

Maakaapeloinnin vertailu Iz SFS 6000-5-52 (2012-08-13), IEC 60364-5-52 (edition 3, 2009–10). b-painos 7.2016.

1. Johdanto

b) Kun artikkelin ensimmäistä painosta kirjoitettiin, ei IEC:n taulukoissa ollut suoraan maahan asennetuille kaapeleille taulukoita. Uudessa IEC normissa on taulukot suoraan maahan asennukselle ja lisäksi maan lämpöresistiivisyyden korjaustaulukkoon on tullut oma rivi suoraan maa asennuksille. SFS 6000 ei ole muutoksia. Vertailutaulukot osassa 2 ovat IEC:n osalta muuttuneen radikaalisesti. Muilta osin sanoma on säilynyt ennallaan.

SFS 6000 esikuva standardina on ollut IEC 60364.

SFS 6000-5-52 on maakaapeliasennuksen sallittujen kuormitusarvojen osalta tehty kansalliset poikkeamat.

SFS 6000-5-52 liitteessä 52B kappaleessa B.52.1 sanotaan mm:

”Maahan asennettujen kaapelien kuormitettavuusarvoina on käytetty aikaisemmin Suomessa käytössä olleita arvoja. Ne on tarkoitettu kaapeleille, jotka on asennettu suoraan maahan. Suojaputkeen asennetuille kaapeleille voi olla tarpeen käyttää pienempiä kuormitettavuuksia. IEC-standardin mukaiset arvot ovat huomattavasti pienempiä.”

”Kaapelien kuormitettavuus voidaan määrittellä myös suoraan standardin IEC 60364-5-52 tai muun luotettavan mitoitusmenetelmän mukaan. Näin suositellaan tehtäväksi erityisesti silloin kun kaapeliasennusta suunnitellaan muualle kuin suomalaisiin olosuhteisiin.”

Kohdassa SFS 6000-5-52 liitteessä 52B kappaleessa B.53.3 ”Maan lämpöresistiivisyys”:

”Suomessa käytetään maan lämpöresistiivisyyden perusarvona 1,0 K·m/W. HUOM. Standardissa IEC 60364-5-52 maan lämpöresistiivisyytenä on käytetty 2,5 K·m/W, joka on turvallinen arvo maailmanlaajuisesti. Kuormitettavuuden laskentaa käsittelevän standardisarjan IEC 60287 osan 3-1 mukaan Suomessa maan lämpöresistiivisyytenä käytetään 1,0 K·m/W. Paikoissa, joissa maan todellinen lämpöresistiivisyys on suurempi kuin 1,0 K·m/W, kuormitettavuutta on pienennettävä vastaavasti käyttäen sopivaa korjauskerrointa tai välittömästi kaapeleiden kanssa kosketuksessa oleva maa-aines on vaihdettava sopivampaan.”

Kaapelin sallitun kuormitusarvon mitoitusmenetelmiä on useita. Menetelmän mukaisesti on laadittu (laskettu) perustaulukot jossa ilmoitetaan sallittu kuormitusvirta määrätyissä asennus olosuhteissa. Menetelmäkohtaisesti on lisäksi taulukoitu korjauskertoimia. Korjauskertoimilla muutetaan sallittua kuormitusarvoa asennusolosuhteiden ollessa perustaulukoista poikkeavia.

Mitoituksissa tulee aina käyttää saman mitoitusmenetelmän perustaulukoita ja korjauskerrointitaulukoita. Ristiin laskentamenetelmien taulukoita ei missään nimessä saa käyttää.

Lisäksi löytyy kirjallisuudesta mitoitusaulukoita joissa ei ole mainintaa, miten taulukko on laskettu. Tässäkin pätee, että saman lähteen korjauskertoimia tulee käyttää.

Tämä ohjeistuksen lisääminen SFS 6000 standardiin olisi suositeltavaa. Esimerkiksi IEC: B.52.18 ja SFS B.52.18 taulukot ovat hyvin samanlaisia. Houkutus on suuri valita 0,5 m korjauskerroin IEC taulukosta, kun se puuttuu SFS taulukosta jne. SFS 6000 sallii mitoitusarvot myös ”muun luotettavan mitoitusmenetelmän mukaan”.

2. Eri laskentamenetelmien vertailu

Asennusolosuhteet perustaulukossa.

Asennusolosuhteet	SFS 6000	IEC B.52-4	IEC B.52-5	Nokia	Nokia	Kabel..
	PVC ja PEX	PVC	PEX	PVC	PEX	PVC 1)
Suoraan maahan as.	B.52.2	B.52-4	B.52-5	Taul 21	Taul. 22	18.5-4
Maan lämpötila	15	20	20	15	15	f1 18.14
Korjauskerroin	B.52.15	B.52.15	B.52.15	Taul 31	Taul 31	f2 18.18
Maan lämpöresistiivisyys	1,0	2,5	2,5	1,0	1,0	
Korjauskerroin	B.52.16	B.52.16	B.52.16	Taul 30	Taul 30	
Johtimen lämpötilalla	70 / 65	70	90	70	90	70
Korjauskerroin	Ei taul.	Ei taul.	Ei taul.	Ei taul.	Ei taul.	Ei taul.

1) Järjestelmä käyttää kahta kerrointa. 1. Johdinlämpötila + maalämpötila + maan resistiivisyys. 2. Järjestelmien lukumäärä + maan resistiivisyys. Molempia kertoimia tulee käyttää f1*f2.

