Supplementary file of the manuscript

Sustainability Assessment of Cement Types via Integrated Life Cycle Assessment and Multi-Criteria Decision-Making Methods

Table S1. Environmental impact category values of the different cement types

Impact category	Unit	CEM I	CEM II A-S	CEM II/A-V	CEM II/B-S	CEM II/B-L	CEM II/B-V	CEM III/A
Global warming	kg CO2 eq	0.99368	0.82391	0.80638	0.74900	0.85695	0.70635	0.57331
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	0.01024	0.00937	0.00910	0.00944	0.00955	0.00824	0.00840
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0.00210	0.00178	0.00175	0.00167	0.00186	0.00155	0.00133
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0.00079	0.00072	0.00069	0.00071	0.00073	0.00062	0.00062
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	0.00212	0.00180	0.00177	0.00169	0.00188	0.00156	0.00135
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0.00244	0.00214	0.00214	0.00210	0.00225	0.00193	0.00177
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.00032	0.00027	0.00027	0.00026	0.00028	0.00024	0.00021
Marine eutrophication	kg N eq	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00001	0.00002
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1.03733	1.17722	0.87800	1.22879	0.92226	0.79171	1.30597
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.01562	0.02038	0.01363	0.02244	0.01424	0.01245	0.02578
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.02119	0.02729	0.01844	0.02993	0.01927	0.01681	0.03416
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0.02442	0.02558	0.02086	0.02649	0.02199	0.01864	0.02653
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0.49646	0.56135	0.42569	0.59409	0.44745	0.38271	0.62892
Land use	m2a crop eq	0.14214	0.12340	0.11784	0.11672	0.12858	0.10453	0.09707
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0.00217	0.00787	0.00176	0.01007	0.00186	0.00154	0.01452
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0.13897	0.11842	0.11612	0.11136	0.12293	0.10283	0.08964
Water consumption	m3	0.00138	0.00154	0.00116	0.00162	0.00125	0.00104	0.00170

Table S2. Decision matrix

	C1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12	C 13	C 14	C 15	C 16	C 17	C 18
CEM I	0.99368	0.00000	0.01024	0.00210	0.00079	0.00212	0.00244	0.00032	0.00002	1.03733	0.01562	0.02119	0.02442	0.49646	0.14214	0.00217	0.13897	0.00138
CEM II A-S	0.82391	0.00000	0.00937	0.00178	0.00072	0.00180	0.00214	0.00027	0.00002	1.17722	0.02038	0.02729	0.02558	0.56135	0.12340	0.00787	0.11842	0.00154
CEM II/A-V	0.80638	0.00000	0.00910	0.00175	0.00069	0.00177	0.00214	0.00027	0.00002	0.87800	0.01363	0.01844	0.02086	0.42569	0.11784	0.00176	0.11612	0.00116
CEM II/B-S	0.74900	0.00000	0.00944	0.00167	0.00071	0.00169	0.00210	0.00026	0.00002	1.22879	0.02244	0.02993	0.02649	0.59409	0.11672	0.01007	0.11136	0.00162
CEM II/B-L	0.85695	0.00000	0.00955	0.00186	0.00073	0.00188	0.00225	0.00028	0.00002	0.92226	0.01424	0.01927	0.02199	0.44745	0.12858	0.00186	0.12293	0.00125
CEM II/B-V	0.70635	0.00000	0.00824	0.00155	0.00062	0.00156	0.00193	0.00024	0.00001	0.79171	0.01245	0.01681	0.01864	0.38271	0.10453	0.00154	0.10283	0.00104
CEM III/A	0.57331	0.00000	0.00840	0.00133	0.00062	0.00135	0.00177	0.00021	0.00002	1.30597	0.02578	0.03416	0.02653	0.62892	0.09707	0.01452	0.08964	0.00170
Wj	0.02273	0.00844	0.00458	0.01620	0.00631	0.01587	0.00875	0.01297	0.00762	0.02790	0.06443	0.06059	0.01400	0.02708	0.01288	0.64832	0.01509	0.02626

