Visibility Laboratory
University of California
Scripps Institution of Oceanography
San Diego 52, California

RADIANCE DISTRIBUTION AS A FUNCTION OF DEPTH IN THE SUBMARINE ENVIRONMENT

Part II. Overcast Lighting with Tables of Radiance -K Values for both Overcast and Sunny Lighting Conditions

John E. Tyler

February 1960
Index Number NS 714-100

SIO REFERENCE 60-9

Bureau of Ships
Contract NObs-72092

Approved:

Seibert Q. Duntley

Seibert Q. Duntley, Director
Visibility Laboratory

Approved for Distribution:

Roger Revelle

Roger Revelle, Director
Scripps Institution of Oceanography

RADIANCE DISTRIBUTION AS A FUNCTION OF DEPTH IN THE SUBMARINE ENVIRONMENT

Part II. Overcast Lighting

with

Tables of Radiance -K Values for both Overcast and Sunny Lighting Conditions

John E. Tyler

Scripps Institution of Oceanography, University of California

La Jolla, California

ABSTRACT

This report is a continuation of S.I.O. Reference 58-25, entitled "Radiance Distribution as a Function of Depth in the Submarine Environment."* It presents the detailed radiance distribution data obtained under overcast lighting conditions at the Navy Calibration Station on Lake Pend Oreille, Idaho, and also gives tables of radiance -K values for both the overcast and clear-sunny conditions.

---

* Index No. NS 714-100, 28 March 1958
BuShips Contract No. NObs-72092, Amendment 5

DISCUSSION AND TREATMENT OF DATA FOR OVERCAST CONDITIONS

The diffuse nature of the surface lighting for overcast conditions makes it practical to take data during a longer interval around noon than can be used for the clear sunny sky. For the same reason the order in which the stations are run is far less critical. The near-surface data for overcast sky shows the image features of the barge and its shadow at lower contrast than before. The zenith readings at the near-surface stations may exhibit greater variability in the zenith thickness of the overcast. In addition the generally lower light level puts the deeper stations experimentally beyond reach. Except for these slight differences the experimental procedure was the same for obtaining the overcast data as it was for obtaining clear sunny data.

The overcast data have been treated by the same procedure used for the clear sunny day data as described in (SIO Ref. 58-25) Steps 1 through 9 inclusive with slight modification. Steps 8 and 9 do not, of course, apply as critically to diffuse lighting as they do to the combination of diffuse plus specular lighting provided by a clear sunny day. In Step 6, two complete runs of overcast sky data at each depth station were averaged.

DATA FOR OVERCAST CONDITIONS

The voice recorded notes for March 16, the overcast day, read in part as follows:

"The data from about 1030 on are all excellent overcast data. The instrument was working perfectly ..... Today's wind velocities ranged from 10 knots at about 1100 to about 2 knots at 1215. At 1400 the water on the south side of the barge where we are operating was as nearly calm as I have seen it .....".

The radiance distribution data for the overcast condition are given for five depth stations in Tables 12 through 16 inclusive.

DISCUSSION OF DATA AND EVALUATION OF SOURCES OF ERROR

The data presented in Tables 12 through 16 are correct to better than ± 5% of the listed value at each entry. Noise due to wave action, and excessive errors in the direction of the sun are not manifest in the overcast data.

TABLE 12

RADIANCE DISTRIBUTION, OVERCAST SKY

Sun Altitude 40.0° Depth = 6.1 Meters θ = Tilt Angle Ø = Azimuth Angle

θ \ Ø	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	321,000	321,000	321,000	321,000	321,000	321,000	321,000	321,000	321,000	321,000
10	343,000	342,000	338,000	332,000	325,000	319,000	311,000	306,000	302,000	300,000
20	327,000	326,000	321,000	312,000	302,000	290,000	281,000	272,000	267,000	265,000
30	277,000	275,000	268,000	258,000	243,000	229,000	216,000	207,000	202,000	200,000
40	199,000	196,000	189,000	179,000	167,000	152,000	141,000	132,000	127,000	126,000
50	96,800	95,700	92,500	87,300	81,700	74,900	69,500	65,900	63,600	62,900
60	53,500	52,800	51,100	48,800	45,600	42,800	39,700	37,500	36,100	35,400
70	32,500	32,100	31,300	30,000	28,200	26,100	24,100	22,800	21,900	21,600
80	20,000	19,700	19,100	18,300	17,100	15,800	14,700	13,900	13,500	13,400
90	12,600	12,400	12,000	11,500	10,800	9,950	9,170	8,710	8,380	8,310
100	8,060	7,980	7,780	7,490	7,080	6,640	6,190	5,860	5,670	5,620
110	5,620	5,580	5,450	5,250	4,970	4,670	4,390	4,180	4,050	4,010
120	4,130	4,080	3,990	3,850	3,700	3,500	3,330	3,200	3,120	3,090
130	3,200	3,190	3,150	3,070	2,970	2,860	2,740	2,630	2,570	2,550
140	2,650	2,640	2,590	2,540	2,480	2,390	2,300	2,240	2,190	2,180
150	2,300	2,290	2,280	2,250	2,200	2,150	2,090	2,040	2,000	1,980
160	2,070	2,070	2,060	2,030	2,000	1,960	1,910	1,890	1,890	1,880
170	1,860	1,860	1,860	1,860	1,860	1,860	1,860	1,860	1,860	1,860
180	1,830	1,830	1,830	1,830	1,830	1,830	1,830	1,830	1,830	1,830

