

CT3041

Geometrisch en constructief ontwerp van wegen en spoorwegen

Deel D. Constructief ontwerp van spoorwegen

September 2005

Prof.dr.ir. C. Esveld



College CT3041

Geometrisch en constructief ontwerp van wegen en spoorwegen

Deel D. Constructief ontwerp van spoorwegen

Prof.dr.ir. C. Esveld

TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT

Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen

Sectie Verkeersbouwkunde

Leerstoel Railbouwkunde

Voorzijde: foto hogesnelheidstrein Korea

September 2003	CT3041, Deel D	Gewijzigde herdruk
----------------	----------------	--------------------

VOORWOORD

De in dit dictaat aangeboden stof vormt een eerste kennismaking met het vakgebied Railbouwkunde dat samen met Wegbouwkunde verenigd is in de sectie Verkeersbouwkunde van de Subfaculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft.

In het kader van dit college CT3041 blijft deze kennismaking beperkt tot de functie, het ontwerp en de constructie en de aanleg en onderhoud (summier) van de spoorwegbovenbouw in het algemeen. Onderwerpen als dynamica, stabiliteit, controle en kwaliteitsbewaking van civiele railconstructies blijven hier buiten beschouwing. Zij komen wel uitgebreid aan de orde in het 4e-jaars basiscollege CT4870, Railway Engineering, en in het 5e-jaars college CT5870, Railbouwkunde b.o.

In Bijlage B is een afleiding van de typische vetergangbeweging, voortkomend uit de samenwerking tussen wiel en rail, gegeven. Verder wordt met het oog op de computerondersteunde oefening (CAI Railstruc, engelstalig, zie Bijlage A) en de CAD oefening Weg- en spoorwegontwerp bij dit college CT3041 ook kennis veronderstelt van een aantal eenvoudige berekeningsmethoden voor de spoorwegbovenbouw. Omdat niet iedere student het vak CT3110, 'Elastostatica van slanke structuren' zal volgen is daarom in Bijlage C, 'Theorie elastisch ondersteunde spoorstaven' in het kort de noodzakelijke theorie behandeld voor zover deze van belang is voor de railbouwkunde. Als verder hulpmiddel fungeren daarbij de Bijlagen D, E en F met overzichten van respectievelijk symbolen, formules en tabellen.

Volledigheidshalve wordt nog vermeldt dat functioneel-geometrische aspecten van spoorwegen uitgebreid aan de orde komen in de collegedictaten Verkeer, CT3040 en Verkeerstechniek, CT3041 (deel A).

Dank gaat uit naar de heren Van Himbergen en De Jong van NedTrain Consulting voor hun bijdragen op het gebied van spoorwegmaterieel.

INHOUD

1	INLEIDING	1
1.1	Historische ontwikkeling.....	1
1.2	Spoorwegen.....	2
1.3	Tram en metro.....	3
1.4	Light-rail.....	4
1.5	Actuele ontwikkelingen.....	4
2	DEFINIËRING BOVENBOUW VAN DE SPOORWEG	6
2.1	Indeling.....	6
2.2	Basisprincipe wiel/rail techniek.....	6
2.3	Algemene eisen bovenbouwconstructie.....	7
2.4	Keuze bovenbouwstelsel.....	7
2.5	Wissels en kruisingen.....	9
2.6	Geometrie wiel/rail.....	11
3	BELASTINGEN	12
3.1	Belastingsparameters.....	12
3.2	Classificatie van spoorwegen.....	13
3.3	Spookkrachten.....	13
3.4	Ontsporingkracht.....	14
3.5	Krachten in een boog.....	14
3.6	Kritische dwarskracht.....	14
3.7	Kritische dwarsversnelling.....	15
3.8	Temperatuurkrachten.....	15
3.9	Temperatuuffecten voegloos spoor op kunstwerken.....	16
4	CONSTRUCTIE ELEMENTEN BOVENBOUW	17
4.1	Voegloos spoor.....	17
4.2	Spoorstaven.....	18
4.2.1	Profielsoorten.....	18
4.2.2	Gecombineerde belasting.....	19
4.2.3	Kritische buigspanning in de railvoet.....	20
4.2.4	Kritische schuifspanning in de railkop.....	20
4.3	Lasverbindingen.....	20
4.3.1	Typen.....	20
4.3.2	Constructieve lassen.....	21
4.3.3	Metallurgische lassen.....	23
4.4	Dwarsliggers.....	25
4.4.1	Soorten.....	25
4.4.2	Functies.....	25
4.4.3	Houten dwarsliggers.....	25
4.4.4	Betonnen dwarsliggers.....	26
4.4.5	Vergelijking tweebloksdwarsligger en monobloksdwarsligger.....	27
4.4.6	Vergelijking betonnen dwarsligger en houten dwarsligger.....	28
4.5	Bevestigingen.....	29
4.5.1	Typen.....	29
4.5.2	Functies.....	29
4.5.3	Indeling bevestigingen.....	29

4.5.4	Rughellingplaten	30
4.5.5	Elastische bevestigingen	30
4.6	Ballastbed	32
4.6.1	Samenstelling	32
4.6.2	Soorten	33
4.6.3	Ballastspecificatie	33
5	BOVENBOUWSYSTEMEN	34
5.1	Ontwikkeling en Indeling	34
5.2	Ballastspoor	35
5.2.1	Klassiek ballastspoor	35
5.2.2	Ballastspoor op kunstwerken	35
5.2.3	Asfalt in de spoorbaan	36
5.2.4	Ballastmatten	36
5.2.5	Dwarsliggeromhulling in ballastbed	37
5.3	Ballastloos spoor	38
5.3.1	Directe bevestiging	38
5.3.2	Prefab platenspoor	38
5.4	Ingestorte dwarsliggersystemen	39
5.5	Geluids- en trillingshinder	39
5.5.1	Geluidshinder	39
5.5.2	Trillingshinder	39
5.5.3	Elastisch ingegoten dwarsligger	40
5.5.4	Elastisch ingegoten blokkenspoor	41
5.5.5	Elastisch ingegoten spoorstaaf	41
5.6	Bijzondere uitvoeringen	42
5.6.1	Afgeveerde betonplaat	42
5.6.2	Superelastische bevestigingen	42
6	AARDEBAAN	43
6.1	Eisen 43	
6.2	Geometrie	43
6.3	Samenstelling.....	45
6.4	Overgangsconstructies	45
7	TRAMBAANCONSTRUCTIES	46
7.1	Open trambaanconstructies	46
7.2	Gesloten trambaanconstructies	46
8	KRAANBAANCONSTRUCTIES	48
9	BOVENBOUW GROTE PROJECTEN	49
9.1	Hoge Snelheids Lijnen	49
9.2	Magneetweefbanen.....	51
9.3	Bovenbouw voor hoge aslasten.....	51
10	AANLEG EN INSTANDHOUDING	52
10.1	Aanlegmethoden ballastspoor	52
10.2	Instandhouding.....	52
10.3	Onderhoudsmethoden	53
10.3.1	Veiligheid	53
10.3.2	Systematisch onderhoud	53
10.3.3	Onderhoudsbewerkingen	53
10.3.4	Conflict exploitatie en onderhoud	54

10.3.5	Stopmachines	54
10.3.6	Stopprincipe	54
10.3.7	Aftakeling spoorgeometrie	55
10.3.8	Stone blowing	55
10.3.9	Ballaststabilisator	55
10.3.10	Slijptreinen	56
10.3.11	Kettingormachine	56
10.3.12	Hoge temperaturen	56
10.3.13	Spoorstaven	57
10.4	Vernieuwing	58
10.4.1	Criteria	58
10.4.2	Mechanische spoorvernieuwing	58
10.4.3	Spoorsectiemethode	58
10.4.4	Continuumethode	58
10.4.5	Snelheidsbeperkingen	58
10.4.6	Spoorbouwtreinen	59
10.5	Aanlegmethoden ballastloos spoor.....	59
11	VERSCHILLEN TUSSEN WEGEN EN SPOORWEGEN	60
12	INTEGRAAL ONTWERPPROCES.....	61
12.1	Inleiding.....	61
12.2	Ontwerpproces.....	62
12.3	Procesbeheersing	62
12.4	De praktijk	62
12.4.1	Inventarisatie	63
12.4.2	Quick-scan	63
12.4.3	Haalbaarheidsstudie	63
12.4.4	Voorontwerp & Definitief Ontwerp	63
12.4.5	Besteksfase	65
12.4.6	Detailering	66
13	MATERIEEL	67
13.1	Reizigersmaterieel	67
13.1.1	Treinstel	67
13.1.2	Trek-duw trein	68
13.1.3	Getrokken trein	68
13.1.4	Enkeldeks versus dubbeldeksmaterieel	69
13.1.5	Bijzonder materieel	70
13.1.6	Locomotieven	72
13.1.7	Ontwikkelingen internationaal	73
13.2	Goederenmaterieel	74
13.2.1	Keuze wagentype	74
13.2.2	Wagentypen	74
13.2.3	Infrastructuurcategorieën	76
13.2.4	Aandrijving	76
13.2.5	Draaistellen en loopwerken	77
13.2.6	Onderhoud	82
14	TRACTIEVOORZIENING	83
14.1	Voedingssystemen volgens EN 50163.....	83
14.2	Systeem 1500 V _{DC}	83
14.3	Systeem 25 kV _{AC}	85
14.4	Theoretische beschouwing van het magnetische veld	86
14.5	Theoretische beschouwing van het elektrische veld	89

14.6	Kunstwerken 25 kV	90
15	BOVENLEIDINGTECHNIEK	93
15.1	Inleiding bovenleidingstechniek	93
15.1.1	Functie bovenleiding	93
15.1.2	Maximale snelheid bij een bovenleidingsstelsel	94
15.1.3	Snelheidsverhogende maatregelen	94
15.1.4	Simulaties dynamisch gedrag	95
15.1.5	Bovenleidingsstelsels voor Heavy rail	95
15.1.6	Vast bovenleidingsstelsel versus beweegbaar bovenleidingsstelsel	96
15.2	Opbouw bovenleidingontwerp	98
15.3	Bovenleidingsstelsels in Nederland	99
15.4	Bovenleidingsstelsels buitenland	100
15.4.1	Duitsland	100
15.4.2	Frankrijk	100
15.4.3	Japan	101
15.5	Invloed spoorbouw	102
16	BEVEILIGING	103
16.1	Inleiding	103
16.2	Spoorwegveiligheid	103
16.2.1	Spoorwegbeveiliging	104
16.3	Reglementering	105
16.3.1	Reglementen	105
16.3.2	Het seinstelsel	105
16.4	Technische voorschriften	105
16.5	Beveiliging	106
16.5.1	Beveiligingsprincipes	106
16.5.2	Beveiligingsinstallaties	111
16.6	Euro-interlocking	114
16.6.1	Voordelen	114
16.6.2	Realisering van de doelen	115
16.6.3	Project tijdplan	115
16.7	European Rail Traffic Management System	115
16.7.1	Voordelen	115
16.7.2	Geschiedenis	115
16.7.3	ERTMS Levels	117
17	REFERENTIES	118
17.1	Literatuur	118
17.2	Websites	118
BIJLAGE A	DIMENSIONERING BOVENBOUW	119
CAI RAILSTRUC	119	
Opbouw van de lessen	119	
Titels van de lessen	119	
BIJLAGE B	VETERGANGBEWEGING	120
BIJLAGE C	THEORIE ELASTISCH ONDERSTEUNDE SPOORSTAVEN	121
Ondersteuningsmodellen	121	
Winkler (veertjesmodel)	121	
Discrete ondersteuning	121	
Continue ondersteuning	122	
Benaderingsberekening discreet spoor	122	

Voegloos spoor op continue elastische ondersteuning.....	122
Andere randvoorwaarden.....	124
Dynamic amplification factor.....	124
BIJLAGE D SYMBOLEN.....	125
BIJLAGE E FORMULES	127
Ondersteuningsmodellen	127
Zimmermann model	127
Verticale doorbuiging spoorstaaf:.....	127
Buigend moment in spoorstaaf:.....	127
Verdeelde reactiekracht:	127
Dynamische Amplificatie Factor:.....	127
Vermoeiingsspanningen in spoorstaven	127
Vermoeiingsspanningen in spoorstaven	128
Krachten in bogen:	128
Kritische dwarskracht (Prud'homme):	129
Kritische dwarsversnelling in bogen.....	129
Temperatuur effecten in voegloos spoor.....	129
Discrete ondersteuning rail.....	130
Continue ondersteuning rail	130
Dwarsligger (drukspanning op)	130
Ballastbed (drukspanning op).....	130
BIJLAGE F TABELLEN	131
Elasticiteitsconstanten orde-grootte	131
Railprofiel geometrie	131
Railprofiel. afmetingen en sterkte gegevens	131
Railstaal eigenschappen	131
Toelaatbare buigspanning railvoet (σ_{rf}).....	131
Spanningsreductie in bovenbouw	132
Toelaatbare schuifspanning railkop	132
Toelaatbare drukspanning op railondersteuning:.....	132
Toelaatbare drukspanning op ballastbed:.....	132
FIGUREN	
Figuur 1: Spoorwegongeluk bij Weesp	1
Figuur 2: Transrapid	5
Figuur 3: Geïntegreerd model voertuig-bovenbouw	6
Figuur 4: Klassieke spoorconstructie. Langsprofiel	8
Figuur 5: Klassieke spoorconstructie. Dwarsdoorsnede.....	8
Figuur 6: Gewoon wissel en wisselschema	9
Figuur 7: Gewoon rechts wissel.....	9
Figuur 8: Puntstuk	9
Figuur 9: Hogesnelheidswissel.....	10
Figuur 10: Beweegbaar puntstuk in hogesnelheidswissel	10
Figuur 11: Maatvoering wielstel en spoor resp. wielband en railkop.....	11
Figuur 12: Mechanisme van de vetergang	11
Figuur 13: Krachten op een spoorstaaf.	13
Figuur 14: Eenpuntscontact.....	14
Figuur 15: Krachten en versnellingen in bogen	14
Figuur 16: Verloop railkracht en verplaatsing	16
Figuur 17: Spoorspatting in de spoorbaan.....	17
Figuur 18: Spoorspattingmechanisme	17
Figuur 19: Verloop trekkracht na railbreuk.....	17
Figuur 20: Typen railprofielen	18

Figuur 21: Vignole railprofielen	18
Figuur 22: Maatvoering railkop UIC60	18
Figuur 23: Belastingssplitsing	19
Figuur 24: Kritische spanningen in de spoorstaaf	20
Figuur 25: Plaatlas ('K-Oberbau') in de spoorbaan	21
Figuur 26: Plaatlas ('K-Oberbau')	21
Figuur 27: Compensatielas principe	21
Figuur 28: Compensatielas in de spoorbaan	21
Figuur 29: Compensatie-inrichting (niet op schaal)	22
Figuur 30: Gelijkde isolatielas	22
Figuur 31: Gelijkde isolatielas in de spoorbaan	22
Figuur 32: Schlatter stomplasmachine	23
Figuur 33: Mobiele stomplasmachine	23
Figuur 34: Voorbereiding thermietlas	24
Figuur 35: Thermietlasproces in actie	24
Figuur 36: Thermietlas: eindproduct	24
Figuur 37: Onderstopping dwarsliggers	25
Figuur 38: Gewapende tweebloksdwarsligger	27
Figuur 39: Voorgespannen monoblokdwarsligger	27
Figuur 40: Krachten op rughellingplaat	30
Figuur 41: Vossloh bevestiging	31
Figuur 42: Directe bevestiging op beton (Vossloh-klem)	31
Figuur 43: Pandrol bevestiging	31
Figuur 44: Veer karakteristieken bevestigingen	32
Figuur 45: Ballast specificatie	33
Figuur 46: Ballastspoor op kunstwerken	35
Figuur 47: Toepassing asfaltlagen in spoorwegen	36
Figuur 48: Ballastmatten	36
Figuur 49: Dwarsliggeronderlegplaat	37
Figuur 50: Directe bevestiging (spoorviaduct Delft)	38
Figuur 51: Platen spoor van voorgespannen beton (Duitsland)	38
Figuur 52: Rheda constructie (details)	39
Figuur 53: Rheda 2000	39
Figuur 54: Elastisch ingegoten dwarsliggers	40
Figuur 55: Stedef-spoor	40
Figuur 56: Blokkenspoor	41
Figuur 57: Ingegoten spoorstaaf	41
Figuur 58: Spoor op afgeveerde betonplaat	42
Figuur 59: Kölner Ei	42
Figuur 60: Dwarsprofiel dubbelsporige spoorbaan in rechtstand en op maaiveldhoogte	43
Figuur 61: Voorbeeld van spoor in ophoging	44
Figuur 62: Voorbeeld van een spoor in ingraving	44
Figuur 63: Profiel 2 sporen zonder geluidscherm	44
Figuur 64: Overgangsconstructie kunstwerk-aardebaan	45
Figuur 65: Open trambaanconstructie. Tramlijn 17 van Den Haag naar Wateringse Veld in grasbaan	46
Figuur 66: Gesloten trambaanconstructie. Groefrail Ri60 op kunststof platen	47
Figuur 67: Gesloten trambaanconstructie in uitvoering. Groefrail Ri60 op kunststof platen	47
Figuur 68: Trambaanconstructie in betonplaat (Nikex)	47
Figuur 70: Continu ondersteunde kraanbaan voor intensief gebruik. Rail 127 kg/m	48
Figuur 71: Magneetweefbaan: Transrapid	51
Figuur 72: Stopprincipe	54
Figuur 73: Stopmachine in actie	55
Figuur 74: Verbetering door stoppen, gevolgd door aftakeling	55
Figuur 75: Principe van stone blowing	55
Figuur 76: Slijpmachine met roterende stenen	56
Figuur 77: Verwachte maximale railtemperaturen bij verschillende weertypen	56
Figuur 78: Golfslijtage	57
Figuur 79: Spoorbouwtrein	59
Figuur 80: Aanlegmethode betonplaat voor embedded rail m.b.v. slip-form paver	59
Figuur 81: Vergelijking tussen SA42 en UIC 54 bij embedded rail constructie	59
Figuur 82: Vergelijking weg en spoorweg	60
Figuur 83: Een ongewenst dwarsprofiel (let op de zeer onlogische plaats van seinen achter bovenleidingmasten)	61
Figuur 84: een goede afwatering van sporen en emplacementen is vereist	64
Figuur 85: onderbroken dwarsliggers in wissel t.b.v. gefaseerde aanleg	65
Figuur 86: referentieontwerp HSL-Zuid	66
Figuur 87: Ontwerpfouten praktisch door aannemer opgelost	66
Figuur 88: Treinstelconcept (Materieel '64)	67

Figuur 89: Trek-duwtrein (Stuurrijtuig IC EW iv Bt)	68
Figuur 90: Getrokken trein (loc 1700 met ICR-rijtuigen)	68
Figuur 91: Dubbeldeks treinstam (DDM2)	69
Figuur 92: Stoptreinstam (SM'90)	70
Figuur 93: Dubbeldeks materieel (IRM III)	70
Figuur 94: TGV Thalys PBKA	71
Figuur 95: Zesassige locomotief met drie twee-assige draaistellen (Re 6/6)	72
Figuur 96: Dubbeldeks trek-duw trein (IC 2000)	73
Figuur 97: Dubbeldeks treinstam (S-Bahn Zürich)	73
Figuur 98: Overslag van een tankcontainer	74
Figuur 99: Beladingsraster	76
Figuur 100: Lastverdeling	76
Figuur 101 Overzicht verloop tractiestroom in bovenaanzicht (bovenste afbeelding) en zijaanzicht (onderste afbeelding). In rood is de stroom door de bovenleiding aangegeven en in blauw door de retour	84
Figuur 102 Overzicht geleiders 1500 V _{DC} -baanvak. Bovenleidinggeleiders, 2 rijdraden + draagkabel + versterkingsleiding; retour, spoorstaven	85
Figuur 103 Overzicht geleiders bij een 25 kVAC AT-systeem	85
Figuur 104: Stroomverloop bij een 25 kV AT-systeem. In rood de stroom door de bovenleiding. In blauw de stroom in de retour: spoorstaven en equipotentiaalleiding. In groen de stroom door de negatieve feeder	86
Figuur 105: magnetisch veld H rond een stroomvoerende geleider	86
Figuur 106: sommen van de magnetische velden van twee geleiders	87
Figuur 107: Dwarsdoorsnede spoor met magnetisch veldverloop in de nabijheid van een tractievragende trein. De stroom loopt door de bovenleiding en wordt de spoorstaven en lineaire aardkabel (rechts onderin) ingedwongen.	88
Figuur 108: Dwarsdoorsnede spoor met magnetisch veldverloop na een dwarskoppeling in de retour met de equipotentiaalleiding. De stroom is uit de spoorstaven en lineaire aardkabel naar de equipotentiaalleiding in de nabijheid van de heengaande stroom gaan lopen	88
Figuur 109: Dwarsdoorsnede spoor met magnetisch veldverloop voorbij AT-station. De stroom wordt hoofdzakelijk door negatieve feeder (rechts boven) en bovenleiding verzorgd	88
Figuur 110: Links: lokaal opdrogen van het isolatoroppervlak. Rechts: overslag van de isolator	89
Figuur 111: Twee situaties voor weergave elektrisch veld.	90
Figuur 112: Verloop elektrisch veld: geel, tussen plaat en geleider; rood, tussen plaat en plaat	90
Figuur 113: Overzicht standaard ruimtebeslag bij 25 kV	91
Figuur 114: Overzicht kunstwerken < 5800 mm in Nederland	91
Figuur 115: beweging stroomafnemer onder bovenleiding	94
Figuur 116: simulatie bovenleidingsysteem zonder en met voordoorhang	95
Figuur 117: Temperatuurinvloed vast afgespannen kabel. Figuur 118: Beweegbaar afgespannen draagkabel	96
Figuur 119: bovenleidingmodel bij 10 C	96
Figuur 120: bovenleidingmodel bij +40 C	97
Figuur 121: bovenleidingmodel bij -20 C	97
Figuur 122: Verschillen in vast en beweegbaar in het langsprofiel	97
Figuur 123: verschillen in vast en beweegbaar in het dwarsprofiel	98
Figuur 124: Opbouw bovenleidingnet	98
Figuur 125: Opbouw bovenleidingsectie	98
Figuur 126: B1 bovenleidingsysteem	99
Figuur 127: B5 bovenleidingsysteem	99
Figuur 128: B4 bovenleidingsysteem	100
Figuur 129: langsprofiel Duitse hoge snelheidsysteem	100
Figuur 130: Langsprofiel Frans hoge snelheidsysteem	101
Figuur 131: Langsprofiel compound systeem	101
Figuur 132: Hoe hoger de snelheid, des te nauwkeuriger de rijdraadhoogte	102
Figuur 133: Bij wissels is nauwkeurige afstemming tussen spoorbouw en bovenleiding vereist.	102
Figuur 134 Interoperability	103
Figuur 135 Harmelen, 8 januari 1962	104
Figuur 136 Hoog lichtsein met cijfer	108
Figuur 137 Tweemaal laag lichtsein, bovenste uitvoering voor plaatsing langs perronwand	108
Figuur 138 Hoog lichtsein met P	108
Figuur 139 Cabine display en DH trein	110
Figuur 140 Heerlen, 15 maart 1983	112
Figuur 141 Architectuur elektronische systemen	113
Figuur 142 Technische architectuur	114
Figuur 143 ETCS/ERTMS	116

TABELLEN

Tabel 1: Lengte spoornet anno 1990	2
Tabel 2: Enkele vervoercharacteristieken.....	2
Tabel 3: Metro- en trambedrijven anno 1990.....	3
Tabel 4: Aantal assen en gewicht per as voor diverse materieelsoorten	12
Tabel 5: Maximale rijksnelheden treinverkeer	12
Tabel 6: UIC Classificatie van spoorwegen	13
Tabel 7: Overzicht ballastspoor	34
Tabel 8: Overzicht ballastloos spoor.....	35
Tabel 9: Vergelijking bovenbouwgegevens tussen TGV en ICE.....	50
Tabel 10: Ontwerpgegevens Hogesnelheidslijnen.....	50
Tabel 11: Overzicht instandhoudingsprocessen	52

1 INLEIDING

1.1 Historische ontwikkeling

De rail als ondersteunend en geleidend element werd voor het eerst toegepast in de zestiende eeuw. In die tijd werden in de mijnen in Engeland houten rijbanen gebruikt om de weerstand van de mijnwagens te reduceren. De loopvlakken waren van een opstaande kant voorzien om de wagens in het spoor te houden.

Tijdens een crisis als gevolg van overproductie in de ijzerindustrie in Engeland in 1760 werden de houten rails met ijzeren platen bekleed, hetgeen de loopweerstand zodanig bleek te verminderen dat de toepassing zich snel uitbreidde. Omstreeks 1800 werden de eerste vrijdragende rails toegepast (Outtram), aan de einden ondersteund door gietijzeren stoelen op houten dwarsliggers. De geleiding werd overgenomen door het wiel met flens, zoals we dat nu nog kennen. De wagens werden aanvankelijk voortbewogen met mankracht of paarden.

De uitvinding van de stoommachine leidde tot de eerste stoomlocomotief, in 1804 geconstrueerd door de Engelsman Trevithick. George Stephenson bouwde in 1814 de eerste stoomlocomotief met vlampijpketel. In 1825 werd de eerste spoorlijn voor reizigersvervoer geopend tussen Stockton en Darlington. Op het vasteland van Europa was België het eerste land waar een spoorlijn (Mechelen - Brussel) werd geopend. België was zo snel daarmee om een verbinding met het Duitse achterland te creëren buiten de Nederlandse vaarwegen om. De eerste spoorlijn in Nederland (Amsterdam - Haarlem) kwam veel later: pas in 1839. Men zag hier de spoorweg als een grote concurrent voor de binnenvaart.

De spoorwegen waren een geheel nieuwe transportwijze van tot dan toe ongekende capaciteit, snelheid en betrouwbaarheid. Grote gebieden werden ontsloten, die vroeger door primitieve weg- en waterverbindingen niet tot ontwikkeling konden komen. De steden werden veel minder afhankelijk van hun verzorgingsgebied in de directe omgeving. De spoorwegen vormden een geweldige stimulans voor de politieke, economische en sociale ontwikkeling in de negentiende eeuw. Landen als de Verenigde Staten en Canada zijn dank zij de spoorwegen opengelegd en tot een staatkundige eenheid geworden. In landen als Rusland en China speelt de spoorweg nog steeds een cruciale rol in het transport.

De opkomst van de vakbeweging begon bij de spoorwegmaatschappijen als grote werkgever (spoorwegstakingen in Engeland in 1900 en 1911 en in Nederland in 1903). De spoorwegmaatschappijen waren ook de eerste bedrijven waar een zorgvuldig planning-, organisatie- en controlesysteem werd ontwikkeld om een efficiënte bedrijfsvoering mogelijk te maken. Ze gaven voorts de stoot tot grote ontwikkelingen op civieltechnisch gebied (baanbouw, bruggen, tunnels, stationskappen).

De technische ontwikkeling van spoorwegconstructies geschiedde aanvankelijk op empirische basis (trial and error). Nadat Winkler in 1871 een basis had gegeven voor de berekening van de spoorwegbovenbouw werd door Zimmermann in 1888 de theorie van de continue elastisch ondersteunde buigligger ontwikkeld en toegepast op spoorconstructies. Het belang van een goede draagkrachtige en stabiele onderbouw voor de spoorweg werd op dramatische wijze gedemonstreerd met het spoorwegongeluk bij Weesp (zie Figuur 1). Deze ramp gaf trouwens aanleiding tot de oprichting van Grondmechanica Delft (thans GeoDelft) in 1934 op initiatief van Keverling Buisman.



Figuur 1: Spoorwegongeluk bij Weesp

Na de Tweede Wereldoorlog kwam de ontwikkeling van de spoorwegbovenbouw in een stroomversnelling. Het voegloos spoor werd geïntroduceerd, betonnen dwarsliggers en elastische bevestigingen werden ingevoerd en het spoorwegonderhoud werd in hoge mate gemechaniseerd. Daarna brak een periode van stabiele ontwikkeling aan in de vorm van een verdere optimalisatie van de bestaande constructietypen. In het laatste decennium van dit millennium is er echter sprake van een ongekende opleving van de belangstelling voor het railsysteem.

1.2 Spoorwegen

Verkeerden de spoorwegmaatschappijen tot in de jaren twintig van deze eeuw in een monopoliepositie, met de komst van de verbrandingsmotor en de straalmotor kregen zij er in de vorm van autobus, personenauto en vliegtuig geduchte concurrenten bij.

De *massamotorisering* van na de Tweede Wereldoorlog als uiting van toenemende welvaart heeft vele problemen met zich gebracht, vooral in dichtbevolkte gebieden: ruimtegebruik, congestie, onveiligheid, emissies en geluidhinder. Juist bij deze zaken kunnen de spoorwegen in het voordeel zijn en daaraan kunnen ze een toekomstperspectief ontlenuen.

Het zijn:

- het geringe *ruimtegebruik*, gerelateerd aan de grote *vervoercapaciteit*;
- de hoge graad van *betrouwbaarheid* en *veiligheid*;
- de *automatiseerbaarheid* en *beheersbaarheid*;
- de geringe aanslag op het *milieu*.

Daarnaast hebben de spoorwegen een met de auto vergelijkbaar comfort en de mogelijkheid van hoge, met het vliegtuig op middellange afstand concurrerende snelheden waaraan de spoorwegen hun kracht kunnen ontlenuen. Dat dient te worden vertaald voor het reizigersvervoer in:

- kwalitatief hoogwaardig voorstads- en stadsvervoer naar en in grote agglomeraties;
- snelle intercity- en hogesnelheidsdagverbindingen tot 800 km;
- comfortabele intercity-nachtverbindingen tot 1500 km;
- seizoen-chartervervoer (eventueel met auto).

Daarbij bestaan voor het goederenvervoer hoogwaardige verbindingen op de middellange en lange afstand (200 - 2000 km).

In Tabel 1 zijn enige globale gegevens vermeld over de wereldwijde omvang van spoorwegen. Tabel 2 geeft enkele vervoer-karakteristieken.

Lengte 1000 km	Bestaand	In aanleg
Europa	530	10
Azië	250	110
Afrika	80	10
Noord-Amerika	420	3
Midden- en Zuid-Amerika	150	15
Australië	50	3
totaal	1.500	150

Tabel 1: Lengte spoornet anno 1990

	modal split reizigers	reizkm/ inwoner	10 ⁶ reizkm/ km spoor	10 ⁶ tonkm/ km spoor
Nederland	7%	650	3	1
West-Europa	8%	800	1	1.5
Verenigde Staten	1%	100	0.07	4.4
Japan	38%	2700	10	0.7

Tabel 2: Enkele vervoer-karakteristieken

Spoorwegen zijn het aangewezen middel voor het massale reizigersvervoer over korte afstand naar en in de grote agglomeraties. Op dit terrein is de kwaliteit van de trein de laatste jaren aanzienlijk opgevoerd door de inrichting van grote stervormige netten rondom de grote steden, frequent bereden door snel optrekkende en afremmende stoptreinen. Waar nodig penetreren deze treinen de steden via speciale tunneltrajecten, waardoor de centra beter worden ontsloten en er doorgaande verbindingen tot stand worden gebracht. Voorbeelden hiervan zijn München, Hamburg (S-Bahn) en Parijs (RER). Van bijzonder belang hierbij is een goede integratie met andere vervoermiddelen (vooral voor en natransport met metro, tram, bus, auto en fiets).

Spoorwegbedrijven zijn verliesgevend en de overheden moeten financieel bijspringen om de bedrijven in staat te stellen treinen te laten rijden. Zeker zolang de spoorwegen -in tegenstelling tot het wegverkeer en de binnenvaart- de volledige kosten van de infrastructuur zelf moeten dragen, is het niet mogelijk de exploitatie bedrijfseconomisch sluitend te krijgen. Die infrastructuur is kostbaar. Eén kilometer spoorbaan kost globaal f15 à 20 miljoen, nog afgezien van grote kunstwerken.

In steeds meer landen wordt echter de spoorweginfrastructuur in eigendom en beheer overgenomen door de overheid en betalen (particuliere) spoorwegexploitatiebedrijven voor het gebruik ervan. Ook in Nederland is een dergelijke constructie in de maak, waarbij de overheid de eis stelt dat de exploitatiekosten dan wel volledig door de opbrengsten worden gedekt.

1.3 Tram en metro

De spoorwegen, ontwikkeld als snel interlokaal vervoermiddel op eigen baan, zijn minder geschikt voor lokale vervoerfuncties, omdat ze niet inpasbaar zijn in de stedelijke schaal (boogstralen, profiel van vrije ruimte), terwijl ook de capaciteit van de trein te groot is voor de lokale vervoerbehoefden met een diffuus patroon van verplaatsingen. Daarom zijn in de tweede helft van de negentiende eeuw kleinschalige vormen van railvervoer ontwikkeld, die ook van de openbare weg gebruik kunnen maken, met het doel de groeiende steden te voorzien van fijnmazige vervoerstelsels. Aanvankelijk bediende men zich hierbij van paardentraction en soms ook wel stoomtraction; in de periode 1890-1920 zijn deze tractievormen nagenoeg geheel door de elektrische tractie verdrongen.

Ook voor de verzorging van het veelal geringe voorstads- en plattelandsvervoer, waarvoor de spoorwegen te kostbaar waren, is de tram in zwang geraakt, maar met de opkomst van de autobus is deze hier weer grotendeels verdwenen, evenals in de kleine en middelgrote steden. Alleen in de grote steden (boven circa 300.000 inwoners) heeft de tram zich kunnen handhaven, dankzij de grote vervoercapaciteit en de mogelijkheid om met vrije banen onafhankelijk van het wegverkeer te kunnen opereren. Daarmee gaat de tramweg hoe langer hoe meer het karakter krijgen van een kleinschalige spoorweg, zij het dat het wegverkeer nog steeds gelijkvloers kan worden gekruist zonder de absolute voorrang zoals de trein geniet. Dat stelt speciale eisen aan het remvermogen van dit vervoermiddel en aan de tracering van de baan.

In miljoenensteden zijn stads-spoorwegstelsels (metro's) ontwikkeld, die over volledig eigen infrastructuur beschikken en daartoe noodgedwongen veelal ondergronds of op viaduct zijn gebouwd. De zeer kostbare infrastructuur wordt gerechtvaardigd door het zware vervoer dat met voertuigen, veel langer dan de tram (100 tot 150 m tegenover 30 tot 50 m), op snelle en betrouwbare wijze wordt verwerkt.

Tabel 3 geeft een indicatie van metro- en trambedrijven verspreid over de wereld.

	aantal metro-bedrijven	aantal tram-bedrijven
Europa	35	225
Azië	15	65
Afrika	0	5
Noord-Amerika	10	25
Midden- en Zuid-Amerika	5	5
Australië	0	2
totaal	65	325

Tabel 3: Metro- en trambedrijven anno 1990

1.4 Light-rail

Om de grote voordelen van de metro ook in steden met minder inwoners te behalen, tracht men tegenwoordig via evolutie van tramwegstelsels tussenvormen tussen metro en tram te realiseren. Deze, aangeduid als sneltram, *light-rail* of *light rapid transit*, die deels op straatniveau (zoveel mogelijk op vrije baan, maar soms in de straat en met gelijkvloerse kruisingen) en deels in tunnels en op viaducten zijn gebouwd. Voorbeelden in Nederland zijn te vinden in Rotterdam, Utrecht en Amsterdam.

Globale kenmerken van light-rail zijn:

- vrije baan (in principe) en prioriteit
- hogere snelheid
- hoge capaciteit, alleen metro's hebben een hogere capaciteit
- passagiers stappen in en uit bij stations en niet bij halten
- veelzijdigheid, hoge snelheden op vrije banen en doordringend in nauwe historische centra

Een strenge scheiding bestaat echter niet tussen trams en light-rail, een trambaansysteem kan bijvoorbeeld worden omgebouwd tot een light-rail verbinding.

1.5 Actuele ontwikkelingen

Zoals eerder vermeld staat momenteel staat de aanleg en verbetering van railgebonden infrastructuur sterk in de belangstelling. Reden hiervoor is de toegenomen mobiliteitsbehoefte, welke op gespannen voet staat met de bestaande capaciteit van de bestaande verkeersmodaliteiten.

Als gevolg hiervan is momenteel een groot aantal railinfra projecten in studie. De belangrijkste zijn:

- **HSL Zuid** verbinding (Amsterdam – Rotterdam - Belgische grens): Dit eerste hogesnelheidsproject in Nederland is in een vergevorderd stadium van voorbereiding en nadert de uitvoeringsfase.
- **Betuweroute** (Maasvlakte – Duitse grens): De eerste werken voor de aanleg van deze goederenlijn zijn inmiddels in uitvoering genomen.
- **RandstadRail** (light-rail verbindingen tussen de grote steden in de Randstad). Project dient ter verbetering van de mobiliteit op regionaal niveau en zal gedeeltelijk bestaande NS sporen gebruiken.

Naast deze grote vraag naar nieuw (of vernieuwd) spoor zijn er ook een aantal factoren die een heroverweging van het bestaande technisch-constructieve spoorwegontwerp nodig maken. Deze zijn:

- Door de hoge snelheden (bij HSL) nemen de dynamische effecten sterk toe. Voor een juiste beoordeling van deze effecten is een diepgaand inzicht nodig in het gedrag van het *gehele* systeem van voertuig, bovenbouw en onderbouw. Aan de primaire eisen zoals comfort en veiligheid van inzittenden dient immers onder alle omstandigheden te worden voldaan.
- Voor toekomstige snelheidverhogingen in bestaande sporen wordt vanwege het comfort het gebruik van kantelbakken voorzien. Hierdoor zullen de zijdelingse krachten op het spoor sterk toenemen.
- De exploitant van de spoorweg vereist een hoge mate van beschikbaarheid van het spoor voor de reguliere treindiensten. De spoorconstructie moet derhalve zodanig te worden ontworpen dat het onderhoud aan de sporen minimaal is.
- De milieueisen op het gebied van geluid en trillingen tellen steeds zwaarder mee.

Het ligt dus voor de hand dat goed gedefinieerde, qua mechanisch gedrag goed voorspelbare en onderhoudsarme spoorconstructies worden ontworpen. Weliswaar zijn de kosten (initiële kosten) in dit geval hoger dan die van bestaande (ballast)spoorconstructies maar op lange termijn worden deze terugverdiend door de effecten van verminderd onderhoud.

Deze aspecten zorgen voor een trendbreuk in het ontwerp van railconstructies. Het is nu mogelijk en ook nodig om te breken met het traditionele ontwerp van railconstructies en om innovatieve ontwerpen een kans te geven.

Als kenmerken voor al deze technische ontwikkelingen kunnen worden genoemd:

Operationeel

- hogere snelheden : 200 - 350 km/h
- hogere aslasten : 22.5 t naar 25 t
- levensduurverlenging : 100 - 1000 MGT

Economisch

- onderhoudsarm construeren
- kwaliteitsbeheersing
- kostenbeheersing/life cycle kosten

Veiligheid

- ontsporingsveiligheid
- temperatuureffecten voegloos spoor
- kritische snelheid HSL-spoor

Milieu

- geluids- en trillingsisolatie
- ruimtelijke inpassing

Als zeer recente ontwikkeling valt nog te melden dat thans ook de mogelijkheid wordt bestudeerd om ook in Nederland een spoorbaan voor magnetische zweeftreinen aan te leggen. Zowel de verbinding Amsterdam – Groningen als een ringbaan langs de vier grote steden in de Randstad behoren tot de mogelijkheden.

Een ongewenst neveneffect van de geschetste ontwikkelingen is overigens dat er nu al een groot structureel tekort is ontstaan aan civiele spoorwegingenieurs, die nodig zijn voor leidinggevende functies in het voorbereiden en uitvoeren van de genoemde railprojecten of voor het fysisch-mechanisch onderzoek van nieuwe innovatieve typen spoorconstructies, materialen en aanlegmethoden en de ontwikkeling van technische bewaking- en beheerssystemen.



Figuur 2: Transrapid

2 DEFINIËRING BOVENBOUW VAN DE SPOORWEG

2.1 Indeling

Het vakgebied Railbouwkunde beperkt zich niet alleen tot spoorwegen. De beschouwingen staan ook model voor andere systemen als *trams*, *metro's* en *light-rail* systemen. Een aparte, maar eveneens belangrijke categorie, vormen de *kraanbanen* en *industriesporen* (Hoogovens).

2.2 Basisprincipe wiel/rail techniek

Als typische gemeenschappelijke kenmerken van bovengenoemde systemen kunnen worden genoemd:

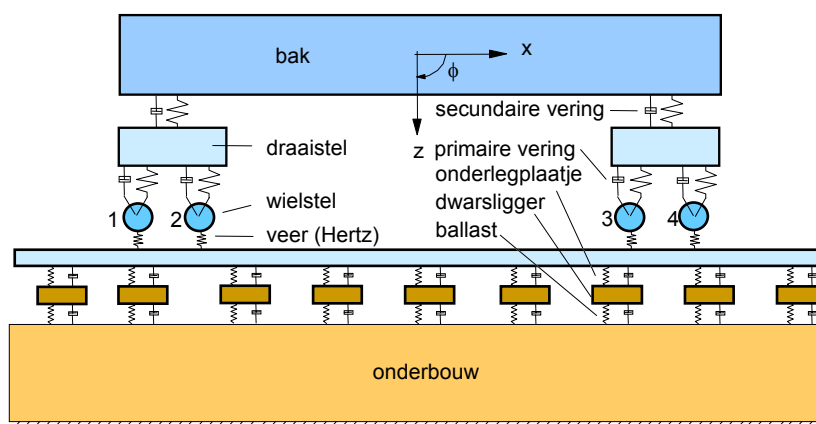
- de *draagfunctie* voor de voertuigen vindt plaats door middel van *stalen* wielen op *stalen* rails ('*staal-op-staal*') (waarmee een lage rolweerstand wordt bereikt);
- de *geleidingsfunctie* vindt plaats door *wielflenzen* (het voertuig is passief);
- de *voortbeweging* wordt verkregen door *adhesiekrachten* tussen aangedreven wielen en rails (het spoor is passief);
- de *energievoorziening* vindt plaats vanuit het *voertuig*: stoom, dieselektrisch, elektrisch (via bovenleiding of stroomrail);
- *aftakkingen/snijdingen* zijn mogelijk d.m.v. *wissels/kruisingen*.

Ofschoon de term Railbouwkunde als eerste kennismaking een goede afspiegeling geeft van het vakgebied, wordt in vakkringen liever gesproken van bovenbouwtechniek. Onder het begrip '*bovenbouw van de (spoor)weg*' wordt verstaan: de spoorconstructie in zijn totaliteit, bestaande uit spoorstaven, bevestigingsmiddelen, dwarsliggers, en ballastbed, inclusief bijzondere constructies als wissels, kruisingen en overwegconstructies. Met dit begrip wordt dus niet het *bovenleidingsstelsel* van de spoorweg bedoeld.

De technische hoofdfuncties van de bovenbouw zijn de volgende:

- het *dragen* en *geleiden* van het rollend materieel (voertuigen);
- het *overbrengen* en *spreiden* van belastingen naar de onderbouw;
- het fungeren als *elastisch* en *trillingsdempend* medium;

Tot de *onderbouw* wordt het draagsysteem van de bovenbouwconstructie gerekend, d.w.z. de aardebaan of een kunstwerk: Hoewel, zoals eerder vermeld, de wisselwerking tussen de bovenbouw en verwante vakdisciplines (Figuur 3) zeer belangrijk is staat in dit dictaat de bovenbouw centraal.



Figuur 3: Geïntegreerd model voertuig-bovenbouw

2.3 Algemene eisen bovenbouwconstructie

Het feit dat over de spoorweg mensen en goederen worden vervoerd en de exploitatie zo economisch mogelijk moet plaatsvinden, geven aanleiding tot de volgende algemene eisen:

- Sporen en wissels moeten, met inachtneming van de toegestane snelheden en aslasten, *veilig* berijdbaar zijn. Daartoe moeten de onderdelen, zoals bijvoorbeeld de spoorstaven, van zodanige afmetingen zijn dat zij niet onder de verkeersbelasting bezwijken. Tevens moet de *juiste ligging* zowel met als zonder belasting blijvend verzekerd zijn;
- Sporen en wissels moeten *comfortabel* berijdbaar zijn en blijven. Ook als de veiligheid niet in gevaar is, kan een ongunstige combinatie van wissels, bogen en tegenbogen, zelfs bij een bovenbouw van zeer goede constructie en met een perfecte ligging, zulke sterke bewegingen in een rijtuig veroorzaken, dat de reizigers dit als uitgesproken onplezierig, soms zelfs als angstaanjagend ervaren;
- De bovenbouw zal zodanig *elektrisch* moeten zijn geïsoleerd, dat de voor beveiliging benodigde spoorstroomlopen, zelfs onder de meest ongunstigste weersomstandigheden, blijven functioneren en dat op geëlektrificeerde baanvakken de retourstroom niet als *zwerfstroom* in de bodem terecht komt;
- De bovenbouw zal zodanig moeten zijn geconstrueerd, dat de daarover rijdende treinen niet te veel *milieubelasting* in de vorm van *lawaai* en *bodemtrillingen* veroorzaken;
- De *kosten* moeten over de totale gebruiksduur zo laag mogelijk zijn;
- Het *onderhoud* zal zo gering mogelijk en zo goedkoop mogelijk moeten zijn.

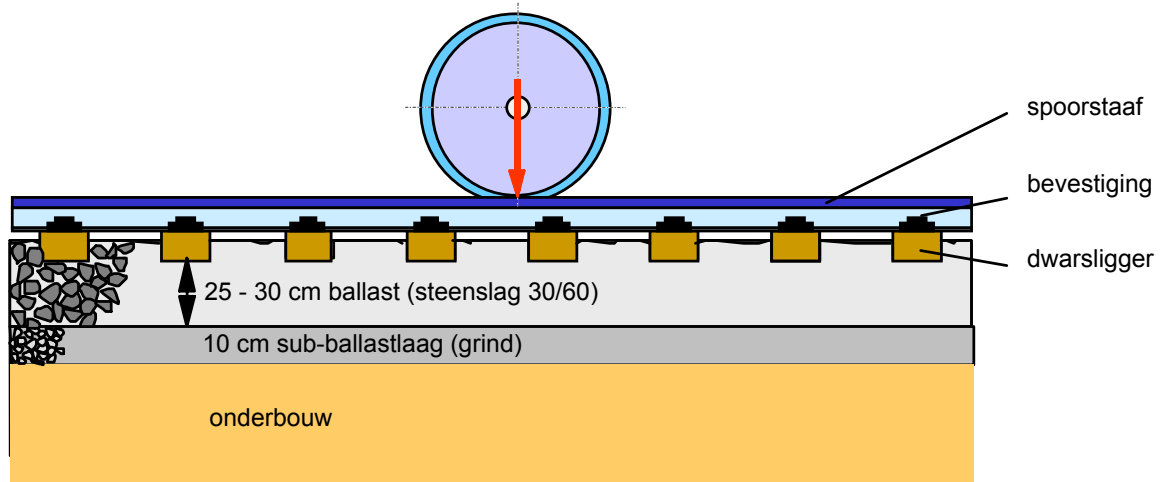
2.4 Keuze bovenbouwstelsel

Sporen en wissels zijn bedrijfsmiddelen met een levensduur van tientallen jaren. De keuze van een bepaald bovenbouwstelsel en het besluit om dit stelsel in bepaalde sporen toe te passen betekent dus in het algemeen een beslissing voor een termijn van 20 tot 50 jaar. Zulke beslissingen moeten daarom met open oog voor de toekomst worden genomen, hoe moeilijk een dergelijke periode ook is te overzien. Daarbij moet men zich realiseren dat het bouwen van sporen het karakter heeft van een massaproductie, waardoor een geringe niet optimale wijziging grote herstelkosten kan veroorzaken. De traditionele terughoudendheid bij spoorwegmaatschappijen ten aanzien van de invoering van nieuwe materialen (kunststof, asfalt, e.d), producten en technieken, waarvan het gedrag of het effect nog niet voldoende zijn onderzocht, is daarom begrijpelijk. Zeker is wel dat men toch enige afstand tot het heden moet durven nemen en niet een te grote waarde aan de toevalligheden van vandaag moet toekennen.

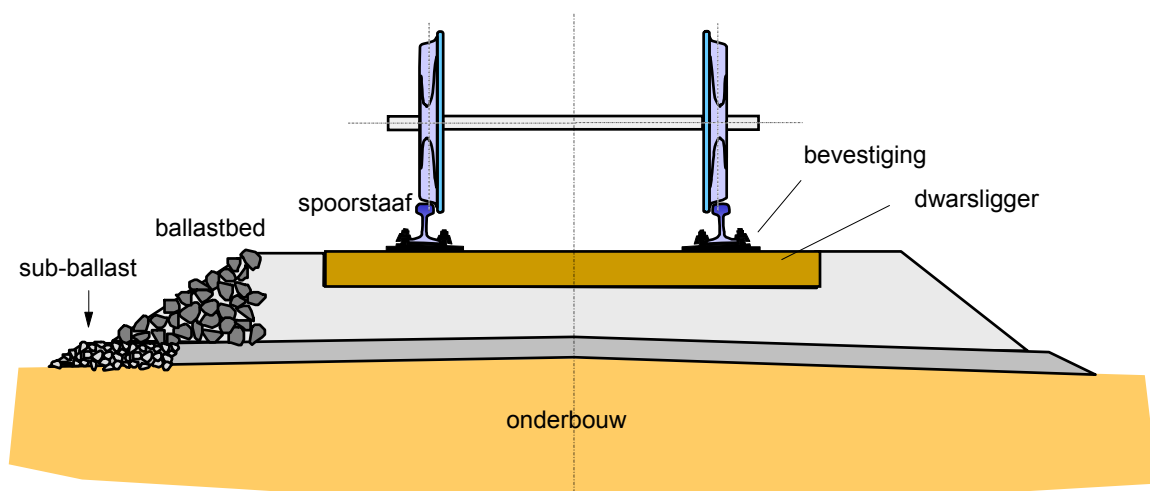
Bij de keuze van een bovenbouwstelsel zullen de bovengenoemde eisen alle in beschouwing moeten worden genomen en is het zeker nodig zich een gedachte te vormen over de in de komende decennia te verwachten grootte van aslasten en maximumsnelheden. Van groot belang is daarbij ook het verband tussen aanlegkosten of vernieuwingskosten, en de zich steeds herhalende onderhoudskosten. Hierbij gaat het uiteindelijk om het bereiken van minimale instandhoudingskosten (vernieuwing + onderhoud) of anders gezegd: minimum *total life-cycle-costs*. Daarna zal men de verschillende onderdelen van de bovenbouw in beschouwing moeten nemen, om zo tot een passende bovenbouwconceptie te komen.

Klassieke bovenconstructie

De opbouw van een klassieke bovenbouwspoorconstructie (de vrije baanconstructie met ballastbed) is getoond in Figuur 4 (langsprofiel) en Figuur 5 (dwarsprofiel).



Figuur 4: Klassieke spoorconstructie. Langsprofiel



Figuur 5: Klassieke spoorconstructie. Dwarsdoorsnede.

In feite bestaat de klassieke spoorconstructie in deze vorm dus uit een in het ballastbed 'zwevend' spoorframe (constructief raamwerk, gevormd door de spoorstaven, bevestigingen en dwarsliggers) en ontbreken duidelijk gedefinieerde constructieve fixatiepunten.

Het is opmerkelijk dat, ondanks het vereiste regelmatige onderhoud, de klassieke spoorwegbovenbouw met ballastbed zich, ook bij hoge snelheidslijnen (TGV), zich *tot nu toe* nog steeds heeft weten te handhaven door de gunstige eigenschappen:

- goede *damping* van geluid en trillingen;
- goede *drainage* van hemel- en smeltwater;
- eenvoudige *correctie* van de spoorligging;
- *vervanging* onderdelen relatief eenvoudig;
- geringe *tracé*-wijzigingen goed mogelijk.

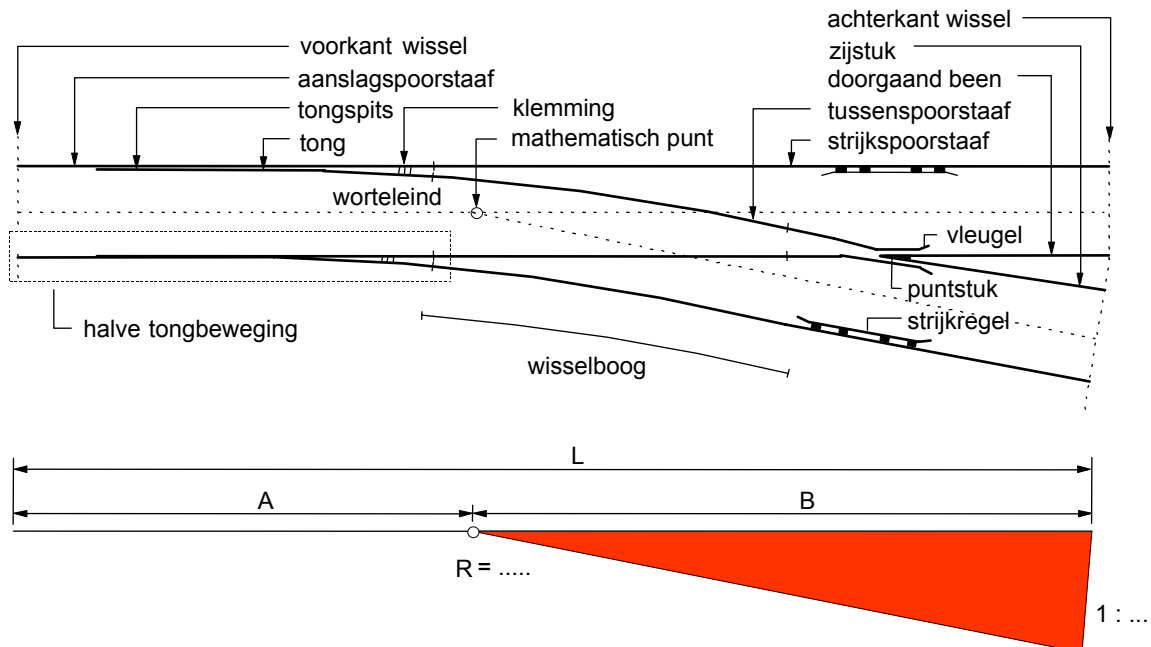
2.5 Wissels en kruisingen

De definities van deze bijzondere voorzieningen in de spoorconstructies luiden:

- *wissels* dienen om een spoor te *vertakken* in twee sporen (soms in drie sporen);
- *kruisingen* dienen om twee sporen elkaar op hetzelfde niveau te laten *snijden*.

Van de vele uitvoeringsvormen wordt hier alleen het gewone *enkele* wissel behandeld (zie Figuur 6). Uit deze figuur kan het wisselprincipe worden afgeleid. Het wissel is opgebouwd uit drie, functioneel gezien, verschillende delen, de *tongbeweging*, het *puntstuk* en de *wisselboog*. In Figuur 6 is tevens het *wisselschema* van dit wissel getekend, zoals dit in emplacementstekeningen e.d. voorkomt.

Meest kenmerkend voor het wissel is de *hoekverhouding*, d.i. de tangens van de hoek tussen de hartlijnen van het *doorgaande* en het *afbuigende* spoor. Deze hoek vindt men ook terug in het puntstuk. Een wissel 1:15 bijvoorbeeld wordt vaak toegepast voor matige snelheden. Voor hogere snelheden dienen langere wissels met een grotere hoekverhouding te worden toegepast om de grootte van dwarsversnelling in de wisselboog aanvaardbaar te houden (in wisselbogen wordt geen verkanting toegepast).



