

Belastbaarheid van kabels

06-079 pmo

12 mei 2006

© Phase to Phase BV, Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens Phase to Phase BV is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

Phase to Phase BV is niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

INHOUD

1	Inleiding	4
2	Model van de kabel	5
2.1	Constructie van de kabels.....	5
2.2	Verliezen in de kabel	7
2.3	Thermische weerstanden.....	8
2.4	Rekentechnisch model.....	9
2.5	Temperatuurverloop	11
3	Berekening stationaire stroombelasting	11
3.1	Kabeltypen.....	12
3.2	Aansluiting aardschermen.....	12
3.3	Omgevingsfactoren	13
3.4	Gronduitdroging	14
3.5	Installatie vrij in de lucht	15
3.6	Installatie ondergronds.....	16
3.7	Rekenvoorbeelden	17
4	Dynamische kabelbelastbaarheid.....	19
4.1	Methode	19
4.2	Berekening transiënte temperatuurrespons	20
4.3	Berekening maximale stapbelasting.....	21
4.4	Berekening cyclische stroombelasting.....	22
5	Conclusies	25

1 INLEIDING

De methode voor berekening van de kabels in stationaire toestand is gebaseerd op de internationaal erkende norm IEC 60287. De norm beschrijft de berekening van de verliezen in de kabel en de thermische weerstanden van de kabel en de omgeving.

Hiernaast bestaat de norm IEC 60853 voor berekening van de dynamische kabelbelastbaarheid van de kabel. In het geval van een dagelijks wisselende belasting zal de maximale temperatuur van de kabel lager zijn dan de temperatuur die hoort bij een stationair vloeiende stroom ter grootte van het maximum van de dagcyclus. Met die wetenschap is het mogelijk om de kabel tijdelijk meer dan nominaal te belasten.

Kabelfabrikanten geven de belastbaarheid van kabels op voor specifieke omstandigheden en voor kabels in stationaire toestand. Voor afwijkingen van temperaturen en liggingsomstandigheden zijn correctiefactoren voor de nominale waarden geïntroduceerd. Een andere manier is het doen van een belastbaarheidsberekening voor de kabel en de afwijkende liggingsomstandigheden.

Vision *Cable* is een computerprogramma voor het berekenen van de belastbaarheid van kabels. Het programma berekent de stationaire stroombelastbaarheid volgens IEC 60287 en de cyclische belastbaarheid en emergency load belastbaarheid volgens IEC 60853. Een kabeltype editor is toegevoegd om de constructiegegevens van de kabel in te voeren.

2 MODEL VAN DE KABEL

De norm voorziet in berekening van alle mogelijke kabeltypen: kunststof, oliedruk, massa en pipe-type kabels. In de norm worden één-, twee- en driedrige kabels behandeld. In *Vision Cable* zijn de tweedelige kabels niet geïmplementeerd. Volgens de norm worden vieraderige laagspanningskabels op de zelfde wijze als driedrige kabels berekend.

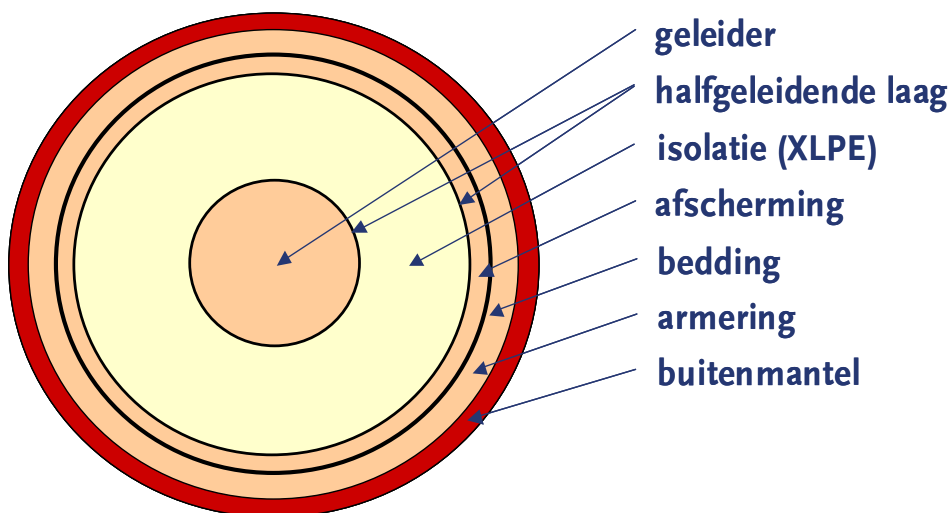
In het model van de kabel is aandacht aan de volgende items:

- Constructie kabels
- Verliezen
- Thermische weerstanden
- Rekentechnisch model
- Temperatuurverloop voor een kabel

2.1 Constructie van de kabels

De constructie beschrijft de opbouw van laag tot laag. Elke kabel wordt geconstrueerd rondom een geleider, isolatie, afscherming, bewapening en buitenmantel. De meeraderige kabel is opgebouwd door het samenslaan van meerdere aders. De constructie van enkele veelvoorkomende één- en driedrige kabels wordt hier toegelicht.

Enkeladerige XLPE kabel



De opbouw van een enkeladerige kunststof kabel is als volgt:

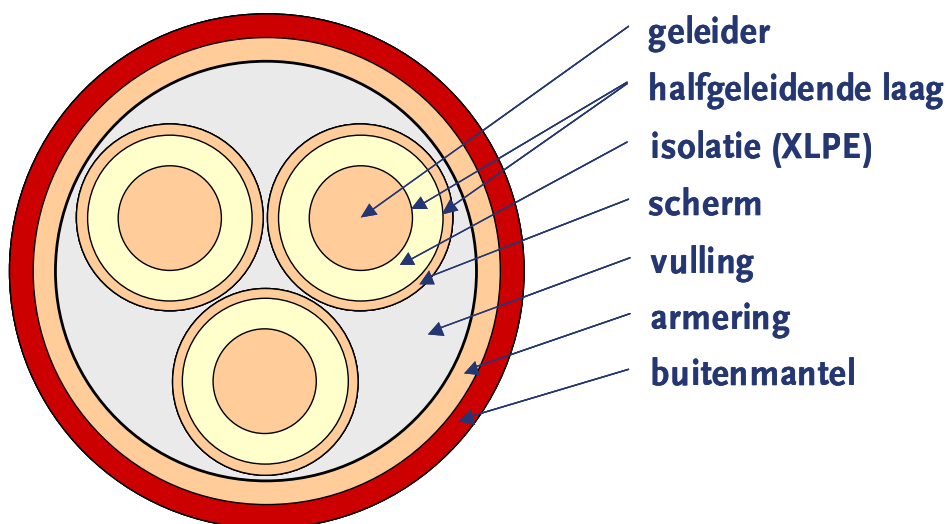
- Geleider van koper of aluminium.
- Geleiderscherm. Er kunnen zich oneffenheden voordoen in de geleideromtrek, waardoor het elektrische veld zich niet netjes rond de geleider verdeelt. Dit kan kleine ontladingen veroorzaken, waardoor de kabel snel verouderd. Om die oneffenheden op te heffen wordt een halfgeleidende laag om de geleider aangebracht, zodat het veld zich in de isolatie homogeen zal verdelen.

- Isolatiemateriaal van XLPE.
- Isolatiescherm. Er kunnen zich eveneens oneffenheden voordoen in het binnenoppervlak van de afscherming, zodat ook tussen de afscherming en de isolatie een halfgeleidende laag is aangebracht.
- Afscherming. Deze sluit het elektrische veld binnen de kabel op en zorgt ervoor dat geen spanningen in de geleider kunnen worden geïnduceerd ten gevolge van naburige kabels. Bovendien heeft het koper scherm ook nog een tweede doel, namelijk voorkomen dat bij aanraking van een onder spanning staande kabel de mantel capacitieve stromen kunnen lopen.
- Optioneel: armering. Tussen de afscherming en de armering bevindt zich dan de bedding. De bedding geeft een scheiding tussen de afscherming en de armering. De armering zorgt voor stevigheid van de kabel en beschermt de kabel tegen mechanische invloeden.
- De buitenmantel beschermt de kabel tenslotte tegen invloeden van buitenaf, zoals vocht.

Alle kabels met een isolatie anders dan van papier zijn leverbaar met een loodmantel ten behoeve van de waterdichtheid en het voorkomen van het mogelijk binnen dringen van bijvoorbeeld aromatische koolwaterstoffen die de isolatie kunnen aan tasten. Bij papier geïsoleerde kabels is de loodmantel noodzakelijk om de impregneermassa of de olie binnen te houden.

Normaal heeft een enkeladerige HV of EHV kabel nooit een stalen wapening.