TABLE 13

RADIANCE DISTRIBUTION, OVERCAST SKY

Sun Altitude 40.0° Depth = 18.3 Meters θ = Tilt Angle ∅ = Azimuth Angle

θ \ ∅	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	26,800	26,800	26,800	26,800	26,800	26,800	26,800	26,800	26,800	26,800
10	27,500	27,400	27,200	26,900	26,600	26,000	25,200	24,600	24,100	23,900
20	23,600	23,400	23,000	22,500	21,900	21,000	20,100	19,400	18,800	18,600
30	17,500	17,400	17,200	16,800	16,200	15,400	14,400	13,400	12,900	12,600
40	11,900	11,800	11,600	11,100	10,600	9,800	9,080	8,460	8,040	7,860
50	7,520	7,460	7,310	7,090	6,750	6,250	5,710	5,240	4,880	4,720
60	4,600	4,540	4,440	4,280	4,070	3,740	3,440	3,230	3,050	2,970
70	2,780	2,750	2,690	2,590	2,450	2,300	2,130	1,990	1,910	1,860
80	1,650	1,640	1,590	1,550	1,470	1,380	1,280	1,220	1,160	1,150
90	1,040	1,020	995	948	892	830	784	745	722	713
100	645	638	627	603	583	557	533	514	502	500
110	454	449	439	426	409	391	378	366	357	356
120	334	331	324	315	302	289	280	272	268	265
130	258	255	250	243	235	228	218	214	209	209
140	206	205	202	198	193	188	185	182	179	179
150	176	175	174	170	167	164	162	161	161	160
160	156	156	156	155	152	151	150	149	147	147
170	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145
180	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141

TABLE 14

RADIANCE DISTRIBUTION, OVERCAST SKY

Sun Altitude 40.0° Depth = 30.5 Meters θ = Tilt Angle ∅ = Azimuth Angle

θ \ ∅	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	2,430	2,430	2,430	2,430	2,430	2,430	2,430	2,430	2,430	2,430
10	2,500	2,490	2,470	2,430	2,380	2,310	2,210	2,120	2,070	2,030
20	2,190	2,170	2,130	2,080	2,010	1,910	1,790	1,680	1,600	1,570
30	1,690	1,670	1,640	1,600	1,550	1,420	1,300	1,180	1,090	1,050
40	1,150	1,130	1,090	1,050	998	927	840	757	702	676
50	688	683	670	649	629	596	544	498	466	453
60	413	409	400	389	375	353	332	302	284	275
70	254	252	247	240	231	217	203	189	178	173
80	153	151	148	144	136	130	121	114	110	108
90	93.9	93.4	91.3	88.6	85.2	81.1	75.9	72.3	69.7	68.4
100	61.2	60.7	59.7	57.9	56.0	53.4	50.6	48.3	46.4	45.3
110	42.9	42.7	41.8	40.7	39.3	37.8	35.8	34.2	33.3	32.7
120	31.1	30.9	30.5	29.8	29.1	28.1	27.2	26.3	25.8	25.4
130	23.8	23.7	23.5	23.1	22.8	22.2	21.6	21.2	21.0	20.9
140	20.4	20.3	20.0	19.8	19.5	19.0	18.4	18.1	17.6	17.5
150	18.1	18.0	17.8	17.5	17.3	16.9	16.7	16.5	16.3	16.3
160	16.2	16.1	16.1	16.1	16.0	15.8	15.5	15.3	15.2	15.2
170	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9
180	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8