PERUSTAULUKKO

Johdinmat..	Korjaamattomat Iz arvot							
	SFS 6000	IEC B.52-4	IEC B.52-4	IEC B.52-5	IEC B.52-5	Nokia	Nokia	Kabel..
	B.52.2 ja 3 PVC ja PEX	D1 1) PVC	D2 2) PVC	D1 1) PEX	D2 2) PEX	Taul 21 PVC	Taul. 22 PEX	Taul. 18.5 4-PVC
Kupari	MCMK							
1,5	26	18	19	21	23	26		27
2,5	35	24	24	28	30	35		36
4	46	30	33	36	39	46		47
6	57	38	41	44	49	57	70	59
10	77	50	54	58	65	77	95	79
16	100	64	70	75	84	100	125	102
25	130	82	92	96	107	130	160	133
35	160	98	110	115	129	160	190	160
50	190	116	130	135	153	190	230	190
70	240	143	162	167	188	240	280	234
95	285	169	193	197	226	285	330	280
120	325	192	220	223	257	325	380	319
150	370	217	246	251	287	370	430	357
185	420	243	278	281	324	420	480	402
240	480	280	320	324	375	480	555	463
300	550	316	359	365	419	550	630	518
Alumiini	AMCMK							
16	78	50	53	59	64	78		
25	100	64	69	75	82	100	125	103
35	125	77	83	90	98	125	150	123
50	150	91	99	106	117	150	180	145
70	185	112	122	130	144	185	220	180
95	220	132	148	154	172	220	260	216
120	255	150	169	174	197	255	295	246
150	280	169	189	197	220	280	335	276
185	330	190	214	220	250	330	375	313
240	375	218	250	253	290	375	435	362
300	430	247	282	289	326	430	490	415

1) Suoraan maahan asennettu

2) Yksittäisissä putkissa maassa.

Laaditaan taulukko jossa kuormitusarvot ovat vertailukelpoiset keskenään, muuttamalla korjauskertoimilla asennusolosuhteet samanlaisiksi.

Korjauskertoimet	SFS 6000	IEC B.52-4	IEC B.52-5	Nokia	Nokia	Kabel..
Suoraan maahan asennettuna	PVC ja PEX	PVC	PEX	PVC	PEX	PVC 1)
Maan lämpötila 15 C	1	1,05	1,04	1	1	0,94
Maan lämpöresistiivisyys 1,0 K.m/W.	1	1,50	1,50	1	1	0,89
Johtimen lämpötila	1	1	0,802	1	0,816	1
	1	1,575	1,251	1	0,816	0,837

1) $f_1 = \text{PVC} = 0,94 = 70 \text{ °C/maa}, 15 \text{ °C}/1,0 \text{ K.m/W}$; $f_2 = 0,89 = 1 \text{ kpl}/1,0 \text{ K.m/W}$

Suomalaisien olosuhteisiin korjattu perustaulukko:

Poikkipinta Johdinmat..	Ylläolevilla kertoimilla korjatut Iz arvot						Ero (PVC)	Ero IEC	Ero (PVC)
	SFS 6000	IEC B52-4	IEC B52-5	Nokia	Nokia	Kabel..			
	PVC ja PEX	D2 PVC	D2 PEX	Taul 21 PVC	Taul. 22 PEX	Taul. 18.5 PVC			
Kupari	MCMK								
1,5	26	30	29	26		23	1,15	0,96	0,75
2,5	35	38	38	35		30	1,08	0,99	0,80
4	46	52	49	46		39	1,13	0,94	0,76
6	57	65	61	57	57	49	1,13	0,95	0,76
10	77	85	81	77	78	66	1,10	0,96	0,78
16	100	110	105	100	102	85	1,10	0,95	0,77
25	130	145	134	130	131	111	1,11	0,92	0,77
35	160	173	161	160	155	134	1,08	0,93	0,77
50	190	205	191	190	188	159	1,08	0,93	0,78
70	240	255	235	240	228	196	1,06	0,92	0,77
95	285	304	283	285	269	234	1,07	0,93	0,77
120	325	347	322	325	310	267	1,07	0,93	0,77
150	370	387	359	370	351	299	1,05	0,93	0,77
185	420	438	405	420	392	336	1,04	0,93	0,77
240	480	504	469	480	453	387	1,05	0,93	0,77
300	550	565	524	550	514	433	1,03	0,93	0,77
Alumiini	AMCMK								
16	78	83	80	78			1,07	0,96	
25	100	109	103	100	102	86	1,09	0,94	0,79
35	125	131	123	125	122	103	1,05	0,94	0,79
50	150	156	146	150	147	121	1,04	0,94	0,78
70	185	192	180	185	180	151	1,04	0,94	0,78
95	220	233	215	220	212	181	1,06	0,92	0,78
120	255	266	246	255	241	206	1,04	0,93	0,77
150	280	298	275	280	273	231	1,06	0,92	0,78
185	330	337	313	330	306	262	1,02	0,93	0,78
240	375	394	363	375	355	303	1,05	0,92	0,77
300	430	444	408	430	400	347	1,03	0,92	0,78

Alla vielä muutama vertailukelpoinen esimerkki, kun asennusolosuhteita on muutettu.

Esimerkki 1, yksittäinen 3-vaihe kaapeli AMCMK 4x120+41 asennetaan suoraan maahan eteläsuomessa. Maan lämpöresistivisyys on 1,5 K m/W, kaivannon syvyys on 0,7 m, maan lämpötila on 15 °C ja jännite on 400 V, 50 Hz.

AMCMK 4x120+41	SFS 6000		IECB52-4D2		Nokia t.21		Kabel..18,5	
Korjaamaton lz	255	A	169	A	255	A	246	A
Maan lämpötila	1	15	1,05	15	1	15	0,89	f1
Maan lämpöresistivisyys	0,85	1,5	1,28	1,5	0,85	1,5	0,89	f2
Johtimen lämpötila 70°C	1		1		1		1	
Kuormitettavuus	217 A		227 A		217 A		195 A	
	Ero %	SFS/IEC	4,57 %	SFS/Nokia	0,00 %	IEC/Kabel..	16,57 %	

Esim. 1 PEX kaapelille	SFS 6000		IECB52-5D2		Nokia t.21		Kabel..18,5	
Korjaamaton lz	255	A	197	A	295	A	269	A
Maan lämpötila	1	15	1,04	15	1	15	0,89	f1
Maan lämpöresistivisyys	0,85	1,5	1,28	1,5	0,85	1,5	0,89	f2
Johtimen lämpötila 65°C	1		0,802		0,816		0,802	
Kuormitettavuus	217 A		210 A		205 A		171	
	Ero %	SFS/IEC	-3,06 %	SFS/Nokia	-5,93 %	IEC/Kabel..	23,08 %	

Esimerkki 2, kuten yllä mutta kaapeleita on 2 kpl asennettuna 7 cm välillä. Muutetaan myös ympäröivän maan lämpötilaa 25 ° C.