Driederige XLPE kabel



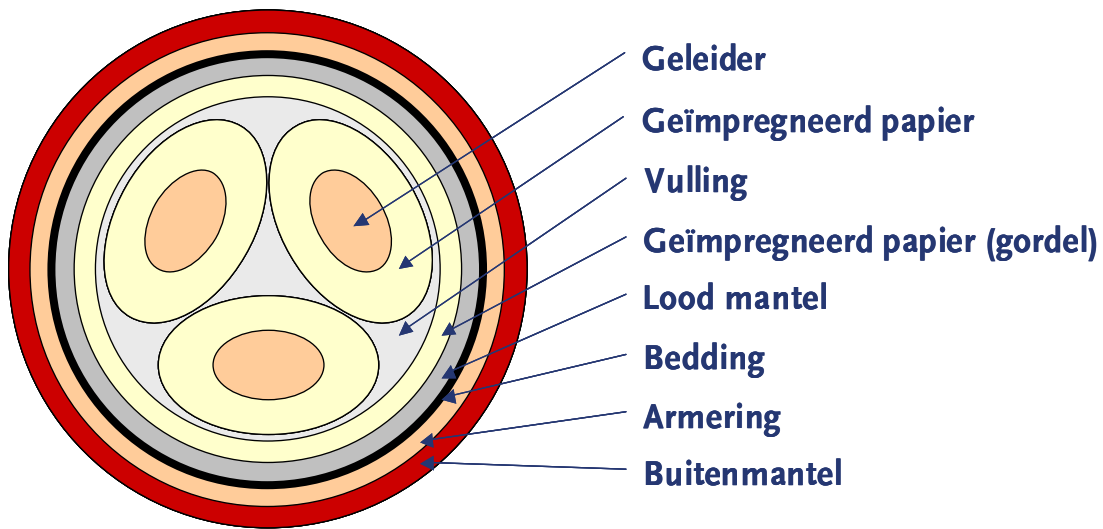
De driederige XLPE kabel heeft in principe eenzelfde opbouw als de enkeladerige. De kabel bevat drie kernen. Elke kern heeft een eigen geleider, isolatie en scherm. Deze drie kernen liggen in een vulling met daar omheen meestal een koperdraadscherm en de buitenmantel.

De aders kunnen rond, sectorvormig en afgeplat sectorvormig (bij de gordelkabel) zijn. Laagspanningskabels hebben vaak een sectorvormige geleider. Kabels met sectorvormige aders hebben een kleinere buiten diameter, hetgeen materiaal bespaart.

Er bestaan uitvoeringen van drieadrige kabels met één gemeenschappelijk scherm.

Een stalen wapening, (staalband en of staaldraad), met uitzondering van zeer speciale gevallen om de toegestane trekkracht van de kabel te vergroten zoals bijvoorbeeld voor onderwater kabels, dient alleen om een beperkte, mechanische bescherming, bijvoorbeeld graven met de hand, te bieden.

Drieadrige gordelkabel



De gordelkabel heeft een afwijkende opbouw ten opzichte van de drieadrige kunststofkabel. De ovale of sectorvormige geleiders zijn omgeven door een isolatie van geïmpregneerd papier. Deze drie geïsoleerde kernen zijn omgeven door een gezamenlijke gordelisolatie van geïmpregneerd papier. Om de gordel bevindt zich een gemeenschappelijke afscherming van lood. De GPLK kabels zijn meestal niet gearmeerd.

2.2 Verliezen in de kabel

In de kabel treedt een aantal verliezen op. Zo zijn er:

Ohmse verliezen in de geleider

De Ohmse verliezen ten gevolge van de weerstand van geleider zijn gelijk aan I^2R . De weerstand is afhankelijk van het materiaal en de geleiderdikte.

Diëlektrische verliezen in de isolatie

In het isolatie materiaal treden diëlektrische verliezen op. Deze verliezen zijn afhankelijk van het isolatiemateriaal en de bedrijfsspanning. De diëlektrische verliezen zijn zeer klein ten opzichte van de verliezen in de ader en het scherm en kunnen daarom in LS- en MS-kabels worden verwaarloosd.

Ohmse verliezen in de afscherming

In de afscherming en in de armering treden Ohmse verliezen op ten gevolge van wervelstromen en eventuele vereffeningstromen.

Wervelstromen zijn zeer kleine plaatselijk stroompjes en vereffeningstromen zijn het gevolg van geïnduceerde spanningen. De grootte van de vereffeningstromen is afhankelijk van de manier waarop de afscherming met elkaar verbonden is en geaard is.

Ohmse verliezen in de armering

De Ohmse verliezen in de armering bestaan overwegend uit wervelstroomverliezen, maar ook verliezen ten gevolge van vereffeningstromen. De Ohmse verliezen in de bewapening kunnen vaak worden verwaarloost. Uitzonderingen daargelaten, zijn driefase circuits meestal in balans.

2.3 Thermische weerstanden

De geleider, de mantel en de armering zijn van een metaalsoort waardoor ze een te verwaarlozen thermische weerstand hebben. Dit geldt niet voor de isolatie, bedding, buitenmantel en het omringende medium. De methode volgens IEC gaat uit van vier thermische weerstanden:

- T1: isolatie tussen geleider en afscherming
- T2: beddingslaag tussen afscherming en armering
- T3: buitenmantel van de kabel
- T4: externe thermische weerstand

T1

Voor de berekening van T1 telt naast de isolatie ook de halfgeleidende laag mee van het geleiderscherm en het aderscherm.

T2

Voor de berekening van T2 tellen de thermische weerstanden mee van de vulling en de beddingslaag tussen afscherming en bewapening. Bij afwezigheid van bewapening is T2 gelijk aan nul.

T3

De buitenmantel van de kabel.

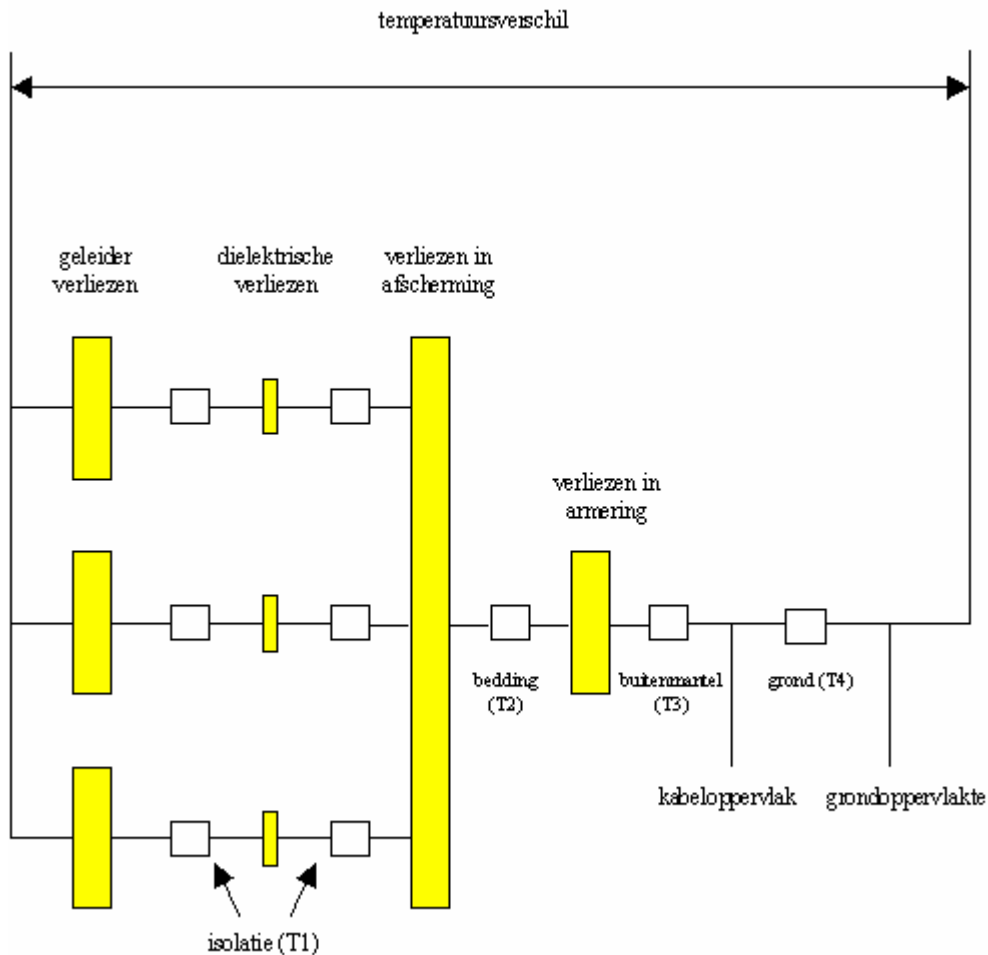
T4

De externe thermische weerstand vertegenwoordigt de warmteafgifte van de kabel naar zijn omgeving.

- Bij een begraven kabel verloopt de warmteafgifte voor het grootste deel door geleiding. Naastgelegen kabels hebben invloed op de temperatuur.
- Bij een bovengrondse kabel verloopt de warmteafgifte door straling en convectie. Naast de luchttemperatuur speelt ook de zoninstraling een grote rol.

