

Zwerfstromen: Al een eeuw een uitdaging

Erwin Smulders

 Movares

vormgeven
aan
bereikbaarheid

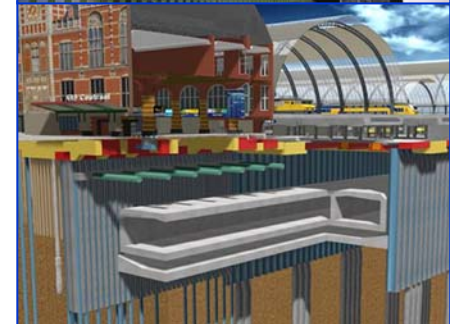
Movares:

‘Vormgeven aan bereikbaarheid’

Movares is een advies- en ingenieursbureau op het gebied van mobiliteit en infrastructuur.

Movares genereert oplossingen voor vraagstukken betreffende capaciteit, veiligheid en inpassing.

- Omzet 2005 ca. 140 miljoen euro, ca. 1300 fte werkzaam
- In Nederland
 - hoofdkantoor in Utrecht
 - regiokantoren in Eindhoven, Weesp, Zoetermeer en Zwolle
- In Europa
 - vestigingen in Duitsland, Polen en Portugal
 - projecten o.a. in Frankrijk, Slowakije, Slovenië en Spanje



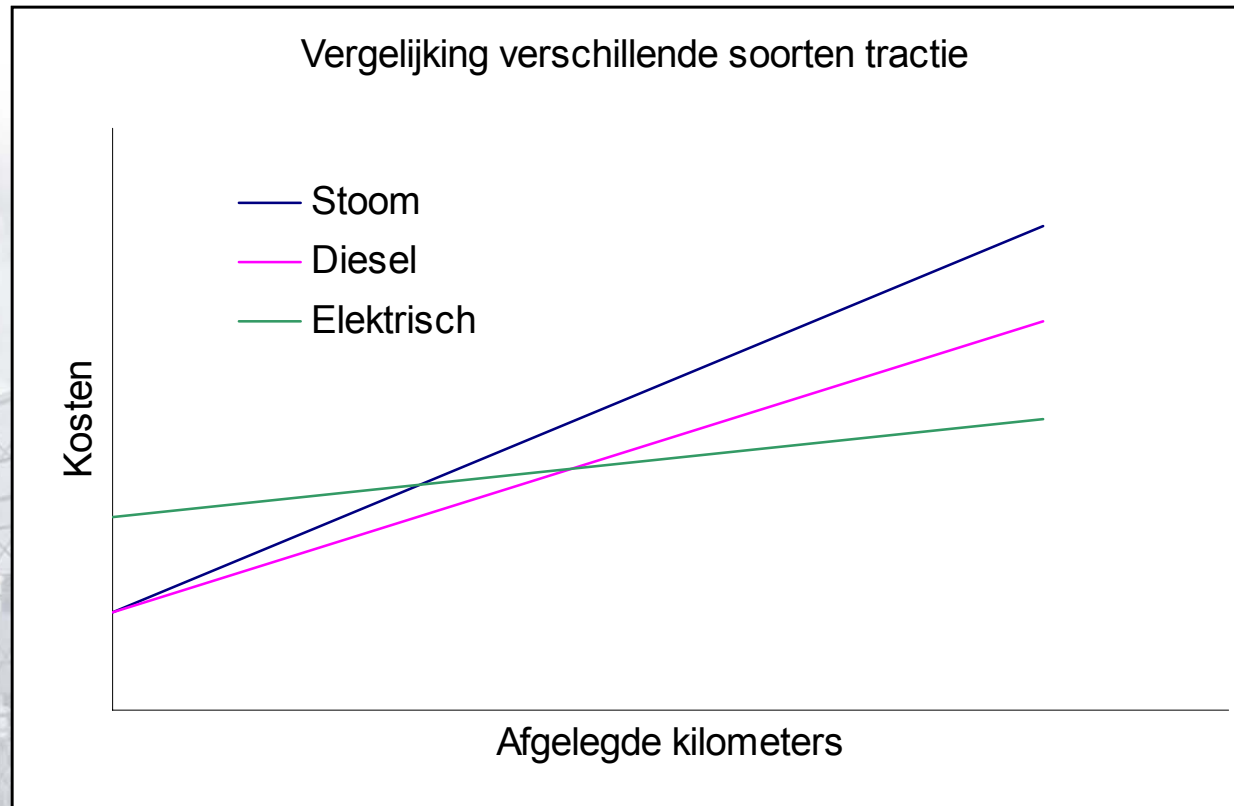
The logo for Movares, featuring the company name in a bold, black, sans-serif font. Above the text is a stylized orange and red arch that mirrors the shape of the structures shown in the images above.

Dienstregeling

- **Introductie**
- **Homologatie**
 - Spoorwegsystemen algemeen
 - Gelijkstroom
 - Wisselstroom
 - Zwerfstroom
- **Modelontwikkeling**
 - Natuurkunde
 - Wiskunde
 - Numerieke implementatie
- **Voorbeelden**
- **Conclusies**

Homologatie Spoorwegsysteem

Waarom Elektrische Tractie?



Homologatie Spoorwegsystemen

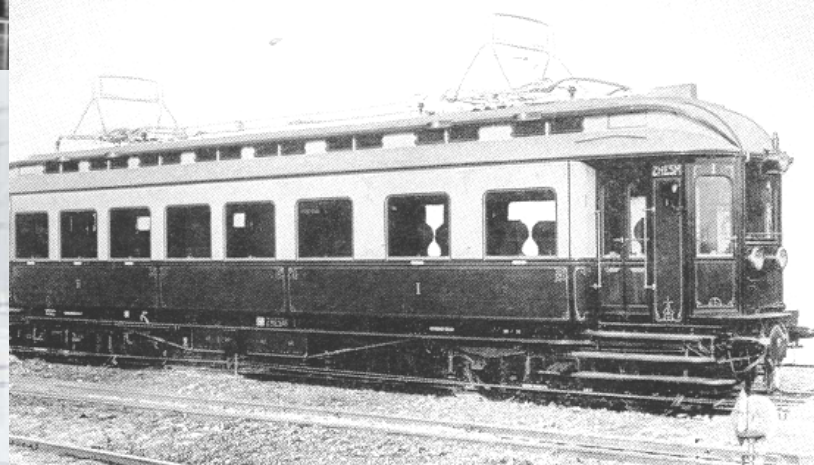
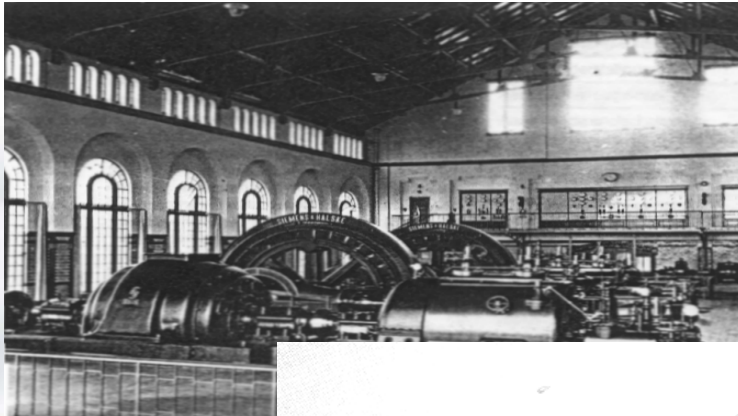
Historie