AMCMK 4x120+41	SFS 6000		IECB52-4D2		Nokia t.21		Kabel..18,5	
Korjaamaton lz	255	A	169	A	255	A	246	A
Maan lämpötila	0,9	25	0,95	25	0,9	25	0,72	f1
Maan lämpöresistivisyys	0,85	1,5	1,28	1,5	0,85	1,5	0,84	f2 2// 7 cm
Johtimen lämpötila 70°C	1		1		1		1	
2 kpl kaapelia	0,85	2// -7cm	0,8	2// D	0,85	2//	1	
Korjaustaulukko	B.52.18 väli 7 cm		B.52.18 väli kaap.halk.		Taul. 28 7cm			
Kuormitettavuus/kaapeli	166 A		164 A		166 A		149 A	
	Ero %	SFS/IEC	-0,86 %	SFS/Nokia	0,00 %	IEC/Kabel..	10,50 %	

Esimerkki 3, kuten yllä mutta kaapelit asennettuna putkiin 7 cm välillä.

AMCMK 4x120+41	SFS 6000		IECB52-4D1		Nokia t.21		Kabel..18,5	
Korjaamaton lz	255	A	150	A	255	A	246	A
Maan lämpötila	0,9	25	0,95	25	0,9	25	0,72	f1
Maan lämpöresistivisyys	0,85	1,5	1,1	1,5	0,85	1,5	0,84	f2
Johtimen lämpötila 70°C	1		1		1		1	
Putket 2 // väli cm	0,75		0,9		0,9		0,85	fr 2)
Korjaustaulukko 1)	B.52.19 väli 7 cm		B.52.19A väli 25 cm		52-E3A Kirja A3 v. 25 cm		f2 18.18, väli 7cm	
Kuormitettavuus/kaapeli	146 A		141 A		176 A		126 A	
	Ero %	SFS/IEC	-3,71 %	SFS/Nokia	16,67 %	IEC/Kabel..	11,55 %	
1) IEC ja Nokia kertoimia ei ole 7cm. Nokia kirjassa ei ole putkiasennuksella korjauskertoimia								
2) Kabel.. Kirjassa on kiinteä kerroin putkiasennukselle joka on 0,85.								

Lainaus SFS standardista: " Suojaputkeen asennetuille kaapeleille voi olla tarpeen käyttää pienempiä kuormitettavuuksia. IEC-standardin mukaiset arvot ovat huomattavasti pienempiä. " Merkitty kansalliseksi poikkeamaksi.

Vertailutaulukko maahan suojaputkeen asennetulle kaapelille, kertoimilla korjattu suomalaisiin olosuhteisiin.

Korjauskertoimet	SFS 6000	IEC B.52-4	IEC B.52-5	Kabel..	Kabel..
Suojaputkessa maahan asennettuna	PVC ja PEX	PVC	PEX	PVC	PEX
Maan lämpötila 15 C	1	1,05	1,04	0,94	0,95
Maan lämpöresistiivisyys 1,0 K.m/W.	1	1,18	1,18	0,89	0,89
Johtimen lämpötila 65 °C	1	1	0,802	1	0,802
Suojaputkessa	0,8	1	1	0,85	0,85
	0,80	1,24	0,98	0,71	0,58

Ylläolevilla kertoimilla korjattu taulukko:

Poikkipinta	Vertailutaulukko maahan putkeen asennettu kaapeleli						
Johdinmat..	SFS 6000	IEC B52-4	IEC B52-5	Kabel..	Kabel..	Ero (PVC)	Ero (PVC)
	PVC ja PEX	D1	D1	Taul. 18.5	Taul. 18.5	SFS -	IEC-
		PVC	PEX	PVC	PEX	IEC PVC	Kabel.. PVC
Kupari				MCMK	MXCMK		
1,5	21	22	21	19	18	1,07	0,92
2,5	28	30	28	26	23	1,06	0,91
4	37	37	35	33	30	1,01	0,90
6	46	47	43	42	37	1,03	0,91
10	62	62	57	56	50	1,01	0,90
16	80	79	74	73	65	0,99	0,90
25	104	102	94	95	84	0,98	0,90
35	128	121	113	114	101	0,95	0,87
50	152	144	133	135	120	0,94	0,87
70	192	177	164	166	148	0,92	0,85
95	228	209	194	199	177	0,91	0,85
120	260	238	219	227	201	0,91	0,85
150	296	269	247	254	225	0,90	0,83
185	336	301	277	286	255	0,88	0,82
240	384	347	319	329	293	0,89	0,83
300	440	392	359	368	328	0,88	0,81
Alumiini				AMCMK	AXMCMK		
16	62	62	58			0,99	
25	80	79	74	73	65	0,99	0,91
35	100	95	89	87	78	0,95	0,86
50	120	113	104	103	92	0,94	0,84
70	148	139	128	128	114	0,93	0,84
95	176	164	152	154	136	0,92	0,85
120	204	186	171	175	155	0,90	0,83
150	224	209	194	196	174	0,93	0,86
185	264	235	217	223	197	0,88	0,81
240	300	270	249	257	229	0,89	0,83
300	344	306	281	295	262	0,88	0,83

Kommentit vertailutaulukoista ja korjauskertoimista.

1. **Nokia.** Oy Nokia AB kirja "Voimakaapelit ja asennusjohdot" 1975 (ISBN 951-99072-7-0). Otettu mukaan vertailuun koska vaikuttaa siltä, että kirjan mukaista mitoitusmenetelmää on käytetty esikuvana SFS-6000 arvoille. Putkeen asennettavalle kaapelille ei löydy korjaustaulukkoa Nokia kirjasta. Nokia kirjassa on myös useita muita hyviä neuvoja maahan asennetuille kaapeleille, katso kohta 3.