2.4 Rekentechnisch model

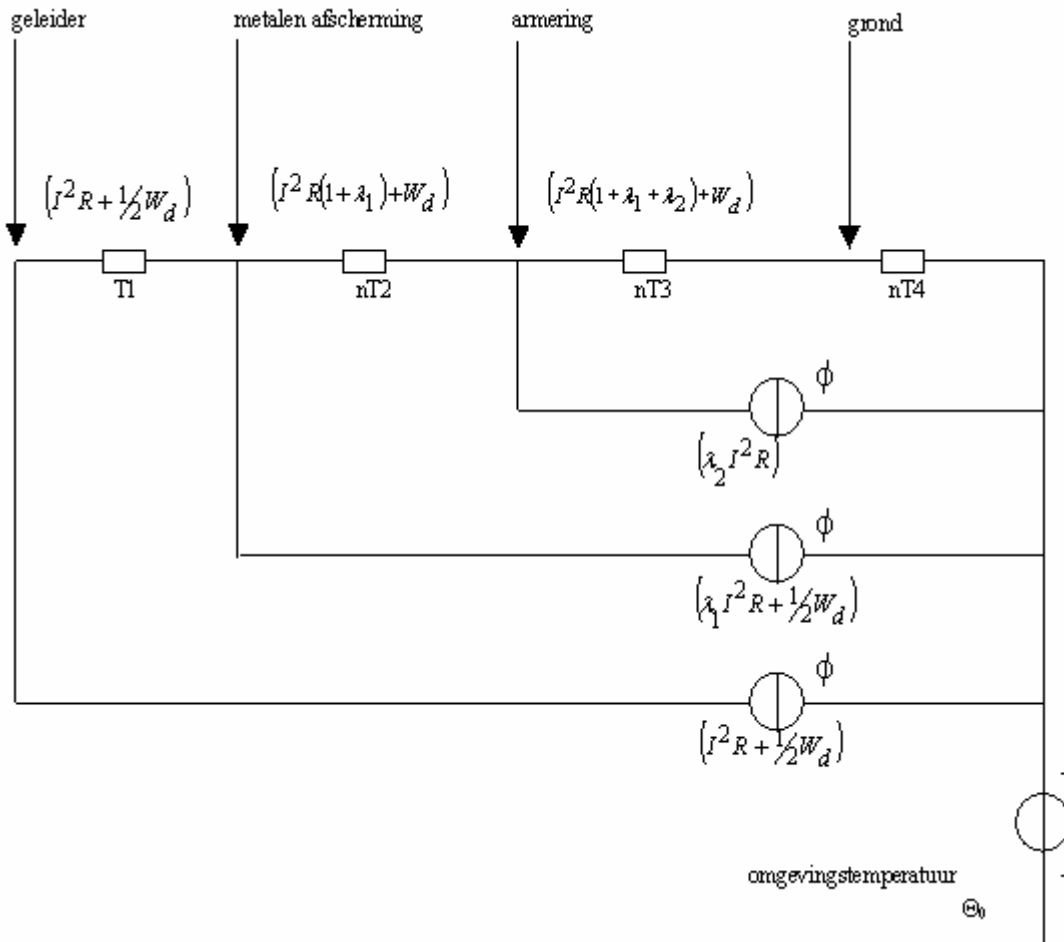
Onderstaand figuur geeft voor een drieadrige kabel aan waar de verliezen ontstaan en door welke thermische weerstanden deze verliesenergie wordt getransporteerd.



Bronnen van verliezen:

- De geleider is een warmtebron ten gevolge van de ohmse verliezen (I^2R). De geleiderverliezen worden door de isolatie, de bedding, de buitenmantel en de omgeving afgevoerd.
- De geleider en de afscherming vormen een capaciteit. In de isolatie treden daarom capacitieve verliezen op. Door integratie van het isolatieoppervlak vanaf de geleider naar het scherm wordt het diëlektrische verlies in de isolatie gemiddeld ($\frac{1}{2} W_d$). De diëlektrische verliezen worden door de isolatie, de bedding, de buitenmantel en de omgeving afgevoerd.
- Door invloed van naburige geleiders wordt er een spanning geïnduceerd in de afscherming van de kabel. Ten gevolge van deze spanning gaat er een stroom vloeien in de afscherming, deze stroom zorgt op zijn beurt weer voor verliezen in het scherm. De schermverliezen worden door de bedding, de buitenmantel en de omgeving afgevoerd.
- Evenzo ontstaan er verliezen in de armering. De armeringsverliezen worden door de buitenmantel en de omgeving afgevoerd.

De berekening van de temperatuur in een kabel verloopt via een elektrotechnisch analogo model.



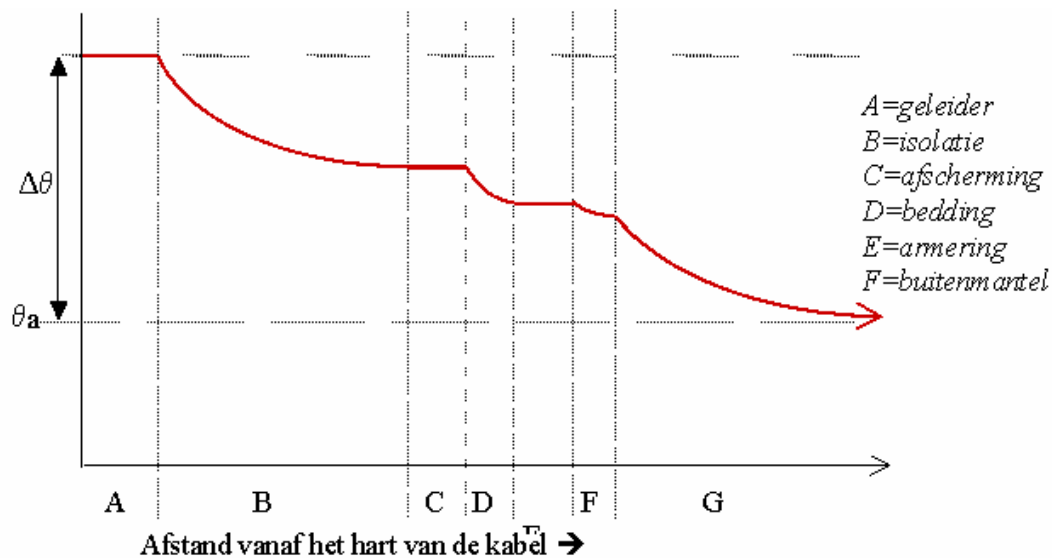
Het elektrotechnisch analogon is gebaseerd op warmtestroom, thermische weerstand en temperaturen:

- In bovenstaand model is de warmtestroom vanuit de geleider gelijk aan de $I^2 R$ verliezen plus de helft van de diëlektrische verliezen.
- De verliezen in de afscherming zijn uitgedrukt als een factor λ_1 maal het geleiderverlies $I^2 R$. Deze warmtestroom, plus de warmtestroom van het geleiderverlies en het diëlektrische verlies, gaat door de thermische weerstand van de beddingslaag (T_2). De variabele n staat voor het aantal aders (1 of 3).
- De verliezen in de armoring zijn uitgedrukt als een factor λ_2 maal het geleiderverlies $I^2 R$. Deze warmtestroom, plus de warmtestroom van het geleiderverlies, het diëlektrische verlies en het schermverlies, gaat door de thermische weerstand van de buitenmantel (T_3) en de omgeving (T_4). De variabele n staat voor het aantal aders (1 of 3).
- De omgevingstemperatuur is vertegenwoordigd door een analoge spanningsbron.

Elektriciteitsleer		Warmteleer	
Spanning U	[V]	Temperatuurverschil $\Delta\theta$	[K]
Stroom I	[A]	Warmtestroom ϕ	[W/m]
Weerstand R	[Ohm]	Thermische weerstand T	[Km/W]

2.5 Temperatuurverloop

Het temperatuurverloop in de kabel van geleider tot omgeving is weergegeven in onderstaande figuur. In deze figuur is ook te zien dat de temperatuur in de geleider, de mantel en de armering constant blijft. De afstanden zijn niet in verhouding met de reële waarden voor de diktes van de diverse lagen. Het figuur is afgebeeld om een globale indruk te krijgen van het temperatuurverloop.



3 BEREKENING STATIONAIRE STROOMBELASTING

De stationaire kabelbelastbaarheid is de maximale stroomwaarde (continu vloeiende stroom), waarbij de temperatuur van de geleider gelijk is aan de voor de betreffende kabel geldende maximale waarde, zodanig dat de kabel niet beschadigt.

De stationaire kabelbelastbaarheid is van een groot aantal factoren afhankelijk. Door hier goed mee om te gaan, kan al een aanzienlijke winst worden behaald.

Uitgangspunt is de constructie van de kabel. De gegevens hiervan kunnen grotendeels aan de brochures van de fabrikant worden ontleend. Verder is de wijze waarop de aardschermen met elkaar verbonden zijn van grote invloed; met name bij ligging van éénaderige kabels in een plat vlak. Ook de wijze van ligging (diepte, onderlinge afstand kabels) of installatie (vrij of tegen een wand) is van groot belang. Tenslotte moet rekening gehouden worden met de omgevingscondities (gronduitdroging, zoninstraling).

Voor de berekening van de stationaire stroombelasting zijn van belang:

- Kabeltypen
- Aansluiting aardschermen
- Omgevingsfactoren
- Installatie ondergronds
- Installatie vrij in de lucht

3.1 Kabeltypen

In *Vision Cable* kunnen enkeladerige en drieadrige kabels berekend worden. De constructiegegevens kunnen met de kabeltype editor bewerkt worden. Onderstaande veelgebruikte typen kunnen gemodelleerd worden.

Enkeladerige kabels:

- kunststof (XLPE)
- oliedruk

Drieadrige kabels:

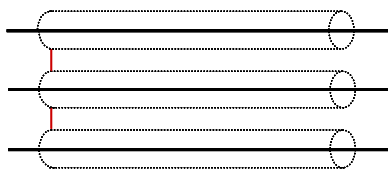
- kunststof (XLPE)
- gordelkabel (GPLK)
- oliedruk

De norm voorziet in berekening van alle mogelijke kabeltypen: kunststof, oliedruk, massa en pipe-type kabels. In de norm worden één-, twee- en drieadrige kabels behandeld. In het te ontwikkelen computerprogramma zijn de tweeadrige kabels niet geïmplementeerd. Volgens de norm worden vieraderige laagspanningskabels op de zelfde wijze als drieadrige kabels berekend.