- **CEM I (A1), CEM II A-S (A2), CEM II/A-V (A3), CEM II/B-S (A4), CEM II/B-L (A5), CEM II/B-V (A6), CEM III/A (A7).**

- **Global warming (C1),Stratospheric ozone depletion (C2), Ionizing radiation (C3), Ozone formation Human health (C4), Fine particulate matter formation (C5), Ozone formation Terrestrial ecosystems (C6), Terrestrial acidification (C7), Freshwater eutrophication (C8), Marine eutrophication (C9), Terrestrial ecotoxicity (C10), Freshwater ecotoxicity (C11), Marine ecotoxicity (C12), Human carcinogenic toxicity (C13), Human non-carcinogenic toxicity (C14), Land use (C15), Mineral resource scarcity (C16), Fossil resource scarcity (C17), Water consumption (C18)**

- **Wj-Weight from the entropy method**

Table S3. Normalized Decision Matrix (COPRAS) of alternatives with respect to impact category

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
A1	0.18036	0.16504	0.15920	0.17440	0.16263	0.17418	0.16564	0.17169	0.16448	0.14130	0.12541	0.12680	0.14844	0.14037	0.17120	0.05462	0.17365	0.14266
A2	0.14954	0.14456	0.14560	0.14768	0.14704	0.14780	0.14478	0.14795	0.15102	0.16036	0.16366	0.16332	0.15548	0.15872	0.14862	0.19773	0.14798	0.15896
A3	0.14636	0.14458	0.14148	0.14549	0.14134	0.14528	0.14493	0.14440	0.13815	0.11960	0.10947	0.11035	0.12680	0.12036	0.14193	0.04412	0.14510	0.12014
A4	0.13594	0.14220	0.14668	0.13841	0.14541	0.13864	0.14196	0.14032	0.14735	0.16738	0.18016	0.17913	0.16100	0.16798	0.14058	0.25305	0.13915	0.16733
A5	0.15554	0.15307	0.14841	0.15471	0.14933	0.15449	0.15260	0.15252	0.14600	0.12563	0.11433	0.11535	0.13368	0.12652	0.15486	0.04683	0.15361	0.12850
A6	0.12820	0.13022	0.12810	0.12880	0.12700	0.12860	0.13047	0.12823	0.12260	0.10784	0.09998	0.10058	0.11332	0.10821	0.12590	0.03881	0.12849	0.10695

A7	0.10406	0.12032	0.13054	0.11051	0.12725	0.11101	0.11961	0.11490	0.13040	0.17789	0.20699	0.20446	0.16128	0.17783	0.11691	0.36485	0.11201	0.17545

Table S4. Weighted Normarlized Decision Matrix (COPRAS) of alternatives with respect to impact category

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
A1	0.00410	0.00139	0.00073	0.00283	0.00103	0.00276	0.00145	0.00223	0.00125	0.00394	0.00808	0.00768	0.00208	0.00380	0.00220	0.03541	0.00262	0.00375
A2	0.00340	0.00122	0.00067	0.00239	0.00093	0.00235	0.00127	0.00192	0.00115	0.00447	0.01054	0.00990	0.00218	0.00430	0.00191	0.12819	0.00223	0.00417
A3	0.00333	0.00122	0.00065	0.00236	0.00089	0.00231	0.00127	0.00187	0.00105	0.00334	0.00705	0.00669	0.00177	0.00326	0.00183	0.02860	0.00219	0.00315
A4	0.00309	0.00120	0.00067	0.00224	0.00092	0.00220	0.00124	0.00182	0.00112	0.00467	0.01161	0.01085	0.00225	0.00455	0.00181	0.16406	0.00210	0.00439
A5	0.00354	0.00129	0.00068	0.00251	0.00094	0.00245	0.00133	0.00198	0.00111	0.00350	0.00737	0.00699	0.00187	0.00343	0.00199	0.03036	0.00232	0.00337
A6	0.00291	0.00110	0.00059	0.00209	0.00080	0.00204	0.00114	0.00166	0.00093	0.00301	0.00644	0.00609	0.00159	0.00293	0.00162	0.02516	0.00194	0.00281
A7	0.00237	0.00102	0.00060	0.00179	0.00080	0.00176	0.00105	0.00149	0.00099	0.00496	0.01334	0.01239	0.00226	0.00482	0.00151	0.23654	0.00169	0.00461