**31 mei 1879: W.
von Siemens,
eerste
elektrische trein,
Wereld-
tentoonstelling
Berlijn**

Homologatie Spoorwegsystemen

Historie



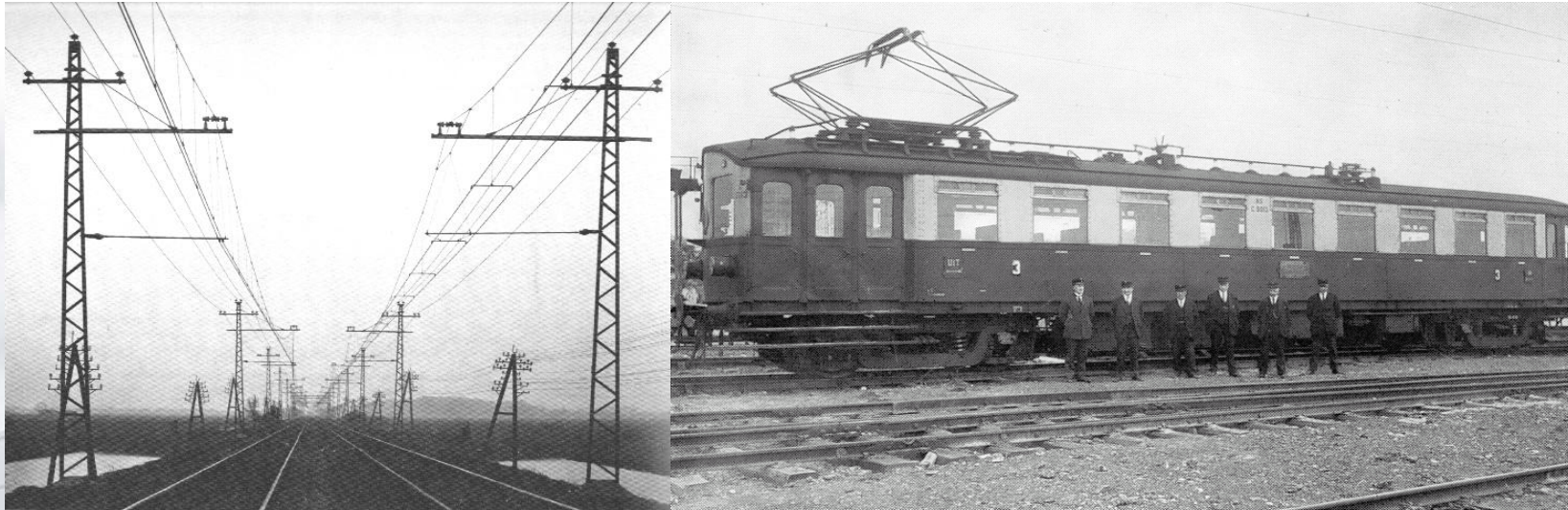
1908-1926

**Rotterdam-Hofplein,
Den Haag-HS ,
Scheveningen,
ZHESM,**

10 kV, 25 Hz

Homologatie Spoorwegsysteem

Historie

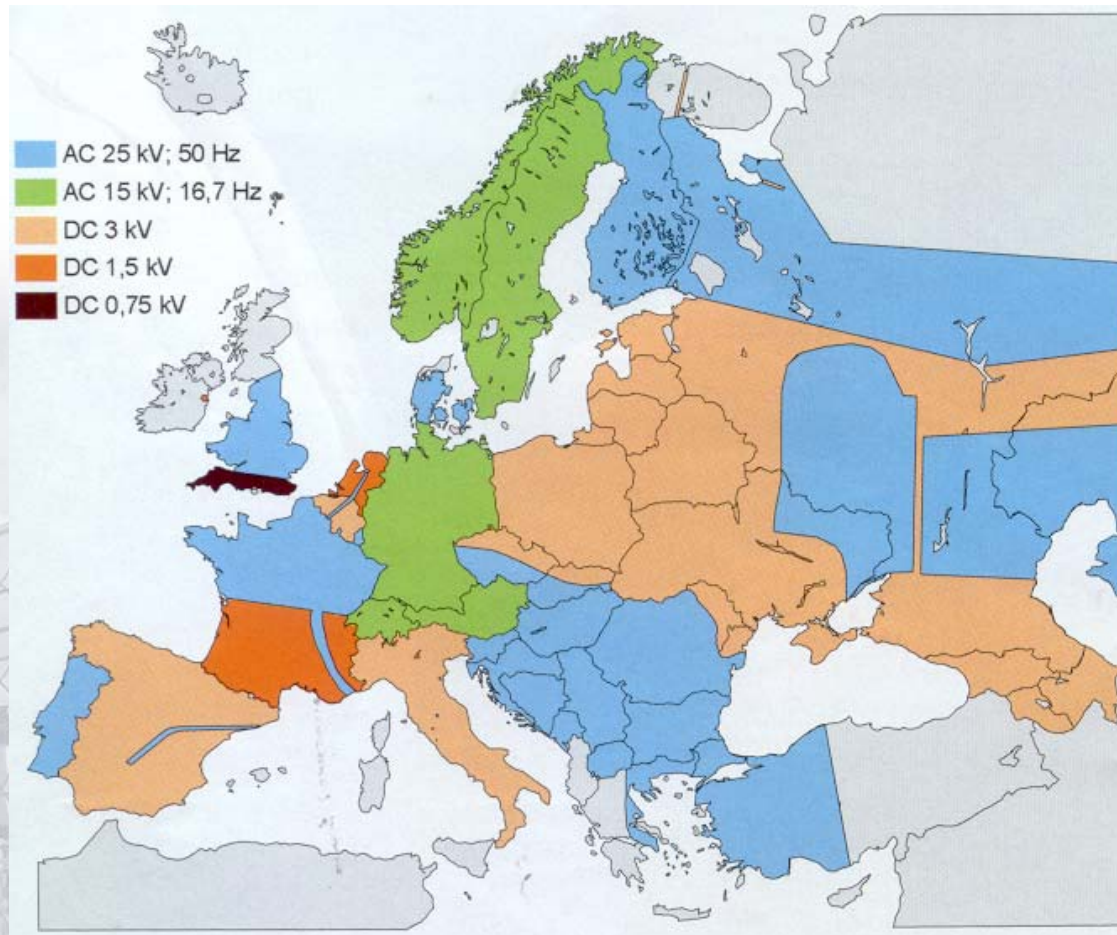


1918 Besluit: Elektrische tractie 1500 V d.c.

1921 De “Oude Lijn” in dienst

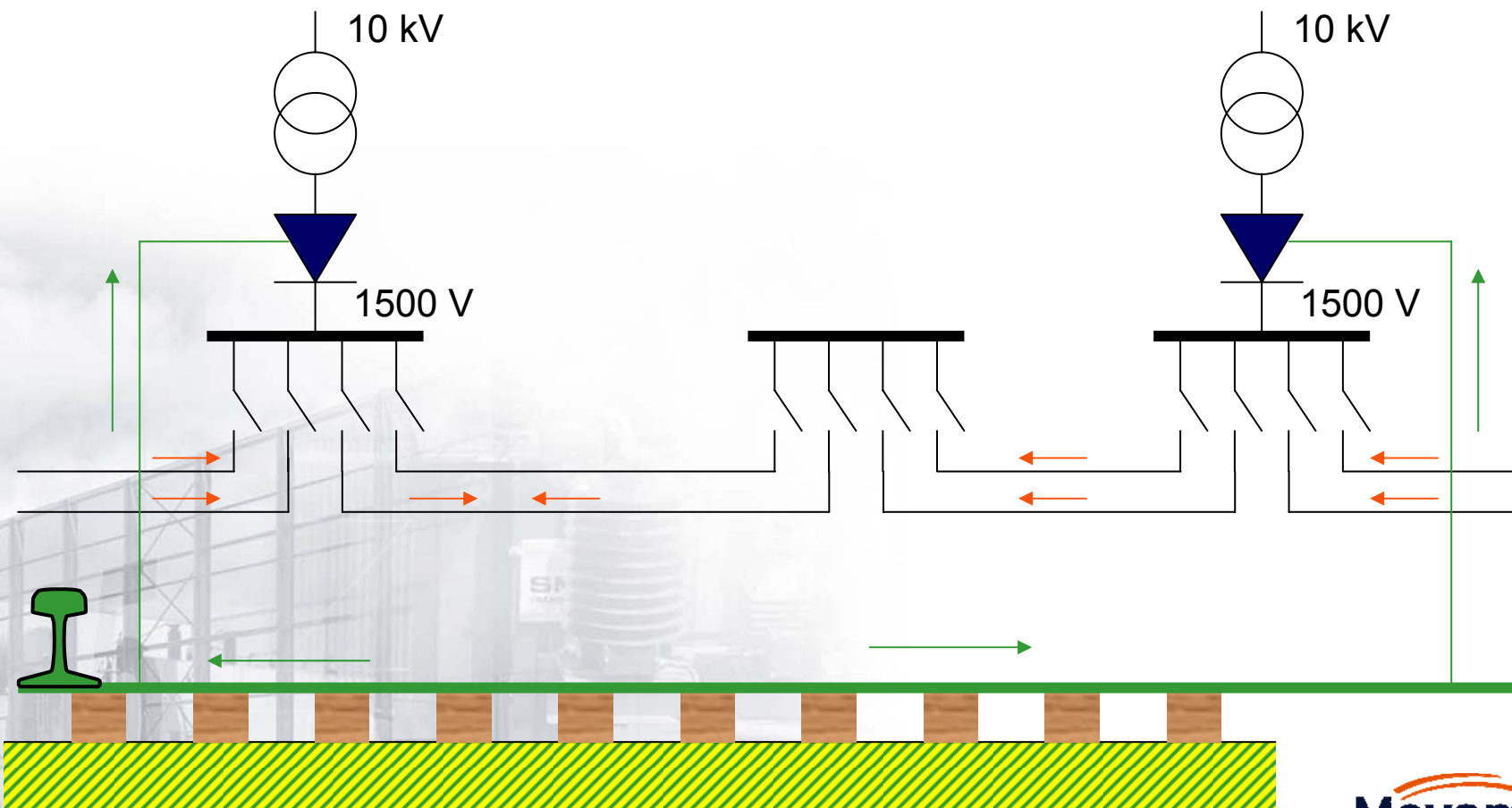
Amsterdam - Haarlem - Rotterdam

Homologatie Spoorwegsystemen



Homologatie

Spoorwegsystemen 1500 V d.c.



Homologatie

Spoorwegsystemen 1500 V d.c.

Kentallen

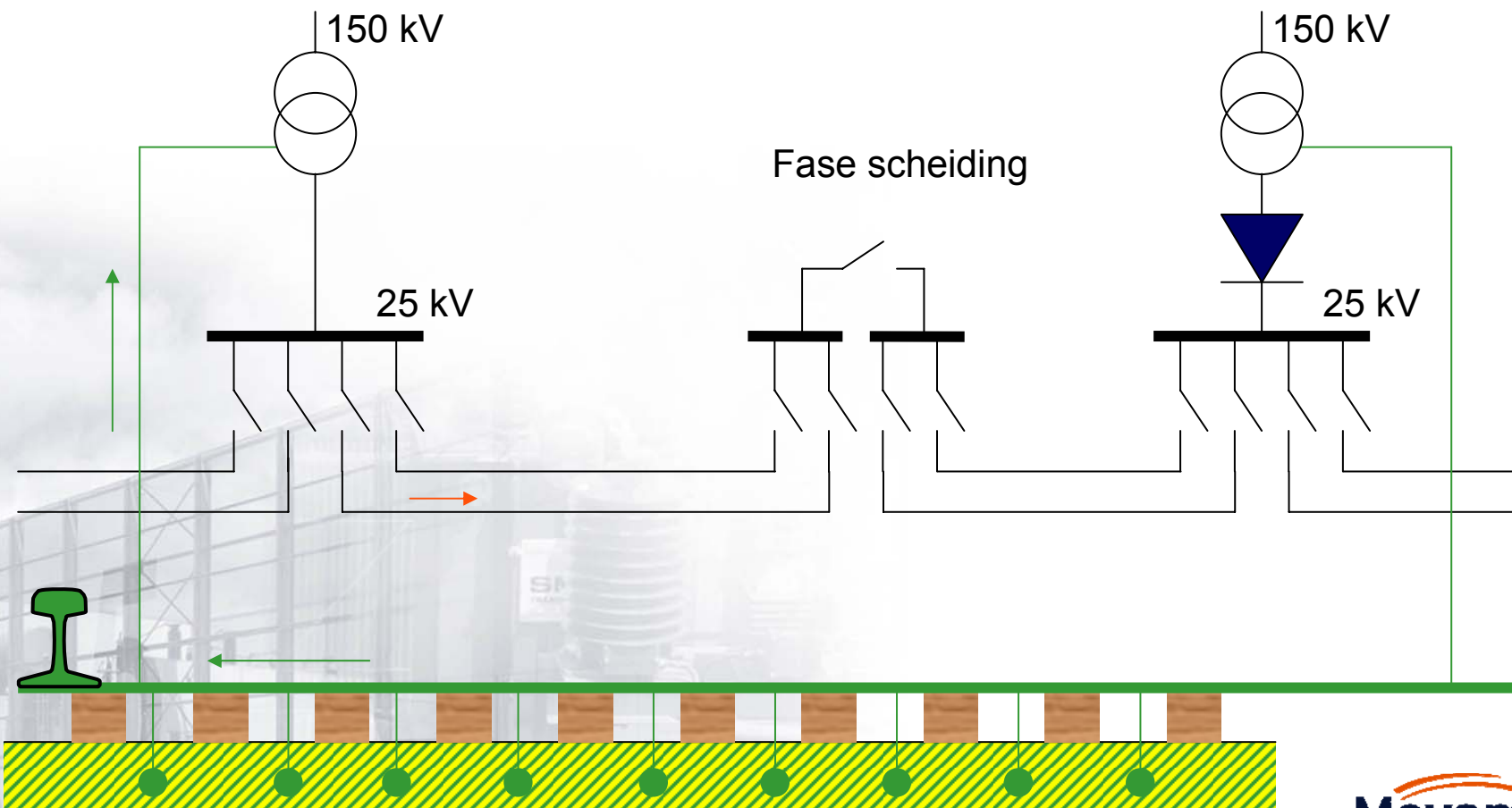
- V_{nom} 1500 V
- V_{max} 1800 V
- V_{min} 1200 V
- I_{max} 4000 A
- P_{max} 6 MW
- V_{max} 140 km/h
- Freq. 0 Hz

Eigenschappen

- Klassieke Systeem
- Afstand voedingspunten 5-10 km
- Vermogen OS 6-8 MW
- Retour geïsoleerd van aarde
- Zwerfstromen belangrijk
- Ook geschikt voor andere lage spanningsniveaus
- Geschikt voor Light-rail

Homologatie

Spoorwegsystemen 25 kV a.c.



Homologatie

Spoorwegsystemen 25 kV a.c.

Kentallen

- V_{nom} 25 kV
- V_{max} 27,5 kV
- V_{min} 21 kV
- I_{max} 1000 A
- P_{max} 25 MW
- V_{max} 300 km/h
- Freq. 50 Hz

Eigenschappen

- **Nieuwe Systemen**
 - BetuweRoute
 - HSL-Zuid
- Afstand voedingspunten ca. 30 km
- Vermogen OS 66 MW
- Retour verbonden met aarde
- Zwerfstromen zeer geringe rol
- Niet geschikt voor andere lage spanningsniveaus
- Ongeschikt voor Light-rail

Homologatie

Spoorwegssystemen Zwerfstromen

- Electro chemische corrosie
- 1 A per jaar → verlies van 9 kg staal
- Reeds lang bekend fenomeen



Wet op de Zwerfstormen

4. WET ZWERFSTROOMEN

WET van den 1sten November 1924, *Stb.* 498, houdende wettelijke maatregelen tegen aantasting van metalen voorwerpen in den bodem door zwerfstromen, afkomstig van de spoorstaven van elektrische spoor- en tramwegen.

Wij WILHELMINA, enz.

Alzoo Wij in overweging genomen hebben, dat wettelijke maatregelen noodig zijn tegen aantasting van metalen voorwerpen in den bodem door zwerfstromen, afkomstig van de spoorstaven van elektrische spoor- en tramwegen; Zoo is het, dat Wij, den Raad van State, enz.

Art. 1. Deze wet is van toepassing op de bij de spoorwegwet of bij een der artikelen 1, 6 of 8 der Locaalspoor- en Tramwegwet bedoelde spoor- en tramwegen, op welke vervoer plaats heeft door middel van als gelijkstroom opgewekte electriciteit en met terugleiding van den stroom door de spoorstaven.

Art. 2. 1. Ter voorkoming van aantasting van metalen voorwerpen in den bodem door zwerfstromen, afkomstig van de spoorstaven, worden bij algemeenen maatregel van bestuur bepalingen vastgesteld betreffende de samenstelling van den bovenbouw der spoor- en tramwegen en tegen afvloeiing van den elektrischen stroom naar den bodem.

2. In den algemeenen maatregel van bestuur wordt omschreven, in hoeverre van zijne bepalingen ontheffing kan worden verleend ten aanzien van niet

op openbare wegen aangelegde gedeelten van spoor- en tramwegen, en ten aanzien van de spoor- en tramwegen, waarop bij het in werking treden dezer wet de dienst wordt uitgeoefend.

De in het eerste lid bedoelde algemeene maatregel van bestuur is vastgesteld bij besluit van 5 februari 1925, *Stb.* 29, hierachter opgenomen.

Art. 3. 1. Ingeval van kruising van spoor- of tramwegen en van onderlinge nadering tot bij den algemeenen maatregel van bestuur, bedoeld bij artikel 2, te bepalen afstanden worden de kosten van de krachtens dien algemeenen maatregel te treffen voorzieningen omgeslagen over de ondernemers.