TABLE 15

RADIANCE DISTRIBUTION, OVERCAST SKY

Sun Altitude 40.0° Depth = 42.8 Meters θ = Tilt Angle Ø = Azimuth Angle

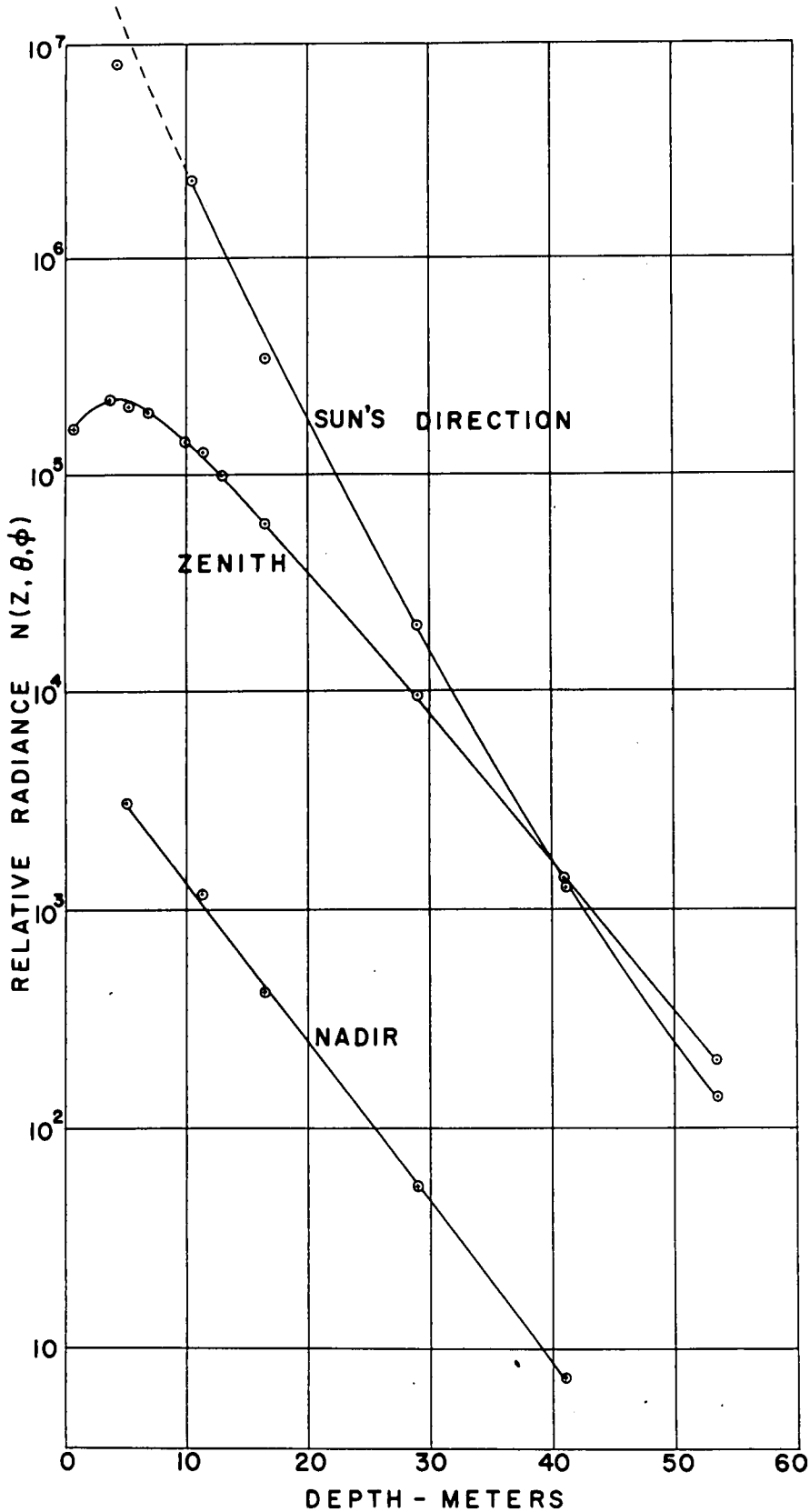
θ \ Ø	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
10	254	252	250	247	242	239	233	227	223	221
20	229	226	223	216	209	201	190	182	176	174
30	175	173	167	161	155	146	138	131	125	123
40	119	117	113	109	104	99.1	92.5	87.4	83.9	82.6
50	76.0	74.9	73.4	70.4	67.0	63.6	59.8	56.9	54.7	53.8
60	45.7	45.3	44.0	42.6	40.8	39.1	38.2	36.6	35.4	34.9
70	27.6	27.2	26.6	25.9	24.9	24.0	22.9	22.0	21.2	20.9
80	16.8	16.6	16.2	15.8	15.4	14.7	14.1	13.6	13.2	13.1
90	10.5	10.4	10.1	9.87	9.55	9.21	8.87	8.58	8.38	8.20
100	6.82	6.78	6.61	6.48	6.28	6.06	5.82	5.61	5.40	5.35
110	4.66	4.63	4.55	4.46	4.36	4.24	4.08	3.95	3.86	3.82
120	3.46	3.42	3.39	3.33	3.27	3.16	3.08	3.02	2.96	2.94
130	2.67	2.66	2.65	2.61	2.58	2.52	2.45	2.39	2.34	2.32
140	2.22	2.22	2.20	2.16	2.13	2.10	2.06	2.01	1.99	1.97
150	1.93	1.93	1.93	1.92	1.91	1.89	1.88	1.86	1.83	1.82
160	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76
170	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67
180	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65

TABLE 16

RADIANCE DISTRIBUTION, OVERCAST SKY

Sun Altitude 40.0° Depth = 55.0 Meters θ = Tilt Angle ø = Azimuth Angle

θ \ ø	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6	29.6
10	29.9	29.7	29.3	28.8	28.2	27.6	27.0	26.5	25.9	25.7
20	24.7	24.6	24.0	23.4	22.8	22.2	21.5	20.9	20.5	20.4
30	18.8	18.5	18.1	17.7	17.3	16.6	16.0	15.4	14.9	14.6
40	13.0	12.8	12.6	12.3	11.9	11.6	11.2	10.8	10.5	10.4
50	8.11	8.00	7.86	7.72	7.54	7.32	7.07	6.86	6.69	6.61
60	4.99	4.96	4.85	4.76	4.64	4.55	4.42	4.28	4.19	4.17
70	3.00	2.98	2.93	2.87	2.81	2.75	2.69	2.63	2.59	2.56
80	1.90	1.88	1.84	1.82	1.78	1.75	1.71	1.67	1.65	1.63
90	1.19	1.18	1.16	1.15	1.12	1.09	1.07	1.05	1.04	1.03
100	0.765	0.761	0.749	0.736	0.723	0.708	0.689	0.678	0.665	0.661
110	0.512	0.509	0.503	0.495	0.488	0.481	0.469	0.460	0.452	0.449
120	0.363	0.360	0.358	0.355	0.352	0.346	0.341	0.337	0.333	0.331
130	0.273	0.272	0.271	0.268	0.266	0.264	0.259	0.256	0.254	0.253
140	0.215	0.215	0.214	0.213	0.210	0.208	0.206	0.204	0.203	0.203
150	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181
160	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158
170	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146	0.146
180	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143


10^7
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
SUN'S DIRECTION
ZENITH
NADIR
RELATIVE RADIANCE $N(Z,\theta,\phi)$
0
10
20
30
40
50
60
DEPTH - METERS

ASYMPTOTIC RADIANCE DISTRIBUTION

It has long been conjectured and perhaps first clearly stated by Whitney (1941 a.b.) that the radiance distribution in an optically deep and homogeneous hydrosol approaches a characteristic shape with increasing depth. This final distribution is referred to as the asymptotic radiance distribution because of the manner of its approach to the final shape. Recently Preisendorfer (1958 a, b) has developed a proof of the existence of asymptotic radiance distribution which shows that the final shape depends only on the inherent optical properties of the hydrosol, i.e., the volume scattering function and the absorption coefficient. It is independent of the lighting conditions at the surface of the water and of the optical state of the water surface. As the absorption coefficient approaches 0 in a scattering-absorbing medium the asymptotic radiance distribution tends to become a sphere whereas if the scattering coefficient approaches 0 the final shape tends to be a vertical line. In between these limits there will be an infinite variety of prolate surfaces of revolution oriented with the poles along the vertical axis, each are characteristic of the inherent optical properties of a particular hydrosol.

