



M+P | Onderdeel van
Müller-BBM groep
Mensen met oplossingen



plan van aanpak

Onderzoeksprogramma model spoortrillingen

Colofon

Opdrachtnemer

M+P raadgevende ingenieurs BV

Opdrachtgever

ProRail
Postbus 2038
3500 GA UTRECHT

Opdrachtnummer

4019502

Titel

Onderzoeksprogramma model spoortrillingen

Rapportnummer

M+P.RAIL.20.05.1

Revisie

0

Datum

16 april 2020

Aantal pagina's

15

Auteurs

dr. ir. Ard Kuijpers

Contactpersoon

dr. ir. Ard Kuijpers
073-6589050 | ardkuijpers@mp.nl

M+P

Wolfskamerweg 47 | 5262 ES Vught
Visserstraat 50 | 1431 GJ Aalsmeer

www.mp.nl | onderdeel van de Müller-BBM groep | Lid NLingenieurs
| ISO 9001 gecertificeerd

Copyright

© M+P raadgevende ingenieurs BV | Niets van deze rapportage mag worden gebruikt voor andere doeleinden dan is overeengekomen tussen de opdrachtgever en M+P (DNR 2011 Artikel 46).

Inleiding

Het huidige kabinet wil vervoer per spoor stimuleren. Vervoer per spoor is veilig en duurzaam. De verwachting is dan ook dat de komende jaren zowel het goederenvervoer als het reizigersvervoer zullen toenemen. Deze toename van het verkeer heeft echter invloed op de leefomgeving: de blootstelling aan geluid en trillingen zal toenemen en daarvoor moeten passende maatregelen worden genomen.

Voor de problematiek rondom trillingen is er behoefte aan goed modelleergereedschap. Om in die behoefte te voor zien is het uniform rekenmodel spoortrillingen (OURS-model) ontwikkeld onder supervisie van het RIVM. Dit model is primair bedoeld voor trillingenonderzoek op grovere schaal en maakt gebruik van een empirische beschrijving voor materieel en baan. Het biedt (nog) niet de mogelijkheid om de bijdrage en invloed van verschillende actoren en maatregelen in het ontwerp en onderhoud van baan en materieel te kunnen bepalen. Er is echter wel behoefte aan een gereedschap dat helpt om inzicht te krijgen in de relatie tussen maatregelen en onderhoud gericht op het verbeteren van spoorligging en dynamische stijfheid en de effecten daarvan op het verminderen of voorkomen van trillingsproblemen. En dit inzicht is essentieel om de juiste investeringsbeslissingen te kunnen nemen om de trillingshinder aan te pakken.

Dit document beschrijft het onderzoeksprogramma om binnen een tijdspanne van drie tot vier jaar een dergelijk gereedschap te ontwikkelen. Dit onderzoeksprogramma beschrijft, in functionele zin, het gewenste eindresultaat van de researchactiviteiten:

- een engineering-rekenmodel voor trillingsemissie van de spoorinfra
- de uit te voeren werkzaamheden
- de fasering om tot dit eindresultaat te komen.

ProRail hecht er grote waarde aan dat het model ook echt gebruikt kan en gaat worden. Daarom is dit plan tot stand gekomen met een actieve participatie van de sector, dus door de onderzoeksinstellingen die de research gaan uitvoeren als ook door de beoogde gebruikers van het resultaat: ProRail, adviesbureaus en eventueel aannemers en vervoerders.

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	3
1. Achtergrond.....	4
Actoren in het domein van spoortrillingen	4
Modellen	4
Stand-der-techniek.....	5
2. Doelstelling	5
3. Visie.....	5
4. Scope	6
5. Onderzoeksvragen.....	6
6. Aanpak.....	6
Ontwikkeling rekengereedschap	6
Samenwerken.....	7
7. Werkzaamheden.....	7
Baanlichaam	7
Ruimtelijke variatie	7
Tijdgedrag.....	8
Gereedschap.....	9
8. Planning.....	9
9. Sturing en begeleiding	10
Zelfsturende teams.....	10
Kernteam.....	10
Gebruikersgroep	10
10. Budget.....	10
11. Belemmeringen, risico's en beheersmaatregelen	12
A. Bijlage: budgettraming projectthema's	13