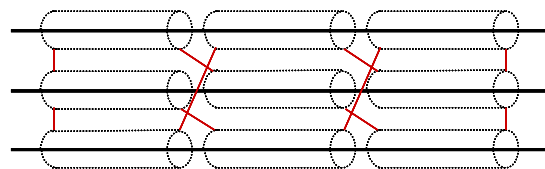
3.2 Aansluiting aardschermen

Door de stromen door de aders worden in de afschermingen van de drie kabels spanningen geïnduceerd. Door deze spanningen kunnen in de afschermingen vereffeningstromen gaan lopen, afhankelijk van de wijze waarop deze afschermingen met elkaar zijn verbonden. Onderstaande configuraties zijn mogelijk:

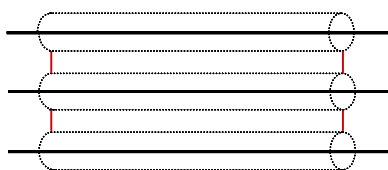
Aansluiting aardschermen



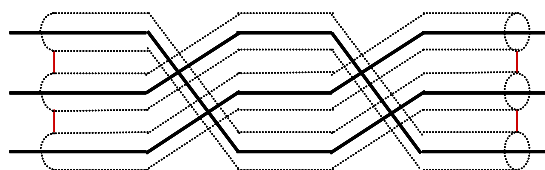
aan één kant



kruislinks verbonden



aan beide kanten



verwisseling van kabelpositie

Aan één kant:

Bij het verbinden van de afschermingen aan één kant zullen geen vereffeningstromen lopen, omdat er geen gesloten circuit is tussen de afschermingen. Het nadeel is dat er aan de andere kant van de kabel grote potentiaalverschillen kunnen ontstaan tussen de afschermingen.

Aan beide kanten:

Een potentiaalverschil wordt vermeden door de afschermingen aan beide kanten met elkaar te verbinden. Er ontstaat dan een gesloten circuit tussen de afschermingen waardoor vereffeningstromen gaan vloeien. De hierbij optredende verliezen zijn (door de inductie) voor de drie kabels van een circuit niet gelijk. De grootste verliezen zullen optreden in één van de buitenste kabels.

Kruislinks (cross-bonding):

Om de vereffeningstromen op te heffen kan ervoor gekozen worden om de elektrische sectie in drie gelijke stukken op te delen. Na elk deel worden de afschermingen kruislinks met elkaar verbonden. Dit leidt ertoe dat de potentialen aan het begin en aan het eind van de sectie gelijk zijn en waardoor dus ook geen vereffeningstromen vloeien.

Kabels worden geleverd met een bepaalde (soms de maximale productie-)lengte. Een langere verbinding kan dus alleen met meerdere lengtes worden gemaakt. Als bij de bestelling, in overleg met de fabrikant, de juiste lengtes worden geleverd is "Cross bonding" eenvoudig toe te passen.

Verwisseling van kabelpositie (transpositie):

Een andere manier om de vereffeningstromen te reduceren is door de elektrische sectie op te delen in drie gelijke delen en na elk deel de kabels onderling van positie te verwisselen. Deze methode wordt in de praktijk niet vaak toegepast.

3.3 Omgevingsfactoren

De omgevingstemperatuur bepaalt voor een groot gedeelte de belastbaarheid van de kabel. Voor bovengronds geïnstalleerde kabels is dat de temperatuur van de lucht in het geval dat er geen stroom door de kabel zou vloeien. Voor ondergronds begraven kabels is dat de temperatuur van de grond in het geval dat er geen kabel of andere warmtebron zou liggen. In het geval van andere kabelcircuits (parallele verbindingen) of warmtebronnen (stadsverwarming), moeten die in het model worden opgenomen.

Installatie bovengronds:

- Kabels beschermd tegen zoninstraling
- Kabels blootgesteld aan zoninstraling

Installatie ondergronds:

- Zonder uitdrogen van de grond
- Gedeeltelijk uitdrogen van de grond
- Uitdrogen moet vermeden worden

Bovengronds

Bij berekeningen met betrekking tot kabels in de open lucht kunnen de kabels blootgesteld zijn aan zonnestraling of kunnen zij daartegen beschermd zijn. Wanneer de kabels blootgesteld zijn aan

zonnestraling wordt de warmteontwikkeling in de kabels beïnvloed. Door de zonnestraling wordt het kabeloppervlak namelijk extra opgewarmd.

De kabels kunnen beschermd worden tegen zoninstraling met behulp van een speciale constructie of door ze te installeren in een afgesloten bak. De norm voorziet in de berekeningsmethode daarvoor. De meeste ontwerpers proberen kabels in een gesloten goot te vermijden vanwege de benodigde koeling. In warme gebieden, bijvoorbeeld in de tropen, worden de kabels nooit in een geheel gesloten bak geïnstalleerd. Er wordt altijd voor optimale ventilatie gezorgd, bijvoorbeeld montage in een geperforeerde bak met verhoogd afschermend deksel zodat lucht langs de kabels kan stromen.

Ondergronds

Doordat er verliezen optreden in de kabel wordt de kabel opgewarmd. Indien een kabel zwaar belast wordt, bestaat het gevaar dat de grond door de grote warmteontwikkeling uitdroogt, zodat de warmte geleidende eigenschappen veranderen. Uitgedroogde grond heeft namelijk als eigenschap dat de thermische weerstand hoger is dan van vochtige grond. De droge grond is veel korreliger zodat er meer stilstaande lucht in zit en stilstaande lucht is een goede warmte-isolator. Voor de berekening van de belastbaarheid van een begraven kabel wordt daarom onderscheid gemaakt tussen onderstaande drie situaties:

- 1) de grond droogt niet uit,
- 2) het moet vermeden worden dat de grond uitdroogt,
- 3) de grond droogt gedeeltelijk uit.

Zonder uitdrogen:

Indien we kunnen aannemen dat de grond onder alle omstandigheden niet uitdroogt, kan de kabel zwaar belast worden. Er kan in dit geval een gewone berekening gemaakt worden voor de maximale stroomsterkte.

Gedeeltelijk uitdrogen:

Bij het berekenen van de kabelbelastbaarheid bij gedeeltelijke gronduitdroging wordt uitgegaan van een simpel fysisch benaderd model van de grond. Er is een zone rondom de kabel of het circuit waar de grond uitgedroogd is en een zone daarbuiten die niet uitgedroogd is. De grens wordt aangegeven met een isotherm.

Uitdrogen vermijden:

Wanneer dit voorkomen moet worden, moet de temperatuursverhoging van het kabeloppervlak gelimiteerd worden, doorgaans tot 45 graden Celsius.

3.4 Gronduitdroging

Het doel van het installeren van een kabel is: zoveel mogelijk energie transporteren gedurende een zeer lange tijd.

In de loop van de jaren is de aderisolatie van een normale distributiekabel (LS en MS) van papier via PVC in XLPE veranderd. De maximum continue adertemperatuur kon, zonder dat de kwaliteit van de isolatie werd aangetast, door deze ontwikkelingen in kabeltypen historisch gezien omhoog gaan van oorspronkelijk 43°C, via 60°C voor papier naar 70°C voor PVC en tenslotte naar 90°C voor XLPE.

Deze maximum adertemperatuur mag voor alle installatiemethoden (in combinatie met andere warmtebronnen) en omgevingscondities niet worden overschreden. De diverse correctie factoren, die de maximaal toelaatbare stroom door een kabel voor een gegeven installatiemethode beïnvloeden, zijn door de fabrikant opgegeven. Dit zijn factoren die de onbelaste adertemperatuur bepalen en die de warmteafvoer van de kabel begrenzen.

Voor ondergrondse kabel is de meeste moeilijk te bepalen correctiefactor altijd de thermische grondweerstand geweest.

Voorbeelden:

- Zeer nat zand waarbij de vochthoeveelheid constant blijft doordat de kabel onder het minimum grondwaterpeil is geïnstalleerd heeft een thermische specifieke weerstand van: $g = 0.5 \text{ K.m/W}$.
- Zeer natte klei, ook onder het grondwaterpeil, heeft geen blijvende g van 0.5 K.m/W als er een belaste kabel in ligt, die berekend was op deze g . Want door de verwarming van de kabel droogt de schil van klei die om de kabel ligt uit. Helaas is dit een onomkeerbaar proces er vormt zich een thermische isolatielaag om de kabel. Door deze isolatielaag gaat de kabel temperatuur omhoog en wordt de isolatielaag van klei steeds dikker. Het resultaat is dat de kabel steeds minder hoog te belasten is.

Als van tevoren bekend is dat het vochtgehalte na de installatie van de kabel afneemt, moet men daar terdege rekening mee houden bij de berekening van de maximale toelaatbare stroom. Als een ondergrondse kabel in droge zand wordt geïnstalleerd, dan moet de thermische specifieke weerstand $g \approx 2.5 - 3 \text{ K.m/W}$ zijn.