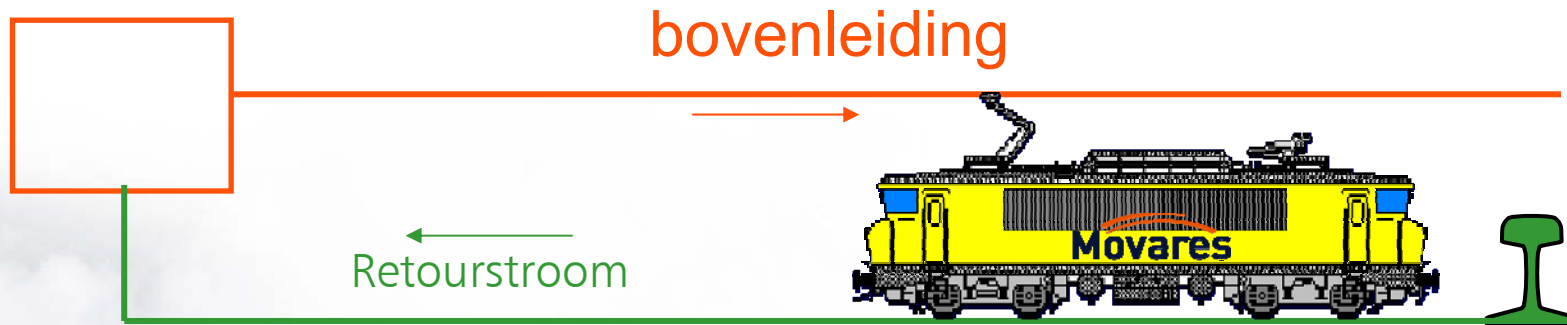
2. Bij gebreke van overeenstemming beslist Onze Minister van Verkeer en Waterstaat.

Art. 4. 1. Op overtreding van den bij artikel 2 bedoelden algemeenen maatregel van bestuur kan daarbij door Ons straf worden gesteld, doch geene andere of hoogere dan geldboete van ten hoogste duizend gulden, indien zij door bestuurders van een spoor- of tramwegdienst wordt gepleegd, of een spoorweg als bedoeld bij artikel 6 der Locaalspoor- en Tramwegwet betreft, en van ten hoogste twee honderd gulden, indien zij door beambten of bedienden van een spoor- of tramwegdienst wordt gepleegd.

2. De beambten en bedienden van een spoor- of tramwegdienst zijn niet strafbaar, zoo hunne overtreding een gevolg is van den last, door de bestuurders van zoodanigen dienst gegeven.

3. Indien de overtreder eene naamlooze vennootschap of eene rechtspersoonlijkheid bezittende vereeniging is, wordt de strafvervolging ingesteld en worden de straffen uitgesproken tegen

Homologatie Spoorwegsystemen Zwerfstromen

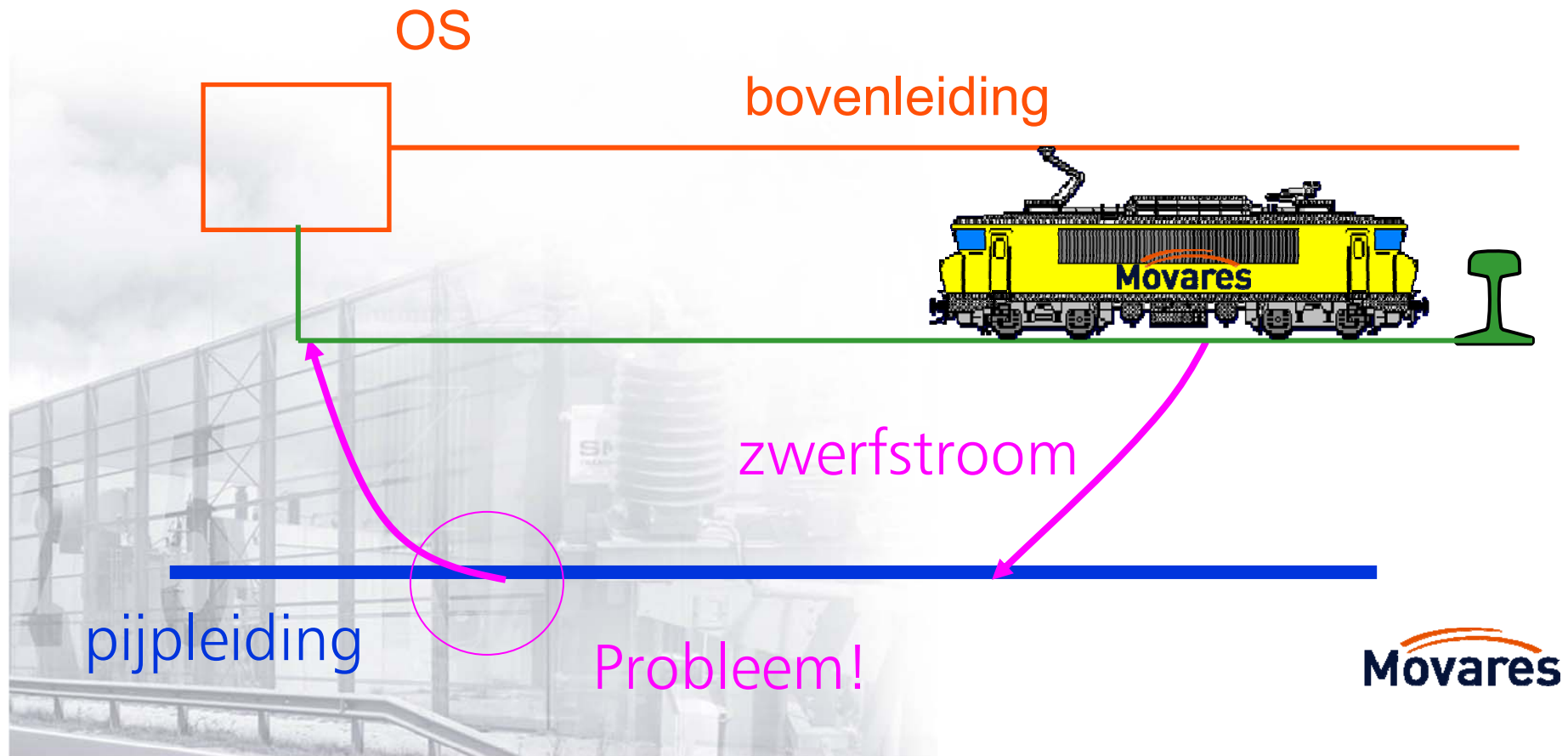


V spoorstaaf-bodem

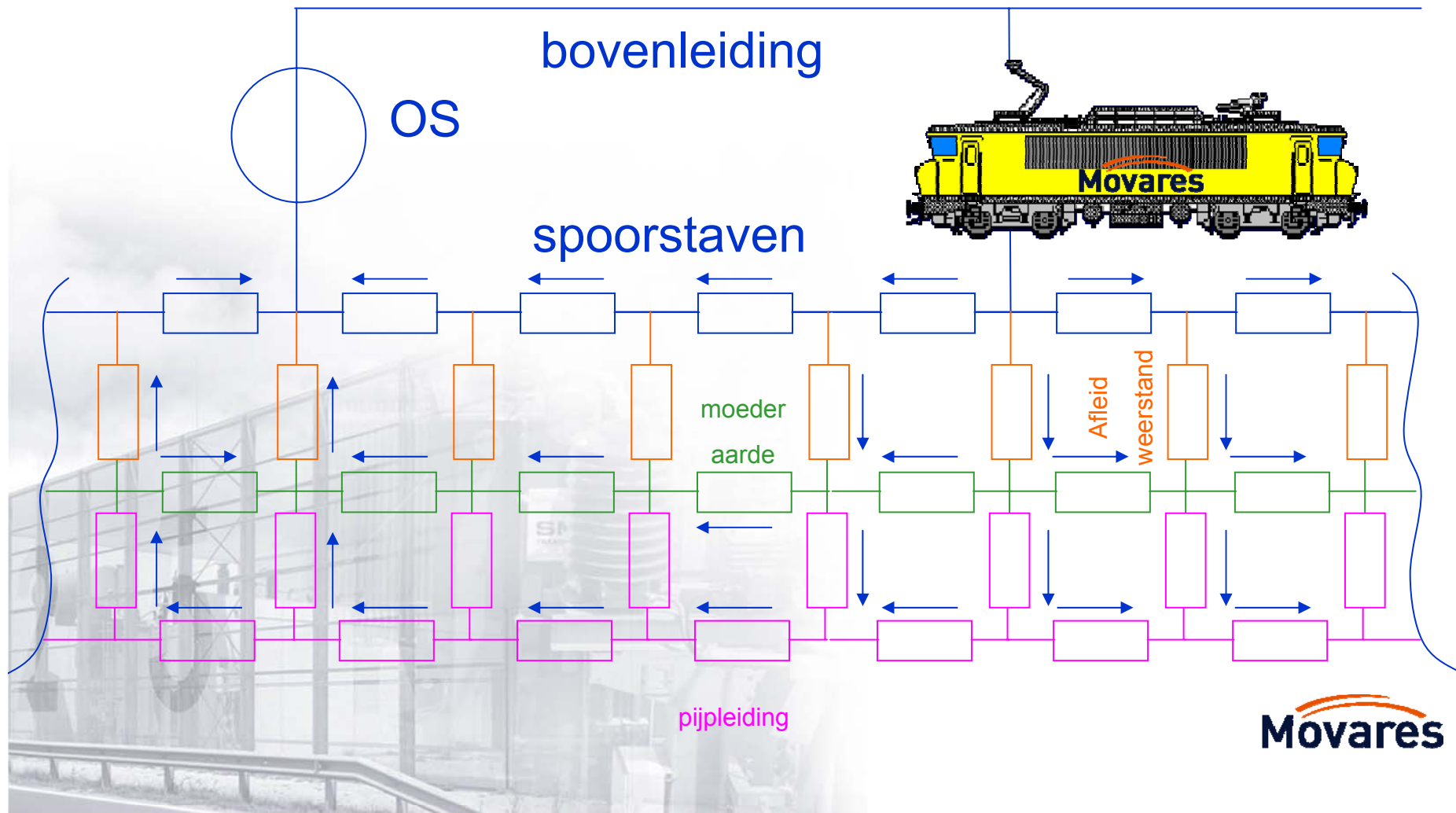
Homologatie

Spoorwegssystemen Zwerfstromen

Stroom door niet bedoeld pad = ZWERFSTROOM



Homologatie Spoorwegsystemen Zwerfstromen



Homologatie

Spoorwegsystemen Zwerfstromen

Waarom is inzicht nodig?

- **Bundeling van infrastructuur**
- **Urbanisatie**
- **Introductie light-rail**
- **Economische belangen**
- **EU wetgeving**

Homologatie

Spoorwegsystemen Zwerfstromen

Mogelijke slachtoffers

- Gasleidingen
- Waterleidingen
- Kabels
- Wapening in funderingen
 - trekpalen
 - damwanden
- Spoorstaven
- Etc.