Figuur 6: Gewoon wissel en wisselschema

Grotere verbeteringen ten aanzien van comfort en stoten is de toepassing van een *beweegbaar puntstuk* (geen ongeleide opening meer), de uitvoering van de wisselboog als overgangsboog en het voegloos lassen van wissels in het spoor. Figuur 7 en Figuur 8 tonen respectievelijk een gewoon wissel en een puntstuk.



Figuur 7: Gewoon rechts wissel



Figuur 8: Puntstuk



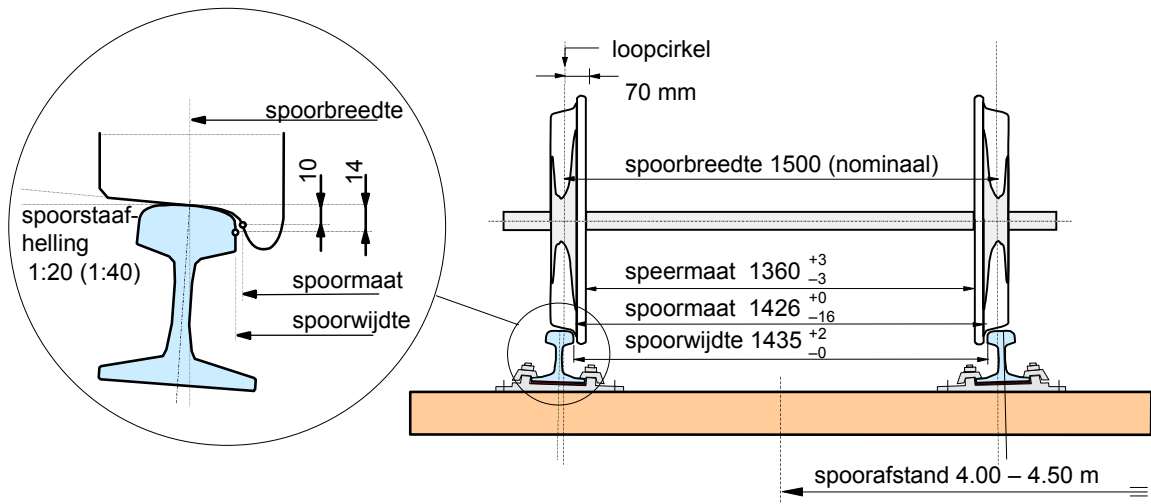
Figuur 9: Hogesnelheidswissel



Figuur 10: Beweebaar puntstuk in hogesnelheidswissel

Bij hogesnelheidswissels worden veelal beweegbare puntstukken toegepast (hoekverhouding groter dan 1:15). Zie figuur 9 en figuur 10.

2.6 Geometrie wiel/rail



Figuur 11: Maatvoering wielstel en spoor resp. wielband en railkop

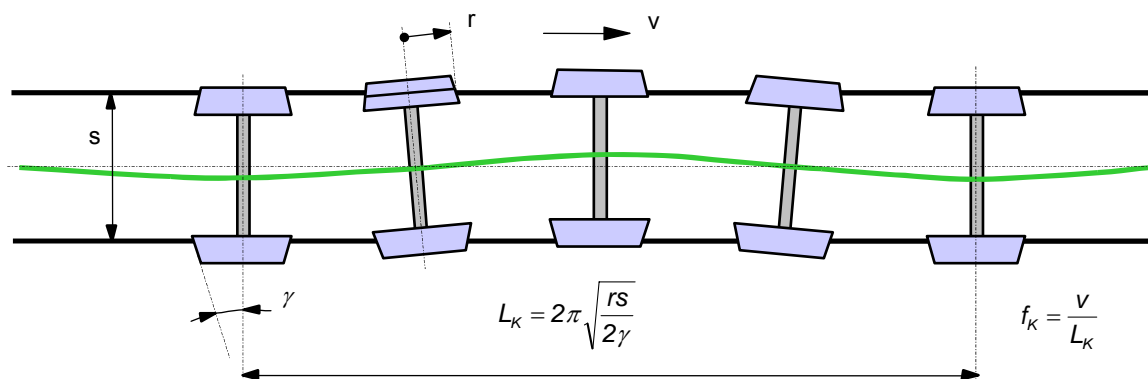
Een *wielstel* (zie Figuur 11) bestaat uit een as waaraan de twee wielen vast zijn verbonden. Dit geeft een goed gedefinieerde sterke verbinding en maakt de centrerende werking (zie hierna) mogelijk. Merk op dat de astappen, waar het voertuig via een primaire vering op afsteunt, aan de buitenzijde zijn geplaatst i.v.m. de grotere stabiliteit. Ook wordt hiermee de inspectie en onderhoud van de astappen vereenvoudigd.

Vaak zijn meerdere assen (meestal 2) via een primaire vering in één draaibaar frame gemonteerd, het *draaistel*, waarop vervolgens de wagenbak door middel van een secundaire vering afsteunt.

Voor wat betreft de maatvoering zijn de *spoorwijdte*, de *spoorbreedte* en de *spoorafstand* voor de civiel ingenieur het belangrijkste.

De spoorwijdte is gedefinieerd als de afstand tussen de binnenzijden van de railkoppen, gemeten op 14 mm onder BS. Voor normaalspoor (meest voorkomend) bedraagt deze afstand 1435 mm.

Door de *conisch* afgedraaide wielbanden, ontstaat een *centrerende* werking van het wielstel in het rechte spoor, waardoor de zogeheten *vetergang* of *sinusloop* ontstaat (Figuur 12).



Figuur 12: Mechanisme van de vetergang

Door deze zelf-centrerende werking wordt flenscontact zoveel mogelijk vermeden. Tevens wordt door de *coniciteit* een *radiale* instelling van het wielstel in bogen bevorderd.

Deze responsie op een afwijking uit de middenstandspositie kan worden beschreven door een gewone 2e orde differentiaalvergelijking (zie Bijlage B).

3 BELASTINGEN

3.1 Belastingsparameters

De draagkracht van de spoorconstructie en de kwaliteit van de spoorligging worden bepaald door de volgende belastingsparameters:

- *asbelasting*, bepaalt de benodigde sterkte en stijfheid; varieert van 70 kN (tramvoertuig) tot 350 kN (ertstreinen, 'heavy haul' spoorweg), zie Tabel 4.
- *aslasttonnage*, bepaalt de mate van achteruitgang spoorligging; NS tot 3 tot $20 \cdot 10^6$ ton/jaar, verwacht wordt op de Betuwelijn $45 \cdot 10^6$ ton/jaar, voor *heavy haul* lijnen komen waarden voor $>100 \cdot 10^6$ ton/jaar;
- *rijksnelheid*, bepaalt toelaatbare afwijking spoorligging; Nederland op het moment in het algemeen 140 km/h, HSL 300 km/h (zie Tabel 5)

	aantal assen	leeg	beladen
trams	4	50 kN	70 kN
light-rail	4	80 kN	100 kN
reizigers rijtuig	4	100 kN	120 kN
rijtuig + motor	4	150 kN	170 kN
locomotieven	4 of 6	215 kN	--
goederen	2	120 kN	225 kN
heavy haul (USA, Australië)	2	120 kN	250-350 kN

Tabel 4: Aantal assen en gewicht per as voor diverse materieelsoorten

Opvallend is het percentage eigen gewicht ten opzichte van het totaal (beladen) gewicht. Uit Tabel 4 blijkt dat dit percentage aanzienlijk kan zijn (~70%) zodat gesteld zou kunnen worden dat voornamelijk eigen gewicht wordt vervoerd! Alleen goederenvervoer steekt gunstig af. (opm. bij personenauto's is dit niet anders).

Het is verder interessant de aslasttonnages per spoor te vergelijken met toekomstige vergelijkbare vervoerscijfers over het water en de weg. Over de Waal zal netto $150 \cdot 10^6$ ton/jaar vervoerd worden (40%), over de weg (A12/A15) ongeveer $175 \cdot 10^6$ ton/jaar (50%) en de Betuweroute zal, volgens de huidige prognoses, in de volgende eeuw een aandeel van netto 10% ($35 \cdot 10^6$ ton/jaar) leveren.

	passagierstreinen	goederen treinen
spooransluitingen	--	30-40 km/h
secundaire lijnen	80-120 km/h	60-80 km/h
hoofdlijnen	160-200 km/h	100-120 km/h
hogesnelheidslijnen*	250-300 km/h	
*wereldrecord = 515.3 km/h (TGV-SNCF, mei 1990)		

Tabel 5: Maximale rijksnelheden treinverkeer

3.2 Classificatie van spoorwegen

Het UIC (Union Internationale des Chemins de Fer), de samenwerkingsorganisatie van spoorwegmaatschappijen, die onder andere standaardisatie nastreeft, onderscheidt volgens UIC-voorschrift 700 de belastingscategorieën welke zijn weergegeven in Tabel 6.

Het NS-net bijvoorbeeld voldoet in het algemeen aan categorie C2; bij nieuwe aanleg wordt C4 of D4 aangehouden.

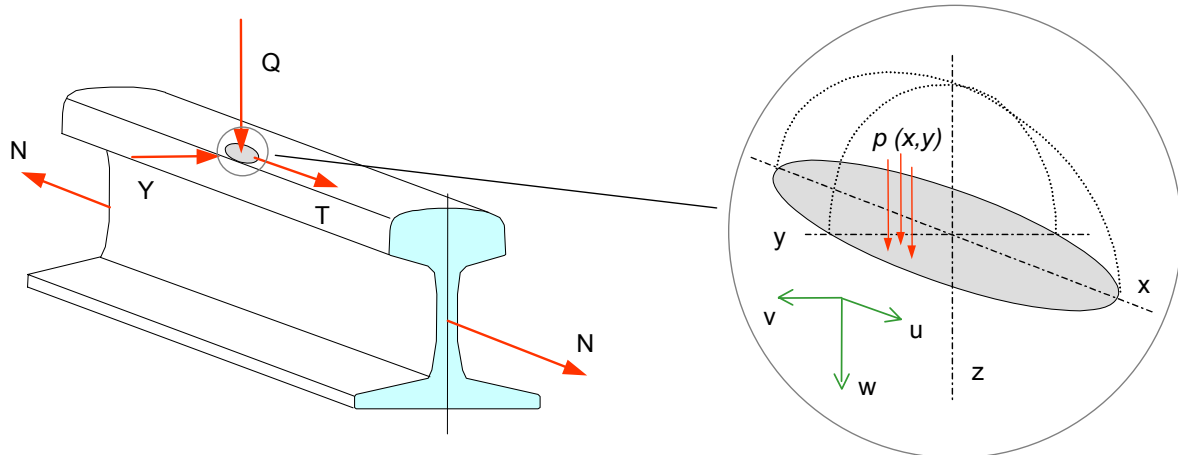
categorie	aslast [kN]	gewicht/meter [kN/m]
A	160	48
B1	180	50
B2	180	64
C2	200	64
C3	200	72
C4	200	80
D4	225	80

Tabel 6: UIC Classificatie van spoorwegen

3.3 Spoorkrachten

De door de trein op de spoorconstructie uitgeoefende krachten kunnen worden onderscheiden in:

- verticale krachten, statisch en dynamisch;
- horizontale *dwars*krachten (aanlopen, boogeffecten);
- horizontale *langs*krachten (aanzetten, remmen);

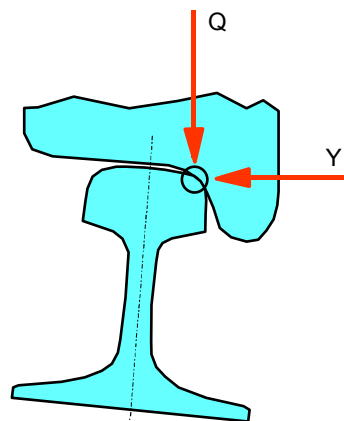


Figuur 13: Krachten op een spoorstaaf.

De op een rail werkende krachten tussen wiel en spoorstaaf worden (zie Figuur 13) in de spoorwegliteratuur meestal aangeduid met Q voor de verticale kracht en Y voor de horizontale dwarskracht. De langskracht wordt aangeduid met T . Naast deze uitwendig aangrijpende belastingen kunnen ook aanzienlijke temperatuurkrachten N optreden. Het detail toont ook de ellipsvormige contactdrukverdeling tussen wielband en railkop. Bovendien zijn in deze figuur het coördinatenstelsel en de drie bijbehorende verplaatsingsgrootheden gegeven die worden gebruikt in de spoorwegbovenbouw.

Overigens is er geen sprake van een werkelijk puntcontact. In werkelijkheid treedt tussen wielband en railkop een contactspanningsverdeling $p(x,y)$ op in de vorm van een *ellipsoïde*. (zie detail Figuur 13). Deze verdeling geeft aanleiding tot een lokale driedimensionale spanningsverdeling in de railkop.

Vaak wordt uitgegaan van *éénpuntscontact* tussen wiel en rail (zie Figuur 14) waarbij de horizontale en verticale krachten in één vlak werken. In het algemeen kan echter ook *tweepuntscontact* optreden, bijvoorbeeld bij het aanlopen van het eerste wielstel in bogen. Op deze situatie wordt in dit dictaat niet nader ingegaan.



Figuur 14: Eenpuntscontact

3.4 Ontsporing

Maatgevend hiervoor is de verhouding tussen de Y- en de Q-kracht. Bij een hoge waarde van deze verhouding kan oplopen van de wielflens op de railkop optreden, gevolgd door *ontsporing*. Uit onderzoek ter zake is gebleken dat voor deze verhouding de volgende grenswaarde moet worden aangehouden:

$$\frac{Y}{Q} < 1.2$$

3.5 Krachten in een boog

In bogen met een verkantingstekort ontstaat, behalve een dwarskracht H per wielstel, door de kantelmomenten ook een toename, resp. afname van de wielbelasting Q op het buitenbeen, resp. binnenbeen van het spoor. (zie Figuur 15). In berekeningen moet met deze wiellasttoename resp. -afname rekening worden gehouden.

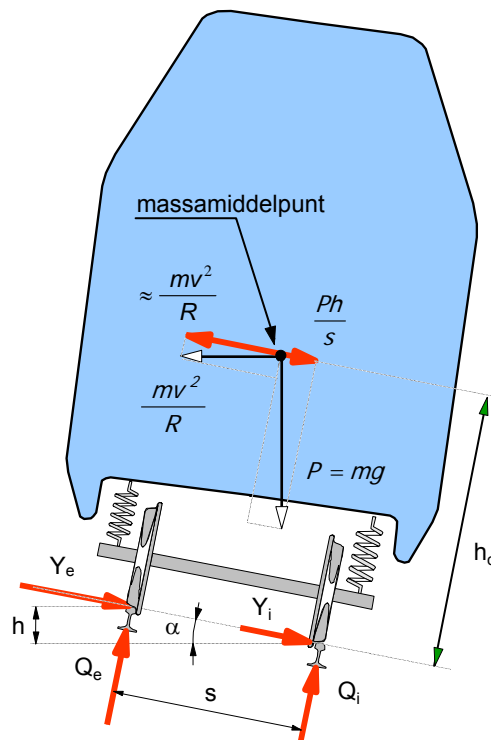
Voor de grootte van de maximum wielbelasting Q_e op de spoorstaaf en de dwarskracht H op het spoor wordt verwezen naar Bijlage E, Formules.

3.6 Kritische dwarskracht

De totale dwarskracht H die op de spoorconstructie wordt uitgeoefend, moet worden opgenomen door:

- de *dwarsschuifweerstand* van de dwarsliggers in het ballastbed;
- de horizontale *raamstijfheid* van het spoorframe (5 à 10%).

Bij overschrijden van de weerstand van het spoor kunnen de dwarsliggers in het ballastbed verschuiven, waardoor blijvende vervormingen kunnen ontstaan.



Figuur 15: Krachten en versnellingen in bogen

Een praktische maat voor de zijdelingse weerstand die het spoor onder belasting moet kunnen leveren teneinde een stabiele ligging te garanderen is in de vijftiger jaren door de SNCF bepaald en staat bekend als de formule van Prud'homme welke luidt:

$$H_{tr} > 10 + \frac{P}{3} \quad \text{waarin:}$$

H_{tr} : horizontale kracht [kN] die het spoor minimaal moet kunnen leveren om een zijdelingse
: permanente verschuiving van het spoor te voorkomen.
 P : aslast = som wiellasten [kN]

Aan materieelzijde stelt men de strengere eis dat de door een voertuig uitgeoefende dwarskracht H op het spoor begrensd blijft volgens:

$$H_{rs} < 0.85 \left(10 + \frac{P}{3} \right)$$

H_{rs} : horizontale kracht [kN] die het materieel maximaal op het spoor mag uitoefenen.

Voor verdere gegevens wordt verwezen naar Bijlage E, Formuleoverzicht

3.7 Kritische dwarsversnelling

Naast de onder 3.5 en 3.6 gegeven *veiligheidsgrenzen* voor de ontsporing en de kritische dwarskracht moet ook rekening worden gehouden met het *comfortcriterium* in dwarsrichting dat kan worden uitgedrukt in de volgende voorwaarde voor de quasi-statische niet-gecompenseerde dwarsversnelling:

$$a_d \leq 0.8 \text{ m/s}^2$$

en een voorwaarde voor de zogenaamde *ruk* in de overgangsboog

$$\frac{da}{dt} \leq 0.2 \text{ m/s}^3$$

Voor verdere gegevens wordt verwezen naar Bijlage E, Formuleoverzicht

3.8 Temperatuurkrachten

De vrije spanningsloze lengteverandering van een spoorstaaf als gevolg van een temperatuurverandering bedraagt zoals bekend:

$$\Delta \ell = \alpha \Delta T \ell$$

waarin:

α : lineaire uitzettingscoëfficiënt van railstaal;
 ΔT : temperatuurverandering van de spoorstaaf ten opzichte van de neutrale (inbouw) temperatuur.
 ℓ : oorspronkelijke lengte spoorstaaf

In een spoorconstructie is een vrije uitzetting (of inkrimping) niet mogelijk omdat de spoorstaven door middel van bevestigingsmiddelen zijn vastgezet. Er wordt nu een langsschuifweerstand op de spoorstaaf uitgeoefend die zich verzet tegen lengteverandering van de spoorstaaf. Deze weerstand wordt

geleverd door de combinatie van wrijvingskrachten tussen spoorstaven, dwarsliggers en het ballastbed (of een ander medium).

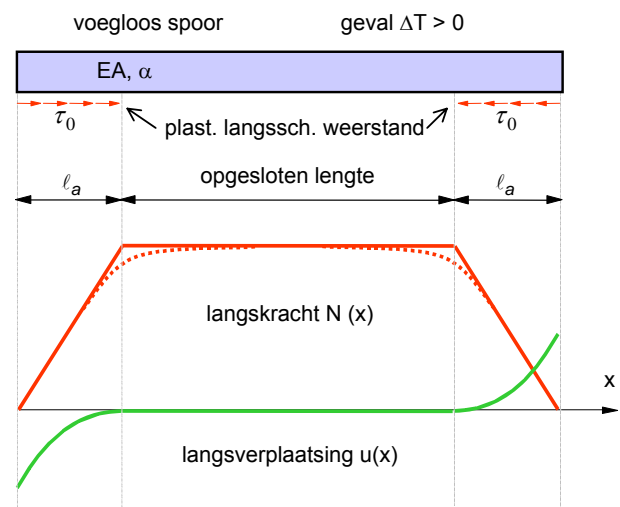
Bij voegloos spoor (zie 4.2) is de ononderbroken lengte van de spoorstaaf zo groot dat er in het centrale deel een vlakke vervormingstoestand heerst, waarbij axiale verplaatsingen van de spoorstaaf volledig worden verhinderd. De in dit 'opgesloten' deel heersende normaalkracht als gevolg van een temperatuurverandering bedraagt dan:

$$N = -EA \frac{\Delta \ell}{\ell} = -EA \alpha \Delta T$$

waarin:

- E : elasticiteitsmodulus railstaal
A : oppervlakte dwarsdoorsnede spoorstaaf

Het min-teken duidt erop dat een temperatuurverhoging (ΔT positief) aanleiding geeft tot een *negatieve* normaalkracht N , dus een *drukkracht* (zie ook Figuur 13).



Figuur 16: Verloop railkracht en verplaatsing

In Figuur 16 is een toepassing geschetst van deze situatie waarbij is uitgegaan van een temperatuurs-verhoging ΔT ; de langsschuifweerstand τ_0 heeft in het gebied waar verschuiven optreedt een constante waarde (plastisch verloop), en werkt uiteraard in tegengestelde richting als de axiale verplaatsing. De langsschuifweerstand wordt geacht gelijkmatig verdeeld te zijn over het werkzame gebied.

Aan de einden van het als voegloos spoor op te vatten spoortraject (voegloos spoor is niet oneindig lang!) bouwt de railkracht af van de waarde in de opgesloten lengte naar nul over de zogenaamde ademlengte ℓ_a . Enige orde-grootten: ademlengte 70 m, schuifweerstand 10 kN/m per dwarsligger, maximale verplaatsing 15 mm en de normaalkracht in de spoorstaaf 800 kN!

In werkelijkheid is de langsschuifweerstand niet voor alle waarden van de verplaatsing constant maar vertoont voor kleine waarden van de verplaatsing een elastisch traject. Hierdoor verloopt de normaalkrachten lijn meer geleidelijk in de overgangspunten. Dit is in Figuur 16 gestippeld weergegeven.

3.9 Temperatureffecten voegloos spoor op kunstwerken

Door ongelijke opwarm- of afkoeleffecten in spoorstaven en brugdelen kunnen plaatselijk grote extra normaalkrachten in de spoorstaven optreden. In combinatie met langskrachten die door remmende treinen op de spoorstaven worden uitgeoefend leiden deze extra krachten plaatselijk tot een aanzienlijk hogere waarde voor de normaalkracht dan de normaalkracht in de opgesloten lengte. Ook kunnen ter plaatse van compensatielassen zeer grote relatieve verplaatsingen optreden. Bovendien kunnen aanzienlijke horizontale krachten op de pijlers van het kunstwerk worden uitgeoefend. Dit is met name het geval bij zeer lange kunstwerken.

4 CONSTRUCTIE ELEMENTEN BOVENBOUW

Inleiding

De belangrijke technologische ontwikkelingen van spoorconstructies na de Tweede Wereldoorlog zijn de volgende:

- introductie van *voegloos spoor* i.p.v. voegenspoor;
- *steenslag* ballastmateriaal i.p.v. grind;
- *verzwaring* spoorstaafprofiel;
- hogere *staalkwaliteit* spoorstaaf;
- toepassing van *betonnen* dwarsliggers (naast houten dwarsliggers);
- *elastische* bevestigingen i.p.v. starre bevestigingen;
- *mechanisering* van het onderhoud i.p.v. handarbeid.
- invoering van geavanceerde *meetapparatuur* voor conditiebepaling spoor.

Na de behandeling van het voegloos spoor concept komen in dit hoofdstuk de constructie en de productie van de afzonderlijke componenten van de bovenbouwconstructie van de spoorweg aan de orde, te weten: de spoorstaven, de lasverbindingen, de dwarsliggers, de bevestiging en het ballastbed.

4.1 Voegloos spoor

Voegenspoor bestaat uit relatief korte stukken spoorstaaf die aan elkaar worden bevestigd met lasplaten en lasbouten. Bij voegloos spoor daarentegen worden stukken spoorstaaf van tot zeer grote lengten in de spoorbaan aaneengelast.

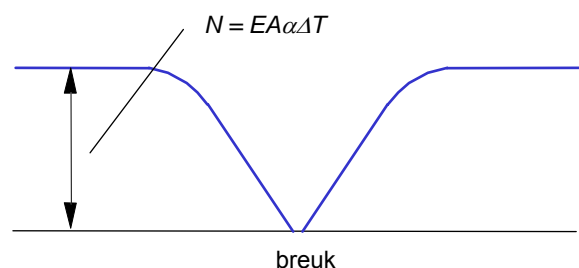
Voegloos spoor heeft grote voordelen t.o.v. voegenspoor, namelijk een structurele vermindering van stoot- en trillingsverschijnselen, slijtage en onderhoud aan sporen en loopwerken van voertuigen. Voegloos spoor vereist echter een stabiel liggende spoorconstructie ter vermindering van een tweetal zeer ongewenste effecten bij extreem hoge railtemperaturen, te weten:

- *spoorspatting* (plotseling uitknikken spoor), bij hoge railtemperatuur (grote raildrukkrachten). (Figuur 17 en Figuur 18).
- *brosse railbreuk*, optredend bij lage railtemperatuur (grote railtrekkrachten) in combinatie met stootbelastingen (Figuur 19);

Brosse railbreuk veroorzaakt ter plaatse van de breuk een opening tussen de spoorstaven. Deze

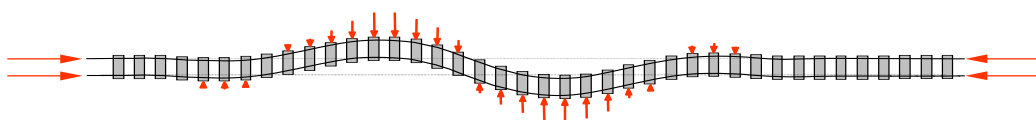


Figuur 17: Spoorspatting in de spoorbaan



Figuur 19: Verloop trekkracht na railbreuk

opening mag niet zomaar worden dichtgelast omdat



Figuur 18: Spoorspattingsmechanisme

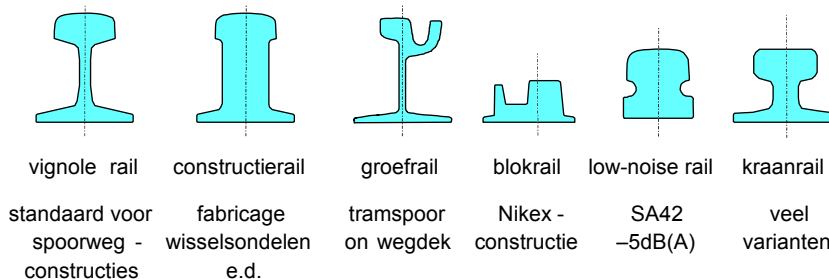
dan extra materiaal wordt toegevoegd dat later een hoge drukspanningspiek veroorzaakt.

De kans op spoorspatting kan aanzienlijk worden verminderd door toepassing van goed ballastmateriaal (zie ballastbed) in combinatie met een *buigstijf* spoorframe in het horizontale vlak. De horizontale *dwarsschuifweerstand* wordt hoofdzakelijk ontleend aan de wrijving tussen dwarsliggers en het ballastmateriaal.

4.2 Spoorstaven

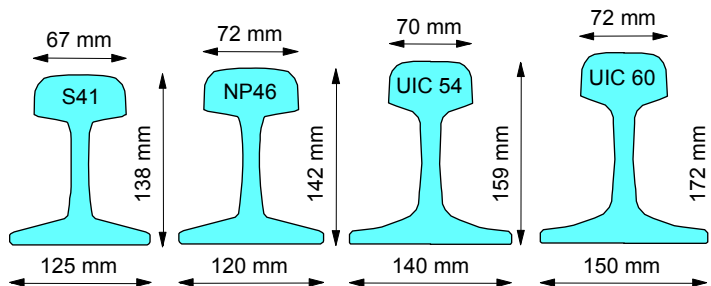
4.2.1 Profielsoorten

De functies van de spoorstaaf zijn af te leiden uit de onder 2.2 genoemde basisprincipes. Meer specifieke functies zijn het leveren van een vlakke en gladde rijbaan en het functioneren als elektrische geleider (indien van toepassing) voor zowel de retourstroom van de tractie als voor de beveiliging (ATB = Automatische TreinBeïnvloeding).



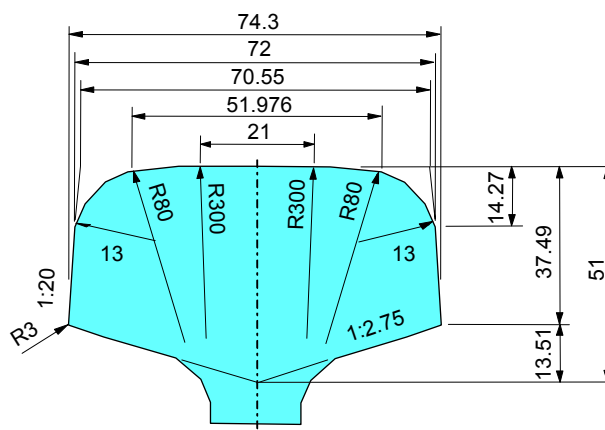
Figuur 20: Typen railprofielen

Enige profielsoorten zijn getekend in Figuur 21. Daarvan is de vignolerail als standaardprofiel te beschouwen in de klassieke spoorconstructie. Het *constructie*profiel verschilt van het vignoleprofiel door een grotere lijfdikte (één- of tweezijdig) en dient ten behoeve van de fabricage van wisselonderdelen, compensatie-lassen e.d.; De *groefrail* wordt toegepast in gesloten spoorconstructies, zoals (tram)spoor in bestrating. De blokrail en de kraanrail zijn minder algemene toepassingen.



Figuur 21: Vignole railprofielen

De geometrie van de vignolerail is afgeleid van het I-profiel, waarbij ten behoeve van de draagen geleidingsfunctie de bovenflens is omgevormd tot een railkop. Figuur 17 en Figuur 22 geven de maatvoering van enige profielen. De getallen geven het afgeronde gewicht in kg per meter aan. NS past twee typen profielen toe, te weten het lichte profiel NP 46 (Normaal Profiel) en het internationale profiel UIC 54 (Union Internationale des Chemins de Fer) dat voor NS als standaard profiel geldt in de belangrijke en zwaardere belaste hoofdsporen. Het UIC 60 profiel komt in aanmerking voor hogesnelheidslijnen of hoogbelaste goederenlijnen.



Figuur 22: Maatvoering railkop UIC60

Men kan het vignoleprofiel, functioneel gezien, in drie delen scheiden:

- *railkop*: de vorm moet zodanig gekozen worden dat goede samenwerking met het wielbandprofiel is verzekerd. De afmetingen van de railkop moeten voldoende groot zijn, zodat een hoge slijtagereserve aanwezig is;
- *raillijf*: de dikte van het lijf wordt bepaald door de eis, dat voldoende stijfheid tegen buiging en plooiën aanwezig is, ook na verlies door corrosie.
- *railvoet*: de breedte hiervan moet groot zijn i.v.m. de standzekerheid van het railprofiel, de drukverdeling op de dwarsligger, het traagheidsmoment in zijdelingse richting. De railvoet dient tevens ter bevestiging van de spoorstaaf, direct of indirect op de dwarsligger.

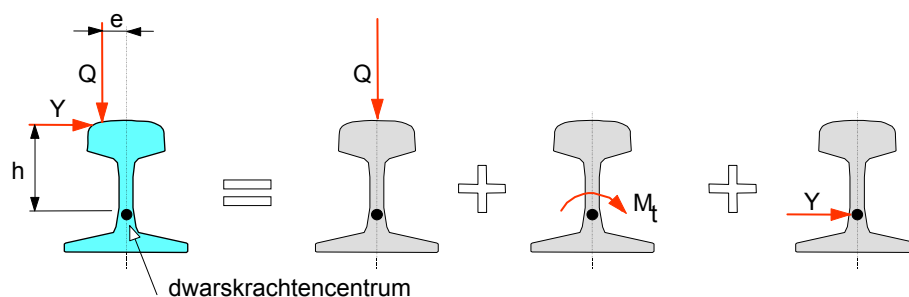
Bij de vervanging door een ander profiel dient men zich te realiseren dat door de ongelijke voetbreedte de profielen niet zonder meer uitwisselbaar zijn in de bestaande bevestiging.

Opmerkingen:

In het lijf worden bij voegenspoor de gaten aangebracht voor de plaatlasconstructies (zie figuur 23). In verband met de plaatsing van de lasplaten zijn de overgangen naar railkop en railvoet, de zgn. laskamers, hellend uitgevoerd. De afrondingen moeten voldoende groot zijn om het optreden van spanningsconcentraties tegen te gaan. Vorm- en maatafwijkingen van railprofielen, die ontstaan bij het fabricageproces, moeten binnen bepaalde grenzen blijven. Het verdient daarom aanbeveling bij de opbouw van het spoor, spoorstaven uit dezelfde walspartij (batch) te betrekken en deze in dezelfde walsrichting samen te stellen. Op het lijf van de spoorstaven is hiervoor een codering aangebracht.

4.2.2 Gecombineerde belasting

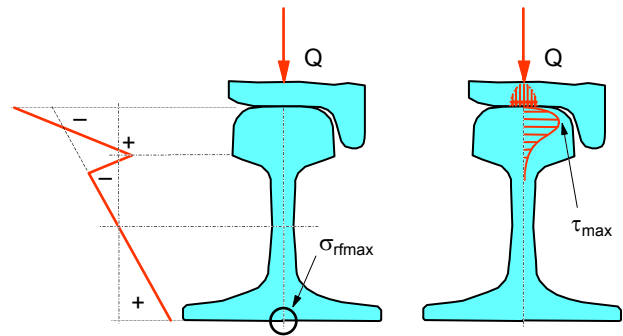
Voor de berekening van de buigspanningen in de spoorstaaf als gevolg van een Y/Q-belasting wordt vaak de in Figuur 23 aangegeven splitsingsmethode gevolgd. In de totaalbeschouwing moet ook rekening worden gehouden met de inwendige (residuele spanningen) in de rail. Deze zijn het gevolg van het wals- en richtproces.



Figuur 23: Belastingssplitsing

4.2.3 Kritische buigspanning in de railvoet

De kritische buigspanning treedt op in de railvoet (Figuur 24, links) omdat daar behalve de buigtrekspanning door de verticale belasting ook twee constante trekspanningen aanwezig zijn, te weten de residuele spanning door het walsproces en de trekspanning bij lage temperatuur in voegloos spoor.



Figuur 24: Kritische spanningen in de spoorstaaf

4.2.4 Kritische schuifspanning in de railkop

Van belang is ook de kritische schuifspanning die optreedt in de railkop en die het gevolg is van de contactspanningsverdeling (Figuur 24, rechts).

Met behulp van de halfruimtetheorie kan worden berekend dat de maximum schuifspanning optreedt op een diepte van enkele mm onder het belaste railoppervlak in de railkop. Op den duur kan hierdoor een afschilfering van de railkop optreden die bekend staat als *shelling*. Door middel van ultrasoononderzoek kan men tijdig defecten als deze in de railkop detecteren.

Spoorstaven worden geleverd in lengten van 30-120 m (Bij NS 36m). In een vaste inrichting (bij NS het Spoorstaafbedrijf in Utrecht) worden deze lengten t.b.v. voegloos spoor aaneengelast tot 180 m volgens het stomplasproces. Dit is de maximale lengte in verband met het transport naar de bouwplaats. Op de bouwplaats worden deze spoorstaven verder aaneengelast tot grotere lengten met behulp van thermietlassen.

4.3 Lasverbindingen

4.3.1 Typen

Lasverbindingen dienen om ter plaatse van twee aaneensluitende losse spoorstaven een zo goed mogelijke verbinding tussen de spoorstaven tot stand te brengen. De geometrische afwijkingen dienen voldoende klein te zijn teneinde dynamische effecten te beperken. Sterkte en stijfheid moeten die van de volle spoorstaaf zoveel mogelijk benaderen. Men onderscheidt de volgende mogelijkheden:

met dilatatiemogelijkheid:

- *plaatlassen* (voegenspoor);
- *compensatielassen, compensatie-inrichtingen*;
- *brugovergangsconstructies*.

zonder dilatatiemogelijkheid:

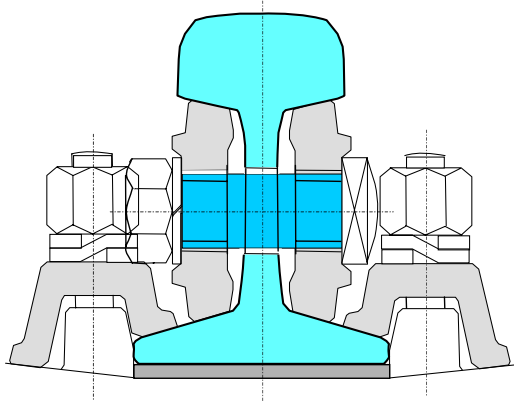
- *isolatielassen* (elektrische scheidingslassen);
- *metallurgische lassen* (stompassen, thermietlassen, bekiste lassen).

Ter onderscheiding van de metallurgische lassen rekent men de overige verbindingen tot de constructieve lasverbindingen. Op basis hiervan kan de volgend indeling worden gemaakt.

4.3.2 Constructieve lassen

Plaatlassen

Plaatlassen dienen voor de verbinding van aansluitende spoorstaven in voegenspoor. De verbinding wordt tot stand gebracht met behulp van lasplaten en lasbouten volgens Figuur 26 en Figuur 25. Axiale verschuivingen als gevolg van temperatuurwisselingen dienen mogelijk te zijn.



Figuur 26: Plaatlas ('K-Oberbau')



Figuur 25: Plaatlas ('K-Oberbau') in de spoorbaan

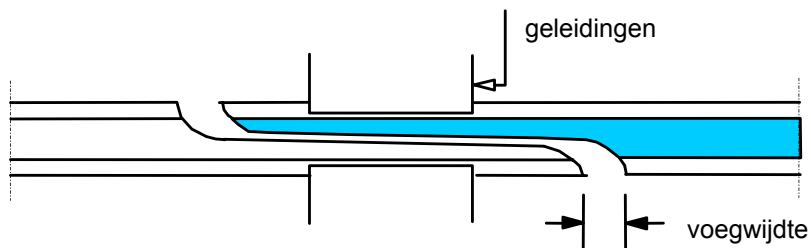
Vanwege de grote slagwerking wordt bij NS de plaatlas opgelegd op een dubbelligger, d.w.z. twee gekoppelde dwarsliggers. Ofschoon de belasting over twee dwarsliggers wordt verdeeld, blijft de plaatlas veel onderhoud vergen. Bovendien vereist het afwijkende dwarsliggerpatroon extra aandacht bij het mechanische stopproces. Door het vele extra onderhoud wordt de plaatlas zoveel mogelijk vermeden.

Compensatielassen en compensatie-inrichtingen

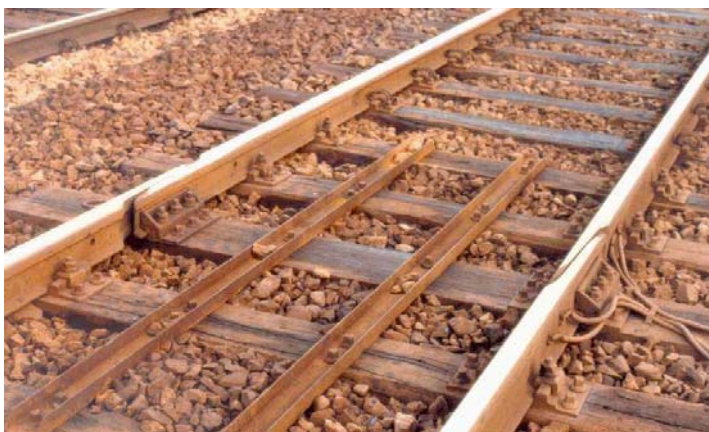
Deze verbindingen dienen om bepaalde constructies spanningsvrij te houden, als de sporen buiten de constructie onderhevig zijn aan grote verplaatsingen ten gevolge van temperatuurverschillen of kruip.

De *compensatielas*, weer gegeven in Figuur 27 en Figuur 28 is opgebouwd uit een constructiespoorstaaf en laat een axiale verplaatsing toe tot 120 mm. De compensatielas is duur en wordt alleen toegepast in voegenspoor bij de rolplegging van grotere kunstwerken en in voegloos spoor bij de beëindiging of bij constructieve verandering als wissels en bruggen.

De *compensatie-inrichting* bestaat uit een vast gemonteerde aanslagspoorstaaf en een tong, volgens Figuur 29, die over een afstand van maximaal 220 mm langs de aanslagspoorstaaf kan schuiven. Deze constructie wordt toegepast bij voegloos spoor op kunstwerken met een tota-

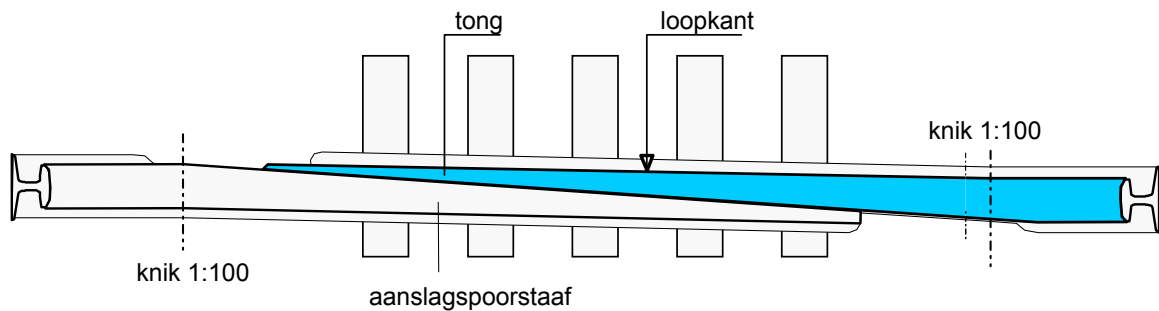


Figuur 27: Compensatielas principe



Figuur 28: Compensatielas in de spoorbaan

le uitzetlengte van meer dan 120 mm.



Figuur 29: Compensatie-inrichting (niet op schaal)

Brugovergangsconstructie

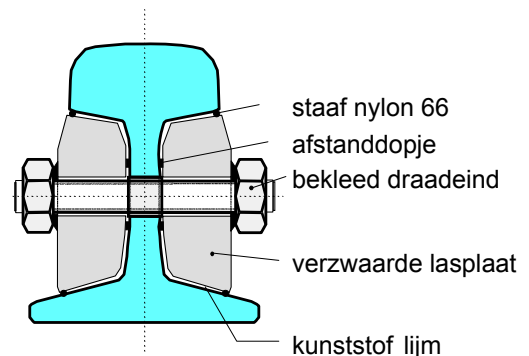
Bij brugovergangsconstructies wordt rekening gehouden met de heffende of draaiende beweging van de brug. Men onderscheidt twee typen. De overgang met schuine voeg wordt toegepast bij vertikaal bewegende bruggen en lijkt op de compensatielas. De overgang met knuppelconstructie wordt toegepast bij bruggen die niet opgezet kunnen worden, zoals basculebruggen. Bij deze constructie steunt het wiel gedeeltelijk op de knuppel die, voor het openen van de brug, teruggeschoven kan worden. (geen tekening).

Electrische scheidingslas (isolatielas)

Teneinde bij toepassing van het automatische blokstelsel de stroomcircuits van elkaar te scheiden worden elektrische scheidingslassen toegepast. Deze spoorstaafverbinding dient dus uitsluitend om beide aansluitende spoorstaven elektrisch van elkaar te isoleren, waarbij de mechanische eigenschappen van de volle spoorstaaf zoveel mogelijk behouden moeten blijven. De verbinding wordt opgebouwd uit lasplaten, bouten en isolatiemateriaal.

Men onderscheidt in hoofdzaak twee uitvoeringen:

- **geconstrueerde isolatielas:** Hierbij bevindt zich in de voeg tussen de spoorstaven een nylon profielplaatje van 6 mm en tussen de lasplaten en de spoorstaven een kunststof voering. Ook de lasbouten zijn geïsoleerd van de lasplaten. Omdat geen grote langskrachten opgenomen kunnen worden, is deze constructie niet geschikt voor voegloos spoor.



Figuur 30: Gelijmde isolatielas

- **gelijmde isolatielas:** Deze verbinding is op dezelfde wijze uitgevoerd als de geconstrueerde isolatielas met uitzondering van de voeringen. De isolerende werking wordt hier, zoals aangegeven in Figuur 30, verkregen door toepassing van een kunststoflijm. Deze las is in staat axiale krachten in voegloos spoor op te nemen tot ongeveer 1000 kN. Deze lassen worden zowel in het werk gemaakt als geprefabriceerd in een stuk spoorstaaf, dat later in het spoor wordt gelast door middel van thermietlassen. De elektrische weerstand (impedantie) dient tenminste 10Ω te bedragen bij 100 kHz. Figuur 31 toont de lijmlas in de spoorbaan.



Figuur 31: Gelijmde isolatielas in de spoorbaan

4.3.3 Metallurgische lassen

Vonkstuiklas (stomplas)

Stomplassen worden vervaardigd in vast opgestelde spoorstaaf-lasmachines, zoals aanwezig in de spoorstaafasbedrijf (SLB) van NS te Utrecht (zie Figuur 32). Kwalitatief zijn stomplassen beter dan de hierna te bespreken thermietlassen. Ook zijn er mobiele stomplasmachines (Figuur 33), waarmee stomplassen in de baan gemaakt kunnen worden.

In het kort verloopt de procedure als volgt:

- stralen uiteinden spoorstaven;
- spoorstaafeinden in positie brengen;
- elektrische spanning aanleggen;
- vlamboog brengt de einden op smeedtemperatuur;
- onder hoge druk de spoorstaafeinden stuiken;
- lasbraam afstropen, gevolgd door de nabewerkingen;
- koelen, richten en slijpen.



Figuur 32: Schlatter stomplasmachine



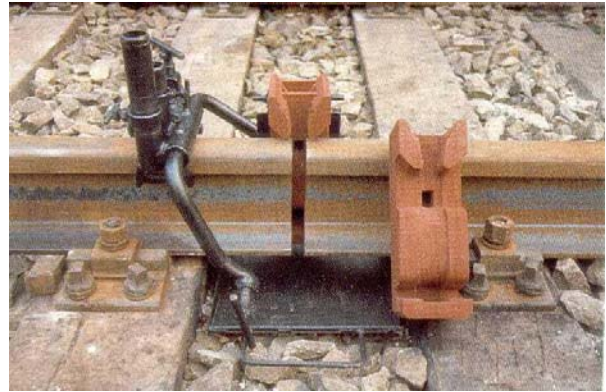
Figuur 33: Mobiele stomplasmachine

Aluminothermische las (Thermietlas)

De thermietlas is ontwikkeld om in de spoorbaan met relatief eenvoudige hulpmiddelen toch een goede metallurgische las te maken. De methode maakt gebruik van een mengsel van aluminiumpoeder en ijzeroxyde, dat bij hoge temperatuur wordt omgezet in aluminium-oxyde en staal. Door de vrijkomende warmte loopt de temperatuur op tot 2500°C.

Het circa 15 minuten durende proces verloopt als volgt:

- spoorstaafinden uitlijnen;
- gietvorm om de voeg aanbrengen;
- gietkroes aanbrengen (zie Figuur 34);
- spoorstaven voorverwarmen tot 900 °C met behulp van propaanbranders;
- mengsel ontsteken: reactie: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{Al} \rightarrow 2 \text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 850 \text{ kJ}$ (zie Figuur 35);
- kroes en vorm verwijderen;
- lasbraam afstropen en las naslijpen (Figuur 36).



Figuur 34: Voorbereiding thermietlas



Figuur 35: Thermietlasproces in actie



Figuur 36: Thermietlas: eindproduct

Bekiste las

Bij deze elektrische vlamboogmethode wordt binnen een "bekisting" van koperen mallen de las met behulp van elektroden vanaf de spoorstaafvoet naar boven opgebouwd. Vanwege de geringere kwaliteit past NS alleen dan bekiste lassen toe, als het niet mogelijk blijkt te zijn om een thermietlas te maken.

De 15 tot 20 minuten durende procedure voor de bekiste las verloopt als volgt:

- mallen aanbrengen;
- voorverwarmen tot 250 à 200°C met behulp van propaanbranders;
- voeg van onder naar boven dichtlassen;
- mallen verwijderen.

4.4 Dwarsliggers

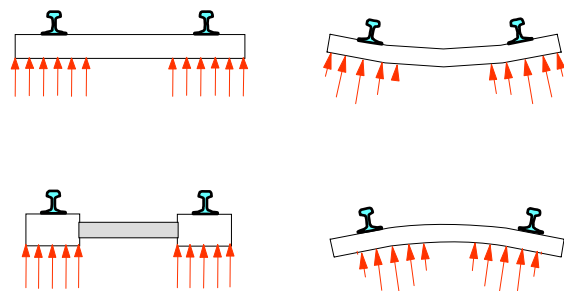
4.4.1 Soorten

In het ballastspoor rusten de spoorstaven op dwarsliggers en vormen hiermee het geconstrueerde gedeelte van de bovenbouw. Hoewel houten dwarsliggers tot nu toe het meeste zijn toegepast, ondervindt deze groep een toenemende concurrentie van betonnen dwarsliggers. Bij NS ligt de verhouding hout-beton thans op ongeveer 1:2. Op kleinere schaal vinden elders ook stalen dwarsliggers toepassing.

4.4.2 Functies

- opleg- en bevestigingsmogelijkheid voor spoorstaafvoet en bevestigingsmiddelen;
- opnemen en op het ballastbed zoveel mogelijk gespreid overbrengen van spoorstaafkrachten;
- handhaving van spoorwijdte en inbouwhelling spoorstaven;
- voldoende elektrische isolatie tussen beide spoorstaven;
- gedurende lange tijd bestand zijn tegen mechanische inwerkingen en weersinvloeden.

In verband met de stabiele ligging is het gewenst dat de dwarsligger alleen in het gebied onder de spoorstaven wordt ondersteund. Dit wordt bij prismatische dwarsliggers, zoals de houten dwarsligger en de monoblok betondwarsligger, bereikt door alleen dit gebied te onderstoppen en het middelste gedeelte vrij te houden, als aangegeven in Figuur 37. Bij een betonnen tweebloksdwarsligger wordt dit doel door de constructie zelf al bereikt.



Stabiel ondergestopte dwarsliggers

Niet correct onderstepte dwarsliggers

Figuur 37: Onderstepping dwarsliggers

Bovendien moet worden voorkomen dat de dwarsligger ter plaatse van de spoorstaven onder de verticale belasting een rotatie vertoont, omdat deze aanleiding geeft tot spoorvernaauwing of verwijding en de helling van spoorstaven verandert. Dit effect treedt op indien de dwarsligger te veel aan de binnen- of buitenkant is ondersteund door niet correct stoppen, dan wel te kort of te lang is.

Opdat de aanwezige ballastschuifweerstand in langs- en dwarsrichting optimaal wordt benut, dient de dwarsligger met de kop- en zijvlakken volledig in de ballast te liggen. De dwarsliggerafstand bedraagt hart op hart 60 cm, bij licht belast spoor tot 75 cm.

4.4.3 Houten dwarsliggers

De houten dwarsligger is prismatisch van vorm met een hoogte van 15 cm en een breedte van 25 cm. De lengte bedraagt 2.60 à 2.70 m en het gewicht circa 100 kg, waardoor de houten dwarsligger handmatig kan worden verwisseld (gestoken).

De volgende soorten vinden toepassing:

- *zachthouten* dwarsliggers (grenen). Omdat de druksterkte loodrecht op de houtvezel bij zachthout niet groot is, moet tussen dwarsligger en spoorstaaf een stalen onderlegplaat worden gelegd die de belasting over een groter oppervlak spreidt. Op den duur snijdt de onderlegplaat toch in het dwarsliggerhout, zodat speling ontstaat en door toetreding van water (pompwerking) de bevestiging snel in kwaliteit achteruitgaat. Dit inslag-verschijnsel wordt vertraagd door het oplegvlak van de dwarsligger te behandelen met kunststof. Dit procédé, dat NS standaard toepast, leidt globaal tot een levensduurverlenging van 30 %.

- *hardhouten* dwarsliggers (beuken, eiken, tropische soorten). Deze soort is sterker en heeft een langere levensduur. Ook hier worden de oplegvlakken met kunststof behandeld. Hardhouten dwarsliggers worden toegepast in o.a. wissels en met bevestigingen zonder rughellingplaat.

Wisselhouten zijn dwarsliggers van normale doorsnede, maar met grotere lengte, tot 7.50 m, en geheel gevloekt, voor toepassing in wissels. Brugdwarsliggers zijn houten dwarsliggers met speciale maatvoering voor toepassing op stalen bruggen.

Houten dwarsliggers moeten na levering een reeks van behandelingen ondergaan alvorens zij in de baan gelegd kunnen worden. Bij NS gebeurt dit in het Houtbereidingsbedrijf (HBB) te Dordrecht en omvat het volgende:

- een droogperiode van minstens driekwart jaar;
- kepen (frezen) van de oplegvlakken;
- boren van gaten ten behoeve van de bevestigingsmiddelen;
- banderen door middel van een stalen band ter beperking van scheuren.
- creosoteren (bereiden) van de houten dwarsligger, teneinde biologische aantasting (schimmels, insecten, e.d.) te voorkomen. De creosootolie wordt onder hoge druk in het hout geperst, waarna door toepassing van onderdruk een deel van de olie weer wordt teruggewonnen;
- monteren van de bewapening (rughellingplaten) of klemhouders.

De totale levensduur in jaren van enige soorten houten dwarsliggers is: grenen 20-25, beuken 30-40 en eiken 40-50.

In tegenstelling tot andere houtsoorten moet en kan beukenhout door en door gecreosoteerd worden. Dit verklaart de lange levensduur. Onbehandeld wordt beukenhout bijzonder snel aangetast door schimmels (zgn. "slaap"). In het algemeen wordt de levensduur van bereide dwarsliggers niet bepaald door verweringsprocessen maar door mechanische inwerkingen.

4.4.4 Betonnen dwarsliggers

De ontwikkeling en toepassing van betonnen dwarsliggers is vooral na de Tweede Wereldoorlog van grote betekenis geworden onder invloed van houtschaarste, invoering voegloos spoor en verbetering van betontechnologie en voorspanttechniek.

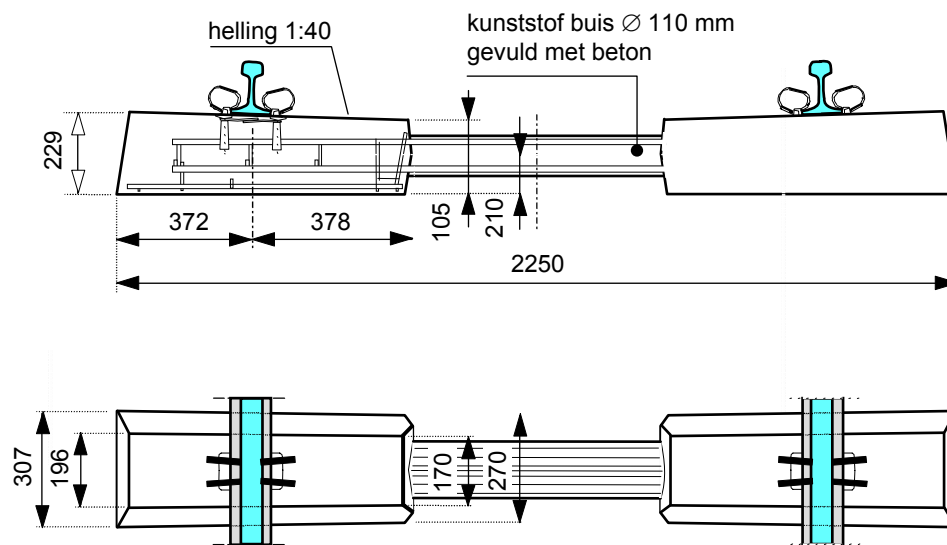
Men onderscheidt de volgende typen:

tweebloksdwarsligger.