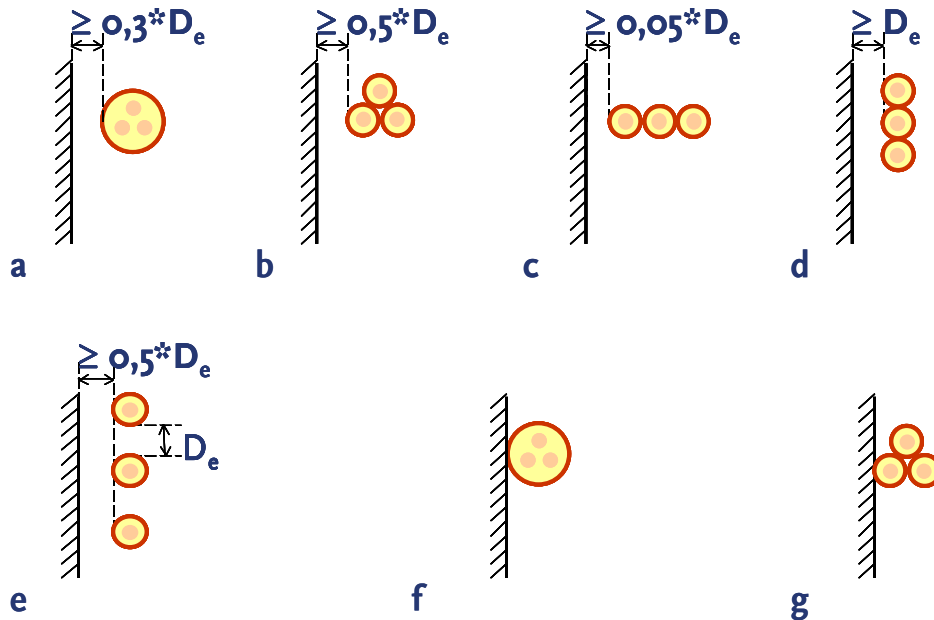
De NPR 3626 is opgesteld omdat de bodem in Nederland vaak afwijkt van de in de IEC 60287-3-1(1999) gerefereerde omstandigheden. In de IEC-norm is voor Nederland een opgave gedaan voor de specifieke thermische weerstand voor in het oosten van het land: $g = 0.8 \text{ K.m/W}$ en voor grond die verzadigd is met water: $g = 0.5 \text{ K.m/W}$. De grondtemperatuur is 15°C . Deze IEC aanbeveling gaat echter niet goed op in de gebieden met rivierklei. De Nederlandse NPR norm gaat daar op in. In de Duitse vakliteratuur bestaat een soortgelijke benadering als de NPR 3626.

Het komt vaak voor dat de IEC 60287 voor een bepaald land een maximum waarde aangeeft voor de specifieke thermische grondweerstand, bijvoorbeeld: $g = 1 \text{ K.m/W}$, terwijl na een uitgebreid onderzoek kan blijken dat de g eigenlijk in de buurt van 2.5 K.m/W zou moeten liggen. Indien daardoor de kabels verbranden en vervangen moeten worden, is de financiële schade aanzienlijk. Duidelijk moge zijn dat alle parameters voor een kabelinstallatie door de verantwoordelijke persoonlijk gecontroleerd moeten worden.

3.5 Installatie vrij in de lucht

De belastbaarheid van de kabels, die bovengronds zijn geïnstalleerd, is afhankelijk van de wijze waarop deze gemonteerd zijn. De kabels kunnen vrij van een muur of tegen een muur aan gemonteerd worden. Onderstaande figuur geeft de mogelijkheden aan die in de norm beschreven zijn. De definitie van vrij of tegen een muur is afhankelijk van de afstand in verhouding tot de buitendiameter van de kabel (D_e). De kabels worden meestal horizontaal gemoneerd.

Installatie vrij in de lucht



Kabels de muur niet rakend:

- a : 3-aderige kabel
- b : drie 1-aderige kabels in driehoek formatie
- c : drie 1-aderige kabels in platte formatie horizontaal
- d : drie 1-aderige elkaar aanrakende kabels in platte formatie verticaal
- e : drie 1-aderige elkaar niet aanrakende kabels in platte formatie verticaal

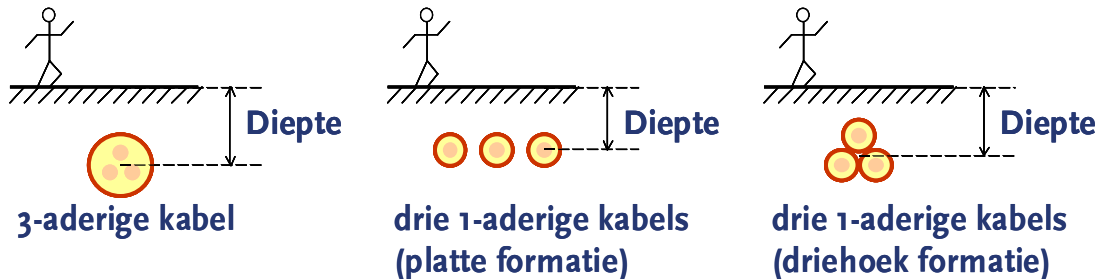
Kabels de muur rakend:

- f : 3-aderige kabel
- g : drie 1-aderige kabels in driehoek formatie

3.6 Installatie ondergronds

Ondergronds zijn zeer veel verschillende installatiemogelijkheden denkbaar. Per circuit kan er sprake zijn van één drieadrige kabel of drie éénaderige kabels. In het geval van éénaderige kabels kunnen deze tegen elkaar en los van elkaar gelegd worden. In het geval van ligging in een plat vlak is een tussenruimte van een kabeldiameter gebruikelijk. In het geval van een driehoek-formatie worden de kabels meestal tegen elkaar gelegd. Elke formatie kent een eigen berekeningsmethode voor de transportcapaciteit.

Installatie ondergronds



De transportcapaciteit wordt mede beïnvloed door de liggingsdiepte onder het maaiveld en de aanwezigheid van naburige warmtebronnen, zoals van andere circuits. In het geval van andere kabelcircuits (parallele verbindingen) of warmtebronnen (stadsverwarming), moeten die in het model worden opgenomen. Dat kan op diverse manieren.

Meerdere circuits

Er zijn drie mogelijkheden om deze te berekenen:

- voor ieder circuit de maximale stroomsterkte
- gelijk belaste identieke circuits
- maximale stroomsterkte bij een naburig circuit

Standaard wordt voor ieder circuit de maximale stroomsterkte bepaald, erbij uitgaande dat van ieder circuit de geleidertemperatuur de geldende maximale waarde bereikt. Er wordt rekening gehouden met de wederzijdse beïnvloeding.

Andere warmtebronnen

Hieronder vallen parallel lopende leidingen, zoals voor stoom en stadsverwarming. Er zijn twee manieren om rekening te houden met warmtebronnen:

- warmtebronnen met een vaste temperatuur
- warmtebronnen met een gedefinieerde warmteafgifte

3.7 Rekenvoorbeelden

Onderstaande tabel geeft een overzicht van diverse mogelijkheden voor een 95 mm² Al XLPE kabel voor 6/10 kV. Bij ligging in de grond zijn de belastbaarheden uitgerekend voor drie waarden van de specifieke warmteweerstand van de grond. De grondtemperatuur is daarbij 15 graden Celsius. Het is goed zichtbaar dat de kabelbelastbaarheid sterk afhangt van de warmteweerstand: meer dan 30 A bij elke stap van $G=0.25$ Km/W.

Rekenvoorbeelden 95 mm² Al 6/10 kV

Omgeving	Drie-hoek	Plat vlak, afstand 2 x D _e		Plat vlak, afstand 300 mm	
		Tweezijdig	Cross-bond	Tweezijdig	Cross-bond
G=0.5	335	343	348	366	381
G=0.75	295	299	304	323	338
G=1	265	268	273	292	306
Vrij in lucht	285	326	333	315	333

Voor de volledigheid is ook de belastbaarheid voor installatie vrij in de lucht aangegeven. De omgevingstemperatuur is dan 30 graden Celsius.

De tabel geeft ook inzicht in de invloed van de onderlinge afstand van ondergrondse kabels in een plat vlak en de methode van verbinden van de aardschermen. Bij een relatief kleine onderlinge hartafstand van de kabels (twee maal de kabeldiameter) blijkt de winst van de cross-bonding methode gering ten opzichte van het tweezijdig doorverbinden (gemiddeld 5 A). Bij een grotere onderlinge hartafstand (300 mm in de tabel) blijkt de winst door de cross-bondingmethode al groter (gemiddeld 15 A), omdat de in de afscherming geïnduceerde spanningen dan groter zijn.

Bij bovengrondse kabels in plat vlak met de afschermingen tweezijdig verbonden gaat de belastbaarheid achteruit indien zij verder van elkaar worden gelegd. Dit is het gevolg van de toegenomen vereffeningstromen.

Bij een grotere onderlinge hartafstand zijn ondergrondse kabels meer belastbaar omdat zij elkaar bij een grotere afstand minder sterk opwarmen. De winst door de kabels verder uit elkaar te leggen is in bovenstaand voorbeeld 25 A bij tweezijdige aarding en 35 A indien cross-bonding is toegepast.

Cross-bonding heeft dus bij ondergrondse kabels in een plat vlak pas noemenswaardig effect bij een grotere onderlinge afstand van de kabels. Bovengrondse kabels zonder cross-bonding kunnen beter dicht bij elkaar (ongeveer 2 x D_e) worden geïnstalleerd.

4 DYNAMISCHE KABELBELASTBAARHEID

- Gebaseerd op traagheid in opwarming van:
 - Begraven kabel
 - Grond in directe omgeving
- Twee berekeningsmethodes:
 - Cyclische belasting
 - Stapvormig veranderende belasting

De methode volgens IEC 287 berekent de maximale kabelbelastbaarheid voor het geval de stroom niet verandert. De methode schrijft nauwkeurig voor welke verliezen er in de kabel optreden en hoe groot de thermische weerstanden zijn voor alle denkbare liggingsomstandigheden.

