensduur.

Vries-dooi resulteert in een verlies van cohesie en het ontstaan van scheuren in de betonhuid. Hierdoor wordt verwacht dat het een versnellend effect zal hebben op de degradatie van de betonstructuur.

Zolang de aarden afdekking de onderliggende structuur bedekt, en dit wordt verwacht tot een leeftijd van minstens 1 000 jaar, worden deze structuren efficiënt beschermd tegen **carbonatatie** en **vries-dooi-cycli**. Bovendien tonen de gegevens in de literatuur (zie 5.3.2.5.1) aan dat voor de beschouwde periode (<1 000 jaar) het fenomeen van **uitloging** (ontkalking) geen aantastingsmechanisme is dat waarschijnlijk leidt naar een depassivatie van de wapening in deze tijdspanne.

Na een periode van minstens 1 000 jaar kan (een gedeelte van) de modules bloot komen te liggen. Er zijn geen processen geïdentificeerd die kunnen leiden tot een plotse en grootschalige blootlegging van de

²⁷ "Meerdere lijnen van het bewijs"

modules. Hierdoor kan na een periode van minstens 1 000 jaar een deel van de modules onderhevig zijn aan atmosferische carbonatatie, vries-dooi-cycli en uitloging. Deze processen zullen de degradatie versnellen. De wapening zal na enige tijd actief beginnen corroderen, waardoor scheuren kunnen ontstaan. De betonconstructie uit gewapend klassiek beton zal hierdoor zijn functies niet meer kunnen vervullen.

- Er zal waterinsijpeling optreden in de modules;
- De sorptiecapaciteit zal door het scheurnetwerk in meer of mindere mate omzeild worden.

Om de mogelijke gevolgen van carbonatatie, vries-dooi en uitloging op de levensduur van de kunstmatige barrières te evalueren, worden de volgende aannames en randvoorwaarden toegepast [OD-187, §2.2 en 2.3]:

- De toegelaten verschillen in de betonformule tijdens de uitvoering in vergelijking met de referentiesamenstelling zijn zodanig dat deze geen significante invloed hebben op de eigenschappen en kenmerken (en dus ook niet op het langetermijnsgedrag);
- De constructies hebben geen scheurtjes die het chemische degradatieproces in belangrijke mate kunnen beïnvloeden, bijvoorbeeld door het transport van agressieve elementen te stimuleren (geen chemo-transport-mechanische koppeling);

Op basis van de fenomenologie beschreven in dit hoofdstuk wordt in het beton van de modules geen initieel aanwezige scheurpatronen verwacht die de mechanische eigenschappen en de performantie van de barrières negatief zouden kunnen beïnvloeden.

In de praktijk zijn de scheuren als gevolg van verhinderde krimp de meest verontrustende voor de kwaliteit en de duurzaamheid van het beton, al worden deze beperkt door het fenomeen ‘relaxatie’ (kruip: zie §5.3.2.9).

Men kan krimp nooit volledig uitschakelen. Krimp is inherent aan beton, maar door correcte praktijken kan men het krimpfenomeen gedeeltelijk beperken, alsook de negatieve effecten hiervan zo veel mogelijk uitsluiten. Daarom is voor zowel de modules als de caissons het beperken van krimp een belangrijk element in het garanderen van een optimale duurzaamheid van het beton. Als men een geschikte samenstelling voor het beton gebruikt (zoals lage hydratatie warmte, kalksteenaggregaten [OD-187, §2.3.2.1]) en de goede praktijken met betrekking tot het realiseren van de constructies en de uithardingsomstandigheden naleven (nabehandeling [HS-7 §7.5; HS-8, §8.6 en 8.8]), dan beperkt men deze fenomenen die eventueel kunnen leiden tot scheurvorming.

De demonstratieproef geeft de efficiëntie van deze benadering geïllustreerd. Op de demonstratieproef gebouwd in 2011 werden (anno 2018) geen scheuren vastgesteld. Ook bleek dat werfproefstukken en boorkernen ontnomen uit de wanden van dit bouwwerk, een gelijkaardige carbonatatiesnelheid lieten opmeten onder versnelde condities [R5-15]. Dit betekent dat de eventueel aanwezige (micro)scheuren in de demonstratieproef, ontstaan door (verhinderde) krimp, geen significante invloed hadden op de carbonatatiesnelheid van het beton.

- Een homogene structuur wordt beschouwd;
- Er is waarschijnlijk geen kruip die de integriteit van de constructies op lange termijn aantast [OD-187, §2.3.2.1],

- De aarden afdekking handhaaft haar beschermende rol voor de betonconstructies tot 1 000 jaar,
- De toegepaste materialen, in het bijzonder die van de afdekking, bevatten geen agressieve elementen (zoals chloriden en/of sulfaten) in hoeveelheden die een potentiële bron van degradatie kunnen zijn.

5.3.3 Resterende onzekerheden

5.3.3.1 Scheurvorming en zelfdichting

Al verwachten we op basis van de fenomenologie beschreven in dit hoofdstuk geen initieel aanwezige scheurpatronen die de mechanische eigenschappen en de performantie van de barrières uit klassiek gewapend beton negatief zou kunnen beïnvloeden, we herhalen dat men krimp nooit volledig kan uitschakelen. Krimp is inherent aan beton, maar door correcte praktijken kan men het krimpfenomeen gedeeltelijk beperken alsook de negatieve effecten hiervan zo veel mogelijk uitsluiten.

- Het ontwerp wordt zo gemaakt om de opening van de scheuren te beperken tot 200 µm voor de caisson [HS-7, §7.4.2, DR9.g] en tot 300 µm voor de modules [HS-8, §8.5.1.3];
- Passende uithardingsomstandigheden (bv. beschermen van het beton tegen uitdroging gedurende de eerste dagen) tijdens de constructie worden toegepast;
- Een specifieke volgorde bij de constructie is voorzien om de opening van de scheuren te beperken ([HS-8, §8.6.1.2] en [R5-164]).

De realisatie van prototypes (voor de monolieten) en van een demonstratieproef (voor de modules) heeft deze keuzes gevalideerd.

We willen tevens benadrukken dat scheuropeningen van respectievelijk 300 µm en 200 µm voor de modules [HS-8, §8.5.1.3] en de caissons [HS-7, §7.4.2, DR9.g] conservatieve ‘ontwerpwaarden’ zijn. Het zijn afgeleide codewaarden die de onzekerheden omhullen die inherent zijn aan dergelijke berekeningen (benadering van het ontwerp, grote veiligheidsmarge). Zoals reeds vermeld verwachten we scheuropeningen die onmiskenbaar kleiner zijn dan deze waarden en ondiep zijn indien ze voorkomen. Dit wordt in ieder geval bevestigd door het onderzoek op de prototypes (monolieten) die reeds werden geproduceerd [R5-98, R5-106].

In deze context is het interessant te weten dat ook is aangetoond dat het toepassen van een kleine druk ($> 0,2 \text{ N/mm}^2$) in aanwezigheid van water resulteert in de zelfdichting van scheuren²⁸ [§5 uit R5-120]. Zelfdichting van scheuren is waarschijnlijker wanneer er een lage hydratatiesnelheid is in de cement. Bij aanwezigheid van deze druk gaat het zelfdichtingsproces sneller. Wanneer aan het einde van het hydratatieproces de temperatuur begint te dalen, zullen de zijanten van de buitenwanden van de modules worden gecompriëerd. Elke scheur die tijdens deze periode wordt gevormd, wordt hierdoor zelf gecompriëerd [R5-215, R5-216]. Dit is een gunstige situatie voor zelfdichting.

Na de realisatie van de afdekking zal het beton gekenmerkt zijn door een hoge graad van verzadiging wat het zelfdichten van eventuele scheuren bevordert. Gezien de verwachte kleine scheuropeningen aan de

²⁸ Niet-doorgaande scheuren tot een opening van 150 µm.

wapening²⁹, moet de zelfdichting gepaard gaan met repassivatie van het potentieel gedepasseerd staal (door de diffusie van hydroxylionen onderaan de scheur). Het systeem zal daarom snel overgaan naar een zogenaamde slapende fase (inactieve scheuren).

In conclusie: Indien scheuren zich initieel vormen, wordt verwacht dat deze relatief beperkt in breedte zijn en ondiep zullen blijven, al is de exacte grootte onzeker. Maar, indien ze toch aanwezig zijn, zijn de omstandigheden na het plaatsen van de aarden afdekking ideaal voor een eventuele zelfdichting, al is dit proces van zelfdichting complex en vervat het nog meerdere onzekerheden.

5.3.3.2 Overige onzekerheden

Het voorziene O&O-programma en *in situ*-metingen zijn gericht om een bevestiging van de hypothesen te krijgen voor het beoordelen van de levensduur van gewapende beton constructies.

Uit de voorgaande subparagrafen volgen onzekerheden voor de langetermijnsevolutie van de betonnen componenten met betrekking tot:

- Het evolutionair pad. Tot ongeveer 1 000 jaar kan de evolutie van de kunstmatige barrières op basis van klassiek gewapend beton omhullend worden beschreven. Na 1 000 jaar worden de onzekerheden groter;
- Tijdsduur voor het ontstaan van grote scheuren die de performantie van de kunstmatige barrières beïnvloeden en kunnen leiden tot waterinsijpeling;
- De spreiding in de tijd van de degradatie van de barrières op basis van klassiek gewapend beton. Er wordt geen abrupt verlies van fysische eigenschappen verwacht, maar wel een geleidelijke toename van heterogeniteit;
- Kenmerken van de scheuren (breedte, patroon) en de evolutie van de scheuren en de vorming van netwerken die een effect kunnen hebben op de waterstroming in de tijd;
- De precieze initiële saturatiegraad en de precieze evolutie hiervan en het effect op de hydraulische geleidbaarheid; de effecten van chloriden en cellulose in een aantal specifieke afvalstromen op de retentie van radionucliden en op de performantie van gewapend beton barrières;
- de fysische eigenschappen porositeit, bulkdichtheid, diffusiviteit, dispersie, permeabiliteit van gedeeltelijk gedegradeerde cementgebonden barrières;

Het effect van sommige van deze onzekerheden wordt verder geanalyseerd aan de hand van specifieke gevoeligheid- en onzekerheidsanalyses, andere worden benaderd met conservatieve aannames in de veiligheidsevaluaties [HS-14, §14.4.4].

5.3.4 Performantie-indicatoren

Om de samenstelling van het beton voor de caissons en modules vast te leggen, werd ten dele gesteund op de ontwikkelingen uit de studies van de betonbuffer voor het ontwerp van de supercontainer (huidige referentie voor de verpakking van hoogradioactief verglaasd afval (HLW) en bestraalde splijtstof met het

²⁹ Mechanische beperkingen beperken zich tot de wapening (scheuropeningen zijn duidelijk kleiner dan diegene die aanwezig zijn aan de oppervlakte).

oog op eindberging in een geschikte kleiformatie). Deze zogenaamde supercontainer heeft een zeer groot bufferend vermogen (en dus een hoge weerstand tot carbonatatie, wat een belangrijke troef is) en is gebaseerd op niet ASR-gevoelige kalksteengranulaten om enige vorm van ASR uit te sluiten. Deze keuze van de materialen en de samenstelling van dit beton werden aanbevolen door een groep van internationale experts. De gerapporteerde kenmerken voor dit beton getuigden van een zeer hoge kwaliteit. Daarom was het niet meer dan logisch om het voorbeeld van deze werken te volgen bij het bepalen van de betonsamenstelling voor de caissons en modules uit klassiek gewapend beton.

Daarnaast deed NIRAS in belangrijke mate beroep op ENRESA en IETcc, gezien de gelijkennis tussen de Belgische en de Spaanse concepten (El Cabril) aan de ene kant, en de ruime ervaring opgedaan door ENRESA en IETcc aan de andere kant. Dit leidde tot een optimalisering van de betonformule [OD-011 §2].

De keuze van materialen beoogt het beperken, zelfs in sommige gevallen het uitsluiten, van enige mogelijke degradatiemechanismen. Een belangrijke functie die wordt toegekend aan het beton, is de bescherming van de wapening tegen corrosie. (Zie ook hier de gelijkennis met de supercontainer waar het beton een stalen *overpack* beschermt tegen corrosie.)

De volgende materialen werden geselecteerd voor het klassiek gewapend beton van de caissons en de modules:

- Cement:
 - ▶ CEM I: dit type van cement garandeert een maximale pH-buffercapaciteit (carbonatatie, wapeningscorrosie). Er is een betrouwbare thermodynamische database voor dit type cement (data als onderdeel van de geochemische modellen voor de ontwikkeling van kunstmatige barrières);
 - ▶ HSR, (SR 0 of SR 3) *High Sulfate Resistant*, of gelijkaardig, om elk risico van een sulfaataantasting te verminderen;
 - ▶ LH (lage hydratatiewarmte), of gelijkaardig, om de thermische effecten veroorzaakt door de binding van de cement (voornamelijk voor de modules) te beperken. De betontemperatuur van de modules zal gemonitord worden gedurende de uitharding;
 - ▶ LA (laag alkali-gehalte), of gelijkaardig, om de hoeveelheid alkali te verminderen en zo bij te dragen aan een betere duurzaamheid.
- NS type superplastificeerder: door zijn chemische aard, heeft dit type superplastificeerder niet de mogelijkheid tot complexatie van radionucliden om hun mobiliteit te vergroten.
- PCE type superplastificeerder: beproevingen op dit type superplastificeerder tonen aan dat deze niet leidt tot een verlaagde sorptie van radionucliden in de gebruikelijke dosissen [R5-107, R5-105].
- Kalksteenaggregaten: de belangrijkste redenen voor het gebruik van gebroken kalkhoudende aggregaten zijn:
 - ▶ Ze worden gebruikt als alternatief voor siliciumachtige aggregaten om het risico op alkali-silica reacties (ASR) te vermijden. Specificaties met betrekking tot hun chemische samenstelling worden vastgelegd;

- ▶ De treksterkte van het beton op basis van gebroken aggregaten is in het algemeen hoger dan deze van beton op basis van afgeronde aggregaten;
- ▶ Kalkhoudende aggregaten hebben een thermische uitzettingscoëfficiënt die lager is dan hun siliciumachtige tegenhangers, wat helpt bij het beperken van thermische krimp;
- ▶ Hoekige (of langwerpige) aggregaten genieten de voorkeur omdat zij helpen bij de vorming van een stabiel skelet in de zone die degenereert door uitloging. Het gebruik van gebroken kalksteenaggregaten is hiervoor een voordeel.

De correcte dosering en het gebruik van de juiste materialen zal het onderwerp zijn van een uitgebreid QA/QC-plan. Een dergelijk plan is een essentieel en fundamenteel element voor het waarborgen van een consistente kwaliteit voor de productie van het beton.

Met het oog op de performantie op lange termijn zullen op verschillende niveaus controles gebeuren tijdens de productie, zowel op de gebruikte grondstoffen als op eventuele halfproducten. Zie ook [HS-7, §7.5.3] en [HS-8 §8.8] voor het geheel van ontwerpvereisten en hun link met de ontwerpinputs.

Behalve een correcte samenstelling is het tevens evident dat het beton juist moet geplaatst worden. De afwezigheid van grindnesten, de goede omhulling van de wapeningsstaven, met andere woorden een correcte verdichting moet geverifieerd worden gedurende de constructie.

Behalve zijn duurzaamheid, die gewaarborgd is door het gebruik van de juiste materialen in de juiste verhoudingen en geplaatst volgens de regels van de kunst, is het beton ook *robuust*. Een lichte afwijking in de doseringen zal niet leiden tot een grote wijziging in zijn karakteristieken. Dit is aangetoond met behulp van een gevoeligheidsstudie. De resultaten tonen duidelijk aan dat voor de geteste samenstellingen (en gedefinieerd volgens de geldende normen) het beton vrij ongevoelig is voor productievariaties.

De performantie-indicatoren zijn:

- Voor wat betreft de modules, een beperkte opwarming van de betonstructuur tijdens uitharding (maximum 65°C ³⁰);
- Een correcte plaatsing van het beton met een goede omhulling van de wapeningsstaven en verdichting;
- De sorptiecapaciteit.

³⁰ Indien het equivalent alkali-gehalte van het beton, berekend volgens de methode uit TRA 21-600:2008 kleiner is dan 3 kg/m^3 . Indien niet aan deze voorwaarde voldaan is zal de uithardingstemperatuur $\leq 60^{\circ}\text{C}$ dienen te zijn.

5.4 Vulmortel

Een samenstelling (SFFC3) (zie ook [HS-7], §7.3.4) werd opgesteld door het WTCB-CSTC [R5-55]. In parallel met een gevoeligheidsstudie (zie verder) werd deze na enkele beproevingen op groter volume licht bijgestuurd door Belgoprocess [R5-166]. Dit resulteerde in volgende samenstelling, IPM1. Het belangrijkste verschil tussen SFFC3 en IPM1 is de grootte van de zandfractie. Vandaag is deze samenstelling, IPM1, de referentiesamenstelling.

Van deze samenstelling, IPM1 bestaan er twee varianten: één met een vloeibare superplastificeerder (Tabel 5-5) en één met een superplastificeerder in droge vorm (Tabel 5-6), beide met een gelijkaardige chemie (N/S, Naftaleen/Sulfonaat).

Alle componenten van deze samenstelling kunnen verder geoptimaliseerd worden, gebaseerd op feedback van de hogervermelde proefprogramma's en in een latere fase rekening houdend met de technische specificaties van de uitrustingen en de processen die zullen gebruikt worden tijdens de productie van de monolieten.

Het is onmogelijk om vandaag, zonder een IPM en zonder dat alle aangehaalde studies ten einde zijn, alle mogelijke aanpassingen aan de mortel reeds te voorzien. A priori denkt men hierbij onder meer aan het gebruik van andere, doch gelijkaardige ruwe grondstoffen (CEM III/B in plaats van CEM III/C in geval van bijvoorbeeld schaarste op de cementmarkt, andere leverancier of types, bijkomende dosering van extra hulpstoffen, enzovoort) alsook mogelijk kleine wijzigingen in de verhoudingen van de dosering of granulometrie.

Binnen de grenzen bepaald door de gevoeligheidsstudie, is geen nieuwe karakterisering noodzakelijk (zie [HS-2 §2.3]). Indien optimalisering zou leiden tot een samenstelling buiten deze grenzen, zijn bijkomende karakterisering en gevoeligheidsstudies noodzakelijk. Elke samenstelling zal voldoen aan de conformiteitscriteria (zie [HS-15]).

Tabel 5-5: Samenstelling van mortel IPM1 (variant met SP in droge vorm)

Product	Dosering (kg/m ³)
CEM III/C 32,5N	637.21
Condensil S 95DS (<i>silica fume</i>)	39.01
Calcitec 2001 M (kalksteenmeel)	101.09
Melcret 500F (naftaleen sulfonaat)	6.37
Kalksteen < 100 µm	90.75
Kalksteen 0,1 mm – 0,5 mm	403.98
Kalksteen 0,5 mm – 1 mm	299.30
Kalksteen 1 mm – 2 mm	412.34
Water	228.76
W/C	0,36

Tabel 5-6: Samenstelling van mortel IPM1 (variant met SP in natte vorm)

Product	Dosering (kg/m ³)
CEM III/C 32,5N	637.21
Condensil S 95DS (<i>silica fume</i>)	39.01
Calcitec 2001 M (kalksteenmeel)	101.09
Melcret 500L (naftaleen sulfonaat)	16.00
Kalksteen < 100 µm	90.75
Kalksteen 0,1 mm – 0,5 mm	403.98
Kalksteen 0,5 mm – 1 mm	299.30
Kalksteen 1 mm – 2 mm	412.34
Water	219.16
W/C (excl. water uit SP)	0,34
W/C (incl. water uit SP)	0,36

5.4.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

Er werd een referentieformule bepaald, ook al is de superplastificeerder nog niet definitief gekozen (deze laatste heeft geen invloed op de eigenschappen in uitgeharde toestand of de duurzaamheid van de matrix). De vereisten voor de mortel zijn weergegeven in [HS-15, Tabel 5-17 in bijlage II] (zie ook OD-187, §1.3).

Testen op voorlopige samenstellingen gaven een goede indicatie van de te verwachten eigenschappen van de vulmortel [R5-35].

5.4.1.1 Rol

Cementgebonden materialen in de kunstmatige barrières in het bergingssysteem kunnen de waterstroming beperken (veiligheidsfunctie R2a) en/of kunnen radionucliden chemisch adsorberen in het bergingssysteem (veiligheidsfunctie R3) en/of kunnen de diffusie van radionucliden in een poreus medium beperken (veiligheidsfunctie R4a).

De veiligheidsfuncties van deze component zijn beschreven in hoofdstuk 2 [HS-2].

5.4.1.2 Eigenschappen

5.4.1.2.1 Hydraulische geleidbaarheid

Metingen van de waterpermeabiliteit van een voorlopige samenstelling van de opvulmortel leverden een waarde die iets lager was dan voor varianten van het beton voor de caissons en modules [R5-35, §4.4.2, Tabel 4.17, pp.78-79]. Een lagere waarde voor waterpermeabiliteit is bovendien coherent met een hogere gemeten waarde van elektrische weerstand voor mortel dan voor beton [R5-35, §4.3.3, Tabel 4.10, pp.52-53]. De lagere waarde is ten slotte ook coherent met een lagere gemeten waarde van capillaire waterabsorptie [R5-35, §5, Tabel 5.1, p. 89]. De voorlopige samenstelling uit [R5-35, Tabel 3.2 p4] heeft

gelijkaardige bestanddelen³¹ en water tot cement verhouding als de momenteel gehanteerde referentiesamenstelling IPM1.

De mortel zal net als de caisson gemaakt worden in een specifiek daarvoor bestemde industriële installatie. In deze installatie zullen de constructie- en omgevingsparameters strikt gecontroleerd worden. Om deze redenen is het een goede benadering om voor de opvulmortel van de monoliet dezelfde waarden voor de hydraulische geleidbaarheid te hanteren als voor het beton van de caissons.

NIRAS heeft bijgevolg de volgende waarden geselecteerd voor de hydraulische geleidbaarheid van de vulmortel van de monoliet:

- Bij bijna-watersaturatie (waarden gebruikt als startpunt van waterretentiecurve): minimum 1×10^{-14} m/s, maximum 2×10^{-13} m/s, geen beste schatting.
- Bij 80% watersaturatie: beste schatting $1,5 \times 10^{-15}$ m/s, we nemen een factor 10 om onzekerheden in rekening te brengen: minimum $1,5 \times 10^{-16}$, maximum $1,5 \times 10^{-14}$ m/s.