The transformation of radiance distribution from the complex structure found near the surface to its final symmetrical shape at great depth will require enhancement of radiance in some directions, attenuation in others.

This is evident in the data shown in Fig. 7 and to some extent in the tables of radiance data, and can be deduced from theory in the following way. Starting with the equation of transfer for radiance (1) see Preisendorfer (1958).

$$\cos\theta \frac{dN(z,\theta,\varphi)}{dz} = -\alpha(z) N(z,\theta,\varphi) + N_*(z,\theta,\varphi) \quad (1)$$

Figure 7

Radiance as a function of depth in the zenith and nadir directions and in the direction of the sun's image. The attenuation of light is shown by the slope of the curves. For regions of high radiance the attenuation coefficient is large. For regions of low radiance the attenuation coefficient is low, even negative. When asymptotic radiance distribution is reached the slopes in all directions will be the same.

where Θ is the angle from the zenith

ϕ is the azimuth angle from the sun

Z is the depth

N is the radiance

α is the total attenuation coefficient

N_* is the path function

dN, N, and N_* are all taken at the same depth (Z) and in the same direction (Θ,ϕ).

We note that the attenuation coefficient (K) for radiance for this same depth and direction is by definition

$$K(Z,\Theta,\phi) = -\frac{1}{N(Z,\Theta,\phi)} \frac{dN(Z,\Theta,\phi)}{dZ} \qquad (2)$$

Thus

$$\cos\Theta\, K(Z,\Theta,\phi) = \alpha(Z) - \frac{N_*(Z,\Theta,\phi)}{N(Z,\Theta,\phi)} \qquad (3)$$

By definition

$$N_*(Z,\Theta,\phi) = \int_{\text{over all direction}} \sigma(Z,\Theta,\phi,\Theta',\phi')\, N(Z,\Theta',\phi')\, d\Omega$$

where the volume scattering function σ has direction Θ, ϕ for all incident radiance in the direction Θ', ϕ'. For shallow depths the sun is by far the most important contribution to N_* and we can let Θ', ϕ' describe the incident radiance from the sun only, that is

$$\theta' = \theta_S$$
$$\phi' = \phi_S$$
$$N = N_S$$
$$\Omega = \Omega_S$$

When $N_*(Z,\theta,\phi)$ may be approximated by the equation

$$N_*(Z,\theta,\phi) = \sigma(Z,\theta,\phi,\theta_S\phi_S)\, N_S\, \Omega_S \qquad (4)$$

Equation (3) can thus be written

$$K(z,\theta,\varphi) \cong \frac{1}{\cos\theta}\left[\alpha(z) - \frac{\sigma(z,\theta,\varphi,\theta_s\,\varphi_s)\, N_S\, \Omega_S}{N(z,\theta,\varphi)}\right] \qquad (4)$$

For the three directions illustrated in Fig. 7 specific values of θ and ϕ can be assigned as shown below; and the negative slopes, K, of the curves of Fig. 7 can be roughly predicted for a fixed depth Z near the surface by equations 5, 6, and 7.

	θ	ϕ	$N(Z,\theta,\phi)$	$(Z,\theta,\phi,\theta_S,\phi_S$
Zenith	0	0	N_{Zenith}	24° foreward scattering $=\sigma_{24}$
Sun	θ_S	ϕ_S	N_{Sun}	foreward scattering within the beam $=\sigma_o$
Nadir	π	0	N_{Nadir}	156° backward scattering $=\sigma_{156}$

(The underwater angle of the sun from the zenith (θ_S) for the data presented in this report is about 24°).

$$K_{Zenith} = \alpha - \frac{\sigma_{24} N_S \Omega_S}{N_{Zenith}} \tag{5}$$

$$K_{Sun} = \frac{1}{\cos\theta_S}\left[\alpha - \frac{\sigma_0 N_S \Omega_S}{N_S}\right] \tag{6}$$

$$K_{Nadir} = -\left[\alpha - \frac{\sigma_{156} N_S \Omega_S}{N_{Nadir}}\right] \tag{7}$$

It can be seen from Equation 5 that when N_{Zenith} is sufficiently dark, as it is when seen from a depth of less than 4 meters at Lake Pend Oreille on a clear sunny day, the second terms on the right of the equation will be larger than α and a positive slope will result in Fig. 7. With increasing depth N_{Zenith} increases until the two terms on the right of Equation 5 are equal and the slope becomes zero.

In the direction of the sun (Equation 6) the second term on the right of the equation will be minimized due to the presence of N_S in the denominator. The slope in Fig. 7 will therefore be negative and maximized near the surface as shown but will become smaller as N_S decreased with depth.

In the Nadir direction (Eq. 7) the second term will always be larger than α but the change in sign insures that the slope of the curve in Fig. 7 will always be negative. Also since the ratio N_S/N_{Nadir} will not change greatly with depth, the value of K would be expected to remain nearly constant.

From this brief example the usefulness of radiance K data in following and predicting the changes in shape of the radiance distribution solid as a function of depth can easily be seen. By means of radiance K data the radiance distribution at other depths can be easily extrapolated and a quantitative estimate of the proximity to asymptotic distribution can be obtained.