Voor het berekenen van de kabelbelastbaarheid voor veranderende stromen wordt de norm IEC 853 toegepast. Deze norm gaat er van uit dat een ondergrondse kabel, die niet voor de volle 100 % is belast, nog niet de maximum temperatuur heeft bereikt. Dankzij de temperatuurtraagheid, veroorzaakt door de warmtecapaciteit van de kabel en de grond direct daaromheen, duurt het even voordat de temperaturen zich hebben aangepast aan de nieuwe situatie. Het is dus mogelijk om een ondergrondse kabel gedurende een korte tijd meer stroom te laten voeren dan op grond van de stationaire berekening volgens IEC 287 was berekend. De methode houdt geen rekening met het uitdrogen van de grond.

Voor bovengronds geïnstalleerde kabels heeft het geen zin de dynamische belastbaarheid te berekenen, omdat de geleidertemperatuur de veranderingen in de belastingstroom te snel volgt.

In deze norm worden twee berekeningsmethoden beschreven, namelijk de stapvormig veranderende en de cyclische belasting. De kabelbelasting verandert in de loop van de dag als gevolg van het cyclische gedrag van de belastingen. Het is mogelijk dat het maximum van deze belastingcyclys groter is dan de maximale stationaire stroombelasting. Bovendien zijn de kabels, meestal niet voor de volle 100% belast. De netbeheerder wil dan weten hoeveel belasting op een kabel kan worden bijgeschakeld, bijvoorbeeld als gevolg van een omschakelactie na een storing of bij onderhoud. Het is namelijk mogelijk in die situaties de kabel tijdelijk licht te overbelasten. Dit kan met behulp van de norm IEC 60853 voor elk moment van de dag berekend worden.

De norm IEC 60853 maakt gebruik van de berekende kabelverliezen en thermische weerstanden volgens IEC 60287 en is dus een uitbreiding daarop. Uitgangspunt van een dynamische berekening is altijd de stationaire berekening, waarin een aantal basisparameters, zoals de verliezen in de kabel en de thermische weerstanden, wordt bepaald.

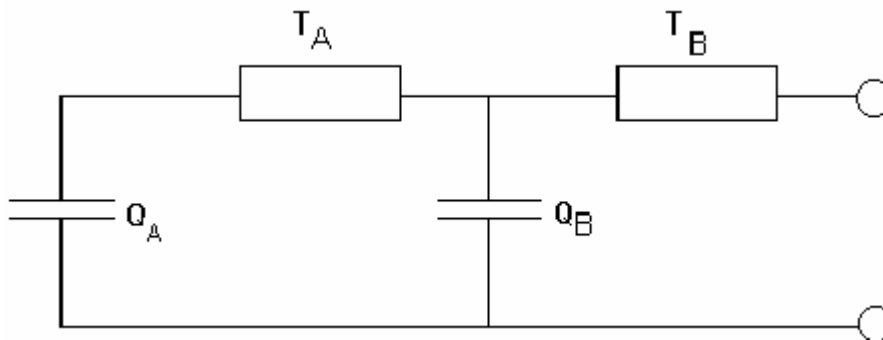
Vision *Cable* bevat twee dynamische stroombelastbaarheidsmodulen:

- berekening van de transiënte temperatuurrepons
- berekening van de maximale stapbelasting (emergency load)
- berekening van de cyclische stroombelasting.

4.1 Methode

De methode voor het berekenen van de temperatuurrepons van een kabel op een stapvormig aangebrachte continue stroom door de geleider(s) komt neer op het opsplitsen van het model in twee

onafhankelijke gedeelten. Één deel modelleert de kabel zelf, van geleider tot en met de buitenmantel. Het tweede deel modelleert de omgeving van de kabel. De individuele responsies van deze twee delen worden gesommeerd, waaruit de respons voor het gehele systeem volgt.



De dynamische responsie van de kabeltemperatuur als gevolg van een stapvormige verandering in de stroom door de geleider hangt af van de combinatie van warmtecapaciteiten en thermische weerstanden van de kabel en van de omgeving (de grond).

Voor een in de grond begraven kabel speelt bij korte overgangsverschijnselen de warmtecapaciteit van de kabel zelf de belangrijkste rol. De invloed van het omringende medium op de temperatuur is daarbij verwaarloosbaar. Voor langdurige overgangsverschijnselen (langer dan 6 uren), wordt de invloed van de kabel zelf verwaarloosbaar en wordt de temperatuur voornamelijk door het omringende medium bepaald. Om die reden wordt het thermische circuit opgedeeld in twee onafhankelijke delen:

- een deel van de geleider tot aan de buitenmantel van de kabel (Q_A en T_A in bovenstaande figuur) en
- een deel van het omringende medium (Q_B en T_B in bovenstaande figuur).

4.2 Berekening transiënte temperatuurrepons

De transiënte temperatuurrepons van een kabel op een stapfunctie van stroom door zijn geleider(s) wordt bepaald door de combinatie van warmtecapaciteiten en warmteweerstanden van de kabel zelf en van de omgeving. Zo wordt de temperatuurrepons van een begraven kabel voor korte responstijden (tot 6 uren) bijna volledig door de kabel zelf bepaald en is de invloed van de omgeving verwaarloosbaar. Aan de andere kant wordt de temperatuurrepons voor langere tijden volledig door de omgeving bepaald en worden de warmtecapaciteiten van de kabel zelf verwaarloosd.

De transiënte temperatuurrepons is de verandering van de temperaturen in de loop van tijd na aanbrenge van een stapvormige belastingsverandering. Uitgaande van een bepaalde stroom, die vóór de verandering stationair door de kabelverbinding loopt, wordt het temperatuurverloop berekend na aanbrenge van een door de gebruiker ingevoerde stapbelasting.

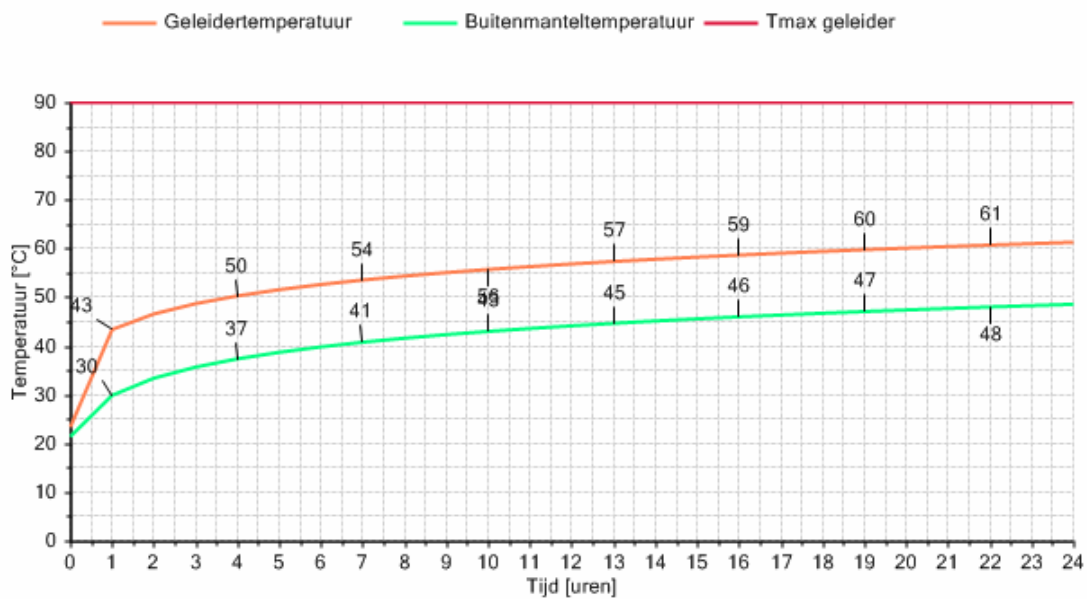
Het resultaat van de stapberekening is een grafiek waarin, uitgaande van een gegeven voorbelasting, aangegeven is hoe de geleidertemperatuur en de buitenmanteltemperatuur zich gedragen als functie van de tijd.

- oranje lijn: geleidertemperatuur
- groene lijn: buitenmanteltemperatuur
- rode lijn: maximaal toegestane temperatuur voor deze geleider

Voorbeeldberekening

Onderstaand voorbeeld is berekend aan de hand van een YMeKrvas 10 kV 1x95 Al kabelcircuit in plat vlak. In dit voorbeeld is, uitgaande van een voorbelasting van 100 A, een stapvormig toegenomen stroom van 269 A op de kabelverbinding aangebracht. De temperatuur van de geleider neemt in 24 uren toe van 23 tot 61 graden Celsius. De temperatuur van de buitenmantel neemt in diezelfde tijd toe van 22 tot 48 graden Celsius.

Duidelijk is te zien dat de geleidertemperatuur in de eerste uren snel toeneemt ten opzichte van de buitenmanteltemperatuur. Dit is de invloed van de warmtecapaciteiten en warmteweerstanden van de kabel zelf. Na ongeveer 6 uren is dit effect uitgewerkt en speelt alleen het opwarmen van de omgeving nog een rol. Indien de rekestijd naar oneindig zou naderen, zou de geleidertemperatuur de maximale waarde bereiken.