5.4.1.2.2 Porositeit

Metingen met behulp van kwikporosimetrie van voorlopige samenstellingen van de mortel leverden waarden op die variëren tussen 7 en 12% [R5-35]. Nieuwe testen zijn bezig op de huidige referentiesamenstelling IPM1. Literatuurdata voor mortels met vergelijkbare W/C vertonen een gelijkaardige range van porositeitswaarden [R5-56, R5-57 en referenties daarin, R5-58, R5-59, R5-60].

Gebaseerd op deze gegevens selecteren we volgende waarden:

- Beste schatting: 10%
- Verwachte range: 7 – 12%

5.4.1.2.3 Droge bulkdichtheid

De droge bulkdichtheid is nauw verbonden met de porositeit.

De waarden voor intacte mortel zijn [OD-108, §9.2.1]:

- Beste schatting: 2220 kg/m³
- Verwachte range: 2210-2230 kg/m³

5.4.1.2.4 Dispersiviteit

Er werd geen studies gevonden betreffende dispersiviteit van (beton of) mortel.

5.4.1.2.5 Sorptie

Door de combinatie van hoogovenslakken (het hoofdbestanddeel van CEM III/C) en *silica fume* in de opvulmortel is de verhouding van calcium tot silicium in het bindmiddel significant lager dan in het bindmiddel van het beton van de caissons of modules. Gezien deze samenstelling van de mortel is het zeer waarschijnlijk dat de pH (in standaardomstandigheden) zal evolueren naar een lagere waarde dan

³¹ In de voorlopige samenstelling van de mortel waren de granulaten dolomietsteen. In de huidige mortelformule(s) is dit kalksteen (zie ook p101 van [R5-227]).

12,45 – de pH van een verzadigde portlandietoplossing in standaardomstandigheden – op relatief korte termijn. Door reactie met de hoogovenslakken en de *silica fume* zal het gehalte aan vrije alkaliën afnemen terwijl ook portlandiet (quasi) afwezig zal zijn op termijn [R5-231]. De effecten van deze fenomenen op de pH van het poriënwater zijn beschreven in [R5-108].

Meer concreet wordt de verhouding CaO tot SiO₂ in de opvulmortel geschat op ongeveer 1,29 à 1,40 mol/mol, afhankelijk van de exacte compositie van de bestanddelen en hun verhoudingen in het CEM III/C-cement. In afwezigheid van uitloging, carbonatatie en in evenwicht, is de pH van een C-S-H-gel met een dergelijke verhouding gelijk aan ongeveer 12,1 à 12,2 [R5-232], aldus de modelering van Gisby et al. die ondermeer gevalideerd is met behulp van de data van Harris [R5-233].

Deze pH-waarde (ongeveer 12,1 à 12,2) wordt bijgevolg aangenomen een goede schatting te zijn voor de onderwaarde voor de pH van een cementeus systeem zoals de opvulmortel. De werken van B. Lothenbach et al [R5-231] en C. Cau-dit-Coumes et al. [R5-234] indiceren bovendien dat de pH hoger kan zijn. Tevens vermelden we dat de pH van een gelijkaardige mortel (CEM III/C met *silica fume*) op een leeftijd van één maand gemeten werd door IETcc. Het resultaat hiervan was een pH van ongeveer 12,4 [R5-35]. De evolutie van de pH van de opvulmortel zal onderwerp uitmaken van toekomstig onderzoek.

Toestand II eindigt stricto sensu wanneer de pH van de mortel niet meer gebufferd is door portlandiet en (bij standaard omstandigheden) daalt tot een waarde kleiner dan 12,45. De mortel bevindt zich bijgevolg stricto sensu op termijn niet in toestand II. De opvulmortel zal zich in toestand III bevinden, in het begin van de pH-daling. Dit is, zoals hoger geïndiceerd, het gevolg van het feit dat portlandiet weggereageerd zal zijn door de reactie met silicafume en de hoogovenslakken alsook door incorporatie van alkaliën in de gevormde hydratatiefasen. Omdat de sorptiewaarden hierdoor slechts een weinig gevarieerd zijn, ten opzichte van deze van toestand II, blijven de meest representatieve sorptiewaarden uit Tabel 5-3 toch die van toestand II en zijn dit niet die van toestand III. Immers de sorptiewaarden voor toestand III uit Tabel 5-3 zijn per conventie onder de betrokken deskundigen deze (in standaard omstandigheden) bij een pH van ongeveer 11 [OD-038 §2.7], wat een significante alteratie (door uitloging) van het materiaal impliceert en dus niet representatief is voor de opvulmortel de eerste honderden of duizend jaar. Door de langzame kinetiek van het diffusiegedomineerd uitlogingsproces (zie § 5.3.2.5) wordt dit proces immers niet verwacht bepalend te zijn voor de verwachte evolutie.

5.4.1.2.6 Gewichtsfractie uitgeharde cement

Mortel (en beton) bestaat voornamelijk uit granulaten en uitgeharde cement (*hardened cement paste, HCP*). De uitgeharde cement draagt in belangrijke mate bij aan de sorptiecapaciteit van componenten uit beton of mortel. De gewichtsfractie aan uitgeharde cement is dan ook een belangrijke input voor de veiligheidsevaluaties.

De stoichiometrische massaverhouding tussen water en portlandcement is ongeveer 0,4. Dit betekent dat voor een beton met een water tot cement verhouding van minder dan 0,4 de hoeveelheid HCP per m³ mortel als volgt kan berekend worden:

$$\text{HCP} = W(1+2,5) \text{ met } W \text{ het aantal kilogram water per m}^3 \text{ mortel.}$$

Voor een mortel met 637 kg/m³ cement en een W/C van 0,36 geeft dit bijgevolg 802 kg/m³, oftewel 36 gew.% (= 802 / 2220).

5.4.1.2.7 Diffusiecoëfficiënt

De vulmortel is op basis van een cement rijk aan hoogovenslakken. Materialen op basis van cement zijn beter chlorideresistent indien hoogovenslakken zijn toegevoegd, maar dit kan niet verklaard worden enkel en alleen door een verhoogde weerstand tegen chloridemigratie. Sommige auteurs schreven dit effect toe aan de vorming van Friedel's zout, maar anno 2018 is gekend dat voornamelijk hydrotalciet aan de basis van deze observaties ligt dankzij zijn chloride-sorptiecapaciteit, die de hoeveelheid vrije chloorionen in het poriewater beperkt [R5-206, R5-207, R5-208] en aldus corrosie mitigeert. Belangrijk om te melden is dat er indicaties zijn dat carbonaten (waarvan kalksteen en kalksteenmeel een grote bron kan zijn) de vorming van deze fase zouden kunnen verhinderen [R5-208].

Toch kan verwacht worden dat de vulmortel een lagere diffusiecoëfficiënt zal hebben dan "Beton 1" of "Beton 2". Immers de lage water-tot-cementverhouding van 0,36 resulteert in een nauwer poriënnetwerk, wat migratie bemoeilijkt. Tevens zijn er ook indicaties dat de toevoeging van hoogovenslakken de poriestructuur enigszins vernauwt en chloridemigratie terugdringt [R5-206]. Ook *silica fume* zou de diffusiecoëfficiënt sterk terugdringen, wat blijkt uit metingen van Johnston en Wilmot die meer dan tien verschillende samenstellingen beproefd hebben [R5-209].

Metingen op een zeer preliminaire samenstelling van de vulmortel resulteerden in een schijnbare chloridediffusiecoëfficiënt van $2,23 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ en een effectieve van $4,36 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ [R5-35]. NIRAS selecteert daarom deze waarde als de beste schatting voor de effectieve chloridediffusiecoëfficiënt voor de vulmortel. Zie ook [OD-108, §6.2.4.3].

In saturatie kan de poriëndiffusiecoëfficiënt berekend worden door de effectieve chloridediffusiecoëfficiënt te delen door de porositeit. Voor de vulmortel selecteert NIRAS daarom $4,07 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ als een beste schatting. Zie ook [OD-108, §6.5.1].

5.4.1.3 Verwacht gedrag

Op lange termijn **evolueert de saturatiegraad** van de mortel van een niet-gesatureerd systeem naar een bijna-gesatureerd systeem.

Daarnaast is **carbonatatie** een belangrijk proces voor de evolutie van de mortel op zeer lange termijn (> 1 000 jaar). Inderdaad, de vulmortel zal omgeven zijn door een caisson en dus pas blootgesteld zijn aan CO₂ na het falen van deze barrière. Waar de vulmortel toch reeds plaatselijk blootgesteld is aan koolzuurgas (CO₂) (via de vulopeningen in het deksel van de caisson) zal het carbonatatieproces traag verlopen omwille van de gesatureerde toestand en de lage partiële druk.

5.4.1.3.1 Hydraulische geleidbaarheid

Initieel zal de mortel zich in een toestand van saturatiegraad van ongeveer 80% bevinden. Naarmate de saturatiegraad toeneemt tot bijna verzadiging, zal de geleidbaarheid, naar analogie met beton, met een factor 20 tot 100 toenemen.

Het cement van de mortel is CEM III/C. Bij carbonatatie van een CEM III/C domineert het effect van de microscheuren op het effect van het opvullen van de poriën (zie ook §5.3.2.6). Daarom wordt een toename van de hydraulische geleidbaarheid verwacht bij carbonatatie.

Echter, de carbonatatie zal in gesatureerde toestand zeer traag verlopen en het effect hiervan zal verwaarloosbaar zijn ten opzichte van het effect van de saturatiegraad.

5.4.1.3.2 Sorptie

De sorptie-eigenschappen voor een volledig gecarbonateerd front van de mortel zijn de sorptiewaarden van toestand IV (Tabel 5-3).

5.4.1.3.3 Porositeit

Voor mortel wordt een vermindering van de porositeit van 5 à 10% gerapporteerd als gevolg van carbonatatie [R5-18, R5-32, R5-33].

5.4.1.3.4 Droge bulkdichtheid

De evolutie van de bulkdichtheid zal deze van de porositeit volgen.

5.4.1.3.5 Diffusiecoëfficiënt

Bij gebruik van een CEM III zal de poriëndiffusiecoëfficiënt echter verhogen door carbonatatie [R5-218].

5.4.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

Voor wat betreft de degradatiemechanismen worden dezelfde als zoals voor klassiek gewapend beton (zie § 5.3.2) beschouwd, met uitzondering van deze die rechtstreeks verband houden met de aanwezigheid van wapeningsijzers en vries-dooi die hier om evidente redenen niet beschouwd wordt:

- Binnendringen van chloriden;
- Sulfaataantasting (externe en interne);
- Degradatie door alkali-silica reactie;
- Biodegradatie;
- Ontkalking;
- Carbonatatie;
- Kruip;
- Krimp;

Voor wat krimp betreft, is het belangrijk om volgende informatie, die specifiek voor de mortel is, mee te nemen. De mortel heeft door zijn lage W/C en hoog cementgehalte een belangrijke vrije krimp. Dit wordt eenvoudig opgemeten op proefstukken en is in de grootteorde van 2 à 3 mm per meter [R5-149, data relevant voor mengsels met W/C 0,364]. Omdat de mortel te allen tijde omgeven is door de caisson, die vochtuitwisseling tussen mortel en omgeving verhindert, zijn deze metingen conservatief. Realistischer zijn de metingen die op omwikkelde proefstukken zijn uitgevoerd. In deze situatie werd een significant lagere krimp opgemeten van om en bij de 1,5 mm/m. Deze waarde is nog altijd veel groter dan deze opgemeten op het referentiebeton voor de caissons (ca 400 µm/m) [OD-134, §3.4.10]. Doch geeft deze cijferwaarde niet het volledige risico op scheurvorming weer.

Effecten zoals relaxatie en kruip kunnen in het voordeel spelen en het risico op scheuren reduceren. De toevoeging van additieven om de krimp te beperken werd echter wel onderzocht [§4.3.2 van R5-37, R5-149], doch tot op heden zonder succes.

Deze autogene krimp van de vulmortel zou ertoe kunnen leiden dat er een scheur ontstaat in de mortel tussen het primair collo en de caissonwand (ter hoogte van lokale verdikkingen van het collo). In het voorjaar van 2016 zijn er prototypemonolieten gemaakt en doorgezaagd voor visuele inspectie waarbij lokale scheuren vastgesteld werden in de mortel tussen de primaire colli en de caissonwand.

Autogene krimp van de vulmortel kan er ook toe leiden dat er een scheur ontstaat tussen de mortel en de wanden van de caissons en/of aan het raakvlak tussen de primaire collo en de mortel. Hoewel in de gerealiseerde prototypes geen grootschalige en systematische scheuren werden geobserveerd, zijn lokaal kleine scheuren tussen de vulmortel en de andere onderdelen van de monoliet (inclusief afval) mogelijk. Deze scheuren worden zoveel mogelijk beperkt (door bijvoorbeeld het verzekeren van geschikte uithardingscondities of de optimalisatie van de samenstelling/ aanmaakprocedure van de mortel) en zijn maximaal enkele mm. Het is niet verwacht dat er over de ganse omtrek en hoogte van het deksel een verticale doorgaande scheur zal zijn waardoor invloed van dergelijke scheuren op de langetermijnveiligheid beperkt blijft.

■ Thermische scheuren.

Gezien het gebruik van een cement op basis van hoogovenslakken worden hier betere prestaties verwacht dan bij klassiek gewapend beton. Deze verwachting werd gedemonstreerd gedurende het testprogramma op monolieten in 2016. Het testprogramma voorzag in het vullen van twee type I en één type III monolieten. Deze werden na uitharden doorgezaagd en geïnspecteerd. De omhulling van het afval was integraal; slechts enkele scheuren konden opgemerkt worden. De temperatuur van de mortel steeg slechts licht tot een maximum van ongeveer 35°C [R5-104].

Ook voor wat betreft de compatibiliteit met het afval wordt verwezen naar de §5.3.2.10.

Een programma om het gedrag en de duurzaamheid van deze matrix in te evalueren werd uitgevoerd [§4.3 en §4.5 van R5-37]. Deze mortel is dankzij zijn samenstelling zeer performant in termen van duurzaamheid. Het gebruik van CEM III/C in combinatie met een lage W/C en de toevoeging van *silica fume* en *kalksteenmeel* resulteren in een duurzaam materiaal, zoals aangetoond is in [R5-37]. De mortel wordt ook gekenmerkt door een hoog sorptievermogen (immers het gehalte aan cement bedraagt ongeveer 637 kg/m³).

Zie ook § 5.3.2.11 van deze tekst.

5.4.3 Resterende onzekerheden

De resterende onzekerheden situeren zich op het vlak van:

- De eventuele gedeeltelijke vervanging van het kalksteenzand door siliciumzand. Ter verbetering van de reologische eigenschappen, al lijken testresultaten³² dit niet te bevestigen, is het niet uitgesloten dat dit noodzakelijk zal zijn.

³² Grootschalige testen in 2016 duiden op voldoende vloeï- en verpompbaarheid zonder vervanging van het kalksteenzand.

In de huidige samenstelling (IPM1, zie Tabel 5-5 en Tabel 5-6) is geen siliciumzand geïncorporeerd. Gezien een hoge vloeibaarheid cruciaal is voor de goede vulling van de met afval gevulde caisson met de mortel, werd de technische mogelijkheid verkend om een deel van het kalksteenzand te vervangen door siliciumzand. Dit resulteert immers in een hogere verwerkbaarheid dankzij de ronde vorm van het zand. Deze optie zal enkel en alleen verder gevolgd worden wanneer uit validatie met industriële uitrusting blijkt dat de mortel in zijn huidige vorm omwille van vloeiproblemen niet geschikt is. In dat geval is het beoogde vervangingspercentage maximaal 20 gew.% en zal het type kwartzand kritisch gekozen worden teneinde elke negatieve interactie met alkalibronnen (afval of cement) uit te sluiten. Het zand dient in dat geval inactief te zijn tot alkaliën. In geval kwartzand geïncorporeerd wordt, zal er een justificatiedossier ingediend worden bij de veiligheidsautoriteit met daarin specifieke gegevens zoals de betrokken korrelgroottes van het zand die zullen worden vervangen, referenties van resultaten van tests, methodes die gebruikt zullen worden om de materialen te selecteren, QA/QC programma en frequentie van testen in de tijd enzovoort.

Deze keuze van materialen maakt dat de resulterende mortel, zelfs met eventueel gebruik van een beperkte hoeveelheid siliciumzand, ongevoelig is voor eventuele interne bronnen van alkaliën tot ASR. Niet alleen zal het siliciumzand van uitermate goede kwaliteit zijn, ook het gebruikte bindmiddel (CEM III/C (referentie) of /B (alternatief)) met een toevoeging van *silica fume* minimaliseert verder dit risico. Dit omdat het gebruikte cement gekend staat om een mitigerend effect te hebben op ASR. Het is immers zo dat de gevormde C-S-H-fasen van dit cement een grote capaciteit hebben om alkaliën te adsorberen, waardoor de hoeveelheid (concentratie) aan alkaliën in het poriënwater sterk vermindert. Bovendien stelt de hydratatiereactie van dit type cement slechts een beperkte hoeveelheid portlandiet vrij.

Het gebruikte *silica fume* (condensil) werd toegevoegd uit reologische overwegingen, maar een dergelijk materiaal staat er eveneens om bekend ASR te beperken. *Silica fume*, zeer fijnverdeelde reactieve silica, reageert immers snel met zowel portlandiet als alkaliën. Hierdoor wordt de concentratie van alkaliën, alsook het gehalte van portlandiet, in het resulterende mortelmengsel verder geminimaliseerd.

Daar alkaliën in het poriënwater nodig zijn om ASR te ontwikkelen en het daarbij resulterende schadepatroon (scheuren, zwellings) enkel optreedt in aanwezigheid van portlandiet³³, maakt dit dat ASR ten gevolge van een interne alkalibron (zoals bijvoorbeeld cement, vervuilingen,...) volledig uit te sluiten is.

Alkaliën die eventueel via externe bronnen na uitharding van de mortel in contact komen met dit materiaal (bijvoorbeeld alkaliën uit het afval of van insijpelend water) zullen zelfs met eventueel gebruik van een beperkte hoeveelheid siliciumzand niet tot schadereacties leiden, aangezien het gebruikte siliciumzand van hoge kwaliteit zal zijn. De omstandigheden waaraan het zand zal worden onderworpen tijdens beproeving (ASTM C 1260 [R5-223] en/of ASTM C 1293 [R-226] of equivalent) - om zich te vergewissen van deze kwaliteit - zijn immers zo streng dat ze zeer conservatief zijn voor dit scenario. Daarbij blijft het portlandietgehalte van het mortelmengsel

³³ De precieze rol van portlandiet in de zwellings van beton dat meestal met ASR gepaard gaat, en de uiteindelijke schade verricht, staat nog ter discussie, maar consensus is er wel over de noodzaak van de aanwezigheid van portlandiet hiervoor.

minimaal, waardoor een schadepatroon ten gevolge van een eventuele ASR niet te verwachten is. De lage water tot cementfactor van ongeveer 0,36 beperkt bovendien de permeabiliteit van het mengsel waardoor een eventuele indringing van alkali sterk bemoeilijkt wordt en zich hoofdzakelijk zal beperken tot eventuele aanwezigheid in gevormde scheuren, waar de mortel reeds niet meer intact is.

- In het kader van de ontwikkeling van de doseerinstallatie werden de toegelaten afwijkingen op mortel SFFC3 beproefd door WTCB-CSTC op basis van een gevoeligheidsstudie. Daaruit bleek dat voor meeste bestanddelen zoals kalksteenmeel, cement en *silica fume*, de algemene betonnorm EN 206-1 [R5-3] voldoende nauwkeurig is en bijgevolg wordt deze norm toegepast voor deze bestanddelen. De waterdosering blijkt hier echter de meest kritische parameter te zijn, waardoor deze dosering mogelijk nauwkeuriger dient te gebeuren dan de toegelaten toleranties in deze norm [R5-150]. NIRAS zal daarom extra aandacht besteden aan een correcte waterdosering aan deze mortel en waar nodig extra maatregelen nemen tijdens het ontwerp en de bouw van de installatie en exploitatie van de IPM. Vóór de oplevering van de desbetreffende onderdelen van de IPM (bijvoorbeeld de doseerinstallatie) zullen de precieze afwijkingstoleranties vastgelegd worden op een finaal mortelmengsel en/of een mortelmengsel zal gevalideerd worden met de doseerafwijkingen van de IPM.
- De exacte samenstelling. In functie van de compatibiliteit met de installatie in de IPM (reologische eigenschappen) kan de mortel nog licht bijgestuurd worden. De hoofdkarakteristieken zullen echter niet wijzigen. De W/C zal laag blijven en de typematerialen zullen eveneens gelijk blijven.

5.4.4 Performantie-indicatoren

Om een referentiesamenstelling van de IPM-mortel te ontwikkelen werd gesteund op de expertise van WTCB en de ervaring van Belgoproces.

Daarnaast deed NIRAS in belangrijke mate beroep op IETcc om de duurzaamheid van de ontwikkelde mortel te onderzoeken.

De keuze van de gebruikte materialen beoogt het beperken, zelfs in sommige gevallen het uitsluiten, van enige mogelijke degradatiemechanisme en het beperken van het transport van radioactieve of agressieve deeltjes.

De correcte dosering en het gebruik van de juiste materialen zal het onderwerp zijn van een uitgebreid QA/QC-plan. Een dergelijk plan is een essentieel en fundamenteel element voor het waarborgen van een consistente kwaliteit voor de productie van de mortel.

Behalve een correcte samenstelling, is het tevens evident dat de mortel juist moet geplaatst worden. Zijn hoogvloeiende eigenschappen staan garant voor een correcte plaatsing en omhulling van het afval, zoals ook aangetoond is door de vulproeven.