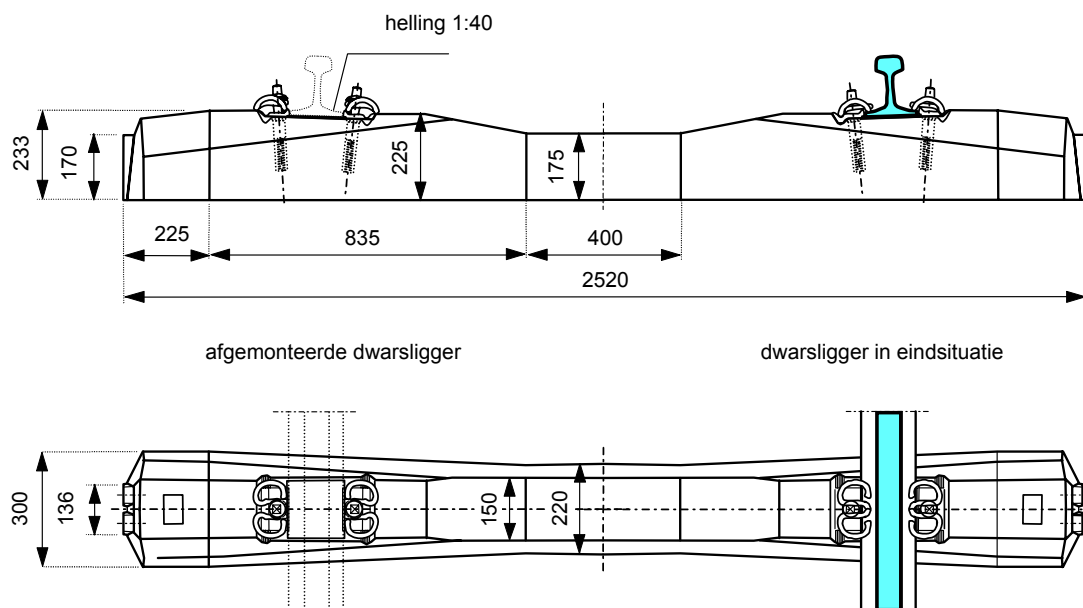
Dit type bestaat uit twee blokken van gewapend beton die door een koppelstang of -buis verbonden worden. Bij NS werd tot voor kort de UIC 54 betondwarsligger toegepast, afgebeeld in Figuur 38. De blokken zijn hier gekoppeld door een kunststofbuis, gevuld met gewapend beton. Het bovenzvlak van de blokken heeft een helling 1:40, overeenkomstig de gewenste spoorstaafhelling. Het gewicht bedraagt circa 2 kN.

monoblokdwarsligger.

Deze is gebaseerd op de balkvorm en heeft globaal dezelfde hoofdafmetingen als een houten dwarsligger. Figuur 39 toont de nieuwe voorgespannen monoblok dwarsligger van NS, welke thans voor de nieuwe lijnen en vervangingen wordt toegepast. Het gewicht bedraagt circa 250 kg. De rail wordt bevestigd met Vossloh klemmen (zie later).



Figuur 38: Gewapende tweebloksdwarsligger



Figuur 39: Voorgespannen monoblokdwarsligger

4.4.5 Vergelijking tweebloksdwarsligger en monoblokdwarsligger

Voordelen van de tweebloksdwarsligger ten opzichte van de monoblokdwarsligger zijn:

- goed gedefinieerde oplegvlakken in het ballastbed;
- hoge dwarsschuifweerstand in het ballastbed door het dubbele aantal kopvlakken.

Nadelen t.o.v. de monoblokdwarsligger zijn:

- hogere prijs;
- grotere scheurgevoeligheid;
- niet voor te spannen.

4.4.6 Vergelijking betonnen dwarsligger en houten dwarsligger

Specifieke voordelen van betonnen dwarsliggers ten opzichte van houten dwarsliggers zijn:

- groot gewicht (200-300 kg) nuttig in verband met stabiliteit van voegloos spoor;
- de levensduur ligt, bij kwalitatief goed spoor, beduidend hoger.
- grote vrijheid in vormgeving en constructies;
- relatief eenvoudige fabricage.
- klimatologische factoren e.d. hebben nauwelijks invloed;

Als nadelen van betonnen dwarsliggers kunnen worden genoemd:

- minder elastisch dan hout. Op slechte ondergrond mogelijk optreden van "klappers";
- door groot gewicht moeilijk hanteerbaar, geen handverwerking;
- kans op beschadiging bij stoten (ontsporing, laden/lossen, stopijzers);
- dynamische belastingen en ballastspanningen liggen tot 25% hoger;
- restwaarde negatief.

4.5 Bevestigingen

4.5.1 Typen

Onder een bevestiging wordt verstaan het totaal van onderdelen dat gezamenlijk de constructieve verbinding vormt tussen spoorstaaf en dwarsligger. De afzonderlijke onderdelen van de bevestiging worden gerekend tot de bevestigingsmiddelen. Er bestaat, wereldwijd gezien, een grote variatie aan bevestigingen die nog regelmatig wordt uitgebreid met nieuwe typen, aangepast aan veranderde wensen en inzichten, of mogelijk gemaakt door toepassing van nieuwe materialen. De keuze van de bevestiging is ook sterk afhankelijk van eigenschappen en constructie van de dwarsligger.

4.5.2 Functies

- blijvend verzekeren, met zekere toleranties, van spoorwijdte en inbouwhelling van de spoorstaven;
- elastisch opnemen en op de dwarsligger overdragen van de spoorstaafkrachten
- leveren van een voldoende verticale klemkracht van de spoorstaaf op de dwarsligger in elke belastingssituatie, ook na slijtage, ter verzekering van de noodzakelijke doorschuifweerstand en de hoekverdraaiingsweerstand van de spoorstaaf ten opzichte van de dwarsligger;
- zoveel mogelijk dempen van trillingen en stootbelastingen via het elastische beddingsplaatje (vaak kurkrubber) tussen railvoet en dwarsligger.
- elektrische isolatie tussen spoorstaven en dwarsliggers, in het bijzonder bij betonnen en stalen dwarsliggers.

De doorschuifweerstand moet voldoende hoog zijn om de beweging in langsrichting te beperken in verband met rembelasting, thermische belastingen (ademplengte), voegwijdte bij spoorstaafbreuk en het kruipverschijnsel. NS streeft ernaar de doorschuifweerstand tussen spoorstaaf en dwarsligger op tenminste 14 kN te houden, zodat deze veel groter is dan de langsschuifweerstand van de dwarsligger in het ballastbed, welke voor een halve dwarsligger in de orde van 5 kN ligt. Hierdoor blijft bij grote axiale spoorstaafkrachten de bevestiging intact en zullen de dwarsliggers verschuiven in het ballastbed.

De hoekverdraaiingsweerstand draagt bij tot een grotere horizontale buigstijfheid van het spoorframe, zodat dan meer zekerheid tegen spoorspatting aanwezig is.

Bij voegloos spoor met directe bevestiging op viaducten geldt de eis, dat de door temperatuurverschillen geïntroduceerde langskracht, welke door de vaste oplegging van het viaduct moet worden opgenomen, niet te groot mag worden. Deze langskracht bedraagt maximaal de som van de doorschuifkrachten gesommeerd over de viaductlengte. Door toepassing van speciale nylon klemplaten kan de doorschuifweerstand worden verlaagd.

4.5.3 Indeling bevestigingen

Naar de wijze van bevestiging kan men onderscheiden:

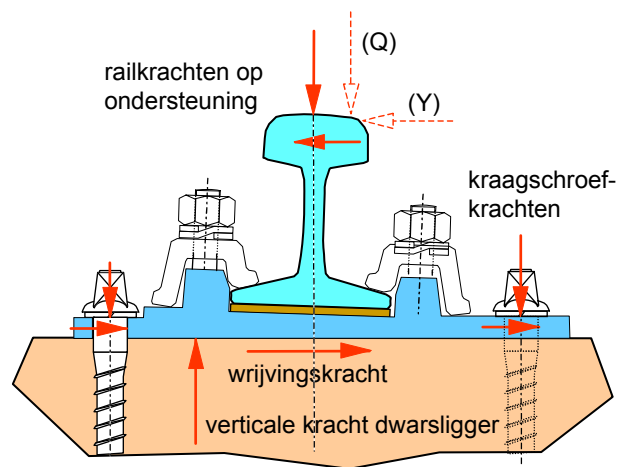
- *directe bevestigingen*, waarbij dezelfde bevestigingsmiddelen zowel de spoorstaaf als de eventuele onderlegplaat op de dwarsligger vastzetten. Eveneens wordt de bevestiging van spoor op kunstwerken, zonder ballastbed en dwarsliggers, als directe bevestiging aangeduid.
- *indirecte bevestiging*, waarbij de spoorstaaf via een tussenelement (onderlegplaat, klemhuis) is verbonden met andere bevestigingsmiddelen dan waarmee het tussenelement aan de dwarsligger is verbonden. Indirecte bevestigingen hebben als voordeel dat de spoorstaaf verwijderd kan worden zonder de bevestigingsmiddelen aan de dwarsligger los te nemen en dat het tussenelement vooraf op de dwarsligger kan worden aangebracht.

4.5.4 Rughellingplaten

De spoorstaven kunnen op de dwarsliggers worden bevestigd met of zonder stalen onderlegplaten. Deze bewapening is voorzien van een hellend bovenvlak en opstaande ribben, waartussen de spoorstaaf wordt opgesloten. De belangrijkste constructie in deze categorie vormt de rughellingplaat. Het krachtenspel is weergegeven in Figuur 40.

De rughellingplaat met klembouten vormt de klassieke indirecte bevestiging. De constructie is vroeger op grote schaal toegepast en is een voorbeeld van een starre (niet-elastische) bevestiging.

De rughellingplaat wordt met kraagbouten op de houten of betonnen dwarsligger bevestigd. De spoorstaaf wordt vastgezet met klembouten, starre klemplaten, veerringen en moeren. De starre bevestiging De elasticiteit in verticale zin ontleent deze bevestiging aan het slijtplankje en de veerringen.



Figuur 40: Krachten op rughellingplaat

Het gebruik van deze platen heeft de volgende voordelen:

- de verticale belasting wordt over een groot oppervlak van de dwarsligger verdeeld. Door deze bewapening wordt de levensduur van de dwarsliggers verlengd;
- de horizontale belasting wordt beter opgenomen door wrijving en door verdeling over alle in de dwarsligger verankerde bevestigingsmiddelen; rughellingplaten zijn bij uitstek geschikt voor het opnemen van grote zijdelingse krachten bij toepassing van grote verkantingstekorten;
- bij rughellingplaten is kepen van de houten dwarsligger niet nodig;
- rughellingplaten hebben een grote buigstijfheid en bieden door inkassingen (kluisgaten) in de ruggen goede bevestigingsmogelijkheden voor de spoorstaaf;
- de onderlegplaten geven extra gewicht aan de dwarsligger.

Als nadeel kunnen de relatief hoge kosten worden genoemd en de wat hogere constructie.

4.5.5 Elastische bevestigingen

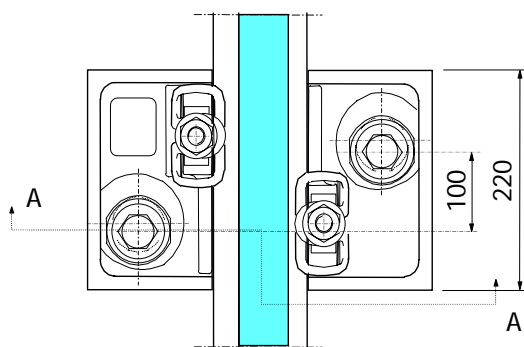
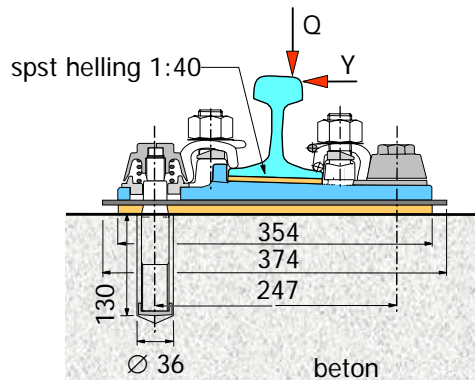
De introductie van voegloos spoor heeft de behoefte doen ontstaan aan bevestigingen met een grotere elasticiteit. Zeker bij toepassing van betonnen dwarsliggers is dit, vanwege de stootgevoeligheid, een absolute noodzaak.

In de vijftiger jaren werd in Nederland de zgn. DE-klem ingevoerd. Deze elastische klem werd o.a. als directe bevestiging op viaduct toegepast. Door het ontbreken van een schroefdraadverbinding was in principe geen onderhoud of nastellen vereist ('fit-and-forget' principe). Een toepassing is te zien in Figuur 56. Omdat deze klem erg gevoelig is voor maatverschillen, die niet corrigeerbaar zijn, is deze klem inmiddels in onbruik geraakt en vervangen door de Vossloh-bevestiging (Figuur 42 en Figuur 41).

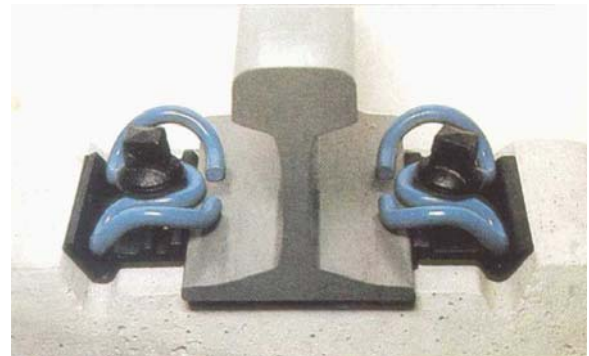
Het principe van de elastische bevestiging bestaat hierin, dat de veerweg groot is, dat wil zeggen dat de klemkracht gepaard gaat met een aanzienlijke elastische veerverplaatsing. Figuur 44 toont de klemkracht versus veerweg voor een aantal typen.

Deze klem geeft de mogelijkheid geeft de vereiste klemkracht beter in te stellen, te controleren en te corrigeren. Deze klem wordt in een groot aantal landen toegepast, zowel voor spoorwegen als tramwegen.

Een ander veel gebruikt type elastische bevestiging van het fit-and-forget principe is de Pandrol-bevestiging (Figuur 43) die eveneens een wereldwijde toepassing kent. Deze klem is eenvoudiger



Figuur 42: Directe bevestiging op beton (Vossloh-klem)



Figuur 41: Vossloh bevestiging



Figuur 43: Pandrol bevestiging

aan te brengen (in langsrichting) en brengt de klemkracht via passtukken over op de spoorstaaf.

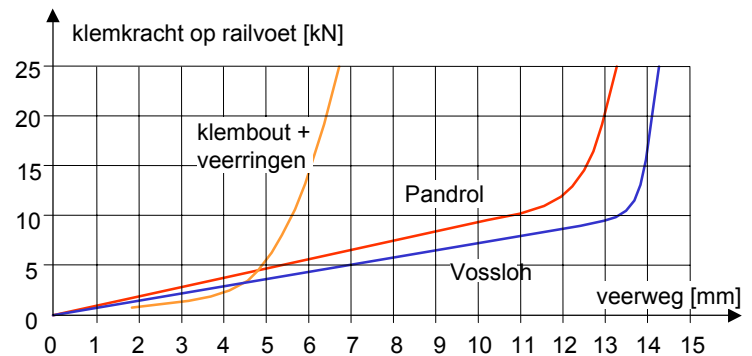
Het principe van de elastische bevestiging bestaat hierin, dat de veerweg groot is, dat wil zeggen dat de klemkracht gepaard gaat met een aanzienlijke elastische veerverplaatsing. Figuur 44 toont de klemkracht versus veerweg voor een aantal typen.

De lage stijfheid en grote veerweg maken de klemkracht op het spoor minder gevoelig voor:

- elastische bewegingen bij wielpassage;
- maatafwijkingen en onnauwkeurigheden tijdens inbouw van de klemhouder;
- eventueel in geringe mate loswerken van de bevestigingsmiddelen;
- slijtage.

De stijfheid van de bevestiging wordt in hoge mate bepaald door het railbeddingsplaatje (rail pad).

Een bijzonder en zeer actuele wijze van railbevestiging is het vrijwel volledig inkapselen (door ingieting of inklemming) van de spoorstaaf met behulp van kunststoffen (zie hoofdstuk 5).



Figuur 44: Veercharacteristieken bevestigingen

4.6 Ballastbed

4.6.1 Samenstelling

Het ballastbed bestaat uit een laag grofkorrelig en ongebonden materiaal, dat door de inwendige wrijving tussen de korrels aanzienlijke drukspanningen kan opnemen, echter geen trekspanningen. De draagkracht van het ballastbed is in verticale richting groot, in dwarsrichting echter duidelijk begrensd.

De belangrijkste eisen waaraan het ballastmateriaal moet voldoen zijn een grote hardheid en slijtvastheid, alsmede een goede korrelverdeling. De korrels zelf moeten kubisch en scherpkorrelig zijn. De dikte van het ballastbed dient zodanig te zijn, dat de ondergrond zoveel mogelijk gelijkmatig wordt belast. De optimale dikte is meestal 25 à 30 cm, gemeten vanaf onderzijde dwarsligger.

Bij het afwerken van de ondergrond en het aanbrengen van de ballastlagen dient ter voorkoming van zettingsverschillen te worden gezorgd voor een nauwkeurige afwerking, waarbij afwijkingen beperkt moeten blijven tot 10 mm.

De onder het ballastbed liggende tussenlaag gaat vermenging tussen grote en kleine korrels tegen, conform de hiervoor geldende filterwetten. Soms worden nog extra lagen aangebracht i.v.m. vorstbescherming en een nog betere belastingsspreiding.

Naast de drukverdelende functie en het leveren van zijdelingse weerstand is de drainerende werking van groot belang, waarbij de bergingscapaciteit tijdens stortbuien een niet te onderschatten facet vormt.

Verontreiniging van het ballastbed kan ontstaan door uitwendige oorzaken of door inwendige oorzaken, zoals slijtage en verweering van het ballastmateriaal. Op een slechte ondergrond kunnen door de pulserende werking van de dwarsliggers fijne deeltjes in de vorm van een klei(leem)-water mengsel in het ballastbed worden opgeperst (mud pumping), leidend tot een sterk verontreinigd ballastbed. Deze uiterlijk herkenbare locaties staan bekend als 'klappers'.

Een vervuild ballastbed belemmert de waterafvoer, waardoor de schuifweerstand achteruitgaat en bij vorst opvriezing optreedt.

Op den duur is een algemene reiniging van het ballastbed noodzakelijk, uit te voeren met groot onderhoudsmaterieel, het ballasthorren.

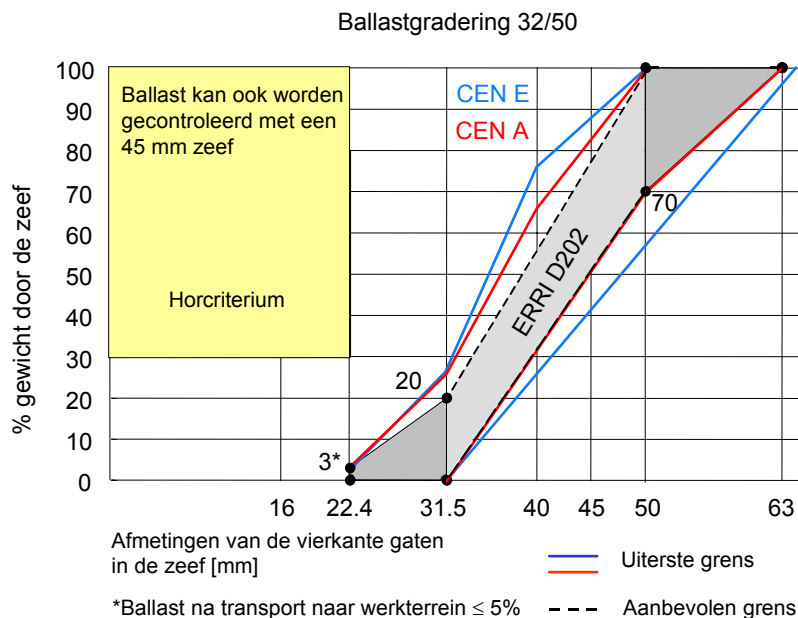
4.6.2 Soorten

Enige vaak gebruikte ballastsoorten zijn:

- *steenslag*: gebroken stollings- of sedimentgesteente, zoals porfier, basalt, graniet, gneis, kalksteen, gres, enz. Gradering 30/60 mm voor hoofdsporen en 20/40 mm voor wissels en overwegen. Steenslag bezit in het algemeen zeer gunstige eigenschappen; sommige soorten zijn echter gevoelig voor vertering, waardoor kans op leemvorming bestaat;
- *grind(kiezel)*: afkomstig uit de Maas en sinds lang toegepast in NS-spoor. Gradering 20/50 mm. Grind heeft een grote hardheid maar bestaat uit ronde korrels, waardoor een grindballastbed een lage inwendige wrijving bezit.
- *gebroken grind*: wordt verkregen door breking van grote grindstukken. Komt voor in NS-spoor. Gradering 20/40 mm. Deze soort is inmiddels in onbruik geraakt.

4.6.3 Ballastspecificatie

Het al dan niet gebroken zijn van grind is van grote invloed op de schuifweerstand. Van gebroken grind is deze aanmerkelijk groter dan van gebroken grind. Figuur 45 toont een overzicht van een ballastspecificatie opgesteld door het ERRI (European Rail Research Institute)



Figuur 45: Ballast specificatie

5 BOVENBOUWSYSTEMEN

5.1 Ontwikkeling en Indeling

Tegenover de vele bewezen voordelen van het klassieke ballastspoor staat het grote nadeel van steeds terugkerend en intensief onderhoud. Door nieuwe ontwikkelingen zoals hogere belastingen, hogere snelheden, hogere tonnages, meer intensief gebruik van het spoor, etc. gaat dit nadeel steeds zwaarder gaan wegen, temeer omdat de beschikbaarheid van het spoor voor onderhoud afneemt. In Japan en Europa worden daarom andere mogelijke constructievormen voor de spoorweg onderzocht, die in potentie een grotere draagkracht en een grotere duurzaamheid hebben dan de klassieke vorm met ballastbed en dwarsliggers of die tenminste gelijke geluid- en/of trillingsdempende eigenschappen bezitten als ballastspoor.

Bovenbouwsystemen kunnen grofweg in twee groepen worden ingedeeld, te weten:

- spoorconstructies met ballastbed op dwarsliggers (ballastspoor)
- spoorconstructies zonder ballastbed (ballastloos spoor)

Ballastloos spoor is daarbij nog te onderscheiden in:

- discreet bevestigde railconstructies (op betonplaat, betonblok of kunstwerk)
- embedded rail constructies (continue ingegoten of ingeklemde spoorstaven)

Als voordelen van een continue ondersteuning ten opzichte van discrete ondersteuning kunnen worden genoemd:

- reductie van spanningen
- beter dynamisch gedrag, waardoor minder slijtage
- vermindering pin-pin resonanties (treedt op bij repeterende discrete ondersteuning)

Overigens is een continue ondersteuning niet overal homogeen; onderbrekingen treden op bij lassen, wissels, e.d.

Van beide hoofdgroepen en subgroepen zullen in tabelvorm de voor- en nadelen worden genoemd en uitvoeringsvoorbeelden (varianten) worden gegeven. Deze worden daarna besproken aan de hand van figuren. Een tweetal bijzondere gevallen is hieraan toegevoegd.

BALLASTSPOOR		
VOORDELEN	NADELEN	VARIANTEN
<ul style="list-style-type: none"> • relatief eenvoudige aanleg tegen lage kosten • relatief eenvoudige correctie van de spoorligging; • grote elasticiteit • goede demping van geluid en trillingen; • goede drainage van hemel- en smeltwater; • vervanging onderdelen relatief eenvoudig; • geringe tracé-wijzigingen goed mogelijk. 	<ul style="list-style-type: none"> • onderhoudsgevoelig (dus lage beschikbaarheid en hoge kosten) spoorverbinding en meer overlast) • geen constructieve fixering van het spoorframe ('zwemmen') • beperkte zijdelingse weerstand in bogen (mogelijk instabiliteit) • grote constructiehoogte (gevolgen voor tunneldiameters en lengte hellingen) • hoog eigengewicht ballast (kostenverhoging bij bruggen en viadukten) • afname doorlatendheid ballastbed door vervuiling; • vergruizen en opwervelen van ballast bij hoge snelheden, (schade aan spoorstaven) • op kunstwerken ballastmatten nodig 	<ul style="list-style-type: none"> • klassiek ballastspoor • ballastspoor op kunstwerken • asfalt in de spoorbaan • ballastmatten • dwarsliggeromhulling in ballastbed

Tabel 7: Overzicht ballastspoor

BALLASTLOOS SPOOR		
VOORDELEN	NADELEN	VARIANTEN
<p><i>Voor beide subtypen geldt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • onderhoudsarm en daardoor grotere beschikbaarheid spoor • grote zijdelingse stijfheid, gunstig in verband met horizontale krachten en stabiliteit; • gering gewicht (van belang bij bruggen en viaducten); • geringe constructiehoogte (van belang bij tunnels); • geen ballast vergruizing (bij hoge snelheden) • geen geluidshinder 's nachts door stopmachines; • toegankelijk voor wegvoertuigen • gemakkelijk te reinigen (haltes / stations). <p><i>Directe bevestiging</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • veel ervaring aanwezig • hoge verkrijgbaarheid (internationaal) • kwaliteit gegarandeerd • instelbaarheid • geschikt wanneer (geringe) zettingen worden verwacht. <p><i>Embedded rail</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • minimale constructiekosten • vrijwel onderhoudsvrij • zeer geschikt voor zettingsvrij spoor (paalfundatie) • mogelijkheid tot optimalisatie 	<p><i>Voor beide subtypen geldt:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • lange aanlegtijd indien in situ beton wordt toegepast • maatregelen nodig in verband met geluids- en trillingshinder • discontinuïteiten bij overgang op aardebaan (stijfheidsprong); • grotere temperatuureffecten dan bij ballastspoor (beperkt op kunstwerken bruglengte) <p><i>Directe bevestiging</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • hoge kosten door vereiste nauwkeurige afwerking kunstwerk • vulplaten met variabele dikten nodig (arbeidsintensief). <p><i>Embedded rail</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • hoge nauwkeurigheid vereist bij top-down aanbrengen spoorstaven • eventuele latere veranderingen moeilijk uitvoerbaar; (uitzagen spoorstaaf noodzakelijk) 	<p><i>Discrete bevestiging</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • directe bevestiging (Delft) • prefab platenspoor (slab track) Japan, Italië, Duitsland • ingegoten dwarsliggersystemen (Rheda) • (ingegoten) blokspoor <p><i>Embedded rail</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • ingegoten spoorstaaf (Harmelen, Best) • ingeklemde spoorstaaf (Nikex) <p><i>Bijzondere uitvoeringen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • afgeveerde betonplaat • superelastische bevestiging

Tabel 8: Overzicht ballastloos spoor

5.2 Ballastspoor

5.2.1 Klassiek ballastspoor

Hieronder wordt verstaan het conventionele spoor met spoorstaven op dwarsliggers in een ballastbed op een aardebaan. Dit type wordt vaak als referentie gebruikt in de vergelijking met andere, meer moderne typen spoorconstructies. De constructieve opbouw van het klassieke ballastspoor is eerder al gegeven in Hoofdstuk 2.

5.2.2 Ballastspoor op kunstwerken

Op korte, niet beweegbare bruggen of viaducten, is het zinvol het ballastbed op de aansluitende aardebaan te laten doorlopen op het kunstwerk, om discontinuïteiten bij de overgang te vermijden. Hierdoor ontstaat wel een extra statische belasting op het kunstwerk, maar de treinbelasting wordt beter verdeeld. Bovendien kunnen de gebruikelijke aanleg- en onderhoudsmethoden voor ballastspoor zonder onderbreking worden toegepast. Verder vereffent het ballastbed de verschillen in temperatuurbeweging van de voegloze spoorstaven op het kunstwerk en van het kunstwerk zelf. Wel moet uiteraard bij het ontwerp van



Figuur 46: Ballastspoor op kunstwerken

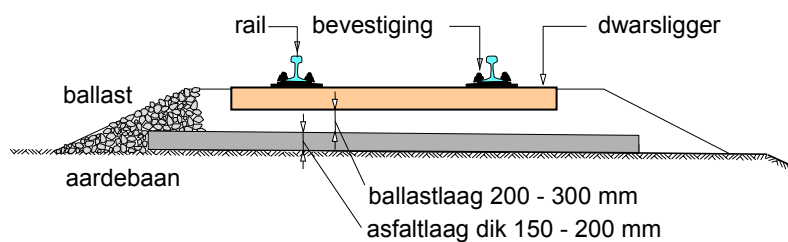
het kunstwerk rekening worden gehouden met de hogere statische belasting en een grotere bouwhoogte van de bovenbouw (langere aanloophellingen, grotere tunneldoorsnede).

Eventueel kunnen trillingshinder voor de omgevingen nog worden verminderd door toepassing van elastische lagen tussen kunstwerk en ballastbed, de zogenaamde ballastmatten (zie aldaar).

5.2.3 Asfalt in de spoorbaan

Voor de toepassing van asfaltbeton in spoorconstructies komen de volgende twee belangrijkste mogelijkheden in aanmerking:

- toepassing als subballastlaag (underlayment) onder het ballastbed;
- toepassing ter vervanging van de ballastlaag (full depth overlayment).



Figuur 47: Toepassing asfaltlagen in spoorwegen

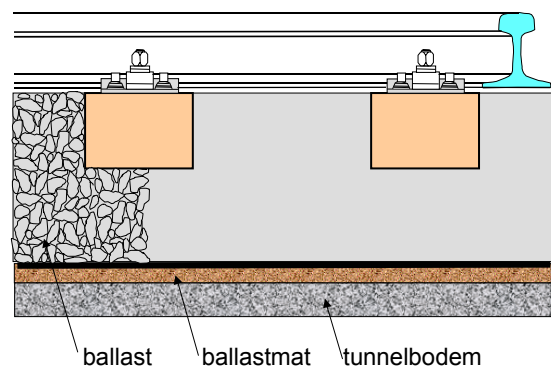
Geclaimd worden een grotere draagkracht en betere drukverdeling, de waterdichtheid, en het voorkomen van 'mud pumping'. In Nederland zijn er nog nauwelijks toepassingen met asfalt in spoorconstructies. De kosten van asfaltbovenbouw zijn erg afhankelijk van de lokale beschikbaarheid van het materiaal en de bereikbaarheid en toegankelijkheid van de bouwplaats voor asfaltmachines. Bij nieuwbouw is de toepassing eenvoudiger dan bij vernieuwing.

Omdat de spoorwegbeheerder in ieder geval de mogelijkheid van correctie van de spoorligging wil openhouden, gebruikmakend van standaard onderhoudsmachines, komt alleen het underlayment systeem in aanmerking voor verdere studie (zie Figuur 47).

5.2.4 Ballastmatten

Ballastmatten kunnen worden aangebracht tussen ballastbed en kunstwerk als middel om de uitstraling van contactgeluid en trillingen naar de omgeving te beperken. (Figuur 48).

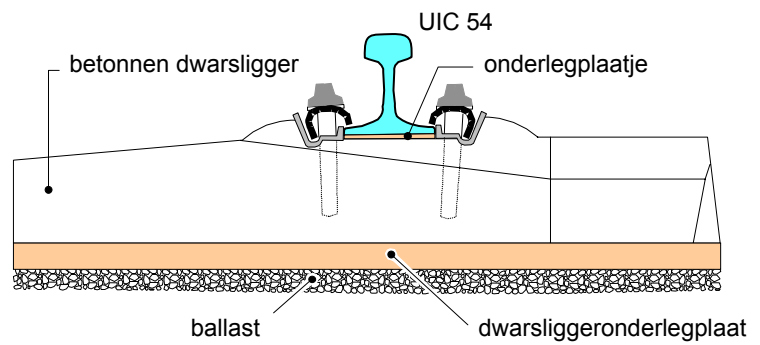
Het ballastspoor fungeert als massa, de mat als veer. Een nadeel is dat na voltooiing van de spoorconstructie geen wijziging meer mogelijk is in geval van problemen. Er worden dan ook strenge eisen gesteld aan de eigenschappen en de duurzaamheid van de matten. De demping van de matten blijkt alleen effectief te zijn voor trillingen met een frequentie > 30 Hz.



Figuur 48: Ballastmatten

5.2.5 Dwarsliggeromhulling in ballastbed

De betonnen dwarsligger kan worden omhuld met een elastische laag ('soffit pad') voordat de dwarsligger in de ballast wordt gelegd (Figuur 49). Deze toepassing is eenvoudiger en goedkoper te verwezenlijken dan de ballastmatten.



Figuur 49: Dwarsliggeronderlegplaat

5.3 Ballastloos spoor

5.3.1 Directe bevestiging



Figuur 50: Directe bevestiging (spoorviaduct Delft)

Op langere kunstwerken kan men besluiten om geen ballastbed toe te passen maar de spoorconstructie op het kunstwerk te fixeren door middel van een directe bevestiging mits op andere wijze is voorzien in de benodigde elasticiteit en demping.

Een voorbeeld van deze bevestigingsmethode is het spoorviaduct Delft (Figuur 50). De elastisch-dempende functie wordt hier verkregen door twee lagen van kurkrubber. De bevestiging in het viaduct geschiedt met een chemisch anker of door middel van deuzels. Er wordt een regelbare bevestiging toegepast, waarmee de rail in dwarsrichting kan worden gepositio-



Figuur 51: Platenspoor van voorgespannen beton (Duitsland)



neerd. Het fijn afstellen van de hoogte-instelling geschiedt met vulplaatjes.

5.3.2 Prefab platenspoor

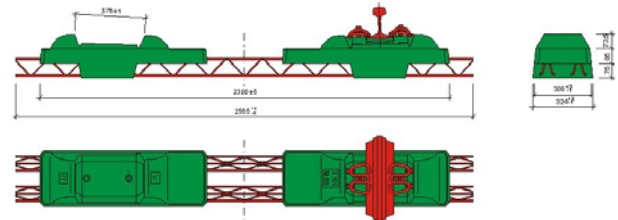
Bij het platenspoor (Figuur 51) worden gewapende of voorgespannen betonplaten, meestal in geprefabriceerde vorm, toegepast. De spoorstaven worden door middel van een elastische bevestiging direct bevestigd op het betonplatensysteem. Hoewel deze platen bij een goede onderbouw onderhoudsarm zijn, vormen de hoge investeringskosten een beletsel voor toepassing op grote schaal. Andere nadelen zijn de lange buitendienststelling bij in situ aanleg, de geluids- en trillingsproblemen en de moeilijke correctie van eventuele plaatszettingen.

5.4 Ingestorte dwarsliggersystemen

Bij het Rheda systeem (zie Figuur 52 en Figuur 53) worden de spoorstaven aan de betonnen dwarsliggers bevestigd waarna het geheel in het werk wordt gesteld. Vervolgens wordt er beton omheen gestort zodat een massieve gewapend betonnen plaat ontstaat. Dit is een zeer gangbare constructie voor de hogesnelheidslijnen in Duitsland.



Figuur 52: Rheda constructie (details)



Figuur 53: Rheda 2000

5.5 Geluids- en trillingshinder

5.5.1 Geluidshinder

Hier wordt volstaan met de vermelding van enkele maatregelen, die kunnen bijdragen tot een actieve bronbestrijding van luchtgeluid in de bovenbouwconstructie:

- toepassing van smering (water, vet);
- regelmatig slijpen spoorstaven (golfslijtage);
- aanbrengen van absorptie-elementen tegen het raillijf;
- ingegoten rail (in constructies zonder ballastbed);
- zorgen voor geleidelijke constructieovergangen;
- toepassing van wissels met beweegbare puntstukken;

Indien deze acties te weinig effect sorteren en ook aanpassingen aan het voertuig niet helpen, dienen meer passieve maatregelen te worden genomen, zoals bijvoorbeeld geluidsschermen.

Geluidshinder is in het algemeen goed te beoordelen en te beschrijven. De toegestane immissiegrenzen zijn voor verschillende geluidsbronnen, waaronder railverkeer, in wetgeving vastgelegd.

5.5.2 Trillingshinder

Anders dan bij luchtgeluid bestaat voor trillingshinder (nog) geen wetgeving voor algemeen toegestane immissiegrenzen. De trillingssituatie is in het algemeen zeer complex en sterk afhankelijk van lokale factoren. In voorkomende gevallen is de Hinderwet van toepassing.

Door constructieve verbindingen tussen kunstwerk (tunnels) en gebouwen kunnen trillingen worden doorgeleid en omgezet in contactgeluid. Algemeen afdoende oplossingen voor trillingshinder kunnen niet worden aangegeven. Actieve isolatie (bij de bron) blijkt het meest effectief te zijn.

De oplossingen berusten alle op het principe van het massa-veer-systeem. De combinatie van een lage stijfheid (slappe vering) en een grote massa geeft een lage eigenfrequentie en leidt derhalve tot een betere trillingsdemping van frequenties groter dan de eigenfrequenties.

Een te lage stijfheid kan echter leiden tot te veel beweging, verstoring van de rustige loop van voertuigen, stoten bij voegen en breuken, slijtage en overbelasting van de spoorstaaf. Algemeen wordt daarom een maximale statische doorbuiging van 3 mm, optredend onder de maximale wiellast, aangehouden.

Een lagere stijfheid kan overigens ook worden verkregen door een grotere steunpuntsafstand te kiezen bij constant gehouden steunpuntsstijfheid.

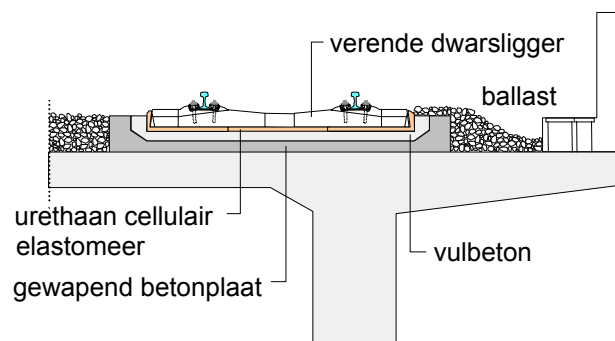
De massa bestaat per as uit de onafgeveerde massa (wielstel) plus effectieve spoormassa.

Het dempende effect is des te groter naarmate de elastische elementen dieper in het railsysteem zijn aangebracht. (verhouding stijfheid en massa kleiner).

Onderstaand enkele voorbeelden van constructieve oplossingen.

5.5.3 Elastisch ingegoten dwarsligger

Ingegoten dwarsliggers kunnen worden toegepast op betonnen viaducten of in tunnels. Daarbij worden in de betonplaat uitsparingen aangehouden waarin de dwarsliggers ruim passen. Na het stellen van het spoorframe wordt de ruimte tussen dwarsliggers en betonplaat opgevuld met een vloeibare elastische massa, die daarna uithardt. Een toepassing uit Japan is getoond in Figuur 54.

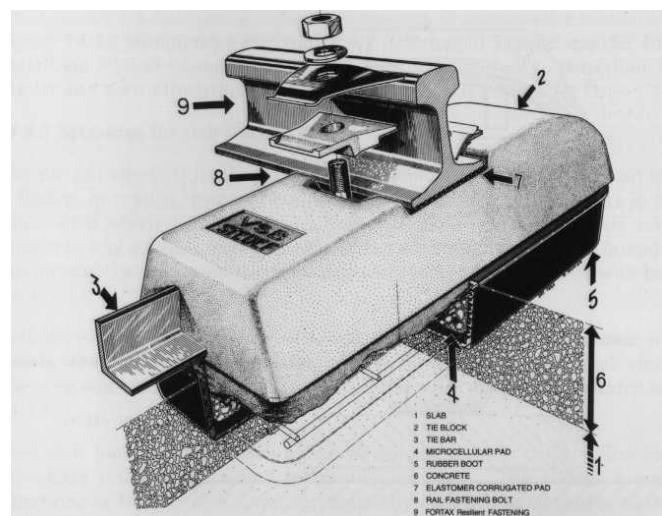


Figuur 54: Elastisch ingegoten dwarsliggers

Een bekende variant is ook het Stedef-spoor, dat onder meer in de Metro Parijs is toegepast (Figuur 55).

Verklaring van de cijfers in deze figuur:

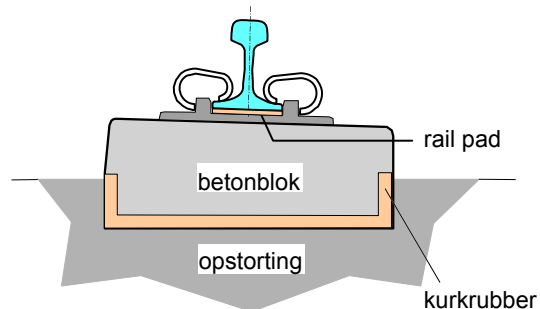
- 1 betonplaat
- 2 betonblok
- 3 traversesestang
- 4 cellulair elastomeer
- 5 rubber bekleding ('boot')
- 6 beton
- 7 gegroefd elastomeer plaatje
- 8 bevestigingsbout
- 9 bevestigingsklem



Figuur 55: Stedef-spoor

5.5.4 Elastisch ingegoten blokkenspoor

Als voorbeeld is het NS-blokkenspoor gegeven (Figuur 56), toegepast op kunstwerken. Deze uitvoering kan als een variant worden gezien van de voorgaande toepassing.



Figuur 56: Blokkenspoor

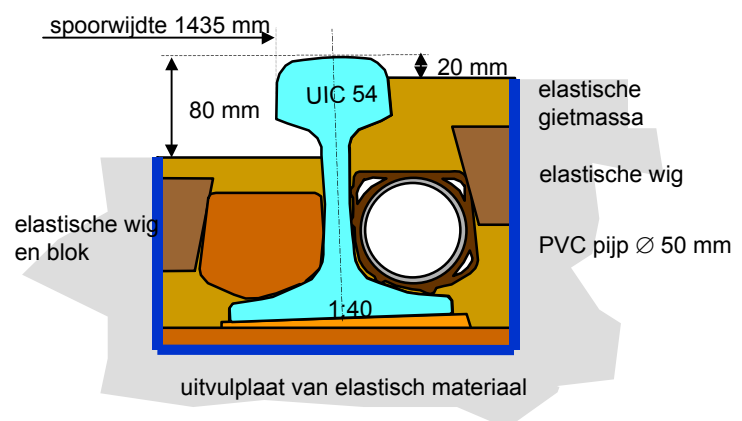
5.5.5 Elastisch ingegoten spoorstaaf

Een aantrekkelijke wijze om een solide, continue elastische ondersteuning voor de rail te verkrijgen is de elastisch ingegoten spoorstaaf, ook wel bekend als 'embedded rail'.

Bij dit type spoorconstructie (zie Figuur 57) wordt de rail in een goot (staalprofiel of beton) gelegd en na het stellen in fasen geïnjecteerd of ingegoten met een kurkrubber mengsel. Ter besparing van dit (dure) materiaal kunnen ook ruimte-innemende elementen worden aangebracht.

De rail is verder niet verankerd in de ondersteuning zodat een goede trillings- en geluidsisolatie aanwezig is.

De waterdichte constructie is tevens elektrisch isolerend. Het toepassingsgebied ligt bij sporen in kunstwerken, overwegen en gesloten trambaanconstructies.



Figuur 57: Ingegoten spoorstaaf

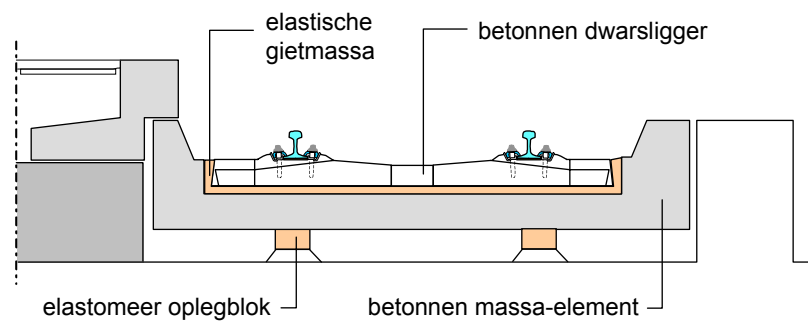
Mogelijk wordt dit type ook in geoptimaliseerde vorm toegepast in de nieuw aan te leggen hogesnelheidslijn tussen Amsterdam en de Belgische grens. Het type staat dan ook sterk in de belangstelling en is onderwerp van veel theoretisch en experimenteel onderzoek.

In het hoofdstuk over Trambaanconstructies worden voorbeelden gegeven van een ingegoten groefrail en van een elastisch ingeklemde spoorstaaf.

5.6 Bijzondere uitvoeringen

5.6.1 Afgeveerde betonplaat

Bij het systeem afgeveerde betonplaat wordt de massa van de bovenbouw gecombineerd met die van zware betonplaten of betonelementen en met relatief slappe elementen afgeveerd op de tunnelbodem. Op deze wijze kan een zeer lage eigenfrequentie kan worden gehaald (<10 Hz). Deze systemen vragen een behoorlijke bouwhoogte en zijn



Figuur 58: Spoor op afgeveerde betonplaat

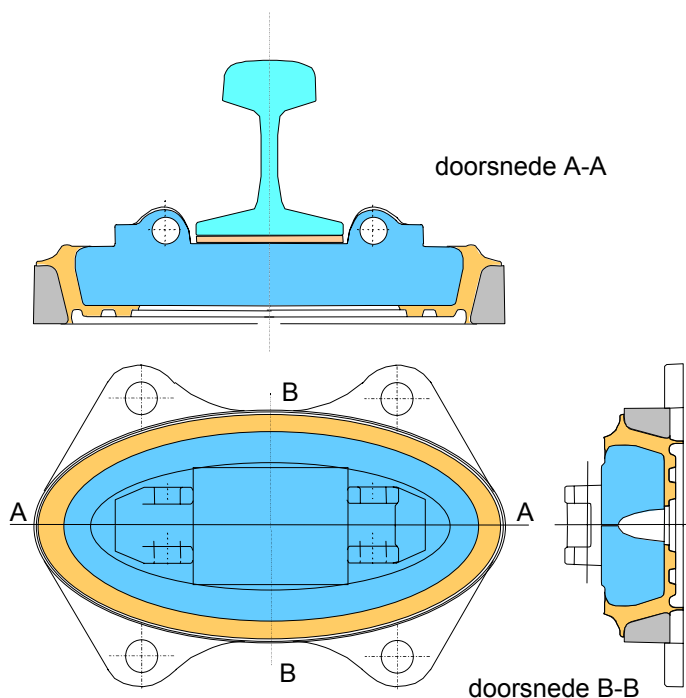
Door een mogelijk korter tracé te kiezen (onder bebouwing door) kunnen de totaalkosten worden beperkt. Deze toepassing is bedoeld zeer kwetsbare gebieden. In Figuur 58 is een toepassing gegeven met een ballastloze spoorconstructie.

5.6.2 Superelastische bevestigingen

De rail wordt hierbij op een bevestigings-systeem met een ingebouwde zeer slappe afvering gemonteerd, de superelastische bevestiging. Omdat de massa gering is en de stijfheid beperkt moet blijven in verband met de maximaal toegelaten verplaatsingen van de rail, is het effect relatief gering.

Een voorbeeld is het door zijn vorm direct herkenbare Kölner Ei (Figuur 59).

Bij deze systemen wordt het effect van het massa-veer-systeem boven in de constructie aangebracht. Deze typen hebben het voordeel dat ze ook achteraf (curatief) op de dwarsligger kunnen worden aangebracht. De dwarsstijfheid wordt in het algemeen hoger gemaakt dan de (progressieve) verticale stijfheid om de zijdelingse verplaatsingen beperkt te houden.



Figuur 59: Kölner Ei

6 AARDEBAAN

De aardebaan komt uitvoerig aan de orde in Deel B van dit college. Hier wordt volstaan met enkele voor de spoorbaan typische bijzonderheden.

6.1 Eisen

Tot de onderbouw rekent men de aardebaan, met inbegrip van taluds, bermen en bermsloten, alsook de daarin gelegen kunstwerken.

De aardebaan dient te beschikken over voldoende draagkracht en stabiliteit, een aanvaardbaar zettingsgedrag, alsmede een goede ontwatering van regen- en smeltwater uit het ballastbed. Indien de aanwezige ondergrond ongeschikt is deze eisen naar behoren te vervullen, kan men overgaan tot grondverbetering door een cunet te graven, grondverdichting met mechanische middelen of grondstabilisatie (diep-mixing, grouting).

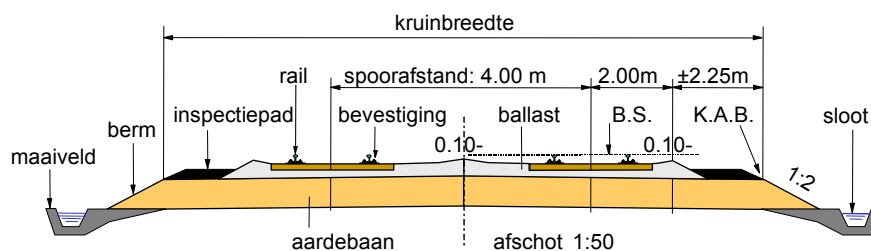
In voorschriften wordt als regel gehanteerd dat de bovenkant van de laagst gelegen spoorstaaf tenminste 1.75 m boven de hoogste grondwaterstand moet liggen.

Ter bevordering van de ontwatering moeten slecht doorlatende lagen tot het laagste slootpeil worden verwijderd en vervangen door goed waterdoorlatend zand. In oude onderbouwconstructies kan het in verband met de huidige eisen nodig zijn drainagesystemen aan te brengen.

6.2 Geometrie

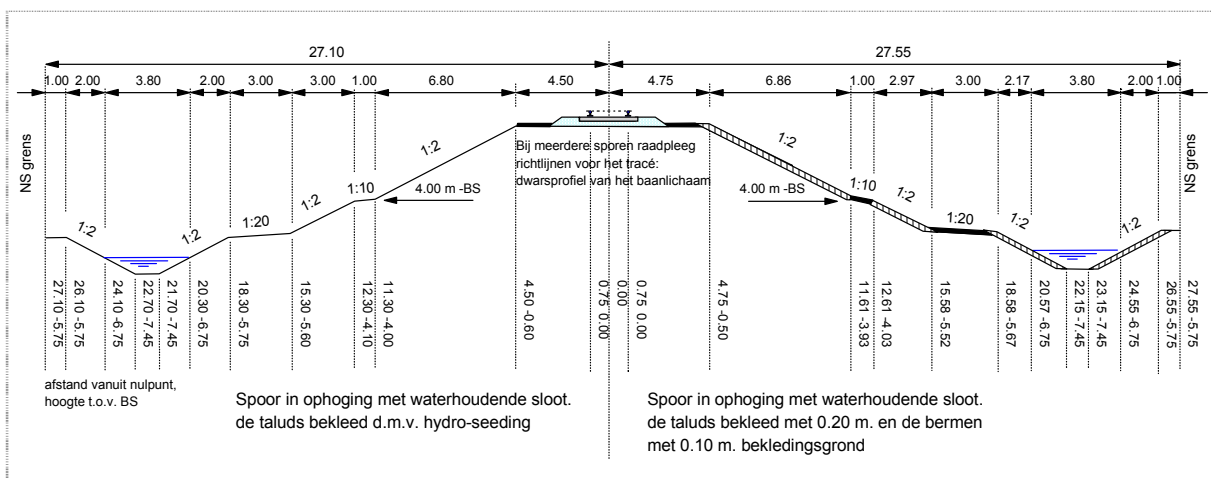
Naar gelang de hoogteligging van het spoor onderscheidt men baanprofielen op maaiveldhoogte, in ingraving en op ophoging. Een voorbeeld van een dubbelspoor baanprofiel op maaiveldhoogte is gegeven in Figuur 60, waarin ook enkele hoofdafmetingen zijn gegeven. Onder KAB (kant aardebaan) wordt verstaan de overgang van kruin (bovenzijde baanlichaam) naar talud. KAB heeft betrekking op het baanlichaam (zandprofiel) en is exclusief afdeklaag en bekleding.

De kruinbreedte en hoogte zijn afhankelijk van baanklasse, aantal sporen, spoorafstand, rechtstand of boog en plaatselijke situatie. De kruin is afwaterend.

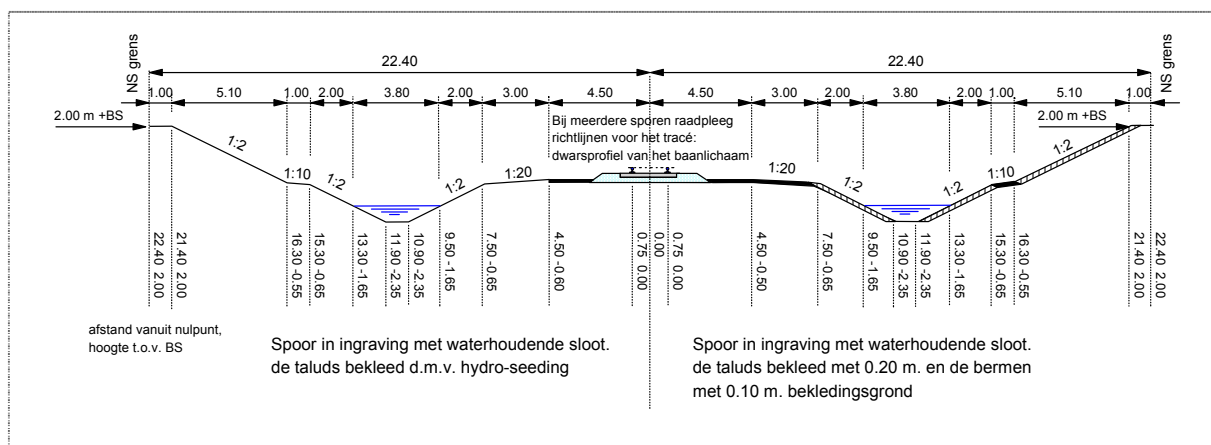


Figuur 60: Dwarsprofiel dubbelsporige spoorbaan in rechtstand en op maaiveldhoogte

In Figuur 61 en Figuur 62 zijn voorbeelden gegeven van een enkelspoor in het geval van een ophoging respectievelijk een ingraving, met varianten in de afdekking. (Bron: OVS, Aarden Baan, Code If 5007, Bijlage III, resp. IV)



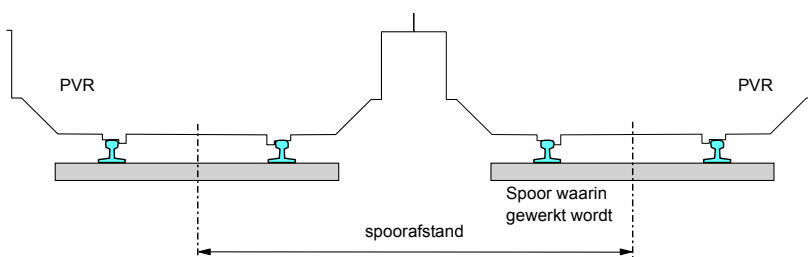
Figuur 61: Voorbeeld van spoor in ophoging



Figuur 62: Voorbeeld van een spoor in ingraving

Men is gewend om alle verticale maten relatief op te geven t.o.v. BS (Bovenkant Spoorstaaf).

In het geval van meer sporen dient de breedte van het baanprofiel te worden vergroot met de som van de spoorafstanden. In Figuur 63 is de veel voorkomende situatie geschetst voor een dubbel-spoor in een standaard situatie (Bron: OVS, Dwarsprofiel van het baanlichaam, Code If 5003, Blad 13).



snelheid in km/h	veilige opstelafstand personeel t.o.v. hart spoor	spoorafstand h.o.h. bij dubbelspoor
0 - 140	2.25 m	4.00 m
141 - 160	2.40 m	4.00 m
161 - 200	2.75 m	4.25 m
300	3.00 m	4.50 m

Figuur 63: Profiel 2 sporen zonder geluidscherm

6.3 Samenstelling

In Nederland bestaat de aardebaan uit zand dat ter plaatse aanwezig is of van elders wordt aangevoerd. De aardebaan moet goed worden verdicht, vooral de bovenlaag. Ten aanzien van de waterdoorlatendheid zijn eisen gesteld in de VTG.