Homologatie

Spoorwegssystemen Zwerfstromen

Gevolgen zwerfstroomcorrosie

Zwerfstroomcorrosie
van waterleiding



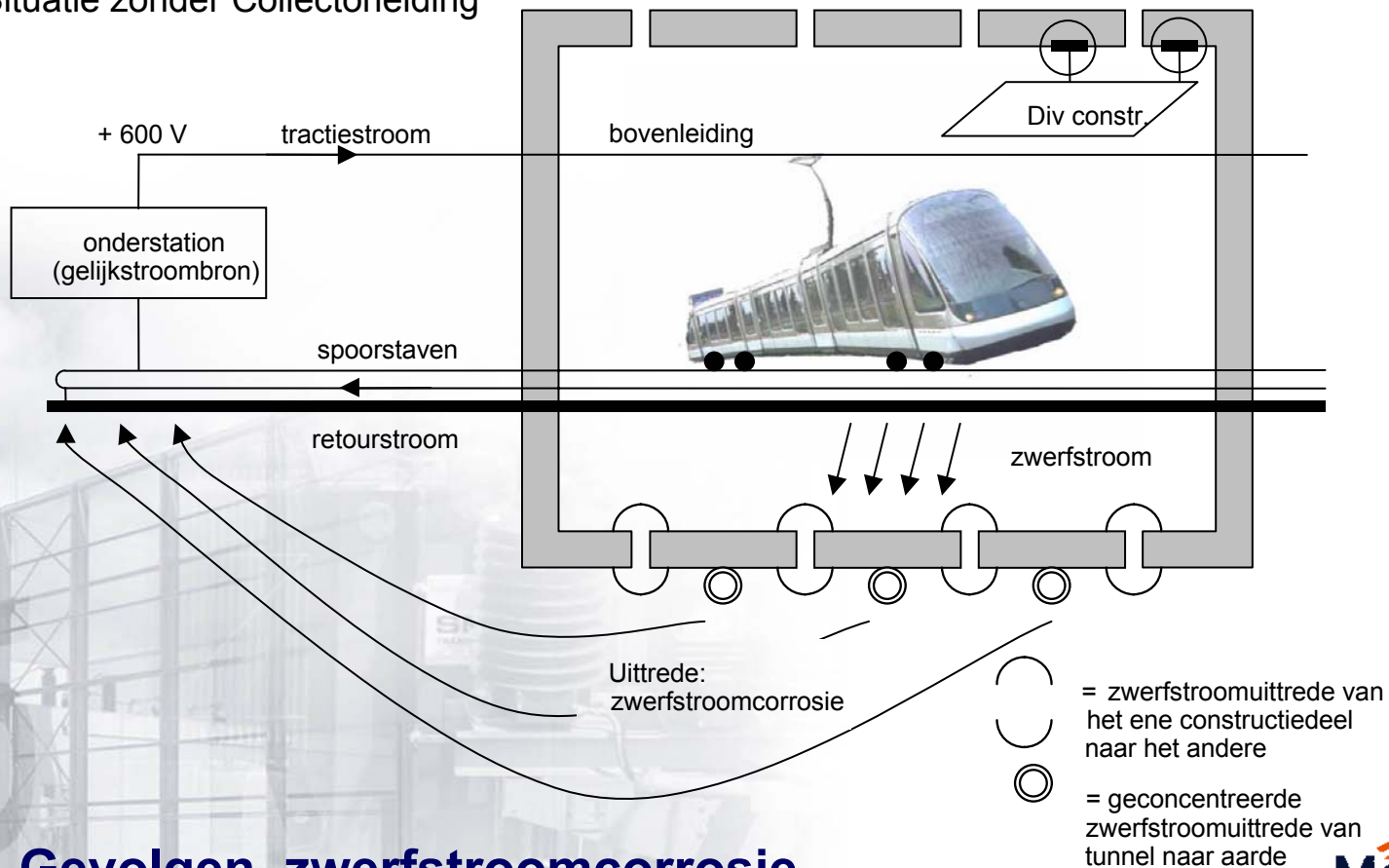
Putcorrosie van
geïsoleerde gasbuis



Homologatie

Spoorwegsystemen Zwerfstromen

Situatie zonder Collectorleiding



Gevolgen zwerfstroomcorrosie

Modelontwikkeling

- **Overzicht modellen**
- **Natuurkunde**
- **Wiskunde**
- **Numerieke implementatie**



Modelontwikkeling

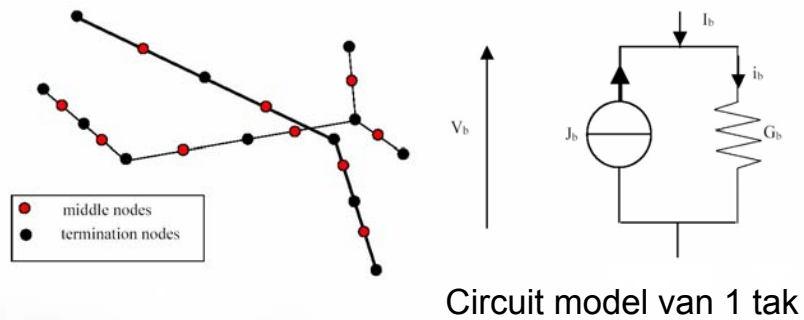
Overzicht Modellen

- A. Directe discretisatie naar circuit model
- B. Weerstand netwerk
- C. Cilindrische lagen
- D. Volledige 3-D simulatie
- E. Longitudinale sectionering, semi 2-D

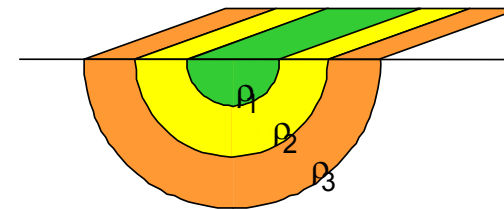


Modelontwikkeling

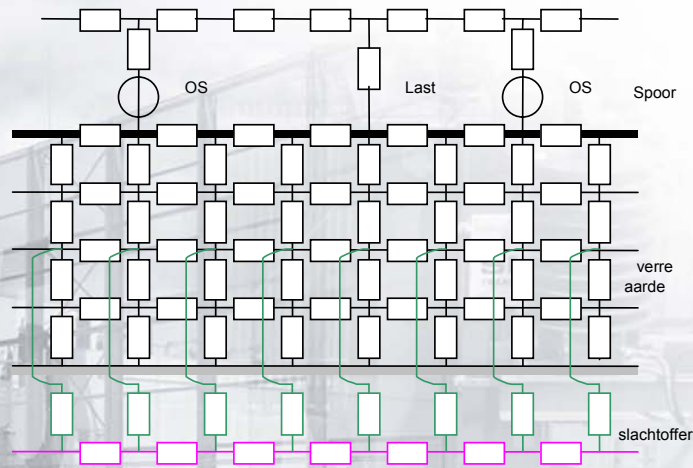
Overzicht Modellen



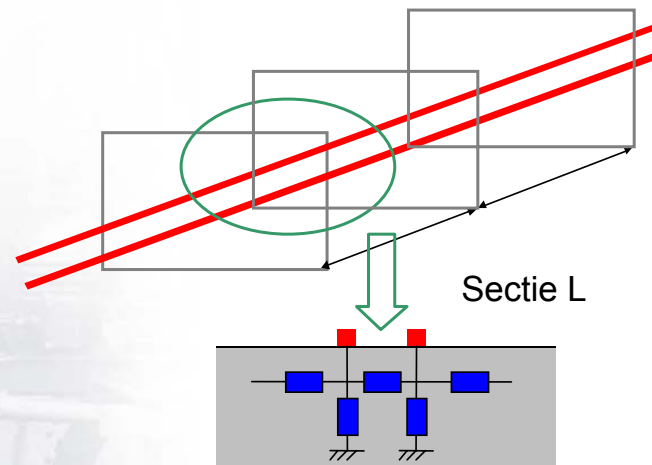
A. Direct Circuit Modellen



C. Cilindrische laag modellen



B. Weerstand netwerk modellen



E. Longitudinale sectionering, 2-D

Modelontwikkeling

Overzicht Modellen

	Voordelen	Nadelen
A. Circuit model	<ul style="list-style-type: none"> • Simpel • Grote systemen 	<ul style="list-style-type: none"> • relatie tussen circuit elementen en echte spoorwegomgeving
B. Weerstand netwerk	<ul style="list-style-type: none"> • Simpel • Intuïtief 	<ul style="list-style-type: none"> • omslachtig • Zeer beperkte betrouwbaarheid
C. Cilindrische lagen	<ul style="list-style-type: none"> • Eenvoudig • combinatie met 3-D Model • Grote structuren mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> • Gelaagdheid bodem • Meerdere sporen • Verbinding met echte spooromgeving
D. Volledig 3-D	<ul style="list-style-type: none"> • Commercieel verkrijgbaar 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspanning noodzakelijk • Discrepancie longitudinaal ↔ transversaal
E. Longitudinaal sec., semi 2-D	<ul style="list-style-type: none"> • Simp3l • Grote structuren mogelijk • Detailniveau mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> • Bestond nog niet • Nauwkeurigheid

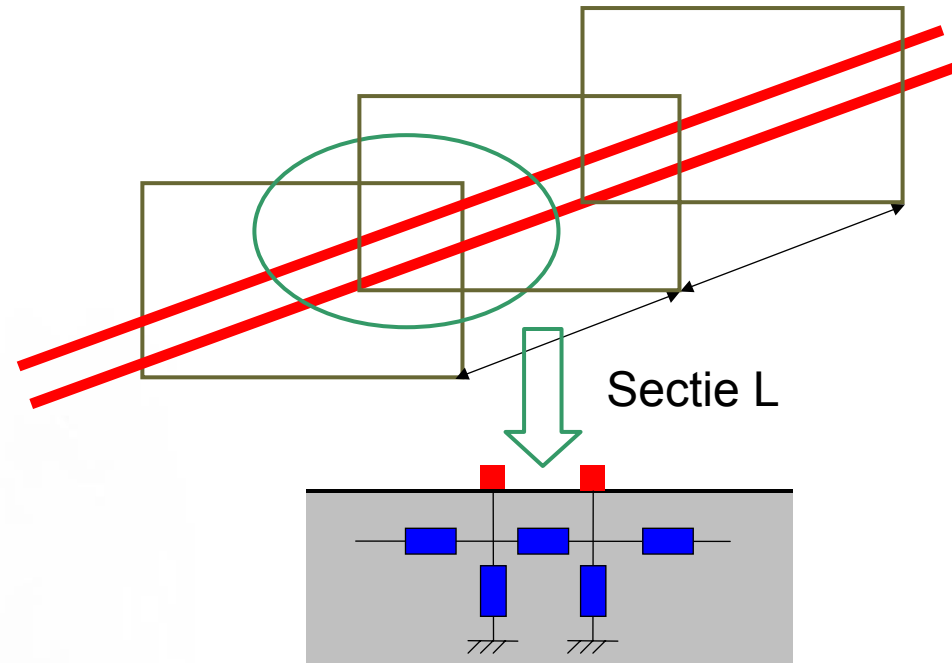
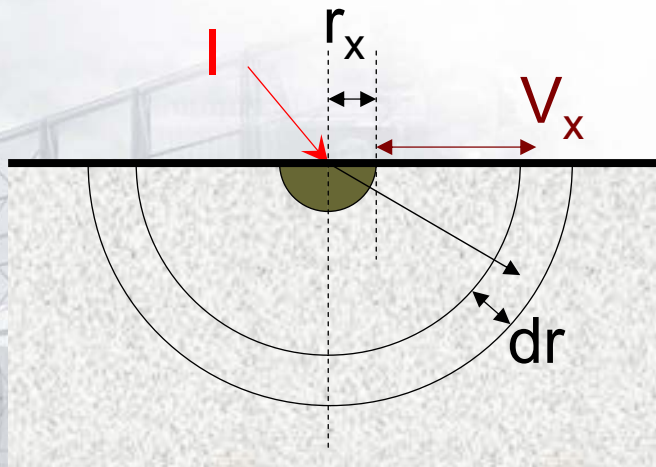
Modelontwikkeling

Op basis van bovenstaande argumenten:

- **Besluit Movares:**
- **In samenwerking met RET**
- **R&D project**
- **Hulpmiddel STARTRACK® ontwikkelen**

Fysisch model Basis

- Aard elektroden
- Bol geometrie
- Koppeling coëfficiënten
- Homogene bodem



$$\alpha_{ii} = \frac{\rho}{2\pi r_x}$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\rho}{2\pi d}$$