2. Kabel. = Kabel und Leitungen für Starkstrom (5-painos,1999, ISBN 3-89578-088-X) on otettu vertailuun mukaan ”muuna luotettavana mitoitusmenetelmänä”. Kirjassa esitetään seikkaperäisesti saksalaisien (VDE) standardien mukainen mitoitusmenetelmä kaapeleiden kuormitettavuudelle.

Vertailutaulukoista voidaan yleisesti todeta, että tämän mitoitusmenetelmän arvot poikkeamat IEC:n ja SFS 6000 arvoista suhteellisen paljon. Näin suuria poikkeamia ei tulisi olla eri mitoitusmenetelmien välillä.

Mitoitukseen liittyvä fysiikka pysyy samana mitoitusjärjestelmästä toiseen. Erojen syiden selvitys edellyttää mitoitusmenetelmillä suoritettujen yksittäisten laskelmien vertailuja. Tämän artikkelin puitteissa ei ole mahdollista suorittaa tätä vertailua.

3. SFS 6000-5-52. Nokian kirjan PVC arvot ovat samat kuin SFS 6000 perustaulukon arvot (Ovatko nämä = ”Suomessa käytössä olleita arvoja?”). Yksinkertaistettu niin että sama taulukko pätee sekä PVC ja PEX eristeisille kaapeleille. Kansallinen poikkeama.

Nokian kirjan PEX arvot on otettu mukaan (johtimen lämpötila korjattu 90 - 65 ° C) korjattuun perusavotaulukkoon. Vertaamalla Nokian PVC ja PE taulukoita voidaan todeta, että erot ovat pieniä, joten taulukoiden yhdistäminen SFS 6000 on perusteltua. Johtimien lämpötilalle ei ole perustaulukoita, joten korjauskerroin on laskettu (neliöjuurikaavalla), katso kohta 3.

4. SFS B.52.15 (korjauskerroin maan lämpötilalle) on sama kuin Nokian taulukko 31, katso kohta 3. Kansallinen poikkeama.

5. SFS B.52. 16 (korjauskerroin maan lämpöresistiivisyydelle) on osa Nokian kirjan taulukosta 30, katso kohta 3. Kansallinen poikkeama.

6. SFS B.52.18 (korjauskerroin usealle suoraan maahan asennetuille kaapeleille) on sama kuin Nokia kirjan taulukko 28, katso kohta 3. Ei ole merkitty kansalliseksi poikkeamaksi, vaikka vastaavat IEC:n taulukot ovat erilaisia. IEC taulukossa on myös useita tärkeitä huomautuksia, jotka on jätetty pois SFS taulukosta.

7. SFS B.52.19 (korjauskertoimet putkessa maahan asennetuille kaapeleille) on epäselvää mistä tai miten ko. taulukko on saatu aikaan. Taulukko **ei ole** merkitty kansalliseksi poikkeamaksi ja IEC:n taulukon huomautukset on jätetty pois. Kirjasta A2 vuodelta 1994 löytyy myös taulukot 52-E3 A ja B jotka koskevat putkeen maahan asennettuja kaapeleita. IEC taulukossa on lisäksi korjauskertoimet myös putkeen asennetuille yksijohdinkaapeleille, vastaavia taulukoita ei ole SFS 6000 standardissa.

8. SFS 6000-5-52 ja IEC 60364-5-52 arvojen vertailu

Kaapelien maa-asennuksen mitoituksissa on kaksi arvoa, joiden määrittely on haasteellista. Nimittäin kaapelin kuormitusvirta ajan funktiona ja maan lämpöresistiivisyys. Lisäksi reittilinjauksen varrella saattaa kulkea maassa esimerkiksi kaukolämpöputkia tms. jotka lämmittävät tai kuivattavat maaperää.

Kun huomioidaan edellä mainittu ja verrataan korjattuja taulukkoarvoja, niin voidaan tulla siihen johtopäätöksen, että molempien mitoitusjärjestelmien (SFS / IEC) arvot ovat käyttökelpoisia maakaapelimitoitukseen. Ero johtunee siitä, että Nokian kirjassa (joka arvot on ainakin osittain kopioitu SFS standardiin) on käytetty mitoitusmenetelmää, joka todennäköisesti poikkeaa jonkin verran IEC:n menetelmästä, tai on peräisin tehdyistä kokeista.

Maakaapelin Iz arvon määrittää kaapelin kuormitettu lämpötila joka seuraa kaavaa (neliöjuurikaava):

$$\Delta v = \Delta v_n \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \quad (\text{katso kohta 3})$$

Tämä tarkoittaa että 10 % ero Iz virroissa vaikuttaa kaapelin lämpötilaan vain noin $\sqrt{10}$ eli 3,3 %.

Toisenlaiseen johtopäätökseen voi myös tulla. Miksi meillä on kaksi eri järjestelmää maakaapelien mitoitusmitoitukseen?

Olisiko paikallaan poistaa SFS standardeista kansalliset poikkeukset ja korjata taulukot suoraan IEC:n mukaisiksi?

Suomessa käytetään useita eri valmistajien ilmaisia mitoitusohjelmia. Näissä ohjelmissa on poikkeuksetta käytössä IEC:n mukaisia mitoitusmenetelmiä. Kun erot Iz virroissa ovat joissain tapauksissa yli 10 %, aiheuttaa tämä turhia selvityksiä. IEC:n standardeihin on tehty pari tärkeää muutosta, nimittäin D2 taulukot ja uusi rivi maan lämpöresistiivisyyden korjauskertoimiksi, kun kaapeli asennetaan suoraan maahan. On syytä tarkistaa, että ohjelma huomioi nämä asiat.

Kansallisena poikkeamana riittäisi lyhyt selvitys siitä, mitä maan lämpötilaa ja maan resistiivisyysarvoja Suomessa tulee käyttää. Lisäksi jouduttaisi lisäämään korjauskerroin PEX kaapelin johtimen lämpötilalle 65 °C. Muutama mitoitus esimerkki olisi myös paikallaan.