Behalve zijn duurzaamheid, die gewaarborgd is door het gebruik van de juiste materialen in de juiste verhoudingen en geplaatst volgens de regels van de kunst, is de mortel ook *robuust*. Een lichte afwijking in de doseringen zal niet leiden tot een grote wijziging in zijn karakteristieken. Dit is aangetoond met behulp van een gevoeligheidsstudie. De resultaten tonen duidelijk aan dat voor de geteste samenstellingen de mortel vrij ongevoelig is voor productievataties. Enkel voor wat betreft de waterinhoud is de mortel zeer gevoelig aan variaties. Tijdens het ontwerp van de doseerinstallatie van de IPM, alsook tijdens de

productie van de mortel in de IPM zal extra aandacht uitgaan naar het waarborgen van een correcte waterinhoud.

De performantie-indicatoren zijn:

- De sorptiecapaciteit, de welke gewaarborgd is door zijn samenstelling en zijn cementgehalte;
- De behaalde opvulgraad, die eveneens gewaarborgd is door zijn samenstelling en kan gecontroleerd worden via het opmeten van het verpompt volume of een andere equivalente meting.

5.5 Staalvezelbeton

Staalvezelbeton, zonder klassieke wapeningsstaven, zal gebruikt worden voor de constructie van verschillende onderdelen van de berging:

De afschermingsplaten zullen gemaakt worden uit een staalvezelbeton. Deze samenstelling is nog niet gekend.

Ook voor de ondoorlatende topplaat (met inbegrip van de vlotplaten) zal een staalvezelbeton gebruikt worden. Ook deze samenstelling is nog niet gedefinieerd.

Daarnaast onderzoekt NIRAS de mogelijkheid een staalvezelbeton te gebruiken voor de caissons als alternatief voor klassiek gewapend beton.

5.5.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

5.5.1.1 Rol

Cementgebonden materialen zoals vezelbeton in de kunstmatige barrières in het bergingssysteem, kunnen de waterstroming beperken (veiligheidsfunctie R2a) en/of de diffusie van radionucliden in een poreus medium beperken (veiligheidsfunctie R4a).

In het geval van een vezelcaisson zullen deze tevens de radionucliden chemisch vasthouden in het bergingssysteem (veiligheidsfunctie R3).

Daarnaast doet de ondoorlatende topplaat ook dienst als fysieke barrière tegen onvrijwillige menselijke intrusie (veiligheidsfunctie I1). Het referentiemateriaal voor de ondoorlatende topplaat is vezelversterkt beton (staalvezels).

Voor geen van deze drie componenten werd reeds een referentieformule uit vezelbeton bepaald. Voor wat betreft de ondoorlatende topplaat zijn wel laboproeven gaande. De belangrijkste parameters vooropgesteld in het kader van deze proeven zijn de volgende:

- Duurzaamheid:
 - ▶ Sulfaatresistent;
 - ▶ ASR-ongevoelig;
 - ▶ zo resistent mogelijk aan zwavelzuur (ten gevolge van pyrietoxidatie), doch met inachtnaam van technische randvoorwaarden;
 - ▶ een beperkte temperatuurstijging tijdens uitharding (om ondermeer DEF en scheuren te voorkomen);
 - ▶ een goede vries-dooi resistentie;
 - ▶ een beperkte permeabiliteit.
- Mechanische eisen:
 - ▶ druksterkte op 90 dagen equivalent of beter dan C40/50;

- ▶ geen doorgaande scheuren na plaatsing en uitharding;
- ▶ een scheurgedrag dat meerdere kleine scheuren favoriseert in plaats van één lokale grote en een belangrijke hoeveelheid energie kan dissiperen alvorens te bezwijken.

5.5.1.2 Eigenschappen

5.5.1.2.1 Hydraulische geleidbaarheid

Wanneer vezels toegevoegd worden aan beton, zullen deze uiteraard niet enkel in de eventuele scheuren (bijvoorbeeld geïnduceerd door een belasting) aanwezig zijn. Er zullen eveneens vezels in het ongescheurde beton zijn. Het effect van deze vezels op de hydraulische geleidbaarheid van beton is recentelijk onderzocht door meerdere onderzoekers. De resultaten indiceren een gelijkaardige tot zeer lichte verlaging van de hydraulische geleidbaarheid van het ongescheurde beton [§8.2.1 van R5-10] in vergelijking met klassiek gewapend beton of ongewapend beton, al zijn er ook indicaties in de andere richting. [§8.2.2 van R5-10]

Sommige onderzoekers suggereren dat de licht verlaagde permeabiliteit een effect is van het relatief lagere volume aan cementpasta in het beton door de toevoeging van vezels. [§8.2.1 van R5-10].

Gescheurd vezelbeton lijkt een lagere permeabiliteit te hebben in vergelijking met gescheurd klassiek gewapend beton, althans indien de scheurgrootte significant groter is dan 100 µm. In dergelijke gevallen kan de permeabiliteit meerdere grootteorden lager zijn voor vezelbeton. Ook Desmettre *et al.* hebben metingen uitgevoerd op vezelversterkt beton onder mechanische belasting [R5-62, R5-63, R5-64, R5-65, R5-66]. Ook deze studies, die niet opgenomen zijn in de literatuurstudie van Laboratorium Magnel [R5-10] melden dat voor dezelfde graad aan mechanische schade een vezelversterkt beton een lagere waterpermeabiliteit bezit dan een klassiek gewapend beton. Bij scheurtjes tot 100 µm of kleiner wordt er geen effect of soms zelfs een verhoogde permeabiliteit van het vezelbeton tot klassiek gewapend beton opgemeten [§8.2.2 van R5-10].

NIRAS selecteert daarom dezelfde basiswaarden voor de hydraulische geleidbaarheid van het vezelbeton van de vezelcaissons, de afschermingsplaten en de ondoorlatende topplaat als voor klassiek gewapend beton in §5.3.1.

Zoals reeds vermeld heeft gescheurd vezelbeton, vanaf een bepaalde beschadigingsgraad, een significant lagere hydraulische permeabiliteit dan klassiek gewapend beton, wat maakt dat bij een eventueel mechanisch scheuren door een overbelasting (bijvoorbeeld seïsme) de waterpermeabiliteit zal toenemen, maar niet in dezelfde mate als voor een klassiek gewapend beton.

Men kan vezelbeton onderverdelen in twee soorten [R5-10]:

- *Strain softening*
- *Strain hardening*

De eerste soort zal bij een belasting op één plek een scheur initiëren. Deze scheur zal, wanneer de belasting blijft toenemen, blijven groeien, totdat uiteindelijk de structuur daar bezwijkt.

De tweede soort zal bij een belasting initieel ook op één plek beginnen scheuren, doch wanneer de belasting blijft toenemen, zullen de vezels de scheur voldoende overbruggen en uiteindelijk meer

spanning kunnen opnemen dan aanwezig was op het moment dat de scheur geïnitieerd werd. Hierdoor blijft deze scheur relatief beperkt, maar worden andere (eveneens relatief beperkte) scheuren bij toenemende belasting ontwikkeld. Wanneer men de belasting blijft opvoeren zal dit materiaal uiteindelijk finaal ook in één plek volledig doorscheuren, maar echter pas na dat meer energie gedissipeerd is dan in het geval van *strain softening*. Het is dit tweede soort gedrag dat we, voor de ondoorlatende topplaat, nastreven.

NIRAS heeft volgende waarden geselecteerd voor de hydraulische geleidbaarheid van het vezelversterkte beton van de ondoorlatende topplaat, naar analogie met het beton voor de modules (zie § 4.2.5 in [OD-108]):

- Bij bijna-watersaturatie (waarden gebruikt als startpunt van waterretentiecurve): minimum 2×10^{-14} m/s, maximum 4×10^{-13} m/s.
- Bij 80% watersaturatie: beste schatting 3×10^{-15} m/s. Range: minimum 3×10^{-16} , maximum 3×10^{-14} m/s. (Een factor 10 werd genomen om onzekerheden in rekening te brengen).

Voor de afschermingsplaten en de eventuele vezelcaisson selecteert NIRAS, naar analogie met de caissons volgende waarden voor de hydraulische geleidbaarheid van het vezelversterkte beton:

- Bij bijna-watersaturatie (waarden gebruikt als startpunt van waterretentiecurve): minimum 1×10^{-14} m/s, maximum 2×10^{-13} m/s, geen beste schatting.
- Bij 80% watersaturatie: beste schatting $1,5 \times 10^{-15}$ m/s. Range: minimum $1,5 \times 10^{-16}$, maximum $1,5 \times 10^{-14}$ m/s. (Een factor 10 werd genomen om onzekerheden in rekening te brengen).

5.5.1.2.2 Porositeit

Voor al het vezelversterkt beton selecteert NIRAS dezelfde waarden als voor het klassiek gewapend beton van de caissons. De W/C zal immers hoogstwaarschijnlijk gelijkaardig zijn of kleiner en ook de dosering aan cement zal in dezelfde grootteorde liggen.

5.5.1.2.3 Droge bulkdichtheid

Voor een vezelversterkt beton met een W/C tussen 0,36 en 0,56 worden typische waarden tussen ongeveer 2300 en 2450 kg/m³ in de literatuur gevonden [R5-54]. Voor vezelversterkt beton wordt daarom dezelfde waarden van de droge bulkdichtheid gekozen als voor klassiek gewapend beton.

5.5.1.2.4 Dispersiviteit

Er zijn geen studies gevonden betreffende dispersiviteit in vezelversterkt beton.

5.5.1.2.5 Sorptie

Van de drie componenten die al dan niet in vezelbeton kunnen gebouwd worden, is er slechts één die een sorptierol heeft, de vezelcaisson. Voor deze zal NIRAS, ondanks het feit dat nog geen referentiebeton geselecteerd is, een CEM I gebruiken. We verwijzen dan ook naar §5.3.1.2 voor de sorptiewaarden.

5.5.1.2.6 Fysieke barrière

Enkel de ondoorlatende topplaat heeft een fysieke barrièrefunctie. De aanwezigheid van staalvezels, zijn dikte (van minstens 70 cm) en zijn mechanische sterkte ontmoedigen fysieke intrusie.

5.5.1.2.7 Zuurresistentie

De omgeving waaraan de ondoorlatende topplaat wordt blootgesteld is niet gelijkaardig aan deze van de overige betonnen componenten in de berging. Dit komt door de aanwezigheid van klei in de aarden afdekking. Tijdens de ontwikkeling van dit materiaal gaat dan ook speciale aandacht uit naar de duurzaamheid in relatie tot de gebruiksomstandigheden. Omdat eventuele oxidatie van pyriet in een bovenliggende kleilaag (deel van de aarden afdekking) zal leiden tot zwavelzuur, zal de zuurresistentie van dit materiaal zo hoog mogelijk zijn, zonder afbreuk te doen aan de andere eigenschappen. In de literatuur [R5-161, R5-162, R5-163] kan men constateren dat de zuurresistentie van een betonsamenstelling voornamelijk functie is van het cementtype. Een lage water tot cement verhouding en een hoge dosering aan cement geeft contra-intuïtief geen garantie op een betere zuurresistentie. Dit betekent dat niet noodzakelijk al de vereisten voor XA3 (volgens EN 206-1 [R5-3]) moeten gerespecteerd worden.

5.5.1.2.8 Diffusiecoëfficiënt

De diffusiecoëfficiënt van chloriden in klassiek gewapend beton blijft quasi onveranderd door de additie van vezels [R5-10 §8.2.3]. Voor vezelbeton selecteert NIRAS daarom dezelfde diffusiecoëfficiënten als voor klassiek gewapend beton. Zie ook §5.3.1.2.11.

5.5.1.3 Verwacht gedrag

Het belangrijkste proces voor de evolutie van het beton op lange termijn is ook hier **carbonatatie**.

Dankzij de beperkte mechanische belasting die verwacht wordt op de componenten uit (potentieel) vezelbeton, zijn eventuele effecten van kruip van ondergeschikt belang. Tevens verwacht men geen overbelasting (door bijvoorbeeld seismiek) vóór 1 000 jaar na constructie.

Voor wat betreft het **vezelcaisson en de afschermingsplaten** wordt verwezen naar §5.3. De componenten zullen immers beide op basis van een CEM I zijn waardoor het effect van carbonatatie op de hydraulische geleidbaarheid gelijkaardig is.

Het cement van het vezelversterkt beton voor **de ondoorlatende topplaat** is vandaag nog onbekend (de samenstelling is nog in ontwikkeling) en mogelijk zal een CEM III gebruikt worden voor dit element. We herhalen dat in dergelijk geval er op termijn door carbonatatie een plaatselijke verhoging van de **permeabiliteit** verwacht wordt. Doch, de effecten van carbonatatie op de hydraulische geleidbaarheid van de vezelversterkte topplaat zijn verwaarloosbaar. De gecarbonateerde zone heeft immers een verwaarloosbaar effect op de permeabiliteit van deze plaat, zolang de totale dikte van de plaat niet gecarbonateerd is. Het verschil in carbonatatiesnelheid tussen een CEM I of een andere calcium-silicaat cement (bijvoorbeeld CEM III of CEM II/A-LL) is maximaal een factor 4 [R5-67]. Aangezien een K-waarde van grootte orde $0,05 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-0.5}$ wordt verwacht voor het beton op basis van een CEM I, is carbonatatie tot de helft van de plaatdikte bijgevolg uitgesloten voor 1 000 jaar na plaatsing. Maximaal bedraagt de K-waarde $0,2 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-0.5}$ en dit geeft een carbonatatie diepte van ongeveer 6 mm na 1 000 jaar,

wat verwaarloosbaar is ten opzicht van zijn dikte van minstens 70 cm. Men verwacht bijgevolg dat de ondoorlatende topplaat zijn functie zal blijven vervullen tot minstens 1 000 jaar na plaatsing.

Tevens **evolueren deze drie betonbarrières van een saturatiegraad** van ongeveer 80% naar een bijna-gesatureerd systeem. Dat zal een significant effect op de hydraulische geleidbaarheid van de betoncomponenten hebben.

5.5.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

Een vezelbeton, gebaseerd op een gewone cementsoort (CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V), is omwille van zijn chemie compatibel met de andere cementgebonden materialen.

Voor wat betreft de ondoorlatende topplaat zal, zoals reeds aangehaald, gedurende de ontwikkeling extra aandacht gaan naar de zuurresistentie (tot H_2SO_4), waardoor een goede compatibiliteit met de bovenliggende klei, die arm zal zijn in pyriet ([HS-8, §8.5.7.2, DR10]), verwacht kan worden.

Voor een lijst van mogelijke aantastingsmechanismen verwijzen we naar §5.3.2 van deze tekst. Indien een aantastingsmechanisme voor vezelbeton aanvullingen vereist, in vergelijking tot wat reeds hoger geschreven is voor klassiek beton, dan gebeurt dit hieronder. In wat volgt wordt enkel aandacht besteed aan staalvezels, aangezien hiervoor geopteerd wordt.

5.5.2.1 Het binnendringen van chloriden

Onderzoek heeft aangetoond dat vezels een hogere corrosieresistentie hebben dan klassieke wapening. Sommige data indiceren zelfs een corrosie-resistentie tot bijna 5 gew.% Cl (tot het cementgehalte) in het beton [R5-10 §8.3]. In zeer agressieve milieus (bijvoorbeeld chloride migratietest) kan de corrosie van de vezels, net zoals in klassiek beton scheuren induceren [R5-10 §8.3]. Daar vandaag geen afval wordt beschouwd met een chloride-gehalte hoger dan 0,4 gew.% ten opzichte van het cement in de conditioneringsmatrix, wordt niet verwacht dat dergelijke chlorideconcentraties bereikt kunnen worden in de **vezelcaisson**.

Ook de omgeving waaraan de **ondoorlatende topplaat en de afschermingsplaten** zullen blootgesteld worden, wordt niet verwacht in dergelijke mate agressief te zijn.

5.5.2.2 Carbonatatieproces, effect op hydraulische geleidbaarheid en corrosie

Het carbonatatieproces van een vezelbeton is gelijk aan dat van een klassiek gewapend beton. Doch, zoals reeds aangehaald in § 5.3.2.6, is het effect van carbonatatie op het betonmateriaal in functie van het cementtype.

Wat betreft de kinetiek, vindt men in de literatuur indicaties dat vezelversterkt beton en klassiek beton gelijkaardig scoren voor wat betreft carbonatieresistentie, althans in de versnelde laboratoriumtesten (en mits gebruik van hetzelfde cement) [R5-10 §8.2.4]. Maar ook zijn er indicaties dat het carbonatatieproces afgeremd wordt bij een kleine dosering aan vezels, terwijl dit voor hogere doseringen versneld wordt. Wang *et al.* rapporteerden versnelde carbonatatie-effecten vanaf een dosering van 2 vol.-% staalvezels [R5-61].

Gebaseerd op voorlopige onderzoeksresultaten veronderstelt NIRAS dat de dosering vezels in de betonsamenstellingen beperkt zal zijn tot ongeveer 1 vol.-%. Hierdoor wordt niet verwacht dat de

kinetiek van dit aantastingsmechanisme, als gevolg van de aanwezigheid van vezels, significant verschillend zal zijn van deze voor een klassiek gewapend beton.

Daarnaast is er aangetoond dat eventuele (door een belasting geïnduceerde) scheuren slechts een geringe invloed hebben op de corrosie van de vezels [R5-62] (zie ook R5-158) en §2.2.4.3 van [R5-160]). Een omgekeerde koppeling, het effect van een corroderende vezel in een verder intact beton – bijvoorbeeld een ongescheurd beton onderhevig aan carbonatatie of aan chloride indringing – is onschuldig, zo rapporteren meerdere bronnen ([R5-158], [§2.2.4.2 van [R5-160)], [R5-109] alsook [R5-169]). In het werk [R5-109] werd corrosie van vezels geïnduceerd door carbonatatie. Dit leidde niet tot bijkomende scheuren of het afdrucken (betonhuid of *covercrete* dat onder invloed van volumineuze corrosieproductie wordt weggedrukt) van het beton. In [R5-159], waar men vezelbeton aan versnelde corrosie (in een zoutoplossing) onderworpen heeft, wordt enkel melding gemaakt van de vorming van microscheuren; verder bleken de mechanische aspecten en de integriteit niet aangetast te zijn. Ook de *mock-up* monoliet te Dessel, voorzien van een caisson uit vezelbeton, vertoont vandaag (circa 15 jaar na constructie) geen blijk van een eventuele scheurvorming ten gevolge van de corrosie van deze vezels. Volgens [R5-160, §2.2.4.2] kunnen deze observaties verklaard worden door de beperkte corrosiestromen. In tegenstelling tot bij klassieke wapening is er geen continu conductief pad voor deze stromen, wat de corrosie sterk beperkt.

5.5.2.3 Kruip

Uit de literatuur [R5-10 § 7.1] leren we dat vezelversterkt beton bij lage doseringen (tot circa 1 vol.-%) niet meer of minder resistent is tot kruip dan klassiek beton. Bij hogere doseringen beperkt de toevoeging van vezels het scheuren van een aan kruip onderworpen beton.

Wanneer een structuur uit vezelbeton een significante last draagt, zal deze hierdoor in zekere mate onderhevig zijn aan kruip. Er zijn geen studies gevonden die de invloed van dit proces op de interfase tussen vezel en de cementpasta bestuderen. Dit is wel pertinent, daar kruip kan leiden tot een significante aantasting van deze interfase [R5-10 §7.1] met als gevolg:

- een verminderde *post-cracking*-prestantie (de prestantie van het materiaal, na de eerste scheurinitiatie door een belasting);
- een hogere permeabiliteit, immers in tegenstelling tot klassiek gewapend beton zijn de interfases van de vezels tot de cementpasta verdeeld over het gehele beton en vormen zo, onder meer afhankelijk van de vezeldosering, mogelijk een geconnecteerd netwerk.

Echter, gezien de lage bedrijfsbelasting van de ondoorlatende topplaat en de afschermingsplaten alsook eventueel het vezelcaisson en de gelijkaardige tot licht hogere resistentie van vezelversterkt beton tot kruip lijkt dit mechanisme niet pertinent te zijn.

5.5.2.4 Mechanische eigenschappen en scheurgedrag

Het gedrag van vezelbeton verschilt op enkele punten van dit van klassiek gewapend beton. Zo zal klassiek gewapend beton naarmate het ouder wordt, betere mechanische prestaties neerzetten, wat niet per definitie het geval zal zijn voor vezelbeton. Door de continue (maar trage) hydratatie van de cementmatrix zal beton (vezel en klassiek gewapend) immers sterker worden. Het is aangetoond dat het scheurgedrag van het beton negatief beïnvloed kan worden, net doordat de matrix van het vezelbeton

sterker wordt. Een beton dat oorspronkelijk gedimensioneerd was als *strain hardening* en ook over deze karakteristieken beschikte op jonge leeftijd (28 dagen), kan enkele jaren later deze karakteristieken verliezen [§8.4.2 uit R5-10]. Daarom zal de ontwikkeling van een vezelbeton ook proeven op minstens één jaar ouderdom voorzien.

5.5.2.5 Compatibiliteit van het afval met de cementbarrières

De compatibiliteit van het afval met een caisson uit vezelbeton is a priori identiek aan deze van een caisson uit klassiek gewapend beton, eventueel met als uitzondering de compatibiliteit met chloride-rijke afvalfamilies.

Zoals reeds hierboven aangehaald, lijkt vezelbeton beter resistent te zijn tegen chloriden dan klassiek gewapend beton. Echter, bij te hoge concentraties zal ook vezelbeton beginnen scheuren door de opstapeling van corrosieproducten.

Afvalfamilies met hoge chloridegehalten worden besproken in §5.3.2.10.

5.5.2.6 Levensduurevaluatie

Gezien de belangrijke onzekerheden is het vandaag moeilijk om de levensduur van dit materiaal in te schatten. Doch, in de verwachte condities waaraan een dergelijke caisson, afschermingsplaat of ondoorlatende topplaat zal blootgesteld zijn, kan een gelijkaardige of betere prestatie dan met een klassiek gewapend beton verwacht worden. Hierdoor wordt verwacht dat de levensduur van de vezelcaisson minstens gelijk is aan deze van de klassiek gewapende caisson. De afschermingsplaten worden verwacht een gelijkaardige degradatie te ondergaan als de vezelcaissons. De ondoorlatende topplaat uit vezelbeton wordt verwacht veel beter te presteren dan zijn equivalent uit klassiek gewapend beton.

5.5.3 Resterende onzekerheden

Gebaseerd op het *state-of-the-art report* van Laboratorium Magnel [R5-10] lijkt het dat in de meeste gevallen op korte termijn vezelbeton zich gedraagt als klassiek (on)gewapend beton of beter. Echter, op lange termijn zijn er kennisvacuüms geïdentificeerd.