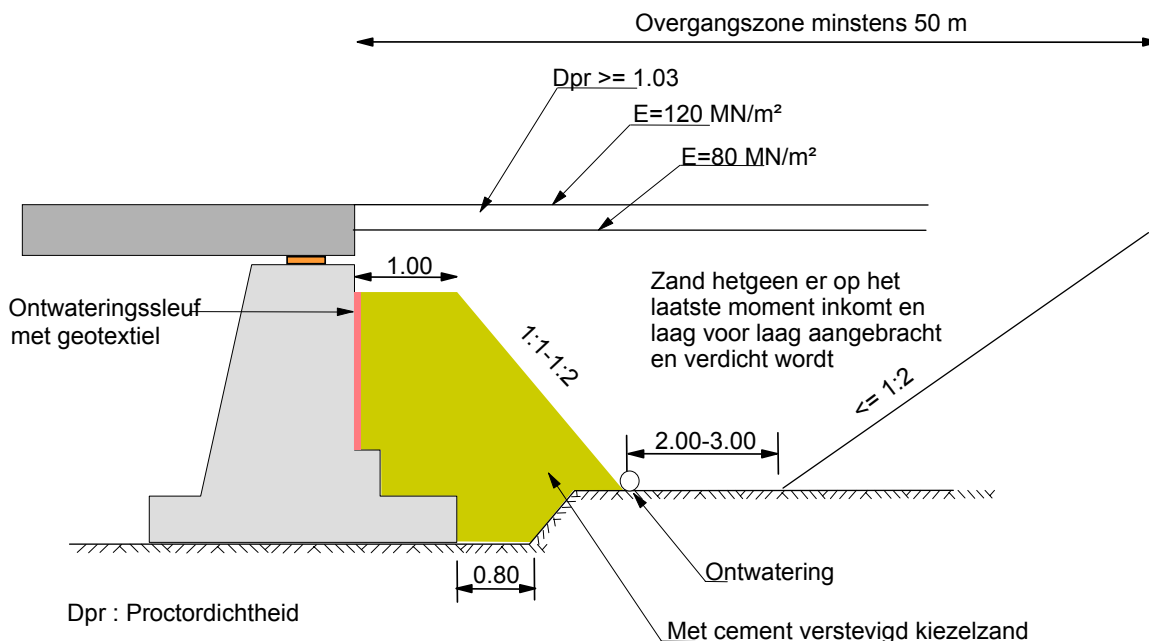
Ter bevordering van een goede filterwerking wordt tussen ballastbed en aardebaan een tussenlaag aangebracht, bestaande uit een circa 10 cm dikke laag grindballast met korrelafmetingen 5/40 mm. De functie van de tussenlaag is het grofkorrelige ballast en het fijnkorrelige zand van elkaar te scheiden, waardoor geen vermenging kan optreden. Bovendien draagt de tussenlaag bij tot een betere drukverdeling en vorstbescherming.

In samenwerking met een tussenlaag kan ook een filtervlies worden toegepast, vervaardigd uit kunststof (geotextiel). De functie hiervan is primair het verhinderen van het transport van fijnere deeltjes.

6.4 Overgangsconstructies

Ter plaatse van de overgang van aardebaan naar kunstwerk vice versa ontstaat in langsrichting een discontinuïteit, gekenmerkt door een stijfheidssprong in het spoor en door lokale zettingsverschillen. Het kunstwerk fungeert daarbij als een 'hard' punt. Hierdoor zullen vooral bij hoge snelheden dynamische effecten optreden die het comfortnadelig zijn. Deze discontinuïteit kan worden afgezwakt door een overgangsconstructie in de onderbouw aan te brengen zodat veelvuldig onderhoud wordt voorkomen.

Figuur 64 toont een voorbeeld van een in het buitenland veelvuldig gebruikt soort overgangsconstructie voor hoge snelheden. In dit voorbeeld is het landhoofd op staal gefundeerd ervan uitgaande dat de ondergrond voldoende draagkrachtig is. In Nederland is dit niet het geval.



Figuur 64: Overgangsconstructie kunstwerk-aardebaan

7 TRAMBAANCONSTRUCTIES

7.1 Open trambaanconstructies

De verschijningsvorm van een 'open trambaanconstructie' is identiek aan die van het 'grote' spoor, zij het dat de trambaan lichter geconstrueerd is. Vanwege de gunstige eigenschappen (zie ballastbed) wordt dit type zoveel mogelijk toegepast indien de trambaan alleen voor trams toegankelijk is. In stedelijke omgeving wordt de ballastlaag afgedekt met fijn grind in verband met mogelijk vandalisme. Een esthetische variant is de grasbaan zoals o.m. is toegepast in delen van de nieuwe tramlijn 17 van Den Haag CS naar Wateringen. Hiermee wordt tevens een geluidsreductie bereikt.



Figuur 65: Open trambaanconstructie. Tramlijn 17 van Den Haag naar Wateringse Veld in grasbaan.

7.2 Gesloten trambaanconstructies

Van een 'gesloten trambaanconstructie' is sprake wanneer de trambaan is opgenomen (verzonken) in het wegdek, zodat zowel trams als het wegverkeer hetzelfde verkeersvlak kunnen gebruiken. Vooral bij de oudere constructietypen blijkt het moeilijk de weg en trambaan met geheel verschillende constructieve concepten met elkaar te verenigen. Verschillen zijn er immers in belastingen, temperatuureffecten, elasticiteiten, degeneratieprocessen en vernieuwingstijdstippen. Met name bij de overgang rail-weg kunnen problemen ontstaan met de voegafdichting. Het feit dat de beheerder van de wegen vaak niet dezelfde is als die van de trambaan kan ook complicerend werken.

Het onderhoud en vooral het vernieuwen van de constructie in de binnenstad leiden vaak tot stagnatie en hinder voor het verkeer, omwonenden en winkelbedrijven. Dit pleit ervoor het groot onderhoud (vernieuwing) van trambaan en weg gelijktijdig uit te voeren. Verder dienen de oudere onderhoudsgevoelige trambaanconstructies te worden vervangen door een nieuwe generatie meer duurzame constructies met 'spoorse' eigenschappen, zoals:

- toepassing van verzonken dwarsliggers (traversestangen kunnen vervallen);
- elastische oplegging en bevestiging (Vossloh);
- scheiding van het weg- en railonderhoud.

In Figuur 66 is een voorbeeld gegeven van één van deze moderne constructies. Het is een voorbeeld van een ballastloze ingegoten spoorstaaf (zie Hoofdstuk 5)

De rails zijn van het type groefrail, in Nederland wordt bijna alleen Ri60 gebruikt. kenmerkend bij een groefrail is het asymmetrische profiel. Dit levert problemen op bij het walsproces: men kan geen groefrails leveren zonder afwijkingen. Het kan voorkomen dat bij de ene partij rails de voet 5 millimeter 'vershoven' is vergeleken met de andere partij rails. Aangezien de rails bij de voet ingeklemd worden heeft dit consequenties voor de spoorbreedte. Daarom zijn de kunststof onderlegplaten voorzien van wigvormige schuifplaten, hiermee is het mogelijk om de spoorbreedte in te stellen.

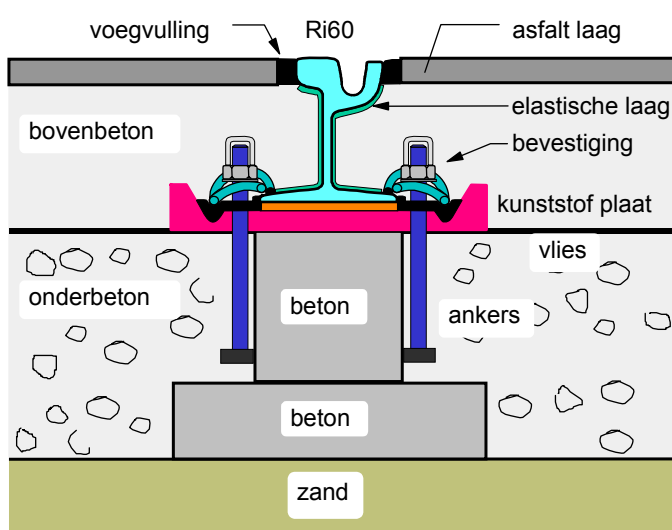
Het wegdek is in principe vrij te kiezen en onafhankelijk van de onderliggende constructie. Gekozen kan worden uit een vulende betonlaag met een afdekking van 4 cm asfalt. Tevens is het mogelijk een elementenbestrating toe te passen, gemetseld in specie of gestraat in een zand-cement stabilisatie.

In Amsterdam worden betonnen prefab platen toegepast als wegdek. De platen liggen in een laagje basaltspit.

Een qua concept interessante constructie is het uit Hongarije afkomstige Nikex-systeem (Figuur 68). Hierbij is een blokrail opgenomen in een voorgespannen betonplaat die tevens als wegdek fungeert. De blokrail is met rubberen strips vastgezet.

Doel is het bereiken van een onderhoudsvrije trambaan waarin de eventuele uitwisseling van de blokrails snel kan geschieden. Een probleem vormt nog de overgangsconstructie naar het bestaand tramspoor

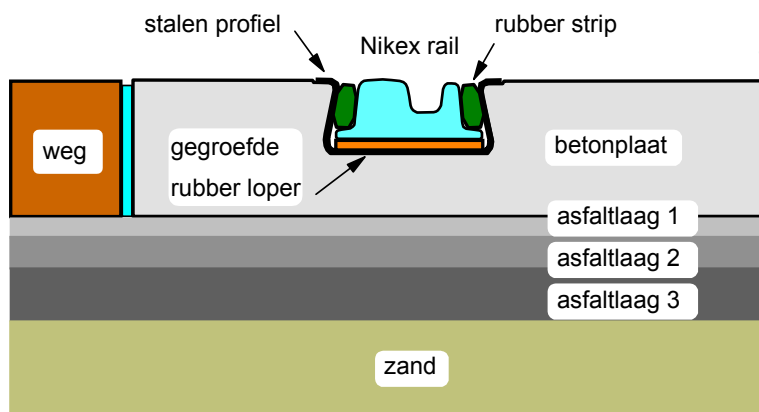
Het eerder genoemde principe met een embedded rail vindt ook toepassing bij trambanen, met name op brugdekken. Evenals bij het Nikex-systeem heeft de rail hier zelf geen kerende functie voor het wegdek (gunstig) en ontbreekt de vaak falende voegvulling. Deze systemen bevatten daarom interessante uitgangspunten voor een verdere ontwikkeling, mogelijk in combinatie met lagere railprofielen.



Figuur 66: Gesloten trambaanconstructie. Groefrail Ri60 op kunststof platen.



Figuur 67: Gesloten trambaanconstructie in uitvoering. Groefrail Ri60 op kunststof platen.



Figuur 68: Trambaanconstructie in betonplaat (Nikex).

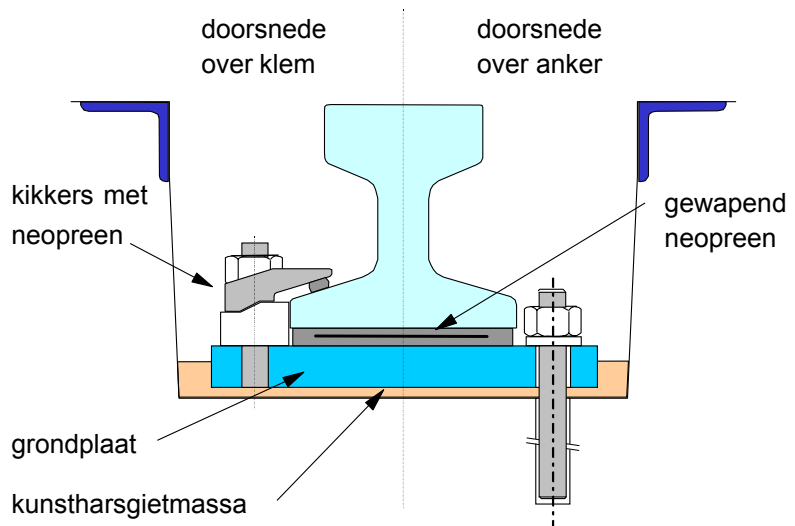
8 KRAANBAANCONSTRUCTIES

Het vakgebied 'Kraanbanen' kan als een bijzondere toepassing van de railbouwtechniek worden beschouwd en valt eigenlijk tussen de disciplines werktuigbouwkunde en civiele techniek. Elke kraanbaan is namelijk sterk gerelateerd aan de kraan die deze baan berijdt.

Als definitie wordt gehanteerd: Kraanbanen zijn railbanen, waarop kranen en allerlei andere vormen van overslagwerktuigen rijden, met wiellasten van 200-1000 kN, en waarbij snelheden optreden tot 150 m/min. De kraanbanen kunnen geheel of gedeeltelijk in de bodem of verharding zijn opgenomen. De ondersteuning kan bestaan uit houten dwarsliggers, zware I-balk, of een betonnen fundering.

Om de hoge verticale belasting te verwerken wordt de railkop en de wielband cilindrisch uitgevoerd en wordt gebruik gemaakt van staalkwaliteit 700 N/mm² met vanadium toevoeging. Een voorbeeld van een dergelijke constructie is gegeven in Figuur 69.

De wielen van een kraan hebben in tegenstelling met spoorvoertuigen aan beide zijden flenzen. De 'spoorwijdte' kan tientallen meters bedragen. Ook de horizontale belasting vraagt bijzondere aandacht, met name de schrankkrachten. Deze kunnen tot 25% van de verticale wiellast bedragen.



Figuur 69: Continu ondersteunde kraanbaan voor intensief gebruik. Rail 127 kg/m

De toelaatbare toleranties van de kranen zijn van groot belang en vastgelegd in het normblad NEN 2019. Een slappe kraan kan de vervormingen beter volgen.

9 BOVENBOUW GROTE PROJECTEN

9.1 Hoge Snelheids Lijnen

De Franse Spoorwegen (SNCF) exploiteren sinds 1981 met succes de TGV-Sud (Parijs -Lyon). Inmiddels zijn ook in andere landen TGV-lijnen in gebruik genomen respectievelijk in aanbouw of in studie. In Duitsland (DB) rijden eveneens hoge-snelheidslijnen (ICE). In beide landen worden echter verschillende concepten toegepast:

1. HSL alleen voor reizigers (uniform verkeer): TGV (SNCF)
2. HSL voor reizigers en goederen (gemengd verkeer): ICE (DB)

De onder 1 genoemde exploitatievorm wordt toegepast indien alleen behoefte is aan een snelle verbinding voor zeer veel passagiers. Volstaan kan worden met een relatief lichte constructie, waarvan het tracé geoptimaliseerd kan worden en grote hellingen kunnen worden overwonnen (35 0/00 in TGV-Sud).

De onder 2 genoemde exploitatievorm komt in aanmerking indien de HSL alleen economisch haalbaar is indien zowel hogesnelheidstreinen als langzamere goederentreinen gebruik kunnen maken van de HSL. In dit geval zijn ruime bogen, geringe hellingen en een ruim PVR noodzakelijk.

Voor de toekomstige HSL Zuid in Nederland is het TGV-systeem interessant. Vrijwel zeker zal het overgrote deel van het traject zettingsvrij worden uitgevoerd, waarvan een deel ondertunneld. De keuze van de bovenbouw is inmiddels gevallen op een constructie met directe bevestiging. De toepassing van zorgvuldige en gecontroleerde methoden van ontwerp en uitvoering van de onderbouw zijn noodzakelijk om de vereiste hoge structurele en geometrische kwaliteit te verkrijgen die nodig is voor de HSL.

De dynamische effecten van hoge snelheidstreinen probeert men zo klein mogelijk te houden door de onafgeveerde massa (wielstellen) zo klein mogelijk te houden, omdat daar deze massa verantwoordelijk is voor de dynamische wiel/rail belasting. Zo zijn de motoren op de afgeveerde massa (materieel boven de primaire vering) bevestigd en wordt de aandrijving van de wielen tot stand gebracht met cardanassen. Het aantal wiellastvariaties wordt beperkt (vermoeiing) door toepassing van een minimum aantal draaistellen.

De TGV heeft een zeer goede aërodynamische vorm, waarbij ook gelet is op een zo volledig gesloten zijwand.

In Tabel 9 is een overzicht gegeven van de belangrijkste verschillen in de bovenbouwparameters van de Franse en de Duitse hogesnelheidslijnen.

In Tabel 10 is een overzicht gegeven van de algemene ontwerpgegevens van de TGV, de ICE en, ter vergelijking, ook van de Nederlandse HSL.

	TGV (SNCF)	ICE (DB)
Ballast	steenslag 25/50 dikte onder dwarsl. 30 cm	steenslag dikte onder dwarsl. 30 cm
Dwarsligger	U41, 2-bloks gewapend beton lengte 2,41 m gewicht 2,45 kN	B70W voorgespannen beton lengte 2,60 m gewicht 3 kN
Dwarsliggerafstand	60 cm	60 cm
Bevestiging	type Nabla klemkracht/rail: 25 kN	Vossloh W klemkracht/rail 23 kN
Railonderlegplaatje	elastomeer gegroefd 9 mm dik, stijfheid 100 kN/mm tussen 10 en 100 kN	synthetisch materiaal 6 mm dik stijfheid 400 kN/mm
Rail	UIC 60 800 N/mm ² vert. fouten (raileinden) 0.3 mm over 3 m vert. fouten (overig) 0,3 mm over 1,60 m	UIC 60 880 N/mm ²

Tabel 9: Vergelijking bovenbouwgegevens tussen TGV en ICE

	TGV (SNCF) uniform verkeer	ICE (DB) gemengd verkeer	HSL-zuid uniform verkeer
Snelheden	reizigers: TGV-SE: 270 km/h TGV-A: 300 km/h geen goederen	reizigers: ABS: 200 km/h NBS: 250 km/h goederen: 100-160 km/h	reizigers: 300 km/h min: 220 km/h
Aslasten	165 kN	225 kN	170 kN
Boogstralen	4000 m (uitz 3250 m)	ABS: gegeven NBS: 7000 m (uitz 5100 m)	4900 m (uitz. 4250 m)
Verkanting	180 mm	ABS: 160 mm (was 150 mm) NBS: 45 mm (uitz 65 mm)	165 mm (toek. 180 mm)
Verkantingstekort	100 mm (270 km/h) 130 mm (300 km/h)	ABS: 150 mm (was 130 mm) NBS: 60 mm (uitz 80 mm)	max. 70 mm (uitz. 85 mm)
Hellingen	TGV-SE: 35 ‰ TGV-A : 25 ‰	NBS: 12,5 ‰	25 ‰
verticale afrondingsbogen	dalboog: 12000 m topboog: 16000 m	NBS: 25000 m	dalboog: 18000 m topboog: 20000m
Overgangsboog	300 m		495 m (toek. 540 m)
Spoorafstand	4,20 m	NBS: 4,70 m	4,5 m
Wissels	overloopwissel 1:46 (160 km/h) splitsing 1:65 (220 km/h)	NBS: overloop 1:24,5 (130 km/h) splitsing 1:42 (200 km/h)	overloopwissel 1:47 (160 km/h) splitsing 1:62 (220 km/h)
Kunstwerken	TGV-SE: niet nodig TGV-A : tunnels	NBS: tunnels en viaducten	tunnels en viaducten

Tabel 10: Ontwerpgegevens Hogesnelheidslijnen

9.2 Magneetzweefbanen

Voor het hoge snelheidsverkeer zijn ook systemen in studie (Duitsland, Japan) waarbij gebruik wordt gemaakt van magneetzweeftreinen. Voor het zweven wordt gebruik gemaakt van elektromagnetische levitatie, terwijl ook de geleiding en aandrijving op magnetische wijze plaatsvindt (lineaire motor). Omdat het wiel-rail systeem in feite is geëlimineerd is er ook geen slijtage en rolwrijving meer. Op proeftrajecten werden zeer hoge snelheden behaald (500 km/h).



Figuur 70: Magneetzweefbaan: Transrapid.

De invoering van magneetzweeftreinen stuit echter (voorlopig) nog op de volgende bezwaren:

- veel technische problemen moeten tegelijkertijd worden opgelost (aandrijving, beremming, wisseltechniek, signalering, energietoevoer);
- de totale rijweerstand bij magneettreinen blijkt bij hoge snelheden niet veel lager te zijn dan die bij conventioneel spoorverkeer (wegens de dominante luchtweerstand);
- het magneettreinsysteem is incompatibel met conventionele spoorwegen;
- hoge ontwikkelings- en aanlegkosten.

Niettemin neemt de belangstelling voor dit systeem, zoals eerder opgemerkt, sterk toe, ook in Nederland.

9.3 Bovenbouw voor hoge aslasten

Zoals bekend, is in Nederland de aanleg van de Betuweroute voor uitsluitend goederenverkeer voorzien. De lijn wordt ontworpen voor 225 kN aslast, terwijl het tonnage zeer hoog zal zijn. De bovenbouw en vooral de onderbouw moeten hiervoor worden gedimensioneerd. Uit de ervaringen met 'heavy haul lijnen' in andere landen is gebleken dat bij hoge aslasten naast de aftakeling van de spoorligging ook de problematiek in de omgeving van het contactgebied wiel/rail van belang is. Regelmatig worden internationale conferenties aan dit thema gewijd.

De definitie van een heavy haul lijn luidt: 'A heavy haul railroad is one which regularly operates unit or combined trains of 5 000 tonnes or more, having axle loads of 25 tonnes or more, and generating at least 20 million gross tonnes per year over a given track segment'.

10 AANLEG EN INSTANDHOUDING

10.1 Aanlegmethoden ballastspoor

Bij volledig nieuwe aanleg van het spoor behoeft geen rekening te worden gehouden met de aanzienlijke beperkingen in ruimte en tijd die voor het onderhouds- en vernieuwingsproces gelden. Men heeft derhalve een relatief grotere vrijheid in het kiezen van methoden voor planning, constructie en uitvoering. Vaak betreft het echter een uitbreiding van een bestaande situatie waarbij weer voor de locatie specifieke regels van kracht zijn.

Een belangrijk onderscheid kan worden gemaakt tussen de twee volgende aanlegmethoden:

- *'Over de kop'*-methode. Deze methode wordt gebruikt als er nog helemaal geen spoor op de baan aanwezig is. Alle materialen worden aangevoerd via het nieuwe spoor zelf. Vervoer van rails die langer zijn dan 30 m is bezwaarlijk. Dit betekent dat de rails in de baan aan elkaar gelast moeten worden, dan wel later moeten worden vervangen door langgelaste rails;
- *'Uit de zij'*-methode. Deze methode wordt toegepast als er al een spoor aanwezig is. De materialen kunnen dan over dit spoor worden vervoerd en zijwaarts op de juiste plaats worden gelost. De aanvoer van lange rails (180 tot 200 m) levert dan geen problemen op.

10.2 Instandhouding

Onder instandhouding van de bovenbouw verstaat men het totale proces van *onderhoud* en *vernieuwing*, waarmee het spoor in een zodanige conditie wordt gehouden, dat aan de normen voor veiligheid en kwaliteit wordt voldaan, tegen zo laag mogelijke kosten. In Tabel 11 is een samenvatting gegeven van de verschillende componenten van het instandhoudingsproces.

INSTANDHOUDING			
<i>onderhoud</i>		<i>vernieuwing</i>	
hand	mechanisch	hand	mechanisch
(op)lassen wissels overwegen constructies	stoppen stabiliseren slijpen richten lassen horren ballast		continue methode sectiemethode
		wissels en constructies	

Tabel 11: Overzicht instandhoudingsprocessen

10.3 Onderhoudsmethoden

Men onderscheidt:

- incidenteel onderhoud, d.w.z. het herstellen van plotseling optredende plaatselijke gebreken in de spoorligging;
- systematisch onderhoud, waaronder wordt verstaan het planmatig uitvoeren van herstellingen van de spoorligging. Dit kan als handwerk worden uitgevoerd, maar geschiedt steeds meer met grote spooronderhoudsmachines.

10.3.1 Veiligheid

De remweg van treinen is veel langer dan die van auto's of trams. De trein kan niet tijdig tot stilstand worden gebracht als er onverwacht mensen of voertuigen in het spoor komen. Verder is het niet mogelijk om voor de uitvoering van alle werkzaamheden het treinverkeer tijdelijk stil te leggen. Er gelden daarom voor het uitvoeren van werkzaamheden binnen het profiel van vrije ruimte van het spoor uitgebreide en stringente veiligheidsvoorschriften. Het gaat daarbij enerzijds om de veiligheid van het treinverkeer: het spoor moet te allen tijde bij de nadering van een trein veilig berijdbaar zijn. Anderzijds gaat het om de veiligheid van het personeel dat tijdig de spoorbaan moet verlaten bij een naderende trein.

10.3.2 Systematisch onderhoud

De planning van het systematisch onderhoud kan soms gebaseerd zijn op een systeem van belastingafhankelijk onderhoud (afhankelijk gepasseerd tonnage), de gangbare praktijk is echter een systeem van liggingsafhankelijk onderhoud. In het laatstgenoemde geval worden de onderhoudswerkzaamheden gepland op basis van meetgegevens omtrent de horizontale en verticale ligging van het spoor alsmede de snelheid van aftakeling hiervan. De meetgegevens worden verkregen met een bovenbouwmeetwagen welke tussen de normale treinenloop door de benodigde meetdata verzameld en verwerkt tot voor de spoorligging karakteristieke waarden. Vervolgens worden hiermee en met bepaalde criteria het onderhoudsadvies per spoorsectie gepland in de vorm van een prioriteitenlijst. Thans zijn ook systemen in onderzoek om de planning niet meer te baseren op de spoorligging zelf, maar eerder op het 'eindprodukt' van het dynamische systeem voertuig/bovenbouw. Hierbij fungeert de onregelmatige spoorligging als input en de voertuigbewegingen, kenmerkend voor het reizigerscomfort, als output. De overdrachtsfunctie van het deelnemende voertuig speelt nu ook een rol. Een ander type meting bewaakt gelijktijdig het verloop van de dynamische krachten tussen wiel en rail.

10.3.3 Onderhoudsbewerkingen

Men onderscheidt de volgende bewerkingen:

- *stoppen*: doel is het corrigeren van de verticale spoorligging van ballastspoor; hiertoe wordt het spoorframe ter plaatse op de juiste hoogte gebracht (gelicht), waarna de onderliggende ballastmassa onder het dwarsliggergebied ter plaatse van de rail met stopijzers (trillende stampers) zo goed mogelijk wordt opgevuld.
- *schiften*: doel is het corrigeren van de horizontale spoorligging van ballastspoor; het spoorframe wordt ter plaatse in de juiste horizontale positie geforceerd, waarna de ballast op dezelfde wijze als bij het stoppen wordt verdicht.
- *verdichten*: doel is de door het stoppen verloren geraakte stabiele ligging van het ballastbed voor een groot deel te herwinnen. De maximale verdichting wordt echter pas na enige tijd bereikt en wel door het spoorverkeer zelf.
- *splitten*: doel is het corrigeren van de verticale spoorligging door toevoeging van fijn splitmateriaal onder de dwarsligger. Het ballastbed wordt door deze bewerking niet geroerd, zodat de stabiliteit behouden blijft. Sinds kort is een nieuwe gemechaniseerde versie van het splitproces ontwikkeld (*stone-blowing*).

- *horren*: het vervuilde ballastbed wordt van onder het spoor vandaan verwijderd m.b.v. een kettinghormachine. De fijne fracties van de ballast, horsel geheten, worden gezeefd en afgevoerd. De grovere fractie wordt, samen met nieuwe ballast, teruggebracht in het spoor;
- *slijpen*: het machinaal tot het gewenste profiel terugbrengen van de rail, c.q. het verwijderen van golflijtage.

10.3.4 Conflict exploitatie en onderhoud

De toenemende belastingsniveau's en snelheden vergroten enerzijds de behoefte aan frequent onderhoud van de bovenbouw, maar verminderen anderzijds door de hogere bezettingsgraad van de sporen juist de mogelijkheden hiertoe. Ook in de nachtelijke uren waartoe het gemechaniseerde onderhoud zich noodzakelijkerwijs moet beperken, passeren op het naastliggende spoor treinen (goederentreinen, posttreinen, nachttreinen). Dit heeft niet alleen technische en organisatorische, maar ook sociale problemen tot gevolg. Vooral de weekendnachten vormen bij de personeelsinzet een steeds groter probleem. Ook het veiligheidsaspect voor het onderhoudspersoneel en de overlast voor omwonenden zijn hierbij in het geding.

De duur van de buitendienststelling kan in doordeweekse nachten zelden groter zijn dan 7 uur, soms niet meer dan 5½ uur. De duur van de buitendienststelling is van enorme invloed op de prestaties. Bijvoorbeeld bij een buitendienststelling van 5.30 h bedraagt de productie 480 m en bij 7.00 h 700 m. Een compromis is mogelijk door een nieuwe afweging van de belangen tussen de exploitatie- en de onderhoudsdienst in het voordeel van de laatste (tijdelijke buitendienststelling, inzetten van tijdelijke busdiensten). Dit is economisch gezien zeker interessant voor het vervoerbedrijf, maar vermindert de service aan reizigers.

Een meer structurele oplossing ligt in het ontwikkelen van meer duurzame bovenbouwconstructies en meer effectieve onderhoudsmethoden waardoor onderhoud of vernieuwing minder vaak nodig is.

10.3.5 Stopmachines

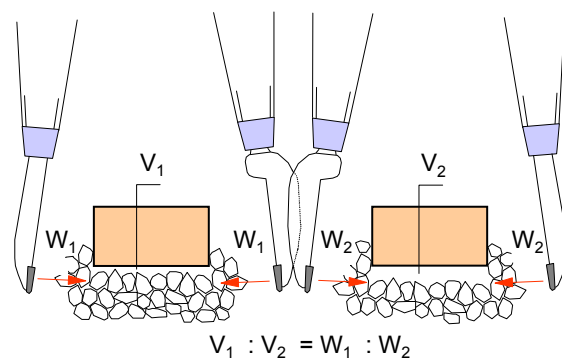
De bewerkingen stoppen en schiften worden tegenwoordig in één machinaal proces uitgevoerd. Deze stop-schiftmachines bezitten hiertoe een meetsysteem voor het automatisch nivellerend corrigeren van de spoorligging. Een grote productie is mogelijk (1000 m/h).

De mechanisatie van het spooronderhoud is een betrekkelijk recente ontwikkeling. In de zeventiger jaren volgde een geleidelijke verbetering van de machines welke leidde tot grotere bedrijfszekerheid, betere kwaliteit en hogere productie.

Tegenwoordig worden sporen praktisch uitsluitend onderhouden met behulp van stopmachines, die zowel hoogte en verkanting, als schift corrigeren. Onregelmatigheden in de spoorgeometrie tot een golflengte van 20 à 30 m worden automatisch genivelleerd op grond van een ingebouwd meetsysteem. Voor het corrigeren van lange golven maken de machines gebruik van een laser. In bogen is bovendien externe stuurinformatie nodig.

10.3.6 Stopprincipe

De stopmachine heft het spoor op de door een meetsysteem bepaalde hoogte en positioneert het spoor eveneens in de dwarsrichting, waarna de ballast onder de dwarsliggers wordt aangeknepen met de stopijzers. Figuur 71 toont het principe van het stoppen bij een duomatic machine, waarbij twee dwarsliggers tegelijk worden gestopt.



$$V_1 : V_2 = W_1 : W_2$$

Figuur 72 toont een stopmachine in actie. Goed Figuur 71: Stopprincipe

zichtbaar zijn het lichtmechanisme en een stel stopijzers aan de buitenzijde van het spoor.

10.3.7 Aftakeling spoorgeometrie

In het kader van internationaal onderzoek zijn historische gegevens over het verloop van de spoor kwaliteit verzameld en gepubliceerd. Figuur 73 toont de standaardafwijking van de spoorligging in de golfband 0-25 m, als functie van het gepasseerde tonnage voor twee verschillende aansluitende spoorsecties. De zaagtandkrommes tonen duidelijk het effect van stoppen. Het lijkt alsof stopmachines de standaardafwijking tot een min of meer constant niveau reduceren.

Blijkbaar kan de snelheid van aftakelen zeer sterk kan variëren, in het voorbeeld 0.6 en 2.4 mm per 100 MGT. In het algemeen verloopt de aftakeling evenredig met het gepasseerde tonnage.

10.3.8 Stone blowing

Bij deze bewerking fungeert een pneumatische ballastinjectiemachine als een soort splitmachine (Figuur 74). Bij *Stone-blowing* wordt het spoor gelicht, waarna een afgemeten hoeveelheid fijnkorrelige ballast tussen dwarsligger en ballastbedding wordt geblazen. De hoeveelheid ballast per dwarsligger wordt via een voormeting automatisch bepaald.

10.3.9 Ballaststabilisator

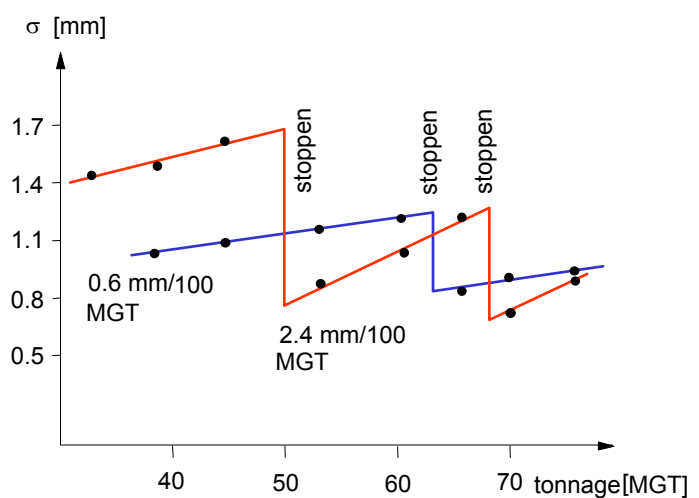
Met deze trilmachine wordt via de spoorstaven de ballast verdicht. Het principe berust op het in zijdelingse richting exciteren van het spoor met een frequentie van 25-40 Hz, waarbij het spoor gelijktijdig in verticale richting wordt belast met een aslast van ongeveer 25 t.

De stabilisator wordt direct achter een stopmachine ingezet. Als gevolg van stoppen daalt de zijdelingse weerstand van de spoorconstructie met bijna 50%. Met de stabilisator wordt ongeveer de helft van dit verlies teruggewonnen, mits spoorconstructie en ballastbed van goede kwaliteit zijn. Dit komt globaal overeen met 70.000 t treinverkeer.

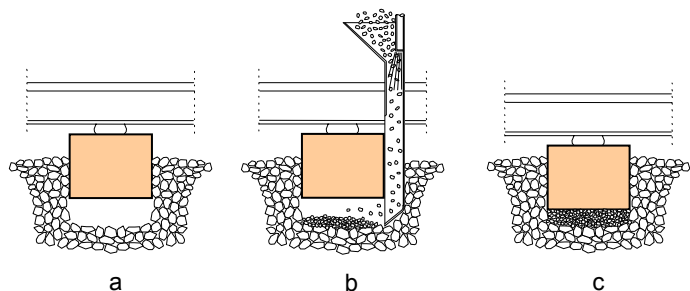
De zeer grote energie die door de stabilisator plaatselijk in het spoor wordt gebracht, veroorzaakt sterke bodemtrillingen in de baan, die zich als oppervlakte-golven (Rayleigh golven) in het om liggende terrein voortplanten. Dit levert een zekere hinder op voor de omgeving.



Figuur 72: Stopmachine in actie



Figuur 73: Verbetering door stoppen, gevolgd door aftakeling



Figuur 74: Principe van stone blowing

10.3.10 Slijptreinen

Onregelmatigheden in de railgeometrie kunnen aanleiding geven tot zeer hoge dynamische belastingen. Deze geometrische afwijkingen ontstaan deels tijdens het fabricageproces van de rail, de zogenaamde walsfouten en deels tijdens de exploitatie als golfslijtage. De enige remedie voor het verwijderen van dergelijke gebreken is slijpen. Lange golven, zoals bij walsfouten, zijn moeilijk te verwijderen omdat zeer veel materiaal moet worden weggenomen.



Figuur 75: Slijpmachine met roterende stenen

Voor het slijpen van spoorstaven bestaan twee principes: roterende stenen en in langsrichting oscillerende stenen. De stenen zijn gemonteerd in een in langsrichting oscillerend frame. Als gevolg van deze beweging wordt spoorstaafmateriaal als het ware weggevoerd. De stenen passen zich continu aan de gemiddelde vorm van de railkop, hetgeen een nivellerende werking heeft.

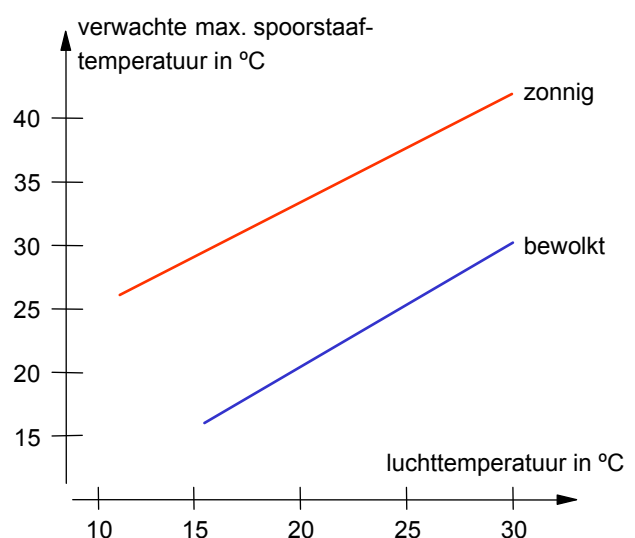
Het systeem met roterende stenen wordt wereldwijd toegepast (Figuur 75). De effectiviteit van dit slijpprincipe is zeer groot. De stenen maken ten opzichte van elkaar een zodanige hoek, dat daarmee het railprofiel in de vorm van een polygoon wordt benaderd. Hiermee kan de railkop worden gereprofileerd wat vooral grote voordelen heeft bij plastische deformaties en grote slijtage.

10.3.11 Kettinghormachine

Met de kettinghormachine wordt de ballast tot minimaal 25 cm onder de dwarsliggers ontgraven door middel van een ketting, waaraan "graafvingers" zijn bevestigd. De ketting voert de ontgraven ballast omhoog naar een stelsel van trilzeven. Daar wordt het materiaal kleiner dan 35 mm, het horsel, uitgezeefd, afgevoerd en gerecycled tot betongrind. Het schone grovere materiaal komt terug in het spoor.

10.3.12 Hoge temperaturen

Bij voegloos spoor zijn meestal geen lengteveranderingen mogelijk, waardoor bij temperatuurveranderingen spanningen in de spoorstaven ontstaan. Bij de uitvoering van werkzaamheden zijn vooral de hoge temperaturen en de daarmee samenhangende drukspanningen belangrijk. Het gaat met name om werkzaamheden waarbij de zijdelingse weerstand van het ballastbed sterk terugloopt. Deze herstelt zich onder invloed van de treinenloop slechts langzaam. Ofschon toepassing van ballaststabilisatoren direct achter stopmachines en hormachines een duidelijke verbetering betekent, gebiedt de veiligheid toch enige beperking bij aanwezige of te verwachten hoge spoorstaaftemperaturen. Spoorstaaftemperaturen wijken, vooral bij zonnig weer, sterk af van luchttemperaturen en laten zich moeilijk voorspellen. Na verschillende meetprogramma's is een grafiek gevonden als in Figuur 76, waarmee de weersverwachting globaal kan worden omgezet in een spoorstaaftemperatuurverwachting.



Figuur 76: Verwachte maximale railtemperaturen bij verschillende weertypen

Als in voegloos spoor de spoorstaaf temperatuur hoger is dan 35°C, is het losmaken van de ballast over een grotere lengte dan 2.50 m verboden. Dit betreft onder meer ballastvernieuwing, horren, lichten en onderstoppen, alsmede vernieuwen van dwarsliggers.

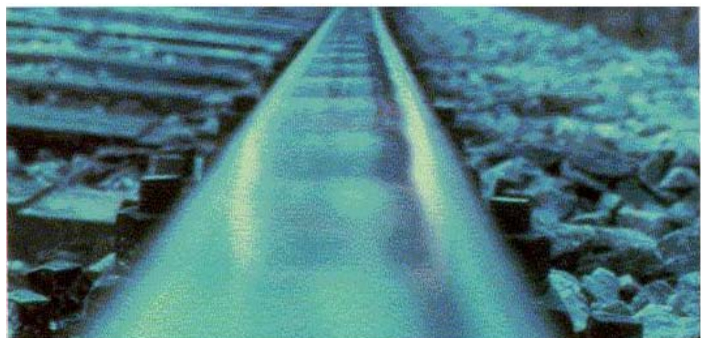
10.3.13 Spoorstaven

Het meest ingrijpende onderhoud aan spoorstaven bestaat uit het plaatselijk vervangen wegens ernstige gebreken. Dit kan gebeuren door een passtuk, dan wel door toepassing van een thermietlas met brede voeg indien het gebrek tot een afstand van 60 mm beperkt blijft.

Met ultrasoon apparatuur kunnen fouten in spoorstaven worden opgespoord, die tot breuk kunnen leiden.

Een andere categorie bestaat uit deformaties van het loopvlak, zoals braamvorming en uitpletten. De remedie hiervoor is slijpen.

Ook het verschijnsel *golfslijtage* (ontstaan van een golfvormig slijtagepatroon op de spoorstaafkop, (Figuur 77) wordt curatief behandeld door het wegslijpen van de onregelmatigheid m.b.v. een speciale slijptrein. Tegenwoordig wordt ook nieuw spoor preventief geslepen waardoor golfslijtage minder snel optreedt.



Figuur 77: Golfslijtage

Oplassen van spoorstaven wordt toegepast bij plaatselijke gebreken, zoals brandplekken, kleine horizontale scheuren

in de kop, etc. Brandplekken ontstaan door het doorslijpen van aangedreven wielen bij het optrekken van treinen. Ook het herstellen van ernstige lokale slijtage, bijvoorbeeld bij krappe bogen en halten bij trambanen) komen voor oplassen in aanmerking.

10.4 Vernieuwing

10.4.1 Criteria

In Europa wordt vrijwel overal gestreefd naar het vernieuwen van complete baanvakken. Voor een economisch optimaal gebruik van de constructieonderdelen dienen de levensduren op elkaar afgestemd te zijn in een verhouding van hele getallen, bijvoorbeeld 1:1 of 1:2. Plaatselijke omstandigheden, zoals ondergrond, ballastbed en bogen kunnen de verhouding en daarmee de keuze van het toe te passen bovenbouwstelsel beïnvloeden. Ter bevordering van een homogene bovenbouwkwiteit streeft men ernaar onderhoudssecties van 5 à 10 km integraal te vernieuwen.

10.4.2 Mechanische spoorvernieuwing

Toen voor andere bedrijfstakken zwaar handwerk al lang door machines was overgenomen, geschiedde het vernieuwen van sporen nog grotendeels met de hand. De reden hiervoor is simpel. De zeer intensieve trein-exploitatie laat in het algemeen niet toe, dat de sporen ten behoeve van de vernieuwing in voldoende mate buiten dienst worden gesteld, terwijl dit een noodzakelijke voorwaarde is voor de inzet van grote machines.

Toepassing van betonnen dwarsliggers en de behoefte aan verbetering van het ballastbed door vernieuwen of horren maken in toenemende mate een mechanische uitvoering noodzakelijk. Bij de keuze van beschikbare systemen spelen diverse factoren een rol, zoals benodigde investeringen, verlangde prestaties, mogelijkheden van buitendienststelling en opstelruimten.

10.4.3 Spoorsectiemethode

Over het gehele land verspreid is een viertal emplacementen aangewezen, waarop tenminste 1500 m spoor gereserveerd is voor bouw en demontage van spoorsecties. Meestal zijn dit 3 naast elkaar gelegen sporen. Op een spoor worden de betonnen dwarsliggers gelost en 9-hoog in voorraad gestapeld. Op hetzelfde spoor worden vrijgekomen oude spoorsecties gedemonteerd en nieuwe secties gemonteerd. Langs dit spoor zijn hulpspoorstaven geplaatst, waardoor dezelfde kranen als op de baan kunnen worden gebruikt. Op het 2e spoor rijdt een laad/loskraan, terwijl op het 3e spoor de wagens staan welke gelost of beladen worden.

10.4.4 Continuumethode

Hoewel voor de continuumethode in principe geen bouwemplacementen nodig zijn, worden de aanwezige sporen benut voor opslag van nieuwe dwarsliggers en demontage van vrijkomende spoorsecties. Ten opzichte van de spoorsectiemethode is het volgende op te merken:

De spoorstaven worden achter de inbrengmachine direct op rollen geplaatst. Daarna wordt door trekken of verwarmen een zodanige verlenging gerealiseerd, dat de spoorstaven, na te zijn bevestigd op de dwarsliggers, bij 25°C spanningsloos zijn. De productie bedraagt circa 400 m spoor in een buitendienststelling van 5 uur en ongeveer 540 m in een buitendienststelling van 6 uur.

10.4.5 Snelheidsbeperkingen

In het algemeen wordt gedurende 2 weken een snelheidsbeperking aangehouden van 60 km/h voor goederentreinen en 90 km/h voor reizigerstreinen. De duur van een snelheidsbeperking wordt in feite bepaald door het tempo waarin de zijdelingse weerstand zich opbouwt.

10.4.6 Spoorbouwtreinen

Er zijn enkele grote bedrijven in de wereld, die gespecialiseerd zijn in de vervaardiging van spooronderhouds- en spoornieuwbouwmachines. (Figuur 78). Deze systemen zijn erop gericht om met hoge snelheid complete sporen te leggen of te vernieuwen. Hiermee is een hoge produktie van voegloos spoor mogelijk. De inzet is echter alleen zinvol voor lange aaneengesloten trajecten.



Figuur 78: Spoorbouwtrein

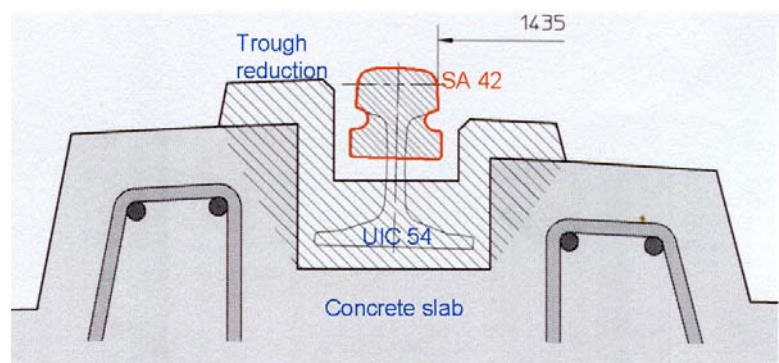
10.5 Aanlegmethoden ballastloos spoor

In hoofdstuk 5 is ingegaan op de voor- en nadelen van ballastspoor en ballastloos spoor. Tevens zijn daar de toegepaste systemen beschreven van het prefab platensysteem, het blokenspoor en het embedded railsysteem. Voor het laatste type is een speciale in situ aanlegmethode voor de betonplaat ontwikkeld waarbij gebruik wordt gemaakt van een slip-form paver. Hiermee wordt in één keer het dwarsprofiel met de uitgespaarde goten vervaardigd. (Zie Figuur 79).



Figuur 79: Aanlegmethode betonplaat voor embedded rail m.b.v. slip-form paver.

Het railprofiel is niet alleen van grote invloed op de technische eigenschappen van het spoor, maar ook op de kosten. Toepassing van de SA42 is niet alleen gunstig voor het geluidsniveau, ook de hoeveelheid benodigde gietmassa is vele malen minder dan bij het meer traditionele UIC 54 profiel. Uit de figuur rechts blijkt dat de kopvorm van beide profielen exact hetzelfde is.

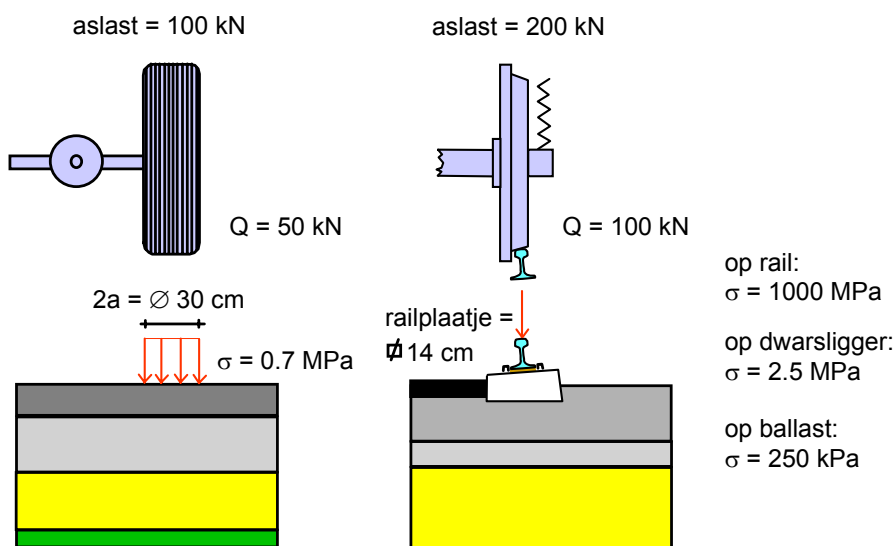


Figuur 80: Vergelijking tussen SA42 en UIC 54 bij embedded rail constructie.

11 VERSCHILLEN TUSSEN WEGEN EN SPOORWEGEN

In tegenstelling tot wegconstructies is er bij spoorwegen meestal sprake van een open bovenbouw. Een functioneel belangrijk verschil tussen weg en spoorweg betreft de dwarsgeleiding. Het railverkeer wordt in dwarsrichting vanuit het spoor geleid, tegenover het wegverkeer dat zich in principe in het rijvlak vrij kan verplaatsen. Om op een ander spoor te komen zijn bij spoorwegen wissels nodig.

De aslasten kunnen bij railverkeer (goederen) een factor twee hoger zijn dan bij het wegverkeer (vrachtauto). Verder is het contactvlak tussen stalen wielband en stalen rail veel kleiner dan tussen luchtband en wegdek. Dit leidt tot een zeer hoge contactdruk tussen wiel en rail. De spanningen in het spoor worden echter aanzienlijk gereduceerd door de spreidende werking van de verschillende lagen van de spoorconstructie: spoorstaven, dwarsliggers, ballastbed.



Figuur 81: Vergelijking weg en spoorweg

In Figuur 81 is de orde-grootte van de reducties aangegeven. Op het niveau dwarsligger/ballastbed bedraagt in het voorbeeld de reductiefactor ca. 3000!. In Bijlage F, Tabellen, is e.e.a. meer gespecificeerd.

Anders dan bij wegverkeer kunnen door het staal-op-staal contact bij spoorwegverkeer de spoorstaafbelastingen een sterk dynamisch karakter hebben, met name indien de loopvlakken van wiel of rail defecten vertonen en met hoge snelheden wordt gereden. Een goede trillingsdempende werking van de spoorconstructie is dan ook van groot belang.

Het staal-op-staal contact heeft als groot voordeel dat de loopweerstand, opgebouwd uit de rolweerstand tussen wiel en rail en de tapwrijving, zeer gering is. De orde-grootte van deze weerstand is ongeveer 2 ‰. Bij wegvoertuigen bedraagt dit ca. 20 ‰. Treinen kunnen daardoor, bij een relatief gering vermogen, toch hoge snelheden bereiken.

Door de grote treinmassa, de hoge snelheden en de beperkte adhesie heeft het railverkeer een lange remweg nodig om tot stilstand te komen. Op zicht rijden, zoals bij wegverkeer, is daarom niet mogelijk en het is nodig een seinstelsel toe te passen om conflictsituaties tussen treinen onderling te voorkomen.

Bij spoorwegen vormt een hellingspromillage van 20 ‰ eigenlijk al een uitzondering (zie onder 3). Daarentegen zijn hellingen van 70 ‰, mits niet te lang, voor autowegen nog wel toelaatbaar. Dit houdt in dat bij een spoorweghelling veel meer lengte-ontwikkeling nodig is.

Bij de spoorwegen berusten van oudsher aanleg, onderhoud, voertuigkeuze en exploitatie bij één instantie. Bij het wegverkeer is de gebruiker een ander dan de beheerder en bepaalt de centrale overheid de verkeersregels en welke vervoermiddelen worden toegelaten. Kort geleden heeft ook bij de NS een soortgelijke scheiding tussen het beheer van de infrastructuur enerzijds en de exploitatie van het treinverkeer anderzijds plaatsgevonden.

12 INTEGRAAL ONTWERPPROCES

12.1 Inleiding

Een omschrijving van integraal ontwerpen is interdisciplinair ontwerpen. Interdisciplinair ontwerpen is niet gelijk aan multidisciplinair ontwerpen. Interdisciplinair geeft aan dat er interactie (communicatie) plaats vindt tussen de verschillende vakgebieden.

Bij multidisciplinair ontwerpen worden er afzonderlijke ontwerpen gemaakt die vaak niet op elkaar zijn afgestemd. De noodzakelijke communicatie bij interdisciplinair ontwerpen moet een ontwerp geven dat rekening houdt met alle onderlinge relaties van het ontwerp.

Het ontwerp wordt daarom vaak vergeleken met een systeem.

Belangrijk is het Infra systeem met een omgeving. Er zijn zowel interne relaties tussen de verschillende subsystemen als externe relaties met het meso-systeem omgeving. Centraal voor het hele ontwerp is het materieel dat uiteindelijk gebruik maakt van het Infra-systeem.

De verschillende subsystemen hebben op zichzelf weer een relatie met alle aspecten in het Infra-systeem.

Dit geeft aan dat er voor een goed railbouwkundig ontwerp een veel breder inzicht nodig is in vakgebieden die een relatie met railbouwkunde hebben.

Kortom: ontwerpen is meer dan alleen technische regels toepassen. Ontwerpen is integraal denken en continu rekening houden met interne en externe factoren in het project. Voor elk project geldt dat dit volledig ingepast moet worden in de omgeving en eventueel binnen bestaand railbouwkundige systemen. Dit vereist een brede blik van de railbouwkundige ontwerper.



Figuur 82: Een ongewenst dwarsprofiel (let op de zeer onlogische plaats van seinen achter bovenleidingmasten).

12.2 Ontwerpproces

Het ontwerpen gebeurt volgens een ontwerpproces.

Vanuit de omgeving worden diverse randvoorwaarden aan spoorinfra opgelegd. Ook worden intern de Spoorinfra eisen aan het systeem opgelegd.

Het ontwerpproces kent een verloop in de tijd dat zich kenmerkt door van grof naar fijn te werken en een toenemende complexiteit. Deze complexiteit uit zich door:

- veel geld
- veel tijd
- veel vakgebieden
- veel partijen
- veel innovaties

Dit geeft met elkaar veel afhankelijkheden

12.3 Procesbeheersing

Sommige ontwerpen in bepaalde vakgebieden kunnen pas worden gestart als er in andere vakgebieden bepaalde keuzes zijn gemaakt. Anderzijds moet er bij de gemaakte keuzes wel met de toekomstige ontwerpen uit andere vakgebieden rekening worden gehouden.

Om de afhankelijkheden inzichtelijk te maken worden relatiediagrammen opgesteld.

Een lus in een ontwerpproces kan zich verscheidene keren herhalen. Hier is versiebeheer belangrijk. Het is zaak dat andere vakgebieden de juiste versie van de tekeningen of documenten gebruiken die van een ander vakgebied afkomstig is.

Hierbij kan gedacht worden aan een conceptversie en een definitieve versie. De documenten/tekeningen kunnen ook een oplopende nummering krijgen. Het is belangrijk dat wordt vastgesteld wie een gewijzigd document/tekening moet krijgen.