Radiance K data per meter for clear sunny conditions are given in tables 17 through 23 and for overcast conditions in tables 24 through 28.

TABLE 17

RADIANCE K VALUES, CLEAR SUNNY SKY

Sun Altitude = 56.6° Depth = 4.24 Meters θ = Tilt Angle Ø = Azimuth Angle

θ \ Ø	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.0764	0.0764	0.0764	0.0764	0.0764	0.0764	0.0764	0.0764	0.0764	0.0764
10	0.110	0.101	0.0896	0.0879	0.0863	0.0846	0.0846	0.0676	0.0627	0.0607
20	0.127	0.125	0.105	0.0909	0.0824	0.0804	0.0784	0.0764	0.0712	0.0679
30	0.185	0.136	0.106	0.0958	0.0942	0.0925	0.0932	0.0942	0.0919	0.0886
40	0.106	0.117	0.112	0.105	0.106	0.111	0.117	0.122	0.126	0.131
50	0.0912	0.0751	0.0682	0.0679	0.0738	0.0817	0.0912	0.0945	0.0919	0.0942
60	0.115	0.0948	0.0791	0.0794	0.0906	0.100	0.106	0.110	0.109	0.111
70	0.104	0.101	0.103	0.106	0.114	0.119	0.124	0.125	0.125	0.121
80	0.134	0.130	0.124	0.129	0.135	0.137	0.133	0.138	0.136	0.133
90	0.150	0.149	0.147	0.149	0.150	0.149	0.147	0.143	0.138	0.134
100	0.156	0.155	0.150	0.144	0.148	0.151	0.151	0.149	0.147	0.144
110	0.155	0.154	0.147	0.144	0.148	0.155	0.157	0.158	0.156	0.155
120	0.154	0.152	0.150	0.147	0.150	0.158	0.161	0.163	0.163	0.161
130	0.158	0.157	0.153	0.151	0.152	0.150	0.153	0.153	0.155	0.155
140	0.154	0.153	0.150	0.150	0.149	0.151	0.152	0.153	0.155	0.155
150	0.152	0.151	0.151	0.151	0.152	0.152	0.153	0.153	0.155	0.154
160	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.156	0.156
170	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156
180	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154

TABLE 18

RADIANCE K VALUES, CLEAR SUNNY SKY

Sun Altitude = 56.6° Depth = 10.42 Meters θ = Tilt Angle ø = Azimuth Angle

θ \ ø	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
10	0.121	0.119	0.113	0.110	0;106	0.103	0.0991	0.0958	0.0939	0.0925
20	0.197	0.160	0.131	0.110	0.0994	0.0945	0.0942	0.0958	0.0968	0.0961
30	0.246	0.152	0.125	0.107	0.0991	0.0965	0.0994	0.103	0.107	0.108
40	0.151	0.140	0.121	0.108	0.106	0.109	0.115	0.126	0.125	0.127
50	0.122	0.114	0.0988	0.0951	0.0971	0.101	0.105	0.110	0.114	0.117
60	0.125	0.115	0.110	0.110	0.111	0.112	0.114	0.119	0.119	0.122
70	0.131	0.131	0.131	0.127	0.126	0.125	0.131	0.129	0.130	0.129
80	0.148	0.146	0.142	0.140	0.138	0.136	0.133	0.136	0.137	0.137
90	0.154	0.155	0.153	0.150	0.146	0.144	0.144	0.144	0.146	0.145
100	0.160	0.158	0.155	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.150
110	0.162	0.160	0.157	0.155	0.154	0.153	0.155	0.155	0.154	0.154
120	0.163	0.160	0.158	0.156	0.157	0.157	0.158	0.158	0.157	0.157
130	0.161	0.159	0.157	0.157	0.157	0.156	0.157	0.157	0.158	0.158
140	0.160	0.159	0.158	0.158	0.158	0.159	0.159	0.159	0.159	0.158
150	0.159	0.159	0.159	0.158	0.159	0.158	0.159	0.159	0.159	0.159
160	0.160	0.161	0.161	0.159	0.161	0.161	0.162	0.163	0.163	0.163
170	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162
180	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162

TABLE 19

RADIANCE K VALUES, CLEAR SUNNY SKY

Sun Altitude = 56.6° Depth = 16.58 Meters θ = Tilt Angle ∅ = Azimuth Angle

θ \ ∅	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123	0.123
10	0.147	0.145	0.139	0.133	0.127	0.123	0.118	0.115	0.115	0.115
20	0.214	0.178	0.154	0.136	0.125	0.117	0.115	0.114	0.115	0.115
30	0.243	0.178	0.152	0.136	0.125	0.119	0.116	0.117	0.119	0.120
40	0.164	0.160	0.148	0.136	0.128	0.125	0.125	0.126	0.129	0.131
50	0.150	0.145	0.136	0.127	0.121	0.118	0.119	0.121	0.125	0.128
60	0.152	0.147	0.141	0.135	0.130	0.127	0.124	0.126	0.129	0.131
70	0.153	0.152	0.150	0.144	0.140	0.137	0.136	0.135	0.136	0.137
80	0.160	0.160	0.157	0.153	0.149	0.146	0.142	0.142	0.142	0.142
90	0.164	0.164	0.160	0.157	0.153	0.150	0.148	0.147	0.148	0.149
100	0.165	0.164	0.162	0.159	0.156	0.154	0.153	0.152	0.152	0.152
110	0.165	0.164	0.162	0.152	0.156	0.156	0.156	0.155	0.156	0.156
120	0.162	0.162	0.162	0.160	0.159	0.158	0.159	0.159	0.160	0.160
130	0.161	0.161	0.161	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160
140	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.160	0.160	0.161	0.161	0.161
150	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161
160	0.161	0.162	0.162	0.162	0.162	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163
170	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163
180	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163