5.5.3.1 Corrosie in agressieve omgevingen

In extreem agressieve omgevingen kan de corrosie van de vezels tot scheuren van het betonmateriaal leiden [R5-10 §8.3]. De performantie van een vezelcaisson (onder corrosie) geïnduceerd door uitloging van de afvalvormen (zoals homogeen gecementeerde concentraten, rijk aan chloriden) dient vergeleken te worden met deze van het klassiek gewapend beton.

5.5.3.2 Betonsamenstellingen

Uit contacten met de industrie (zoals Bekaert, ArcelorMittal en Twintec) werd de doenbaarheid voor de uitvoering van een vezelversterkte topplaat bevestigd voor diktes van 0,2 m tot 1,2 m en vezelinhouden tot 120 kg/m³ (circa 1,5 vol.-%). Ook zijn platen van 36 m × 36 m zonder voegen mogelijk.

Een samenstelling is in ontwikkeling. Ook zal een O&O-programma over duurzaamheid in de verwachte omgeving worden gerealiseerd. Daar vezelbeton mogelijk slechtere prestaties neerzet naarmate het ouder

wordt (in tegenstelling tot klassiek beton), zijn er ook mechanische proeven op meer dan één jaar voorzien.

Ook voor de andere componenten, de vezelcaisson en de afschermingsplaten zijn nog geen samenstellingen ontworpen.

5.5.4 Performantie-indicatoren

De performantie-indicatoren van het vezelbeton voor de caissons en de afschermingsplaten zijn:

- De mechanische eigenschappen;
- De porositeit, droge bulkdichtheid, en sorptie.

De performantie-indicatoren van de ondoorlatende topplaat zijn:

- De mechanische eigenschappen;
- De dikte;
- De hydraulische geleidbaarheid;
- Het scheurgedrag;
- De helling van de bovenzijde waarop water lateraal draineert;
- De duurzaamheid (specifiek zuurresistentie).

Net zoals bij klassiek gewapend beton zullen bovenstaande aspecten geverifieerd worden tijdens de constructie en deel uitmaken van een adequaat QA/QC-programma zoals het productiereglement voor stortklaar BENOR-beton [R5-201], eventueel aangevuld met materiaalspecifieke aspecten.

5.6 Ruimte tussen monolieten

De monolietstapels staan niet tegen elkaar of tegen de modulewand, maar worden geplaatst met een tussenruimte van ongeveer 5 centimeter. Bij de structurele sluiting van een module wordt de ruimte tussen de monolietstapels onderling en tussen de buitenste monolietstapels en de modulewanden opgevuld met fijn grind (2/8 klasse f2 volgens PTV 411 [R5-220]). Dit resulteert in een opvulling van nagenoeg 100% van deze ruimte met een materiaal dat zeer permeabel ($\geq 10^{-4}$ m/s) is in vergelijking met de omliggende betonnen componenten en alzo sterk bijdraagt aan het beperken van de watersinsijpeling tot bij het afval (R2a veiligheidsfunctie).

5.6.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

De met grind gevulde tussenruimte heeft een meervoudige functie. Ten eerste is het een soort van buffer in geval van seïsme waardoor beschadiging aan de monolieten drastisch verminderd wordt. Ten tweede is het een afvoerkanaal voor insijpelend water waardoor het water rond de monolieten in plaats van doorheen de monolieten stroomt.

Er zijn geen gegevens beschikbaar voor poriëndiffusiecoëfficiënt, dispersiviteit, bulkdensiteit, porositeit en hydraulische geleidbaarheid.

Enige vorm van lichte zetting kan optreden naarmate de tijd vordert. Het is niet verwacht dat deze eventuele zetting de performantie van het systeem significant zal beïnvloeden.

Gezien de grotere permeabiliteit van dit materiaal wordt niet verwacht dat dit materiaal zal evolueren naar saturatie. De relatieve vochtigheid zal echter wel evolueren naar waarden dicht bij 100%.

5.6.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

Granulaten van hoge kwaliteit (conform NBN EN 12620 [R5-219] of equivalent) zullen gebruikt worden. Hierdoor is de compatibiliteit met het beton gegarandeerd.

Er zijn geen processen geïdentificeerd die de performantie van het systeem zouden kunnen beïnvloeden.

5.6.3 Resterende onzekerheden

Geen.

5.6.4 Performantie-indicatoren

De afwezigheid van fijne materialen, om een hoge hydraulische geleidbaarheid te garanderen, is een belangrijk gegeven voor het opvulmateriaal. Fijne materialen kunnen immers verstoppingen veroorzaken en de werking teniet doen. Daarom wordt een materiaal dat arm is aan fijne fractie (f2 volgens PTV 411 [R5-220]), voorgesteld.

Tevens is een goede vulling ook een performantie-indicator. Er zal toegezien worden op het correct plaatsen van het grind in de voorziene openingen.

5.7 Opvulmateriaal van de inspectiegalerij

De in- en uitgang van de inspectiegalerij wordt afgesloten met beton, de rest van de inspectiegalerij wordt opgevuld met zand en met zand-cement (gedeelte boven de *footprint* van de modules). Voor een beschrijving van de rol, eigenschappen, verwacht gedrag, degradatie en veroudering, resterende onzekerheden en performantie-indicatoren van het gedeelte in zand-cement: zie §5.10.

5.8 Opvulmateriaal van de inspectieruimten

5.8.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

De referentie-oplossing voor het opvullen³⁴ van de inspectieruimten is het gebruik van een op CEM I gebaseerde *grout* (vloeibare mortel). NIRAS heeft echter nog geen referentiesamenstelling vastgelegd voor het opvulmateriaal van de inspectieruimten.

5.8.1.1 Rol

Het opvulmateriaal van de inspectieruimte vervult verschillende rollen ([HS-2, bijlage 3]):

- Bijdragen tot de sorptiecapaciteit van de berging (veiligheidsfunctie R3). Om de sorptiecapaciteit van dit materiaal tijdens de migratie van de radionucliden effectief te benutten via dispersie, is een conductief materiaal nodig (veiligheidsfunctie R4b);
- Evacuatie van water-infiltratie zodat een badkuipeffect vermeden wordt (R2a);
- Opvulling van vrije ruimte, zodat instorting van de ondersteunende plaat vermeden wordt, wanneer de structurele integriteit hiervan zou afnemen op lange termijn.

5.8.1.2 Eigenschappen

Daar het materiaal voor het opvullen van de inspectieruimten nog niet geselecteerd is, is het bijgevolg ook niet gekarakteriseerd. Er zijn dan ook geen gegevens beschikbaar voor poriëndiffusiecoëfficiënt, dispersiviteit, bulkdensiteit en porositeit.

Als vertrekbasis voor de waarden van bulkdensiteit en porositeit van het opvulmateriaal wordt gesteund op literatuurwaarden voor verse grouts [R5-221] en voor de Nirex Reference Vault Backfill [R5-68]. Men beschouwt op basis hiervan dat de waarden voor bulkdensiteit zullen liggen tussen 1 000 en 1 600 kg/m³ en waarden voor porositeit tussen 0,40 en 0,60.

Waarden voor de sorptiecapaciteit en de hydraulische geleidbaarheid kunnen afgeleid worden op basis van vereisten.

Vereisten met betrekking tot doenbaarheid van opvulling omvatten een hoge vloeibaarheid en verpompbaarheid [HS-10, §10.3.2].

Voor het opvulmateriaal is een zekere sorptiecapaciteit vereist [HS-8, §8.5.1.2, DR3]. Het materiaal zal hiervoor voorzien worden in minstens 19 gew.% aan uitgehard cement. Om de sorptiecapaciteit van dit materiaal tijdens de migratie van de radionucliden effectief te benutten is een poreus en permeabel materiaal waarin dispersie kan optreden, beter geschikt dan een materiaal met lage porositeit en waterpermeabiliteit. NIRAS zal daarom bij de ontwikkeling van het opvulmateriaal een hydraulische geleidbaarheid groter dan 1×10^{-6} m/s vereisen [OD-281 §6.2].

³⁴ Het opvullen zal gebeuren ~ 100 jaren na de exploitatie. Een alternatieve oplossing (gebruik van zeolieten) wordt onderzocht om de kennis rond de fenomenologie van deze kunstmatige barrières te kunnen onderbouwen.

Tot op heden grenst de vereiste hydraulische geleidbaarheid aan de limieten van de huidige praktijk, zo blijkt uit een literatuurstudie:

- De Nirex Reference Vault Backfill [R5-68] is een voorbeeld van een poreus opvulmateriaal op basis van cement. De hydraulische geleidbaarheid van dit materiaal bedraagt 1×10^{-9} m/s [R5-68].
- Een literatuuroverzicht van de hydrologische eigenschappen van cementgebaseerde opvulmaterialen gebruikt bij de berging van radioactief afval, vermeldt een bovenwaarde van 1×10^{-8} m/s voor gelijkaardige materialen [R5-69].
- Rapport [R5-211], opgesteld ter ondersteuning van een veiligheidsevaluatie van de Savannah River Side (DOE), vermeldt waarden tot 1×10^{-6} m/s voor cement gebaseerde materialen.

5.8.1.3 Verwacht gedrag

Het opvulmateriaal zal net zoals de overige delen van de modules evolueren naar een toestand met hoge relatieve vochtigheid. Modelleringen van het opvulmateriaal met volgende randvoorwaarden:

- een volledige destructie van de afdekking en bijgevolg,
- een waterinsijpeling van 480 mm per jaar,
- gedurende een oneindig lange tijdsperiode,

indiceren een volledige saturatie over 2/3 van de hoogte [OD-281 §6.1]. Doch, deze situatie is te beschouwen als een bovengrens. In aanwezigheid van de aarden afdekking wordt niet verwacht dat het opvulmateriaal gesatureerd zal zijn. Er is geen enkel scenario of proces geïdentificeerd dat zou kunnen leiden tot een omzeiling van de sorptiecapaciteit in dit materiaal.

5.8.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

De degradatieprocessen hangen af van de uiteindelijke samenstelling van het gekozen opvulmateriaal. Voor het referentiemateriaal (een *grout*), is carbonatatie het bepalende degradatieproces.

Per definitie is standaard *grout* chemisch compatibel met beton. Tevens werd geverifieerd of de hydratatiewarmte van een dergelijke *grout* compatibel is met de bergingsinstallatie [HS-8].

5.8.3 Resterende onzekerheden

Een evaluatie uitgevoerd door DBE Technology GmbH en de technische gebruikservaringen in het kader van de referentieoplossing bevestigen de technische uitvoerbaarheid van deze opvulling van de inspectieruimten [R5-217]. De keuze van de matrix (samenstelling) is nog niet vastgelegd. Om deze referentiesamenstelling op punt te stellen wordt een trapsgewijze aanpak vooropgesteld in [HS-10, §10.2.3]. Er zal een materiaal op basis van een hydraulisch bindmiddel gebruikt worden. Zodra de samenstelling van de matrix bepaald is, wordt deze aan een karakteriseringsprogramma onderworpen (eigenschappen, duurzaamheid).

5.8.4 Performantie-indicatoren

Voor het opvulmateriaal van de inspectieruimte zijn de performantie-indicatoren de hydraulische geleidbaarheid, de sorptiecapaciteit, de behaalde opvulgraad, alsook de porositeit.

5.9 Opvulmateriaal van het drainagesysteem

Tijdens de sluitingsfase wordt het grootste gedeelte van het drainagesysteem verwijderd. Enkel de roestvast stalen buis doorheen de ondersteunende plaat blijft achter. Deze wordt echter niet opgevuld, maar vormt vanaf dan een onderdeel van het ABS (Anti-badkuipsysteem), zie §5.15.

5.10 Zand-cement

Zand-cement is een mengsel van zand en enkele gewichtsprocenten cement. Men zal een hoogovencement (CEM III/C) gebruiken in een dosering van ongeveer 5 gew.% ten opzichte van het zand.

5.10.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

De rol van de zand-cement ophoging is enerzijds zorgen voor een voldoende stabiele ondergrond voor de bovenliggende SSC's (voldoende draagkracht) en anderzijds zorgen voor sorptiecapaciteit (veiligheidsfunctie R3). Om de sorptiecapaciteit van dit materiaal tijdens de migratie van de radionucliden effectief te benutten via dispersie is een conductief materiaal nodig (veiligheidsfunctie R4b). Door zijn dikte zorgt de zand-cement ophoging er ook voor dat de bergingsinstallatie buiten het bereik van eventuele overstromingen ligt.

De lasten van de bergingsinstallatie tijdens de bouw van de modules zijn van die aard dat een versterkte onderfundering aanbevolen wordt. Door een zand-cement mengsel op de laatste 2 m van de ophoging te gebruiken, ontstaat een stabiele basis voor de bouw van de modules. Een gewichtspercentage van ongeveer 5% cement wordt aan het zand toegevoegd. Dit percentage werd gekozen na het beschouwen van verschillende aspecten:

- Een zand-cement onderfundering met ongeveer 5% cement voldoet aan de geotechnische vereisten, met ~5% cement wordt met andere woorden voldoende draagvermogen bereikt (zie §8.5.4.2, DR25.a van [HS-8]). Er wordt opgemerkt dat het vereiste draagvermogen het grootst is tijdens de constructiefase, meer bepaald wanneer de modulewanden gebouwd zijn, maar de funderingsplaat nog niet.
- Dankzij de toevoeging van cement stijgt de sorptiecapaciteit van de ophoging. Belangrijke nuance is dat er geen lineair verband is tussen de totale sorptiecapaciteit en de hoeveelheid cement in dit materiaal. Zie §5.3.1.2.9 voor de sorptiewaarden van cement.
- Door de toevoeging van cement aan het zand vermindert de hydraulische geleidbaarheid. Ter illustratie, de gemeten waarde voor de zanden van Bierbeek van 2×10^{-5} m/s verlaagt tot ongeveer 6×10^{-6} m/s bij toevoeging van 5% en 10% cement (zie §4.5.2.1 van [OD-166]), en is dus bij toevoeging van 5 à 10% cement nog steeds voldoende hoog om (regen)water naar de ondergrond af te voeren.
- Een toevoeging van meer cement resulteert in een brossere ophoging, waardoor het risico op breukvorming na (differentiële) belasting verhoogt met hogere percentages cement.
- Een hoger cementpercentage zal leiden tot een hogere economische kost.

Interessant is tevens te melden dat zand-cement mengsels met 5% cement werd gebruikt als ophoging voor een kerncentrale in Zuid-Afrika in het licht van de seismische stabiliteit. [R5-72]. Tevens was een interessante bevinding van dat werk het feit dat een kleine hoeveelheid cement volstond om liquefactie te voorkomen. Zand-cementmengsels worden ook vaak gebruikt als bouw materiaal voor ophogingen bij werkzaamheden aan (spoor)wegen en andere infrastructuur.

Vereisten zijn opgelegd aan het zand in het zand-cement. Deze kunnen teruggevonden worden in HS-8 §8.5.4.2.

Het chemische gedrag (voornamelijk sorptie-eigenschappen) van dit cementgebonden materiaal evolueert op gelijkaardige wijze als deze van klassiek gewapend beton.

De veiligheidsfuncties (R3 en R4b) van deze component zijn beschreven in [HS-2, Bijlage 3].

Er zijn geen gegevens beschikbaar voor poriëndiffusiecoëfficiënt, dispersiviteit, bulkdensiteit en porositeit. Waarden voor de bulkdensiteit en porositeit kunnen evenwel afgeleid worden op basis van de vereiste compactiegraad, die tussen 95 en 98,5% moet bedragen. Op basis daarvan beschouwt men waarden voor bulkdensiteit tussen 1 710 en 1 875 kg/m³ en waarden voor porositeit tussen 0,29 en 0,35.

5.10.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

Het verwachte degradatieproces is carbonatatie. Carbonatatie zal leiden tot een vermindering van de sorptie, een hogere druksterkte en een lagere ductiliteit. De draagkracht wordt niet beïnvloed.

Er wordt een beperkte degradatiesnelheid verwacht. Omdat deze laag afgedekt is door meerdere meters grond, wordt een hoge relatieve vochtigheid (dichtbij 100%) en een lage partieldruk voor CO₂ verwacht en dus een lage carbonatatiesnelheid.

Tijdens de exploitatiefase wordt het zand-cement, dat niet door beton (van de modules of de betonplaat met de sporen) is afgedekt, beschermd door een geomembraan om het zo te beschermen tegen carbonatatie, al konden metingen in het talud op de demonstratieproef - op onbeschermd zand-cement – na zes jaar geen carbonatatie identificeren ([R5-148], kernen A, B, C en D ontnomen uit het talud, vrij aan de atmosfeer).

5.10.3 Resterende onzekerheden

Behalve het cement (CEM III/C) ligt het type en herkomst van het materiaal nog niet vast.

De snelheid van degradatie: Tijdens de exploitatie wordt het zand-cement beschermd door een geomembraan. Nadat de aarden afdekking aangebracht is, wordt verwacht dat de carbonatatiesnelheid erg laag zal zijn door de hoge relatieve vochtigheid en de lage partieldruk van CO₂. De precieze snelheid is echter moeilijk te voorspellen.

5.10.4 Performantie-indicatoren

De performantie-indicatoren zijn de hydraulische geleidbaarheid, het cementgehalte en de draagkracht. Deze worden tijdens de constructie geverifieerd.

5.11 Voegen

5.11.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

De voegen zijn de interfases tussen:

- de structurele topplaat en de modulewand;
- de ondersteunende plaat en de modulewand;
- de funderingsplaat en de modulewand.

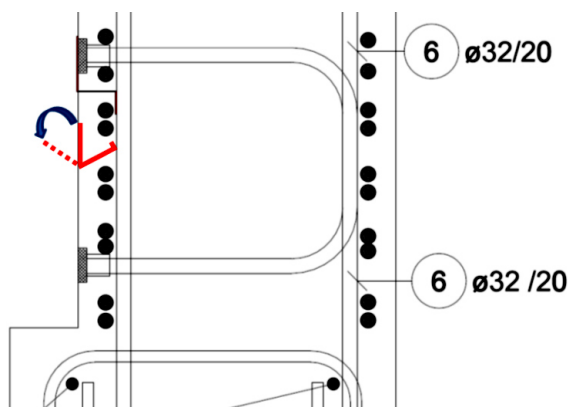
Deze voegen vervullen geen langetermijnsfunctie, maar mogen ook geen aanleiding geven tot een kortsluiten van de veiligheidsfuncties (Zie [HS-2 §2.8.6] voor de operationele en langetermijnsveiligheidsfuncties van de platen en wanden).

De verbindingswapening tussen de platen en de wanden is zodanig berekend dat ook op deze locatie de maximale theoretische scheurwijdte aanvaardbaar is (0,3 mm). Er hoeven dus geen specifieke materialen gebruikt te worden ter hoogte van de voegen. Ter hoogte van de interfase tussen de muren en de platen worden de muren opgeruwd om een goed contact tussen de twee stortfasen te bevorderen.

Om de transmissiviteit te beperken en zo de goede werking van het drainagesysteem te ondersteunen, wordt er een metalen voeg geplaatst in volgende interfases:

- de modulewand en de ondersteunende plaat
- de modulewand en de funderingsplaat

Figuur 5-6 toont het prinsipeschema van deze stalen voeg. Een dunne (~1 à 2 mm) stalen *strip* wordt deels in de wand ingestort. Na het ontkisten van de wanden wordt deze uitgeplooid en correct gepositioneerd samen met de wapening van de desbetreffende plaat, zodat het uitgeplooid deel in de plaat wordt gestort. Luchtophopping onder de *strip* tijdens het storten wordt vermeden door de V-vorm van deze *strip*. (zie ook [HS-8, §8.6.1.2] voor meer informatie rond deze stalen *strip*.)



Figuur 5-6: Principeschema van de voeg met bijhorende *strip* tussen de modulewand en de ondersteunende plaat (idem voor de funderingsplaat).

De interfase tussen de modulewand en de structurele topplaat wordt afgedicht door een bitumenlaag bovenop de structurele topplaat en de modulewand. Hier is geen stalen voeg voorzien.

5.11.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

De degradatiemechanismen van de metalen voeg zijn dezelfde als die van wapeningsstaal in beton. Depassivatie ten gevolge van carbonatatie (zie §5.3.2.6.) is dus een potentieel degradatiemechanisme dat aanleiding kan geven tot corrosie van de stalen *strip*. Gezien de stalen *strip* zich in het midden van de plaat bevindt, blijft ze echter in een niet-gecarbonateerde omgeving. Dit betekent dat de potentiële actieve corrosie van de stalen *strip* pas zal gebeuren na degradatie van de betonbarrières door scheurvorming in het beton ten gevolge van corrosie van de wapening.

5.11.3 Resterende onzekerheden

Het referentiemateriaal dat kan gebruikt worden voor de stalen *strip* is koolstofstaal. Het exacte type van de stalen *strip* zal bepaald worden op basis van een voorstel van de aannemer via een technische fiche en na goedkeuring door NIRAS.

5.11.4 Performantie-indicatoren

De performantie-indicator is de waterdichtheid. De waterdichtheid wordt tijdens de constructie geverifieerd (bijvoorbeeld door een lekttest voor de ondersteunende plaat).

5.12 Drainagesysteem

5.12.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

De functie van het drainagesysteem is het afvoeren van water binnen de module en het collecteren van water buiten de module: condenswater, regenwater (in geval van defecten aan het stalen dak) of water dat door de afdekking sijpelt. Na sluiting maken (delen van) het drainagesysteem deel uit van het ABS; hieraan worden dus **langetermijnsveiligheidsfuncties toegekend** (zie §5.15.1).

Het materiaal van het drainagesysteem is HDPE, uitgezonderd voor de recipiënten (Plexiglas) en de tanks in het WCB (GRE - *Glass Reinforced Epoxy* - met een RF coating) en de ingestorte delen in de ondersteunende plaat (roestvast staal - AISI 304). Voor een detailuitwerking van de doorvoer door de ondersteunende plaat wordt verwezen naar [HS-8, §8.6.5]. Door de kraag in het midden van de ingestorte buis en door de aanhechting tussen beton en de buis, vormt de drainagebuis geen omzeiling van de modulebasis.