Table S5. Result (COPRAS method)

S -i		S -min		S -min/S -i		Qi	Ui	Rank	Alternatives
0.09		0.06		0.74		0.17	74.27	4	CEM I
0.18				0.35		0.08	35.40	5	CEM II A-S
0.07				0.89		0.21	89.06	2	CEM II/A-L
0.22				0.29		0.07	29.37	6	CEM II/B-S
0.08				0.84		0.19	84.19	3	CEM II/B-L
0.06				1.00		0.23	100.00	1	CEM II/B-V
0.29				0.22		0.05	22.06	7	CEM III/A

Table S6. Normalized decision matrix (ARAS) of alternatives with respect to impact category

	C1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12	C 13	C 14	C 15	C 16	C 17	C 18
OV	0.1804	0.1650	0.1592	0.1744	0.1626	0.1742	0.1656	0.1717	0.1645	0.1779	0.2070	0.2045	0.1613	0.1778	0.1712	0.3648	0.1737	0.1755
A1	0.0994	0.1092	0.1131	0.1031	0.1108	0.1033	0.1088	0.1049	0.1096	0.1261	0.1394	0.1382	0.1204	0.1270	0.1052	0.1785	0.1036	0.1249
A2	0.1198	0.1246	0.1237	0.1218	0.1226	0.1217	0.1244	0.1217	0.1193	0.1111	0.1069	0.1073	0.1149	0.1124	0.1212	0.0493	0.1216	0.1121
A3	0.1224	0.1246	0.1273	0.1236	0.1275	0.1238	0.1243	0.1247	0.1305	0.1490	0.1598	0.1589	0.1409	0.1482	0.1269	0.2209	0.1240	0.1483
A4	0.1318	0.1267	0.1228	0.1299	0.1240	0.1297	0.1269	0.1284	0.1223	0.1064	0.0971	0.0979	0.1110	0.1062	0.1281	0.0385	0.1293	0.1065
A5	0.1152	0.1177	0.1214	0.1162	0.1207	0.1164	0.1181	0.1181	0.1235	0.1418	0.1530	0.1520	0.1337	0.1409	0.1163	0.2082	0.1171	0.1386
A6	0.1398	0.1383	0.1406	0.1396	0.1419	0.1399	0.1381	0.1405	0.1470	0.1652	0.1749	0.1743	0.1577	0.1648	0.1431	0.2512	0.1400	0.1666
A7	0.1722	0.1497	0.1380	0.1627	0.1416	0.1620	0.1506	0.1568	0.1382	0.1002	0.0845	0.0857	0.1108	0.1003	0.1540	0.0267	0.1606	0.1015

Table S7. Weighted normalized decision matrix (ARAS) of alternatives with respect to impact category