TABLE 20

RADIANCE K VALUES, CLEAR SUNNY SKY

Sun Altitude = 56.6° Depth = 29.0 Meters θ = Tilt Angle Ø = Azimuth Angle

θ \ Ø	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152
10	0.174	0.172	0.167	0.160	0.154	0.148	0.143	0.141	0.140	0.140
20	0.216	0.192	0.176	0.163	0.153	0.145	0.140	0.137	0.136	0.137
30	0.232	0.201	0.178	0.164	0.154	0.146	0.141	0.137	0.137	0.136
40	0.136	0.188	0.176	0.164	0.155	0.148	0.142	0.136	0.136	0.136
50	0.182	0.180	0.175	0.164	0.154	0.147	0.140	0.138	0.136	0.136
60	0.178	0.175	0.171	0.163	0.156	0.150	0.146	0.144	0.142	0.142
70	0.175	0.173	0.168	0.164	0.159	0.154	0.148	0.147	0.146	0.145
80	0.176	0.175	0.172	0.167	0.162	0.158	0.154	0.151	0.149	0.148
90	0.177	0.175	0.171	0.167	0.163	0.159	0.155	0.153	0.151	0.151
100	0.172	0.172	0.171	0.167	0.163	0.160	0.157	0.156	0.155	0.155
110	0.172	0.171	0.169	0.166	0.164	0.162	0.159	0.158	0.158	0.158
120	0.168	0.168	0.167	0.165	0.164	0.162	0.161	0.161	0.161	0.161
130	0.166	0.166	0.165	0.165	0.164	0.163	0.162	0.161	0.161	0.161
140	0.165	0.164	0.164	0.164	0.163	0.163	0.162	0.161	0.162	0.163
150	0.164	0.164	0.164	0.164	0.163	0.163	0.163	0.162	0.162	0.162
160	0.164	0.164	0.164	0.164	0.163	0.163	0.163	0.162	0.162	0.162
170	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163
180	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163

TABLE 21

RADIANCE K VALUES, CLEAR SUNNY SKY

Sun Altitude = 56.6° Depth = 41.3 Meters θ = Tilt Angle ∅ = Azimuth Angle

θ \ ∅	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156
10	0.169	0.166	0.163	0.159	0.157	0.155	0.153	0.151	0.149	0.148
20	0.191	0.179	0.170	0.163	0.158	0.154	0.151	0.148	0.145	0.144
30	0.200	0.185	0.172	0.164	0.158	0.155	0.152	0.149	0.146	0.144
40	0.191	0.183	0.174	0.166	0.161	0.157	0.154	0.150	0.145	0.143
50	0.185	0.181	0.174	0.168	0.163	0.159	0.155	0.149	0.144	0.141
60	0.180	0.177	0.172	0.167	0.164	0.160	0.156	0.151	0.147	0.144
70	0.178	0.175	0.170	0.167	0.163	0.158	0.157	0.153	0.149	0.147
80	0.176	0.173	0.170	0.167	0.164	0.161	0.158	0.155	0.152	0.149
90	0.174	0.173	0.171	0.168	0.165	0.161	0.158	0.155	0.152	0.151
100	0.173	0.171	0.169	0.166	0.164	0.162	0.162	0.157	0.155	0.154
110	0.172	0.171	0.169	0.166	0.165	0.163	0.161	0.159	0.157	0.157
120	0.170	0.170	0.167	0.165	0.164	0.163	0.161	0.160	0.158	0.158
130	0.168	0.168	0.166	0.165	0.164	0.163	0.162	0.161	0.160	0.160
140	0.167	0.166	0.165	0.164	0.164	0.163	0.162	0.162	0.161	0.160
150	0.165	0.165	0.164	0.164	0.163	0.162	0.162	0.161	0.161	0.160
160	0.164	0.164	0.163	0.163	0.163	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162
170	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163
180	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163	0.163

TABLE 22

RADIANCE K VALUES, CLEAR SUNNY SKY

Sun Altitude = 56.6° Depth = 53.7 Meters θ = Tilt Angle ∅ = Azimuth Angle

θ \ ∅	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156
10	0.163	0.161	0.159	0.157	0.156	0.155	0.154	0.153	0.153	0.152
20	0.168	0.166	0.163	0.160	0.157	0.154	0.153	0.151	0.149	0.148
30	0.168	0.166	0.163	0.160	0.157	0.154	0.152	0.149	0.147	0.146
40	0.170	0.168	0.164	0.161	0.158	0.155	0.152	0.150	0.147	0.146
50	0.169	0.167	0.165	0.162	0.159	0.157	0.154	0.151	0.148	0.147
60	0.170	0.169	0.166	0.162	0.159	0.156	0.153	0.150	0.147	0.146
70	0.169	0.168	0.166	0.162	0.159	0.156	0.154	0.150	0.148	0.147
80	0.166	0.165	0.163	0.161	0.159	0.157	0.155	0.154	0.151	0.150
90	0.165	0.164	0.163	0.163	0.161	0.158	0.157	0.156	0.155	0.155
100	0.167	0.166	0.165	0.163	0.161	0.160	0.159	0.158	0.157	0.156
110	0.166	0.165	0.165	0.164	0.163	0.162	0.162	0.161	0.160	0.159
120	0.167	0.167	0.167	0.166	0.165	0.164	0.163	0.162	0.161	0.161
130	0.169	0.168	0.169	0.168	0.168	0.168	0.167	0.167	0.166	0.166
140	0.172	0.172	0.171	0.171	0.171	0.171	0.171	0.170	0.170	0.169
150	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172	0.171
160	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174
170	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175
180	0.176	0.176	0.176	0.176	0.176	0.176	0.176	0.176	0.176	0.176