12.4 De praktijk

Vanuit Railned (onderdeel van het Ministerie van Verkeer & Waterstaat) wordt een functioneel Programma van eisen (FPVE) aan een project gesteld. Railned stelt dit op aan de hand van verwachte vervoerprognoses op korte en lange termijn. Voorbeelden voor de lange termijn zijn de grote projecten zoals HSL en Betuweroute maar ook spoorverdubbelingen zoals Amsterdam-Utrecht. Voor de korte termijn zijn het vaak kleinere projecten zoals het aanpassen van wissels op stations of perronverlengingen.

Het FPVE bevat:

- Snelheden per spoor
- Treinlengte per spoor
- Soorten treinen (gewicht, treinstellen of locomotieven met rijtuigen)
- Aantal sporen op een station of baanvak
- Gelijktijdige treinbewegingen bij stations
- Bereikbaarheden van sporen bij stations

Deze worden samen met technische en omgevingseisen door Railinfrabeheer aan een ontwerpende partij gegeven. Dit kan een ingenieursbureau zijn maar ook een aannemer in een design & construct opdracht. Verder zijn er nog allerlei andere vormen van aanbesteding die niet in dit college behandeld zullen worden.

De ontwerpende partij zal een ontwerp maken afhankelijk van het gewenste niveau.

12.4.1 Inventarisatie

Hierbij zal als eerste de bestaande situatie moeten worden geïnventariseerd. Dit gebeurt o.a. door:

- kaartmateriaal op te vragen
- ter plekke visuele opnames te maken
- landmeetkundige opnames
- luchtfoto's te maken
- aanwezige infradata op te vragen

Het is heel belangrijk om als ontwerper zelf een kijkje te nemen waar ontworpen moet worden. Enerzijds om onvolledigheden in het geïnventariseerde uit te sluiten, anderzijds om zelf een ruimtelijk idee te krijgen over hoe de omgeving eruit ziet en hoe je daar in de toekomst na afloop van een werk maar nog belangrijker tijdens de bouw (!) je ontwerp ziet. Hier is enig 3D denkvermogen vereist.

Met deze informatie kan een eerste begin worden gemaakt door de railbouwkundige ontwerper met de tekeningen in veelal de schaal 1:1000. Hierbij moet deze multidisciplinair denken en interdisciplinair handelen!

12.4.2 Quick-scan

In een quick-scan wordt een grof ontwerp gemaakt om een eerste idee te krijgen van het totale ruimtebeslag en (on)mogelijkheden om het Functioneel Programma van Eisen waar te maken. Hierin worden de meest belangrijke factoren (wat betreft ruimte en financiën) meegenomen.

12.4.3 Haalbaarheidsstudie

Aan de hand van de eerste gegevens uit een quick-scan kan aan de hand van de dan beschikbare gegevens een indicatie worden gegeven over de haalbaarheid van een project. Veelal wordt er dan een kostenraming afgegeven aan de hand waarvan beslist wordt of er met het ontwerpproject verder wordt gegaan.

12.4.4 Voorontwerp & Definitief Ontwerp

In het voorontwerp wordt een ontwerpteam gecreëerd dat het volgende doet:

- Start met een eerste schetsontwerp.
- Nadat de railbouwkundige ontwerper zijn eerste ontwerp heeft gemaakt ligt er een eerste basis waarop vervolgens in- en extern het project commentaar kan worden gegeven en door de andere disciplines een begin kan worden gemaakt met ontwerpen.
- Het opzetten van een dwarsprofiel door alle disciplines
- Vaststellen van ontwerp-uitgangspunten
- Het maken van het eigenlijke voorontwerp
- Na het ontwerp een ontwerpnota opstellen met daarin een ontwerpverantwoording opgenomen

In het definitief ontwerp wordt het voorontwerp bijgesteld met alle invoer van wensen van de opdrachtgever (en burgers) en voor een aantal zaken een detaillering.

In bijna alle ontwerpen komen omgevingsfactoren voor:

- Kan ik bundelen met een snelweg, hoogspanningsleidingen, buisleidingenstraten
- door welke gebieden kan ik wel of niet (kerncentrales, begraafplaatsen of natuurgebieden)
- kan ik hoogspanningsmasten, monumentale gebouwen vermijden
- waar loopt ondergrondse infra (buisleidingenstraten zoals bijv Rotterdam-Antwerpen, defensieleidingen (staan niet op de kaart!))
- hoe kan ik geluid- en trillingsoverlast vermijden voor bewoners langs een tracé

Hierbij kan een duidelijk onderscheid worden gemaakt tussen vrije baan zoals bij spoorwegen en metro's gebruikelijk is en tramwegen die zich vaak in een stedelijke omgeving bevinden en waar de inpassing nog belangrijker is!

De railbouwkundige ontwerper dient zich bewust te zijn van zowel railbouwkundige zaken zoals welke railconstructie en welk alignement mogelijk is als ook alles wat er omheen zit.

Dit betekent met heel veel **andere(!)** vakgebieden (intern het spoorstelsel) rekening houden (waar kan ik bovenleiding kwijt, waar is een goede ondergrond of hoe kan ik deze eventueel goedkoop verbeteren, hoeveel wissels heb ik nodig, waar moet ik seinen neerzetten, welke dwarsdoorsnede van een tunnel heb ik nodig zodat ik de spoorafstand kan bepalen, hoe is de ondergrondse infra (kabels & leidingen) georganiseerd)

Voor wat betreft de railbouwkundige onderwerpen volgen hieronder enige ontwerpaspecten in relatie tot de railbouwconstructie. Hierbij is enige kennis van de regelgeving vereist.

- Wat is de geologische ondergrond van de baan?
- Welk baan- en spoorontwerp horen hier bij elkaar?
- Welk soort bovenbouwconstructie wordt toegepast (ballast of ballastloos)
- Welke soort rail, dwarsligger + bevestiging, ballast of ballastloze spoorconstructie kan worden toegepast?
- Hoe is de afwatering van de baan gegarandeerd? Denk hierbij aan situaties op stations bij perronsporen op een viaduct of aan de afwatering van een trambaan in een smalle straat.



Figuur 83: een goede afwatering van sporen en emplacementen is vereist

- Waar moeten geleidingsconstructies komen (bruggen, tunnels)?
- Waar kan ik wissels projecteren (niet op overgangen van viaduct-aarden baan)? Past hierbij ook een goed beveiliging- en bovenleidingontwerp? Dit hangt weer samen met aansluitend spoorgebruik. Het heeft bijvoorbeeld geen nut om wissels 1:9 (geschikt voor 40 km/uur) en 1:15 (geschikt voor 80 km/uur) door elkaar te gebruiken omdat in de beveiliging het maatgevende wissel wordt gebruikt, de 1:9, zodat een wissel 1:15 toch niet met 80 km per uur bereden kan worden.
- Wat voor type wissel past hier het beste?
(met welke hoekverhouding en veel afbuigend/rechtdoorgaand bereden, wel/geen beweegbaar puntstuk, met houten of betonnen dwarsliggers)
- Bij wisseloverlopen/-straten moet ook gedacht worden aan al of niet doorlopende dwarsliggers onder de sporen door (dit bepaalt de aanleg- en vervangingsmogelijkheden)?

Figuur 84: onderbroken dwarsliggers in wissel t.b.v. gefaseerde aanleg

Hiermee samen hangen ook de mogelijkheden voor beveiliging en bovenleiding om sporen buiten dienst te nemen voor calamiteiten en onderhoud.

- Is voegloos spoor mogelijk (hierbij rekening houden met krappe bogen en bruggen, waar moet ik een compensatielas projecteren)
- Doorrijhoogtes van spoor onder kunstwerken (o.a. afhankelijk van type bovenleiding)
- Hoe hoog kan ik over bestaande infra heen (kunstwerkhoogte + constructiehoogte bovenbouw)?



Veelal is het ontwerpen bij nieuwbouw relatief technisch eenvoudiger dan bij een ombouw van een bestaande situatie. In de laatste situatie moet het railverkeer vaak continu (al of niet) doorgang vinden en binnen de bestaande grenzen van de railbeheerder het werk worden afgewikkeld, terwijl bij nieuwbouw vaak meer ruimte is. Bij een ombouw moeten er vaak extra ontwerpen gemaakt worden voor tijdelijke situaties.

Gestreefd wordt hierbij zoveel mogelijk in grote brokken te werken. Hier conflicteren weer de verschillende disciplines zoals bijvoorbeeld de spoorbouw en bovenleiding. Zo kan bijvoorbeeld eerst een tijdelijk spoor moeten worden aangelegd om een definitieve bovenleidingmast te plaatsen. Andersom kan ook.

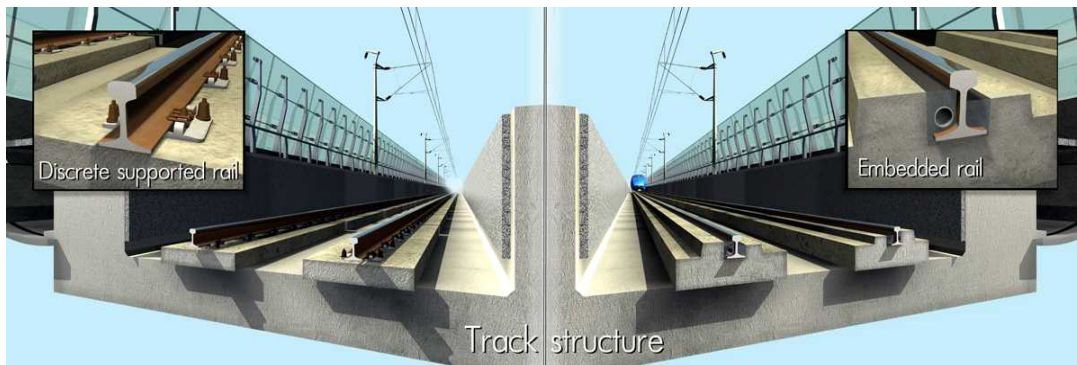
12.4.5 Besteksfase

In deze fase wordt het ontwerp vastgelegd in een document dat bestek wordt genoemd. Hierin worden naast alle ontwerpen ook alle technische, juridische en economische (geld) zaken beschreven. Verder worden alle voorwaarden waaronder het werk moet worden uitgevoerd genoemd. Bij railbedrijven gelden vaak afwijkende of aanvullende documenten ten opzichte van wat verder in de bouwwereld gebruikelijk is. Zo is er een Reglement Veilig Werken Infra dat voorschrijft welke veiligheidsmaatregelen getroffen moeten worden bij werken langs of op de spoorbaan. Voor het ontwerp kunnen deze regelingen bepalend zijn voor technische mogelijkheden.

Ook wordt in een bestek een opleveringsdatum of zelfs een planning van het werk voorgeschreven omdat dit project weer een relatie heeft met andere projecten. Voor de bovenbouw worden tevens specificaties toegevoegd voor zover materialen niet eenduidig zijn voorgeschreven. Het ontwerp wordt soms in de besteksfase nog aangepast door nieuwe inzichten of wensen van de opdrachtgever.

12.4.6 Detaillering

In de detailleringfase kan een bepaald deel van het ontwerp door de aannemer die het werk gegund heeft gekregen verder moeten worden uitgewerkt.. De aannemer is echter vrij om onder bepaalde voorwaarden hiervan af te wijken. De aannemer kan daarmee toch tot een ander ontwerp komen en dit ter goedkeuring aan de opdrachtgever voorleggen. Voor de HSL-Zuid is door de opdrachtgever een nog niet voor deze snelheid (300 km/uur) toegepast referentie-ontwerp voor de bovenbouw gemaakt maar de aannemer heeft een ander, beproefd ballastloos spoor concept voorgesteld omdat de financiers van de aannemer geen risico wilden nemen.



Figuur 85: referentieontwerp HSL-Zuid

In de uitvoering kan blijken dat er niet helemaal volgens bestek kan worden gebouwd doordat bijvoorbeeld ondergronds bij kabelwerkzaamheden een archeologische vondst wordt gedaan. Dit betekent dat het ontwerp moet worden aangepast. Na afloop van het werk wordt er door de aannemer revisie gepleegd wat betekent dat het besteksontwerp wordt aangepast aan wat er werkelijk gebouwd is.



Figuur 86: Ontwerpfouten praktisch door aannemer opgelost

13 MATERIEEL

13.1 Reizigersmaterieel

Het reizigersmaterieel kan worden ingedeeld in de volgende categorieën:

- Treinstel
- Trek-duw trein
- Getrokken trein

Bovendien worden voor elk type nog de volgende uitvoeringen onderscheiden:

- Enkeldeks
- Dubbeldeks

Deze basisuitvoeringen worden in de volgende paragrafen toegelicht.

13.1.1 Treinstel

Een treinstel kan worden beschreven als een materieeleenheid met de volgende kenmerken:

- bestaat uit meerdere rijtuigen
- heeft een min of meer permanente samenstelling
- heeft cabines aan weerszijden
- is voorzien van automatische koppelingen aan weerszijden
- apparatuur verdeeld over de rijtuigen en
- apparatuur zo veel mogelijk onder de rijtuigvloer aangebracht.

Een trein, bestaande uit meerdere treinstellen wordt door één machinist vanuit de voorste cabine bediend. Het is bovendien mogelijk om snel van rijrichting te wisselen.

Automatische koppelingen maken het mogelijk om de treinsamenstelling binnen enkele minuten te wijzigen waardoor een zeer flexibele inzet mogelijk is (het “combineren”/“bijplaatsen” en “split-sen”/“aftrappen”). Hierdoor is het goed mogelijk om in te spelen op een wisselend vervoersaanbod. Tevens kunnen gemakkelijk “vleugeltreinen” worden gevormd (trein met verschillende begin- en eindpunten die een gedeelte van het traject gecombineerd rijdt). Zo wordt op het gecombineerde traject een machinist en dienstregelingpad bespaard.



Het verdelen van de apparatuur over meerdere rijtuigen heeft tot gevolg dat de rijtuigen van een treinstel in het algemeen niet te vervangen zijn door een ander type. Bovendien moet bij een defect een compleet treinstel uit dienst worden genomen.

Figuur 87: Treinstelconcept (Materieel '64)

13.1.2 Trek-duw trein

Een trek-duw trein wordt onder meer gekenmerkt door:

- Samenstelling bestaande uit een locomotief, tussenrijtuig(en) en een stuurrijtuig
- Bediening van de locomotief vanuit het stuurrijtuig of vanuit de locomotief zelf
- Autonomie van de tussenrijtuigen
- Cabines aan weerszijden.

Een belangrijk voordeel van het treinstelconcept (cabines aan weerszijden) wordt gecombineerd met de mogelijkheid om de samenstelling qua lengte en soort rijtuigen relatief snel aan te passen. De autonome tussenrijtuigen zijn naar wens bij te plaatsen of uit te rangeren. Ook kan het onderhoud hierdoor op rijtuigniveau plaatsvinden.

In sommige gevallen zijn trek-duw treinen voorzien van automatische koppelingen. Het flexibiliteitsvoordeel van het treinstel geldt dan ook voor een trek-duw trein.



Figuur 88: Trek-duwtrein (Stuurrijtuig IC EW iV Bt)

Tijdens de uren waar minder vraag is naar reizigersmaterieel kan de locomotief worden ingezet voor ander vervoer (bijvoorbeeld goederentreinen).

13.1.3 Getrokken trein

De getrokken trein kan worden beschouwd als de meest oorspronkelijke variant van de treinsamenstelling: een locomotief die één of meerdere rijtuigen trekt.

Het spreekt voor zich dat de rijtuigen relatief eenvoudig uitwisselbaar zijn (aanpasbaarheid van de lengte en de samenstelling van de stam). Wel is op eindstations extra personeel nodig voor het omrangeren van de locomotief, en voor het bijplaatsen of afhaken van rijtuigen.

Ook hier geldt dat de locomotief flexibel inzetbaar blijft voor ander vervoer.



Figuur 89: Getrokken trein (loc 1700 met ICR-rijtuigen)

13.1.4 Enkeldeks versus dubbeldeksmaterieel

Door de explosieve vervoersgroei van de laatste decennia zien vervoerders zich gedwongen om steeds meer vervoerscapaciteit aan te bieden. Hiermee wordt tevens een ander probleem aangehaald, namelijk het rentabiliteitsvraagstuk met betrekking tot investering in materieel. De vraag naar zitplaatsen (lees: reizigersmaterieel) wordt bepaald door de korte spitsuren waarin vrijwel het gehele materieelpark wordt ingezet. Tijdens de daluren is er echter sprake van overcapaciteit, een groot deel van het materieel wordt dan niet voor reizigersvervoer gebruikt.

De alternatieven om meer zitplaatsen aan te bieden zijn inzet van:

- Langere treinen
- Meer treinen
- Dubbeldeksmaterieel

Langere treinen

De mogelijkheid tot het inzetten van langere treinen wordt al snel beperkt door de beschikbare peronlengtes.

Meer treinen

Ook het in de dienstregeling opnemen van meer treinen kent grenzen: het huidige spoorwegnet met intercity-, snel-, stop- en goederentreinen is al dermate dicht bezet dat het uiterst moeilijk is om nieuwe dienstregelingpaden voor extra treinen te vormen. Bovendien moet gerekend worden met extra kosten, onder andere voor het treinpersoneel.

Dubbeldeksmaterieel

In 1984 is daarom het dubbeldeks stoptreinmaterieel (DDM-1) in Nederland geïntroduceerd. Het betreft trek-duw treinen (loc met 6 à 7 rijtuigen) waarvan de rijtuigen circa 40% meer zitplaatsen bieden dan enkeldeksrijtuigen met dezelfde lengte. Het materieel is gebaseerd op een ontwerp van de Franse spoorwegen.

Begin jaren negentig is met het SM'90 opnieuw een prototype gebouwd voor enkeldeksstoptreinmaterieel. De geplande hoofdserie was bedoeld om materieel '64 (plan T en V) op termijn te vervangen. Wederom ingehaald door de explosieve vervoersgroei is de hoofdserie echter tot op heden niet gebouwd. Gekozen is om opnieuw een grote serie dubbeldeks stoptreinmaterieel te bestellen (DDM-2 en DDM-3).

In vergelijking met DDM-1 bieden deze series iets meer comfort en worden het interieur gekenmerkt door een eigentijdse uitstraling. Het concept bestaat net als bij DDM-1 uit trek-duw treinen met de bijzonderheid dat de stammen korter zijn (loc met 3 of 4 rijtuigen); bovendien zijn de stammen voorzien van automatische koppelingen waardoor een treinstelbedrijf mogelijk is. Een belangrijke eigenschap van stoptreinmaterieel is een snelle aanzet. Dit was één van de uitgangspunten die hebben geleid tot het verkorten van de stammen ten opzichte van DDM-1.



Figuur 90: Dubbeldeks treinstam (DDM2)

De serie SM'90 (negen treinstellen) wordt nog steeds ingezet voor de dienst Zwolle-Emmen. In deze serie zijn talrijke constructies en componenten beproefd die later zijn toegepast in het diesel-stoptreinmaterieel DM'90 en in IRM.



Figuur 91: Stoptreinmaterieel (SM'90)

Met de introductie van IRM is nogmaals gekozen voor dubbeldeksmaterieel, nu echter specifiek voor de langere afstand. Bovendien is hier sprake van een typisch treinstelconcept (drie- en vierrijtuigtreinstellen)

13.1.5 Bijzonder materieel

In het kader van bijzonder materieel wordt hier beknopt ingegaan op:

- Internationaal inzetbaar materieel
- Hogesnelheidsmaterieel
- Reizigersmaterieel voor bijzonder vervoer

Internationaal inzetbaar materieel

Tot het materieelpark van NS Internationaal behoren onder meer de rijtuigen voor nachten vakantietreinen die internationaal toegelaten zijn.

Voor de nachttreinen zijn verschillende typen slaap- en coucetterijtuigen beschikbaar die beschouwd kunnen worden als variant van in het buitenland ontwikkelde typen. Slaaprijtuigen zijn voorzien van compartimenten voor gebruik door 1,2 of 3 personen. De rijtuigen bieden relatief veel comfort en zijn in sommige gevallen zelfs voorzien van douchesruimtes.

Coucetterijtuigen zijn eenvoudiger van uitvoering en hebben compartimenten voor 4 tot 6 personen. Eveneens bestemd voor internationaal verkeer zijn restauratie- en buffetrijtuigen in dienst.



Figuur 92: Dubbeldeks materieel (IRM III)

Hogesnelheidsmaterieel

Het hogesnelheidsmaterieel van NS bestaat uit treinstellen ICE en TGV. De ICE-treinstellen zijn samen met DB besteld ter vervanging van Eurocitytreinen op de relatie Amsterdam-Keulen (-Frankfurt/M). In de toekomst zullen de treinstellen ook ingezet worden naar Berlijn en naar Zwitserland.

TGV-treinstellen van de series PBA en PBKA (Thalys) doen dienst op Amsterdam-Parijs, in het winterseizoen naar Bourg Saint-Maurice en in de zomer naar Valence.

De hogesnelheidstreinstellen zijn toegelaten op verschillende Europese spoorwegnetten en beschikken daarom onder meer over de benodigde treinbeveiligingssystemen en over tractie-installaties die geschikt zijn voor de vier verschillende stroomsystemen.



Figuur 93: TGV Thalys PBKA

Reizigersmaterieel voor bijzonder vervoer

Tot het materieel voor bijzonder vervoer behoort onder meer het Koninklijk Rijtuig. Dit rijtuig is een variant op de ICR-rijtuigen, is internationaal inzetbaar en is gereserveerd voor leden van het Koninklijk Huis en het Kabinet.

13.1.6 Locomotieven

Algemeen

Moderne locomotieven worden vrijwel uitsluitend ontworpen als draaistellocomotief. Het aantal assen bedraagt meestal vier, hoewel ook zes-assige locomotieven worden gebouwd. De assen worden in het algemeen in twee draaistellen gemonteerd (2x2 assen of 2x3 assen), hoewel ook concepten bestaan met drie twee-assige draaistellen (bv. SBB Re 6/6).



Figuur 94: Zesassige locomotief met drie twee-assige draaistellen (Re 6/6)

De keuze voor het aantal assen wordt onder meer bepaald door de toegestane aslasten. Een hoge aslast is in die zin gunstig, dat het ten goede komt aan de adhesie. Een andere bepalende factor is het geïnstalleerd vermogen dat wordt omgezet in trekkracht. Dit vermogen moet ten volle benut kunnen worden maar mag de adhesiegrenzen niet overschrijden.

Afhankelijk van de lijnen waarop de locomotieven ingezet worden kan gekozen worden voor diesel-aandrijving (DE of DH) of voor een elektrische variant. Met het instellen van Europese Freight Free-ways (corridors in internationale dienstregelingen voor grensoverschrijdend goederenverkeer) wordt een toenemende vraag naar multicourante locomotieven en diesellocomotieven gesignaleerd. Deze locomotieven zijn voorzien van beveiligingssysteem voor meerdere landen. Enkele recente ontwikkelingen zijn:

- SNCF BB36000 Astride (25kV AC, 1,5 kV DC, 3 kV DC)
- Railion DEL 6400 (Diesel, varianten voor inzet in Nederland en naar België, Duitsland)
- Railion BR 241 (Diesel, variant voor inzet in Duitsland en naar Nederland)
- NMBS reeks 13 (25 kV AC, 3 kV DC voor inzet in België en naar Luxemburg, Frankrijk)

Tevens is bij het ontwerp van locomotieven een tendens zichtbaar die gebaseerd is op een modulaire opbouw. Componenten kunnen binnen het basisconcept naar wens van de gebruiker worden gecombineerd tot een complete locomotief. De locomotief kan hierdoor aan uiteenlopende specificaties voldoen (vermogen, mono- of multicourant, reizigers- of goedereninzet).

Locomotief concepten

De beoogde inzet van een locomotief bepaalt in hoge mate het concept ervan. Bij een indeling naar inzet kan onderscheid worden gemaakt tussen:

- Rangeerlocomotieven
- Locomotieven primair bestemd voor reizigerstreinen
- Locomotieven primair bestemd voor goederentreinen

Rangeerlocomotieven

De rangeerlocomotief wordt ingezet voor het samenstellen van reizigers- en goederentreinen en bijvoorbeeld voor het plaatsen van wagens op raccordementen. Dit type locomotief is eenvoudig van uitrusting maar kan zijn voorzien van allerlei hulpmiddelen zoals radiografische besturing, bordessen voor het rangeerpersoneel, snelheidsbegrenzing, semi-automatische koppelingen enzovoorts. Het vermogen ligt globaal op 300 kW.

Locomotieven primair bestemd voor reizigerstreinen

Locomotieven voor reizigerstreinen hebben een vermogen van ca. 1700 tot 4500 kW. De maximum toegelaten snelheid is relatief hoog en kan voor moderne locomotieven 200 tot 230 km/h bedragen.

Locomotieven primair bestemd voor goederentreinen

Goederentreinlocomotieven worden gekenmerkt door een lagere toegelaten snelheid maar beschikken vooral over een grote trekkracht bij lage snelheden.

13.1.7 Ontwikkelingen internationaal

In vergelijking met andere Europese spoorwegondernemingen worden in Nederland traditioneel veel treinstellen ingezet, terwijl bijvoorbeeld DB, SBB en SNCF relatief veel getrokken treinen inzetten. Deze keuze wordt uiteraard sterk bepaald door de gemiddelde afstanden en daarmee verbonden het aantal wisselingen van rijrichting. Toch is de laatste 10 jaar een tendens zichtbaar waarbij getrokken materieel verdrongen wordt door treinstellen en dubbeldeks materieel.

Enkele concrete voorbeelden zijn:

- ICE/ICT/VT605/VT610..612/...
Met de introductie van dit materieel heeft DB een duidelijke keuze gemaakt voor het treinstelconcept. Treinstellen voorzien van automatische koppelingen maken het onder meer mogelijk om vleugeltreinen te vormen.
- IC2000/IC EW IV/S-Bahn Zürich
De ruggegraat van het regionaal vervoer rond Zürich wordt gevormd door dubbeldeksmaterieel waarvan het concept veel overeenkomst vertoont met DDM-2 en DDM-3. Om te besparen op personeels- en materieelinzet op (eind-)stations en om de keertijden te verkorten heeft SBB midden jaren '90 gekozen voor de inzet van trek-duw-treinen op intercity-verbindingen: IC EW IV (enkeldeks) en IC 2000 (dubbeldeks).
- TGV/TGV Duplex
SNCF heeft voor een deel van het lange afstandvervoer gekozen voor de aanleg van hogesnelheidslijnen met inzet van het bijbehorende materieel: treinstellen die koppelbaar zijn om te kunnen inspelen op een wisselend vervoersaanbod (TGV Sud-Est, -Atlantique en Réseau). Door de sterke vervoersgroei op Ligne Nouvelle N° 1 (Paris – Lyon) is bovendien besloten tot inzet van dubbeldeks hogesnelheidsmaterieel TGV Duplex.



Figuur 95: Dubbeldeks trek-duw trein (IC 2000)



Figuur 96: Dubbeldeks treinstam (S-Bahn Zürich)

Een bijzonderheid van IC 2000 en TGV Duplex is het doorlopend bovendek. Door de (in vergelijking met Nederland) lagere perrons is het mogelijk om balkons tussen de draaistellen op het niveau van het onderdek te voorzien. Hierdoor is het mogelijk om een doorlopend bovendek toe te passen, waardoor complexe voorzieningen als bijvoorbeeld een minibarlift overbodig worden.

13.2 Goederenmaterieel

13.2.1 Keuze wagentype

De keuze welk wagentype het meest geschikt is hangt uiteraard af van de te vervoeren lading. De lading kan bestaan uit containers, wissellaadbakken, losse pallets, stukgoed of stortgoed (vast en vloeibaar).

Wanneer de lading bekend is volgt de keuze tussen een tweeasser, vierasser of zesasser. Dit is afhankelijk van de massa van de belading en het tonmeter gewicht van de lading. De wagen wordt natuurlijk duurder en gecompliceerder met de toename van het aantal assen. En ook het onderhoud van een draaistel wagen is duurder dan van een tweeasser. Daarom wordt deze keus altijd zorgvuldig gemaakt.

Als volgende criteria gelden de lengte, breedte, hoogte, volume en/of verschijningsvorm van de lading.

De belangrijkste beperkende factoren betreffende deze keuzes zijn het profiel van vrije ruimte, aslasten en tonmeter gewicht. Ook een aantal geometrische kenmerken (lengte over buffers LOB, draaikomafstand en het overstek) vormen een beperking.

13.2.2 Wagentypen

Hieronder volgen enkele karakteristieke wagentypen voor de verschillende ladingen.

Containerwagens

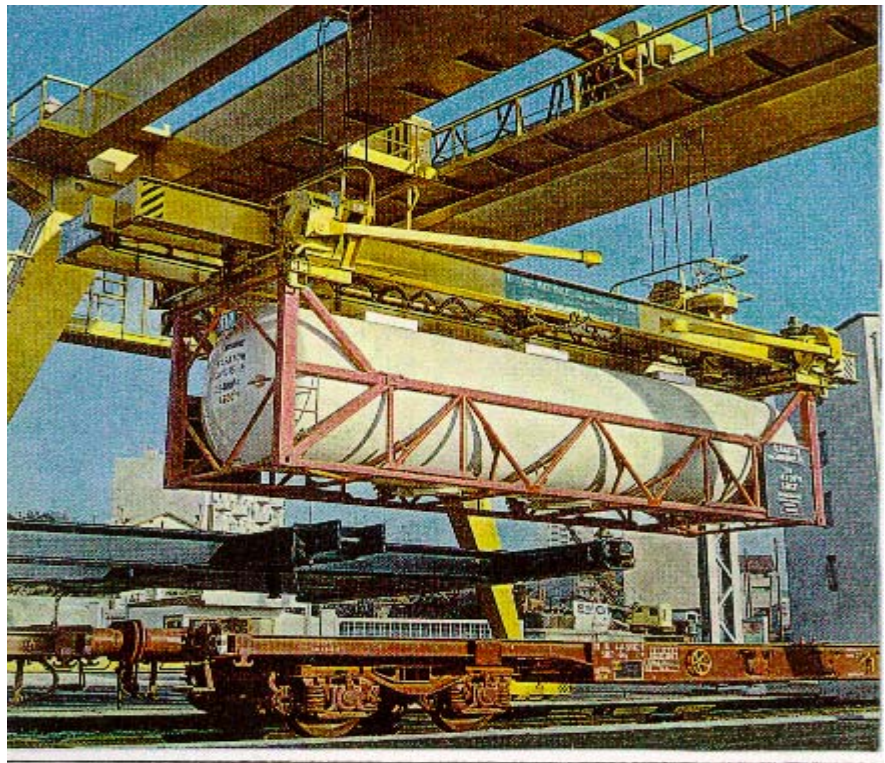
Containerwagens voor het vervoer van containers en wissellaadbakken.

- Tweeassige containerwagen Lgns(s). Deze wagen heeft als nadeel dat door de extreme afmetingen deze wagen niet zonder meer internationaal toegelaten is
- Vierassige containerwagen Sgns(s)
- Zesassige containerwagens Sggmrs(s) oftewel gelede wagens.
- Achtassige containerwagens Sfggmrrss is een hele speciale kortgekoppelde wagen. Nadeel is dat door de kleine wielen de maximale aslast beperkt is tot 18 ton

Schuifwandwagens

Schuifwandwagens kenmerken zich door het makkelijk beladen vanaf de zijkant of vanaf de bovenzijde. Deze wagen zijn er met of zonder dak in verband met beladen met een kraan.

- De tweeasser Habbins is meer geschikt voor licht pallet- en stukgoedvervoer
- De vierasser Habbins is vooral geschikt voor zwaar pallet- of stukgoedvervoer



Figuur 97: Overslag van een tankcontainer

Platte Wagens

Platte Wagens zijn in twee categorieën in te delen:

- R- wagens (vierassers) deze wagens zijn vooral bedoeld voor het vervoer van lange goederen (balken, buizen, walsproducten e.d.) eventueel zijn ze voorzien van rongen, kop- en zijwanden en huiven
- K-Wagens (tweeassers) deze wagens worden vooral gebruikt voor het vervoer van los gestorte goederen

Bulkwagens

Ook hier zijn twee categorieën aanwezig, wagens voor vaste goederen (stortgoedwagens), en vloeibare of gasvormige goederen (ketelwagens)

- Stortgoedwagens, F en T wagens twee en vierassers. Deze wagens worden gebruikt voor het vervoer van bulk goederen die van bovenaf geladen worden. De wagens worden meestal ontladen aan de onderzijde of zijkant met behulp van de zwaartekracht.
- Ketelwagens/reservoirwagens, Z wagens. Omdat deze ook vanwege de ladingdrager (reservoir) afwijkend zijn is hieraan een speciale paragraaf gewijd.

Speciale wagens

Buiten de containerwagens bestaan er ook nog speciale wagens zoals:

- Coilwagen Shimmns voor het vervoer van rollen dun plaatstaal
- Houtwagen Snps voor het vervoer van buizen en stamhout
- Zwaar transport wagens Salmnps voor het vervoer van bv legertanks

Reservoirwagens

Gevaarlijke stoffen worden o.a. vervoerd in reservoirwagens. Afhankelijk van de aard van de stof en/of de laad- en losprocedure zijn speciale wagens ontwikkeld. We onderscheiden:

- Gasketelwagens voor het vervoer van onder druk vloeibaar gemaakte gassen of voor sterk gekoelde vloeibaar gemaakte gassen.
- Vloeistofketelwagens voor het vervoer van vloeistoffen of gesmolten stoffen

13.2.3 Infrastructuurcategorieën

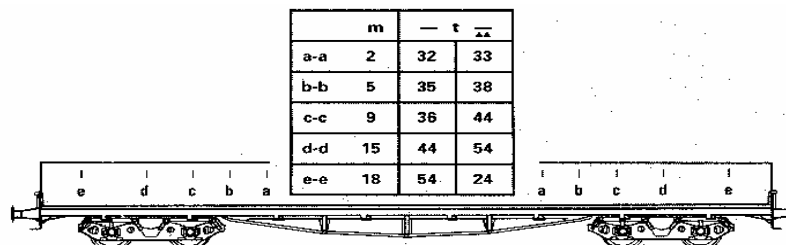
Op elke wagen staat aangegeven welk beladingsgewicht bij de verschillende infrastructuurcategorieën en de verschillende rijnsnelhedentoeelbaar is. Die aanduiding (in vaktermen: het beladingsraster) kan er als volgt uitzien:

	A	B1	B2	C2	C3C4	D2	D3
S	35,5t	38,0t	53,0t	53,5t	61,0t	53,5t	61,0t
120	00						

Figuur 98: Beladingsraster

In dit raster is af te lezen tot welk gewicht bij een bepaalde snelheid mag worden beladen. Voor de snelheden 100 en 120 kilometer per uur worden meestal de letters "S", respectievelijk "SS" gebruikt. Als een wagen alleen leeg 120 kilometer per uur mag rijden, wordt dat aangegeven met een "120" in plaats van "SS". Soms staan er 1 of 2 sterren naast het beladingsraster. Dit betekent dat de wagen technisch geschikt is voor een snelheid van 100 respectievelijk 120 kilometer per uur, maar dat hij qua remvermogen te kort komt.

Voor een aantal wagens is niet alleen het totaal gewicht van de lading belangrijk, maar ook de wijze waarop de last over de wagen wordt verdeeld. Het maximaal te beladen gewicht geldt alleen bij een gelijkmatige verdeling over het gehele vloeroppervlak. Bij gedeeltelijke belading of bij een puntbelasting (bijv. een grote machine of een voertuig) gelden andere maximumgewichten (zie voorbeeld hieronder en tabel bij wagentekening)



Figuur 99: Lastverdeling

Bij het vervoer van containers en wissellaadbakken geldt ook een lastverdeling. Voor elk type containerdraagwagen worden hierbij speciale beladingschema's opgesteld.

13.2.4 Aandrijving

De aandrijving van de tractievoertuigen, of dit nu locomotieven of treinstellen zijn, kan op verschillende manieren plaatsvinden.

Stoom tractie wordt in Europa nauwelijks meer toegepast, behalve op museumspoorlijnen. Belangrijkste nadelen van stoom tractie zijn de lage efficiency en de grote vervuiling (uitstoot van roet).

Diesel tractie kan zinvol zijn bij een relatief lage frequentie van het treinverkeer.

In vergelijking met elektrische tractie kan de dure bovenleiding achterwege blijven. Onderscheid kan nog worden gemaakt in:

- dieselektrische aandrijving
- dieselhydrodynamische aandrijving
- dieselhydromechanische aandrijving
- dieselhydrostatische aandrijving

In Europa wordt vooral elektrische tractie veel toegepast. Bij snelheden boven 200 km/uur is elektrische aandrijving het enige bruikbare alternatief. In Nederland wordt voor reizigerstreinen elektrische tractie ingezet op alle hoofdlijnen, slechts op enkele nevenlijnen wordt dieselmaterieel gebruikt.

Voordeel van elektrische tractie is dat de efficiency hoog is en dat de vervuiling beperkt blijft tot de plaats van opwekking (centrale) en daardoor eenvoudiger beheersbaar.

13.2.5 Draaistellen en loopwerken

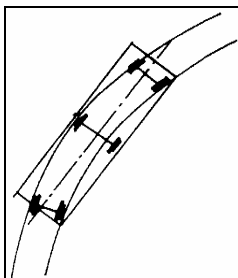
Inleiding

De maximale asbelasting per wielstel voor reizigers- en goederenmaterieel mag omwille van de infra over het algemeen niet meer dan 22,5 ton bedragen.

Dit geeft een beperking voor het gewicht per bak (of locomotief) wanneer deze slechts uitgerust is met 2 wielstellen.

Zijn grotere gewichten per bak (of locomotief) noodzakelijk, dan moeten er meerdere wielstellen toegepast worden.

Meerdere wielstellen op onderlinge gelijke afstand zijn echter niet toepasbaar i.v.m. de moeilijkheden bij het doorlopen van bogen.



Figuur 100: Wielstellen in bogen

Daarom is het noodzakelijk de wielstellen te combineren tot draaistellen, wat een gunstig effect heeft op de rijcomfort.

Het rijcomfort van een wagon/treinstel neemt toe wanneer de cycluslengte van de sinusbeweging die optreedt bij vetergang kan worden vergroot.

Voor een draaistel waarbij de aspotten onbeweeglijk aan het draaistelframe zijn bevestigd, wordt de formule van Klingel anders:

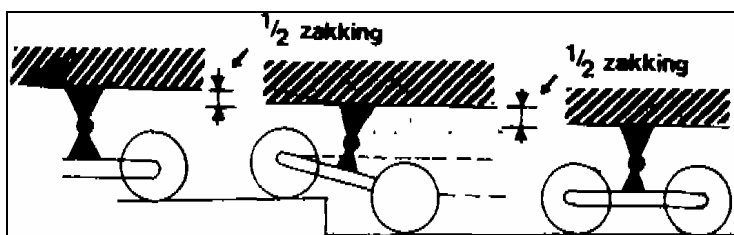
$$L = 2\pi \sqrt{\frac{l_0 r_0}{\gamma}} \cdot \sqrt{1 + \frac{a^2}{(2l_0)^2}}$$

Met:

L = De golflengte van de sinusloop in m.
 l_0 = Halve spoorbreedte in m.
 r_0 = radius wiel in m.
 γ = De wielbandconiciteit in radialen.
 a = asafstand

Of wel een starre verbinding aspotten-draaistelframe heeft een gunstig effect op de cycluslengte. Echter geeft de genoemde starre verbinding problemen m.b.t. bouwtoeranties (geringe afwijking in de maatvoering zal "zelf sturing" van het draaistel tot gevolg hebben) en tevens zullen de wielstellen in bogenloop hun instelbaarheid missen (waardoor slijtage en verhoogde ontsporingkans). Aspotten worden daarom min of meer beweeglijk in het draaistelframe bevestigd.

Een draaistel heeft t.o.v. een enkel wielstel het voordeel, dat bij een horizontale-of verticale oneffenheid in de baan, deze maar voor de helft optreedt in de wagenbak.



Figuur 101: Filtering oneffenheden

Vering

In draaistellen worden veren toegepast.

De vering is nodig om:

- oneffenheden in de baan, waarover wordt gereden, en trillingen die in het loopwerk ontstaan zo min mogelijk over te brengen op de rijtuigbak.
- de stootkrachten ten gevolge van de massa werking, bijvoorbeeld bij het passeren van wissels, zoveel mogelijk te beperken.

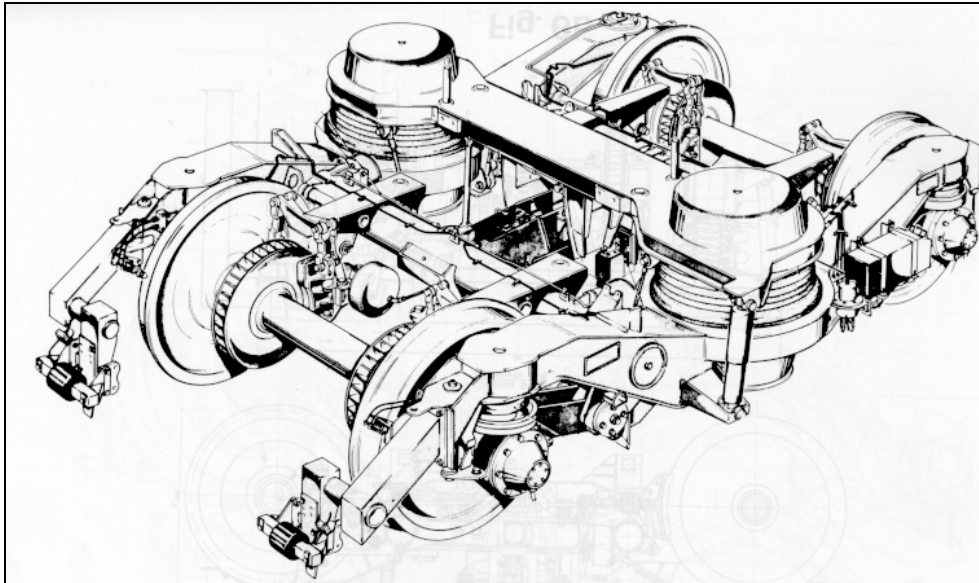
Demping

Het is mogelijk de optredende bewegingen in het draaistel te beperken door het toepassen van demping. Dit is het geval als de massa en de basis, behalve door de veer, ook nog door een demper met elkaar zijn verbonden. Hierdoor wordt de bewegingsenergie van de beweging van de massa t.o.v. de basis in wrijving omgezet en wordt de beweging uitgedempt.

In het algemeen bestaat het veersysteem van een draaistel uit twee gedeelten. Het eerste gedeelte, de primaire vering, zorgt voor het opnemen van de stoten uit het spoor zodat geen trillingsschade aan draaistel of spoor ontstaat. De secundaire vering zorgt voor het rijcomfort zoals de reizigers dat ondervinden, zowel verticaal als horizontaal (dwars). Bij goederendraaistellen vinden we over het algemeen geen secundaire vering.

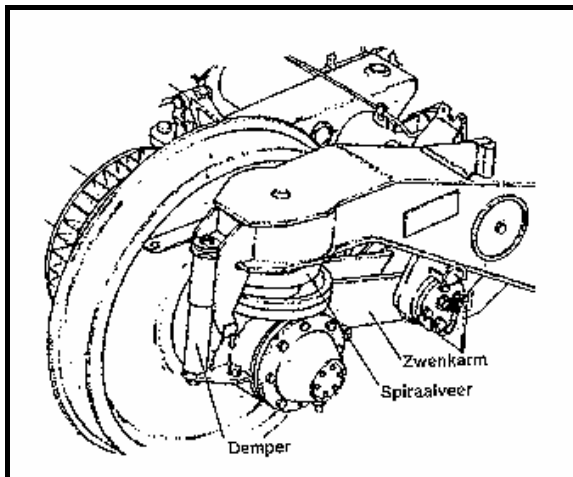
Enkele constructieve uitvoeringen van draaistellen

In onderstaande figuur is een modern Y32 draaistel (ICR) weergegeven.



Figuur 102: Y32 draaistel IRM

Daarbij is een deel van de primaire vering te zien:

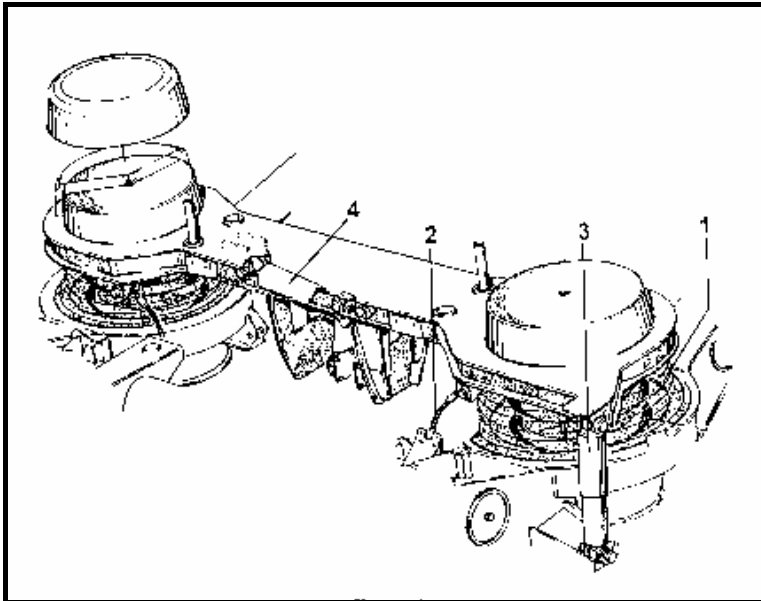


Figuur 103: primaire vering

Het veersysteem is aangebracht bij de wielaspotten en is tevens steunpunt voor het draaistelframe en bestaat uit: hydraulische demper, spiraalveer en zwenkarm.

Om de dans- en dompbewegingen te onderdrukken, is tussen iedere zwenkarm en langsligger een hydraulische demper gemonteerd.

In onderstaande figuur is de secundaire vering weergegeven. Het veersysteem is opgehangen in het draaistelframe en bevat tevens het steunpunt van de rijtuigbak.



Figuur 104: secundaire vering

De secundaire vering van een ICR draaistel is als volgt opgebouwd:

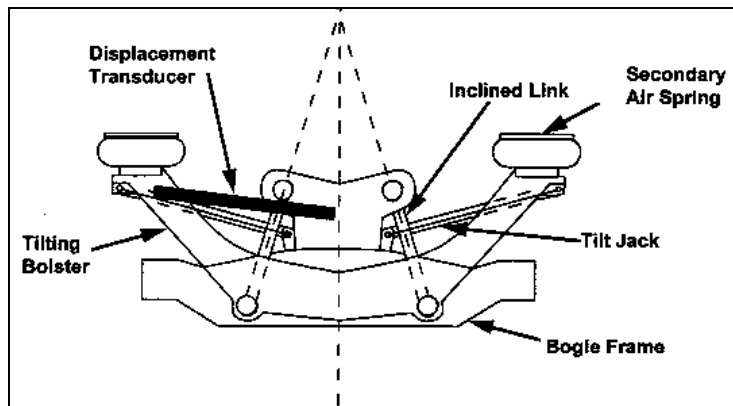
- Twee schroefveren (pos.1) aan beide kanten van het draaistel. De veren laten verticale-, zijdelingse, langs- en uitdraaibewegingen toe. De onderste veerschotel doet tevens dienst als centreerring. De isolatie voorkomt metaalcontact.
- Op de beide schroefveren is de wiegbalk geplaatst. De einden van de wiegbalk zijn doorgezet en fungeren als draagvlak voor de bovenste veerschotel, die voorzien is van een aanslag. Bij een te grote inverting zullen buffer en aanslag elkaar raken. De maximale uitvering (zoals bij het hijsen) wordt begrensd door vier vangkabels (pos.2) tussen wiegbalk en langsliggers.
- Tussen de langsliggers en de wiegbalk zijn overhoeks twee hydraulische dempers (pos.3) gemonteerd. Deze dempers dempen de verticale relatieve bewegingen tussen bak en draaistel.
- De wiegbalk is verbonden dmv 1 hydraulische demper (pos.4) die de zijdelingse kracht dempt.

Tegenwoordig wordt aan diverse ontwikkelingen gewerkt om het loopgedrag en de loopveiligheid en de bogenloop bij hogere snelheden nog verder te verhogen. De belangrijkste ontwikkelingen zijn:

- (semi)-actieve vering
- kantelbak voertuig
- sturende wielstellen
- onafhankelijke wielen

Kantelbak

Een speciale uitvoering van actieve vering is de kantelbak:



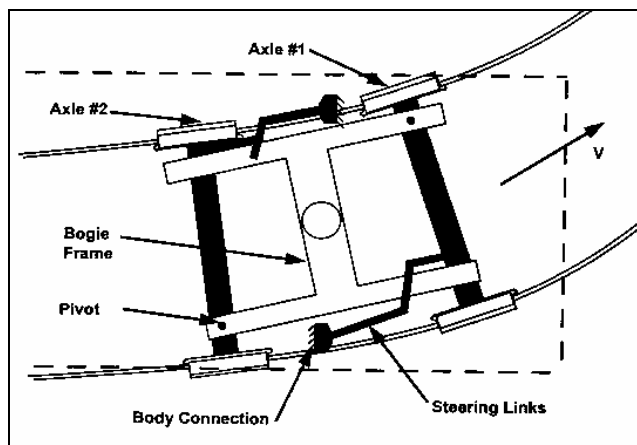
Figuur 105: kantelbak; principeschets

De kantelbak geeft een verhoogd comfort in bochten met een hoog verkantings-tekort. Als de bak (met passagiers) kan worden gekanteld, zodanig dat de laterale versnelling vanwege de boog gecompenseerd kan worden door de laterale component van de zwaartekracht, is het mogelijk het toelaatbare verkantingsstekort te verhogen. Hierdoor zullen de krachten op het spoor niet significant worden gewijzigd.

Sturende wielstellen

Over het algemeen wordt uit oogpunt van een grote stabiliteit bij hoge snelheden en het kunnen sturen in krappe bochten een hoge veerstijfheid in de ophanging gewenst. Hierdoor hebben moderne treinen een grote impact op relatief krappe bogen: hoge krachten en verhoogde slijtage van het spoor.

Om dit te omzeilen wordt gezocht naar de toepassing van zichzelf instellende wielstellen. Onderstaand een schematische weergave.



Figuur 106: sturende wielstellen

Twee mechanische armen zorgen ervoor dat de wielstellen radiaal naar het centrum van de boog gericht blijven. Een stabielere uitvoering is er een die de hoek tussen draaistel en bak continu controleert en dit gegeven gebruikt door de wielen een specifieke radiale instelling mee te geven.

Gescheiden wielen

Tot slot worden de onafhankelijke wielen vermeld. Het voordeel van deze splitsing van 1 wielstel in 2 delen is dat de wielen verschillende hoeksnelheden kunnen hebben, hetgeen in bochten van belang kan zijn, (zie ook paragraaf 1). Hiermee is de eerder genoemde "sinusgang" niet meer mogelijk en zal de slijtage aan wielen en spoor gereduceerd kunnen worden door een afname van de slip in het wiel-rail contact. Nadeel is de complexiteit van de constructie en vergrootte inbouwruimte.

13.2.6 Onderhoud

Het materieel heeft regelmatig (technisch) onderhoud nodig. Onderdelen van het voertuig die aan slijtage onderhevig zijn worden periodiek gemeten en zodra de betreffende afkeurmaat bereikt is zal het onderdeel worden vervangen of hersteld. Gedacht moet worden aan kool slijtstukken op stroomafnemers, koolborstels in motoren en generatoren, remblokken en –schijven en wielen.

De wielen zijn belangrijk, omdat ze een directe relatie hebben met het aspect veiligheid. Een te ver gesleten wiel kan een onveilige situatie opleveren. Uiteraard geldt dit ook voor het spoor.

Bij spoorwegen zal de holslijtage van het wiel meestal de parameter zijn die aanleiding geeft de wielen te herprofilen. Het loopoppervlak van de wielband zal door slijtage een holle vorm krijgen. Door de verandering van de vorm van het loopoppervlak wijzigen de loopeigenschappen in negatieve zin. Bovendien zullen bij het passeren van openingen in het spoor, zoals bij punt- en kruisstukken, de wielen bij veel holslijtage grote dynamische krachten opleveren ('slaan' van de wielen). Ook slijtage van de flens of een verlopende flenshelling kan reden zijn om de wielen te herprofilen. De locomotief, het rijtuig of het treinstel gaat dan op de kuilwielenbank, een draaibank die onder de vloer is aangebracht. Nadat de lagers van de wielassen zijn ondersteund, worden de wielassen rondgedraaid terwijl een beitel het oppervlak van het wiel weer in het juiste profiel draait. Na enkele malen afdraaien wordt de wielband te dun en zal een nieuw wiel moeten worden aangebracht. Belangrijk bij de kuilwielenbank is dat de beide wielen van een wielas tegelijk worden gedraaid, zodat het linker- en rechter wiel beide dezelfde vorm en afmetingen krijgen.

De kuilwielenbank wordt ook gebruikt om platte kanten van de wielbanden te verwijderen. In feite wordt ook hier een laag staal van de wielband afgedraaid, zodat de wielen weer rond worden. Platte kanten, of polygonisatie, ontstaan wanneer het wiel slijpt ten opzichte van de spoorstaaf. Dit gebeurt veelvuldig in de herfst, wanneer blaadjes op het spoor vallen en de wielen bij het remmen blokkeren bij gebrek aan voldoende wrijving tussen wiel en rail.

Moderne treinen zijn voorzien van elektronische systemen die continue de technische toestand van de trein monitoren en analyseren. Dit ondersteunt het onderhoudsproces, verhoogt de veiligheid en geeft bruikbare informatie waarmee voorspellingen kunnen worden gedaan over de te verwachten storingen in de trein en de tijdstippen waarop onderhoud en revisie dienen te worden uitgevoerd.

14 TRACTIEVOORZIENING

14.1 Voedingssystemen volgens EN 50163

In de EN 50163 zijn standaard systemen voor elektrische tractie gegeven. Deze standaardisatie maakt het eenvoudiger standaard infracomponenten en materieel toe te passen. De tractiespanning varieert van lage gelijkspanning tot hoge wisselspanning:

750 V_{DC}

1500 V_{DC}

3000 V_{DC}

15 kV_{AC} 16 ²/₃ Hz

25 kV_{AC} 50 Hz (Europese standaard)

Het 750 V_{DC}-systeem wordt veelal gebruikt in stedelijk gebied voor de voeding van tram en metro o.a. bij de HTM en de RET. Het 1500 en 3000 V_{DC}-systeem wordt toegepast voor de voeding van treinen, o.a. in België, Nederland, Italië en Frankrijk.

De laatste twee voedingssystemen zijn wisselspanningssystemen, waarbij 25 kV_{AC} gebruik maakt van de industriële frequentie van 50 Hz. Het 25 kV_{AC}-systeem wordt beschouwd als de huidige standaard voor treinverkeer en wordt toegepast over de hele wereld, o.a. in West en Oost Europa, Rusland, Argentinië, Australië, Canada, China, India, Iran, Japan, Zuid Korea, Maleisië, Mexico, Nieuw Zeeland, Pakistan, Taiwan, Tunesië, Turkije, USA, Zimbabwe en Zuid Afrika.

Het 15 kV 16 ²/₃ Hz maakt gebruik van een eigen voedingssysteem op 16 ²/₃ Hz en wordt vooral toegepast in Duitsland. Deze uit historie gegroeide frequentie blijft naast de industriële frequentie bestaan voor elektrische tractie, omdat de investering in dit systeem bijzonder groot is. Landen, die treinen met dit systeem laten rijden, zullen om die reden niet snel overstappen op het 25 kV_{AC}-systeem.