3. Nokian kirja

3.1 Kirjan mukaiset korjauskertoimet:

Taulukko 28 Useita kaapeleita vierekkäin maassa. Kertoimet pätevät kolmijohdin-kaapeleille sekä yksijohdinkaapeliryhmille.

Vierekkäisten kaapelien lukumäärä	2	3	4	5	6	8	10
Korjauskerroin, kun kaapelien vapaa välimatka on							
a) kaapelit koskettavat toisiaan (0 mm)	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
b) 70 mm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
c) 250 mm	0,87	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,64

SFS B.52.18 taulukossa on samat arvot, kun ylläolevassa taulukossa.

SFS B.52.19 vastaavaa taulukkoa ei löydy Nokia kirjasta.

Taulukko 29 Asennussyvyys

Asennussyvyys m	Kaapelin nimellisjännite	
	0,6/1 kV	5,8/10 ... 40/69 kV
0,5 ... 0,7	1,0	1,0
0,71 ... 0,9	0,97	0,99
0,91 ... 1,1	0,95	0,98
1,1 ... 1,3	0,93	0,96
1,31 ... 1,5	0,92	0,95

Kuten huomataan ei asennussyvyydellä ole kovin suurta merkitystä. Asennussyvyydestä johtuvia korjauskertoimia ei ole mukana standardeissa IEC tai SFS. Asennussyvyys on IEC:n taulukoissa 0,8 m ja SFS taulukoissa 0,7 m.

Taulukko 30

Taulukko 30 Maan lämpöresistivisyys

Maan lämpöresistivisyys Km/W	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0
0,6/1 kV							
25 mm ² saakka	1,11	1	0,94	0,87	0,78	0,72	0,67
35 ... 95 mm ²	1,13	1	0,93	0,86	0,76	0,70	0,64
120 ... 500 mm ²	1,14	1	0,92	0,85	0,75	0,69	0,63
5,8/10 kV							
25 mm ² saakka	1,09	1	0,95	0,88	0,80	0,74	0,69
25 ... 95 mm ²	1,11	1	0,94	0,87	0,78	0,72	0,66
120 ... 500 mm ²	1,12	1	0,93	0,86	0,77	0,70	0,65
11,6/20 kV							
25 mm ² saakka	1,08	1	0,96	0,90	0,81	0,75	0,70
35 ... 95 mm ²	1,10	1	0,95	0,89	0,79	0,73	0,67
120 ... 500 mm ²	1,11	1	0,94	0,88	0,78	0,72	0,66
17,3/30-34,6/60 kV							
95 mm ² saakka	1,08	1	0,95	0,90	0,82	0,76	0,71
120 ... 500 mm ²	1,09	1	0,95	0,89	0,80	0,74	0,69

Nokia kirjan taulukko on huomattavasti monipuolisempi. **SFS B.52. 16** taulukkoon on otettu ainoastaan yksi rivi, 120...300 mm². Vaikutus ei ole kovin merkittävä. Ero johtuu Ahto ilmiön lisähäviöistä jotka kasvavat, kun poikkipinta kasvaa.

Lisäksi Nokia kirjasta löytyy esimerkkejä maan lämpöresistivisyydestä:

Kuiva hiekka (kosteus 0 %)	3,0 Km/W
Kuiva sora ja savi	1,5 Km/W
Puolikuiva sora, suomulta ja hiekka (kosteus 10 %)	1,2 Km/W
Puolikuiva savi ja kostea sora	1,0 Km/W
Kostea savi ja Hiekka (kosteus 25 %)	0,7 Km/W

Taulukko 31
Maan lämpötila

Maan lämpötila °C	5	10	15	20	25	30
90°C johdinlämpötila	1,06	1,03	1,0	0,96	0,93	0,89
80°C ..	1,07	1,04	1,0	0,96	0,92	0,88
70°C ..	1,09	1,04	1,0	0,95	0,90	0,85
65°C ..	1,10	1,05	1,0	0,95	0,89	0,84

SFS B.52.15 taulukon arvot tulisi kai olla samat kuin taulukossa yllä. [Onko mahdollisesti kirjoitettu PEX kaapeleille 90 °C asteen arvot? Perustaulukko oli muunnettu 65 °C eli PEX arvot tulisi mielestäni ottaa 65 °C riviltä.](#) Vaikutus ei ole kovin suuri.

Johtimen lämpötila

Johtimen lämpötilan muuttamiselle ei löydy taulukoita IEC:stä eikä SFS:stä. Kirjasta **Kabel und..** löytyy alla esitetty kaava.

Kun halutaan laskea kaapelin kuormitus arvo toisella johdinlämpötilalla, voidaan käyttää kaavaa:

$$\Delta v = \Delta v_n \left(\frac{I}{I_n} \right)^2$$

jossa: I on kuormitus virta ja Δv on lämpötila, josta on vähennetty ympäristön lämpötila.

Lähdetään siitä, että kaapelin pintalämpötila ei saa ylittää 50 °C. Katso tarkemmin, alla maan kuivuminen.

Korjauskertoimet ovat silloin:

PVC kaapelille ei tarvitse laskea tätä kerrointa koska kaapelin pintalämpötila jää alle 50 °C johdinlämpötilalla on 70 °C.

PEX ja EPR kaapelien pintalämpötila nousee täysin kuormitettuna yli 50 °C. Yleisesti käytetään PEX kaapelien johdin lämpötilaa 65 °C. PEX ja EPR = $\sqrt{75/50} = 0,816$ (90 / 65 ja maa 15 °C) Nokia kirjan taulukolle ja IEC taulukolle jossa maan lämpötila on 20 °C: $\sqrt{70/45} = 0,802$.

Laskentamenetelmä ei ole ihan tarkka johtuen siitä, että vaihtovirralla Ahto-ilmiö kasvattaa resistanssia ja näin kaapelihäviöitä suhteessa enemmän suurilla poikkipinnoilla kuin pienillä poikkipinnoilla. Vaikutus näkyy myös taulukossa 30 yllä.