TABLE 23

RADIANCE K VALUES, CLEAR SUNNY SKY

Sun Altitude = 56.6° Depth = 66.1 Meters θ = Tilt Angle Ø = Azimuth Angle

θ \ Ø	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157
10	0.161	0.161	0.160	0.160	0.157	0.156	0.153	0.151	0.150	0.150
20	0.162	0.162	0.160	0.158	0.155	0.153	0.150	0.149	0.147	0.147
30	0.158	0.159	0.158	0.156	0.153	0.149	0.147	0.145	0.144	0.143
40	0.157	0.157	0.157	0.156	0.150	0.149	0.147	0.145	0.144	0.144
50	0.156	0.157	0.157	0.156	0.155	0.151	0.149	0.147	0.146	0.145
60	0.159	0.159	0.158	0.155	0.153	0.151	0.149	0.148	0.146	0.147
70	0.159	0.159	0.159	0.157	0.155	0.153	0.150	0.148	0.147	0.147
80	0.159	0.159	0.158	0.156	0.155	0.153	0.152	0.152	0.150	0.150
90	0.160	0.159	0.158	0.157	0.157	0.157	0.157	0.157	0.156	0.157
100	0.163	0.163	0.163	0.162	0.161	0.160	0.159	0.159	0.159	0.160
110	0.162	0.163	0.164	0.164	0.164	0.164	0.164	0.163	0.164	0.164
120	0.167	0.167	0.168	0.168	0.167	0.166	0.165	0.165	0.164	0.166
130	0.171	0.171	0.172	0.172	0.172	0.171	0.172	0.172	0.172	0.172
140	0.177	0.178	0.178	0.178	0.178	0.178	0.178	0.178	0.178	0.179
150	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.182	0.182	0.183	0.183	0.182
160	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184
170	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187
180	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188

TABLE 24

RADIANCE K VALUES, OVERCAST SKY

Sun Altitude = 40.0° Depth - 12.2 Meters θ = Tilt Angle Ø = Azimuth Angle

θ \ Ø	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204
10	0.207	0.207	0.206	0.206	0.205	0.206	0.206	0.207	0.207	0.207
20	0.215	0.216	0.216	0.215	0.214	0.215	0.216	0.217	0.218	0.218
30	0.226	0.226	0.225	0.224	0.222	0.222	0.223	0.224	0.224	0.226
40	0.230	0.230	0.228	0.228	0.226	0.225	0.225	0.225	0.226	0.227
50	0.209	0.209	0.208	0.206	0.204	0.204	0.205	0.208	0.210	0.212
60	0.201	0.201	0.200	0.199	0.198	0.200	0.200	0.201	0.203	0.203
70	0.201	0.201	0.201	0.201	0.200	0.199	0.199	0.200	0.200	0.201
80	0.204	0.203	0.204	0.202	0.201	0.200	0.200	0.200	0.201	0.201
90	0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.203	0.201	0.201	0.201	0.201
100	0.207	0.207	0.206	0.206	0.205	0.203	0.201	0.199	0.199	0.198
110	0.206	0.206	0.206	0.206	0.205	0.203	0.201	0.200	0.199	0.199
120	0.206	0.206	0.205	0.205	0.205	0.204	0.203	0.202	0.201	0.201
130	0.206	0.207	0.207	0.208	0.208	0.207	0.207	0.205	0.205	0.205
140	0.209	0.209	0.208	0.209	0.209	0.208	0.206	0.206	0.205	0.205
150	0.210	0.210	0.210	0.211	0.211	0.210	0.209	0.208	0.206	0.206
160	0.211	0.211	0.211	0.210	0.210	0.209	0.208	0.208	0.209	0.208
170	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209
180	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209

TABLE 25

RADIANCE K VALUES, OVERCAST SKY

Sun Altitude = 40.0° Depth = 18.3 Meters θ = Tilt Angle ∅ = Azimuth Angle

θ \ ∅	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
10	0.201	0.202	0.201	0.201	0.201	0.202	0.203	0.204	0.204	0.205
20	0.205	0.205	0.205	0.205	0.205	0.206	0.207	0.208	0.209	0.210
30	0.208	0.208	0.208	0.208	0.207	0.208	0.209	0.212	0.214	0.215
40	0.211	0.211	0.211	0.210	0.210	0.208	0.210	0.211	0.212	0.214
50	0.202	0.202	0.201	0.201	0.199	0.198	0.199	0.200	0.201	0.202
60	0.199	0.199	0.199	0.198	0.197	0.196	0.196	0.197	0.198	0.199
70	0.198	0.198	0.198	0.198	0.197	0.196	0.196	0.196	0.197	0.197
80	0.199	0.199	0.199	0.198	0.198	0.197	0.196	0.197	0.196	0.197
90	0.200	0.200	0.200	0.199	0.198	0.197	0.196	0.196	0.196	0.196
100	0.199	0.199	0.199	0.199	0.198	0.197	0.197	0.196	0.197	0.197
110	0.199	0.199	0.199	0.199	0.198	0.197	0.197	0.197	0.196	0.197
120	0.200	0.200	0.199	0.199	0.198	0.197	0.196	0.196	0.196	0.196
130	0.200	0.200	0.200	0.200	0.199	0.198	0.198	0.197	0.196	0.196
140	0.199	0.199	0.198	0.198	0.198	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197
150	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.197	0.197	0.196	0.196
160	0.198	0.198	0.198	0.197	0.197	0.197	0.196	0.196	0.197	0.197
170	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197	0.197
180	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196