Fysisch Model Transversaal

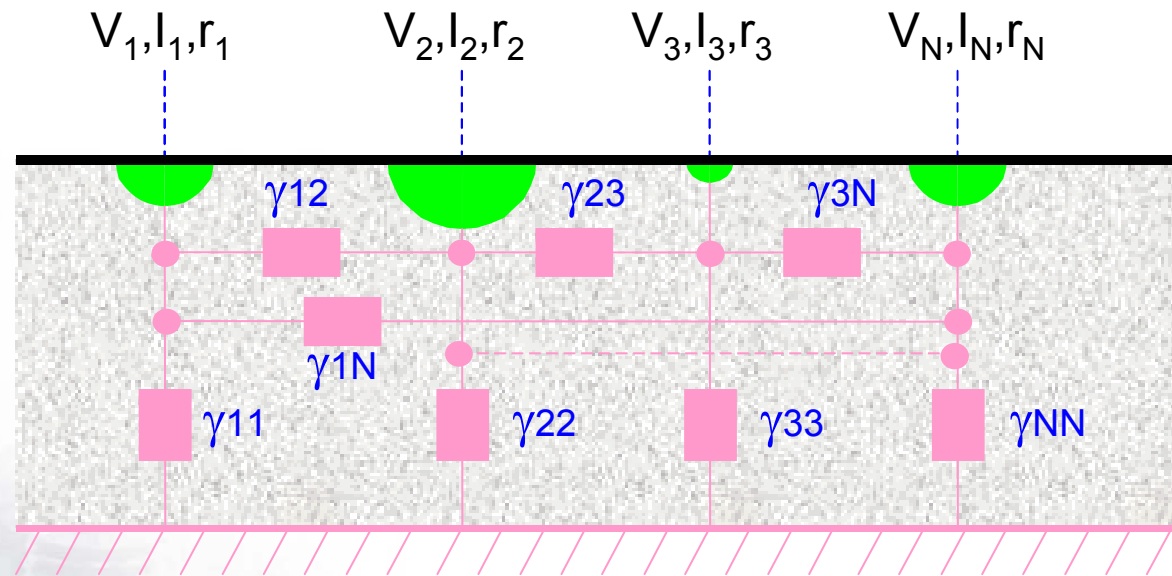
$$[V] = [A] \cdot [I]$$

$$[I] = [B] \cdot [V]$$

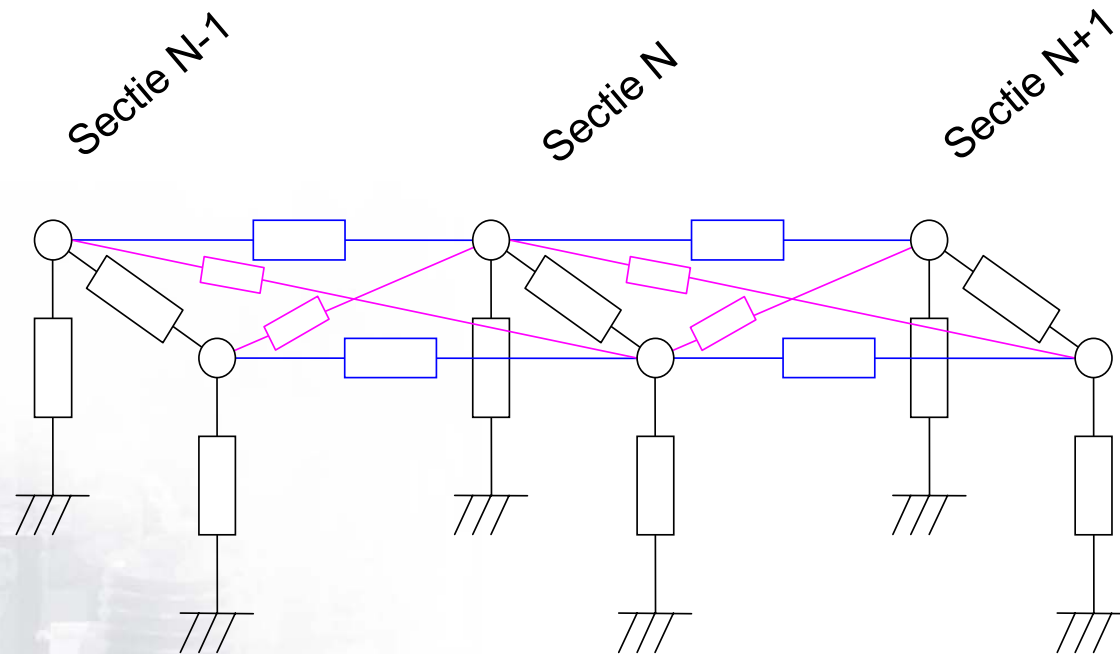
$$[B] = [A]^{-1}$$

$$[\Gamma] = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{1N} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{2N} \\ \gamma_{N1} & \gamma_{N2} & \gamma_{NN} \end{bmatrix}$$

$$\gamma_{11} = (\beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} + \dots + \beta_{1N}) = \sum_{n=1}^N \beta_{1i} \quad \gamma_{12} = \gamma_{21} = -\beta_{12} = -\beta_{21}$$



Fysisch Model Longitudinaal

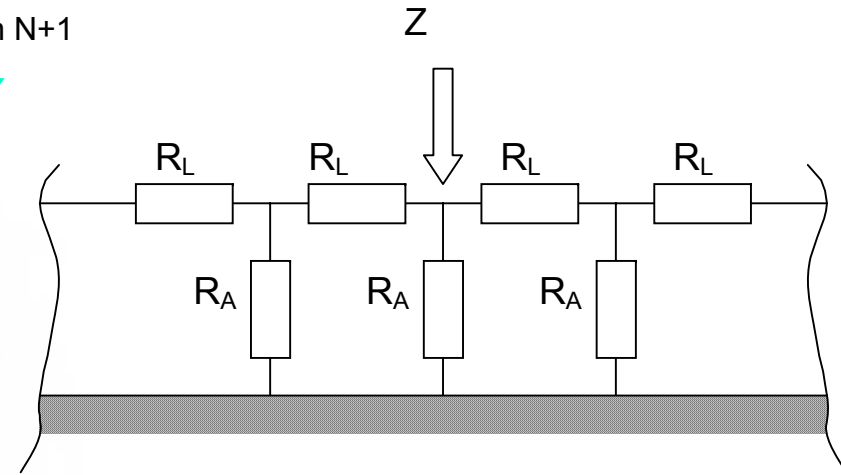
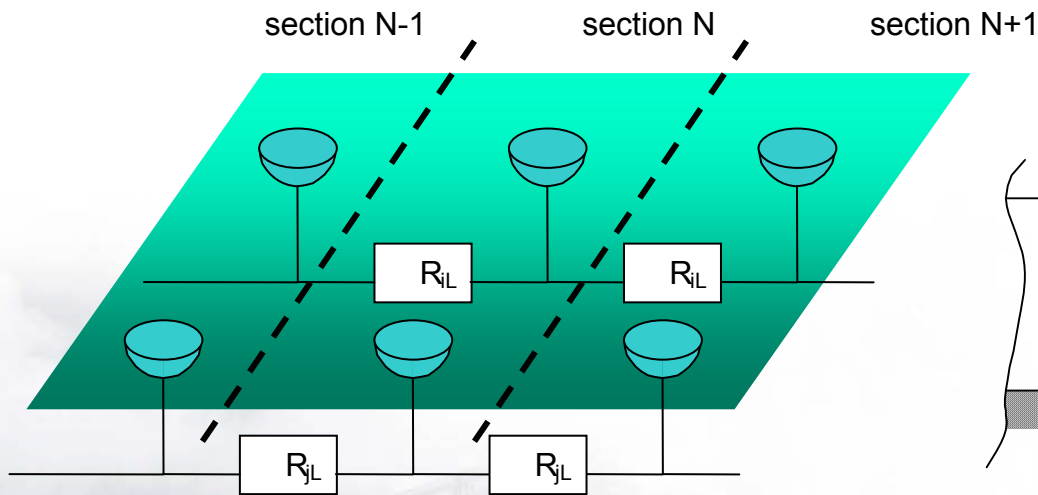


$$\alpha_{iL} = \frac{\rho}{2\pi r_{iL}}$$

$$r_{iL} = \frac{r_i}{\sum_{n=1}^N r_i} * \sqrt{\sum_{n=1}^N r_i^2}$$

$$R_{Li} = \frac{\rho}{\pi} * \frac{(L - 2 * r_{iL})}{r_{iL} * (L - r_{iL})}$$

Fysisch Model Koppeling



$$R_{Ai} = G_i + \frac{2 * G_i^2}{R_{Li}} + \frac{G_i}{R_{Li}} * \sqrt{4 * G_i^2 + 2 * R_{Li} * G_i}$$

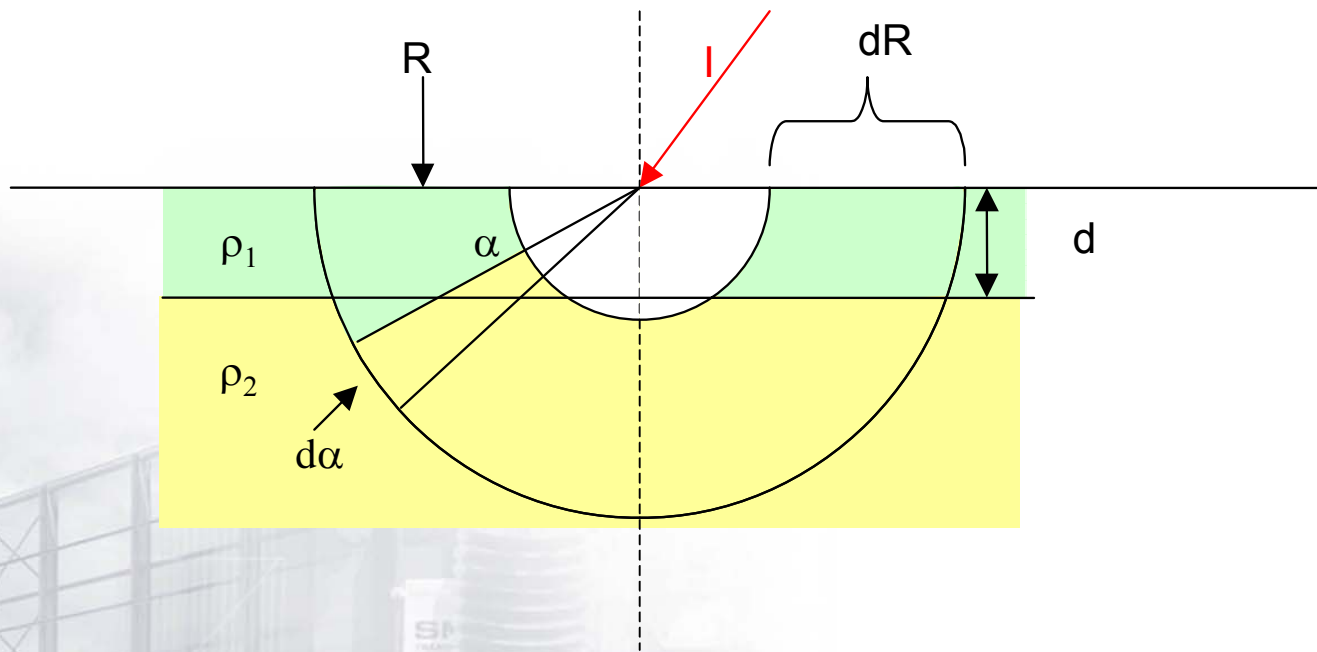
$$\delta_{ij} = \gamma_{ij} \quad i \neq j$$

$$\delta_{ii} = \frac{1}{R_{Ai}}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} & \delta_{1N} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdot & \cdot \\ \delta_{31} & \cdot & \delta_{33} & \cdot \\ \delta_{N1} & \cdot & \cdot & \delta_{NN} \end{bmatrix} = [\Delta]$$