	C1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12	C 13	C 14	C 15	C 16	C 17	C 18
V	0.0041	0.0014	0.0007	0.0028	0.0010	0.0028	0.0014	0.0022	0.0013	0.0050	0.0133	0.0124	0.0023	0.0048	0.0022	0.2365	0.0026	0.0046
A1	0.0023	0.0009	0.0005	0.0017	0.0007	0.0016	0.0010	0.0014	0.0008	0.0035	0.0090	0.0084	0.0017	0.0034	0.0014	0.1157	0.0016	0.0033
A2	0.0027	0.0011	0.0006	0.0020	0.0008	0.0019	0.0011	0.0016	0.0009	0.0031	0.0069	0.0065	0.0016	0.0030	0.0016	0.0320	0.0018	0.0029
A3	0.0028	0.0011	0.0006	0.0020	0.0008	0.0020	0.0011	0.0016	0.0010	0.0042	0.0103	0.0096	0.0020	0.0040	0.0016	0.1432	0.0019	0.0039
A4	0.0030	0.0011	0.0006	0.0021	0.0008	0.0021	0.0011	0.0017	0.0009	0.0030	0.0063	0.0059	0.0016	0.0029	0.0016	0.0250	0.0020	0.0028
A5	0.0026	0.0010	0.0006	0.0019	0.0008	0.0018	0.0010	0.0015	0.0009	0.0040	0.0099	0.0092	0.0019	0.0038	0.0015	0.1350	0.0018	0.0036
A6	0.0032	0.0012	0.0006	0.0023	0.0009	0.0022	0.0012	0.0018	0.0011	0.0046	0.0113	0.0106	0.0022	0.0045	0.0018	0.1628	0.0021	0.0044
A7	0.0039	0.0013	0.0006	0.0026	0.0009	0.0026	0.0013	0.0020	0.0011	0.0028	0.0054	0.0052	0.0016	0.0027	0.0020	0.0173	0.0024	0.0027

Table S8. Result (ARAS Method)

	Si		Ki			Rank
	0.3015		1			
A1	0.1588		0.5266		**A1**	4
A2	0.0720		0.2389		**A2**	5
A3	0.1936		0.6421		**A3**	2
A4	0.0642		0.2130		**A4**	6
A5	0.1827		0.6061		**A5**	3
A6	0.2188		0.7257		**A6**	1
A7	0.0584		0.1937		**A7**	7

So	0,3015

Table S9. Inventory Dataset (from Ecoinvent and SimaPro)

Reference product	CEM I	CEM II A-S	CEM II/A-V	CEM II/B-S	CEM II/B-L	CEM II B-V	CEM III/A
Inputs from Technosphere							
GGBFS (kg)		0.25		0.35			0.55
Hard coal ash (kg)			0.25			0.3	
Clinker (kg)	0.902	0.713	0.713	0.618	0.76	0.618	0.427
Ethylene glycol	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019
Gypsum (kg)	0.0475	0.0475	0.0375	0.0325	0.04	0.0325	0.0225
Limestone (kg)	0.05				0.2		
Electricity (kWh)	0.0376	0.0375	0.0497	0.0497	0.0497	0.0497	0.0497
Steel (kg)	5.25E-05	5.25E-05	5.25E-05	5.25E-05	5.25E-05	5.25E-05	5.25E-05
Emissions to air							
Heat, waste (MJ)	0.135	0.135	0.135	0.179	0.179	0.179	0.179

Table S10. Parameters

Symbol	Definition
x_{ij}	Raw performance score of alternative i under criterion j
m	Number of alternatives
n	Number of criteria
w_j	Normalized weight for criterion j
r_{ij}	Normalized value for alternative i and criterion j
q_{ij}	Weighted normalized value: q_{ij} = r_{ij} * w_j
J_+	Set of beneficial criteria (to be maximized)
J_-	Set of non-beneficial criteria (to be minimized)
S_{+i}	Sum of weighted beneficial criteria for alternative i.
S_{-i}	Sum of weighted non-beneficial criteria for alternative i.
S_{-min}	Minimum value among all S_{-i} alternatives
(Q_i)	Relative significance
U_i	Utility degree
$\overline{x_{ij}}$	Normalized value of x_{ij}
$\widetilde{x_{ij}}$	Weighted normalized value
w_j	Weight of criterion j $\times \sum w_j = 1$
S_i	Overall score of alternative i
K_i	Utility degree of alternative i