14.2 Systeem 1500 V_{DC}

Het 1500 V_{DC}-systeem is het huidige systeem dat gebruikt wordt voor de voeding van het geëlektrificeerde deel van de Nederlandse Railinfra. Het systeem is opgebouwd uit een aansluiting tussen energiebedrijf en onderstation. In het onderstation wordt wisselspanning omgezet in een gelijkspanning, die op de bovenleiding en retour wordt aangesloten. Om gestandaardiseerde producten te kunnen gebruiken is de variatie van deze gelijkspanning genormeerd.

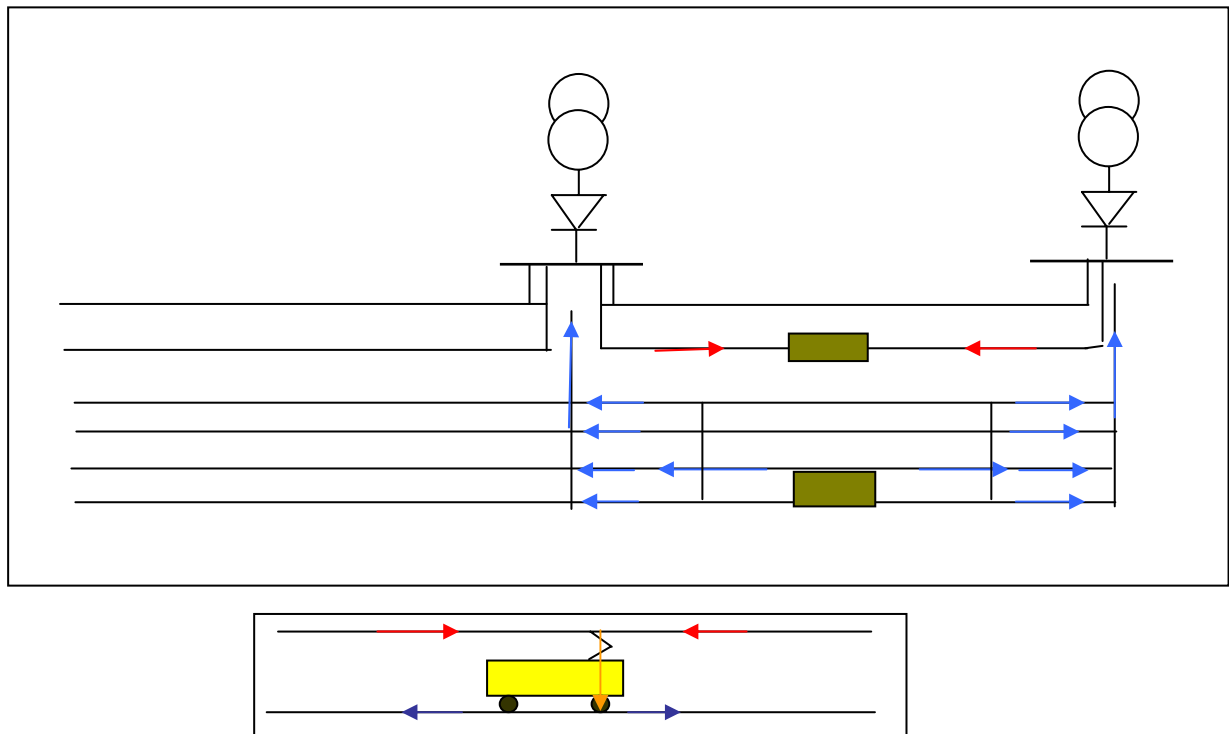
De EN 50163 schrijft naast de standaard tractiespanningen ook de maxima en minima qua tractiespanning voor binnen een systeem. Voor het 1500 V_{DC}-systeem luiden de relevante grenzen:

Minimale spanning 1000 V

Nominale spanning 1500 V

Maximale continue spanning 1800 V

Het vermogen dat aan het materieel kan worden overgedragen wordt bepaald door het product van spanning en stroom aan de stroomafnemer. Het theoretische maximum aan vermogen dat in dit systeem is over te dragen aan het materieel bedraagt 1800 V x 4000 A = 7.2 MW. Omdat de geleiders tussen energiebedrijf, onderstation en materieel een eindige geleidbaarheid hebben, zal dit vermogen niet haalbaar zijn. Een gedeelte van dit vermogen zal verloren gaan als verlies tijdens transport, wat resulteert in een lagere spanning aan de stroomafnemer. Het huidige materieel heeft een stroombe grenzing van 4 kA. Bij een spanning van 1500 V leidt dit tot een vermogen van 6 MW, welke waarde als bovengrens voor het systeem geldt.



Figuur 107 Overzicht verloop tractiestroom in bovenaanzicht (bovenste afbeelding) en zijaanzicht (onderste afbeelding). In rood is de stroom door de bovenleiding aangegeven en in blauw door de retour.

De retour van dit systeem wordt gevormd door de spoorstaven. Deze spoorstaven zijn geïsoleerd opgesteld t.o.v. de aarde om te voorkomen dat DC-stroom een weg via derden naar het onderstation vindt. Hierdoor kan zwerfstromcorrosie ontstaan ter grootte van 1 gram ijzer per ampère uur over het uitredende oppervlak. De weerstand van de spoorstaven is relatief groot vergeleken met die van de grond en is gedefinieerd als:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

waarbij ρ de soortelijke weerstand, l de lengte en A de oppervlakte van de 'geleider' is. Het grote verschil in oppervlakte tussen grond en spoorstaven, maakt de grond tot een aantrekkelijke geleider.

Het isoleren van de spoorstaven heeft twee aandachtspunten:
dit kan leiden tot onaanvaardbaar hoge aanraakspanningen tussen spoorstaven en aarde;
portalen dienen verbonden te worden met de spoorstaven om bij falen van een isolator een gegarandeerde kortsluiting en daarmee een veilige situatie te waarborgen. De waarborging van deze elektrische verbinding tussen portaal en spoorstaaf is gevoelig voor onderhoud aan het spoor.

Overige kenmerken zijn: afstand onderstations 4 – 15 km; maximale snelheid 200 km/u.



Figuur 108 Overzicht geleiders 1500 V_{DC}-baanvak. Bovenleidinggeleiders, 2 rijdraden + draagkabel + versterkingsleiding; retour, spoorstaven.

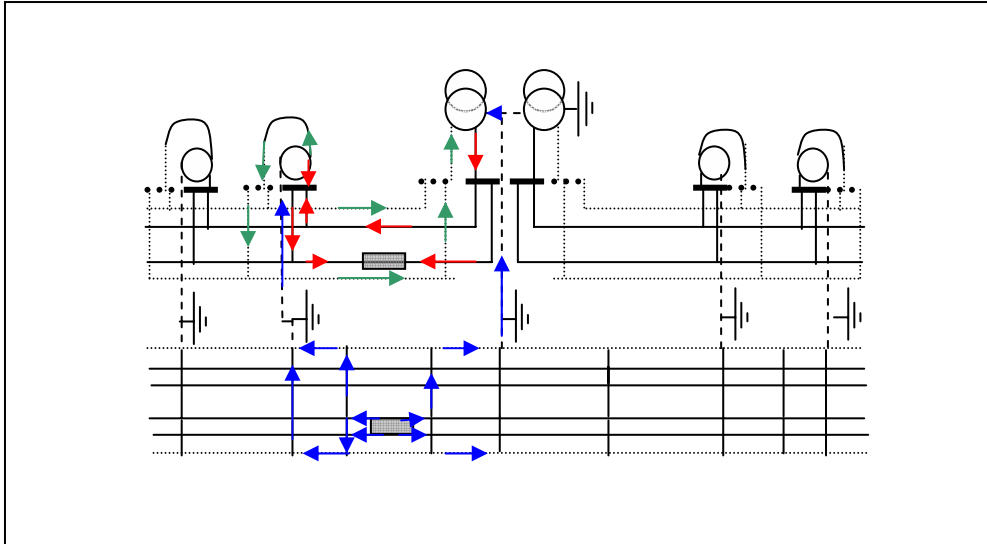
14.3 Systeem 25 kV_{AC}

Het 25 kV_{AC}-systeem kan door de hogere spanning en kleinere stromen een relatief hoog vermogen transporteren via het bovenleidingsysteem. De wisselspanning biedt mogelijkheden om met autotransformatoren en één extra geleider de transportspanning op te voeren naar 50 kV, terwijl het materieel gevoed wordt met 25 kV. Hierdoor kan de onderstationsafstand tot ca. 60 km oplopen bij een configuratie met autotransformatoren (AT's). Autotransformatoren hebben geen aansluiting op het openbare net nodig om te functioneren. Er zijn wel is waar minder onder stations nodig dan bij DC-systemen, maar daarvoor in de plaats dienen wel AT's te worden geplaatst op een onderlinge afstand van ongeveer 10 km. Overige kenmerken van het AC-systeem zijn: maximale stroom per trein 1000 A; maximale snelheid 300 km/u.



Figuur 109 Overzicht geleiders bij een 25 kVAC AT-systeem.

In tegenstelling tot het gelijkspanningsysteem zijn er twee extra geleiders te zien aan de buitenzijde van de portalen. De ene geleider verbindt de portalen met elkaar en met het aardingssysteem: de equipotentiaalgeleider. De andere geleider is geïsoleerd opgesteld en transporteert vermogen samen met het bovenleidingsysteem op 50 kV-niveau tussen AT-stations. Tussen bovenleiding en spoorstaven is een tractiespanning van 25 kV beschikbaar.



Figuur 110: Stroomverloop bij een 25 kV AT-systeem. In rood de stroom door de bovenleiding. In blauw de stroom in de retourspoorstaven en equipotentiaalgeleiding. In groen de stroom door de negatieve feeder.

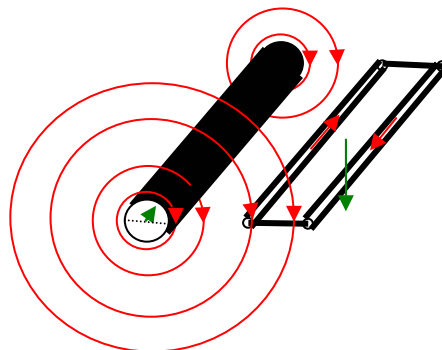
14.4 Theoretische beschouwing van het magnetische veld

Uit de natuurkunde is bekend dat er een beïnvloeding bestaat tussen elektrische en magnetische velden beschreven in de eerste twee wetten van Maxwell. Deze kunnen als volgt onder woorden worden gebracht: een magnetisch veld wordt opgewekt door een stroom en een elektrisch veld door een in de tijd veranderend magnetisch veld.

Het magnetische veld H rond een stroomvoerende geleider is te beschrijven met:

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

met I de stroom door de geleider en r de afstand van het middelpunt van de geleider tot het punt van waarneming. In onderstaande figuur is een stroomvoerende geleider gegeven waaromheen aan het begin en einde een magnetisch veld is getekend (rode cirkels).



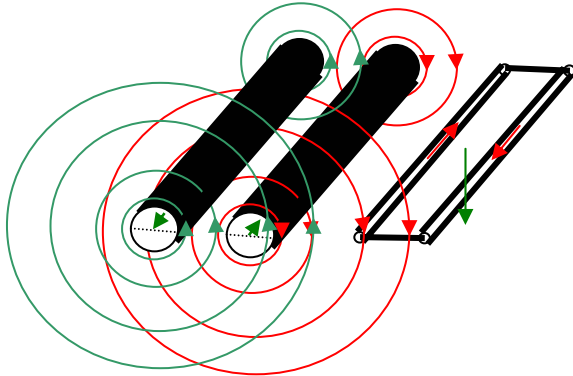
Figuur 111: magnetisch veld H rond een stroomvoerende geleider

Het magnetisch veld gaat door de oppervlakte van een gesloten lus. Er zijn nu twee situaties te onderscheiden:

- Een tijdonafhankelijk magnetisch veld van een DC-stroom
- Een tijdafhankelijk magnetisch veld van een AC-stroom

Een veranderend magnetisch veld H wekt volgens de tweede wet van Maxwell een spanning op in de gesloten kring, die leidt tot een stroom. Het tijdonafhankelijke veld doet dit niet! Een wisselstroom (AC) wekt dus in parallel liggende elektrische lussen een stroom op, ook wel aangeduid als beïnvloeding.

Deze beïnvloeding kan leiden tot het niet correct werken van elektrische systemen en onveilige situaties (aanraakspanningen).



Figuur 112: sommen van de magnetische velden van twee geleiders

Deze beïnvloeding kan worden beperkt door de magnetische velden van twee geleiders te sommeren. Wanneer deze geleiders dicht bij elkaar geplaatst zijn op een afstand Δr en een gelijke, maar tegengestelde stroom voeren, dan volgt voor het magnetisch veld H op een afstand r :

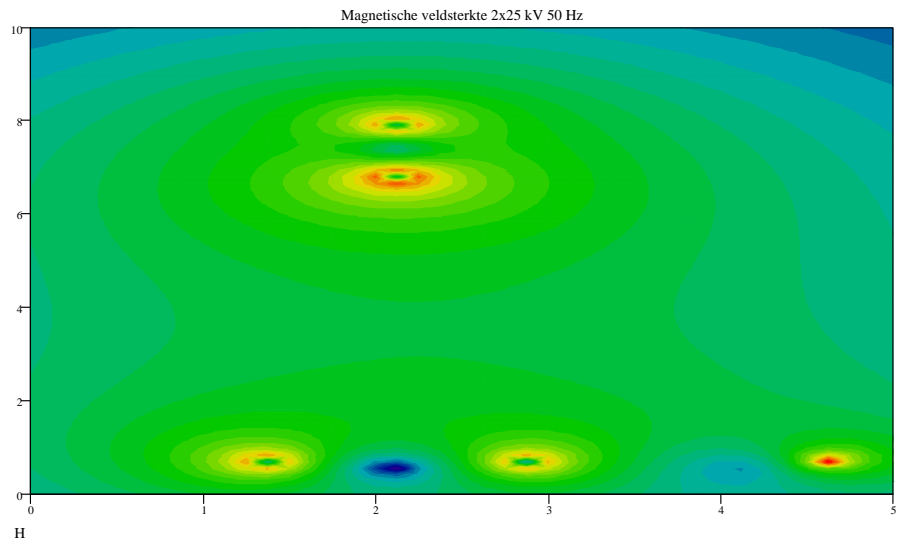
$$H = \frac{I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r + \Delta r} \right) \approx \frac{I}{2\pi} \frac{\Delta r}{r^2}$$

Hieruit volgt dat het veld naar nul nadert met $\Delta r/r^2$. Naarmate de geleiders dichter bij elkaar liggen, neemt de straling dus af. Van deze werking wordt in een AT-systeem door meerdere geleiders gebruik gemaakt:

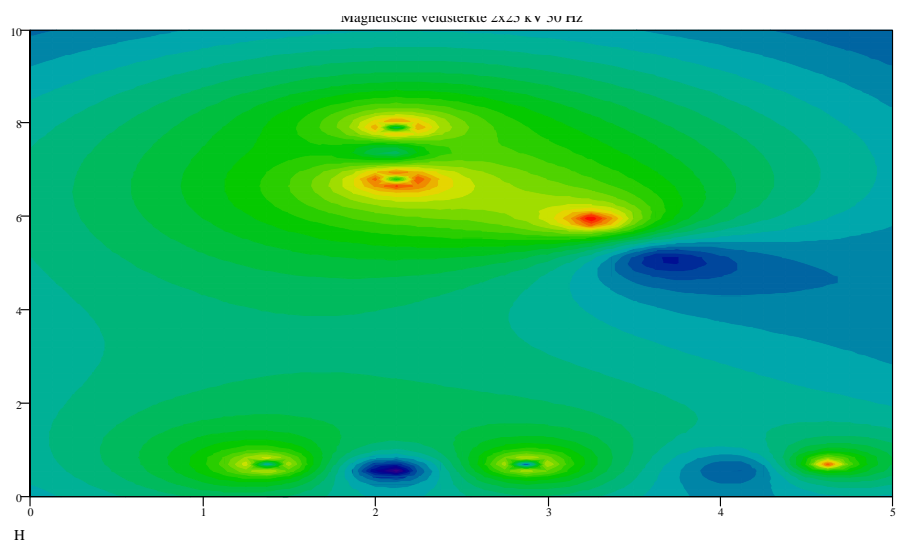
- Equipotentiaal met de bovenleiding (25 kV);
- Negatieve feeder met de bovenleiding (50 kV).

De plaatsing van deze geleiders onderling is gezien de uitstraling van het magnetisch veld van belang (zie figuren op de volgende pagina). Ook tussen bovenleiding en spoor ontstaan magnetische velden. De stromen zijn weliswaar gering, maar de onderlinge afstand is relatief groot. Dergelijke velden treden niet alleen op bij AT-systemen, maar ook bij DC-systemen. Vanuit een oogpunt van straling is een derde rail systeem (metro) dus gunstiger dan een bovenleidingsysteem.

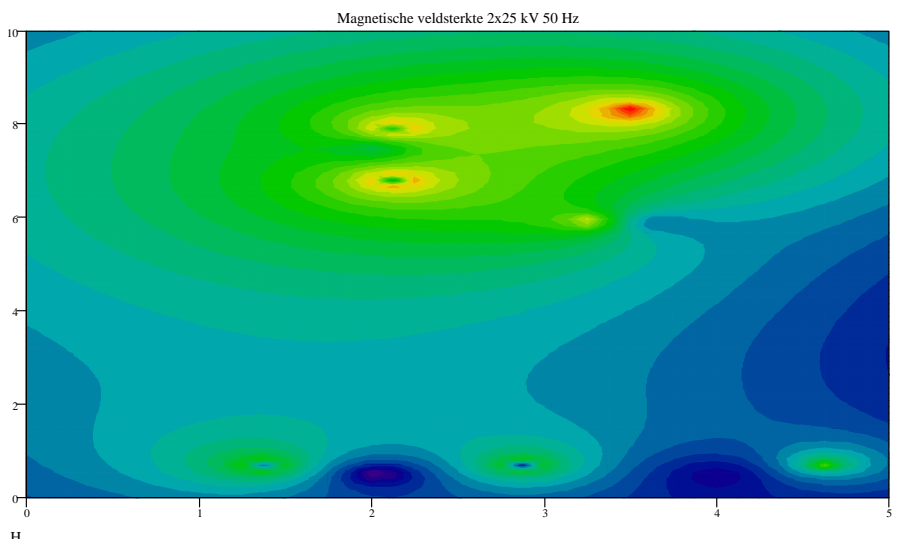
Figuur 113: Dwarsdoorsnede spoor met magnetisch veldverloop in de nabijheid van een tractievragende trein. De stroom loopt door de bovenleiding en wordt de spoorstaven en lineaire aardkabel (rechts onderin) ingedwongen.



Figuur 114: Dwarsdoorsnede spoor met magnetisch veldverloop na een dwarskoppeling in de retour met de equipotentiaalleiding. De stroom is uit de spoorstaven en lineaire aardkabel naar de equipotentiaalleiding in de nabijheid van de heengaande stroom gaan lopen.



Figuur 115: Dwarsdoorsnede spoor met magnetisch veldverloop voorbij AT-station. De stroom wordt hoofdzakelijk door negatieve feeder (rechts boven) en bovenleiding verzorgd.



De retour van een 25 kV-systeem is geaard om onaanvaardbaar hoge aanraakspanningen te voorkomen. De AC-zwervstroom is om twee redenen minder schadelijk dan de DC-zwervstroom: Ten opzichte van DC-zwervstroom bedraagt de AC-zwervstroomcorrosie 1%; De retourgaande stroom zoekt als het ware de heengaande stroom in de bovenleiding op in tegenstelling tot DC-stroom, waarbij de stroomverdeling geheel op weerstand berust is.

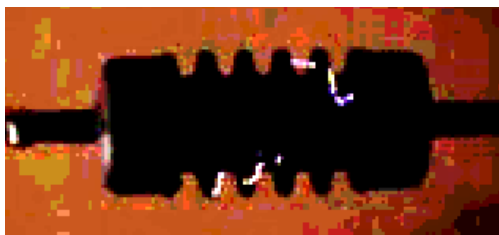
14.5 Theoretische beschouwing van het elektrische veld

In de vorige paragraaf is aangegeven waarom bepaalde geleiders bij elkaar in de buurt worden gehangen in een AC-systeem. Om hierbij een maximaal effect te verkrijgen zouden de geleiders zo dicht mogelijk bij elkaar geplaatst moeten worden. Tussen bovenleiding en retour is dit niet mogelijk vanwege de mogelijkheid om materieel te laten rijden. Maar daarnaast bevinden zich in heengaande en retourgeleider een verschillende potentiaal, die van elkaar moet worden gescheiden om kortsluiting te voorkomen. Het isolatiemedium bij spoorwegen bestaat grotendeels uit lucht. De geleiders (bovenleiding, negatieve feeder) worden met isolatoren bevestigd aan een draagconstructie.

Bij de dimensionering dient rekening gehouden te worden met overslag in een isolatieconstructie van het bovenleidingsysteem. Dit kan optreden:

- langs een isolatoroppervlak als gevolg van tracking
- tussen metalen delen door de lucht, al dan niet langs een isolator

Tracking (of kruipontladingen) treedt op aan het oppervlak van een isolator bij gelijktijdig aanwezig zijn van vervuiling en hoge luchtvochtigheid of lichte regen. Ten gevolge van inhomogene (geleiden- de) vervuiling van het isolatoroppervlak wordt de potentiaalverdeling langs het oppervlak verstoord. Lokaal kan zo de grenswaarde voor het ontsteken van een ontleding gemakkelijk worden overschreden, ook bij relatief lage spanningen. Bij het dimensioneren van de kruipweg van isolatoren is de continue spanning maatgevend vanwege het lange duur effect.

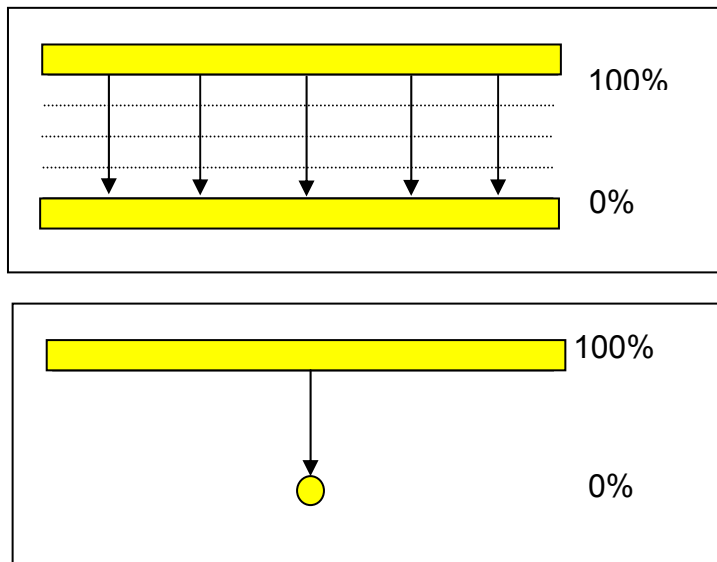


Figuur 116: Links: lokaal opdrogen van het isolatoroppervlak. Rechts: overslag van de isolator.

Overslag door de lucht wordt voornamelijk bepaald door de grootte van de luchtisolatie, welke in hoge mate afhankelijk is van de grootte van overspanningen als gevolg van directe en indirecte blikseminslag en schakelhandelingen.

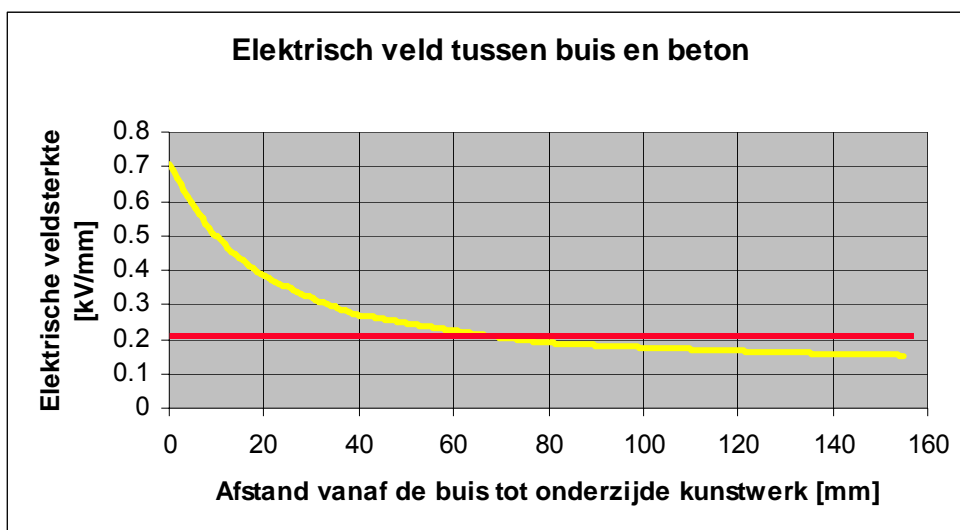
14.6 Kunstwerken 25 kV

In figuur 10 zijn twee configuraties weergegeven met een gelijke onderlinge afstand en een gelijk spanningsverschil tussen de geleiders.



Figuur 117: Twee situaties voor weergave elektrisch veld.

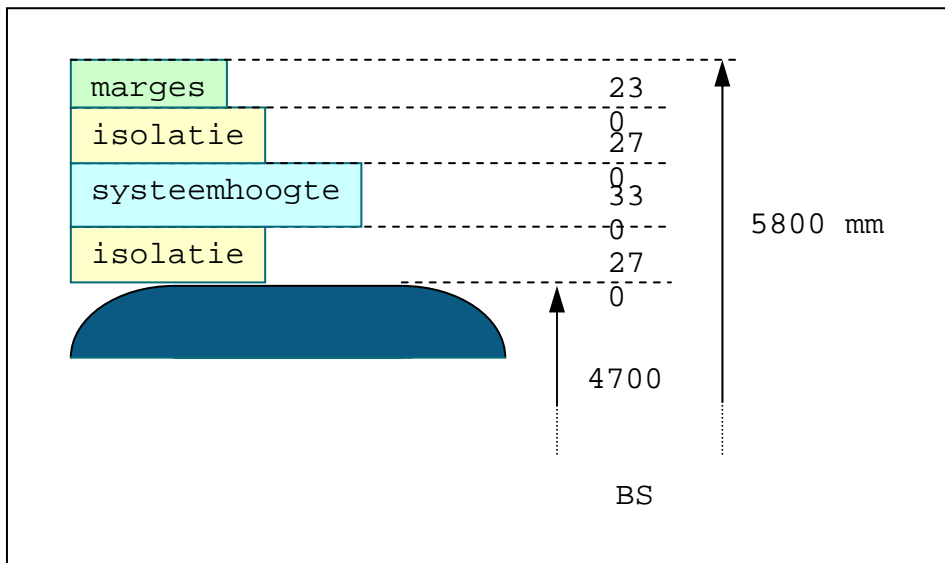
Tussen de twee platen ontstaan een constante veldsterkte (condensator) en deze configuratie vormt dus in feite een theoretisch maximum. De tweede configuratie met een geleider en een plaat is terug te vinden bij kunstwerken over de spoorbaan. Het kunstwerk is de plaat en de draagkabel is de geleider. Voor beide configuraties is het verloop van het elektrisch veld over de kortste afstand afgebeeld in figuur 11. Het is duidelijk dat een geleider t.o.v. een plaat eerder voldoet aan de criteria van doorslag in de lucht dan de configuratie met twee platen.



Figuur 118: Verloop elektrisch veld: geel, tussen plaat en geleider; rood, tussen plaat en plaat.

Normaal gesproken is er voldoende ruimte om de geleiders van het tractievoedingssysteem te plaatsen. Wanneer er echter krappe ruimtebeslagen zijn zoals in tunnels en bij viaducten is het van groot belang om de verschillende disciplines binnen het spoor integraal te bekijken. Dit wordt geïllustreerd aan een actueel voorbeeld om bestaande kunstwerken, ontworpen voor een ruimtebeslag van een 1500 V_{DC}-systeem, geschikt te maken voor toepassing van een 25 kV_{AC}-systeem.

Uit voorgaande paragrafen volgt dat de uitdaging vooral in het gebied van het elektrisch veld valt te vinden. In onderstaande figuur is het ruimtebeslag onder een kunstwerk voor een 25 kV-tractievoeding afgebeeld.



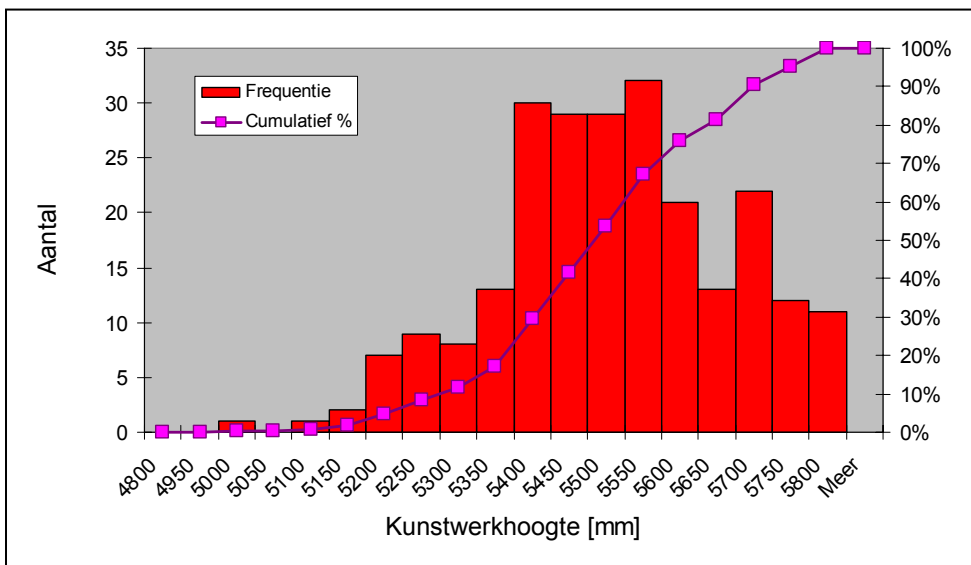
Figuur 119: Overzicht standaard ruimtebeslag bij 25 kV.

De genoemde marge van 230 mm is opgebouwd uit:

Marge vanuit spoorbouw:

- Kunstwerken vrije baan: 100 mm
- Tunnels doorgaand ballastbed: 50 mm
- Tunnels met ingegoten spoorstaven: 30 mm
- Doorhang rijdraad: 30 mm
- Veiligheidsmarge: 100 mm

In Nederland zijn echter de bestaande kunstwerken veelal niet gebaseerd op een hoogte van 5800 mm, zoals blijkt uit onderstaande verdeling van de hoogte van kunstwerken bij NS.



Figuur 120: Overzicht kunstwerken < 5800 mm in Nederland.

In principe zijn onderstaande opties beschikbaar om deze kunstwerken geschikt te maken voor 25 kV:

- Kunstwerk verhogen (kostbaar)
- Systemhoogte bovenleiding beperken tot maximaal 100 mm: oplossing voor 30% van de kunstwerken, kunstwerkhoogte minimaal 5570 mm
- Isolatieafstand beperken tot ca 100 mm: oplossing voor 50% van de kunstwerken, kunstwerkhoogte minimaal 5440 mm
- Een combinatie van de twee bovenstaande oplossingen: oplossing voor 90% van de kunstwerken, kunstwerkhoogte minimaal 5210 mm
- Bovenstaande oplossing inclusief minimalisering van de marges: oplossing voor alle kunstwerken met een minimale hoogte van 4980 mm

15 BOVENLEIDINGTECHNIEK

15.1 Inleiding bovenleidingstechniek

Een eerste gedachte aan de term “bovenleidingen” wordt meestal geassocieerd met een niet al te complexe techniek. Echter wanneer dieper in de bovenleidingstechniek wordt gedoken dan blijkt deze techniek toch fundamentele vraagstukken te behelzen. Deze paragraaf behandelt kort enkele onderwerpen uit de bovenleidingstechniek om een algemene indruk te geven van de problematiek. De volgende onderwerpen worden behandeld:

1. Functie van de bovenleiding;
2. Maximale snelheid bij een bovenleidingsysteem;
3. Snelheidsverhogende maatregelen;
4. Simulaties dynamisch gedrag;
5. Bovenleidingsystemen voor Heavy rail;
6. Vast bovenleidingsysteem versus beweegbaar bovenleidingsysteem.

15.1.1 Functie bovenleiding

De bovenleiding vervult de volgende twee functies:

1. Het leveren van energie aan de trein. Hiervoor is het sleepcontact tussen rijdraad en stroomafnemer nodig.
2. Het transport van energie. Deze functie kan vergeleken worden met een hoogspanningsnet: net als bij een hoogspanningsnet verzorgt de bovenleiding het energietransport tussen onderstations. Om deze functie goed te vervullen zijn soms versterkingsleidingen nodig.

Bovenleidingsystemen zijn er in allerlei verschillende uitvoeringen, meestal gegroepeerd naar een maximaal te bereiken snelheid. Zo is de eerste functie “het leveren van energie aan de trein via een sleepcontact” bij lage snelheden eenvoudiger te realiseren dan bij hogere snelheden. Voor tramsystemen waarbij de maximale snelheden om en nabij de 50 km/u liggen, zijn de bovenleidingsystemen dan ook vaak uitgevoerd in de vorm van slechts één draad.

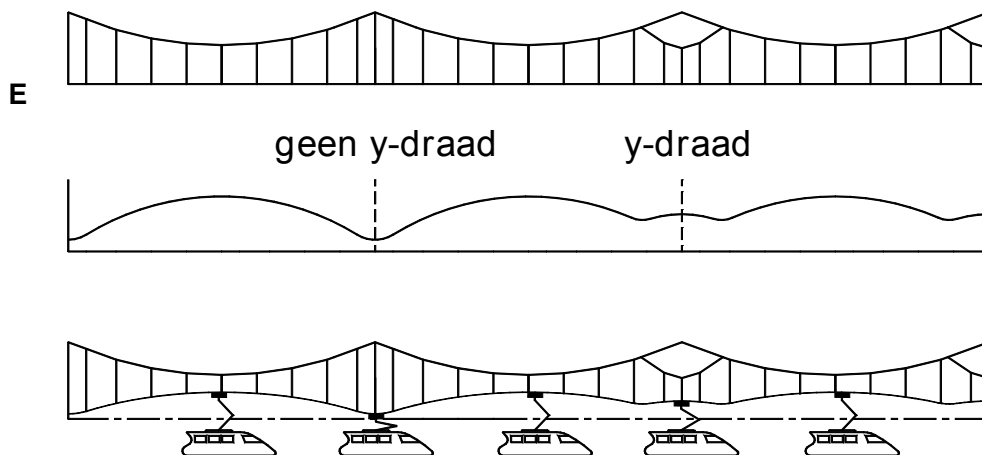
Bij hogere snelheden worden hogere eisen gesteld aan het bovenleidingsysteem waardoor de uitvoering in de vorm van slechts één draad niet meer voldoet. Door de doorhang van deze enkele draad zal het sleepcontact bij hogere snelheden niet meer voldoende zijn. Bij hogere snelheden wordt een constante hoogte van de rijdraad (de draad die contact maakt met de stroomafnemer/pantograaf) steeds belangrijker. Daarom wordt bij deze bovenleidingsystemen gebruik gemaakt van een draagkabel die er voor zorgdraagt dat de rijdraad horizontaal ligt.

15.1.2 Maximale snelheid bij een bovenleidingsysteem

Het huidige Nederlandse "vaste" bovenleidingsysteem is geschikt voor 140 km/u. Waardoor is dit nu begrensd? Dit heeft te maken met het feit dat de maximale snelheid van een bovenleidingsysteem bepaald wordt door twee aspecten:

1. Het transport van vermogen door de bovenleiding naar de trein.
Om met de trein een hoge snelheid te rijden zal voldoende energie naar de trein moeten worden gevoerd. Dit is behandeld in het hoofdstuk Tractievoorziening.
2. Het contact tussen stroomafnemer en bovenleiding.
De snelheid wordt beperkt indien het contact tussen de stroomafnemer en de bovenleiding onvoldoende stabiel is (veel vlambogen, loslaten etc).

Onderstaande figuur laat de beweging van de stroomafnemer zien wanneer deze een bovenleidingsysteem berijdt. Hoe sneller de stroomafnemer langs de bovenleiding sleept hoe meer de stroomafnemer zal gaan bewegen. Het zal steeds moeilijker worden om het sleepcontact goed te houden. In combinatie met een stroomafnemer heeft elk bovenleidingsysteem daarom een maximale snelheid waarbij het sleepcontact nog acceptabel is.



Figuur 121: beweging stroomafnemer onder bovenleiding

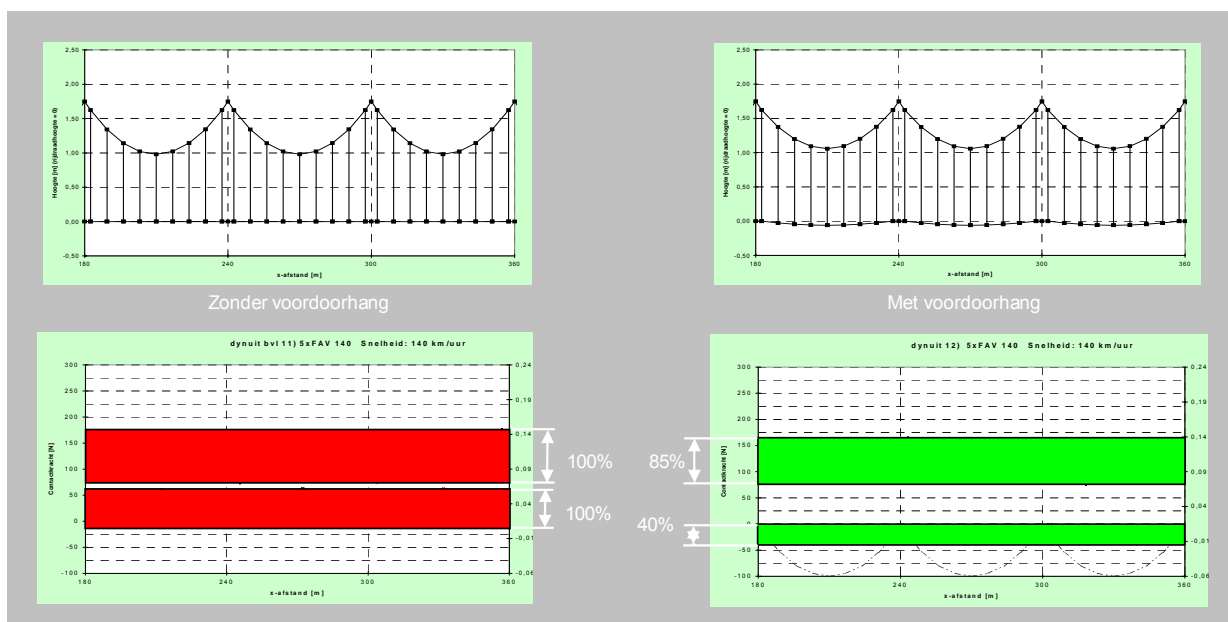
15.1.3 Snelheidverhogende maatregelen

Zoals reeds aangegeven is het traditionele Nederlandse "vaste" bovenleidingsysteem geschikt voor 140 km/u. Om bij snelheidsverhoging toch een acceptabel dynamisch gedrag te behouden zijn diverse maatregelen mogelijk. Het gaat te ver om al deze maatregelen te behandelen, toch worden de belangrijkste maatregelen genoemd.

1. Rijdraadhoogtes constanter. Bijvoorbeeld door het toepassen van een zogenaamd beweegbaar bovenleidingsysteem. Dit wordt verderop behandeld.
2. Trekkrachten kabels verhogen. Dit wordt bijvoorbeeld gedaan in het bovenleidingsysteem dat wordt toegepast op de HSL-Zuid.
3. Het toepassen van een lichter bovenleidingsysteem.
4. Voordoorhang toepassen. Dit wordt geïllustreerd in de volgende paragraaf.
5. Y-draad toepassen. Dit is te zien in de bovenstaande figuur.
6. Kleinere bouwtoeranties.

15.1.4 Simulaties dynamisch gedrag

Eén van de snelheidsverhogende maatregelen is voordoorhang. Om de invloed van voordoorhang op het dynamisch gedrag te onderzoeken zijn simulaties verricht. Met behulp van deze simulaties wordt een indicatie verkregen van de variërende contactkracht en de beweging van de pantograaf bij een bepaalde snelheid. De contactkracht mag hierbij niet te groot zijn: om mechanische slijtage te minimaliseren. De contactkracht mag ook niet te laag zijn: om losse contacten en daarmee gepaard gaande vlambogen te vermijden. Bij te kleine contactkrachten ontstaat zogenaamde elektrische slijtage: door vlambogen smelt telkens een stukje rijdraad weg. In onderstaande figuur zijn twee simulaties met elkaar vergeleken: een simulatie van een bovenleidingsysteem met een horizontale rijdraadligging en een bovenleidingsysteem met voordoorhang. Te zien is dat het bovenleidingsysteem met voordoorhang beter presteert: minder variatie in de stijfheid en minder variatie in de beweging van de stroomafnemer



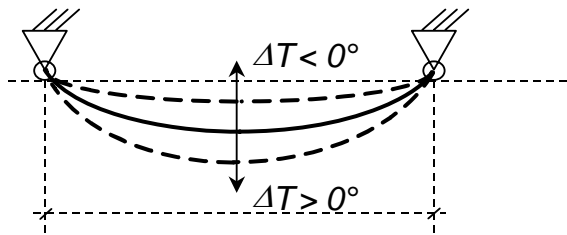
Figuur 122: simulatie bovenleidingsysteem zonder en met voordoorhang

15.1.5 Bovenleidingsystemen voor Heavy rail

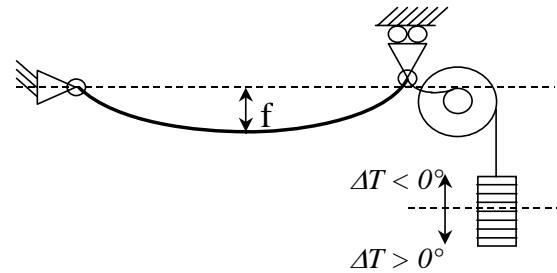
Voor bovenleidingsystemen voor snelheden van circa 80 km/u en hoger (meestal genoemd bovenleidingstemen voor Heavy rail) wordt onderscheid gemaakt in:

1. Bovenleidingsystemen met vast afgespannen draagkabel.
2. Bovenleidingsystemen met beweegbaar afgespannen draagkabel.

Om de verschillen aan te geven zal eerst kort uitleg moeten worden gegeven over de doorhang van een kabel. Wanneer een kabel is afgespannen tussen twee vaste punten dan zal de kabel bij temperatuurverhoging uitzetten en bij temperatuurdaling krimpen. Dit resulteert in meer of minder doorhang van de kabel en variërende trekkrachten. In onderstaande figuur is dit toegelicht.



Figuur 123: Temperatuurinvloed vast afgespannen kabel.



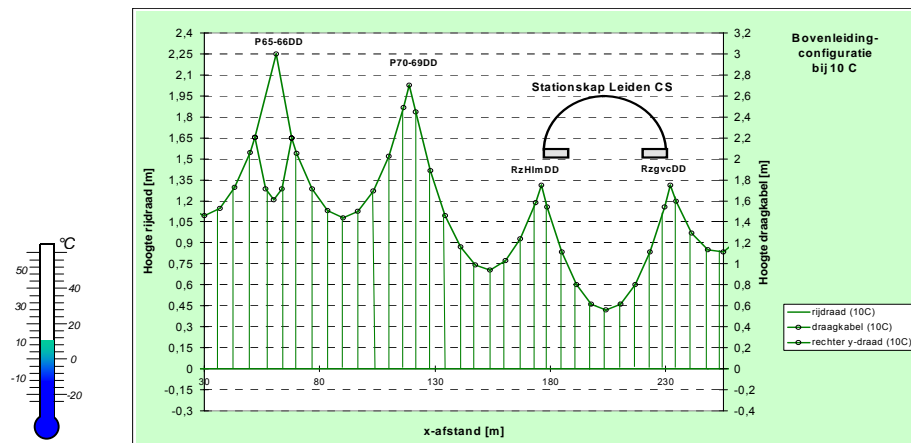
Figuur 124: Beweegbaar afgespannen draagkabel

De doorhang en trekkrachten in een kabel kunnen bij verschillende temperaturen constant worden gehouden door een kabel aan één uiteinde af te spannen via een katrol met een gewicht. Dit wordt het beweegbaar afspannen van een kabel genoemd.

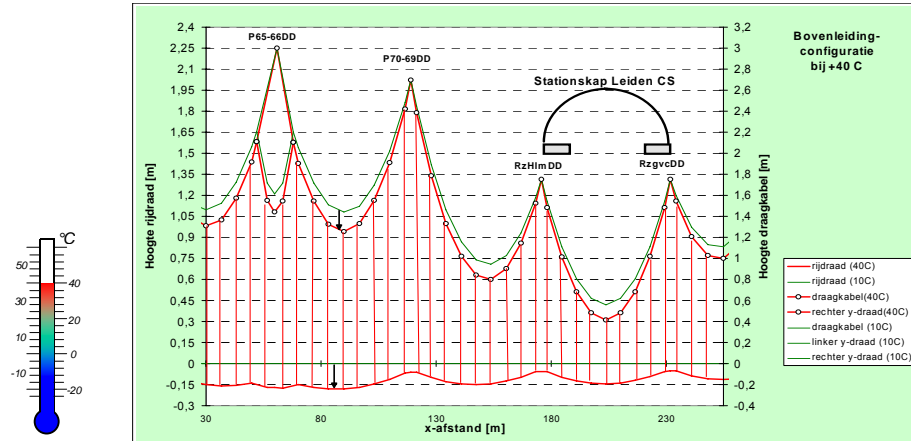
15.1.6 Vast bovenleidingsysteem versus beweegbaar bovenleidingsysteem

Zogenaamde “Vaste” bovenleidingsystemen maken gebruik van een vast afgespannen draagkabel. De rijdraad is echter wel beweegbaar afgespannen. De maximale snelheden van deze systemen is circa 100 km/u. Door toepassing van extra voorzieningen zoals een y-draad kan de maximale snelheid worden verhoogd naar 140 km/u. De y-draden zorgen er in dit systeem voor dat bij temperatuurvariatie het verschil in rijdraadhoogtes binnen acceptabele grenzen blijft.

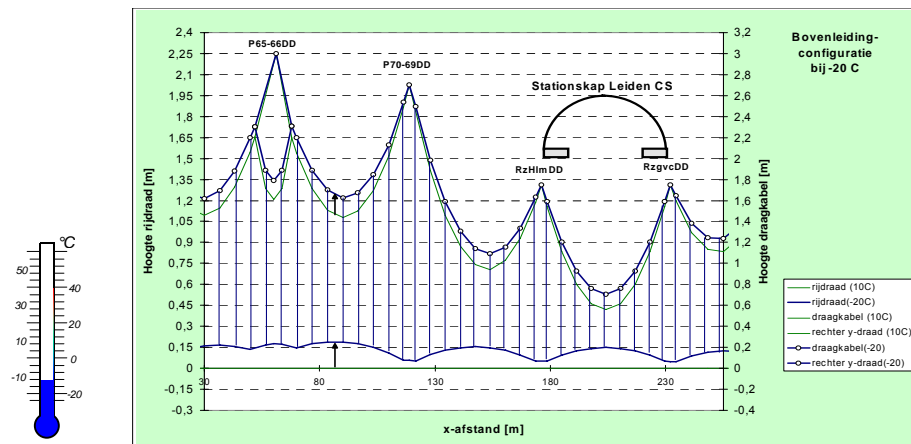
Een simulatie van de temperatuurvloed op een vast bovenleidingsysteem wordt in de volgende figuren behandeld. In de eerste figuur is een zogenaamd langsprofiel van een vast bovenleidingsysteem gemodelleerd. Genomen is een situatie waarbij de bovenleiding onder een stationskap is ontworpen, waarbij onder de stationskap geen plaats is om de y-draden te positioneren. Vlak voor de stationskap zijn wel y-draden gepositioneerd. In de volgende twee figuren is te zien wat er gebeurt met de rijdraadligging bij een temperatuur van 40 °C en –20 °C.



Figuur 125: bovenleidingmodel bij 10 C

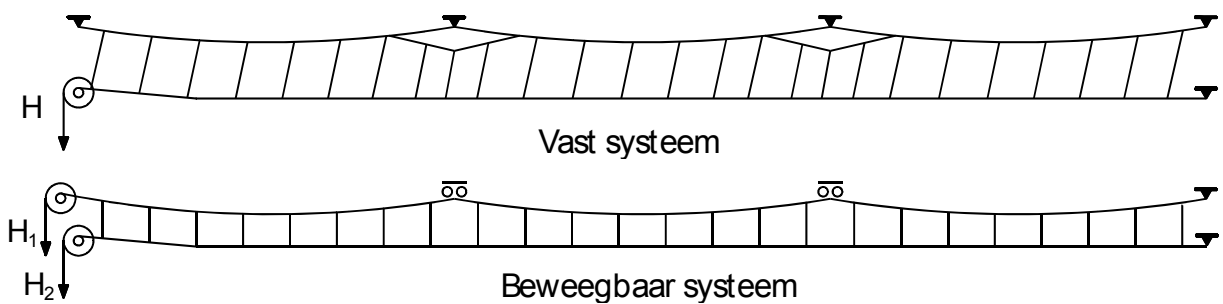


Figuur 126: bovenleidingmodel bij +40 C



Figuur 127: bovenleidingmodel bij -20 C

Bij een beweegbaar systeem blijft de rijdraadhoogte bij temperatuurvariatie constant. De belangrijkste verschillen tussen een vast bovenleidingsysteem en een beweegbaar bovenleidingsysteem zijn in onderstaande figuur weergegeven.



Figuur 128: Verschillen in vast en beweegbaar in het langspriefiel

In het langspriefiel van een beweegbaar systeem is niet alleen te zien dat de draagkabel beweegbaar is afgespannen maar ook dat elk ophangpunt door middel van een roloplegging aan de vaste wereld is verbonden. De bovenleidingophangingen zullen namelijk in langsrichting van het spoor moeten kunnen bewegen om de lengteveranderingen van de draagkabel door te geleiden naar de beweegbare afspanning. Onderstaand figuur laat de dwarsprofielen tussen de twee bovensystemen zien: een scharnierende bovenleiding arm en een niet scharnierende, vaste, bovenleidingarm.

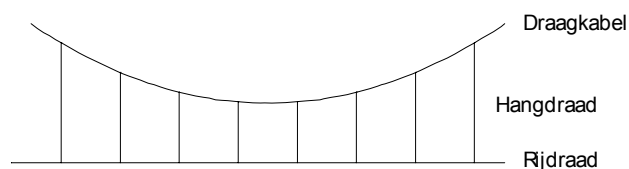
Conventioneel systeem (vast) B4 systeem (beweegbaar)



Figuur 129: verschillen in vast en beweegbaar in het dwarsprofiel

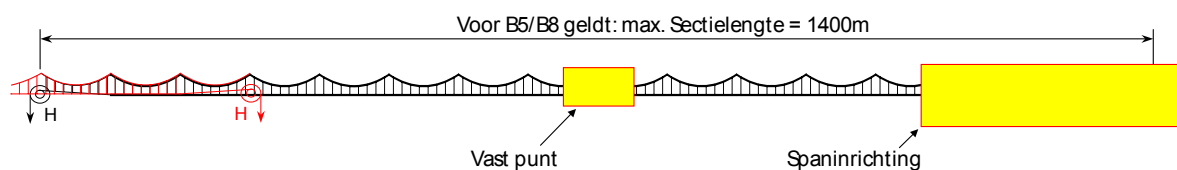
15.2 Opbouw bovenleidingontwerp.

Een standaardbovenleidingveld is te zien in onderstaande figuur.



Figuur 130: Opbouw bovenleidingnet

De lengte van de kabels in een bovenleidingsysteem is in belangrijke mate begrensd door de lengteverandering bij temperatuurswisselingen. Daarom is een bovenleidingontwerp opgedeeld in bovenleidingsecties (met maximale lengtes van ongeveer 1400 m – 1800 m). Deze bovenleidingsecties worden verbonden door middel van zogenaamde spaninrichtingen. Dat is een gebied waarin over meerdere bovenleidingvelden de aangrenzende bovenleidingsecties elkaar overlappen en waar de secties worden afgespannen. In het midden van een bovenleidingsectie wordt een vast punt gecreëerd. De functie van een vastpunt is het voorkomen dat de rijdraad ten gevolge van stroomafnemerpassages beweegt in de rijrichting van de stroomafnemer.



Figuur 131: Opbouw bovenleidingsectie

15.3 Bovenleidingsystemen in Nederland

Het zogenaamde "B1" bovenleidingsysteem, een 1500 V vast bovenleidingsysteem geschikt voor snelheden tot 140 km/u komt in Nederland het meeste voor.



Figuur 132: B1 bovenleidingsysteem

Voor de Nieuwbouwprojecten zoals de Betuweroute, Hsl-Zuid en Utrecht – Amsterdam 4 sporigheid zijn nieuwe bovenleidingsystemen ontwikkeld. Zo is voor de Betuweroute een 25 kV bovenleidingsysteem (genaamd "B5") ontwikkeld op basis van vormgeving. Karakteristiek zijn de gebogen bovenleidingpalen.



Figuur 133: B5 bovenleidingsysteem

De meeste nieuwbouwprojecten met uitzondering van de Hsl-Zuid en de Betuweroute zullen worden gebouwd met het "B4" bovenleidingsysteem. Dit bovenleidingsysteem is geschikt voor 1500 V, de gebruikte spanning in het huidige bovenleidingnet, maar ook voor 25 kV, de naar verwachting in de toekomst noodzakelijke spanning om de gevraagde vermogens en snelheden te behalen. Onder 1500 V is dit bovenleidingsysteem geschikt voor 160 km/u en onder 25 kV is deze geschikt voor 200 km/u.



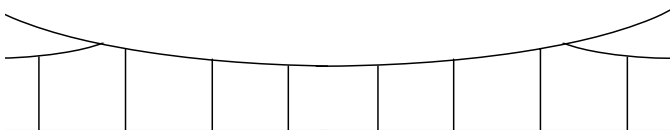
Figuur 134: B4 bovenleidingsysteem

15.4 Bovenleidingsystemen buitenland

15.4.1 Duitsland

Om een acceptabel dynamisch gedrag tussen stroomafnemer en bovenleiding te verkrijgen wordt in Duitsland vooral de y-draad gebruikt. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van hoge trekkrachten en een harde rijdraad. Het spanningsnivo bedraagt 15 kV 16 2/3 Hz.

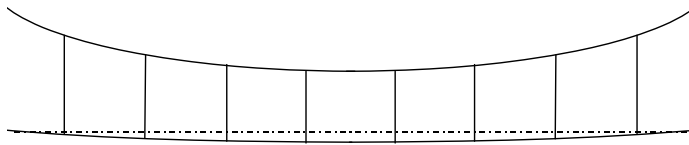
In Duitsland wordt ook actief onderzoek gedaan naar actief regelbare stroomafnemers. Dit zijn stroomafnemers die zichzelf bijregelen wanneer deze in een slecht dynamisch gedrag verzeild raken.



Figuur 135: langsprofiel Duitse hoge snelheidsysteem

15.4.2 Frankrijk

De tegenhanger van de Duitse filosofie (y-draad) is de Franse filosofie. De Fransen gebruiken voorhang voor het bereiken van hogere snelheden. Daarnaast gebruiken ze ook dickere kabels (bijvoorbeeld een 150 mm² rijdraad in plaats van de dunnere 120 mm² zoals gebruikt in het Duitse hoge snelheidsysteem) en hogere trekkrachten. Zij hebben hiermee het wereldrecord in huis gehaald: 515 km/u. Het spanningsnivo bedraagt 25 kV, 50 Hz en wordt dikwijls uitgelegd in een AT variant. Oude lijnen zijn nog uitgerust met een spanning van 1500 V. Een compound bovenleidingsysteem (zoals in de volgende dia's behandeld bij het onderwerp Japan) komt in Frankrijk ook voor.