Fysisch Model

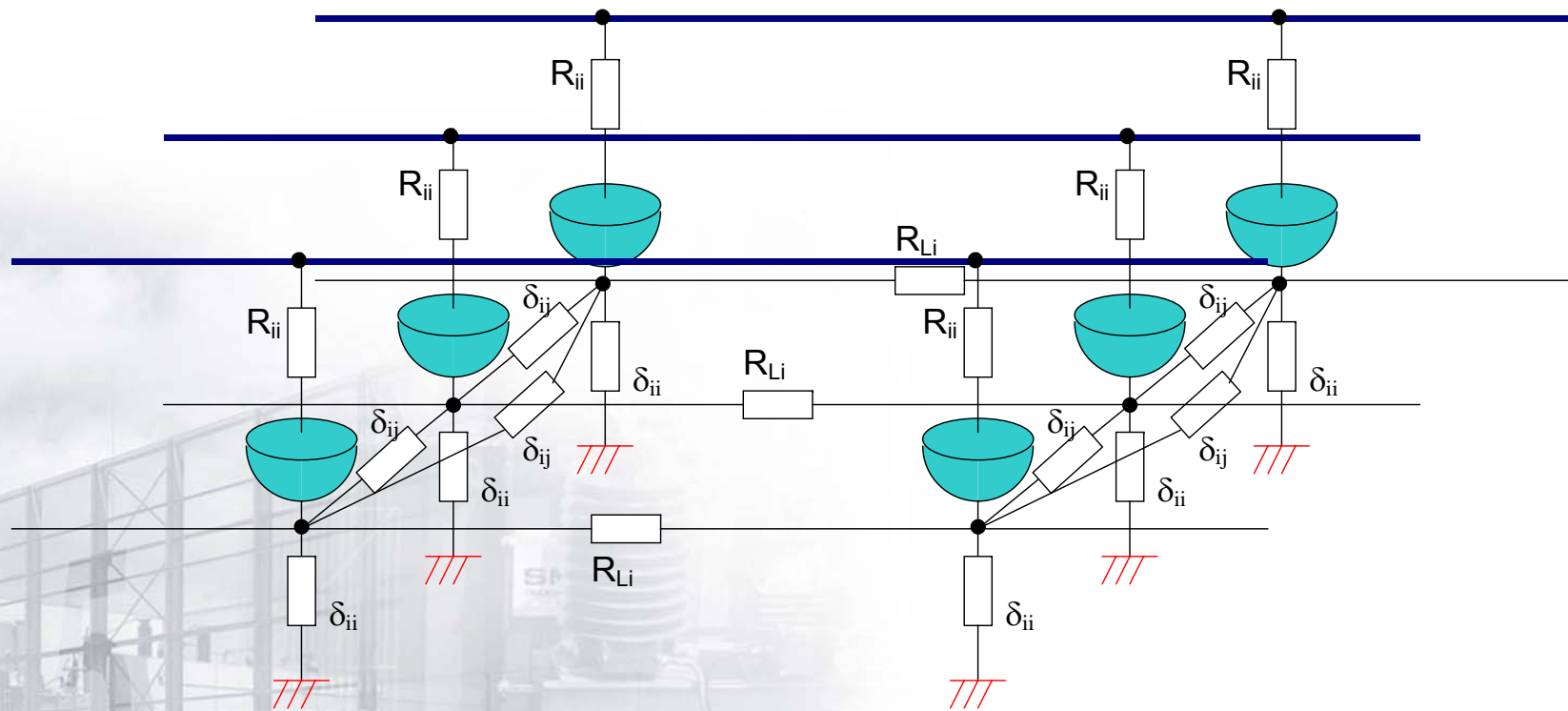
Meervoudig gelaagde bodem



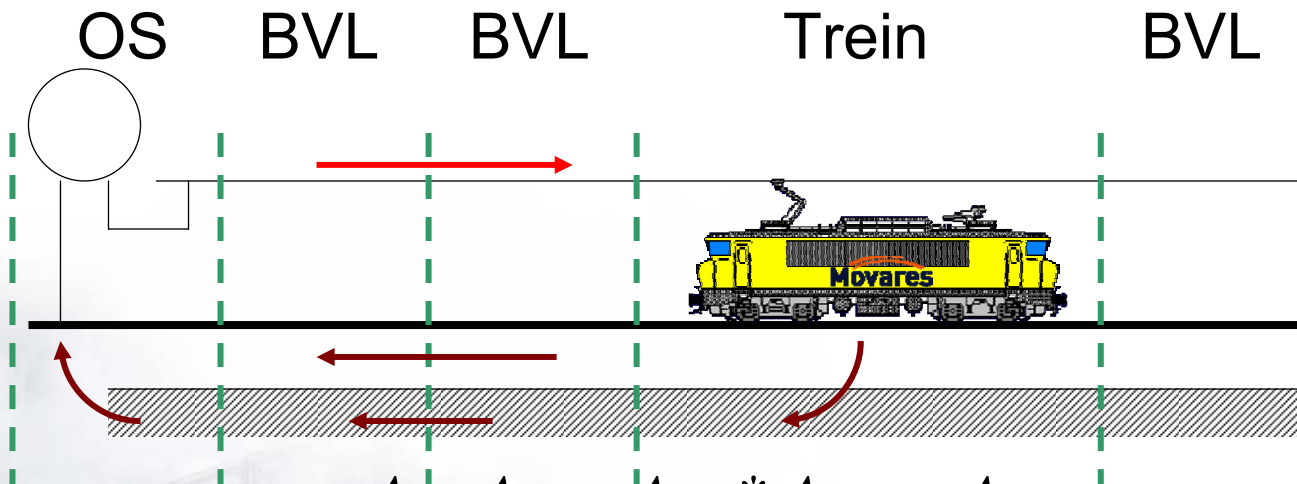
$$V_X = I_x * \frac{\rho_2}{2\pi} * \int_a^{\infty} \frac{1}{R^2} * \frac{\sqrt{R^2 + d^2}}{\left(\left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right) * d + \sqrt{R^2 + d^2} \right)} * dR$$

Fysisch Model

Overzicht



Numerieke Modellen meerpool techniek



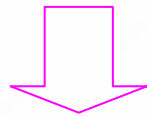
$$A = A_{Cat} * A_{Cat} * A_{Train} * A_{Cat}$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & & Z_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} [U'] \\ [I'] \end{bmatrix} = A * \begin{bmatrix} [U'' \\ [I''] \end{bmatrix}$$

Numerieke Modellen meerpool techniek

Problemen:

- Instabiliteit $L > 5 \text{ km}$ → Moeder Natuur niet instabiel



- Numeriek instabiliteit



- Ingenieursoplossing

Numerieke Modellen meerpool techniek

Oplossingen:

- **Fundamenteel, in algoritme:**

- Te lastig en tijdrovend, niet generiek

- **Brute Force**

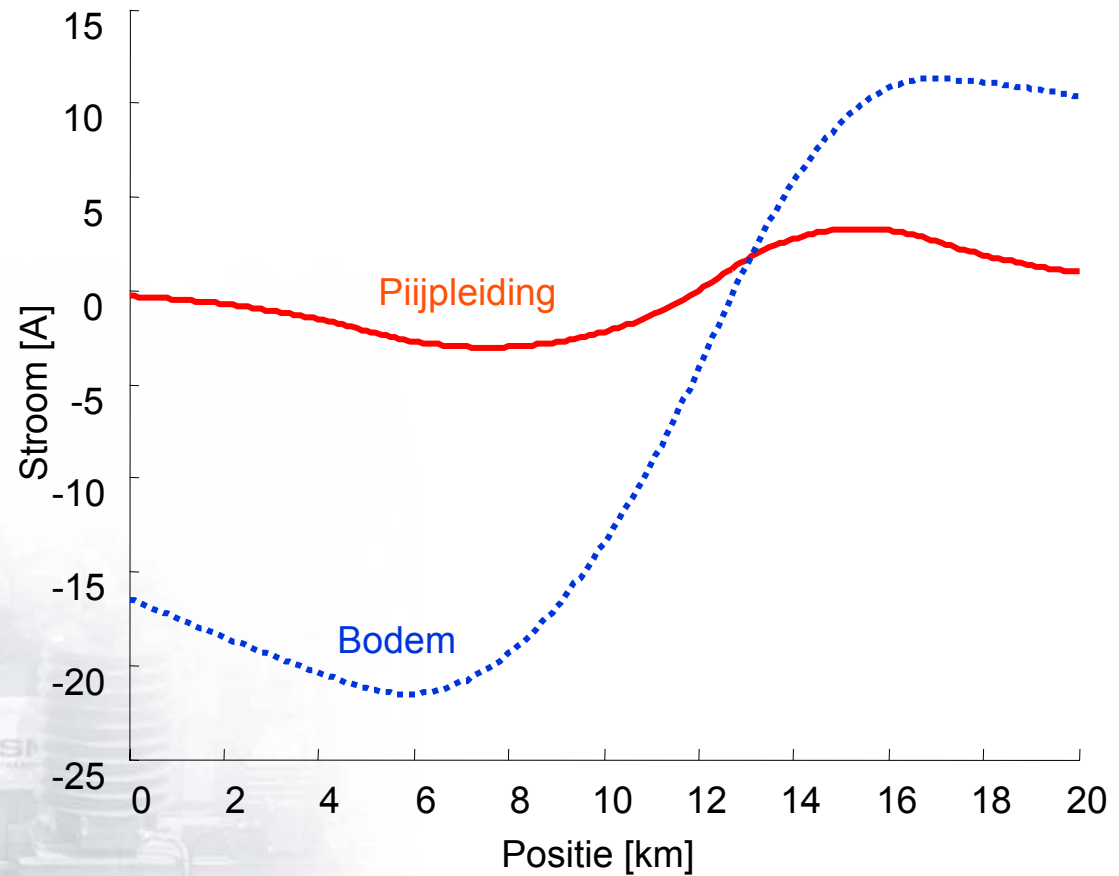
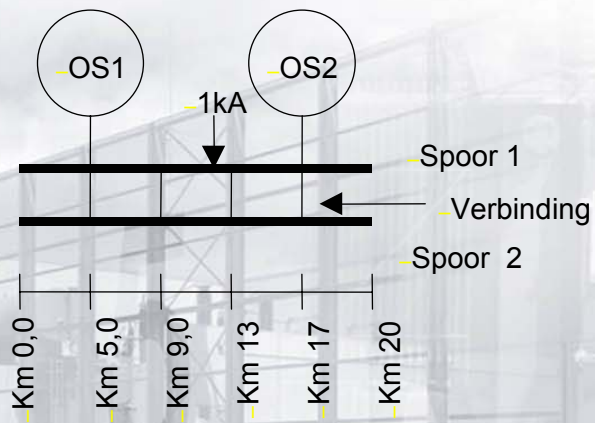
- Bepaal conditie getal matrix
- Bepaal op basis van conditie getal en vuistregel mantisse lengte
- Simuleer



Dit werkt!