Muita hyödyllisiä Nokia kirjan taulukoita maa asennuksille:

Taulukko 29 Asennussyvyys

Asennus- syvyys m	Kaapelin nimellisjännite	
	0,6/1 kV	5,8/10 ... 40/69 kV
0,5 ... 0,7	1,0	1,0
0,71 ... 0,9	0,97	0,99
0,91 ... 1,1	0,95	0,98
1,1 ... 1,3	0,93	0,96
1,31 ... 1,5	0,92	0,95

Taulukko 32

Suojakourujen ja -laattojen vaikutus kuormitettavuuteen

Suojaustapa		Korjaus- kerroin
Betoni- tai tiili-laatta yli 0,1 m kaapelin yläpuolella hyvin tiivistetyssä hiekkamaassa		1,0
Tiilikivet joka puolella kaapelin suojana, välit täytetty tiiviisti hiekalla tai betonikouru kaapelin päällä, kourun ja kaapelin välissä tiivis hiekka		0,9
Betonikouru kaapelin päällä, kaapelin ja kourun välinen hiekkatäyte löysä		0,8

Maan lämpötila ja maan kuivuminen

Alla on suora sitaatti Nokia kirjasta kohta 7.2.1

”Korkeimmat lämpötilat maaperässä 0,7 m syvyydessä esiintyvät heinä- ja elokuussa. Alhaisimmillaan ovat maan lämpötilat taas helmikuun lopulla. Ohjearvoina voidaan pitää seuraavia lämpötiloja:

Etelä-Suomi	Korkein 15 °C ja alin 0 °C
Pohjois-Suomi	Korkein 13 °C ja alin -5 °C

Kuormitustaulukoiden perustana oleva maaperän lämpöresistiivisyyttä 1 k m/W voidaan pitää sopivana keskiarvona suomalaisiin olosuhteisiin. Kostealla hiekalla ja savella on pienempi lämpöresistiivisyys (taulukko 30). Sitä vastoin kuivuneella ja huokoisella maalla sekä rakennusjätteitä sisältävällä täytemaalla on tavallisesti suurempi lämpöresistiivisyys.

Kaapelissa kehittyvä häviölämpö saattaa määrättyissä olosuhteissa aiheuttaa ympäröivän maaperän kuivumista ja lämpöresistiivisyyden nousua. lämpötila kohoaa edelleen ja kuivumisen kiihtyessä syntyy labiili tilanne, joka johtaa korkeisiin lämpötiloihin ja kaapelin turmeltumiseen. Tapahtumaketjuun vaikuttavista tekijöistä voidaan mainita kuormitusvaihtelut, kaapelin pinnan lämpötila ja maaperän laatu.

Jos kuormituskäyrä sisältää yhden tai kaksi vuorokautista huippua ja pienen kuorman yöaikaan, on edellä kuvattu tapahtumien kulku tavallisesti epätodennäköinen. Pitkäaikaisella jatkuvalla kuormituksella riski suurenee sitä enemmän mitä korkeampi kaapelin pintalämpötila on. Termisesti labiiliin tilanteeseen johtavan lämpötilan kriittinen arvo riippuu maan laadusta. On tapauksia, jossa kuivuminen on alkanut kaapelin pinnan saavutettua + 40 °C lämpötilan. Yleensä voidaan kaapelin pintalämpötilan kuitenkin nousta arvoon + 50 °C asti. Käytettäessä kaapelin ympärillä ns. termisesti stabiilia täytettä voidaan kuivumisen vaikutuksia lieventää. Tällainen täyte voidaan saada aikaan sekoittamalla eri raekoon omaavia hiekkakokoja keskenään tai lisäämällä hiekkaan pieni määräsementtiä tai sopivasti valittua asvalttia. Juntattaessa täytemateriaali lisäksi mahdollisimman tiiviiksi voidaan kuivallakin täytteellä saada täten aikaan stabiili arvo n. 1 K m/W.

Jos kaapelin pintalämpötilan odotetaan nousevan korkeaksi, on aiheellista tarkistaa täytemaan laatu ja pyrkiä mittaamaan lämpötilat niissä kohdissa, jossa kuivumisen vaara on suurin. Koska pintalämpötilan mittaus on tavallisesti vaikea järjestää, pintalämpötila joudutaan usein arvioimaan kaapelin johdinlämpötilan mittauksen perusteella ottaen huomioon kaapelin sisäinen lämpöresistanssi ja maaperän lämpöresistanssi.

Useimmissa asennuksissa massakyllästettyjen paperieristeisten, PVC- ja PE-eristeisten kaapelien pintalämpötila eivät normaalisti saavuta +50 °C. Sitä vastoin PEX-eristeisten, täyteen kuormitettujen kaapelien pintalämpötila on yli + 50 °C, kuten eräissä tapauksissa myös öljykaapelien pintalämpötila.

Veteen lasketut kaapelit jäähtyvät yleensä niin hyvin, että niitä voidaan kuormittaa noin 1,15 kertaa suuremmalla virralla, kun maahan asennettuja kaapeleita. Pohjaa peittävät kerrokset, joihin kaapelit vajoavat, ovat tavallisesti termisesti stabiileita. On kuitenkin löydetty pohjakerroksia, joiden lämpöresistiivisyys on suuri. Tällaisesta on esimerkkinä orgaaninen, mm. kasvijätteistä muodostunut muta. Tästä syystä on myös vesistöihin laskettujen kaapelien pintalämpötiloihin kiinnitettävä huomiota.”

4. Lyhyesti kuormituksen laskenta menetelmistä ja korjauskertoimista

Tietenkin paras tapa olisi aina laskea kulloisenkin tapauksen kuormitusarvot erikseen esimerkiksi IEC standardin IEC 60287 mukaan. Näin tulee myös tehdä, mikäli mitoitusaulukkojen käyttö ei ole mahdollista ko. tapauksen mitoitukseen. Esimerkkinä mainittakoon asennus kaukolämpöputkiston lähelle. Laskenta on monimutkainen ja edellyttää kaapelin rakenteen ja maan laadun, asennustavan ym. tarkkaa tuntemusta.