5.12.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

Alle polymeren geproduceerd door radicale polymerisatie, waaronder HDPE, zijn goed bestand tegen een breed spectrum aan chemicaliën, waaronder sterke basen en de inwerking van micro-organismen. Voor dit type synthetisch materiaal bedraagt de levensduur enkele honderden jaren (zie ook §5.13 betreffende geotextielen op basis van HDPE). De gewenste levensduur is ~100 jaar. Tevens wordt opgemerkt dat de onderdelen van het drainagesysteem makkelijk bereikbaar en vervangbaar zijn - met uitzondering van het korte stuk buis tussen enerzijds het achterblijvende deel van het drainagesysteem in de ondersteunende plaat en anderzijds de inspectiegalerij, wat moeilijker te bereiken is.

Het achterblijvende deel van het drainagesysteem in de ondersteunende plaat is vervaardigd uit roestvast staal AISI 304 en zal zeer traag degraderen, zodat de levensduur van deze component en de aanhechting met het omliggende beton de nucleaire reglementaire controlefase omvat.

Roestvast staal kan in dit geval gecombineerd worden met koolstofstalen wapening zonder verhoogd risico op corrosie door galvanische koppeling. De snelheid van de galvanische corrosie wordt immers bepaald door de kathodische reactie op het roestvast staal en dit materiaal is een slechte kathode. De kathodische stroom is kleiner voor roestvast staal dan voor gepassiveerd koolstofstaal, zelfs in het geval het roestvast staal wordt blootgesteld aan hoge concentraties chloriden. Bijgevolg zal eventueel contact tussen het roestvast staal en de koolstofstalen wapening het corrosierisico van de wapening niet verhogen [R5-73, R5-74, R5-75, R5-76]. Omdat de condities in de module niet agressief zijn, zal het gedeelte van het roestvast staal dat niet ingebed is, in beton passief blijven en is het vermijden van elk mogelijk contact tussen de twee materialen geen vereiste. Bovendien:

- werden zelfs in agressieve milieus goede corrosie-eigenschappen van gedeeltelijk ingebed roestvast staal aangetoond [R5-77];
- zal, in een niet agressieve omgeving, zelfs in geval van een galvanische koppeling tussen niet-gepassiveerd koolstofstaal en roestvast staal, het koolstofstaal slechts een beperkte tot matige, bijkomende corrosie ondervinden [R5-78, R5-79].

Desalniettemin zal rechtstreeks contact tussen de drainagebuis en de wapening vermeden worden door gebruik van afstandhouders.

5.12.3 Resterende onzekerheden

Tijdens de exploitatiefase wordt aangenomen dat degradatieprocessen de doeltreffendheid van het drainagesysteem niet zullen beïnvloeden. Inspectie en onderhoud van het drainagesysteem zullen worden uitgevoerd om een adequate werking ervan te waarborgen. Potentiële schade aan het drainagesysteem tijdens deze fase zal worden hersteld. De delen van het drainagesysteem die zich in de inspectiegalerij en het WCB bevinden zijn makkelijk toegankelijk voor eventuele herstellingen. De korte stukken leiding (grootteorde 1 meter) die zich in de inspectieruimte bevinden (uit HDPE) zijn moeilijker toegankelijk, deze bevinden zich immers in het afgesloten deel van de inspectieruimte. De ingestorte delen in de ondersteunende plaat (uit AISI 304) zijn niet toegankelijk.

De resterende onzekerheden zijn niet van die aard dat ze de veiligheid in het gedrang brengen.

5.12.4 Performantie-indicatoren

De performantie-indicatoren zijn:

- De lekdichtheid. Deze wordt tijdens de constructie geverifieerd door een druktest op de leidingen en wordt opgevolgd tijdens de exploitatie door periodieke inspectie. Lekdichtheid van de aanhechting tussen de ondersteunende plaat en de drainagebuis wordt geverifieerd tijdens de constructie (bijvoorbeeld door een lekttest voor de ondersteunende plaat).
- De helling. Het drainagesysteem moet voldoende hellend zijn aangelegd om water te kunnen evacueren.

5.13 Geosynthetische materialen

5.13.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

In de bergingsinstallatie worden verschillende geosynthetische materialen gebruikt. Deze worden in wat volgt overlopen.

5.13.1.1 In de afdekking

Van boven naar onder (zie Figuur 5-1):

- Geotextiel tussen laag 1c en 2a en geotextiel tussen laag 2c en 3a. Deze geotextielen moeten vermijden dat materiaal van laag 1c (zand) indringt in laag 2a (grover materiaal) en dat materiaal van laag 2c (zand) vermengd geraakt met laag 3a (klei). Dit is nodig tijdens de aanleg van de afdekking waarbij materialen verdicht worden en er op de lagen gereden wordt met machines. Ook nadien vermijdt het geotextiel transfer van deeltjes van laag 1c naar laag 2a en van laag 3a naar laag 2c. Referentiematerialen die kunnen gebruikt worden zijn (HD)PE of PP (voorstel van de aannemer via technische fiches en goedkeuring door NIRAS) (Referentietype: 2.5.B volgens PTV829).
- *Geosynthetic Clay Liner* - GCL (tussen de kleilagen om waterinfiltratie te beperken). Zelfs indien het klei-gedeelte van de infiltratiebarrière niet naar behoren zou functioneren, zal de GCL het infiltratiedebiet beperken [R5-6, §4.1 en §4.4]. De GCL bestaat uit een laag bentoniet (Na-type, natuurlijk of geactiveerd) tussen twee geotextielen uit (HD)PE of PP. Het geotextiel aan de onderzijde is geweven, het bovenste is niet-geweven. Het GCL is *needle-punched* (ter vergroting van de schuifsterkte van het GCL).
- Geotextiel tussen laag 3c en laag 4. Dit geotextiel moet vermijden dat materiaal van laag 3c (klei) indringt in de laag 4 (zand). Dit is nodig tijdens de aanleg van de afdekking waarbij materialen verdicht worden en er op de lagen gereden wordt met machines. Ook nadien vermijdt het geotextiel transfer van deeltjes van laag 3c naar laag 4. Referentietype: 4.2 volgens PTV829.
- HDPE geomembraan boven de ondoorlatende topplaat om waterinfiltratie te beperken, dikte $\geq 1,5$ mm.

Het HDPE membraan en de GCL zullen gedurende enkele honderden jaren bijdragen tot het beperken van de waterinsijpeling in het bergingssysteem, maar vormen niet de bepalende factor (dat is de ondoorlatende topplaat). De rol van de overige geosynthetische materialen in de afdekking is belangrijk tijdens de aanleg van de afdekking. Nadien zullen de geotextielen weliswaar gedurende enkele honderden jaren sterk bijdragen tot het gescheiden houden van de korrels van aangrenzende lagen. Samenvattend, de geosynthetische materialen in de afdekking vervullen geen langetermijnsveiligheidsfunctie en hebben bijgevolg geen minimaal vereiste levensduur.

5.13.1.2 In de funderingen

Van boven naar onder (zie [HS-8 §8.5.4]):

- Geotextiel tussen de zand-cement ophoging en de grindlaag. Het geotextiel moet een adequate scheiding tussen het grind en het zand-cement vormen. Het betreft een niet-geweven geotextiel.

Referentiematerialen die kunnen gebruikt worden: (HD)PE of PP (voorstel van de onderaannemer via technische fiches en goedkeuring door NIRAS).

- Geogrid in de grindlaag. De hoofdfunctie van het geogrid is de herverdeling van lasten over een groter oppervlak (bijvoorbeeld verkeersbelasting, kraanbelasting, ...) tijdens de periode dat er transport op de grindlaag verwacht wordt. Dit is in principe enkel tijdens de initiële bouwfase. Tijdens de aanleg van de afdekking is er al een zekere zandlaag aanwezig waardoor de belasting van de machines niet rechtstreeks op de grindlaag gebeurt. Om alsnog te anticiperen op een eventuele directe belasting bij de aanleg van de afdekking (of vroeger), wordt een levensduur van grootteorde van 50 jaar vereist. Referentiematerialen die kunnen gebruikt worden: (HD)PE of PP (voorstel van de onderaannemer via technische fiches en goedkeuring door NIRAS).
- Geotextiel tussen de grindlaag en het onderliggende zand (of BES³⁵). Het geotextiel moet een adequate scheiding tussen het grind en het zand vormen. Het betreft een niet-geweven geotextiel. Referentiematerialen die kunnen gebruikt worden: (HD)PE of PP (voorstel van de onderaannemer via technische fiches en goedkeuring door NIRAS).
- Geomembraan ter beperking van de carbonatatie van de zand-cement ophoging. Waar het zand-cement niet tegen carbonatatie door atmosferische CO₂ beschermd is, wordt het afgedekt door een geomembraan. Het referentiemateriaal is (HD)PE. De (onder)aannemer zal via technische fiches een voorstel doen dat al dan niet goedgekeurd wordt door NIRAS.

Er wordt geen langetermijnsveiligheidsfunctie toegekend aan deze materialen. De vereiste levensduur is van de grootteorde van 50 jaar (cf. moment van aanleggen van de afdekking).

5.13.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

Alle polymeren geproduceerd door radicale polymerisatie, waaronder HDPE, zijn goed bestand tegen een breed spectrum aan chemicaliën, waaronder sterke basen en de inwerking van micro-organismen.

De geschatte levensduur van de geosynthetische materialen loopt uiteen tussen verschillende honderden jaren [R5-6] en enkele tientallen jaren [R5-80]. Gezien de omstandigheden waarin de geosynthetische materialen zich zullen bevinden (afgedekt en bij ~10°C) is de verwachte levensduur van de grootteorde van enkele honderden jaren en in elk geval groter dan de vereiste levensduur die strikt genomen enkele jaren bedraagt met uitzondering van het geogrid in de grindlaag, waar de vereiste levensduur 50 jaar bedraagt.

De potentiële effecten van degradatie van deze materialen worden hierna per component besproken en zijn aanvaardbaar.

5.13.2.1 In de afdekking

Van boven naar onder (zie Figuur 5-1):

- Geotextiel tussen laag 1c en 2a. In geval van degradatie van het geotextiel zou materiaal van laag 1c samen met insijpelend water in laag 2a kunnen dringen. Potentiële verzakkingen in laag 1c zijn

³⁵ BES: *bentonite enriched soil*.

hierdoor beperkt, aangezien het bovenste gedeelte van laag 2a bestaat uit grof zand. De veiligheidsfuncties en rollen van laag 2a worden niet verstoord door degradatie van het geotextiel. Bovendien wordt de afdekking gemonitord en indien nodig hersteld gedurende de nucleaire reglementaire controlefase.

- Geotextiel tussen laag 2c en 3a. Het effect van degradatie van het geotextiel is in dit geval klein aangezien het een grof materiaal op een fijn materiaal betreft. De drainerende werking van laag 2c komt alleszins niet in het gedrang gezien de grote dikte van deze laag (en de bovenliggende lagen die eveneens drainerend zijn ten opzichte van de kleilagen). Ook de kleilaag 3a zal zijn veiligheidsfunctie (R2a) blijven vervullen.
- *Geosynthetic Clay Liner* - GCL. De geosynthetische materialen dienen in hoofdzaak om de GCL correct te kunnen manipuleren en positioneren en om de (inwendige) bentoniet tijdens deze manipulaties op zijn plaats te houden. Op het moment van degradatie hebben de geotextielen geen functie meer.
- Geotextiel tussen laag 3c en laag 4. Degradatie van dit geotextiel kan ervoor zorgen dat kleipartikels in de drainerende zandlaag komen. De omvang van dit fenomeen zal beperkt zijn aangezien er filtercriteria opgelegd worden (dit wil zeggen op elkaar afstemmen van de granulometrieën van de klei- en zandlagen). Bovendien wordt verwacht dat er steeds enkele niet-verstopte stromingspaden zullen overblijven en dit is voldoende om de drainerende functie te blijven vervullen.
- HDPE geomembraan boven de ondoorlatende topplaat. Eventuele degradatieproducten van dit membraan hebben geen negatieve invloed op de omliggende componenten: gezien de eenvoudige structuur van PE, de afwezigheid van halogenen, hydroxyl- en carboxylgroepen wordt geen effect van degradatie van HDPE op de duurzaamheid van beton en/of de migratie van radionucliden verwacht.

5.13.2.2 In de funderingen

Van boven naar onder (zie [HS-8 §8.5.4]):

- Geotextiel tussen de zand-cement ophoging en de grindlaag. Op het moment van degradatie is het zand-cement uitgehard en is het effect bijgevolg beperkt.
- Geogrid in de grindlaag. Op het moment van degradatie heeft het geogrid geen enkele functie meer.
- Geotextiel tussen de grindlaag en het onderliggende zand. In geval van degradatie van het geotextiel kan er op lange termijn vermenging optreden tussen de onderste zone van de grindlaag en het onderliggende zand (of BES - zie fiche 10 'optimalisatie'). De goede werking van de grindlaag komt hierdoor niet in het gedrang (voldoende marge op de dikte van de grindlaag).

5.13.3 Resterende onzekerheden

De resterende onzekerheden zijn niet van die aard dat ze de veiligheid in het gedrang brengen (zie boven).

5.13.4 Performantie-indicatoren

De belangrijkste performantie-indicatoren zijn:

- De treksterkte, rek bij breuk en stijfheid die door de technische fiches en labotesten worden geverifieerd;
- Het correct plaatsten van de geotextielen en geogrid (bijvoorbeeld overlap tussen de verschillende stroken, schade vermijden tijdens plaatsing), wat tijdens de bouw geverifieerd wordt;
- Het correct plaatsten van de geomembranen (bijvoorbeeld kwaliteit van de lasnaden), wat tijdens de bouw geverifieerd wordt.

5.14 Vast stalen dak

5.14.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

De stalen dakstructuur is aanwezig tijdens de exploitatiefase Ia. Zijn functie gelinkt aan de veiligheid is de volgende: het beschermen van de betonnen componenten (onder andere de monolieten) tijdens de exploitatiefase Ia tegen de weersomstandigheden (beperken van vries-dooi-cycli, droog-nat-cycli) om hun levensduur te verlengen.

Het vast stalen dak heeft enkel veiligheidsfuncties in de exploitatiefase en wordt aan het einde van fase Ia ontmanteld.

De stalen dakstructuur bestaat uit een reeks onafhankelijke structuren die worden verankerd aan de zijkant van de modules en ondersteund door lokale betonnen sokkels.

Het gekozen materiaal voor de draagstructuur is gegalvaniseerd staal. De functionele schil van de buitenbekleding bestaat uit gegalvaniseerd en gelakt staal. Een laag van 12 cm rotswol (of equivalent) zorgt voor de isolatie.

De stalen dakstructuur wordt ontworpen om waterinsijpeling te vermijden en zal een levensduur van 50 jaar hebben.

5.14.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

De graduele en lokale degradatieprocessen van het vaste dak zijn: defect in de primaire deklaag van het dak door atmosferische corrosie of mechanische gebeurtenissen *beyond design*.

Bij ontwerp en constructie worden specifieke maatregelen voorzien om de degradatie en veroudering te beperken, zoals het passend gebruik van materialen en de maatregelen voorzien in [HS-8, §8.5.6.4].

Er is jaarlijkse inspectie en onderhoud voorzien om mogelijke defecten te kunnen detecteren en de nodige onderhoudsmaatregelen en herstellingen te kunnen uitvoeren [HS-16, §16.5.7.4].

De ontwerpbelastingen van het vaste dak zijn gedocumenteerd in [HS-8, §8.5.6.3]. In geval van ontwerpgebeurtenissen zal de stalen dakstructuur weerstaan en blijft de rolbrug liggen op zijn rolbaan. Binnen de grenzen van de ontwerpbelastingen is dus geen risico dat de rolbruggen op de modules vallen. Er is dus geen impact op lange termijnveiligheid. Er werd berekend dat de hoeveelheid wapening in de modules, bepaald voor de langetermijnsconfiguratie (dit wil zeggen module met afdekking), voldoende is voor de belastingsgevallen van de exploitatiefase Ia, rekening houdend met de krachten overgedragen door de stalen dakstructuur op de module [HS-8, §8.5.6.3]. Het ontwerp van de betonsokkels is dusdanig dat ze geen preferentiële weg voor degradatie vormen [HS-8, §6.1.2 en OD-166 §14.2.13].

Vermoeiing door vibraties van de rolbrug is geen ontwerpgebeurtenis, hiervoor is het aantal brugbewegingen te beperkt, zie §5 van [R5-81].

Vermoeiing door windbelasting is evenmin een ontwerpgebeurtenis. Paragraaf §2 (5) van de norm EN 1991-1-4 vermeldt: "Vermoeiing door windbelasting behoort in acht te zijn genomen voor daarvoor gevoelige constructies." De norm noch de Belgische nationale bijlage geven aan hoe bepaald kan worden

of een constructie in dit opzicht gevoelig is of niet. Echter in de Duitse Nationale bijlage (Annex C §2) is hierover wel informatie te vinden: structuren met een dynamische coëfficiënt (c_d) groter dan 1,10 zijn te beschouwen als zijnde gevoelig. De maximale c_d van de dakstructuur is kleiner dan 1,10 [OD-167 §7.3 van appendix 1, p105/146] dus vermoeiing door wind moet niet beschouwd worden.

5.14.3 Resterende onzekerheden

Tijdens de exploitatiefase Ia wordt aangenomen dat degradatieprocessen de doeltreffendheid van het dak niet zullen beïnvloeden. Inspectie en onderhoud van het dak zullen worden uitgevoerd om een adequate doeltreffendheid ervan te waarborgen. Potentiële schade aan het dak tijdens deze fase zal worden hersteld. Daarom zijn de resterende onzekerheden niet van die aard dat ze de veiligheid in het gedrang brengen.

5.14.4 Performantie-indicatoren

De (afwezigheid van) waterinsijpeling wordt tijdens constructie geverifieerd en tijdens exploitatie opgevolgd via het drainage systeem alsook periodieke inspecties en onderhoud [HS-8, §8.5.5 en HS16, §16.6].

De beschouwde isolatie komt overeen met een R-waarde (warmteweerstand) van minimum 3 m²K/W. Dit wordt tijdens constructie geverifieerd (ondermeer via de technische fiche van de isolatie en zijn aangebrachte dikte).

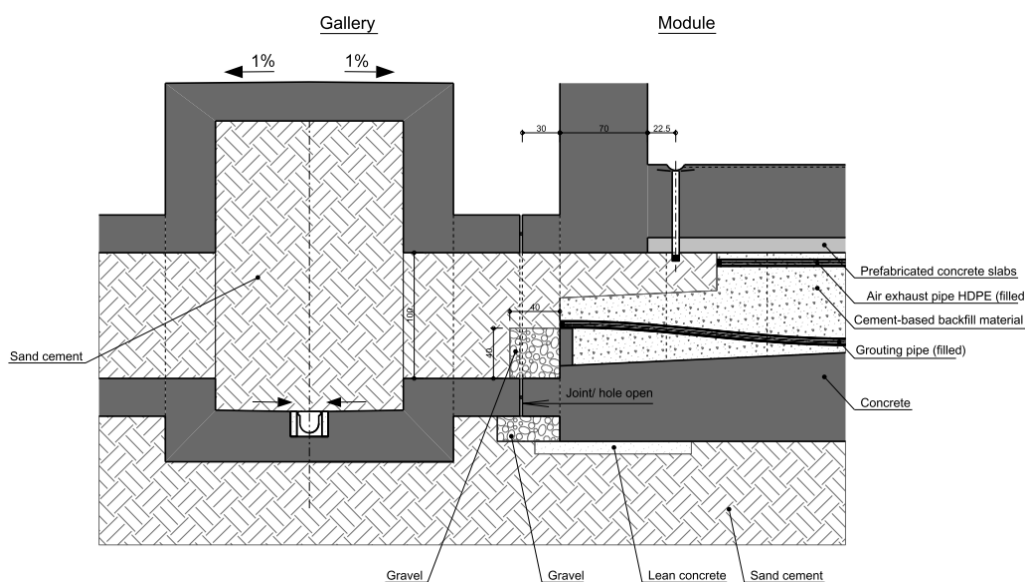
5.15 Anti-badkuipsysteem (ABS)

5.15.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

Het anti-badkuipsysteem moet het optreden van een badkuipeffect, namelijk het vollopen met water (en overlopen) van de modules vermijden. Het ABS bestaat uit verschillende componenten (zie Figuur 5-7):

- De roestvast stalen drainagebuizen door de ondersteunende plaat die vanaf de sluitingsfase onderdeel uitmaken van het ABS en ervoor zorgen dat water zich niet kan ophopen in de module;
- De opgevulde inspectieruimte: water dat via de drainagebuizen door de ondersteunende plaat (of door scheuren in deze plaat) in de inspectieruimte komt, wordt afgevoerd doorheen het opvulmateriaal dat een minimale hydraulische geleidbaarheid heeft van 10^{-6} m/s.

De opgevulde verbindingstunnels tussen de module en de inspectiegalerij en de opgevulde inspectiegalerij zelf: zolang de funderingsplaat niet gescheurd is, verplaatst het water zich doorheen het opvulmateriaal van de inspectieruimte in de richting van de inspectiegalerij. In de funderingsplaat zelf is geen ABS-opening voorzien, maar het water zal via de voeg in de verbindingstunnel afgevoerd worden. De aanwezige voegband wordt bij de sluiting verwijderd of doorboord. Voor het bevorderen van de waterverplaatsing naar deze voeg en van de continue afvoer van water komende uit de voeg, worden bovendien lokale opvullingen met drainagegrind voorzien.



Figuur 5-7: Overzicht van het ABS

5.15.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

Voor degradatie en veroudering van de roestvast stalen drainagebuizen door de ondersteunende plaat: zie §5.12.2.

5.15.3 Resterende onzekerheden

Voor de resterende onzekerheden betreffende de roestvast stalen drainagebuizen door de ondersteunende plaat: zie §5.12.3.

5.15.4 Performantie-indicatoren

Eens de roestvast stalen drainagebuizen door de ondersteunende plaat hun rol als deel van het ABS opnemen, is de performantie-indicator hun vermogen om water af te voeren uit de module. Ze mogen met andere woorden niet opgevuld zijn met een materiaal dat deze functie zou verhinderen.

Ook de afwezigheid van (of de doorboring van) de voegband tussen module en inspectiegallerij is een performantie-indicator.