mits voldoende zware computer! 😊

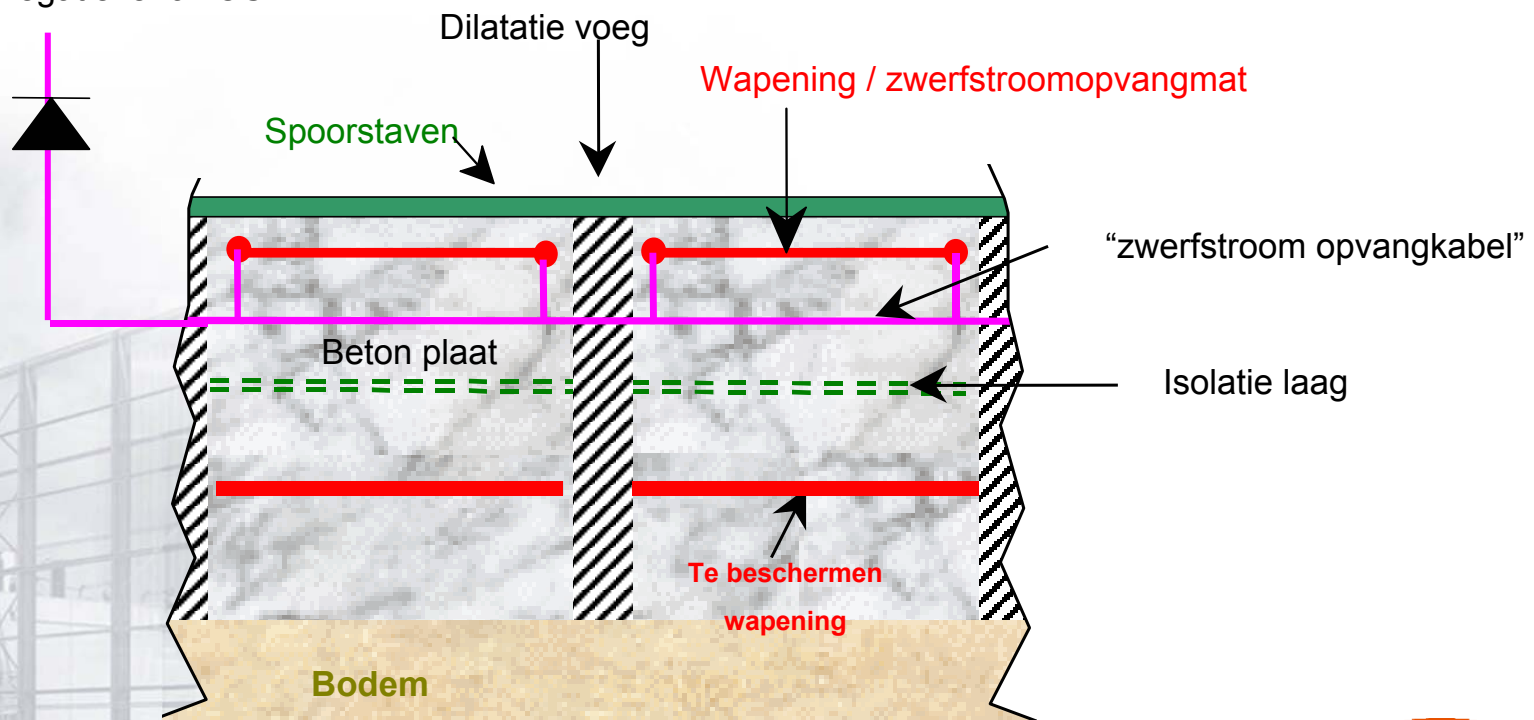
Voorbeelden pijpleiding



Voorbeelden

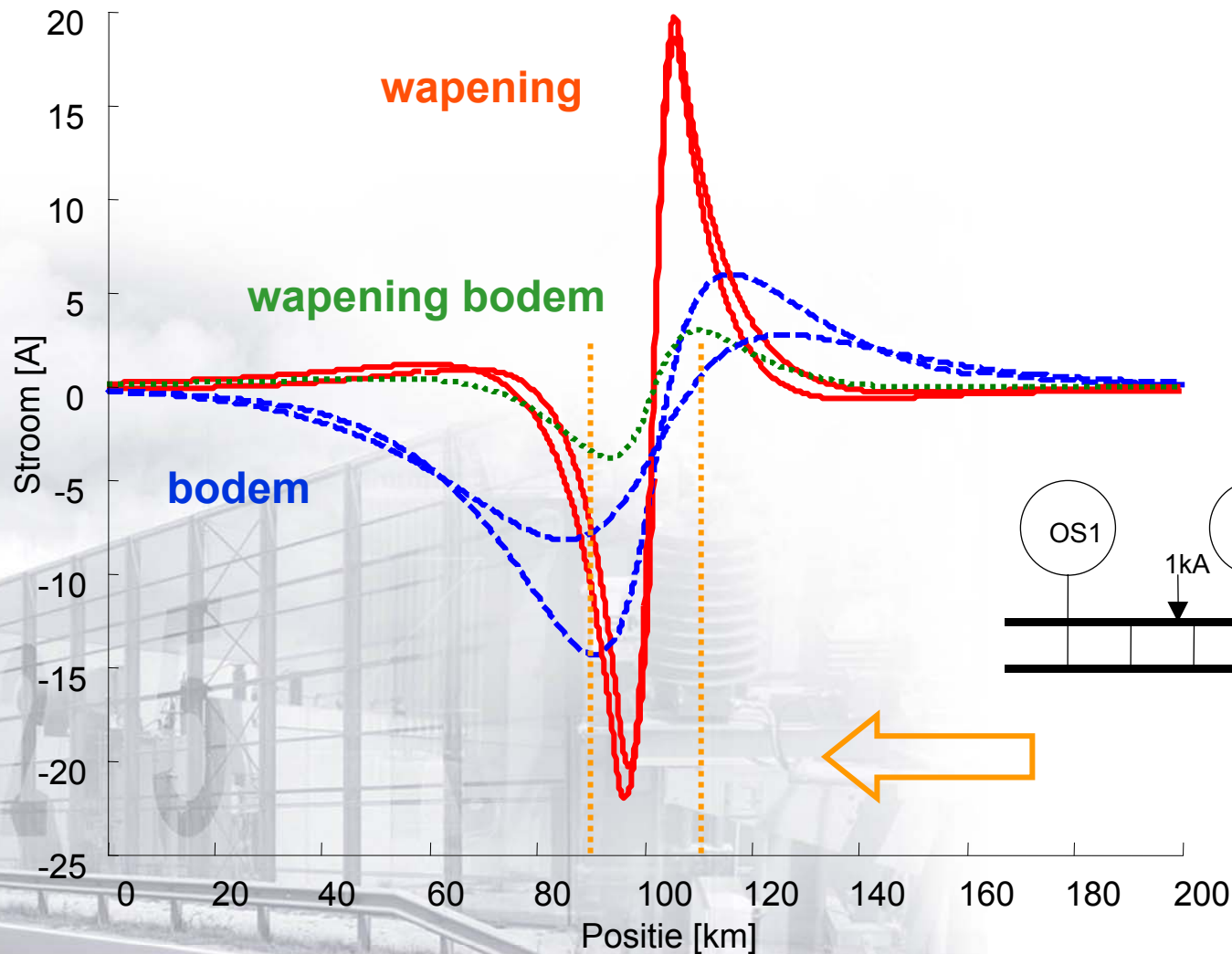
Zettingvrije plaat

Naar negatieve rail OS



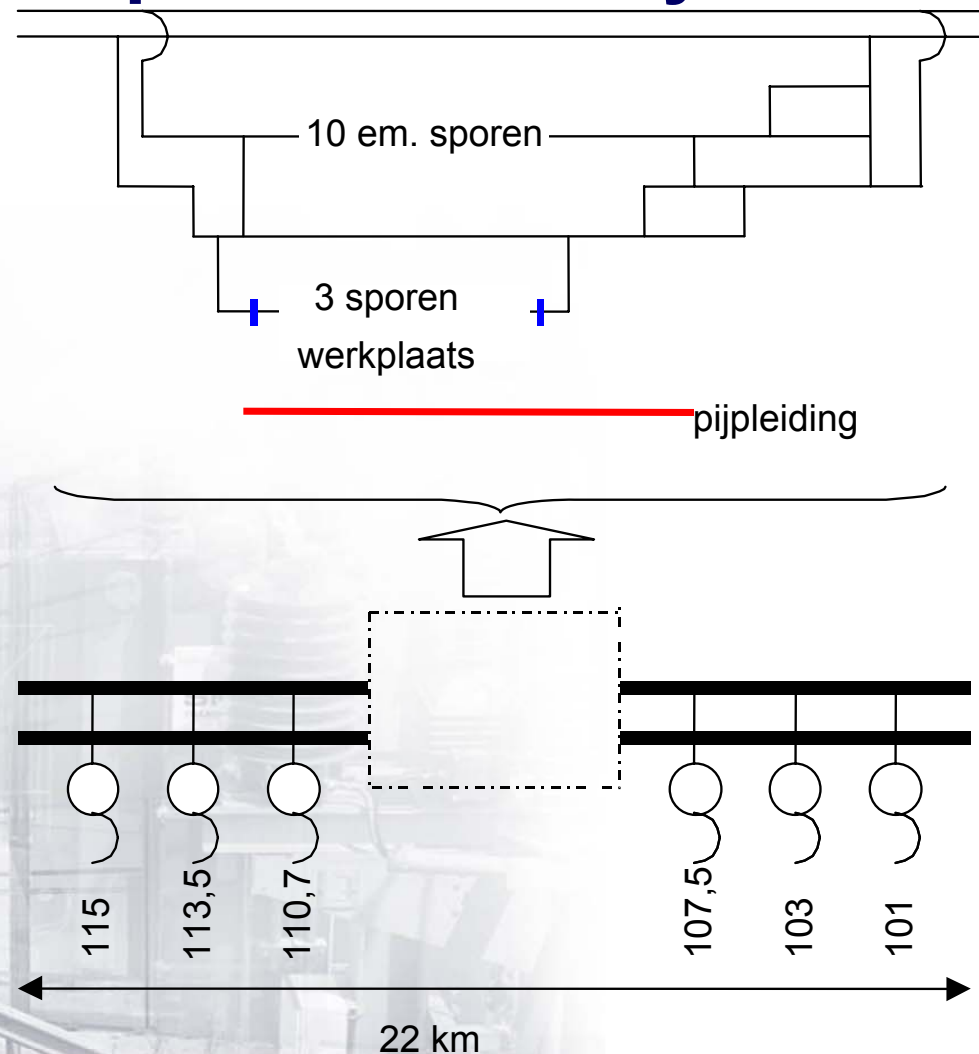
Voorbeelden

Zettingvrije plaat



Voorbeelden

Metro emplacement: Lay-out



RET Rotterdam

Voorbeelden

Metro emplacement: Belastingen

Positie	Locatie	Belasting
109.9	Emplacement	1600 A
109.9	Werkplaats	1600 A
106.7	Hoofdlijn	1600 A
109.0		1600 A
109.5		1600 A
112.1		1600 A

RET Rotterdam

Isolatie las spoor aan één zijde werkplaats kortgesloten

 Movares

Voorbeelden

Metro emplacement: Resultaten

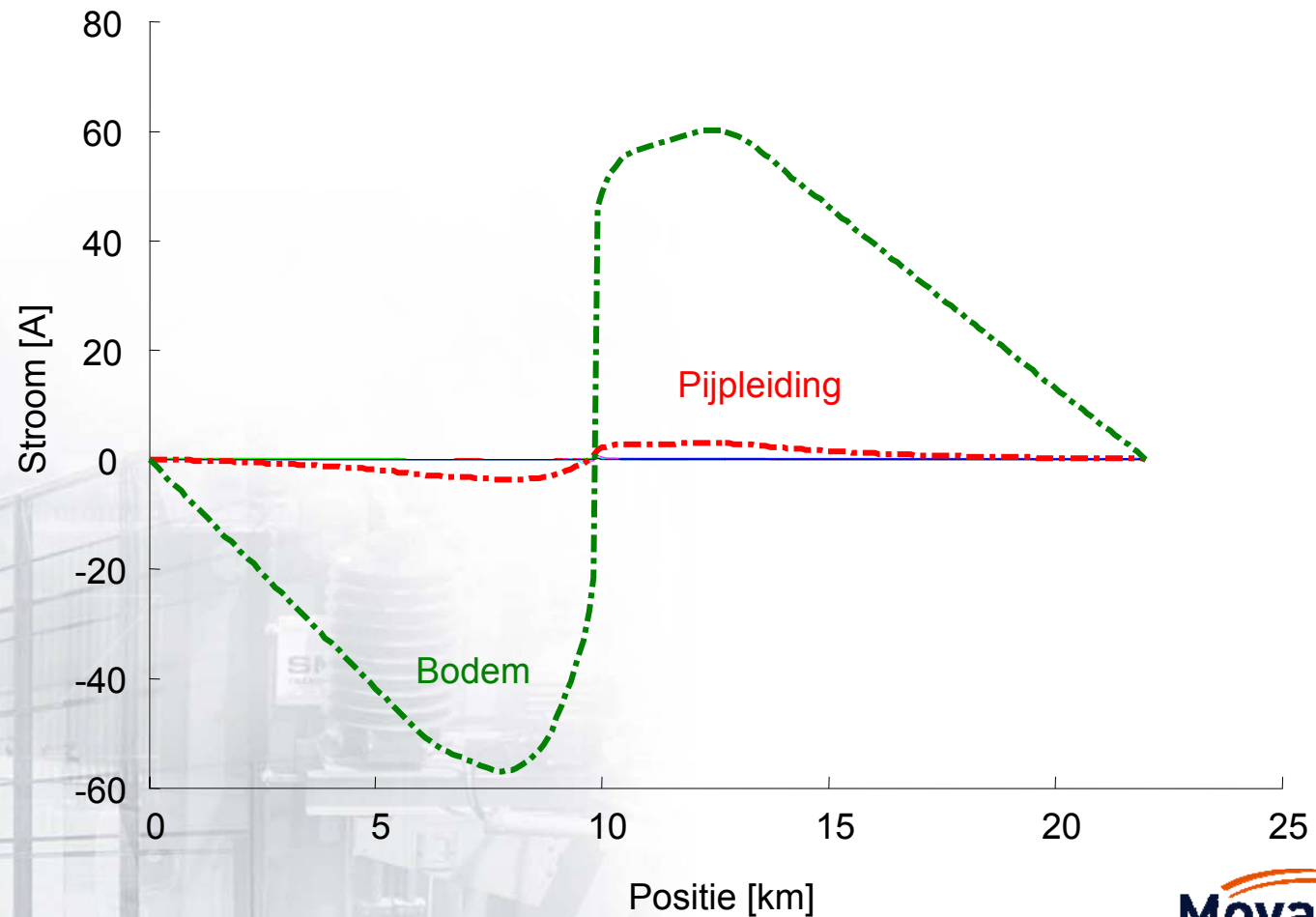
Spanningen	Pijpleiding – Bodem	- 0.26 V
	Spoor – Bodem	61.1 V
Stromen	Pijpleiding	3.7 A
	Bodem	60.0 A