IEC 60287 kohdan 1.4.1.1 mukainen peruskaava:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5}$$

jossa:

I on suurin sallittu kuormitusvirta A

$\Delta\theta$ on johtimen suurin sallittu lämpenemä K

R on johtimen vaihtovirtaresistanssi, maksimi käyttölämpötilassa Ω/m

W_d on dielektriset häviöt W/m

T_1 on johtimen ja metallivaipan välinen lämpöresistanssi K m/W

T_2 on metallivaipan ja armeerauksien välinen lämpöresistanssi K m/W

T_3 on armeerauksien ja kaapelin pinnan välinen lämpöresistanssi K m/W

T_4 on kaapelin pinnan ja ympäristön välinen lämpöresistanssi K m/W

n on kaapelin kuormitettujen johtimien lukumäärä

λ_1 on metallivaipan häviöiden suhde johdinhäviöihin

λ_2 on armeerauksien häviöiden suhde johdinhäviöihin

Kaapelille joka on alttiina suoralle auringon paisteelle, käytetään omaa kaava ja jokaiselle osatekijälle on omat erilliset laskentakaavat ja menetelmät.

Kuormitusvirta- ja korjauskerrointaulukot muodostavat mitoitusjärjestelmän jossa on laadinnan yhteydessä tehty harkittuja kompromisseja ja/tai yksinkertaistuksia. Korjauskerroin saadaan, kun laskenta tehdään erikseen molemmille tapauksille. **Kuten jo kohdassa 1 todettiin, on tärkeää, että sallittu kuormitusvirta ja korjauskertoimet otetaan saman mitoitusjärjestelmän taulukoista.**

5. Esimerkki välijännitekaapeli maassa mitoituksesta



Esimerkkiin liittyvät verkkotiedot:

LÄHTÖTIEDOT		Oletusarvot	
Välijänniteverkko	20,5 kV		x
Maks. 3-vaihe oikosulkuvirta	kA 10		355 MVA
Min. 3-vaihe oikosulkuvirta	kA 5		178 MVA
3-vaihemuuntaja 1	kVA 1600		$I_n = 45,1 \text{ A}$
Toisiojännite	410 V		$U = 20,5 \text{ kV}$
Oikosulkuimped. uk (Zk)	% 5,5		x
Kuormitushäviöt Pk	kW 14,1	Dyn 11	$I_n = 2253 \text{ A}$

Kaapeli on tyyppiä AHXAMK-W 20 kV. (ns. W-kaapeli)

Väljännitekaapelin mitoitukseen vaikuttaa:

1. Verkon sysäysoikosulkuvirta - kaapelin dynaaminen oikosulkukestoisuus
2. Verkon maksimi oikosulkuvirta ja laukaisuaika – kaapelin terminen oikosulkukestoisuus
3. Kaapelin kuormitusvirta – sallittu lämpötila

Tavallisesti väljänniteverkon maksimi oikosulkuvirta (esimerkissä 10 kA) ja sysäysoikosulkuvirta tunnetaan. Kaapelin oikosulkukestoisuudet ja sallittu I_z saa valmistajan luetteloista. Esimerkissä on käytetty PRYSMIAN esitettä Energiakaapelit 2009. SFS 6000 I_z arvot koskevat 0,6/1,0 kV kaapeleita.

Jos vain maksimi oikosulkuvirta tunnetaan, voidaan dynaaminen oikosulkuvirta (i_p) laskea kaavalla:

$$i_p = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I_k^* \quad \text{jossa} \quad \chi = 1,02 + 0,98^{-3R/X}$$

Laskentasääntöjen mukaan R/X suhteena käytetään arvoa 0,1 jos oikeata arvoa ei tunneta. Näin saatu tulos on varmanpuolella. $i_p = 1,74 \cdot \sqrt{2} \cdot 10 \text{ kA} = 24,6 \text{ kA}$

Maan paino estää kaapelia purkautumasta maassa. Mutta kun siirrytään maanpinnalle, on huolehdittava, että kaapeli on sidottu purkautumisen estämiseksi. Yllä laskettu sysäysoikosulkuarvon sidosväli on suuruusluokkaa 1,5 m. 10 kV oikosulkuvirrat ovat huomattavasti suuremmat jolloin sidosväli myös lyhenee. Sidontaan voidaan käyttää narua, Tespa-pantaa tai tarkoitukseen valmistettua teippiä. Neuvottele asiasta tarvittaessa kaapelivalmistajan kanssa tai asennusliikkeen kanssa.

Usein kaapelin terminen oikosulkukestoisuus mitoitetaan niin, että se vioittumatta sallii myös laukaisun siirtymisen toiselle portaalle. Eli $2 \cdot 0,4 \text{ s} = 0,8 \text{ s}$. Esimerkin oikosulkuvirta on 10 kA.

Valmistajan luettelon (Prysmian, Energiakaapelit 2009) mukaan:

AHXAMK-WM 20 kV 3*95+35 1 sekunnin oikosulkuvirtakestoisuus on 8,9 kA

AHXAMK-WM 20 kV 3*120+35 1 sekunnin oikosulkuvirtakestoisuus on 11,3 kA

Oikosulkukestoisuus voidaan muuntaa toiseen aikaan neliöjuurikaavalla:

$$I = (\sqrt{1/0,8}) \cdot 8,9 \text{ kA} = 9,95 \text{ kA}$$

Mitoituksessa on hyvä myös huomioida (arvioida) oikosulkuvirran kasvu tulevaisuudessa.

Kuormitettavuus maassa 65 °C johdinlämpötilalla on 95 mm² al-kaapelilla = 235 A ja 120 mm² = 265 A (valmistajan luettelo). Arvot on ilmoitettu maan lämpötilalle 15 °C, asennussyvyydelle 0,7 m ja maan lämpöresistiivisyydelle 1,0 Km/W.

Kuormitusvirta on 45,1 A (katso kuva yllä). Lyhytaikainen virtakestoisuus ”ylimitoittaa” kaapelin kuormitusvirtaan nähden, joten ongelmia kaapelin lämpötilan kanssa ei ole.