5.16 Met bentoniet verrijkte grond (BES)

De met bentoniet verrijkte grond (*Bentonite Enriched Soil*, afgekort als BES) is een component die aan het ontwerp werd toegevoegd ten gevolge van een optimaliseringsoefening (zie [HS-2, §2.7.6]). Deze component bestaat uit een grondverbetering die toegepast wordt door het infrezen van een kleine hoeveelheid bentoniet in de aanwezige zandlaag en dit tot een diepte van ongeveer 40 cm (vooropgesteld tussen 25,0 en 25,4 m TAW). Deze barrière bevindt zich dus net onder de drainagelaag en zal enkel aangelegd worden in de zone onder de modules.

5.16.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

Deze component vervult een C-rol voor de R3 functie en kan dus bijdragen tot de sorptie van radionucliden.

Het in-situ infrezen van bentoniet is een bestaande techniek die voornamelijk gebruikt wordt om een grondlaag minder permeabel te maken. In de toepassing in de bergingsinstallatie is het doel echter het toevoegen van een extra sorptiebarrière. Wat meer is, een aanzienlijke daling van de hydraulische geleidbaarheid door het infrezen van bentoniet is hier niet wenselijk. Hoewel eventueel aanwezig water in dat geval nog steeds afgevoerd zou worden via de bovenliggende drainagelaag (grind) moet de daling van de hydraulische geleidbaarheid beperkt gehouden worden, opdat het water grotendeels door de sorptiebarrière zou stromen in plaats van er bovenop af te stromen.

- Als de doorlatendheid van het zand-bentoniet 10^{-7} m/s bedraagt, stroomt er 53% van het water door het zand-bentoniet en loopt er 47% op af [R5-204];
- Als de doorlatendheid van het zand-bentoniet 10^{-6} m/s bedraagt, stroomt er 86% van het water door het zand-bentoniet en loopt er 14% op af [R5-204].

Daarom wordt enerzijds een weinig zwellend type bentoniet gebruikt (calcium-bentoniet) en wordt anderzijds de toevoeging beperkt tot 4 gew% (+/- 1 gew%). Laboproeven hebben uitgewezen dat de hydraulische geleidbaarheid in dat geval daalt van grootteorde 10^{-4} m/s voor zand zonder bentoniet tot grootteorde 10^{-6} à 10^{-7} m/s [R5-114], wat op basis van de resultaten van hydrologische modellering voldoende evacuatie van water garandeert. De laboproeven werden uitgevoerd met het zand van de site en een commercieel beschikbaar calcium-bentoniet. In dezelfde proeven werd ook nagegaan en bevestigd dat dergelijke kleine toevoeging van bentoniet geen nadelig effect heeft op de mechanische eigenschappen: er is quasi geen invloed op de cohesie en de wrijvingshoek; de samendrukkingsmodulus daalt 10 à 30% wat slechts 1 à 2 mm extra uniforme zetting vertegenwoordigt. Bij kleine toevoegingen is dit een logisch resultaat: de zandkorrels vormen immers het skelet.

Gezien de belangrijke hoeveelheid cement die zich in de bovenliggende componenten bevindt, zal het water dat de BES bereikt, hoog alkalisch zijn. Er bestaan geen (experimentele) gegevens over de sorptiewaarden (K_d) van radionucliden op bentoniet voor een systeem in contact met cementporiënwater en slechts een beperkt aantal gegevens bij pH > 10. De resulterende sorptiewaarden zijn dus onzeker (zie §5.16.3). Echter, POSIVA en NAGRA hebben data verzameld (tot een maximale pH 12) op basis waarvan met de nodige voorzichtigheid toch richtwaarden kunnen voorgesteld worden voor de BES onder de bergingsinstallatie [R5-115].

5.16.2 Degradatie en veroudering: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

De evolutie van een bentoniet in een hoog alkalische omgeving is een samenspel van verschillende processen zoals:

- Diffusief/advectief transport;
- Snelle uitwisseling van kationen;
- Snelle protonatie-deprotonatiereacties aan de randen van de kleipartikels;
- Trage dissolutie van bentonietmineralen;
- Precipitatie van secundaire fasen.

Deze processen hebben een invloed op:

- Porositeit en hydraulische geleidbaarheid;
- Zwellingscapaciteit;
- Mineralogische samenstelling (en dus sorptie karakteristieken).

Deze processen zijn goed gekend, maar doordat de processen onderling een effect hebben op elkaar, ontstaat een complex systeem dat moeilijk accuraat te voorspellen is. Dit wordt in meer detail toegelicht in [R5-115].

5.16.3 Resterende onzekerheden

De meeste data rond de evolutie van bentonietmateriaal is beschikbaar voor diffusieve systemen (omdat dit type materialen doorgaans gebruikt wordt om laag-permeabele barrières te maken). In dit geval betreft het een eerder advectief systeem (hydraulische geleidbaarheid $\geq 10^{-7}$ m/s). Er kan verwacht worden dat daardoor de interactie tussen de vijf hierboven genoemde processen zal verschillen ten opzichte van een diffusief systeem, wat een gevolg zal hebben op de voorspelling van de evolutie van de BES die kan gedaan worden op basis van een dergelijk systeem. Een andere onzekerheid betreft de rol van onzuiverheden. Deze kunnen immers helpen om de alkalische pluim te bufferen en kunnen bijdragen tot sorptie.

Samengevat is er een onzekerheid over de exacte sorptiecapaciteit van de BES en over de evolutie van zowel deze sorptiecapaciteit (functie R3) als de hydraulische geleidbaarheid. Desondanks wordt geen dramatische daling verwacht van de sorptiecapaciteit door onder meer de precipitatie van secundaire fasen [R5-115].

Aangezien de mechanische eigenschappen van de zandlaag weinig beïnvloed worden door kleine toevoegingen van bentoniet (zie [R5-114]), wordt verwacht dat de mechanische eigenschappen weinig zullen veranderen in de tijd.

5.16.4 Performantie-indicatoren

Voor de aanleg van de eigenlijke BES zullen proefvakken aangelegd worden. Op het materiaal van deze proefvakken zullen dezelfde parameters bepaald worden als deze die bepaald werden in de laboproeven uit [R5-114]. De globale hydraulische geleidbaarheid moet voldoende hoog zijn ($\geq 10^{-7}$ m/s) en de

draagkracht moet gegarandeerd zijn. Verder zal ook de homogeniteit van de menging gecontroleerd worden (4 gew.% +/- 1 gew.%).

5.17 Spletten, openingen en holtes

Er zijn op verschillende plaatsen in de installatie spletten, openingen of holtes. Bij het ontwerp en de uitvoering wordt getracht deze zo veel mogelijk te beperken.

5.17.1 Rol, eigenschappen en verwacht gedrag

Zo zijn er holtes, spletten of openingen die inherent zijn aan het ontwerp:

- Horizontale spletten tussen de monolieten onderling. Afhankelijk van het type monoliet (Type I of Type II/III) worden in de modules vijf of zes monolieten op elkaar gestapeld. Behalve voor de onderste monoliet van de stapel, steunt het ondervlak van een monoliet op de wanden van de onderliggende. Aangezien het deksel ietwat verzonken ligt ten opzichte van de bovenzijde van de wanden van de monoliet, is er binnen het gabarit (of omgrenzingsprofiel) van de monolietwanden een spleet van enkele centimeter tussen het deksel en de onderkant van de bovenstaande monoliet. Bij Type I/II monolieten is het deksel 21 mm verzonken, bij Type III monolieten is dit 48 mm [R5-193, R5-194, R5-195]. Bij Type III monolieten zal de opvulmortel over het deksel vloeien; de uiteindelijke breedte van de spleet zal dus variëren en kleiner zijn dan 48 mm. Gootjes in de bovenzijde van de monolietwanden beperken stagnerend water op het deksel.
- Ook in de monoliet gevuld met afvalvaten zijn holtes aanwezig. De lucht die zich onder de bodem van een afvalcollo bevindt wanneer het in de caisson geplaatst wordt, zal niet allemaal ontsnappen tijdens het aanbrengen van de opvulmortel. Bijgevolg kan er zich onder elke afvalcollo een holte bevinden en bij bulkafval is het niet uitgesloten dat lokaal kleine luchtinsluitingen achterblijven op moeilijk bereikbare plaatsen bij afval met concave vormen.
- Om de nodige plaats te voorzien voor de hijsankers en het grijpen van de monolieten zijn de wanden van de caisson/monoliet bovenaan in de hoeken voorzien van een uitsparing.
- Daarnaast zijn er nog de evidente openingen zoals het drainage systeem en het anti-badkuipsysteem alsook roosters die dienen te vermijden dat het grind het drainagesysteem (en later ABS) blokkeert.

Holten, spletten of openingen die inherent zijn aan de bouwmethode:

- Bij het gebruik van bekistingstrekkers zullen deze van het niet-doorgaande type zijn. Zo worden doorgaande openingen door de modulewanden vermeden. Aan de oppervlaktes van de wand is er na ontlasting een kleine opening aanwezig, die opgevuld wordt met een geschikte herstellmortel of met een kleine op maat gemaakte prefab betonnen cilinder of kegel. De bekistingstrekkers worden centraal in de mazen van de wapening van de wanden gepositioneerd.

Bij het sluiten van de bergingsinstallatie wordt een maximale opvulling van alle spletten, holten en openingen beoogd, behalve voor wat betreft de roestvast stalen drainagebuizen door de ondersteunende plaat, die vanaf de sluitingsfase onderdeel uitmaken van het ABS.

- Bovenaan de inspectieruimte is de aanwezigheid van een spleet echter niet uit te sluiten. Een minimaal opvulratio van 98% wordt beoogd waardoor de gemiddelde spleet van grootteorde één centimeter is. Autogene krimp van het opvulmateriaal zou ertoe kunnen leiden dat er een spleet ontstaat tussen het opvulmateriaal en de kolommen en/of de wanden van de inspectieruimte. Er is

geen effect op de verwachte evolutie omdat het opvulmateriaal een (voor water) conductief materiaal is.

- Bij de sluiting van de installatie wordt (het grootste deel van) de inspectiegalerij opgevuld met zand en zand-cement. Net zoals bij de opvulling van de inspectieruimte wordt hier een maximale opvulratio nagestreefd. In de praktijk kan een opvulratio van 100% benaderd worden (zie Part III §5 van [R5-196]).
- De buizen van het drainagesysteem worden voor het grootste deel gedemonteerd bij de sluiting. De korte stukken doorheen de ondersteunende plaat worden niet opgevuld en dienen als onderdeel van het anti-badkuipsysteem (ABS).

5.17.2 Degradatie en verouderingen: oorzaken en processen, compatibiliteit en levensduur

Voor al deze besproken spleten, holten of openingen is de evolutie zeer beperkt, zolang er geen actieve corrosie optreedt in de gewapende betonnen structuren. Dit omdat de relevante degradatiemechanismen die geïdentificeerd werden, carbonatatie en uitloging zijn en er geen rechtstreekse volumeverandering optreedt bij deze processen. Eens actieve corrosie geïnitieerd is, zullen er zich geleidelijk aan scheuren vormen en nadien is het moeilijk om een betrouwbare beschrijving te geven van de verdere evolutie van het scheurpatroon.

De initiële grootte van de spleten, openingen en holten is beperkt, zodat zelfs bij een verregerende degradatie van de betonnen structuren enkel kleine lokale verzakkingen en geen grootschalige instortingen te verwachten zijn. Er wordt dus geen grote invloed verwacht op de stabiliteit en functionaliteit van de bovenliggende elementen, zoals de afdekking indien deze nog aanwezig zou zijn op het moment van optreden van de verzakkingen.

5.17.3 Resterende onzekerheden

Omwille van de lange tijdsduren en de onzekerheden die gepaard gaan met actieve corrosie, is het onmogelijk om de evolutie van deze spleten, openingen of holtes in de tijd kwantitatief te beschrijven.

5.17.4 Performantie-indicatoren

Spleten, holtes en openingen worden zo ver als mogelijk opgevuld. De opvulgraad hiervan is dan ook de performantie-indicator.

5.18 Referenties

5.18.1 Referenties

- [R5-1] R.T. Pabalan, F.P. Glasser, D.A. Pickett, G.R. Walter, S. Biswas, M.R. Juckett, L.M. Sabido, J.L. Myers, *Review of Literature and Assessment of Factors Relevant to Performance of Grouted Systems for Radioactive Waste Disposal*, CNWRA-2009-001, Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, San Antonio, TX, (2009)
- [R5-2] C. Langton, D. Kosson, *Review of Mechanistic Understanding and Modeling and Uncertainty Analysis Methods for Predicting Cementitious Barrier Performance*, Cementitious Barriers Partnership, CPB-TR-2009-002 rev. 0, (2009)
- [R5-3] NBN EN 206-1 :2001, Beton- Deel 1: *Specificatie, prestatie, productie en conformiteit*
- [R5-4] NBN B15-001 :2004, Aanvulling bij NBN EN 206-1 volgens NBN EN 206-1 - *Beton - Specificatie, prestatie, productie en conformiteit*
- [R5-5] VLAREM II, 2014. *Besluit van de Vlaamse regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiene* (B.S. 31 juli 1995)
- [R5-6] NAS, 2007, *Assessment of the Performance of Engineered Waste Containment Barriers, Committee to assess the Performance of Engineered Barriers, National Research Council*, The National Academies Press, Washington D.C., (2007)
- [R5-7] ONDRAF/NIRAS, Verslag van de meeting Proefafdekking van 18 & 19/01/2010 ANDRA: Centre de l'Aube, Nota 2010-0503, (2010)
- [R5-9] E. Coppens, *Prototype test programme*, NIRAS-nota 2012-0249 (2012)
- [R5-10] T. Soetens, *State-of-the-art report on Fibre Reinforced Concrete*, Magnel Laboratory For Concrete Research, (2016)
- [R5-11] E. Drouet, *Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires : prise en compte des transferts hydriques*. Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, (2010)
- [R5-12] G. Rastiello, *Influence de la fissuration sur le transfert de fluides dans les structures en béton. stratégies de modélisation probabiliste et étude expérimentale*, (Ph.D. thesis) Université Paris-Est, IFSTTAR, (2013)
- [R5-13] P.B. Bamforth, G.M.N. Baston, J.A. Berry, F.P. Glasser, T.G. Heath, C.P. Jackson, D. Savage, S.W. Swanton, *Cement materials for use as backfill, sealing and structural materials in geological disposal concepts*, SERCO Report prepared for NDA RWMD, Serco/005124/001 Issue 3, (2012)
- [R5-14] M. Senoo, K. Shirahashi, Y. Sakamoto, N. Moriyama and M. Konishi, *Research on safety evaluation for TRU waste disposal*, in F. Feizollahi, R. Kohout and A. Suzuki, Low and intermediate level radioactive waste management. New York, NY (USA). American Society of Mechanical Engineers 658(1) 483-490, (1989)
- [R5-15] E. Coppens, *Eigenschappen van het beton van de demonstratieproef 2011-2013 in verharde toestand*, NIRAS-nota 2013-1679, (2013)
- [R5-16] M. Sutton, *Review of distribution coefficients for radionuclides in carbonate minerals*, LLNL-SR-415700, (2009)

- [R5-17] M. Bradbury, L. Van Loon, *Cementitious near-field sorption databases for performance assessment of a L/ILW repository in a Palfris Marl Host Rock*, NAGRA, CEM-94: Update I, June 1996 Nagra Technical Report 96-06, (1997)
- [R5-18] M. Auroy, *Impact de la carbonatation sur les propriétés de transport d'eau des matériaux cimentaires*, PhD thesis, Université PARIS-EST, (2014)
- [R5-19] Report by BNFL Inc, *A literature review on the behaviour of buried contaminated concrete over time and relevance to plutonium, americium and uranium contamination at the Rocky Flats Environmental Technology site*, SW-A-004569, (2002)
- [R5-20] M. Constable, A. Craven and S. Dickinson, *Review of wasteform ageing up to repository resaturation*, Part One, WMT(06)P118 Issue 1, (2010)
- [R5-21] F. Pellegrini, S.D. Hills, P.J. Carey, K.H. Gardner and A. Maries, *Sorption and desorption of Cd, Co, Cu, Ni and Zn from carbonated Portland cement*, *Advances in Applied Ceramics*, Vol. 105, No 4, p.185-190, (2006)
- [R5-22] K. You, S.-H. Lee, S.-H. Hwang, J.-W. Ahn, *Effect of CO₂ carbonation on the chemical properties of waste cement: CEC and the heavy metal adsorption ability*, *Materials Transactions*, Vol.52 No. 8, p.1679-1684, (2011)
- [R5-23] M. Castellote, L. Fernandez, C. Andrade and C. Alonso, *Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations*, *Mater. Struct.*, Vol. 42 Issue 4 p.515–525, (2011)
- [R5-24] M. Auroy, S. Poyet, P. Le Bescop, J.-M. Torrenti, *Impact of carbonation on water transport properties of cement-based materials*, NUWCEM2014, 2nd International Symposium on Cement-Based Materials for Nuclear waste, Avignon, France, June 3-5, (2014)
- [R5-25] P; Redant, Electrabel – GDF Suez, *Goedkeuringsdossier WB02/A* (2011)
- [R5-26] E. Drouet, *Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires : prise en compte des transferts hydriques*. Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, (2010)
- [R5-27] G. Villain, M. Thiery, *Impact of carbonation on microstructure and transport properties of concrete*, *International Conference on durability of building materials and components*, Lyon, France, 17-20, (2005)
- [R5-28] I. Garcia-Lodeiro, J.G. Palomo, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, *A statistical approach to the study of concrete carbonation*, *Materiales De Construcción*, Vol.64, Issue 313, (2014)
- [R5-29] C.A. Rigo da Silva, R. J. Pedrosa Reis, F. Soares Lameiras, and W. Luiz Vasconcelos, *Carbonation-related microstructural changes in long-term durability concrete*, *Materials Research*, Vol.5, No3, 287-293, (2002)
- [R5-30] H. Ranaivormanana, *Transferts dans les milieux poreux réactifs non saturés : application à la cicatrisation de fissure dans les matériaux cimentaires par carbonatation*, Thèse, Université Toulouse III, Paul Sabatier, (2010)
- [R5-31] K.J. Swyler, C.J. Dodge, R. Dayal, *Assesment of irradiation in radwaste containing oranic ion-exchange media*, Brookhaven National Laboratory, Topical Report NUREG/CR-3812, (1984)
- [R5-32] N. Hyvert, *Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton*, Thèse, Université Toulouse III, Paul Sabatier, (2009)

- [R5-33] S. Tung Pham, *Effects of carbonation on the microporosity and macro properties of Portland cement mortar CEM I*, Journal of Materials Science and Chemical Engineering2, 40-52 (2014)
- [R5-34] *Evaluation of ettringite and hydrocalumite formation for heavy metal immobilization: Literature review and experimental study*, Maria Chrysochoou, Dimitris Dermatas, Journal of Hazardous Materials, V136 I1 p.22-33 (2006)
- [R5-35] M. Castellote, C. Andrade, A. Castillo, *Characterisation of cementitious matrices for a surface disposal of LLW*, report n° 19171 (2009)
- [R5-36] G.S. Duffó, S.B.Farina, F.M.Schulz, *Corrosion of steel drums containing cemented ion-exchange resins as intermediate level nuclear waste*, Journal of Nuclear Materials 438 p.116–125, (2013)
- [R5-37] Javier Sánchez Montero, *Optimization and characterization (including of fresh state, mechanical properties and durability) of the four differences mortars*, CISDEM Report n° CISDEM-44, Madrid, (2019)
- [R5-38] K. Hornbostel, C. K. Larsen, M.R. Geiker, *Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – a literature review*, Cement & Concrete Composites 39 p.60-72, (2013)
- [R5-39] O.E. Gjörv, Ø Vennesland, A.H. S. El-Busaidy, “*Electrical Resistivity of Concrete in the Oceans*,” Proceedings – 9 th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, pages 581 to 588, May 2-5, (1977)
- [R5-40] T. Matuso, T. Izumida, M. Hironaga, Y. Horikawa, T. Shiomi, *LiNO₃ addition to cement which prevents aluminum corrosion*, Symposium – Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXI, vol. 506, (1997)
- [R5-41] J. Zhang, M. Klasky, B. C. Letellier, *The aluminum chemistry and corrosion in alkaline solutions*, Journal of Nuclear Materials 384 p.175-189, (2009)
- [R5-42] E. Coppens, *Validatie effect van een CPF-liner op de duurzaamheid van de modules A en verificatie kwaliteit van het beton op basis van Glenium 27 en 360 kg CEM I LH*, NIRAS-nota 2015-2512, (2015)
- [R5-43] A. Silva, R. Neves & J. de Brito, *Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete*, Cement and Concrete Composites 50, p.73-81, (2014)
- [R5-44] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, *Climate Change 2007: The physical science basis – Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, (2007)
- [R5-45] Ryan J. Rohne, *Effect of Concrete Materials On Permeability of Concrete Mixes used in Mn/DOT paving project*, §. 2.3, (2009)
- [R5-46] Abrams, Duff, *Design of Concrete Mixtures, Bulletin 1*, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, (1918).
- [R5-47] Féret, René, *Sur le compacité des mortiers hydrauliques. Annales des Ponts et Chaussées*, Vol. 4, 2nd semester, p.5–161, (1892)
- [R5-48] B. P. Hughes, A. K. O. Soleit, R.W. Brierley, *New Technique for determining the electrical resistivity of concrete*, Mag. Concr. Res., Vol. 37, No. 133, p.243-8, (1985)
- [R5-49] M.C. Torrijos, G. Giaccio, R. Zerbino, *Mechanical and transport properties of 10 years old concretes prepared with different coarse aggregates*, Construction and Building Materials 44 p.7×6-715, (2013)