4.3 Berekening maximale stapbelasting

De transiënte temperatuurrepons van een kabel op een stapfunctie van stroom door zijn geleider(s) wordt bepaald door de combinatie van warmtecapaciteiten en warmteweerstanden van de kabel zelf en van de omgeving. Zo wordt de temperatuurrepons van een begraven kabel voor korte responstijden bijna volledig door de kabel zelf bepaald en is de invloed van de omgeving verwaarloosbaar. Aan de andere kant wordt de temperatuurrepons voor langere tijden volledig door de omgeving bepaald en worden de warmtecapaciteiten van de kabel zelf verwaarloosd.

Bij een stapvormig tot de nominale stroom toegenomen belasting zal de kabel zijn maximale temperatuur pas na lange tijd bereiken. Hierdoor is het volgens de norm mogelijk de kabel tijdelijk meer dan nominaal te belasten. Berekening van de maximale stapbelasting wordt in de norm "Emergency load" genoemd.

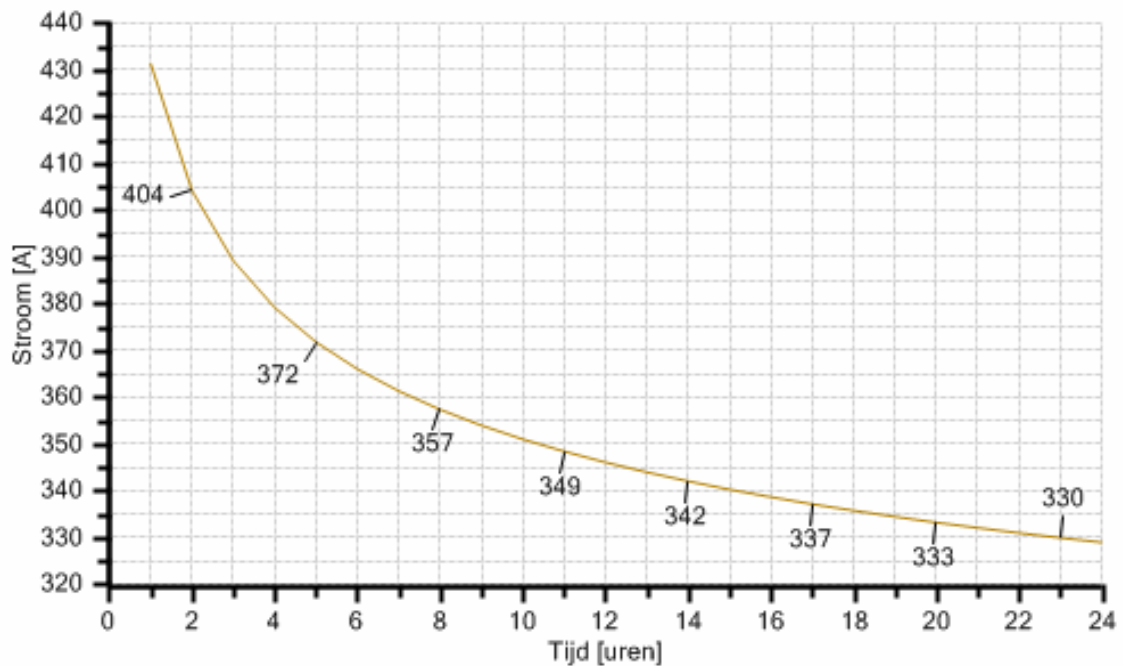
Uitgangspunt voor de berekening is een kabelcircuit waardoor gedurende voldoende lange tijd een continue stroom ter grootte van I_1 vloeit. Daarbij is de stationaire toestand bereikt en zijn eventuele overgangsverschijnselen uitgedempt. Vervolgens wordt op tijdstip $t=0$ de stroom stapvormig tot I_2 (de noodbelasting) vergroot. De vraag voor de berekening is dan hoe groot I_2 maximaal mag zijn als die

stroom gedurende een gespecificeerde tijd t blijft vloeien. Daarbij mag de geleidertemperatuur de maximale waarde niet overschrijden. Bij de berekening wordt rekening gehouden met de verandering van de elektrische geleiderweerstand door de toename van de temperatuur.

Voorbeeldberekening

Onderstaand voorbeeld is berekend aan de hand van een YMeKrvas 10 kV 1x95 Al kabelcircuit in plat vlak. Voor deze kabel kan de maximale stapbelasting automatisch worden berekend. De continue vloeïende stroom ter grootte van I_1 wordt gespecificeerd als "Voorbelasting". Voor alle tijdsduren tussen 0 en 24 uren wordt de maximale stapbelasting uitgerekend. Dat betekent altijd dat voor korte tijdsduren de maximale stapbelasting het grootst is. Indien t nadert tot oneindig, zal de maximale stapbelasting gelijk zijn aan de stationaire stroombelasting.

Het resultaat van de voorbeeldberekening is een grafiek waarin, uitgaande van een gegeven voorbelasting, aangegeven is hoeveel de extra belasting op een kabelverbinding mag zijn. Op de horizontale as is de duur van de extra belasting weergegeven. In onderstaand voorbeeld mag, uitgaande van een voorbelasting van 100 A, gedurende 8 uren een stroom van maximaal 357 A door de kabelverbinding vloeien. Daarna moet de stroom weer beneden de stationair maximale waarde liggen.



4.4 Berekening cyclische stroombelasting

De dynamische berekening wordt beschreven in IEC 60853. In deze norm worden twee berekeningsmethoden beschreven, namelijk de stapvormig veranderende en de cyclische belasting. Uitgangspunt van een dynamische berekening is altijd de stationaire berekening, waarin een aantal basisparameters, zoals de verliezen in de kabel en de thermische weerstanden, wordt bepaald.

Bij een dagelijks wisselende belasting (tot maximaal de nominale stroomsterkte) zal de kabel de maximale temperatuur niet bereiken en volgens de norm is het mogelijk om de kabel tijdelijk meer dan nominaal te belasten.

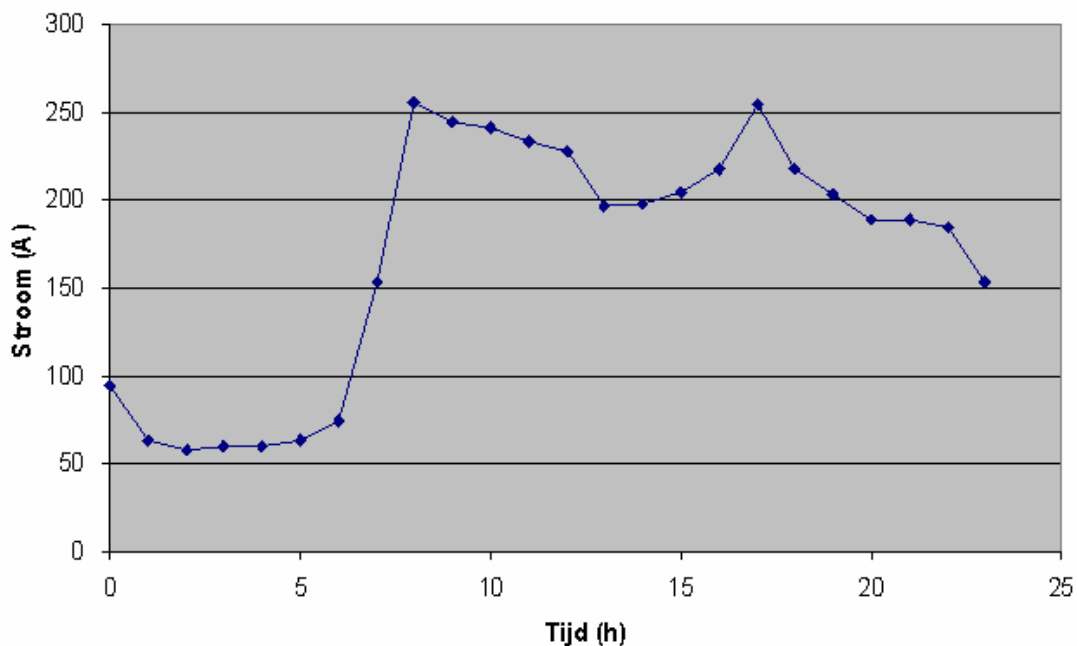
Definitie:

De cyclische belastbaarheidsfactor wordt aangeduid met de letter M. Dit is factor waarmee de nominaal continue stroombelasting mee mag worden vermenigvuldigd om de piekwaarde te verkrijgen van de dagelijkse stroomcyclus, zodanig dat voor die stroomcyclus de geleider de maximale temperatuur niet overschrijdt.

Voor het vaststellen van de M-factor is de vorm van de stroomcyclus van belang. De vastgestelde M-factor geldt dan ook alleen voor stroomcycli van die vorm. Het wijzigen van een van de uurwaarden van de cyclus heeft direct invloed op de waarde van M en dus op de maximale waarde van de totale cyclus.

De methode gaat uit van een langzame component en een snelle component. De langzame component wordt bepaald aan de hand van de gemiddelde belasting over de 24 uurwaarden van de cyclus. De snelle component wordt bepaald aan de hand van het gedrag tijdens de 6 uren die vooraf gaan aan het tijdstip waarvoor de kabelbelastbaarheid wordt bepaald.