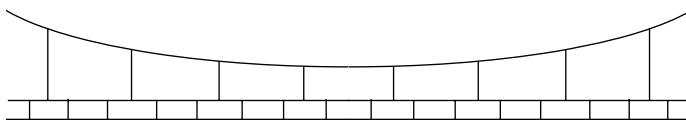


Figuur 136: Langsprofiel Frans hoge snelheidsstelsel

15.4.3 Japan

In Japan werd tot voor kort voor de hoge snelheidsbovenleidingsystemen het zogenaamde “compound systeem” gebruikt. Dit systeem is naast de normale draagkabel voorzien van een hulpdraagkabel en levert een gunstige elasticiteitsverdeling over een bovenleidingveld. Dit dure bovenleidingssysteem was noodzakelijk, omdat het Japanse hoge snelheidsmaterieel per rijkstroomafnemer had, waardoor soms wel tien stroomafnemers moesten zorgdragen voor het sleepcontact. Veel stroomafnemers betekent een slecht dynamisch gedrag tussen stroomafnemer en bovenleiding omdat de stroomafnemers elkaars gedrag beïnvloeden. Met name de achterste stroomafnemers leveren veel vlambogen op.

Tegenwoordig gaan de Japanners meer over naar simpelere bovenleidingsystemen (zonder hulpdraagkabel) vergelijkbaar met de Duitse en de Franse waarbij gebruik wordt gemaakt van maximaal twee stroomafnemers op grote onderlinge afstand (ongeveer 200 meter).

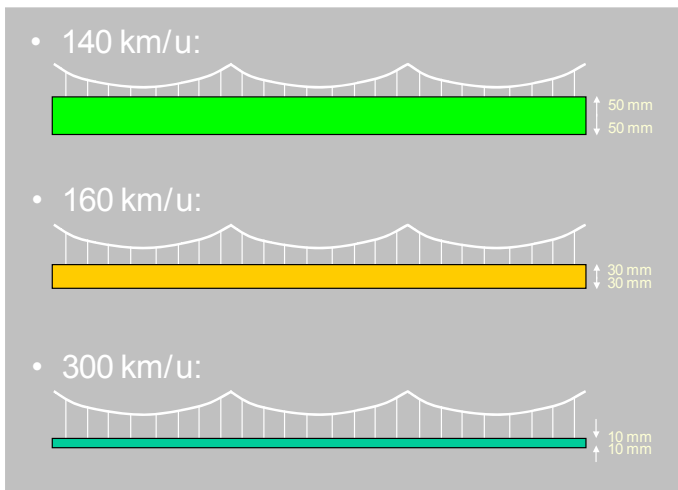


Figuur 137: Langsprofiel compound systeem

15.5 Invloed spoorbouw

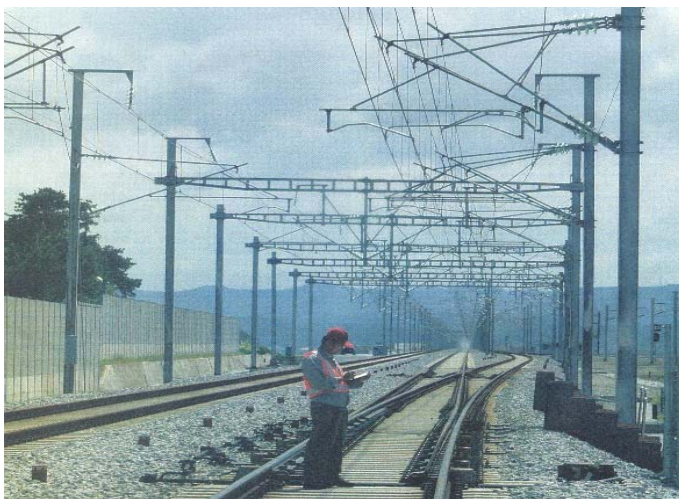
De eisen aan het bovenleidingsysteem kunnen nog zo hoog zijn en de montage van het systeem nog zo nauwkeurig, maar hiermee is een goed functioneren van bovenleiding nog niet gewaarborgd. De afstemming met andere subsystemen zoals het spoor is ook een belangrijke factor.

Een voorbeeld is de rijdraadhoogte. De rijdraadhoogte is de hoogte van onderkant rijdraad tot aan het vlak gevormd door de bovenkant van de twee spoorstaven. Indien de rijdraad in eerste instantie nauwkeurig wordt gemonteerd ten opzichte van de spoorstaven, maar wanneer deze spoorstaven (tijdens onderhoudswerkzaamheden) in hoogte worden aangepast, dan is het mogelijk dat de toleranties van de bovenleiding niet meer voldoen.



Figuur 138: Hoe hoger de snelheid, des te nauwkeuriger de rijdraadhoogte

Ook de verschuiving, de zijdelingse ligging van de rijdraad ten opzichte van hart spoor, kan buiten het tolerantieveld raken ten gevolge van een beperkte afstemming. Dit introduceert met name bij wissels grote storingsrisico's.



Figuur 139: Bij wissels is nauwkeurige afstemming tussen spoorbouw en bovenleiding vereist.

16 BEVEILIGING

16.1 Inleiding

De Nederlandse beveiligingssystemen zijn beschreven, af en toe wordt er een vergelijking gemaakt met de systemen in andere landen.

De komende jaren, de jaren waar de grenzen zowel letterlijk als figuurlijk zullen verdwijnen, met als kapstok "interoperability" zal er veel veranderen.

Wat doen we met alle regels en voorschriften?

Hoe gaan we specificeren, ontwerpen, testen en valideren?

De marktwerking met vraag en aanbod zal een sterke invloed hebben op de antwoorden.

De Informatie Technologie (IT) brengt de mogelijkheid om compleet nieuwe architecturen voor het gehele bedienings- en beveiligingssysteem te realiseren. Het verlangen om de bestaande systemen, die een grote historische investering hebben, te onderhouden maken de spoorwegbeveiligingssystemen complex en duur. De nieuwe technologie wordt veelal gekoppeld aan de bestaande systemen.

Onder auspiciën van de UIC worden door de Europese Spoorwegmaatschappijen en de Industrie het European Rail Traffic Management System (ERTMS) en EURO-INTERLOCKING (EIL) ontwikkeld.

De privatisering en specialisatie van de traditionele Spoorwegmaatschappijen brengt het gevaar met zich mee dat er op het hoogste niveau een vacuüm kan ontstaan. Temeer een reden om de technische know how in Europa te delen.

Misschien is het juist nu belangrijk om een goede beveiligingsfilosofie te hebben. Dit wil niet zeggen dat er strakke regels moeten zijn die "beperkingen" veroorzaken voor de infrastructuur, maar dat er zonder concessies wordt voldaan aan de veiligheid en de nieuwe generatie systemen zo kunnen worden ontworpen en gerealiseerd dat er optimaal gebruik kan worden gemaakt van de infrastructuur.



16.2 Spoorwegveiligheid

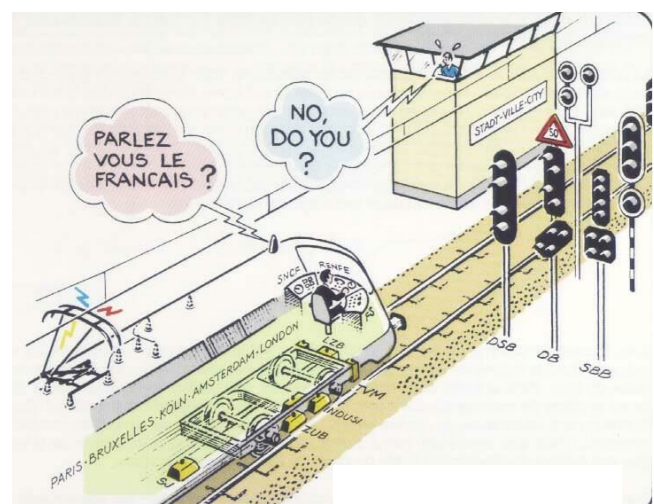
Hieronder wordt verstaan:

Het geheel van regelingen, handelingen, maatregelen, methoden en systemen, die tot doel hebben de "verliezen" in het proces vervoer per trein te voorkomen en te bestrijden, respectievelijk schadegevolgen zoveel mogelijk te beperken.

Onder "verliezen" wordt verstaan letsel of schade aan eigen personeel, vervoerde reizigers of goederen, aan spoorwegomgeving en vervoersproces.

De regelingen, handelingen, maatregelen, methoden en systemen hebben betrekking op:

- de kwaliteit van alle delen van de infrastructuur en van het rollend materieel;
- de bekwaamheden van ontwerpend, regelend, onderhoudend, bedienend en leidinggevend personeel, rekening houdend met voorspelbare verstoringen van het systeem door externe invloeden.



Figuur 140 Interoperability

Het begrip veiligheid laat zich praktisch alleen vertalen in de mate waarin de beoogde veiligheid niet wordt bereikt, hetzij langs rekenkundige weg, hetzij empirisch vast te stellen.

Hierbij is niet uitsluitend maatgevend in hoeverre (toevallig) een afwijking van de veiligheid heeft geleid tot slachtoffers en/of materiële schade.

Een groot treinongeluk, zoals in 1962 te Harmelen waar 93 doden en 151 gewonden waren te betreuren, zegt in negatieve zin zeker iets over onze veiligheid.

Het is echter niet juist om op grond van deze harde cijfers onze spoorwegveiligheid in het jaar 1962 als onvoldoende te beschouwen.

Naar aanleiding van dit ongeval is na overleg met de minister van Verkeer en Waterstaat besloten om de Automatische Treinbeïnvloeding (ATB) versneld in te voeren.

Volgens "Van Dale" betekent het begrip veiligheid: het afwezig zijn van gevaar.

Helaas zijn gevaren bij het treinproces nooit helemaal te voorkomen.

16.2.1 Spoorwegbeveiliging

In seintechnische zin wordt de spoorwegveiligheid verklaard in maatregelen ter voorkoming van ongevallen bij het laten rijden van treinen.

Seintechnisch betekent dit het voorkomen van:

- Botsingen tussen treinen onderling
- Frontaal, achteroprijding en flankbotsingen
- Botsingen tussen trein en wegverkeer
- Overwegen
- Botsingen tussen trein en vast object
- Doodlopend spoor
- Ontsporing door onderbreking in het doorgaande spoor
- Niet aansluitende wisseltong, niet gesloten brug of spoorstaafbreuk
- Ontsporing door overschrijding van de door de infrastructuur toegelaten maximumsnelheid
- Snelheidsbeperking in (wissel-) bogen
- Aanrijding van personeel en werktuigen bij werkzaamheden in of nabij het spoor in uitzichtbeperkende omstandigheden
- In tunnels, nabij bruggen, viaducten en bogen.



Figuur 141 Harmelen, 8 januari 1962

In een aangepaste vorm geldt dit ook voor het wegverkeer.

Het bijzondere bij de beveiliging van het spoorwegverkeer is dat de treinbestuurder, in tegenstelling tot de autobestuurder, helemaal niet kan sturen.

Een treinbestuurder kan rijden en remmen, waarbij de lange remweg het hem, bij hoge snelheden, onmogelijk maakt om op zicht te rijden.

De veilige berijdbaarheid van wissels, bruggen en overwegen kan de treinbestuurder, zeker bij hoge snelheden, niet beoordelen.

De treinbestuurder is volledig aangewezen op informatie van de "vaste wal".

De veiligheid werd en wordt nog steeds bereikt door het enerzijds geven van de juiste seinen en anderzijds het correct opvolgen van deze seinen.

Het zal duidelijk zijn dat deze veiligheid slechts gewaarborgd kan worden als de daartoe gemaakte afspraken, de reglementen dus, volledig worden nageleefd.

Het zal ook duidelijk zijn dat als het naleven van de afspraken uitsluitend aan de mens wordt overgelaten, de kans op onveilige situaties zeer groot is.

16.3 Reglementering

16.3.1 Reglementen

Basis voor de veiligheid vormen de door de overheid gegeven richtlijnen in het **Reglement Dienst Hoofd- en Lokaalspoorwegen (RDHL)**.

De NS-reglementering is hier van afgeleid. De goedkeuring van de overheid is voor deze reglementen vereist.

- TRR Trein- en Rangeerdienstreglement
- SR Seinreglement
- BR Blokreglement

TRR en BR bevatten de spelregels voor het laten rijden van treinen.

Het SR bevat de verklaring van de aan de treinbestuurder te tonen seinbeelden in de vorm van toestemmingen en opdrachten.

Naast het RDHL staan in het RRV (Reglement RailVerkeer) en de Spoorwegwet de belangrijkste voorschriften en richtlijnen voor het Railtransport.

16.3.2 Het seinstelsel

Bij alle beveiligingssystemen worden seinen, bakens en/of borden toegepast om op afstand mededelingen aan machinisten over te brengen. De betekenis van de getoonde seinbeelden staat nauwkeurig vermeld in het Seinreglement.

Het NS- licht seinstelsel (NS '54) is een snelheidsstelsel, waarbij het getoonde seinbeeld een toestemming geeft tot het rijden met een bepaalde snelheid, of een opdracht geeft de snelheid te verlagen tot een bepaalde snelheid, of tot stilstand.

De opdracht wordt op een zodanige afstand voor het sein - waar aan de opdracht moet zijn voldaan - gegeven, dat de slechtst beremde trein nog aan de opdracht kan voldoen.

16.4 Technische voorschriften

Om het directe risico van het menselijk falen zo veel als mogelijk uit te sluiten wordt er een Beveiligingstechniek toegepast.

De techniek deed haar intrede om, daar waar mogelijk, de taak van de mens over te nemen of te vereenvoudigen.

De verantwoordelijkheid van de treindienstleider en treinbestuurder wordt grotendeels overgenomen door de techniek. Dit houdt in dat de verantwoordelijkheid bij de ontwerper van die techniek komt te liggen.

Hierbij moet iedereen zich bewust zijn dat deze ontwerper een mens is en anderzijds ook dat de basis van een veilig systeem een ontwerp zonder fouten is.

Daarbij komt dat de hardware (componenten, apparatuur, installaties enz) die de ontwerper toepast, niet mag falen.

Aangezien dit van de hardware te veel gevraagd is, worden bepaalde ontwerpprincipes geïntroduceerd. Correcte toepassing van die ontwerpprincipes moet er voor zorgen dat als de techniek toch faalt dit niet tot een onveilige situatie leidt.

De ontwerper dient het systeem zodanig te ontwerpen dat falen van de componenten niet tot onveilige situaties kan leiden.

Dit wordt het zogenaamde "**Fail Safe**"-principe genoemd. Dit principe drukt een zeer zwaar stempel op de toe te passen techniek.

Een nieuwe techniek kan slechts worden toegelaten indien de "Fail Safe"-heid is aangetoond. Daar komt nog de eis bij, dat deze nieuwe techniek duidelijk voordelen moet bieden ten opzichte van de bestaande techniek.

De ontwerper moet zich dus enerzijds houden aan de door de overheid gegeven richtlijnen met betrekking tot de spoorwegveiligheid en anderzijds aan de richtlijnen voor de technische invulling daarvan.

Wat de ontwerper zeker niet mag vergeten is het FPvE (Functioneel Programma van Eisen). De functionaliteit van de railinfrastructuur moet niet door het beveiligingssysteem zo beperkt worden dat niet meer wordt voldaan aan het FPvE. De richtlijnen voor de veiligheid en de technische installaties zijn gebundeld in de Algemene Voor- schriften (AV) en Ontwerp Voorschriften (OV). Het zal duidelijk zijn dat de in de techniek aanwezige veiligheid niet vanzelf verankerd blijft. Om onveilig falen te voorkomen is veiligheidsonderhoud nodig. Dit verplichte onderhoud aan de hand van stringente procedures is vastgelegd in de Onderhouds- en Inspectievoorschriften. De aanwezigheid van een beveiligingsinrichting ontheft de treindienstleider onder normale (=ongestoorde) omstandigheden van de verplichtingen die door het TRR en BR worden opgelegd. In plaats daarvan bedient hij de inrichtingen overeenkomstig de bij die inrichtingen behorende bedie- ningsvoorschriften (B en BVS). De treinbestuurder handelt op grond van het SR op de door de seinen gegeven opdrachten en toe- stemmingen.

In een gestoorde situatie kan de treindienstleider, buiten de techniek en de seingeving om, opdrach- ten (lastgevingen) aan de treinbestuurder verstrekken. De verantwoordelijkheid voor de uitvoering van de bepalingen in het TRR en het BR ligt op dat mo- ment geheel bij de treindienstleider en treinbestuurder. De hiervoor geldende regelingen zijn vastgelegd in de voorschriften door Railned en Verkeersleiding samengesteld.

16.5 Beveiliging

16.5.1 Beveiligingsprincipes

Het uitgangspunt van de beveiligingssystemen is dat men voldoet aan de "Spoorwegveiligheid" zoals eerder beschreven. Dit kan bereikt worden door seingeving langs de baan, goed zichtbaar voor de machinist, of door cabine signalering. Indien de machinist deze cabine signalering niet opvolgt en de seingeving langs de baan negeert dan kan de informatie die gebruikt wordt voor de cabine signalering ook dienen om de trein te laten stop- pen of op een andere manier te laten ingrijpen (ATB). Met deze beveiligingssystemen wordt het menselijk falen uitgesloten. Het beveiligingssysteem moet zoveel mogelijk **FAIL - SAFE** zijn.

Een spoorwegbeveiligingsinstallatie zou in absolute zin **fail-safe** zijn indien tenminste:

- Bij het tonen van welk toestemmend seinbeeld dan ook met ALLE voor de veiligheid relevante omstandigheden rekening gehouden zou zijn.
- ALLE toegepaste componenten, of intrinsiek fail-safe zouden zijn, dan wel door middel van in- trinsiek fail-safe componenten gecontroleerd zouden worden.

Een component wordt "intrinsiek fail-safe" genoemd, wanneer de constructie zodanig is, dat het op- treden van bepaalde gedefinieerde fouttoestanden c.q. defecten onmogelijk mag worden geacht.

Eerstgenoemde voorwaarde garandeert dat de installatie bij normaal functioneren **nooit** toestemming zal kunnen geven tot het uitvoeren van enige onveilige treinbeweging, terwijl de tweede voorwaarde ervoor zorgt dat, in geval van storing **altijd** een restrictiever seinbeeld wordt getoond.

In deze absolute zin is verwezenlijking van het fail-safe principe onmogelijk.

Het Relaisbeveiligingssysteem van NS is in beginsel op het ruststroomprincipe gebaseerd en in hoge mate volgens het fail-safe beginsel opgebouwd.

Systemen en de gebruikte apparatuur moet daarvoor zo ontworpen zijn, gemaakt, geïnstalleerd en onderhouden met de hoogste aandacht voor veiligheid, zoals vereist door de regering of de spoor- wegmaatschappij.

Veel gebruikers- en managementsystemen zijn gekoppeld aan de beveiligingssystemen, zij maken gebruik van de informatie van het treinproces waarover de beveiligingssystemen beschikken. Zoals

bijvoorbeeld automatische rijweg instelling of treinnummer volgorde. Voorkomen moet worden dat deze gebruikerssystemen de beveiligingssystemen kunnen beïnvloeden. Iedere vorm van inmenging moet worden uitgesloten.

Er zullen altijd mensen nodig zijn om een volledig automatisch spoorwegbedrijf te runnen. Bij het ontwerp zal rekening gehouden moeten worden met menselijke fouten.

Wanneer het beveiligingssysteem gestoord is zullen in de meeste gevallen, zij het beperkt, de treinen nog rijden. Over de gevolgen van het uitvallen van de beveiligingssystemen dient in het ontwerp proces goed te worden nagedacht.

In Engeland, Spanje en Noorwegen heeft men in principe een richtingstelsel, de andere Europese landen hebben een snelheidsstelsel.

Al vele jaren vinden er discussies plaats over de voor- en nadelen van de beide stelsels.

	Richtingstelsel	Snelheidsstelsel
Voordelen	In het algemeen weinig verschillende seinbeelden Actie van de machinist is direct door zijn interpretatie	Actie van de machinist vastgelegd door het seinstelsel Seingeving afstemmen op soort treinen (Heavy/Light)
Nadelen	Weg bekendheid noodzakelijk Niet eenvoudig bij snelheidsbeperkingen	Veel seinbeelden, met als gevolg; een complex beveiligingssysteem en interpretatie fouten door de machinist

Tegenwoordig zijn de verschillen niet meer zo groot. Op knooppunten wordt bij het richtingstelsel een vorm van het snelheidsstelsel toegepast en bij het snelheidsstelsel worden richtingseinen of richtingaanwijzers toegepast.

Belangrijke elementen van een beveiligingssysteem zijn:

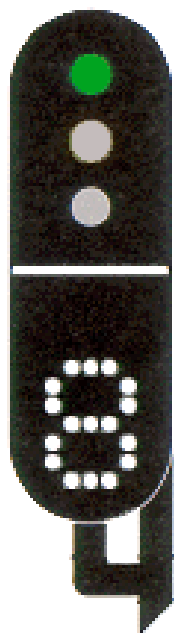
Seinbeelden

Er bestaat een groot aantal seinbeelden dat een lichtsein kan tonen. Een seinbeeld geeft toestemming aan de machinist om met een bepaalde snelheid te rijden of geeft hem de opdracht om de snelheid te begrenzen. Alle seinbeelden hebben dus betrekking op de snelheid van de trein (snelheidsstelsel).

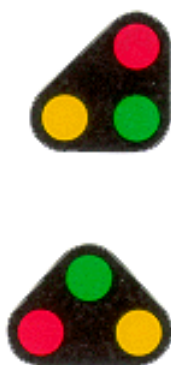
Onderstaande tabel geeft een aantal seinbeelden weer. Een compleet overzicht staat in het Seinreglement (SR)

Seinbeeld	Betekenis
Rood of gedoofd	Stop voor het sein
Geel knipper	Rijden op zicht (ROZ); snelheid < 40 km/uur
Geel	Afremmen naar 40 km/uur en rekenen op stop bij het volgende lichtsein
Geel met cijfer	Afremmen naar de door het cijfer aangegeven snelheid (cijfer max. 10)
Groen knipper of laag groen	Vorbijrijden met 40 km/uur toegestaan
Groen knipper met cijfer	Vorbijrijden met de door het cijfer aangegeven snelheid toegestaan
Hoog groen	Vorbijrijden met plaatselijke maximale snelheid toegestaan

Hoge en lage lichtseinen



Figuur 142 Hoog lichtsein met cijfer



Figuur 143 Tweemaal laag lichtsein, bovenste uitvoering voor plaatsing langs perronwand



Figuur 144 Hoog lichtsein met P

De benamingen hebben te maken met de vorm van de seinen. De lage lichtseinen (ook wel dwergseinen genoemd) komen alleen voor op emplacementen. Ze staan meestal op de grond naast de sporen.

Hoge lichtseinen zijn soms voorzien van een zogenaamde cijferbak. De cijferbak kan een wit verlicht cijfer tonen. Dit cijfer maakt deel uit van het seinbeeld.

Lichtseinen mogen in het algemeen niet voorbijgereden worden, indien deze gedoofd zijn. Bij een sein met een **P** mag dit wel. Een P-sein is een automatisch lichtsein dat **P**ermissie geeft het lichtsein (rijdend op zicht) te passeren indien het gedoofd is en indien contact met de treindienstleiding niet mogelijk is.

Treindetectie

Punt detectie

Pedalen
Lussen
Assentellers
Sensoren

Continu detectie

Gelijk-/Wisselstroomstroomlopen
Toonfrequent spoorstroomlopen
Prikspanningsspoorstroomlopen
GPS

Treindetectie is het bepalen van de aan- of afwezigheid van een trein op een afgebakend stuk spoor. Al vanaf het begin van de spoorwegbeveiliging vindt treindetectie voornamelijk plaats met behulp van spoorstroomlopen. In Nederland vindt op het hoofdnet treindetectie plaats met behulp van 75 Hz wisselstroomstroomlopen. Om treinen te detecteren met behulp van spoorstroomlopen wordt er gebruik gemaakt van geïsoleerde spoorsecties. Onder een geïsoleerde spoorsectie wordt verstaan een spoordeel dat elektrisch gescheiden is van de andere, aangrenzende spoordelen. Dit wordt gedaan met behulp van ES-lassen (elektrische scheidingslassen). De spoorstaven zijn op die plaatsen galvanisch onderbroken door een plaatje isolatiemateriaal. Om nu op een geïsoleerde spoorsectie een trein te kunnen detecteren, wordt aan de ene zijde van de spoorsectie een wisselspanning van 75 Hz op de spoorstaven aangesloten en aan de andere zijde een wisselstroomrelais. Dit wisselstroomrelais heet het Spoorrelais (Track-Relais). De spoorstaven zijn nu als spoorschakeling in het circuit van de geïsoleerde spoorschakeling opgenomen. Er loopt nu een wisselstroom door de spoorstaven en door het spoorrelais. Het spoorrelais is in deze situatie actief (aangetrokken). Wordt nu het geïsoleerde

spoor door een trein bereden, dan ontstaat er een kortsluiting in het circuit. De stroom zal nu via de assen van de trein worden afgeleid. Het spoorrelais ontvangt geen stroom meer en wordt passief (valt af). De lengte van een geïsoleerde spoorsectie is technisch begrensd. Een blok, spoorgedeelte tussen twee lichtseinen, kan daarom uit meerdere geïsoleerde secties bestaan. Een blok is bezet als één of meer geïsoleerde secties in het blok bezet zijn.

Wissels

Wissels zijn spoorconstructies die het mogelijk maken dat een trein zonder te stoppen van richting kan veranderen. De meeste wissels zijn centraal bediend. Een wisselsteller zorgt voor de omlegging van de wisseltongen. In deze wisselsteller zit het mechanisme dat controleert of de wisseltongen in de goede eindstand liggen. De afbuiging van een wissel wordt uitgedrukt in een hoekverhouding. Een wissel 1:9 wijkt één meter uit per negen meter doorgaand spoor. Bij een wissel 1:9 betekent dit een scherpe bocht en dus een grote snelheidsbeperking voor de trein.

Voorbeeld van veel voorkomende wissels:

Hoekverhouding wissel	Maximum snelheid
1 : 9	40 km/uur
1 : 12	60 km/uur
1 : 15	80 km/uur
1 : 15 (symmetrisch)	100 km/uur
1 : 20 (symmetrisch)	125 km/uur
1 : 34,7	140 km/uur

Controle van de seinen met ATB en overdracht aan de machinist

De treinapparatuur van de ATB controleert de snelheid van de trein. Om deze controle uit te kunnen voeren, moet de ATB-apparatuur op de hoogte zijn van de maximale toegestane snelheid die de trein op dat moment mag rijden.

De maximale toegestane snelheid kan de ATB-apparatuur afleiden van de lichtseinen die langs de baan staan. De baanapparatuur van de ATB verzendt deze informatie via de geïsoleerde sectie naar de treinapparatuur. De treinapparatuur vergelijkt vervolgens de maximale toegestane snelheid met de werkelijke snelheid van de trein.

Zolang de machinist de snelheid van de trein onder de maximaal toegestane snelheid houdt, onderneemt de ATB geen actie. Indien de machinist de maximaal toegestane snelheid overschrijdt krijgt de machinist een waarschuwing om af te remmen. Indien de machinist niet voldoende remt, grijpt de ATB in. Een koppeling met het remsysteem van de trein stelt de ATB in staat om in te grijpen en eventueel de trein tot stilstand te brengen.

Momenteel zijn er in Nederland twee systemen operationeel; ATB 1^{ste} generatie, toegepast op het hoofdnèt, en ATB nieuwe generatie toegepast op secundaire lijnen.

Code	Toegestane snelheid
Code 90	Max. 140 km/uur
Code 120	Max. 120 km/uur
Code 180	Max. 80 km/uur
Code 220	Max. 60 km/uur
Code 75	Uitschakelen ATB
Geen code	Max. 40 km/uur

Overzicht ATB codes 1^{ste} generatie

De nieuwe generatie ATB (ATB NG) is in 1996 voor het eerst toegepast in Nederland op het baanvak Winterswijk – Zevenaar. ATN NG is geen continu systeem, het voorziet de trein op vaste punten in het spoor van informatie. Op deze vaste punten liggen bakens (zenders), die een ATB-bericht doorgeven aan de passerende trein. Dit bericht bevat een snelheidsprofiel afhankelijk van de actuele stand van de railinfrastructuur, zoals seinbeelden, wisselstanden, baanvaksnelheid enz. De treinapparatuur zet het ontvangen statische snelheidsprofiel om in een dynamisch profiel.



Figuur 145 Cabine display en DH trein

Stelsamenstelling en configuratie

Het beveiligingssysteem zal zo ontworpen moeten worden dat het voldoet aan de vraag van de gebruiker. Meestal is dit weergegeven in een Programma Van Eisen (PVE). Daarnaast zal voldaan moeten worden aan alle reglementen en voorschriften van de spoorwegmaatschappij en de overheid. Een nieuw beveiligingssysteem zal altijd “beter” moeten zijn in vergelijking met het bestaande systeem.

De elementen van het beveiligingssysteem zullen moeten worden gekoppeld en de afhankelijkheden onderling en met andere factoren zal moeten worden bepaald.

Neem bijvoorbeeld de remkarakteristiek;

Dit kan worden vertaald in “de afstand nodig om te stoppen door een trein met maximumsnelheid”.

Factoren waarmee rekening dient te worden gehouden zijn:

- de gradiënt
- de remkracht / remkarakteristiek, inclusief wrijving wiel/rail
- het gewicht van de trein
- de treinlengte
- is de luchtdruk aanwezig

Men dient ook rekening te houden met enkele andere elementen zoals de seinen en andere “gevaarlijke objecten” waar de voorschriften dwingende eisen stellen aan het ontwerp.

Is er een “overlap” vereist of niet? In Nederland (NS) alleen bij bruggen of andere gevaarpunten, in Europa eisen de meeste spoorwegmaatschappijen bij snelheden groter dan 40 km/h een “overlap” (50m tot 400m).

“Overlap” is de ruimte achter het stoptonend sein dat vrij/onbezet moet zijn en waar de elementen/objecten zodanig vastgelegd zijn dat de trein die door het stoptonend sein schiet geen hinder ondervindt.

De zichtbaarheid van de seinen is onder meer samen met de remkarakteristiek en de reactietijd van apparatuur en machinist bepalend voor de plaats van de seinen.

De “zichtbaarheid” van een sein wordt uitgedrukt in tijd en in afstand.

In Nederland (NS) wordt minimaal 9 seconden vereist, uitgaande van de maximum toegestane (baanvak) snelheid en helder zicht. In België eist men een afstand van 150m bij een snelheid van kleiner of gelijk aan 60 km/h en 300m bij een snelheid van groter dan 60 km/h. Zo heeft ieder land, met zijn spoorwegmaatschappij, zijn eigen regels.

Daar waar gemengd spoorverkeer plaats vindt zal rekening moeten worden gehouden met de remkarakteristieken van alle railvoertuigen en hun betreffende factoren en regels (zoals bijvoorbeeld hierboven is beschreven).

Door de beperkingen die het beveiligingssysteem oplegt kan meestal in dit soort situaties niet meer voldaan worden aan de functionele specificaties. Een oplossing kan dan zijn om extra seinen in te voeren voor specifieke treinen/ railvoertuigen.

Bijvoorbeeld de XG-seinen in tunnels voor zware goederen treinen.

De te verwachten komst van Light Rail op de Heavy Rail baanvakken zal een technische en veilige aanpassing van het toch al complexe ontwerp eisen.

De laatste tijd worden de begrippen FRS en RAMS veel gebruikt.

FRS = Functional Requirement Specification

RAMS = Reliability, Availability, Maintainability and Safety

Bij de mechanische en relaisbeveiligingen kan een ontwerper voor de detail engineering (configuratie van componenten en bedrading) gebruik maken van zeer gedetailleerde ontwerpvoorschriften. Bij de nieuwe elektronische systemen is dit niet het geval.

De Europese standaard voor spoorweg specificaties staat beschreven in de CENELEC normen, met name prEN 50126 t/m prEN 50129.

De fail-safe principes blijven van toepassing onafhankelijk wat voor systeemtechnologie men toepast.

Bij het testen en valideren van de huidige systemen wordt gebruik gemaakt van de OV's en AV's.

Voor de Mechanische, Elektromechanische en de Relaisystemen is hiervoor in de loop der jaren veel ervaring opgedaan en zijn de methoden vastgelegd in procedures.

Bij de Elektronische systemen zijn de beproefde methodes praktisch niet uitvoerbaar.

Voor het testen en valideren kan gebruik gemaakt worden van de Cenelec

normen : "The specification and demonstration of dependability, reliability, availability, maintainability and safety" (prEN 50126).

16.5.2 Beveiligingsinstallaties

In 1863 werd onder andere bepaald dat stations en andere gevaarpunten beveiligd moesten worden met afstandsseinen.

In 1875 werd er aan toegevoegd dat de afstandsseinen van stations alleen op veilig mochten worden gezet met toestemming van de stationschef en dat de vrije baan tussen stations wordt verdeeld in een of meer gedeelten waarin zich maar een trein tegelijk mag bevinden.

Deze baangedeelten noemde men **blokken**.

Mechanische en Elektromechanische installaties

De baanvakbeveiligingen en de stationsbeveiligingen bestonden in die tijd uit mechanische en elektromechanische installaties.

Dit klassiek mechanisch beveiligingssysteem maakt gebruik van armseinen en van deels elektrische, deels mechanische uitsluitingen (liniaalkast).

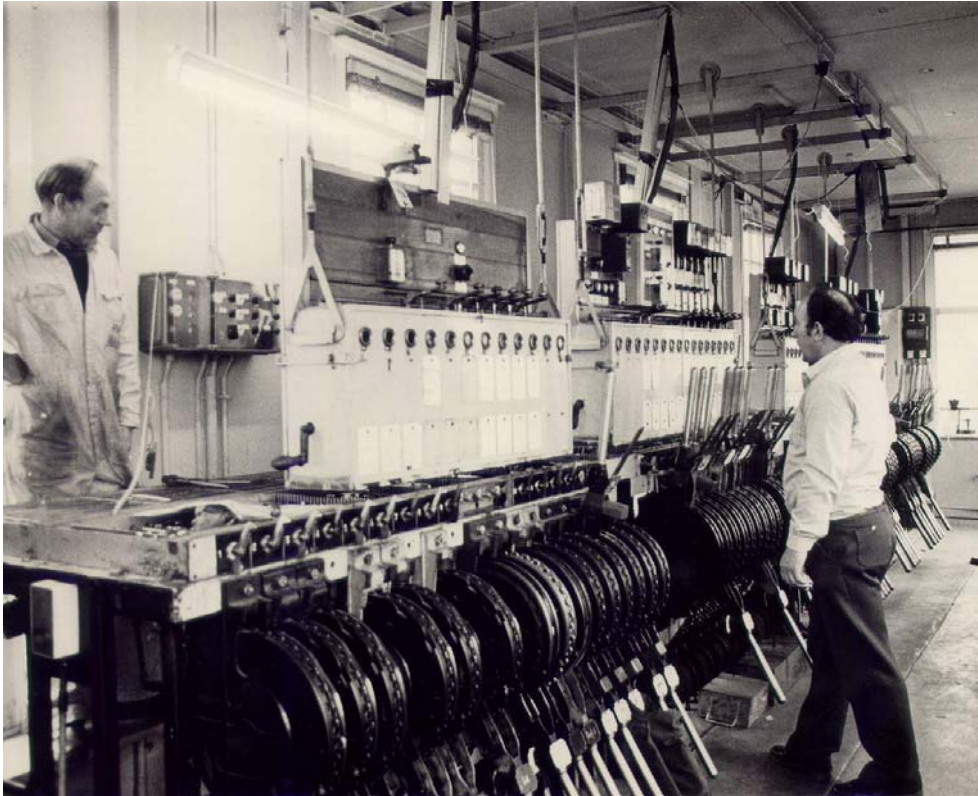
Bij elektrische bediening werden de "handels" vervangen door stelknoppen, die onderling mechanisch gekoppeld waren.

De toestellen werden hierdoor zeer groot. De bediening werd onoverzichtelijk.

Sinds 1935 paste NS de Bouwmantoeestellen toe. De liniaalkast werd onder het bedieningstoestel geplaatst, waardoor een compacte uitvoering ontstond

Relais installaties

Kort voor de tweede wereldoorlog was het relais zo betrouwbaar geworden dat het mogelijk werd de mechanische koppelingen tussen de stelknoppen door elektrische koppelingen te vervangen.



Figuur 146 Heerlen, 15 maart 1983

Voor het eerst werd in 1937 de NX-relais beveiliging in de US toegepast.

Uitgangspunt, bij het relais systeem is de gedachte dat bij een rusttoestand geoorloofde veilige seingeving een stroomloop nodig is, die afhankelijk is van de continue controle door andere stroomlopen van het vervuld zijn van alle noodzakelijke voorwaarden.

Dit uitgangspunt wordt het **“rust-stroom-principe”** genoemd.

Het voordeel is, dat voor de seingeving van onveiligheid de enkele afwezigheid van de stroomloop voldoende is, en dat alle mankementen en storingen inderdaad tot onveilige seingeving leiden.

Het nadeel is dat storingen, ook als ze onbelangrijk zijn, leiden tot stagnatie door seingeving van gevaar dat er niet is.

In de spoorweg-layout onderscheiden we emplacementen en vrije baan.

Op emplacementen worden de verkeersstromen gestuurd door middel van het instellen van rijwegen. De wissel- en seinbediening geschiedt vanuit een centraal beheers-/bedienpunt.

De relaisbeveiligingen die in de vijftiger en zestiger jaren op emplacementen worden toegepast zijn:

- AR All Relay;
- NX eNtrance eXit.

Van emplacementensbeveiliging is sprake zodra bedienbare wissels deel uit maken van de te beveiligen infrastructuur. Aan een emplacementensbeveiliging is altijd bediening en daarmee beheersing van het treinproces gekoppeld.

Vrije baan

De vrije-baan vormt het spoor tussen bediende emplacementen. Op de vrije baan komen geen centraal bediende wissels voor.

Meestal bestaat de vrije baan uit 2 parallelle sporen, voor elke rijrichting één spoor. In de toekomst zal de vrije baan steeds vaker uit meer dan 2 sporen bestaan. Door 4 in plaats van 2 parallelle sporen toe te passen kan de treinfrequentie meer dan verdubbeld worden. Scheiding van stop- en niet stop-treinen en (langzame) goederentreinen is dan mogelijk.

Niet alleen op een emplacement, maar ook langs de vrije baan zijn er stopplaatsen voor het in en uitstappen van reizigers. Dit zijn geen stations maar haltes.

Op de vrije-baan zijn geen "variabele" rijwegen mogelijk, hoogstens verkeer in twee richtingen.

Seinbediening is hier niet nodig.

De indeling van de vrije-baan in **Blokken** leidt tot capaciteitsvergroting van het baanvak.

Elektronische installaties

De architectuur van het systeem is mede bepalend voor de veiligheid.

Bij de elektronische beveiligingsinstallaties komen we hardware matig een-kanaal en twee-kanaal systemen tegen.

Bij twee-kanaal systemen kan gebruik worden gemaakt van dezelfde of verschillende hardware.

Bij het gebruik van software kan bij twee-kanaal systemen gekozen worden voor verschillende software.

De systemen zijn te verdelen naar architectuur en software of naar "land van herkomst".

De een-kanalige hardware structuur wordt door vele spoorwegmaatschappijen toegepast. Door hun eenvoud (in vergelijking met twee/drie-kanaal systemen) is de betrouwbaarheid groot.

Hoe groot is de kans dat er een hardware fout optreedt die niet op tijd door de zelftest wordt ontdekt? Tot op heden geeft de Deutsche Bundesbahn geen systeem vrijgave af voor toepassing van een-kanaal hardware systemen.

De traditionele hardware scheiding in 2 kanalen met daarna een vergelijker heeft in Duitsland de voorkeur en heeft aangetoond voldoende veilig te zijn.

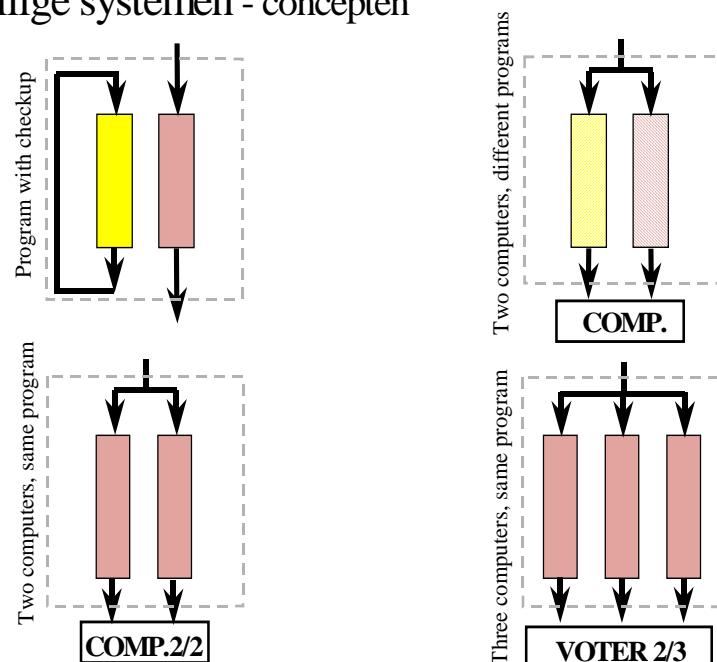
Het meest complex is de software; het wordt daarom steeds belangrijker om het risico van software fouten te elimineren. Veel railverkeer, complexe knooppunten / emplacementen, zeer grote emplacementen en beheersgebieden, dit vraagt een centrale informatie verwerking en een snelle verwerkingsmogelijkheid. Er is behoefte aan het opslaan van data en de mogelijkheid voor fail-safe individuele bediening. De installatie dient onderhoudsvriendelijk te zijn, een goede stringssignalering en telefonische diagnose is een vereiste.

Het meest complex is

de software; het wordt daarom steeds belangrijker om het risico van software fouten te elimineren.

Veel railverkeer, complexe knooppunten / emplacementen, zeer grote emplacementen en beheersgebieden, dit vraagt een centrale informatie verwerking en een snelle verwerkingsmogelijkheid. Er is behoefte aan het opslaan van data en de mogelijkheid voor fail-safe individuele bediening. De installatie dient onderhoudsvriendelijk te zijn, een goede stringssignalering en telefonische diagnose is een vereiste.

Veilige systemen - concepten



Figuur 147 Architectuur elektronische systemen

Beheersingssystemen

Met de intrede van de eerste remote control systemen kwam de mogelijkheid om de bediening van de emplacementen te centraliseren.

Gezien de hoge treinfrequentie en de verschillende soorten treinen (Internationaal, Intercity, Regio trein, Stoptrein, LightRail, Goederentrein enz.) ontstond de behoefte aan een goed Beheersingssysteem.

Het systeem VPT (Vervoer Per Trein) wordt in Nederland ingevoerd.

Meer en meer maken de bedienings- en beheersingssystemen deel uit van de beveiligingsinstallaties. Bij bijvoorbeeld het beveiligingssysteem van Siemens (EBS) is de bediening fail safe en een geheel met de interlocking.

In 1996 werd de directive 96/48 geaccepteerd door de Europese wet. Hierin zijn de technische standaarden die nodig zijn om zonder problemen de grenzen te overschrijden beschreven.

Deze Standards voor Technical Interoperability (STI's) zijn samengesteld door de industrie en de spoorwegmaatschappijen.

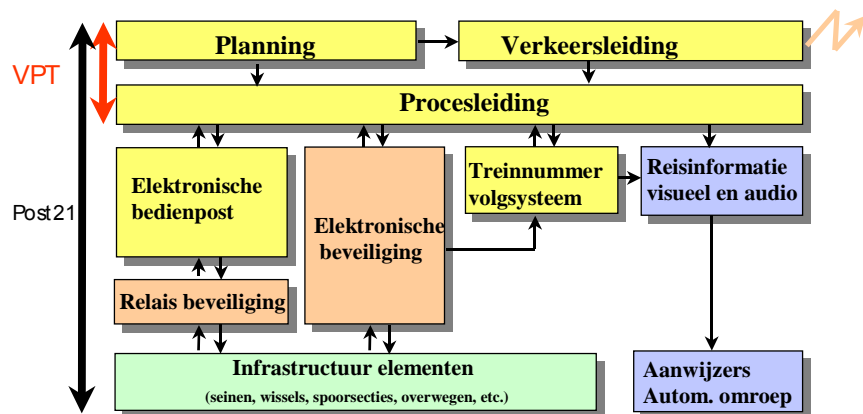
In 1996 werd in Brussel door de drie belangrijkste spoorwegmaatschappijen (SNCF, DB en FS) een European Economic Interest Group (EEIG) opgericht.

Uit deze groep komt het idee van een European Rail Traffic Management System (ERTMS). Het European Train Control System (ETCS) is hiervan de kern, ook wel het "Core system" genoemd.

In 1997 sluiten de Spoorwegmaatschappijen RENFE, Railtrack en NS zich aan bij deze EEIG-groep en wordt vanaf deze tijd algemeen de ERTMS gebruikersgroep genoemd.

Dit ERTMS systeem is nu het aanbevolen "Train Control System".

technische architectuur



Figuur 148 Technische architectuur

16.6 Euro-interlocking

Op 1 januari 1999 maakte 18 Spoorwegmaatschappijen (waaronder ook Nederland), onder auspiciën van de UIC het EURO-INTERLOCKING project bekend, met als doel de Life cycle costs van toekomstige Interlockings in Europa te beperken.

In nauwe samenwerking met de Industrie en de nationale overheden worden standaards voor Interlockings ontwikkeld.

16.6.1 Voordelen

- Significante reductie van de life cycle kosten van de Interlockings in Europa.
- Verbetering van de betrouwbaarheid en / of beschikbaarheid van toekomstige Interlockings.
- Hogere treinfrequentie en een efficiënter Railverkeer management in samenhang met ERTMS.
- Geheel volgens de Europese normen EN 50126 t/m EN 502129.

16.6.2 Realisering van de doelen

De voordelen beschrijven wat de spoorwegmaatschappijen met dit project willen bereiken.

De volgende project doelen beschrijven hoe de voordelen gerealiseerd worden.

- Standaard Spoorweg eisen voor de huidige en toekomstige behoeften van alle deelnemende Spoorwegmaatschappijen en gebruikers.
- Standaardisatie van Interfaces zoals ERTMS / ETCS en Radio Block Centres.
- Het verbeteren van de betrouwbaarheid en bedrijfszekerheid door innovatieve oplossingen van de Industrie te promoten en eisen te formuleren.
- Cross acceptance van Systemen voor Europa.
- Efficiëntere planning, installatie en in gebruikname van individuele Interlockings.
- Realisering van Pilot projecten waar EURO-INTERLOCKING standards worden toegepast.

16.6.3 Project tijdplan

In de herfst van 1999 werd het project plan definitief vastgesteld. Het bestaat uit 5 projectfasen.

- Fase 1 en 2 1999 – 2001
De spoorwegmaatschappijen schrijven de requirements.
- Fase 3 en 4 2001 – 2003
De leveranciers maken de specificaties en samen met de Spoorwegmaatschappijen vindt implementatie plaats in Pilot projecten.
- Fase 5 2003 – 2005
De consolidatie fase. De standards worden gereviewd en de ervaring van de Pilot projecten wordt verwerkt.

16.7 European Rail Traffic Management System

ERTMS is meer dan alleen een beheersingssysteem. ERTMS vormt de basis voor de communicatie en de safety systems voor de nieuwe generatie van Spoorwegbeveiligingen.

ERTMS biedt de mogelijkheid voor "Moving Block"; waarbij de afstanden tussen de treinen zeer klein worden en afhankelijk zijn van de basis eigenschappen van het materieel, de actuele situatie (o.a. snelheid) en locatie van de treinen.

16.7.1 Voordelen

ERTMS de nieuwe dimensie van veiligheid en efficiency zorgt voor:

- Grotere capaciteit op de bestaande Infrastructuur
- Lagere kosten bij het aanleggen van beveiligingssystemen voor nieuwe lijnen.
- Mogelijkheden voor grens overschrijdende Shuttles voor dure stukgoederen.
- Snellere deur tot deur services met een lagere topsnelheid en energieverbruik; eventueel het tijdelijk openen van Haltes of stopplaatsen.
- Verhoging van de veiligheid zowel voor passagiers als voor mensen buiten de trein.

16.7.2 Geschiedenis

Na een zeer lang voortraject waren in 1997 de System Requirements Specifications versie 4a gereed.

Het meeste werk was gedaan door de Spoorwegmaatschappijen de ERTMS-gebruikersgroep.

Het was nu tijd om te starten met proefprojecten. Uitvragen aan de industrie werden gedaan.

In 1998 noemden de leveranciers die de contracten hadden gewonnen zich de Winners-groep.

De leveranciers kregen problemen met de specificaties, inmiddels versie 5a (mei 1998). Vooral met de implementatie van ETCS (European Train Control System).

De Winners-groep bestaande uit Alcatel, Alstom, Ansaldo en Siemens besloten om nieuwe System Requirement Specifications te maken. Natuurlijk waren deze SRS'n gebaseerd op de ERTMS-gebruikersgroep SRS versie 5a.

De naam Winners-groep was achterhaald. Inmiddels had Bombardier de opdracht voor de pilot Luzern – Olten en Invensys Rail trad ook toe. Op 01 september 1998 ontstond de nieuwe naam UNISIG (UNIFE Signalling Manufactures).

De ERTMS-gebruikersgroep realiseerde zich dat ze niet de hele ontwikkeling van de specificaties konden overlaten aan de leveranciers.

De vrees bestond dat het ETCS-systeem niet zou voldoen aan de operationele specificaties en wellicht te duur zou worden in aanschaf en onderhoud.

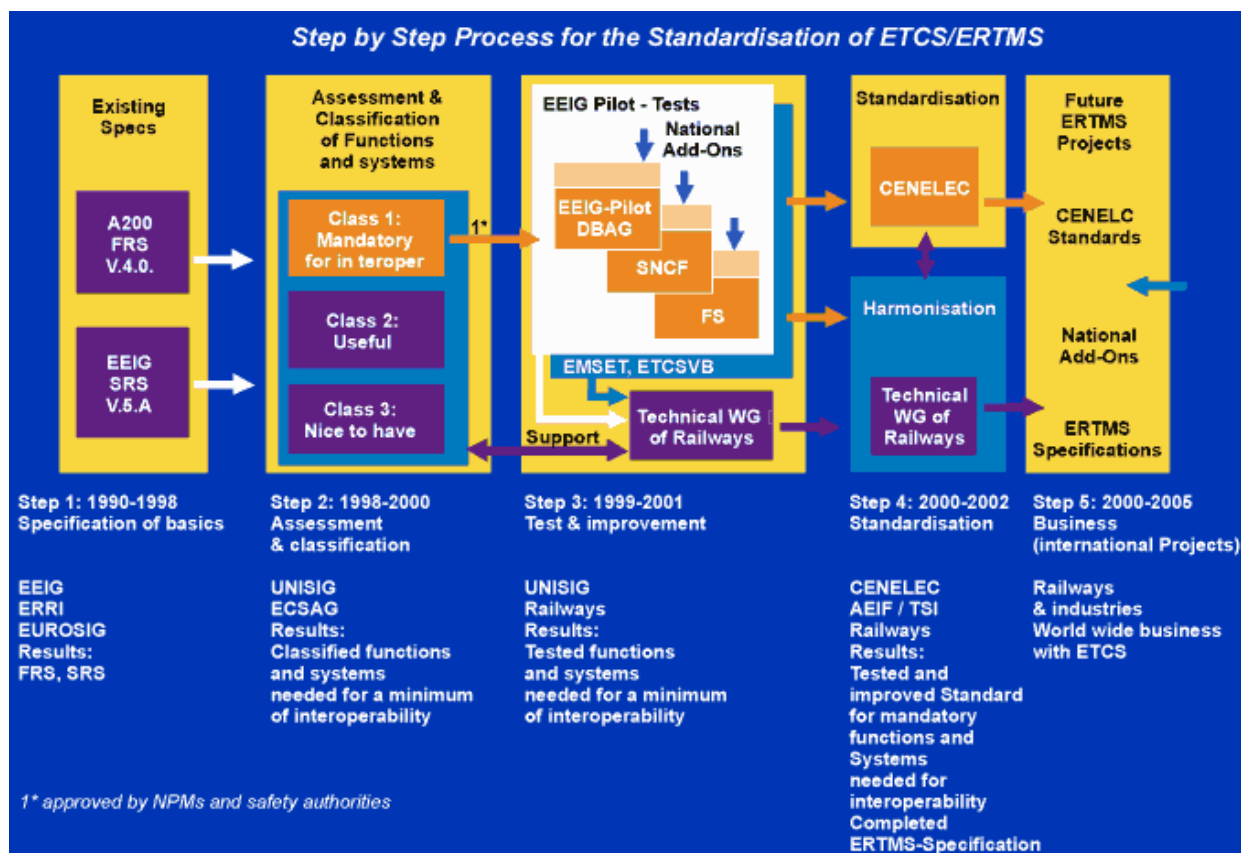
Om de balans in evenwicht te brengen werd de ECSAG opgericht (ERTMS Core Specification Acceptance Group).

ECSAG bestaat uit leden van de deelnemende Spoorwegmaatschappijen RFF/SNCF, DB, FS, REN-
FE, NS en Railtrack plus leden van de SBB, UIC en de ERTMS-gebruikersgroep.

De vorderingen van de werkgroepen verliepen zeer voorspoedig. Begin 1999 had UNISIG behoefte aan duidelijkheid met betrekking tot de specificaties voor Interoperability; welke specificaties waren essentieel en welke niet?

Uiteindelijk werd op 31 maart 2000 een accordo bereikt tussen alle partijen.

De SRS'n voor ERTMS / ETCS zijn nu een feit.



Figuur 149 ETCS/ERTMS

16.7.3 ERTMS Levels

In Hoofdstuk 2 van de SRS staan de "Basic System Description", hierin worden de ERTMS / ETCS application levels genoemd.

- *Level 0*
ERTMS / ETCS werkt niet.
- *Level STM*
Een Specific Transmition Module wordt toegepast voor treinen uitgerust met ERTMS / ETCS apparatuur die rijden op baanvakken die uitgerust zijn met nationale beveiligings-systemen en trein beïnvloedingssystemen.
- *Level 1*
Dit is de simpelste ERTMS / ETCS uitvoering. Het is een puntdetectie systeem met als basis een beveiligingssysteem. Rijweg autorisatie wordt vanaf de baanzijde (vaste wal) overgezonden via balises naar de trein. Het heeft een continue snelheid bewakingssys-teem met een beveiliging tegen overschrijding van de autorisatie. Treindetectie en beveili-gingssysteem (interlocking) behoren niet tot de scope van ERTMS / ETCS.
- *Level 2*
Nieuw hierbij is het gebruik van Radio transmissie. Als basis dient een beveiligingssys-teem. Rijweg autorisatie wordt vanaf de baanzijde (vaste wal) overgezonden naar de trein via Euroradio. Een Radio Block Centrum (RBC) zorgt voor de informatie naar de trein. Treindetectie en beveiligingssysteem behoren niet tot de scope van ERTMS / ETCS.
De lichtseinen langs de baan zijn optioneel.
- *Level 3*
Het hoogst gedefinieerde level 3 is volledig gebaseerd op Radio transmissie. Rijweg auto-risatie wordt gegenereerd vanaf de vaste wal (Centraal punt) en overgezonden naar de trein via Euroradio. Treindetectie en beveiligingssysteem zijn vervangen door het Radio Block Centrum (RBC) in nauwe samenwerking met de trein (locatie en trein integriteit). Level 3 is gebaseerd op Euroradio voor wal naar trein communicatie en op passieve Eu-robotalises voor locatie referentie (puntmeting).
Er staan geen lichtseinen langs de baan.