- [R5-50] P.A.M. Basheer, A.E. Long, *Influence of coarse aggregate on permeation durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete*, Construction and Building Materials 19 p.682-690, (2005)
- [R5-51] C. G. Pereira, J. Castro-Gomes, L. Pereira de Oliveira, *Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete*, Construction and Building Materials 23 p.602–608, (2009)
- [R5-52] X. Ping, J.J. Beaudoin, R. Brousseau, *Effect of aggregate size on transition zone properties at the portland cement paste interface*, Cement and Concrete Research. Vol. 21, p.999-1005, (1991)
- [R5-53] R. K. Dhir, P. C. Hewlett, Y. N. Chan, *Near surface characteristics of concrete : intrinsic permeability*. Magazine of Concrete Research, 41 p.87-97, (1989)
- [R5-54] T. Teruzzi, E. Cadoni, G. Frigeri, S. Cangiano, A. Plizzari, *Durability aspects of steel fibre reinforced Concrete*, Proceedings of the 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC) – BEFIB 2004, 20-22 September 2004, Varenna, Italy p.625-634, (2004)
- [R5-55] E. Coppens, J. Piérard, CSTC/WTCB, *Karakterisatie van mortel, Proefverslag 3 2^o versie*, DE65092004, (2010)
- [R5-56] M.A. Phifer, M.R. Millings, G.P. Flach, *Hydraulic property data package for the E-Area and Z-Area soils, cementitious materials, and waste zones*, WSRC-STI-2006-00198 (Table 6.2), (2006)
- [R5-57] X. Chen, S. Wu, J. Zhou, *Influence of porosity on compressive strength and tensile strength of cement mortar*, Construction and Building Materials 40 p.869-847, (2013)
- [R5-58] I. Papayianni, M. Stefanidou, *Strength-porosity relationships in lime-pozzolan mortars*, Construction and Building Materials 20 p.700-705 (2006)
- [R5-59] Y-Y. Kim, K-M. Lee, J-W. Bang and S-J. Kwon, *Effect of W/C ratio on durability and porosity in cement mortar with constant cement amount*, Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2014, Article ID 273460, (2014)
- [R5-60] M. Goueygou, Z. Lafhaj, M. Kaczmarek, *Relationship between porosity, permeability and ultrasonic Parameters in sound and damaged mortar*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Proceedings of International Symposium NDT-CE 2003, (2003)
- [R5-61] Y. Wang, D. Niu, Z. Dong, *Experimental Study on Carbonation of Steel Fiber Reinforced Concrete*, 4th international conference on the durability of concret structures, West Lafayette, IN, US, (2014)
- [R5-62] C. Desmettre, *Contribution à l'étude de la perméabilité du béton armé sous sollicitations statiques et cycliques*, Thèse de doctorat, Département des Génies Civil, Géologiques et des Mines, Ecole Polytechnique de Montréal, Université de Montréal, Décembre 2011, (2011)
- [R5-63] C. Desmettre, J-P. Charron, *Novel water permeability device for reinforced concrete under load*, Materials and Structures vol. 44 p.1713-1723, (2011)
- [R5-64] C. Desmettre, J-P. Charron, *Water permeability of reinforced concrete with and without fiber subjected to static and constant tensile loading*, Cement and Concrete Research vol. 42 p.945-952, (2012)
- [R5-65] C. Desmettre, J-P. Charron, *Water permeability of reinforced concrete subjected to cyclic tensile loading*, ACI Materials Journal, vol. 11 issue 1, p.79-88 (2013)

- [R5-66] C. Desmettre, J-P. Charron, *Water permeability of fiber reinforced concrete subjected to constant and cyclic loading*, 8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities (BEFIB 2012) Proceedings pro088, Edited by Joaquim A.O. Barros ISBN: 978-2-35158-132-2 e-ISBN: 978-2-35158-133-9 Pages: 332, (2012)
- [R5-67] L.J. Parrott, *Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete*, Materials and Structures / Matériaux et Constructions, vol 29, April 1996, p. 164-173
- [R5-68] A.W. Harris, A.K. Nickerson, *The physical properties of the Nirex Reference Vault Backfill*, AEA Technology, Report NSS/R335, AEA-D&W-0450, (1997)
- [R5-69] R.T. Pabalan, F.P. Glasser, D.A. Pickett, G.R. Walter, S. Biswas, M.R. Juckett, L.M. Sabido, J.L. Myers; *Review of literature and assessment of factors relevant to performance of grouted systems for radioactive waste disposal*. Center for Nuclear Waste Regulatory analyses, San Antonio, Texas, Report CNWRA 2009-001 (Contract NRC NRC-02-07-006), (2009)
- [R5-70] C.A. Langton & J. Weiss, *Transport through cracked concrete: literature review*, SRNL-STI-2012-00267 Revision 0, Savannah River National Laboratory, (2012)
- [R5-71] C. Andrade, *Report for describe the mechanism and risk of corrosion of the lifting anchors of the monoliths*, Report n° CISDEM - 44 III, (2014)
- [R5-72] J.M. Dupas & A. Pecker, *Static and dynamic properties of sand-cement*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, pp. 419-436, (1979)
- [R5-73] C.M. Abreu, M.J. Cristobal, M.F. Montemor, X.R. Novoa, G. Pena, M.C. Perez, *Galvanic coupling between carbon steel and austenitic stainless steel in alkaline media* Electrochimica Acta, vol. 47 p.2271-2279, (2002)
- [R5-74] S. Qian, D.Qu, *Galvanic effect induced by coupling of stainless steel and carbon steel reinforcements*, Institute for Research in Construction, NRCC-49226, Canada, (2006)
- [R5-75] Gro Markeset, *Stainless steel reinforcement in concrete structures - State of the art*, COIN Project Report 4 – 2008 (SINTEF), (2008)
- [R5-76] F. Cui, A. Sagüés, *Cathodic Behavior of Stainless Steel 316LN Reinforcing Bars In Simulated Concrete Pore Solutions*, NACE Corrosion Conference, Paper 08323, (2008)
- [R5-77] G.N. Flint, R.N. Cox, *The resistance of stainless steel partly embedded in concrete to corrosion by seawater*, Magazine of Concrete Research, Vol. 40, No.142, p.13, (1988)
- [R5-78] R. Francis, *Bimetallic Corrosion, Guide to good practices in corrosion control*, National Physical Laboratory, UK (2000)
- [R5-79] PD6484, *Commentary on Corrosion at Bimetallic Contacts and Its Alleviation*, British Standards Institution, (1979)
- [R5-80] R.K. Rowe, H.P. Sangam, *Durability of HDPE geomembranes*, Review article, Geotextiles and Geomembranes, vol. 20 p.77-95, (2002)
- [R5-81] Tractebel Engineering, *MGW - Steel Structure : Verification of the runway beam of the bridge crane*, ref. ONDRAF/4NT/0422595/000/01, Tractebel Engineering (Brussels), (2016).

- [R5-82] M. Andersson, H. Ervanne, M. Glaus, S. Holgersson, P. Karttunen, H. Laine, B. Lothenbach, I. Puigdomenech, B. Schwyn, M. Snellman, H. Ueda, M. Vuorio, E. Wieland, T. Yamamoto., *Development of methodology for evaluation of longterm safety aspects of organic cement paste components*, POSIVA Working Report 2008-28, (2008)
- [R5-83] E. Wieland, B. Lothenbach, M.A. Glaus, T. Thoenen, B. Schwyn, *Influence of superplasticizers on the long-term properties of cement pastes and possible impact on radionuclide uptake in a cement-based repository for radioactive waste*, Applied Geochemistry, Vol. 49 p.126-142, (2014)
- [R5-84] E. Lafond, M. Markulin, *Assessment of ASR risk in waste packages stored at the Belgoprocess site*, NIRAS-nota 2014-1085, (2014)
- [R5-85] M. Markulin, *Problématique ASR - screening des différents procédés de conditionnement – synthèse*, NIRAS-nota 2014-0897, (2014)
- [R5-86] M.-P. Yssorche-Cubaynes & J.-P. Ollivier, *La microfissuration d'autodessiccation et la durabilité des BHP et BTHP*, Materials and Structures 32(1), p.14-21, (1999)
- [R5-87] V. Baroghel-Bouny & P. Mounanga, *Effects of self-desiccation on autogenous deformations, microstructure, and long-term hygral behaviour*, Proceedings of the Fourth International Research Seminar on Self-Desiccation and its Importance in Concrete Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, p.21-48, (2005)
- [R5-88] C. Andrade, *Corrosion risk due to cracks*, IETcc, Report n° CISDEM-44 IV, (2014)
- [R5-89] S. Poyet, *Determination of the intrinsic permeability to water of cementitious materials: Influence of the water retention curve*, Cement and Concrete Composites Volume 35, Issue 1, January p.127–135, (2013)
- [R5-90] I.Galan, F.P. Glasser, D. Baza, C. Andrade, *Assessment of the protective effect of carbonation on Portlandite crystals*, Cement and Concrete Research, vol. 74 p.68-77, (2015)
- [R5-91] I. Galan, L. Perron, F. P. glasser, *Impact of chloride-rich environements on cement paste mineralogy*, Cement and Concrete Research, vol. 68 p.174-183 (2015)
- [R5-92] S. Benders, *Preliminaire studie met als doel het beoordelen van een mogelijke secundaire ettringietvorming in de supercontainer ten gevolge van een late thermische belasting* SGS-INTRON rapport N153067/R20160092a, (2016)
- [R5-93] L. Kupers, J. Piérard, *Bepaling van de alkali-silica gevoeligheid van granulaten*, WTCB-CSTC proefverslag DE612X344, (2016)
- [R5-94] B. Lagerblad, *Leaching performance of concrete based on studies of samples from old concrete constructions*, SKB Technical Report TR-01-27, (2001)
- [R5-95] K. Yokozeki, K. Watanabe, N. Sakata, N. Otsuki, *Modeling of leaching from cementitious materials used in underground environment*, Applied Clay Science, vol. 26 p.293-308 (2004)
- [R5-96] A. Morandeau, M. Thiéry, P. Dangla, *Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties*, Cement and Concrete Reserach, vol. 56 p.153-170, (2014)
- [R5-98] E. Coppens, J. Verstricht. *Instrumentatie en monitoring prototype caisson*, NIRAS -nota 2011-2257, (2011)

- [R5-99] V. L'Hostis, A. Millard, C. Gallé, Contribution to the Belgian Project by ONDRAF/NIRAS on the Disposal of Low-Level and Intermediate-Level Short-Lived Waste, *Instruction Notice on conditions and input data for estimating mechanical damages to repository barriers due to the corrosion of reinforcement systems*, CEA Report NT DPC/SCCME 10-548-A, (2010)
- [R5-100] G. De Schutter, P. Van Itterbeeck, N. Cauberg, B. Debbaut, B. Parmentier, *Ontwikkeling van zelfverdichende betonmengsels die potentieel toepasbaar zijn voor de uitvoering van wanden van modules voor de berging van radioactief afval categorie A te Dessel*, Eindverslag, (2016)
- [R5-101] M. Thomas, *The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review*, Cement and Concrete Research, vol. 41 p.209–216 (2011)
- [R5-102] W. Wieker, C. Hubert, H. Schubert, *Untersuchungen zum Einfluss der Alkalien auf die Stabilität der Sulfoaluminathydrate in Zementsteinen und Mörteln bei Warmbehandlung*, Institut für Bauingenieurwesen der TU Berlin (1996)
- [R5-103] T. Van Doorne, E. Coppens, *Aanpassingen aan de acceptatiecriteria m.b.t. tot de immobilisatiematrix op basis van cement voor heterogeen en homogeen geconditioneerd afval* ONDRAF/NIRAS NIRAS-nota 2015-1604 (2015)
- [R5-104] T. Rondou, *Verslag grootschalige proeven*, Rapport Gijko, Temse, p52 (2016)
- [R5-105] M. Andersson, H. Ervanne, M. Glaus, S. Holgersson, P. Karttunen, H. Laine, B. Lothenbach, I. Puigdomenech, B. Schwyn, M. Snellman, H. Ueda, M. Vuorio, E. Wieland, T. Yamamoto, *Development of methodology for evaluation of longterm safety aspects of organic cement paste components*, POSIVA Working Report 2008-28, (2008)
- [R5-106] E. Coppens. *Inspectie op scheuren van monolieten en caissons*, NIRAS-nota 2014-0334 ,(2014)
- [R5-107] E. Wieland, B. Lothenbach, M.A. Glaus, T. Thoenen, B. Schwyn, *Influence of superplasticizers on the long-term properties of cement pastes and possible impact on radionuclide uptake in a cement-based repository for radioactive waste*, Applied Geochemistry, Vol. 49 p.126-142, (2014)
- [R5-108] A. Vollpracht, B. Lothenbach, R. Snellings, J. Haufe, *Influence of SCM on pore solution composition*, International RILEM conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Concrete with Supplementary Cementitious Materials 22-24 August 2016, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, (2016)
- [R5-109] P. Schiessl, R. Weydert, *Corrosion of steel fibres in carbonated cracked Concrete*, Concrete in the service of mankind – Radial Concrete Technology, p.495-500, CRC Press (1996)
- [R5-110] P. Zuloaga, C. Andrade, M. Castellote, *Leaching of reinforced concrete vaults subjected to variable water content due to capillary suction created by seasonal temperature changes*, RILEM Workshop on Long-Term Performance of Cementitious Barriers and Reinforced Concrete in Nuclear Power Plant and Waste Management, NUCPERF 2009/EFC Event 319 – March 30 – April 2, 2009, Cadarache, France, RILEM Proceedings PRO 64, pp 3-11, Edited by V. L'Hostis, R. Gens, C. Gallé, ISBN: 978-2-35158-072-1 (2009)
- [R5-111] F.P. Glasser and T. Matschei, *Interactions between Portland cement and carbon dioxide*. Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cements, Montreal, (2007)

- [R5-112] C. Richet, P. Le Bescop, C. Gallé, H. Peycelon, S. Bejaoui, I. Pointeau, V. L'Hostis, B. Bary, Dossier de synthèse sur le comportement a long terme : Dossier de reference phenomenologique « colis beton » rapport CEA RT-DPC/SCCME 04-679-A, (2004)
- [R5-113] L. Wouters, *Relevante erosieprocessen in de fenomenologische analyse van de mogelijke evoluties van de afdekking*, NIRAS-nota 2018-0977, (2018)
- [R5-114] Afdeling Geotechniek, departement Mobiliteit en Openbare Werken, Vlaamse overheid, *Verslag over de resultaten van laboratoriumproeven op bentonite enriched soils*, ref. GEO-16/015, (2016)
- [R5-115] B. De Blochouse. *Bentonite Behavior in hyperalkaline solutions*, NIRAS-nota 2016-2970, (2016)
- [R5-116] G. Fagerlund, *A service life model for internal frost damage in concrete*, Lund University of Technology, Report TVBM-3119, §4,2, (2004)
- [R5-117] V. Baroghel-Bouny, M. Mainguy, T. Lassabatere, O. Coussy, *Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials*, Cement and Concrete Research, vol. 29 issue 8 p.1225-1238, (1999)
- [R5-118] O. Coussy, V. Baroghel-Bouny, P. Dangla, M. Mainguy, *Evaluation de la perméabilité à l'eau liquide des bétons à partir de leur perte de masse durant le séchage*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol. 5 (2-3), p.269-284, (2001)
- [R5-119] Z. Yang, J. Weiss, J. Olek, *Water absorption in partially saturated fractured concrete*, Proceedings of the International RILEM Workshop on Transport Mechanisms in Cracked Concrete, edited by K. Audenaert, L. Marsavina and G. De Schutter, (2007)
- [R5-120] V. Baroghel-Bouny, S. Poyet, *Permeability of cement-based materials*, NIROND Technical report NIROND-TR 2015-05 E V1, (2015)
- [R5-121] S. Eghtesadi, *The influence of defects in concrete (cracking and consolidation) on water absorption and electrical resistivity*, Thesis, Concordia University, Montréal, Québec, Canada, (2014)
- [R5-122] A. Aït-Mokhtar, R. Belarbi, F. Benboudjema, N. Burlion, B. Capra, M. Carcassès, J-B. Colliat, F. Cussigh, F. Deby, F. Jacquemot, T. de Larrard, J-f. Lataste, P. Le Bescop, M. Pierre, S. Poyet, P. Rougeau, T. Rougelot, A. Sellier, J. Séménadisse, J-M. Torrenti, A. Trabelsi, P. Turcry, H. Yanez-Godoy, *Experimental investigation of the variability of concrete durability properties*, Cement and Concrete Research vol. 45 p.21-36, (2013)
- [R5-123] J-M. Torrenti, O. Didry, J-P. Ollivier, F. Plas, *La dégradation des bétons, couplage fissuration – dégradation chimique dans les structures en béton*, Editions Hermès (1999)
- [R5-124] J.M. Torrenti, T. de Larrard, F. Benboudjema, *Coupling between leaching and mechanical behaviour of concrete*, Cement-Based Materials for Nuclear Waste Storage, XVIII, p.69, Bart F., Cau-dit-Coumes C., Frizon F, Lorente S. (Eds), Springer, (2013)
- [R5-125] Neves & Vinagre Santos, *Air permeability assessment in a reinforced concrete viaduct*, in: Binda et al. (Eds.) proceedings of SACoMaTIS 2008 (RILEM Pro59), 299-307, Varenna, Italy, (2008)
- [R5-126] C. Gallé, H. Peycelon, P. Le Bescop, *Effect of an accelerated chemical degradation on water permeability and pore structure of cement-based materials*, Advances in Cement Research, vol. 16, Issue 3, p.105-114, July (2004)

- [R5-127] Agostini, Lafhaj, Skoczylas, Loodsveldt, *Experimental study of accelerated leaching on hollow cylinders of mortar*, Cement and Concrete Research, vol. 37, p.71-78, (2007)
- [R5-128] Phung, Maes, Jacques, de Schutter, Ye, *Decalcification of cement paste in NH₄NO₃ solution: microstructural alterations and its influence on the transport properties*, Proceedings of the 10th fib International PhD symposium in Civil Engineering, 2014 July 21-23, Université Laval, Québec, Canada, (2014)
- [R5-129] S. Poyet, X. Bourbon, *Experimental investigation of concrete packages for radioactive waste management: permeability and influence of junctions*, Transport in Porous Media, Vol. 95, Issue 1, p.55–70, (2012)
- [R5-130] T. Vandoorne, *Berekening van de maximaal geaccumuleerde geabsorbeerde dosis in harsen van categorie A*. NIRAS-nota 2016-2872, (2016)
- [R5-131] R. Gens, E. Coppens, *Thaumasite formation and ettringite formation, new insight*. NIRAS-nota 2017-1893, (2017)
- [R5-132] Liu, S., Yan, P., *Effect of limestone powder on microstructure of concrete*, Journal of Wuhan University of technology, Material Science, vol. 25, Issue 2, (2010)
- [R5-133] Z. Sawicz and S. S. Heng, *Durability of concrete with addition of limestone powder*, Magazine of Concrete Research, vol. 48, Issue 175, p.131-137, June (1996)
- [R5-134] G. De Schutter, *Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete*, 36th Conference on Our World in Concrete & Structures Singapore, August 14-16 2011, (2011)
- [R5-135] Marta Castellote Armero, *Resistance to thaumasite formation of concrete C-15-A and mortar MI (cont. of preliminary results given in the report 19171)*, IETcc, Report 19-4 (2012)
- [R5-136] F. Bellmann, B. Moser, J. Stark, *Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen*, Cement and Concrete Research, vol. 36, p.358-363, (2006)
- [R5-137] C. Yu, W. Sun, K. Scrivener, *Mechanism of expansion of mortars immersed in sodium sulfate solutions*, Cement and Concrete Research, vol. 43, p.105–111, (2013)
- [R5-138] Wolfram Müllauer, Robin E. Beddoe, Detlef Heinz, *Sulfate attack expansion mechanisms*, Cement and Concrete Research, vol. 52, p.208–215, (2013)
- [R5-139] W. Kunther, B. Lothenbach, K. Scrivener, *On the relevance of volume increase for the length changes of mortar bars in sulfate solutions*, Cement and Concrete Research, vol. 46, p.23–29, (2013)
- [R5-140] W. Kunther, B. Lothenbach, J. Skibsted, *Influence of the Ca/Si ratio of the C–S–H phase on the interaction with sulfate ions and its impact on the ettringite crystallization pressure*, Cement and Concrete Research, vol. 69, p.37–49, (2015)
- [R5-141] E.F. Irassar, *Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler – A Review*, Cement and Concrete Research, vol. 39, p.241-254, (2009)
- [R5-142] A.M. Hossack, M.D.A. Thomas, *Evaluation of the effect of tricalcium aluminate content on the severity of sulfate attack in Portland cement and Portland cement limestone cement, Cement and Concrete Composites*, vol. 56, p.115-120, (2015)

- [R5-143] T. Schmidt, B. Lothenbach, M. Romer, J. Neuenschwander, K. Scrivener, *Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements*, Cement and Concrete Research, vol. 39, p.1111–1121, (2009)
- [R5-144] P. J. Tikasly, D. Roy, B. Scheetz, T. Krize, *Redefining cement characteristics for sulfate-resistant Portland cement*, Cement and Concrete Research, vol. 32, issue 8, p.1239-1246, (2002)
- [R5-145] L.-M. Raado, T. Hain, *Sulphate Resistance of Various Portland Cements*, Tallinn Technical University, Estonia
- [R5-146] V. Smith, J. Dawson, A. Harper, *Radiation Testing of PVC film in Aqueous Solution*, Amec Foster Wheeler, 4/12/2015, UK (2015)
- [R5-147] I. Mersiowsky, M. Weller, J. Ejlertsson, *Fate of plasticized PVC product under landfill conditions: A laboratory-scale landfill simulation reactor study*, Wat. Res. vol. 35, N° 13, p.3063-3070, (2001)
- [R5-148] E. Coppens, *Carbonatatie zand-cement demonstratieproef*, NIRAS-nota 2017-0848, (2017).
- [R5-149] E. Coppens, J. Piérard, *Bepaling van de druksterkte evolutie van mortel SFFC3 0.364 op jonge leeftijd (en) bepaling van het krimgedrag van mortel SFFC3 en de invloed van Rheomac 100 hierop*, WTCB-CSTC DE65092004/3, 11 July (2011).
- [R5-150] J. Piérard, *Sensitiviteitsstudie op mortel: besluit*, WTCB-CSTC brief 26/09/2016 ref.: 300 / 54753 / JPI / KCA, (2016)
- [R5-151] E. Coppens, J. Piérard, V. Pollet, *Kan een CPF-liner de levensduur van een betonconstructie verlengen?*, WTCB-contact n° 38 (2 - 2013)
- [R5-152] G. Fagerlund, *The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete*, Materiaux et Constructions, vol. 10 n° 58, (1977)
- [R5-153] K.A. Snyder, C. Langton, B. Clark, C. Ferraris & J. Dawson, *Engineered infills for concrete barriers*, National Institute of Standards and Technology (NIST), Report NISTIR 7311, April (2006)
- [R5-154] C. Bataillon, F. Bouchon, C.Chainais-Hillairet, J. Fuhrmann, E. Hoarau & R. Touzani, *Numerical methods for the simulation of a corrosion model with moving oxide layer*, Journal of Computational Physics 231, p.6213-6231, (2012)
- [R5-155] D. Macdonald, A. Saleh, A. Almarzoogi, O. Rosas-Comacho, S.-K. Lee, S. Sharifi-esl & M. Taylor, *The electrochemistry of carbon steel in simulated concrete pore water in Boom Clay repository environments*, Proceedings of EUROCORR 2011, Nuclear Corrosion (WP4), Stockholm, Sweden, Sept. 4-8, (2011)
- [R5-156] R.C. Newman, S. Wang & N. Senior, *Understanding and quantifying the corrosion of carbon steel in grouts relevant to the Swiss L/ILW repository*, Nagra, Arbeitsbericht NAB 15-17, March (2015)
- [R5-157] N. Diomidis, *Scientific basis for the production of gas due to corrosion in a deep geological repository*, Arbeitsbericht NAB 14-21, Nagra, February (2014)
- [R5-158] S. Schaerlaekens & J. Vyncke, *Le béton renforcé de fibres d'acier*, 2e Partie, Recherches & Etudes, CSTC Magazine, Hiver (2000)
- [R5-159] H. Sadeghi-Pouya, E. Ganjian, P. Claisse & K. Muthuramalingam, *Corrosion durability of high performance steel fibre reinforced concrete*, Proceedings of the Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan, August (2013)