Dagcyclus



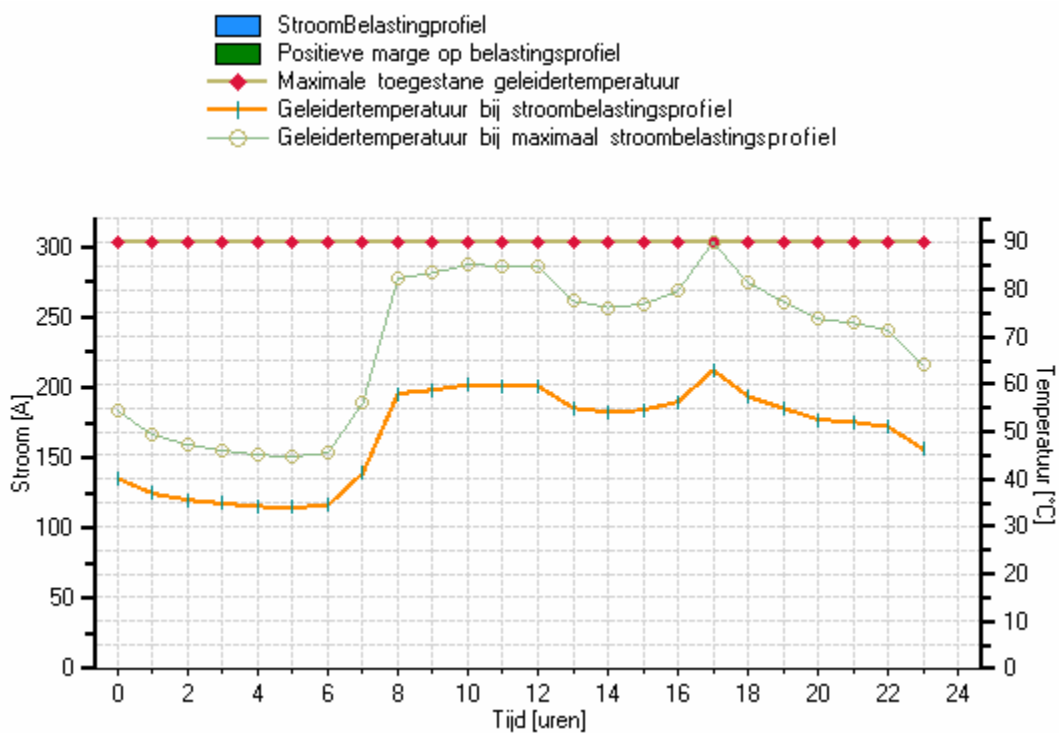
De methode gaat uit van een dagelijks cyclisch veranderend kabelbelastingspatroon. In bovenstaand voorbeeld (uit configuratie: YMeKrvas 10 kV 1x95 Al plat vlak.vcf) toont de belastingstroom twee pieken, die elk ongeveer even groot zijn: één op $t=8$ uur en één op $t=17$ uur. Naar verwachting zal het moment van de kritieke maximale dynamische belastbaarheid zich ergens tussen deze twee tijdstippen bevinden.

De methode berekent voor elk moment van de dagcyclus een maximale cyclische kabelbelastbaarheid, ervan uitgaande dat de kabel gedurende de cyclus niet volbelast is en dat de kabel dus ook niet de maximum temperatuur heeft bereikt.

De hoogste temperatuur treedt doorgaans op aan het einde van een periode met de hoogste stroom. Dit hoeft niet altijd op te gaan want de temperatuur is ook afhankelijk van het niveau van de stroom in de daaraan voorafgaande stroom. In bovenstaand voorbeeld is de stroom het grootst op t=8 uur maar de kabel zal hoogstwaarschijnlijk de hoogste temperatuur bereiken bij de iets kleinere stroom op t=17 uur.

Voorbeeldberekening

Onderstaand voorbeeld is berekend aan de hand van een YMeKrvas 10 kV 1x95 Al kabelcircuit in plat vlak. De stroomcyclus is weergegeven in bovenstaande figuur. De berekende geleidertemperatuur is weergegeven met de oranje lijn in de onderstaande figuur. Zichtbaar is dat de hoogste temperatuur op t=17 uur wordt behaald.



Resultaat van de berekening is de M-factor. Deze is in dit voorbeeld gelijk aan 1,19 (zie hieronder). Dat betekent dat de piekwaarde voor deze dagbelastingcyclus gelijk mag zijn aan 1,19 maal de continu toelaatbare stroomwaarde. In dit voorbeeld mag de piek van de cyclus dus gelijk zijn aan: $1,19 \times 269 A = 320 A$.

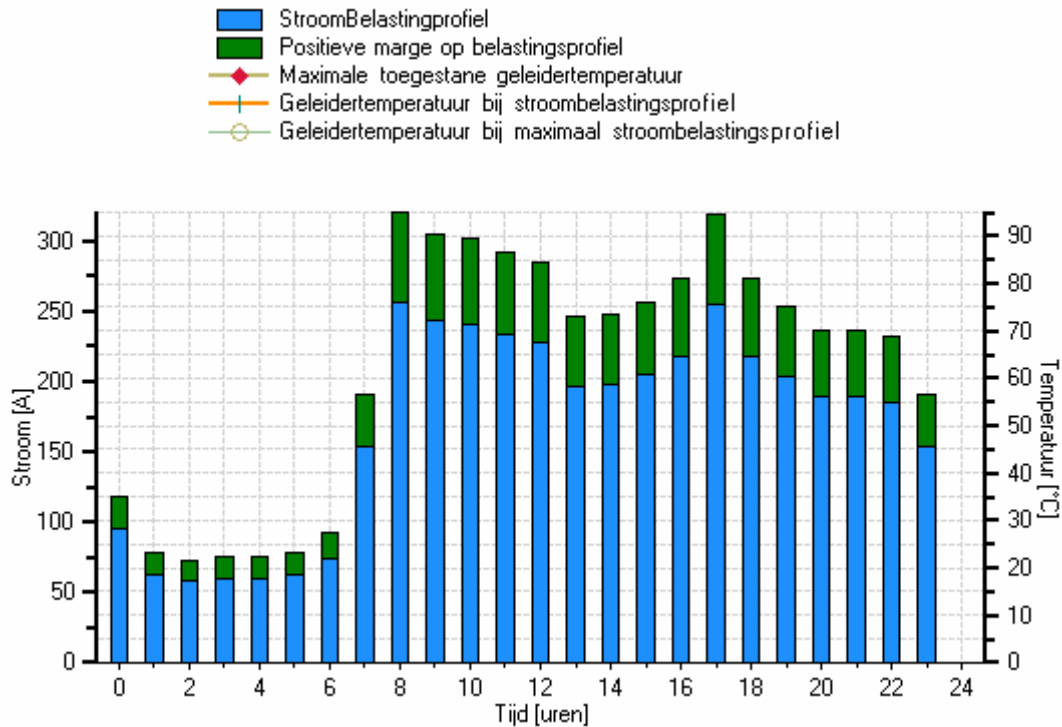
Berekening	
Cyclische belastbaarheidsfactor (M):	01.190
Maximale factor stroombelastingsprofiel:	01.251

Voor de gegeven dagcyclus, die een piek heeft van 256 A op t=8 h, betekent dit dat alle waarden vermenigvuldigd mogen worden met $320 / 256 = 1.25$. Deze waarde is in het resultatengedeelte weergegeven als "Maximale factor stroombelastingsprofiel" (zie hieronder). In bovenstaande grafiek

geeft de grijze lijn de geleidertemperatuur weer voor de maximale dagcyclus (waarvan alle waarden met deze factor zijn vermenigvuldigd).

Onderstaande figuur geeft de stroomcyclus weer, zoals deze is ingevoerd (blauwe histogram) en zoals deze maximaal mag zijn: gestapeld histogram, blauw plus de marge in het groen.

Indien de ingevoerde stroomcyclus al te grote waarden zou bevatten, dan zou de negatieve marge in het rood aangegeven zijn.



5 CONCLUSIES

De nominale belastbaarheid van een kabel is van een groot aantal factoren afhankelijk. Van invloed zijn de kabelconstructie, de aansluiting van de afscherming, de wijze van ligging en de omgevingscondities.

In Nederland moet goed rekening gehouden worden met uitdroging van de grond, met name in gebieden van rivierklei. De NPR 3626 gaat daar op in.

Het komt vaak voor dat de IEC 60287 voor een bepaald land een maximum waarde aangeeft voor de specifieke thermische grondweerstand, bijvoorbeeld: $g = 1 \text{ K.m/W}$, terwijl na een uitgebreid onderzoek kan blijken dat de g eigenlijk in de buurt van 2.5 K.m/W zou moeten liggen. Indien daardoor de kabels verbranden en vervangen moeten worden, is de financiële schade aanzienlijk. Alle parameters voor een kabelinstallatie moeten door de verantwoordelijke persoonlijk gecontroleerd worden.

Het is mogelijk de kabel meer dan nominaal te belasten door gebruik te maken van het feit dat een kabel meestal niet stationair maar volgens een dagelijks patroon (cyclus) belast is, en door gebruik te

maken van het feit dat de temperatuur van de kabel zich als gevolg van de thermische warmtecapaciteit maar langzaam aanpast.

De norm IEC 853 beschrijft een berekeningsmethode van de dynamische belastbaarheid. Hiermee kan voor elke specifieke cyclus een maximale dynamische kabelbelastbaarheid worden uitgerekend, die groter is dan de stationaire belastbaarheid. Ook kan de mogelijkheid voor een tijdelijke vergrote stroom (noodstroom) in het geval van een omschakeling in het distributienet worden uitgerekend.

De berekeningen van de stationaire en de dynamische kabelbelastbaarheid zijn door Phase to Phase geïmplementeerd in een gebruiksvriendelijk computerprogramma.