17 REFERENTIES

17.1 Literatuur

- [1] Esveld, C., Modern Railway track, Second Edition (boek), 2001
- [2] Bouma, A.L., Mechanica van constructies, Elastostatica van slanke structuren (boek), 1993
- [3] Hetényi, M. Beams on Elastic Foundations. Univ. of Michigan, 9e druk 1971

17.2 Websites

Ter informatie wordt hier nog een overzicht van een aantal interessante websites op het gebied van spoorwegen en railbouwkunde gegeven.

Road and Railway Engineering http://vbk.ct.tudelft.nl/	over weg- en spoorwegbouwkunde aan de TU Delft
International Union of Railways http://uic.asso.fr	met o.a. veel over high speed rail
European Rail Research Institute http://www.erri.nl/	met o.a. links naar spoorwegmaatschappijen
Railtechniek http://www.railway-technology.com	over railprojecten, -producten, -fabrikanten
Hogesnelheidslijn Zuid http://www.hslzuid.nl	projectorganisatie HSL Zuid
Betuweroute http://www.betuweroute.nl/	beschrijving van het project Betuwelijn
Holland Rail Consult http://www.hr.nl/index.htm	Nederlands ingenieursbureau
NBM-Amstelland Bouw & Infra http://www.nbm-amstelland.nl/	Nederlands railbouwbedrijf
Volker Stevin Rail & Traffic bv http://www.vsr.com	Nederlands railbouwbedrijf
Strukton Railinfra http://www.strukton.com/railinfra_main.html	Nederlands railbouwbedrijf
Light-rail http://www.lirta.org/explain.html	light-rail concept met veel afbeeldingen
Magnetische levitatie http://www.mvp.de	Transrapid (Duitsland)
Innovative Transportation Technologies http://faculty.washington.edu/~jbs/itrans/	hangbanen, people movers, monorail, etc.
The European Railway Server http://mercurio.iet.unipi.it/	veel over Europese railverbindingen
Rail 1435 http://www.treinen.demon.nl/	met o.a. links naar spoorweg & OV bedrijven

BIJLAGE A DIMENSIONERING BOVENBOUW

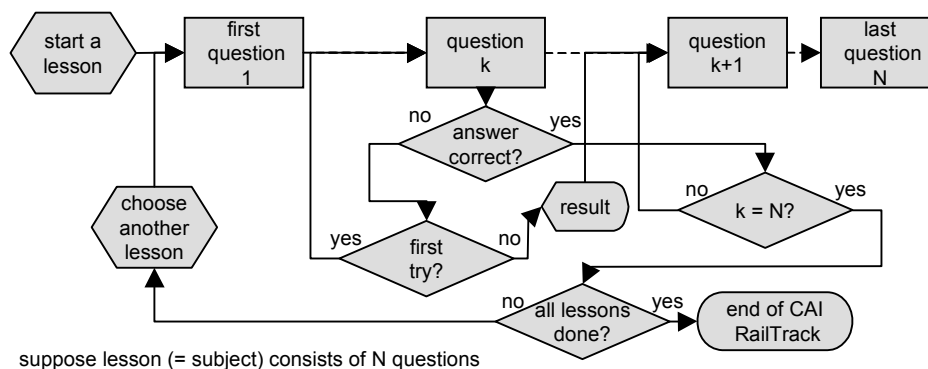
Met het oog op de computeroefening (CAI Railstruc) en de ontwerpbeurt (CAD dwarsprofiel spoor), die in het kader van dit college worden uitgevoerd moet ook een railbouwkundige berekening worden gemaakt. De berekening betreft alleen het quasi-statische verticale gedrag van de spoorwegbovenbouw en is gebaseerd op de theorie van de elastisch ondersteunde ligger. Omdat niet iedere student het vak CT3110, 'Elastostatica van slanke structuren' zal volgen is in Bijlage C, 'Theorie elastisch ondersteunde spoorstaven' in het kort de theorie behandeld voor zover deze van belang is voor de railbouwkunde. In Bijlage D is een overzicht gegeven van de voor de railbouwkunde van toepassing zijnde symbolen en formules, terwijl in Bijlage E een tabel met railgegevens, spanningscriteria en materiaaleigenschappen verzameld.

CAI RAILSTRUC

Opbouw van de lessen

Deze Engelstalige computer ondersteunde instructie CAI (= Computer Aided Instruction) bestaat uit 10 lessen (of onderwerpen) over railbouwkunde. Elke les bevat één of meer vragen en kost ongeveer 20 minuten per les. Als alle vragen van de les goed zijn beantwoord kan de volgende les worden gekozen. Wordt een vraag niet goed beantwoord, dan volgt een melding en volgt een herkansing. Wordt een vraag voor de tweede maal fout beantwoord, dan wordt het antwoord gegeven en de volgende vraag gesteld. Na de laatste vraag over het onderwerp kan de volgende les worden gekozen totdat het einde van de CAI is bereikt (zie onderstaand stroomschema).

Help-informatie over formules, tabellen, e.d. is via menu's en links te verkrijgen. Verder is een woordenlijst Engels - Nederlands opvraagbaar.



Titels van de lessen

Om een indruk te krijgen van de inhoud van de CAI wordt het volgende overzicht gegeven

- Script 1. Track: ballast versus ballastless track
- Script 2. Sleepers: concrete versus wood
- Script 3. Foundation coefficient from rail deflection
- Script 4. Foundation coefficient from rail bending stress
- Script 5. Vertical deflection of an elastically supported rail
- Script 6. Bending moment in an elastically supported rail
- Script 7. Baseplate support forces and stresses
- Script 8. Lateral comfort and forces in curves
- Script 9. Rail: contact stresses
- Script 10. Temperature effects

Voor verdere informatie wordt verwezen naar de instructies bij het programma.

BIJLAGE B VETERGANGBEWEGING

In deze bijlage wordt een wiskundige afleiding gegeven van de in hoofdstuk 2 geïntroduceerde en in figuur B1 geschetste vetergang (afgeleid door Klingel). De volgende parameters spelen hierbij een rol:

- γ = coniciteit (helling) van de wielband
- r = straal loopcirkel wiel in middenpositie
- R = kromtestraal van de baancurve $y(x)$
- s = spoorbreedte
- y = zijd. verpl. wielstel t.o.v. middenpositie
- x = coördinaat lengte-as spoor

In figuur B1 is het wielstel gemodelleerd tot een wielconus. Bij verwaarlozing van y t.o.v. de andere verplaatsingsgrootheden kan de volgende relatie tussen de momentane stralen van de loopcirkels worden afgeleid:

$$\frac{r + \gamma y}{r - \gamma y} = \frac{R + \frac{1}{2}s}{R - \frac{1}{2}s}$$

Zoals bekend mag voor de kromming van een flauw verlopende curve $y(x)$ bij benadering worden geschreven:

$$1/R = -\frac{d^2 y}{dx^2}$$

Uit deze beide geometrische betrekkingen volgt de gewone 2e orde differentiaalvergelijking:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2\gamma}{rs} y = 0$$

De baancurve van de vetergang is dus:

$$y = y_0 \sin 2\pi \frac{x}{L_K}$$

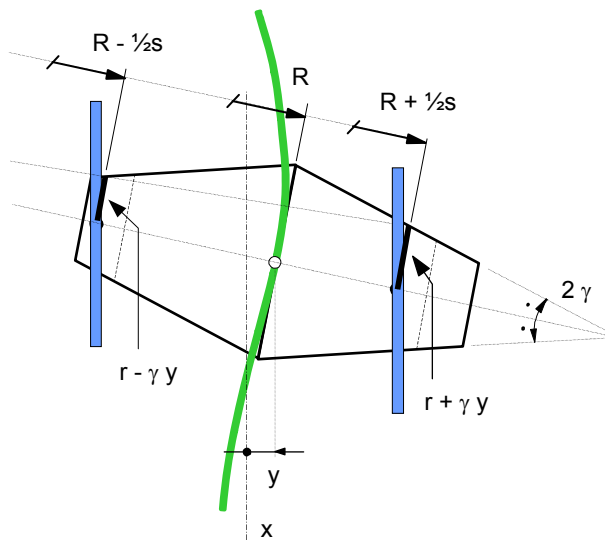
Hierin zijn y_0 en L_K respectievelijk de amplitude en de golflengte van de zijdelingse beweging. De golflengte is blijkbaar afhankelijk van r , s en γ volgens:

$$L_K = 2\pi \sqrt{\frac{rs}{2\gamma}}$$

De frequentie van de beweging bij gegeven snelheid volgt tenslotte uit:

$$f_K = \frac{v}{L_K}$$

Opmerking: Het verschijnsel vetergang is in werkelijkheid meer gecompliceerd, o.a. door de aanwezigheid van gekoppelde assen, massa- en wrijvingskrachten.



Figuur B1: Wielconus in algemene stand

BIJLAGE C THEORIE ELASTISCH ONDERSTEUNDE SPOORSTAVEN

Ondersteuningsmodellen

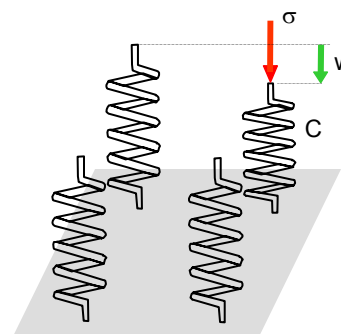
Winkler (veertjesmodel)

In 1867 werd door Winkler een hypothese geformuleerd voor de verticale elasticiteit van een ondersteuning, zoals grond; hij veronderstelde dat in ieder punt van de ondersteuning, onafhankelijk van de omgeving, de drukspanning evenredig is met de indrukking ter plaatse. Dit is geïllustreerd in figuur C1. In formulevorm luidt de relatie:

$$\sigma = Cw \tag{C1}$$

waarin:

- σ = lokale drukspanning op de ondersteuning
- w = lokale indrukking (zakking) van de ondersteuning
- C = beddingsconstante [N/m^3].



Figuur C1: 'Veertjes' model van Winkler

Discrete ondersteuning

Beschouw nu de situatie van een discreet ondersteunde spoorstaaf (figuur C2). Tussen de kracht F op elk steunpunt met een dragend oppervlakte A_{rs} per steunpunt en de zakking w van dit steunpunt bestaat, uitgaande van Winkler, de volgende relatie:

$$F = CA_{rs}w = k_d w \tag{C2}$$

waarin k_d de discrete veerconstante van het steunpunt is. Blijkbaar geldt:

$$k_d = CA_{rs} \quad [N/m] \tag{C3}$$

Voor een spoorconstructie met homogene ondersteuning is de bepaling van de veerconstante k_d in principe eenvoudig. Immers uit een evenwichtsbeschouwing volgt direct:

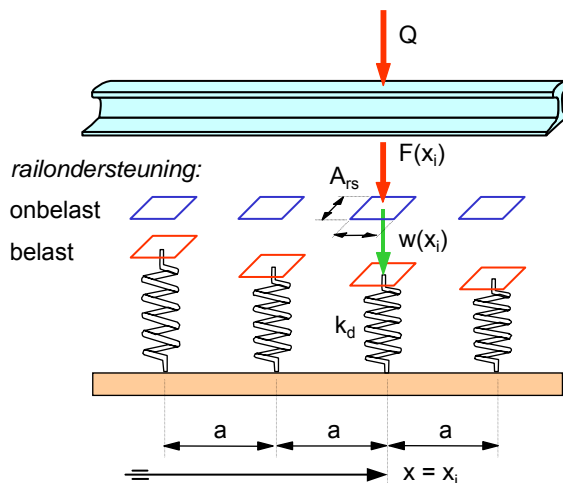
$$k_d = \frac{Q}{\sum w} \tag{C4}$$

waarin:

- Q = één verticale wiellast (met een bekende grootte) op de spoorstaaf [N]
- $\sum w$ = sommatie van alle (gemeten) significante zakkingen in de omgeving van de belasting [m]

Opmerking: Deze veerconstante van de ondersteuning moet niet worden verward met de totale veerconstante van de spoorconstructie, zoals 'gezien' door het wiel:

$$k_{tot} = \frac{Q}{w_{max}} \quad [N/m] \tag{C5}$$



Figuur C2: Model discrete ondersteuning

Continue ondersteuning

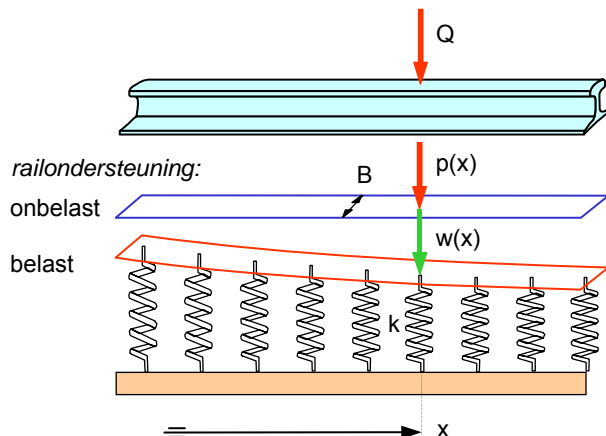
In dit geval wordt door de spoorstaaf op de ondersteuning een lijnbelasting $p(x)$ uitgeoefend, zie figuur B3, die volgens Winkler evenredig is met de nu continue doorbuiging $w(x)$ volgens de relatie:

$$p(x) = kw(x) \quad [\text{N/m}] \quad (\text{C6})$$

waarin:

k = beddingscoëfficiënt $[\text{N/m/m}]$

De beddingscoëfficiënt kan worden geïnterpreteerd als een veerconstante per lengte-eenheid.



Figuur C3: Model continu elastische ondersteuning

Benaderingsberekening discreet spoor

Een *discreet* ondersteunde spoorconstructie kan op basis van bekende parameterwaarden van spoorstaaf en ondersteuning (numeriek) worden doorge-rekend.

Gebleken is echter dat de continue theorie in de praktijk voor eenvoudige statische beschouwingen en voor eenvoudige gevallen een goede benadering is van een discreet ondersteunde spoorcon-structie.

Het probleem is dan relatief eenvoudig analytisch oplosbaar en de resultaten geven een goed inzicht in de rol van de afzonderlijke parameters van de spoorconstructie.

De equivalentie met het werkelijke discreet ondersteunde spoor komt dan tot uiting in:

$$k \approx \frac{k_d}{a} \quad [\text{N/m/m}] \quad (\text{C7})$$

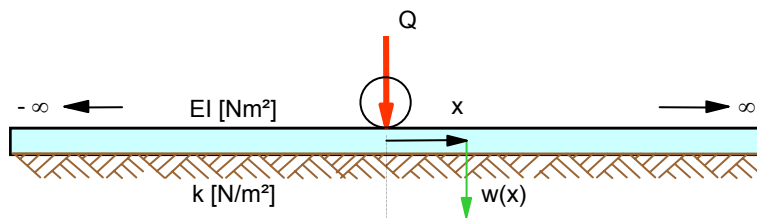
waarin:

a = onderlinge (constante) afstand hart op hart tussen discrete ondersteuning.

In de volgende paragraaf wordt de theorie uitgewerkt.

Voegloos spoor op continue elastische ondersteuning

Beschouw een oneindig lange spoorstaaf (voegloos spoor) met buigstijfheid EI die is opgelegd op een continue ondersteuning met beddingcoëfficiënt k en belast door een wiellast Q op $x = 0$. (zie figuur C4). Deze ligger berekening werd voor het eerst voorgesteld door Zimmermann (1888).



Figuur C4: Model continu elastisch ondersteunde ligger

Gevraagd wordt het verloop van de doorbuiging $w(x)$ van de spoorstaaf.

Omdat slechts één variabele (x) een rol speelt, worden differentialen met 'd' aangeduid (geen '∂')

De evenwichtsvoorwaarden van een liggerelementje zijn, blijktens figuur C5:

$$qdx + \frac{dD}{dx} dx = kw dx \quad (C8)$$

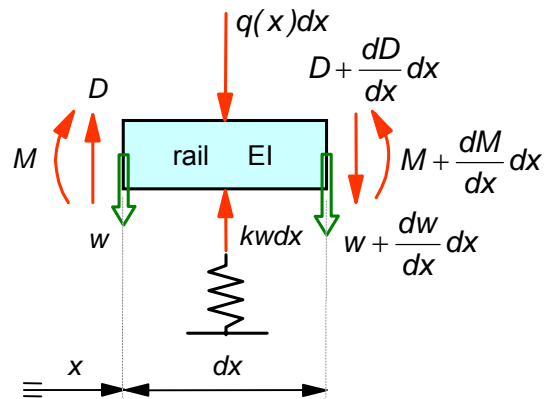
$$Ddx = \frac{dM}{dx} dx \quad (C9)$$

De constitutieve vergelijking is:

$$M = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (C10)$$

Uit deze vergelijkingen kan de differentiaalvergelijking voor het probleem worden afgeleid:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw = q(x, t) \quad (C11)$$



Figuur C5: Evenwichtssituatie liggerelementje

De verdeelde uitwendige belasting $q(x)$ zal hier niet worden beschouwd ($q \equiv 0$). De discrete kracht Q wordt later als randvoorwaarde in rekening gebracht.

Na introductie van de verkorte aanduiding voor afgeleide grootheden volgt:

$$EIw^{IV} + kw = 0 \quad (C12)$$

De randvoorwaarden voor dit probleem luiden:

$$w(\infty) = 0; \quad w'(0) = 0; \quad w'''(0) = \frac{Q}{2EI} \quad (C13)$$

Na substitutie van een exponentiele functie voor de doorbuiging wordt, na enige uitwerking, als oplossing voor de doorbuiging van de spoorstaaf gevonden:

$$w(x) = \frac{QL^3}{8EI} \eta(x) = \frac{Q}{2kL} \eta(x) \quad x \geq 0 \text{ [m]} \quad (C14)$$

De drukspanning op de ondersteuning is dan:

$$p(x) = kw(x) = \frac{Q}{2L} \eta(x) \quad x \geq 0 \text{ [N/m]} \quad (C15)$$

Het buigend moment in de spoorstaaf volgt uit de constitutieve vergelijking:

$$M(x) = \frac{QL}{4} \mu(x) \quad x \geq 0 \text{ [Nm]} \quad (C16)$$

In deze formules is L de zogenaamde karakteristieke lengte van het spoor:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} \text{ [m]} \quad (C17)$$

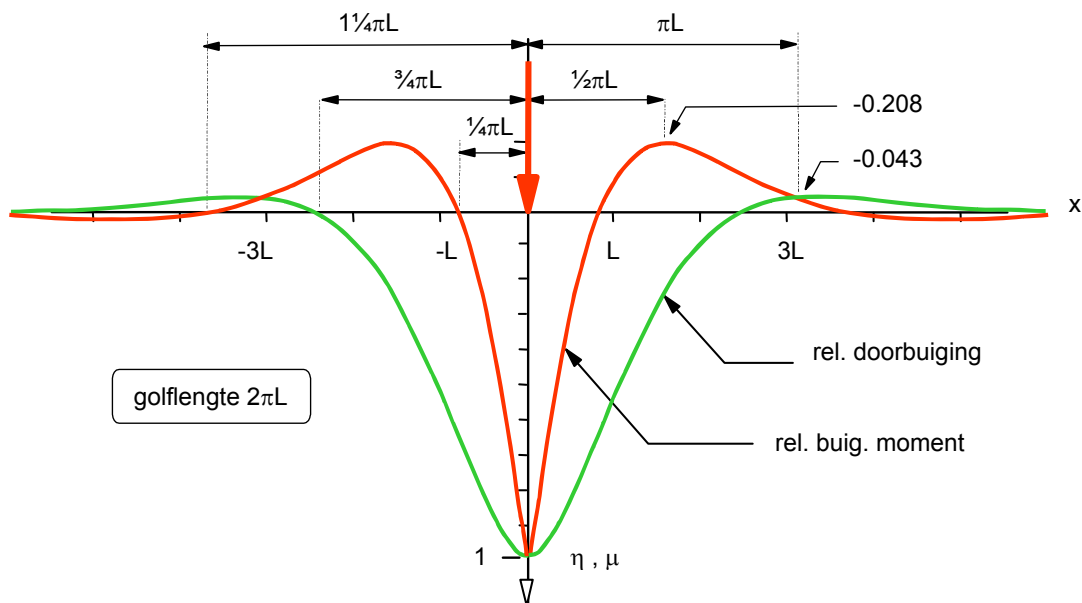
Verder treden er twee vormfuncties op:

$$\eta(x) = e^{-x/L} \left[\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right] \quad x \geq 0 \quad (\text{C18})$$

en:

$$\mu(x) = e^{-x/L} \left[\cos \frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L} \right] \quad x \geq 0 \quad (\text{C19})$$

Deze functies η and μ bepalen de vorm van de doorbuigingslijn, respectievelijk de momentenlijn (zie figuur C6). Het linker deel ($x < 0$) van deze grafieken volgt uit symmetrie overwegingen. De uitdrukkingen stellen zwaar gedempte harmonische golven voor met een golflengte van $2\pi L$. Ze zijn daarom ook bruikbaar als goede benaderingsoplossing voor eindige spoorstaven met een centrale wiellast, mits de lengte van de spoorstaaf groter is dan ongeveer $2\pi L$. De lijnen kunnen ook worden gebruikt als invloedslijnen om de invloed van meerdere naburige wiellasten te bepalen.



Figuur C6: Verloop relatieve doorbuigings- en momentenlijn in voegloos spoor

Andere randvoorwaarden.

Gebruikmakend van de zelfde theorie kan het probleem ook worden opgelost voor andere randvoorwaarden, zoals twee half oneindig lange spoorstaven met een scharnier aan elkaar verbonden (voegenspoor) of zonder enige verbinding (spoorstaafbreek). Enige referenties hiervoor zijn: Esveld, collegedictaat bij college CTvb4870, Railway Engineering; Bouma, Mechanica van constructies bij college CTme3110 of het standaardwerk van Hetényi, Beams on Elastic Foundations.

Dynamic amplification factor

De berekening geldt alleen voor (quasi-) statisch belaste spoorconstructies. Om toch de invloed van de snelheid en de conditie van het spoor enigszins in rekening te brengen is door Eisenmann in de zeventiger jaren een toeslagfactor afgeleid op basis van zeer veel metingen in de praktijk. De definitie en de toepassing van deze dynamische vergrotingsfactor (DAF = Dynamic Amplification Factor) is in het formule overzicht, Bijlage E, weergegeven.

BIJLAGE D SYMBOLEN

(Opm.: de indices bij de symbolen zijn afkortingen van de Engelse termen, in overeenstemming met het Engelstalige 4e jaars dictaat CT4870).

a	= langsafstand h.o.h. discrete ondersteuning	[m]
A	= oppervlak raildoorsnede	[m ²]
a_d	= niet gecompenseerde dwarsversnelling (<u>d</u> eficiency)	[m/s ²]
da_d/dt	= ruk in dwarsrichting overgangsboog	[m/s ³]
a_{dt}	= niet gecompenseerde dwarsversnelling kantelbak (<u>t</u> ilting)	[m/s ²]
a_{rs}	= lengte railondersteuning (in x-richting)	[m]
A_H	= contactopp. tussen wielband en railkop (<u>H</u> ertz)	[m ²]
A_{rs}	= contactopp. tussen spoorstaaf en ondersteuning (<u>r</u> ail to <u>s</u> upport)	[m ²]
A_{bs}	= contactopp. tussen onderlegplaat en dwarsligger (<u>b</u> aseplate to <u>s</u> leeper)	[m ²]
A_{sb}	= contactopp. tussen halve dwarsligger en ballastbed (<u>s</u> leeper to <u>b</u> allastbed)	[m ²]
b_h	= kopbreedte railprofiel (<u>h</u> ead)	[m]
B	= voetbreedte railprofiel	[m]
C	= beddingsmodulus	[N/m ² /m']
$D(x)$	= dwarskracht in raildoorsnede	[N]
DAF	= dynamische amplificatie factor (Eisenmann)	[-]
e	= excentriciteit verticale wiellast	[m]
E	= elasticiteitsmodulus railstaal	[N/m ²]
EI	= verticale buigstijfheid railprofiel	[Nm ²]
F	= verticale kracht op discrete ondersteuning	[N]
F_0	= voorspankracht bevestiging op railondersteuning	[N]
f_K	= frequentie vetergang beweging (<u>K</u> lingel)	[Hz]
g	= zwaartekrachtsversnelling (9.81 m/s ²)	[m/s ²]
h	= verkanting	[m]
h_0	= ideale verkanting	[m]
h_c	= afstand massamiddelpunt rijtuigbak tot BS (<u>c</u> entre)	[m]
h_d	= verkantingstekort (<u>d</u> eficiency)	[m]
h_r	= hoogte railprofiel (<u>r</u> ail)	[m]
h_s	= afstand dwarskr. centrum spoorstaaf tot werklijn Y (<u>s</u> hear centre)	[m]
H	= dwarskracht op het spoor	[N]
H_{rs}	= maximaal toelaatbare dwarskracht (<u>r</u> olling <u>s</u> tack)	[N]
h_{tilt}	= extra 'schijnbare' verkanting door kantelbak	[m]
H_{tr}	= minimaal vereiste dwarskracht Prud'homme (<u>t</u> rack)	[N]
I_y	= traagheidsmoment spoorstaafdoorsnede verticaal vlak (= I_{yy} , ook wel I)	[m ⁴]
I_z	= traagheidsmoment spoorstaafdoorsnede horizontaal vlak (= I_{zz})	[m ⁴]
k	= beddingscoëfficiënt continue ondersteuning	[N/m/m']
k_d	= veerconstante discrete ondersteuning	[N/m]
k_{tot}	= totale veerconstante spoor per spoorstaaf	[N/m]
L	= karakteristieke lengte spoor	[m]
L_{tc}	= lengte overgangsboog (<u>t</u> ransition <u>c</u> urve)	[m]
L_K	= golflengte vetergangbeweging (<u>K</u> lingel)	[m]
m	= massa rail per meter	[kg/m']
$M(x)$	= verticaal buigend moment in de spoorstaaf	[Nm]
N	= axiaal gerichte kracht in de spoorstaaf	[N]
P	= asbelasting op het spoor	[N]
$p(x)$	= verdeelde reactiekracht continue ondersteuning	[N/m]
Q	= verticale wielbelasting op spoorstaaf	[N]
$Q_{e,i}$	= verticale wiellasten in bogen (<u>e</u> xterior/ <u>i</u> nterior)	[N]
R	= horizontale boogstraal	[m]
r	= straal loopcirkel wielen in middenpositie	[m]
R_K	= kromtestraal van de baancurve vetergang (<u>K</u> lingel)	[m]
s	= spoorbreedte (h.o.h. loopvlak spoorstaven)	[m]

T	= actuele temperatuur spoorstaaf	[°C]
T	= tangentiële wielkracht op de spoorstaaf	[N]
t	= tijd	[s]
t	= vermenigvuldigingsfactor standaard afwijking (in DAF)	[-]
T ₀	= neutrale temperatuur spoorstaaf (bij vastzetten spoor)	[°C]
u	= langsverplaatsing spoorstaaf (= u(x))	[m]
V	= rijsnelheid	[km/h]
v	= rijsnelheid	[m/s]
w	= verticale zakking ondersteuning	[m]
w(x)	= verticale doorbuiging spoorstaaf	[m]
W _{yh}	= weerstandsmodulus railkop (railhead) verticaal vlak	[m ³]
W _{yf}	= weerstandsmodulus railvoet (railfoot) verticaal vlak	[m ³]
W _z	= weerstandsmodulus spoorstaaf horizontaal vlak	[m ³]
x	= coördinaat lengterichting spoor in rechtstand	[m]
y	= coördinaat dwarsrichting spoor	[m]
y	= zijdelingse verplaatsing wielstel bij vetergang	[m]
y ₀	= amplitude vetergangbeweging	[m]
Y _{e,i}	= dwarskracht op de spoorstaven (e _{xterior} /i _{nterior})	[N]
z	= coördinaat hoogterichting spoor	[m]
ΔT	= temperatuurverhoging spoorstaaf	[°C]
α	= lineaire uitzettingscoëfficiënt	[1/°C]
α _h	= verkantingshoek	[rad]
γ	= coniciteit (helling) van de wielband	[rad]
η(x)	= relatieve doorbuiging spoorstaaf	[-]
φ	= vergrotingsfactor (afhankelijk spoorkwaliteit)	[-]
ℓ	= lengte spoorstaaf bij montage	[m]
Δℓ	= lengtevermeerdering spoorstaaf door uitzetting	[m]
ℓ _a	= ademplengte spoorstaaf	[m]
μ(x)	= relatief buigend moment spoorstaaf	[-]
ν	= dwarscontractiecoëfficiënt (Poisson)	[-]
ρ	= dichtheid (massa)	[kg/m ³]
σ	= locale drukspanning (Winkler)	[N/m ²]
σ _H	= gemiddelde drukspanning op de railkop (Hertz)	[N/m ²]
σ _{rs}	= gemiddelde drukspanning op de railondersteuning (rail to support)	[N/m ²]
σ _{bs}	= gemiddelde drukspanning op de dwarsligger (baseplate to sleeper)	[N/m ²]
σ _{sb}	= gemiddelde drukspanning op het ballastbed (sleeper to ballastbed)	[N/m ²]
σ _{rf}	= buigspanning in spoorstaafvoet (rail foot)	[N/m ²]
σ _t	= treksterkte railstaal (tensile)	[N/m ²]
σ _y	= vloeigrens railstaal (yield)	[N/m ²]
τ(u)	= langsschuifweerstand spoor	[N/m]
τ ₀	= constante plastische langsschuifweerstand	[N/m]
τ _{max}	= maximale schuifspanning in railkop	[N/m ²]

BIJLAGE E FORMULES

Ondersteuningsmodellen

Beddingsmodulus (Winkler):

$$C = \frac{\sigma}{w} \tag{1}$$

Veerconstante discrete ondersteuning:

$$k_d = \frac{F}{w} \tag{2}$$

Zimmermann model

Beddingscoëfficiënt:

$$k = \frac{p(x)}{w(x)} \approx \frac{k_d}{a} \tag{3}$$

Karakteristieke lengte:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} \tag{4}$$

Verticale doorbuiging spoorstaaf:

$$w(x) = \frac{QL^3}{8EI} \eta(x) = \frac{Q}{2kL} \eta(x) \tag{5}$$

$$\eta(x) = e^{-\frac{|x|}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{|x|}{L} \right] \tag{6}$$

Buigend moment in spoorstaaf:

$$M(x) = \frac{QL}{4} \mu(x) \tag{7}$$

$$\mu(x) = e^{-\frac{|x|}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} - \sin \frac{|x|}{L} \right] \tag{8}$$

Verdeelde reactiekracht:

$$p(x) = kw(x) = \frac{Q}{2L} \eta(x) \tag{9}$$

zie voor grafiek relatieve doorbuigings- en momentenlijn Bijlage C

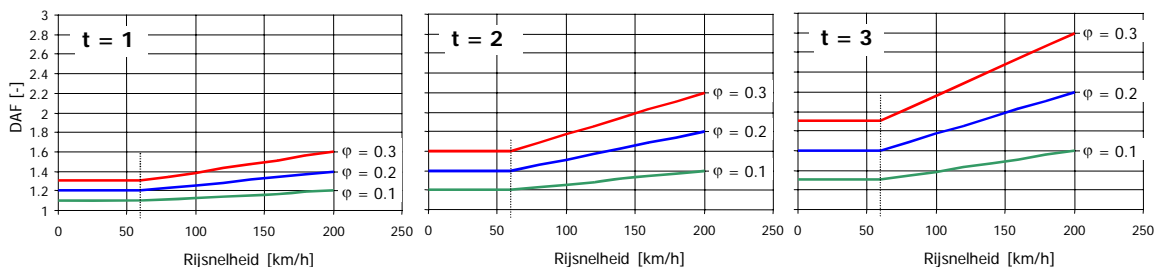
Dynamische Amplificatie Factor:

$$DAF = 1 + t \times \varphi \quad \text{als } V < 60 \text{ km/h}$$

$$DAF = 1 + t \times \varphi \times \left(1 + \frac{V - 60}{140}\right) \quad \text{als } 60 \leq V \leq 200 \text{ km/h} \tag{10}$$

conditie spoor	φ
zeer goed	0.1
goed	0.2
slecht	0.3

probabiliteit	t	toepassing
68.3 %	1	contactspanning, aardebaan
95.4 %	2	dwarskrachten, ballastbed
99.7 %	3	spoorstaven (buiging), bevestiging, steunpunten, dwarsliggers



Vermoeiingsspanningen in spoorstaven

Buigspanning in railvoet:

$$\sigma_{rf\ max} = DAF * \sigma_{rf\ gem} \quad (11)$$

$$\sigma_{rf\ gem} = \frac{QL}{4W_{yf}} \quad (12)$$

Schuifspanning in railkop:

$$\tau_{max} = 412 \sqrt{\frac{Q}{r}} \quad (13)$$

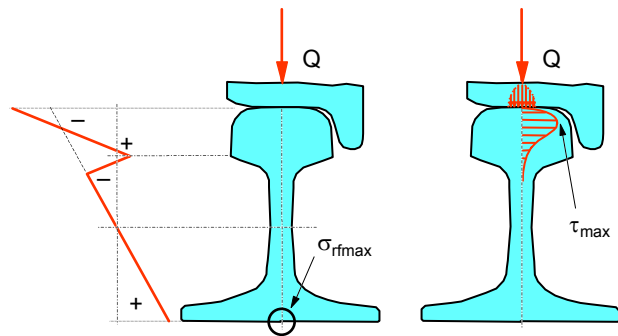
(Q in kN, r in mm => τ_{max} in N/mm²)

Maximale wiellast vanwege contactspanningen:

$$Q_{max} = 4.9 * 10^{-7} r \sigma_t^2 \quad \text{herhaalde belasting} \quad (14)$$

$$Q_{max} = 8.3 * 10^{-7} r \sigma_t^2 \quad \text{incidentele belasting} \quad (15)$$

(r in mm, σ_t in N/mm² => Q in kN)



Krachten in bogen:

met: $\sin \alpha = h/s$ and $\cos \alpha \approx 1$:

$$Q_e \approx \frac{1}{2}P + P \frac{h_c h_d}{s^2} \quad (16)$$

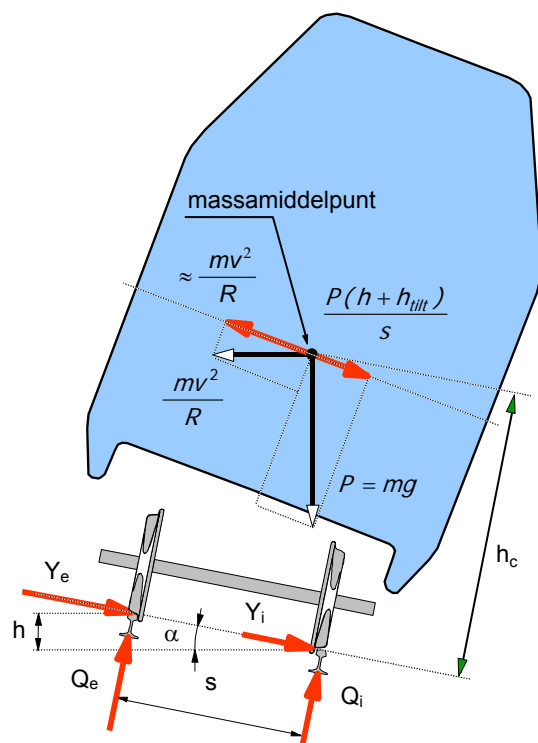
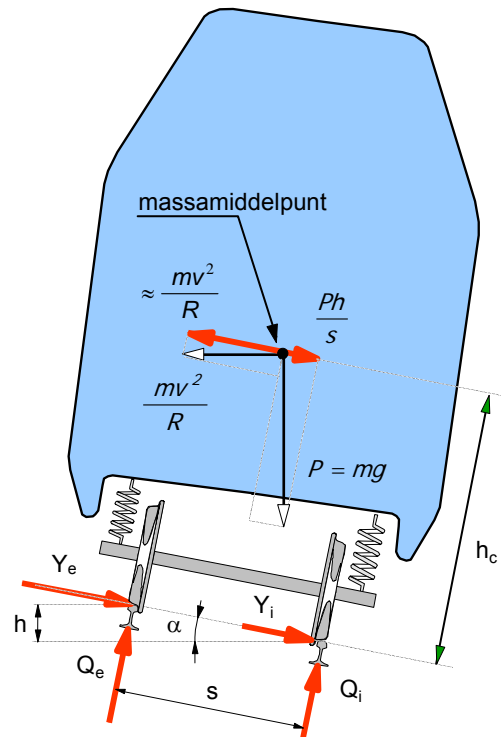
$$H = Y_e + Y_i \approx P \frac{h_d}{s} \quad (17)$$

Ideale verkanting:

$$h_0 = \frac{sv^2}{gR} \quad (18)$$

verkantingstekort:

$$h_d = h_0 - h = \frac{sv^2}{gR} - h \quad (19)$$



Kritische dwarskracht (Prud'homme):

$$H_{rs} = 0.85 \left(10 + \frac{P}{3} \right) \quad (20)$$

$$H_{tr} = \left(10 + \frac{P}{3} \right) \quad (21)$$

(P in kN => H_{rs} and H_{tr} in kN)

Stabiliteitsvoorwaarde Prud'homme:

$$DAF * H \leq H_{rs} \quad (22)$$

Kritische dwarsversnelling in bogen

Niet-gecompenseerde dwarsversnelling:

$$a_d = \frac{g}{S} h_d \leq a_{dmax} \quad (23)$$

Dwarsruk (in overgangsboog):

$$\frac{da}{dt} = \frac{v}{L_{tc}} a_d \leq \left(\frac{da}{dt} \right)_{max} \quad (24)$$

Effect kantelbak op dwarsversnelling:

$$a_{dt} = \frac{g}{S} (h_d - h_{tilt}) \leq a_{dmax} \quad (25)$$

Temperatuur effecten in voegloos spoor

Plastische langsschuifweerstand:

$$\text{als } u \neq 0: \quad \tau(u) = \tau_0 \operatorname{sgn}(u) \quad (26)$$

$$\text{als } u = 0: \quad \tau(u) = 0$$

Maximale langskracht in voegloos spoor:

$$N_{max} = EA\alpha |\Delta T| \quad (27)$$

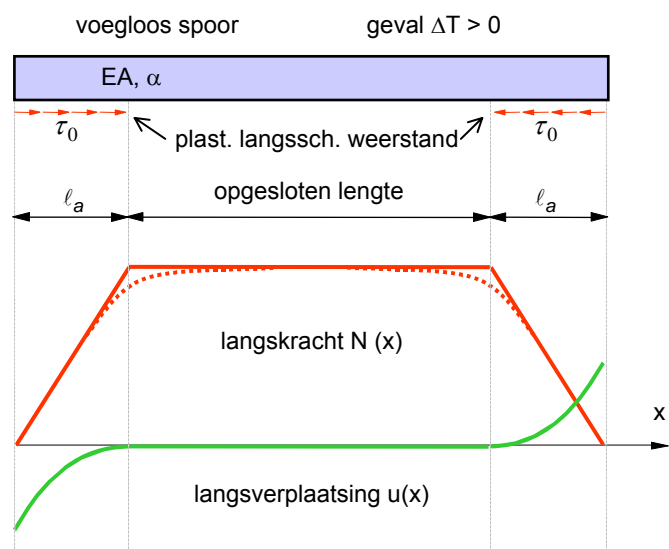
$$\Delta T = T - T_0 \quad (28)$$

Maximale langsverplaatsing:

$$u_{max} = \frac{1}{2} \alpha \Delta T \ell_a \quad (29)$$

Ademlengte:

$$\ell_a = \frac{N_{max}}{\tau_0} \quad (30)$$



Discrete ondersteuning rail

Maximale verticale kracht op een discrete ondersteuning (per rail) t.g.v. één wiellast:

$$F_{max} \approx DAF \cdot \frac{Qa}{2L} \quad (31)$$

Maximale drukspanning op de railondersteuning:

$$\sigma_{rs} = \frac{F_0 + F_{max}}{A_{rs}} \quad (32)$$

waarin F_0 = voorspankracht bevestiging op railondersteuning en A_{rs} = contactoppervlak tussen spoorstaaf en railondersteuning. De ondersteuning bestaat uit de (halve) dwarsligger of een onderlegplaat (rughellingplaat), in beide gevallen voorzien van een tussenliggend railbeddingsplaatje (rail pad).

Indien de voorspankracht wordt verwaarloosd volgt uit (31) en (32) voor de discrete ondersteuning:

$$\sigma_{rs} = DAF \cdot \frac{Qa}{2L} \cdot \frac{1}{Bb_{rs}} \quad (33)$$

waarin B = breedte railvoet en b_{rs} = breedte discreet steunpunt (in x-richting).

Continue ondersteuning rail

Maximale drukspanning op de continue railondersteuning:

$$\sigma_{rs} = \frac{p_{max}}{B} = DAF \cdot \frac{Q}{2BL} \quad (34)$$

Dwarsligger (drukspanning op)

De maximale drukspanning σ_{bs} op de dwarsligger volgt uit formule (33). In het geval van een onderlegplaat wordt echter F_0 de voorspankracht van de onderlegplaat op de dwarsligger en $A_{rs} = A_{bs}$.

Ballastbed (drukspanning op)

De maximale drukspanning σ_{sb} op het ballastbed volgt uit formule (33) met $F_0 = 0$ en $A_{rs} = A_{sb}$:

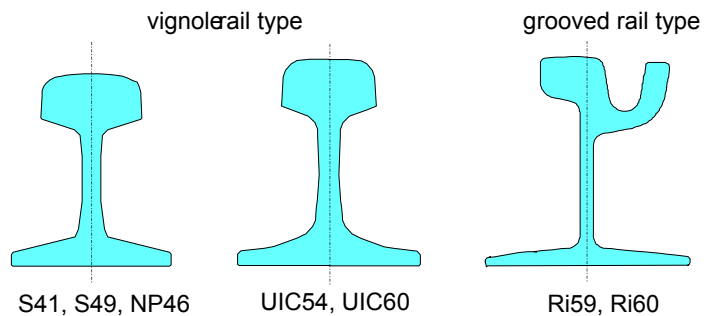
$$\sigma_{sb} = \frac{F_{max}}{A_{sb}} \quad (35)$$

BIJLAGE F TABELLEN

Elasticiteitsconstanten orde-grootte

Kwaliteit ondersteuning spoor		'slecht'	'goed'
Beddingsmodulus	C [N/mm ³]	0.02	0.20
Veerconstante	K [kN/mm]	5.5	55
Beddingscoëfficiënt	k [N/mm ²]	9	90
Karakteristieke lengte	L [m]	1.30	0.70

Railprofiel geometrie



Railprofiel. afmetingen en sterkte gegevens

Rail gegevens	Railprofiel	S41	S49	NP46	UIC54	UIC60	Ri60	
	hoogte	h_r [mm]	138	149	142	159	172	180
	kopbreedte	b_h [mm]	67	67	72	70	72	113
	voetbreedte	B [mm]	125	125	120	140	150	180
	oppervlak	A [cm ²]	52.7	63.0	59.3	69.3	76.86	77.05
	massa/meter	m [kg/m]	41.3	49.4	49.6	54.4	60.3	60.5
	traagheid. moment I_y	[cm ⁴]	1368	1819	1605	2346	3055	3334
	traagheid. moment I_z	[cm ⁴]	276	320	310	418	513	884
	weerst. moment W_{yh}	[cm ³]	196	240	224	279	336	387
	weerst. moment W_{yf}	[cm ³]	200.5	248	228	313	377	355
	weerst. moment W_z	[cm ³]	44.2	51.2	52	60	68	135

Railstaal eigenschappen

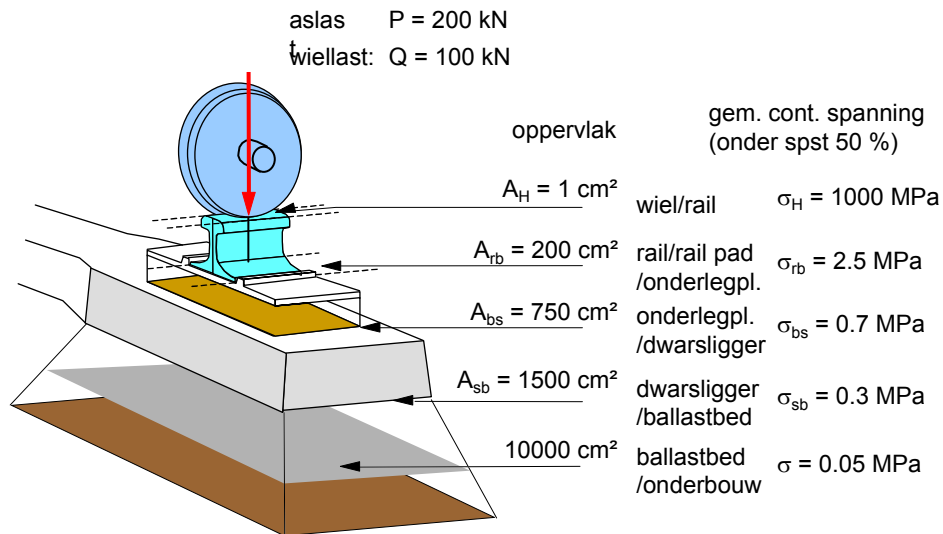
Elasticiteitsmodulus:	E = 210·GPa	Lineaire uitzettingscoëfficiënt:	$\alpha = 1.15 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$
Dwarscontractiecoëfficiënt:	$\nu = 0.3$	Dichtheid:	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

Toelaatbare buigspanning railvoet (σ_{rf})

Treksterkte σ_t [MPa]	Vloeigrens σ_y [MPa]	Constante spanningen		σ_{rf} [MPa] voor incidentele belasting	σ_{rf} [MPa] voor herhaalde belasting
		Richtspanning [MPa]	Temperatuurspanning voegloos spoor [MPa]		
700	450	220	100	450	~55*
900	580			580	220*

* uit Smith diagram

Spanningsreductie in bovenbouw



Toelaatbare schuifspanning railkop

Treksterkte σ_t [MPa]	τ_{\max} [MPa]	
	incidentele belasting	herhaalde belasting
700	260	200
900	340	260

Toelaatbare drukspanning op railondersteuning:

- zachthouten dwarsliggers : $\sigma_{rs} \leq 1.0 - 1.5 \text{ MPa}$
- hardhouten dwarsliggers : $\sigma_{rs} \leq 1.5 - 2.5 \text{ MPa}$
- alle betonnen ondersteuning : $\sigma_{rs} \leq 4 \text{ MPa}$

Toelaatbare drukspanning op ballastbed:

$$\sigma_{bb} \leq 0.50 \text{ MPa}$$

INDEX

- aanlegmethoden 52
aardebaan 6, 35, 43, 45
absorptie 39
ademlengte 16
adhesie 6, 60
afbuigende spoor 9
afgeveerde betonplaat 42
afgeveerde massa 49
aluminoth. las zie thermietlas
asbelasting 12
asfalt 7, 36, 47
aslastonnage 12
astappen 11
ATB 18
baancurve 120
baanprofiel 43, 44
ballastbed 14, 32, 36, 43, 53
ballastloos spoor 34, 35, 38
ballastmat 17, 18, 32, 34, 36, 37
ballastspoor 34, 35
banderen 26
batch 19
beddingscoëfficiënt 122
beddingsconstante 121
bekiste las 20, 24
onderhoud 53
belastingsparameters 12
beschikbaarheid 35
betonnen dwarsligger 17, 25, 26, 28, 58
Betuweroute 12, 51
beveiliging 18
bewegbare puntstukken 9, 39
blokkenspoor 41
blokrail 47
bovenbouw 6
hoofd functies 6
bovenbouwkwaliteit 58
bovenbouwmeetwagen 53
bovenbouwstelsel 7, 58
bovenleiding 6
brandplekken 57
breuk 17, 29, 40, 57
brugovergangsconstructies 22
BS 44
buigspanningen 19
buitendienststelling 35, 38, 58
CAD dwarsprofiel spoor ii, 119
CAI Railstruc. ii, 119
categorie 13
chemisch anker 38
comfort 7, 9, 53
comfortcriterium 15
compensatie-inrichting 20, 21
compensatielas 18, 20, 21
coniciteit 11, 120
constructiehoogte 34, 35
constructieovergang 39
constructieprofiel 18
contactgebied 51
contactgeluid 36, 39
contactspanning 14, 20
contactvlak 60
continue ondersteuning 122
continuumethode 58
correctie 8, 34
CTvb4870 ii
CTvb5870 ii
DAF 124
DB 49
deep-mixing 43
DE-klem 30
demping 8, 34, 36, 38, 39
deuvels 38
dichtheid 131
directe bevestiging 29, 30, 38
discontinuïteiten 35
discrete ondersteuning 121
doorbuigingslijn 124
doorlatendheid 34
doorschuifweerstand 29
draagfunctie 6
draaistel 11
drainage 8, 34, 43
duurzaamheid 34, 36
dwarscontractiecoëfficiënt 131
dwarskrachten 13
dwarsliggerafstand 25
dwarsprofiel 8, 43
dwarsschuifweerstand 14, 18, 27
dwarsstijfheid 42
dwarsversnelling 9, 15
éénpuntscontact 14
eigenfrequentie 39, 42
eigengewicht 34
eisen 7
Eisenmann 124
elasticiteitsmodulus 131
elastische bevestigingen 17
elektrische scheidingslassen 22
elektro-magnetische levitatie 51
embedded rail 41, 47
ERRI 33
filtervlies 45
filterwerking 45
fit-and-forget 30
formules 127
frequentie vetergang 120
gebroken grind 33
geleiding 6, 18, 60
geluid 8, 34, 36, 38, 39, 41
geluidshinder 35
gemengd verkeer 49
geotextiel 45
gesloten trambaanconstructie 41, 46
golflengte vetergang 120
golf slijtage 28, 54, 56, 57
grasbaan 46
grind 33
grondwaterstand 43
grouting 43
hardhout 26
heavy haul 12, 51
helling 25, 26, 36, 49, 60
hinderwet 39
hoekverdraaiing 29
hoekverhouding 9
hogesnelheidslijn 18, 39, 49
horren 32, 52, 54, 57, 58
horsel 54, 56
houten dwarsligger 17, 25, 48
HSL 12, 49
hulpspoorstaven 58
ICE 49, 50
immissie 39
inbouwhelling 25, 29
indirecte bevestiging 29, 30
industriespoor 6
ingegoten dwarsliggers 40
ingegoten rail 39, 47, 49
ingeklemde spoorstaaf 47
ingraving 43
inslag 25
instabiliteit 34
instandhouding 52
instandhoudingskosten 7
isolatielas 20, 22
KAB 43
karakteristieke lengte 123
kettinhormachine 56
klappers 28, 32
klassieke bovenbouw 8
klemkracht 29, 30, 31, 50
Kölnër Ei 42
kraanbaan 6, 48
kruin 43
kruisingen 6, 9
kunststof 7, 22, 25, 26, 45, 47
kunstwerken 35
kurkrubber 29, 38, 41
langgelast spoor zie voegloos spoor
langskracht 13, 16, 22, 29
langsprofiel 8
langsschuifweerstand 15
lawaaï 7
life-cycle-costs 7
onderhoud 53
light-rail 4, 6
lijmlas 22
loopweerstand 60
maaiveldhoogte 43
magneetzweeftrein 51
magnetische zweeftreinen 5
massa-productie 7
massa-veer-systeem 39, 42
mechanisering 17
meetsysteem 54
momentenlijn 124
monoblok 25
monoblokdwarsligger 26
mud pumping 32, 36
Nabla 50
Nikex 47
NP 46 18
onafgeveerde massa 40, 49
onderbouw 6
onderhoud 52, 54, 60
incidenteel 53
spoorstaven 57
systematisch 53
onderhoudssecties 58
onderlegplaat 25, 29
ongeleide opening 9

ontsporing.....	14	stabilisator	55
open trambaanconstructie	46	Stedef-spoor.....	40
ophoging.....	43	steenslag.....	17, 33
oplassen	57	steunpuntsafstand.....	40
oplegvlak	25, 26, 27	stijfheidssprong	35, 45
optimalisatie.....	35	stomplas.....	20, 23
opwervelen	34	stone-blowing	53, 55
overgangsboog.....	9	stopijzers	53, 54
overweg	6, 41, 52	stopmachine.....	54
paalfundatie	35	stoppen	52, 53, 54, 55, 57
Pandrol	31	superelastische bevestiging	42
pin-pin resonanties	34	tabellen	131
plaatlassen	20, 21	temperatuur.....	35, 56
platenspoor.....	38	TGV.....	8, 12, 49, 50
primaire vering.....	11	thermietlas.....	20, 23, 24, 57
Prud'homme	15	tongbeweging.....	9
puntstuk	9	top-down	35
raamstijfheid	14	tracé-wijzigingen	8, 34
railbeddingsplaatje.....	32	trilling.....	7, 29, 36, 39, 41, 55
railkop	18	tussenlaag.....	32, 45
raillijf	19	tweeblokswarsligger.....	25
railprofiel.....	19, 131	tweeblokswarsligger.....	26
railstaal	131	tweepuntscontact	14
railvoet.....	19	UIC 54	18
Rayleigh golven	55	UIC 60.....	18
reinigen.....	35	uitzagen	35
remweg.....	53, 60	ultrasoon onderzoek.....	20, 57
residuale spanningen	19	underlayment	36
retourstroom	18	uniform verkeer	49
Rheda systeem.....	39	veerconstante	121
Ri60	47	veerconstante totaal.....	121
rijnsnelheid	12	verdichten.....	53
roterende stenen	56	verkanting.....	9, 14, 54
rughellingplaat	26, 30, 35	verkantingstekort.....	14, 30
rughellingplaten	26	vermoeiing.....	49
ruk	15	vernieuwing	52
schift	54	verticale krachten	13
schiften	53, 54	vervanging.....	8, 34
schrankkracht	48	vetergang	11, 120
schuifweerstand....	14, 16, 25, 32, 33	vignolerail	18
secundaire vering	11	voegafdichting	46
shelling	20	voegloos spoor.....	16, 17
sinusloop	<i>zie vetergang</i>	vonkstuiklas.....	<i>zie stomplas</i>
slijpen ..	23, 24, 39, 52, 54, 56, 57	voortbeweging.....	6
slijptrein	56	vorstbescherming.....	32, 45
slijtage	17, 19, 29, 56, 57	Vossloh	26, 30, 46, 50
smering.....	39	walsfout.....	56
SNCF.....	12, 49	waterdoorlatendheid.....	45
snelheidsbeperking.....	58	websites	118
soffit pad.....	37	wegen	43, 46, 60
splitsingsmethode.....	19	wiel/rail	6, 49, 51
splitten	53	wielbandprofiel	19
spoorafstand.....	11	wielstel	11
spoorbouwtrein	59	Winkler	1, 121
spoorbreedte	11	wisselboog	9
spoorframe	8	wisselhout	26
spoorligging 8, 12, 34, 36, 51, 53, 54		wissels ...	6, 9, 21, 26, 33, 39, 52, 60
spoorsectie	53, 58	wisselschema.....	9
spoorsectiemethode	58	Y/Q.....	19
spoorspatting	17	zaagtandkromme	55
spoorstaaf temperatuur	56	zacht hout.....	25
spoorwijdte	11, 25, 48	zettingsvrij	35
staalkwaliteit	17	zijdelingse stijfheid	35
staal-op-staal.....	6, 60	Zimmermann	1, 122
stabilisatie.....	43, 47	zwemmen.....	34
		zwerfstrom.....	7