Mitoitetaan I_z kirjan Kabel und... mukaan: (kirjassa on erikseen I_z arvot 12/20 kV kaapeleille).

Wiski-kaapeli on Euroopassa harvinainen rakenne. En löytänyt käytettävissä olevasta kirjallisuudesta vastaavaa kaapelityyppiä, joten käytämme kolmioon asennettuja yksijohdinkaapelien arvoja.

120 mm² alumiini, 12/20 kV, VPE (PEX) eristeisen yksijohdinkaapelin I_z arvo kolmioon asennettuna maahan on 285 A, johdinlämpötilalla 90 °C ja asennussyvyydessä 0,7 m.

Korjauskertoimet:

Maan lämpötila 15 °C, maan lämpöresistiivisyys 1,0 K.m/W, ja johd. lämpötila 65 °C; $f_1 = 0,94$ ja $f_2 = 0,87$

$$I_z = 285 \cdot 0,94 \cdot 0,87 = 233 \text{ A}$$

Mitoitetaan I_z myös Nokian kirjan mukaan: (kirjassa on erikseen I_z arvot 12/20 kV kaapeleille).

Valitaan sama kaapeli, kun yllä eli yksijohdin kaapeli 120 mm² alumiini, 12/20 kV, PEX.

Taulukko 22 = 270 A, asennussyvyys 0,7 m = 1, maan lämpöresistiivisyys 1,0 = 1, Maan lämpötila 15 °C = 1 ja johtimen lämpötila 65 °C = 0,816. $I_z = 270 \cdot 0,816 = 220 \text{ A}$

Vanhin käytettävissäni oleva lähde on "Ingenjörshandboken" osa 3 vuodelta 1949. Esimerkin kaapelin sallittu Iz arvo olisi tämän lähteen mukaan **220 A**.

Paavolan "Sähköjohtojen laskeminen" vuodelta 1953, sivun 213 taulukko 13 mukaan olisi Iz arvoksi saatu **285 A**.

Kirjasta löytyy myös muutama korjauskertoimen eri asennustavoille.

Sivulla 208 on mielenkiintoinen kappale, suora sitaatti:










"Johtimien lämpenemiseen määrääminen laskemalla suoritetaan käytännössä vain oikosulkuvirran lämpövaikutuksen ollessa kysymyksessä. Kuormitusvirran lämpövaikutuksen määrääminen laskemalla ei sen sijaan ole tapana, koska laskelmat voidaan suorittaa vain hyvin epätarkasti. Laskelmien sijasta käytetään kokeitten perusteella laadittuja, valmiita kuormitustaulukoita."

Sähkötarkastuskeskuksen kirjassa A2 vuodelta 1994 (liite 1) löytyy taulukko 52-C2, jossa D sarakkeessa (maa asennus) on arvo 330 A, johtimen lämpötilalle 90 °C. Muunto 90-65 °C, niin $325 * 0,816 = 265 A$, eli sama kun luetteloarvo (asennusolosuhteet kuten esimerkissä).

ABB:n TTT kirjasta (2000) sivulta 512 löytyy taulukko 19.1j, jossa Iz arvona on **265 A** (asennusolosuhteet kuten esimerkissä. Korjauskertoimet Nokia kirjan mukaiset.)

PRYSMIAN esiteessä (Energiakaapelit) 2009 esitetty Iz arvo on siis todennäköisesti kotoisin kahdesta edellisestä lähteistä.

Alla vielä vertailutaulukko jossa on käytetty lähdettä "Kabel und Leitungen" kirjan osaa 2.

Asennus suoraan maahan: maan lämpötila 20 °C, maan lämpöresistanssi 1 K.m / W, kuormitusaste 70 %								
NAYY	NAYY	NAYCWY	NA2XY	NA2XS2Y	NA2XY	NA2XS2Y	NA2XS2Y	NA2XS2Y
0,6 /1,0 kV	0,6 /1,0 kV	0,6 /1,0 kV	0,6 /1,0 kV	6/10 kV	0,6 /1,0 kV	6/10 kV	12/20 kV	18/30 kV
120 Al / RM	120 Al / SE	120 Al / SE	120 Al / SE	120 Al / SE	120 Al / RM	120 Al / RM	120 Al / RM	120 Al / RM
	+120 Al	+120 Al	+120 Al	+16 Cu		+16 Cu	+16 Cu	+16 Cu
PVC	PVC	PVC	VPE	VPE	VPE	VPE	VPE	VPE
70 °C	70 °C	70 °C	90 °C	90 °C	90 °C	90 °C	90 °C	90 °C
								
	Sektori	Konc.johd	Sektori	Konc.johd		Konc.johd	Konc.johd	Konc.johd
251 A	240 A	240 A	266 A	274 A	271 A	283 A	285 A	289 A
Huom. Iz arvoihin tulee käyttää mitoitusmenetelmän mukaisia korjauskertoimia f1 ja f2								
Suomalaiset olosuhteet f1*f2=0,94*0,87=0,818					222 A	231 A	234 A	236 A

Taulukosta voi päätellä, että nimellisjännitteellä on suhteellisen pieni vaikutus sallittuihin kuormitusvirtoihin. Yllä ei ole armeerattuja kaapeleita. Armeeraukset lisäävät kaapelin häviöitä ja pienentävät näin ollen sallittuja kuormitusvirtoja.

Todennäköisesti historia on mennyt niin, että ensin on käytetty kokeiden perusteella laadittuja (VDE:n mukaisia) kuormitustaulukoita. Olosuhteiden muuttaminen kokeissa on varmasti ollut haastavaa. Kun laskentamenetelmät ovat kehittyneet voitiin ottaa mukaan myös korjauskertoimet eri asennusolosuhteille ja kaapelityypeille. IEC standardien viimeiset korjaukset ovat vuodelta 2009. "Vanhat taulukot" on jäänyt kirjallisuuteen, joten näistä saatuja Iz arvoja esiintyy erilaisissa yhteyksissä.