TABLE 26

RADIANCE K VALUES, OVERCAST SKY

Sun Altitude = 40.0° Depth = 30.5 Meters θ = Tilt Angle ∅ = Azimuth Angle

θ \ ∅	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191
10	0.192	0.192	0.192	0.192	0.192	0.192	0.191	0.192	0.191	0.191
20	0.189	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.191	0.191	0.191	0.191
30	0.188	0.189	0.189	0.190	0.190	0.190	0.189	0.189	0.190	0.189
40	0.188	0.189	0.189	0.189	0.189	0.188	0.187	0.187	0.186	0.186
50	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.187	0.186	0.185	0.183	0.183
60	0.188	0.188	0.188	0.188	0.188	0.186	0.184	0.183	0.182	0.182
70	0.188	0.189	0.188	0.188	0.187	0.186	0.185	0.184	0.184	0.183
80	0.187	0.188	0.187	0.187	0.186	0.185	0.184	0.183	0.183	0.183
90	0.188	0.187	0.187	0.186	0.185	0.184	0.183	0.182	0.182	0.182
100	0.186	0.185	0.186	0.185	0.185	0.184	0.184	0.184	0.185	0.185
110	0.187	0.187	0.186	0.186	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185	0.185
120	0.186	0.187	0.186	0.186	0.183	0.184	0.184	0.184	0.183	0.184
130	0.186	0.186	0.185	0.185	0.184	0.184	0.183	0.183	0.183	0.184
140	0.185	0.185	0.185	0.185	0.184	0.184	0.183	0.184	0.184	0.184
150	0.184	0.184	0.184	0.183	0.182	0.182	0.182	0.182	0.183	0.183
160	0.183	0.183	0.183	0.183	0.182	0.182	0.182	0.181	0.181	0.181
170	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182
180	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182	0.182

TABLE 27

RADIANCE K VALUES, OVERCAST SKY

Sun Altitude = 40.0° Depth = 42,8 Meters θ = Tilt Angle ∅ = Azimuth Angle

θ \ ∅	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180
10	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.180	0.179	0.179	0.179
20	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.182	0.181	0.179	0.178	0.177
30	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.182	0.180	0.177	0.175	0.175
40	0.183	0.183	0.182	0.182	0.181	0.179	0.176	0.174	0.172	0.171
50	0.181	0.182	0.182	0.181	0.181	0.180	0.177	0.175	0.173	0.173
60	0.180	0.180	0.180	0.180	0.179	0.178	0.176	0.174	0.172	0.171
70	0.181	0.181	0.181	0.181	0.180	0.178	0.177	0.175	0.173	0.172
80	0.179	0.179	0.179	0.178	0.177	0.176	0.174	0.172	0.172	0.171
90	0.178	0.178	0.178	0.178	0.177	0.176	0.174	0.173	0.172	0.171
100	0.179	0.179	0.179	0.178	0.178	0.177	0.175	0.174	0.173	0.172
110	0.181	0.181	0.181	0.180	0.179	0.178	0.177	0.177	0.176	0.175
120	0.182	0.182	0.182	0.181	0.180	0.180	0.179	0.178	0.178	0.177
130	0.183	0.183	0.182	0.182	0.182	0.181	0.181	0.181	0.180	0.180
140	0.186	0.186	0.186	0.185	0.185	0.185	0.184	0.183	0.183	0.182
150	0.188	0.188	0.188	0.187	0.187	0.186	0.185	0.185	0.184	0.184
160	0.190	0.189	0.189	0.189	0.189	0.188	0.188	0.187	0.187	0.187
170	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190
180	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190

TABLE 28

RADIANCE K VALUES, OVERCAST SKY

Sun Altitude = 40.0° Depth = 48.9 Meters θ = Tilt Angle ∅ = Azimuth Angle

θ \ ∅	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
0	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175
10	0.175	0.175	0.175	0.176	0.176	0.177	0.176	0.176	0.176	0.176
20	0.182	0.181	0.182	0.182	0.181	0.180	0.178	0.177	0.175	0.175
30	0.182	0.183	0.182	0.181	0.179	0.178	0.176	0.175	0.174	0.174
40	0.180	0.181	0.179	0.178	0.177	0.175	0.173	0.171	0.170	0.170
50	0.183	0.183	0.183	0.181	0.179	0.177	0.175	0.173	0.172	0.172
60	0.181	0.181	0.180	0.179	0.178	0.176	0.176	0.175	0.175	0.174
70	0.182	0.181	0.181	0.180	0.179	0.177	0.175	0.174	0.172	0.172
80	0.178	0.178	0.178	0.177	0.176	0.174	0.172	0.172	0.170	0.171
90	0.178	0.178	0.177	0.176	0.176	0.174	0.173	0.172	0.171	0.170
100	0.179	0.179	0.178	0.178	0.177	0.176	0.175	0.173	0.171	0.171
110	0.181	0.181	0.180	0.180	0.179	0.178	0.177	0.176	0.175	0.175
120	0.185	0.184	0.184	0.183	0.183	0.182	0.180	0.180	0.179	0.179
130	0.187	0.187	0.187	0.187	0.186	0.185	0.184	0.183	0.182	0.181
140	0.192	0.192	0.191	0.190	0.190	0.189	0.189	0.189	0.187	0.186
150	0.194	0.194	0.194	0.193	0.193	0.192	0.192	0.190	0.190	0.189
160	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198	0.198
170	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
180	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201