- [R5-160] American Concrete Institute Committee 544, *State-of-the-art report on fiber reinforced concrete*, ACI 544.1R-96, (reapproved), (2002)
- [R5-161] T. Gutberlet, H. Hilbirg, R.E. Beddoe, *Acid attack on hydrated cement - Effect of mineral acids on the degradation process*, Cement and Concrete research, vol. 74 p.35-43, (2015)
- [R5-162] Wetenschappelijk en technisch centrum voor het bouwbedrijf (WTCB-CSTC), *Prestatiegericht ontwerp van beton, blootgesteld aan chemische aantasting*.
- [R5-163] Wetenschappelijk en technisch centrum voor het bouwbedrijf (WTCB-CSTC), WTCB-dossier - Katern nr. 9 - 4° trimester 2004 - pagina 1, (2004)
- [R5-164] D. Stinglhamber & T. Richir, *Proposition de phasage constructif des modules*, Tractebel note TS021-NTE-3-003, 22 November (2010)
- [R5-165] M. Hakanen, H. Ervanne, *The Influence of Organic Cement Additives on Radionuclide Mobility*, A Literature Survey, POSIVA Working Report 2006-06, (2006)
- [R5-166] D. Van Houdt, *Optimalisatie mortelformule SFFC3 tot IPM1*, Belgoproces-nota UBT/2012-03063, 27 September (2012)
- [R5-167] G. Baston, M. Cowper, P. Davies, J. Dawson, B. Farahani, T. Health, J. Schofield, V. Smith, S. Watson, J. Wilson; *The Impact of PVC Additives and Their Degradation Products on Radionuclide Behaviour*. RWM005769 p.156, (2017)
- [R5-168] V. Labed, H. Obeid, K. Ressayre, *Effect of relative humidity and temperature on PVC degradation under gamma radiation: Evolution of HCl production yields*, Radiation Physics and Chemistry, vol. 84 p.26-29, (2013)
- [R5-169] V. Macros Meson, A. Michel, A. Solgaard, G. Fischer, C. Edvardsen, T.L. Skovhus, *Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete – a literature review*, Published in fib symposium 2016: performance-based approach for concrete structures, (2016).
- [R5-170] J. Colombani, G. Herbet, C. Rossi, C. Jousot-Dubien, V. Labed, T. Gilardi, *Leaching of Plasticized PVC : Effect of Irradiation*, Journal of applied Polymer Science, Vol. 112, p.1372-1377, (2009)
- [R5-171] S. C. Bradshaw, S. C. Gaudie, B. F. Grienfield, S. Long, M. W. Spindler, J. D. Dilwkins, *Experimental studies on the chemical and radiation decompositions of intermediate level waste containing organic materials*. DOE Report N° ILWRP/87/P087, (1987)
- [R5-172] B. de Blochouse, *Colloïden in de oppervlakteberging te Dessel: origine en stabiliteit*, NIRAS-nota 2018-0124, (2018)
- [R5-173] Serco, *Review of the behaviour of colloids in the near field of a cementitious repository*, SERCO/TAS/000475/01 Issue 02, Report to NDA RWDM, September (2009)
- [R5-174] R. Beard, D. Roberts, P. Sellin, K. Koskinen & L. Bailey, *State-of-the-art report on the treatment of colloids and related issues in the long term safety case*, BELBaR D1.2, October (2012)
- [R5-175] N. Bryan, N. Sherriff, K. Norrfors, M. Bouby, Y. Heyrich, S. Heck & T. Schäfer, *Understanding of radionuclide colloid interaction (with special emphasis on sorption reversibility)*, BELBaR D3.6, 30 May (2014)
- [R5-176] A. Shelton, P. Sellin, T. Missana, T. Schäfer, R. Červinka & K. Koskinen, *Synthesis Report: Colloids and related issues in the long term safety case*, BELBaR D1.4, 28 April (2016)

- [R5-177] L. Wang, E. Martens, D. Jacques, P. De Cannière, J. berry, D; Mallants, *Review of sorption values for the cementitious near field of a near surface radioactive waste disposal facility*. NIROND-TR 2008-23 E, April (2009).
- [R5-178] T. Missana, U. Alonso, N. Mayordomo, A.M. Fernandez, T; López, M. Hedström, E. Ekvy Hansen, U. Nilsson, M. Bouby, Y. Heyrich, S. Heck, S. Hilpp, T. Schäfer, L. Liu, L. Moreno, I. Neretnieks, J. Gondolli, R. Červinka, *Final report on experimental results on clay colloid stability*. BELBaR Deliverable D4.11., January (2016).
- [R5-179] E. Wieland, *Experimental studies on the inventory of cement-derived colloids in the pore water of a cementitious backfill material – A contribution to the understanding of their role in the retardation of radionuclides in the near-field of a repository*, Nagra Technical Report 01-02, LES/PSI, (2001)
- [R5-180] U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Design of erosion protection for long-term stabilization*. Final report. NUREG-1623, (2002)
- [R5-181] NUREG, *Methodologies for evaluating long-term stabilization designs of Uranium mill tailings impoundments*. NUREG/CR-4620, (1986)
- [R5-182] U.S. Environmental Protection Agency, *Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers* (draft). EPA 540-R-04-007, (2004)
- [R5-183] SCK-CEN, *Gully erosion risk assessment for the earth cover embankment, calculation note on the assessment of gully erosion risk using a (semi)-empirical method*. Leterme, B. & Jacques, D., Reference: SCK/5397898, (2015)
- [R5-184] Le, T.M., Fatahi, B., and Khabbaz, H. *Viscous behaviour of soft clay and inducing factors*. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 30, Issue 5, p.1069-1083, (2012)
- [R5-185] F. Havel, *Creep in soft soils*, PhD thesis, Faculty of Engineering, Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology 192 p., (2004)
- [R5-186] Agentschap voor Natuur en Bos, *Technisch Vademecum Bomen - Harmonisch Park- en Groenbeheer*. Brussel, Agentschap voor Natuur en Bos. 416 p., (2008)
- [R5-187] R. Fischer, M. Lorenz (eds.). *Forest Condition in Europe, Technical Report of ICP Forests and FutMon*. von Thünen Institute, Institute of World Forestry, Hamburg. 212 p., (2011)
- [R5-188] Ł. Pawlik, *The role of trees in the geomorphic system of forested hillslopes—a review*. *Earth-Science Reviews*, vol. 126, p.250-265, (2013)
- [R5-189] F. J. Swanson, R. J. Janda, T. Dunne, D. N. Swanston, *Sediment budgets and routing in forested drainage basins*. *General technical report of Forest Service United States Department of Agriculture*, PNW-141, (1982).
- [R5-190] Ł. Pawlik, P. Migoń, P. Owczarek, A. Kacprzak, *Surface processes and interactions with forest vegetation on a steep mudstone slope, Stolowe Mountains, SW Poland*. *Catena*, vol. 109, p.203-216, (2013)
- [R5-191] Tractebel Engineering. *Toepassing van NUREG 1623 (Design of Erosion Protection for Long-Term Stabilization) op de bio-intrusie barrière en de biologische laag van de afdekking*. Interne Nota MD-07-E-02.
- [R5-192] G. Demarée, *Intensity-Duration-Frequency Relationship of Point precipitation at Uccle. Reference period 1934-1983*, KMI van België, Publications Reeks A, nr. 116, (1985)
- [R5-193] Plan N° 2 van het veiligheidsrapport, Plan APD_121_GCCO_002_F

- [R5-194] Plan N° 3 van het veiligheidsrapport, Plan APD_121_GCCO_003_G
- [R5-195] Plan N° 4 van het veiligheidsrapport, Plan APD_121_GCCO_004_F
- [R5-196] EURIDICE, *The design and installation of the PRACLAY In-Situ Experiment*, Ref. 13-129, September (2013).
- [R5-197] D. Jacques, *Benchmarking of the cement model and detrimental chemical reactions including temperature dependent parameters*, NIROND-TR 2008–30 E V1, (2009)
- [R5-198] E. Drouet, *Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires prise en compte des transferts hydriques*, CEA-R-6274, (2011)
- [R5-199] E. Coppens, *Betonveroudering in de omgeving van Dessel: een case study*, NIRAS-nota 2015-3099, (2015)
- [R5-200] J. Perko, D. Jacques, J. Govaerts, *Water saturation and water flow paths in the near-surface disposal at Dessel*, SCK note SCK/4195432 Version 2.0, February (2015)
- [R5-201] Productiereglement voor stortklaar BENOR-beton, *Benor-certificatie van stortklaar beton*, be-cert, TRA 550.
- [R5-202] J. Piérard, *Détermination de la résistance en compression et de la résistance au gel-dégel d'une formulation de béton*, DE 612X087, (2009)
- [R5-203] P. Laurencet, JP. Jaccoud, *Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel*, LCPC (2003) *Fissuration, étanchéité et durabilité des structures en béton armé*, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, (2000)
- [R5-204] Tractebel, *Bentonite enriched sub-base: FEFLOW 2D modelling including unsaturated conditions*, ONDRAF_4NT_0574771_000_00, 14 October (2017)
- [R5-205] M.-P. Yssorche, *Microfissuration et durabilité des bétons à hautes performances*. PhD thesis, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA-UPS Complexe scientifique de Rangueil, Toulouse, Cedex, (1995)
- [R5-206] O. Kayali, M.S.H. Khan, M. Sharfuddin Ahmed, *The role of hydrotalcite in chloride binding and corrosion protection in concretes with ground granulated blast furnace slag*, Cement and Concrete Composites, vol. 34, p.936-945, (2012)
- [R5-207] Y. Chen, Z. Shui, W. Chen, G. Chen, *Chloride binding of synthetic Ca–Al–NO₃ LDHs in hardened cement paste*, Construction and Building Materials, vol. 93, p.1051-1058, (2015)
- [R5-208] X. Ke, S. A. Bernalab, J. L. Provis, *Uptake of chloride and carbonate by Mg-Al and Ca-Al layered double hydroxides in simulated pore solutions of alkali-activated slag cement*, Cement and Concrete Research, vol. 100, p.1-13, (2017).
- [R5-209] H.M. Johnston & D.J. Wilmot, *Sorption and diffusion studies in cementitious grouts*. Waste Management, Vol. 12, p.289-297, (1992)
- [R5-210] X. Hou, L. J. Struble, J. Kirkpatrick, *Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite*, Cement and Concrete Research, vol. 34, p.1683–1696, (2004)
- [R5-211] M. A. Phifer, M. R. Millings, G. P. Flach, *Hydraulic property data package for the E-area and Z-area soils, cementitious materials and waste zones*, WSRC-STI-2006-00198 rev. 0, (2006)
- [R5-212] F.P. Glasser, J. Marchand, E. Samson, *Durability of concrete – Degradation phenomena involving detrimental chemical reaction*, Cement and Concrete Research, vol. 38, p.226-246, (2008)

- [R5-213] G.A. Julio-Betancourt, *Effect of De-Icer and Anti-Icer Chemicals on the Durability, Microstructure, and Properties of Cement-Based Materials*, University of Toronto, (2009)
- [R5-214] E. Weetjens, *Vegetatie-ontwikkeling op grofkorrelig substraat (grind en kiezel)*, SCK note SCK\6251750, 29 September (2015)
- [R5-215] N. ter Heide, E. Schlangen, *Selfhealing of early age cracks in concrete*, Proceedings of the first international conference on self healing materials, (2007)
- [R5-216] Ø. Bjøntegaard, *Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardened concrete structures – State of the art*, Norwegian Public Roads Administration, COIN project report 31-2011, (2011)
- [R5-217] W. Wacquier, *Doenbaarheid van het opvullen van de inspectieuitmes*, Project voor de oppervlakteberging van categorie A-afval te Dessel, NIROND-TR 2014-03 N (2014)
- [R5-218] V.T. Ngala & C.I. Page, *Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes*, Cement and concrete research 27(7), pp. 995-1007, (1997)
- [R5-219] NBN EN 12620, *Toeslagmateriaal voor beton*.
- [R5-220] Be-Cert, PTV 411 – *Codificatie van de granulaten overeenkomstig de normen NBN EN 12620, NBN EN 13043, NBN EN 13139 en NBN EN 13242*.
- [R5-221] J. Newman & B. Choo, *Advanced concrete technology – Processes*, tabel 12.1 (2003)
- [R5-222] NF P18 542, *Granulats - Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction*, (2004)
- [R5-223] ASTM C 1260, *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*, (2007)
- [R5-224] NF P 18 594 § 5.2, *Granulats - Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis*, (2015)
- [R5-225] BRE Construction Division, *Concrete in aggressive ground*, Special Digest 1, 3^e ed. (2005)
- [R5-226] ASTM C1293, *Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction*, (2015)
- [R5-227] M. Castellote, *resistance to thaumasite formation of concrete C-15-A and mortar M1 (cont. Of preliminary results given in the report 19171)*, report n° 19-4, (2012)
- [R5-228] M. Castellote, A. Castillo, C. Andrade, *Complementary studies of the concrete Mix C-15-A*, report n° 19-5, (2013)
- [R5-229] ONDRAF/NIRAS, *Estimation of concrete carbonation in the modules and monoliths*, NIROND-TR 2011-19 E V2, (2011)
- [R5-230] Stephane Poyet, *Corrosion des armatures*, CEA/DEN/DANS/DPC/SECR/LECBA/, (2018)
- [R5-231] B. Lothenbach, G. Le Saout, M. Ben Haha, R. Figi, E. Wieland, *Hydration of a low-alkali CEM III/B-SiO₂ cement (LAC)*, Cement and Concrete Research, vol 42, pp. 410-423, (2012)

- [R5-232] J.A. Gisby, R.H. Davies, A.T. Dinsdale, M. Tyrer, F.P. Glasser, J. Hill, P. Livesey, C. Walker, *C-S-H Solubility Modeling at Different Temperatures*, in Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement, Cement Association of Canada, Montreal, (2007)
- [R5-233] A.W. Harris, M.C. Manning, W.M. Taerle, C.J. Tweed, *Testing of Models of the Dissolution of Cements – Leaching of Synthetic CSH gels*, Cement and Concrete, 32, pp. 731-746, (2002)
- [R5-234] C. Cau-dit-Coumes, S. Courtois, D. Nectoux; S. Lecrecq, X. Bourbon, *Formulating a low-alkalinity, high-resistance and low-heat concrete for radioactive waste repositories*, Cement and Concrete Research 36, pp. 2152-2163, (2006)
- [R5-235] David Manuel García Cobos, *The role of superplasticizers and their degradation products on radionuclide mobility*, A thesis submitted in fulfilment of the requirements for degree of Doctor of Philosophy at the Universitat Politècnica de Catalunya, (2018)

5.18.2 Ondersteunde documenten

- [OD-011] ONDRAF/NIRAS, Formulation of the concrete for the modules, concrete containers and cementitious backfill, Note 2007-1876 (rev. 3) 2019.
- [OD-038] ONDRAF/NIRAS, Review of sorption values for the cementitious near field of a near surface radioactive waste disposal facility, NIROND-TR 2008–23 E V1 (2009)
- [OD-039] ONDRAF/NIRAS, Evolution of concrete pore water and solid phase composition during leaching with different types of water, NIROND-TR 2008-24 E V3 2019
- [OD-063] SCK-CEN, S. Seetharam, D. Jacques, Data of water saturation states of concrete from field/laboratory measurements, SCK-CEN/22099061 ER-0371 (2017).
- [OD-065] ONDRAF/NIRAS, Long-term evolution of the multi-layer cover, NIROND-TR 2010–03 E V2 (2018).
- [OD-107] ONDRAF/NIRAS, Additional sorption parameters for the cementitious barriers of a near-surface repository, NIROND-TR 2010–06 E V1 (2011)
- [OD-108] ONDRAF/NIRAS, Selection of near field parameters for the Dessel near surface repository, NIROND-TR 2010-07 E V2 (2018)
- [OD-134] ONDRAF/NIRAS, Gevoeligheidsstudie van beton NIROND-TR 2011-74 N V1 (2011)
- [OD-158] ONDRAF/NIRAS, Final cover and test cover – Principles, Design and implementation, NIROND-TR 2011-79 E V2 (2018)
- [OD-166] ONDRAF/NIRAS, Detailed Design Modules, NIROND-TR 2011-55 E V3 (2018)
- [OD-167] ONDRAF/NIRAS, Detailed Design Steel Structure, NIROND-TR 2011-61 E V3 (2018)
- [OD-187] ONDRAF/NIRAS, Aspects phénoménologiques relatifs aux processus de dégradation chimiques des barrières ouvragées à base de liant hydraulique, NIROND-TR 2011-58 V3 (2018)
- [OD-206] ONDRAF/NIRAS, Estimation of the damage induced by corrosion, NIROND-TR 2011–71 E V1 (2011)
- [OD-270] ONDRAF/NIRAS, Re-evaluation of lower limit values for sorption in cementitious materials in the context of the Dessel disposal site, BMG Engineering Ltd, NIROND-TR 2018-02 E V1 (2018)

Hoofdstuk 5: Kennis van de fenomenologie van de kunstmatige barrières in hun omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie A-afval te Dessel

[OD-281] ONDRAF/NIRAS, Anti-bathtub system: FEFLOW 2D modelling including unsaturated conditions, NIROND-TR 2019-02 E V1 (2019)

Bijlage 5-1: Lijst van afkortingen

ASR	Alkali Silica Reactie
ABS	Anti-badkuipsysteem
BDDBE	Krachtiger dan het basisontwerp voor aardbevingen (<i>Beyond Design Basis Earthquake</i>)
BES	Met bentoniet verrijkte grond (<i>Bentonite Enriched Soil</i>)
CEA	Commissariaat voor atoomenergie (Frankrijk) (<i>Commissariat à l'énergie atomique</i>)
CPF	Semipermeabel bekistingsmembraan (<i>Controlled Permeable Formwork</i>)
C-S-H	Cementchemische notatie voor calciumsilicaathydraat. C=CaO, S=SiO ₂ , H=H ₂ O
DBE	Basisontwerp voor aardbeving (<i>Design Basis Earthquake</i>)
DEF	Vertraagde ettringietvorming (<i>Delayed Ettringite Formation</i>)
ENRESA	Nationale instelling voor radioactief afval (Spanje) (<i>Empresa Nacional de RESiduos Radiactivos</i>)
FANC	Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle
GRE	Glasvezelversterkte epoxy (<i>Glass Reinforced Epoxy</i>)
HCP	Uitgeharde cement (<i>Hardened Cement Paste</i>)
HDPE	Polyethyleen met hoge dichtheid (<i>High-density polyethylene</i>)
HLW	Hoogradioactief afval (<i>High Level Waste</i>)
HSR	Sterk bestand tegen sulfaat (<i>High Sulphate Resistance</i>)
IDF	<i>Intensity-Duration-Frequency</i>
IETcc	Wetenschappelijk centrum voor de bouw Eduardo Torroja (Spanje) (<i>Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja</i>)
IPM	Installatie voor de productie van monolieten
ISA	Iso-saccharinezuur (<i>Isosaccharinic acid</i>)
LA	Laag alkali-gehalte (<i>Low Alkali</i>)
LH	Lage hydratatiewarmte (<i>Low Heat</i>)
NDA	De Britse autoriteit voor nucleaire ontmanteling (<i>Nuclear Decommissioning Authority</i>)
NRC	<i>U.S. Nuclear Regulatory Commission</i>
NS	Gesulfoneerd naftaleenformaldehyde condensaat (<i>Sulfonated naphthaleneformaldehyde condensate</i>)
O&O	Onderzoek en Ontwikkeling (zie ook R&D)
PCE	Polycarboxylaatether (<i>Poly-(Carboxylate-ether)</i>)
PGA	Piek Grondversnelling (<i>Peak Ground Acceleration</i>)
PP	Polypropyleen
QA	Kwaliteitsborging (<i>Quality Assurance</i>)
QC	Kwaliteitscontrole (<i>Quality Control</i>)
R&D	Onderzoek en Ontwikkeling (<i>Research & Development</i>) (zie ook O&O)
RF	Brandwerende verf of coating (<i>Résistance aux Feu</i>)

RH	Relatieve vochtigheid (<i>Relative Humidity</i>)
SCK • CEN	StudieCentrum voor Kernenergie – Centre d’Etudes d’énergie Nucléaire (België)
SP	Superplastificeerder
SSC	Systemen, Structuren en Componenten (<i>Systems, Structures and Components</i>) belangrijk voor de veiligheid
TDR	Reflectometer (<i>Time-Domain Reflectometer</i>)
WCB	Watercollectiegebouw (<i>Water Collection Building</i>)
WTCB	Het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (<i>Le Centre scientifique et technique de la construction (CSTC)</i>) (België)

NIRAS

**Nationale instelling voor radioactief afval
en verrijkte splijtstoffen**

Kunstlaan 14

BE-1210 Brussel

Tel. + 32 2 212 10 11

Fax +32 2 218 51 65