Bovenstaande tabel: maximum waarden aanwezig

Simulatie resultaten komen overeen met bekende meetgegevens

Voorbeelden

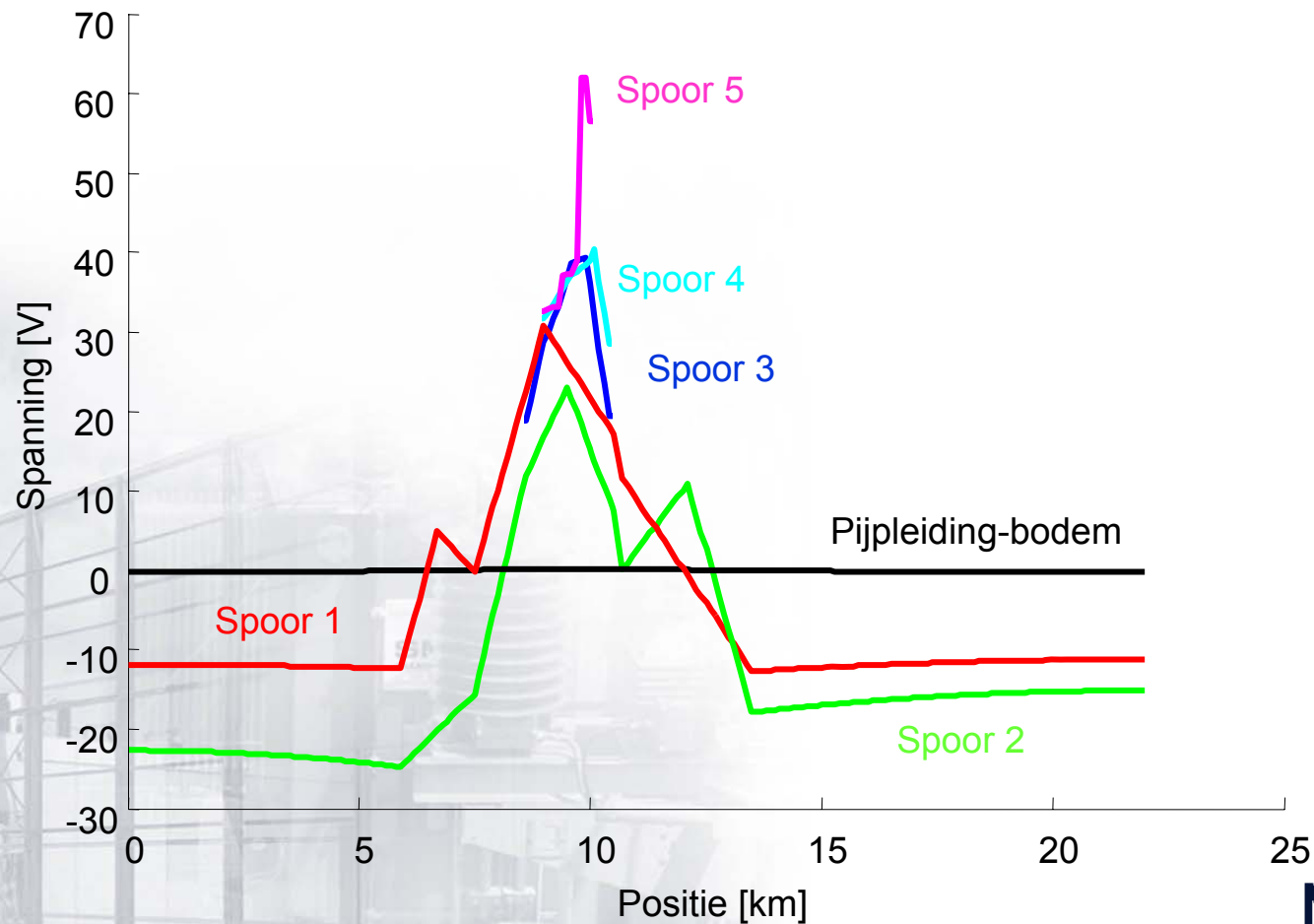
Metro emplacement: Resultaten



RET Rotterdam

Voorbeelden

Metro emplacement: Resultaten



RET Rotterdam

Conclusies

- **Beperkte inspanning noodzakelijk**
- **Voldoende nauwkeurigheid**
- **Invoergegevens bodem moeilijk te verkrijgen**
- **Compromis:**

Fysisch/Mathematische correctheid ↔ technisch nut

- **Waardevolle ontwerphulp**

Zwerfstroom niveau ↔ ontwerpoplossingen ↔ kosten effectief

Dankbetuiging

- **Richel van der Schulp, RET Rotterdam**
- **Leo Vliegenthart, RET Rotterdam**
- **Diederik Verheul, Movares**
- **Gerrit Disberg, Movares**

Net toen ik het antwoord wist,

veranderen ze de vraag,.....



**Movares**

Toegift

Eenvoudige handberekening Schiphol tunnel*

- Tweesporige treintunnel
- Lengte 4000 m
- Eigen voedingspunt aan begin tunnel
- Gescheiden van buitenwereld
- Gemiddelde tractie stroom 2000 A
- Levensduur 100 jaar

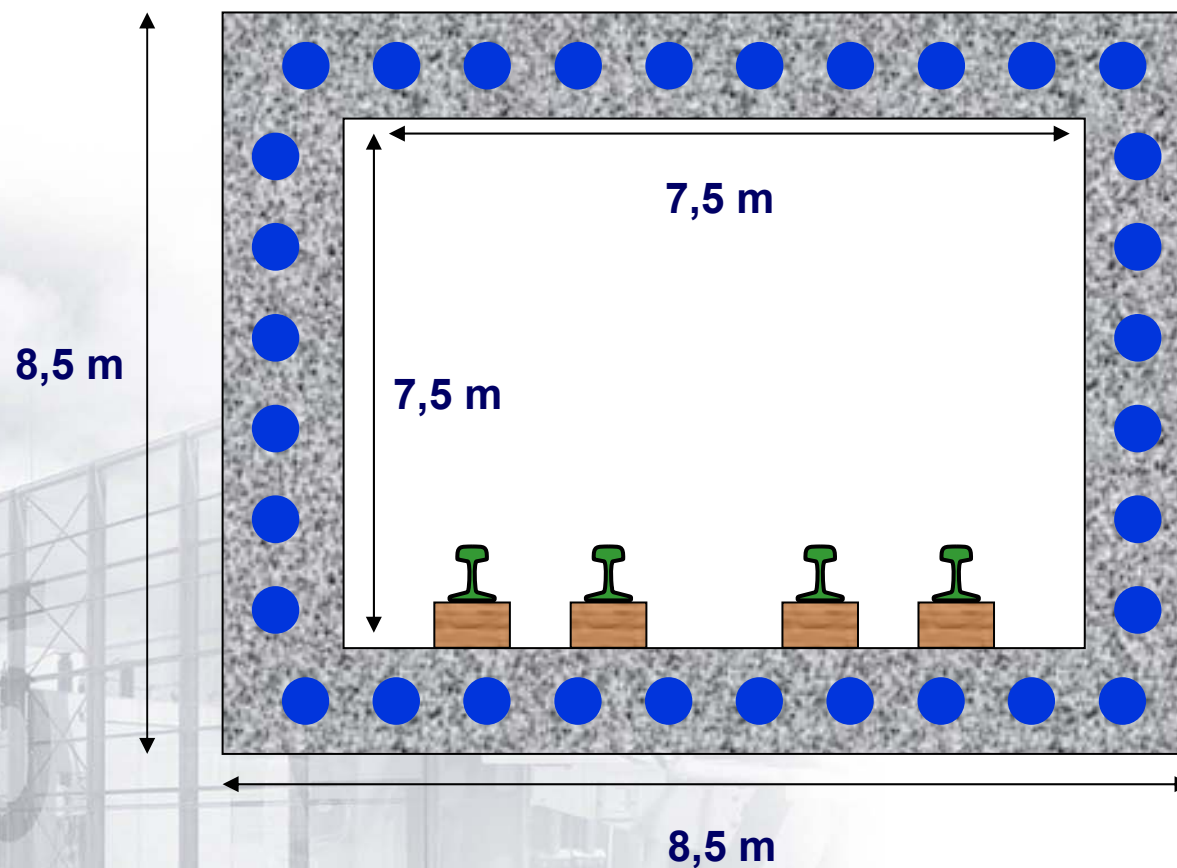
Gevraagd:

- Benodigde spoorisolatie
- Benodigde extra wapening

* Aangepast aan de hand van de oorspronkelijke berekening uit de zeventiger jaren door het NS bureau IS 6.1.3

Toegift

Overzicht situatie



Toegift

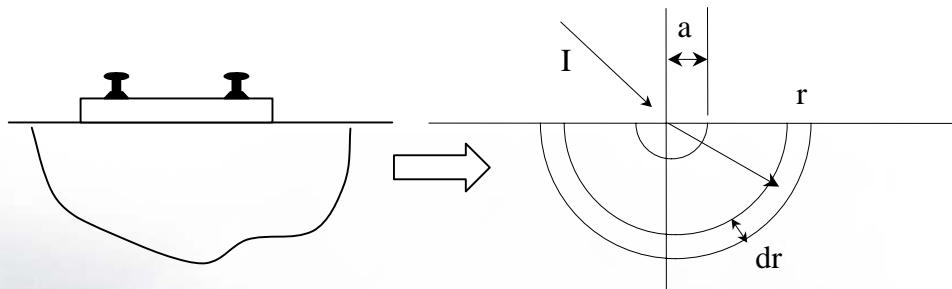
Overzicht situatie

Gegevens:

- Soortelijke massa beton: 2000 kg/m³
- Soortelijke massa staal: 7800 kg/m³
- Hoeveelheid wapening: 150 kg/m³ beton
- Soortelijke weerstand beton: 100 Ωm
- Soortelijke weerstand staal: 200 x 10⁻⁹ Ωm
- Weerstand retourcircuit: 22 mΩ/km

Toegift

Berekening weerstand



$$V(x) = \int_a^x \frac{\rho I}{\pi l r} dr = \frac{\rho I}{\pi l} * \ln\left(\frac{x}{a}\right)$$

Hypothetische stroominjectie oorsprong, retour op oneindig

stroominjectie op
twee punten

$$V_1(x) = \frac{\rho I}{\pi l} * \ln\left(\frac{x+c}{a}\right) \quad \text{voor } x \geq -c+a$$

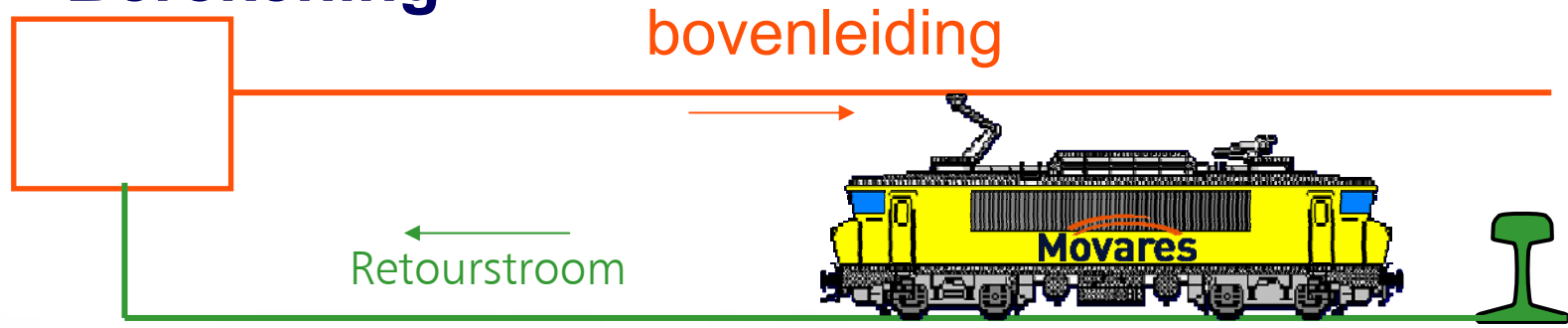
$$V_2(x) = -\frac{\rho I}{\pi l} * \ln\left(\frac{c-x}{a}\right) \quad \text{voor } x \leq c-a$$

$$V_{tot}(x) = \frac{\rho I}{\pi l} \cdot \ln\left(\frac{x+c}{c-x}\right) \quad \text{voor } a-c \leq x \leq c-a$$

$$\Delta V = V(c-a) - V(a-c) = \frac{2\rho I}{\pi l} * \ln\left(\frac{2c-a}{a}\right)$$

$$R = \frac{2\rho}{\pi l} * \ln\left(\frac{d-a}{a}\right)$$

Toegift Berekening



$$V_{\text{spoorstaaf}}(x) = I_{\text{tractie}} * R_{\text{retour}} * x$$

$$I_{\text{zwerf}}(x) = \frac{V_{\text{spoorstaaf}}(x)}{R_{\text{beton}} + R_{\text{iso}}} * I_{\text{tractie}} * R_{\text{retour}}$$

$$I_{\text{zwerftotaal}} = \int_0^{L/2} I_{\text{zwerf}}(x) * dx = \frac{R_{\text{retour}}}{R_{\text{beton}} + R_{\text{iso}}} * I_{\text{tractie}} * \left(\frac{L^2}{8} \right)$$

Toegift

Berekening weerstand

- Volume beton $64 \times 10^3 \text{ m}^3$
- Massa staal $9,6 \times 10^6 \text{ kg}$
- Volume staal $1,23 \times 10^3 \text{ m}^3$
- r verv. halve cilinder staal $0,44 \text{ m}$
- Breedte zool spoorstaaf $0,14 \text{ m}$
- r verv. halve cilinder staal $0,18 \text{ m}$
- r verv. halve cilinders berek. $0,33 \text{ m}$
- Gemiddelde afstand spoor-wapening 2 m
- Rspoor-beton-wapening $27 \text{ m}\Omega$
- Rspoor-beton-wapening voor 1 m $110 \text{ }\Omega\text{m}$

Toegift

Resultaten berekeningen

- Totale zwerfstroom 816 A (=41% $I_{tractie}$)
- Verlies aan staal 744 x 10³ kg (100 jaar)
- Procentueel verlies 8 %

Maar let op: ervaringsfeit:

- lokaal kan een factor 3-5 meer verlies optreden!

Conclusie dit is niet toelaatbaar!

Toegift

Ontwerp modificaties

- **Toevoegen van extra isolatie onder spoorstaaf**
 - Circa 2500 Ω per bevestiging (nieuw)
 - Circa 6 bevestigingen per meter
 - Extra weerstand circa 400 Ω m
- **Meer wapening, 300 kg/m³**

Resultaat:

- **Totale zwerfstroom 174 A**
- **Procentueel verlies 0,8 %**

Dit is toelaatbaar !

Net toen ik het antwoord wist,

veranderen ze de vraag,.....




Movares