1. Achtergrond

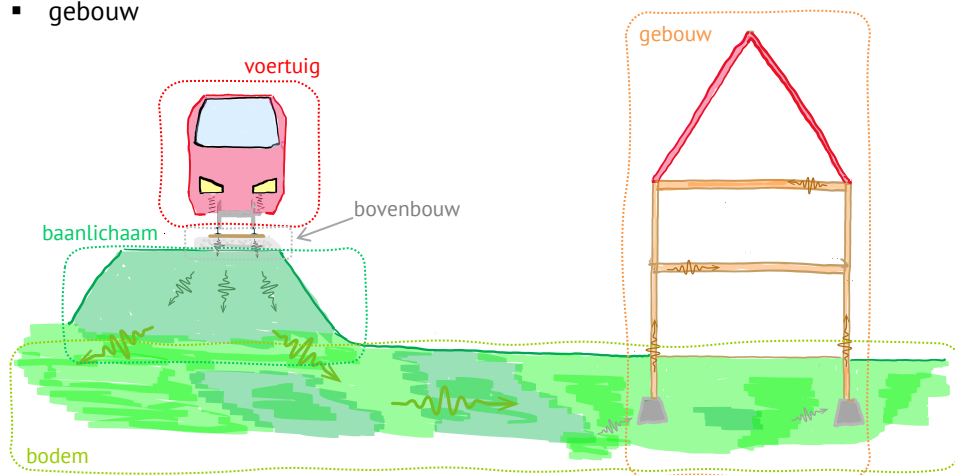
Trillingshinder door railverkeer staat bij ProRail de laatste jaren volop in de belangstelling. Trillingshinder vormt een risico in de besluitvorming bij projecten voor spooruitbreiding. Daarnaast spelen trillingen een rol bij de algehele geometrische degradatie van de spoorconstructie en die degradatie op zichzelf kan weer leiden tot een toename van de aanstoting van het spoorstelsel en van klachten over trillingshinder. Dit vormt een vicieuze cirkel en een risico voor zowel exploitatie als instandhouding.

Om deze vicieuze cirkel te doorbreken is het nodig om de opwekking van trillingen en uitbreiding naar de omgeving beter te beheersen. En daarvoor is het nodig om goed te begrijpen hoe de verschillende actoren bij trillingen rondom het spoor samenhangen en hoe deze met gerichte interventies zijn te beïnvloeden.

Actoren in het domein van spoortrillingen

In het domein van trillingen bij spoor onderscheiden we de volgende actoren:

- voertuig
- bovenbouw
- baanlichaam
- bodem
- gebouw



Trillingen worden opgewekt in de wisselwerking tussen voertuig en bovenbouw: de baan is niet perfect vlak en recht en de wielen zijn niet perfect rond waardoor verplaatsingen optreden in voertuig en baan. Maar zelfs al zou de geometrie perfect zijn dan nog treden er verplaatsingen op. Dat komt omdat de trein onder de invloed van zwaartekracht ervoor zorgt dat de baan en wielen inveren en deze invering is tijdelijk omdat de trein zich verplaatst. De weerstand tegen deze verplaatsing noemen we stijfheid en de stijfheid die de trein ervaart varieert ook als de trein zich over de baan beweegt, bijvoorbeeld vanwege het feit dat een wiel boven een dwarsligger een andere weerstand voelt als een wiel op een doorbuigende rail tussen twee dwarsliggers. En dan zijn er ook nog de verschillen in baanconstructie, grondsoort, baanlichaam etc. die zorgen voor plaatselijk variërende stijfheden.

Als gevolg van een niet perfecte geometrie en variërende stijfheden treden er verplaatsingen op. En als deze verplaatsingen in de tijd variëren dan spreken we van trillingen. Deze trillingen zijn dus onlosmakelijk verbonden met de treinverplaatsing en dus niet zomaar te voorkomen maar wel te beheersen door de baan zo te ontwerpen dat de opwekking van trillingen minimaal is.

Als de trillingen eenmaal zijn opgewekt, dan verplaatsen deze zich door baanlichaam en bodem naar gebouwen in de omgeving. De eigenschappen van de bodem bepalen of de trillingen zich makkelijk kunnen voortplanten of dat ze in enige mate gedempt worden. De interactie tussen bodem en gebouw bepaalt vervolgens hoeveel trillingsenergie er van de bodem naar het gebouw wordt overgedragen. Tenslotte bepaalt de gebouwconstructie zelf hoe de trillingsenergie in het gebouw wordt doorgevoerd en merkbaar is voor de gebruikers van het gebouw in de vorm van voelbare trillingen of door trillende gebouwdelen afgestraald (laagfrequent) geluid.

Modellen

Modellen zijn bedoeld om de interactie tussen de actoren in het domein van spoortrillingen inzichtelijk te maken. Een model bestaat uit rekenkundige vereenvoudingen van de verschillende actoren en beschrijft de krachten en verplaatsingen die door de interacties worden opgewekt en doorgeleid. Elke rekenkundige vereenvoudiging heeft parameters die de voor spoortrillingen kenmerkende en relevante eigenschappen of condities van de actor beschrijven. Deze parameters zijn de 'knoppen' van het model: als we aan de knoppen draaien

dan verandert de uitkomst van het model. Voorbeelden van dergelijke parameters zijn de snelheid van de trein, het dwarsprofiel van de spoorstaaf, de massa van de dwarsligger, de compressiemodulus van de ondergrond en de buigstijfheid van de verdiepingsvloer.

Een aantal van deze knoppen zijn te beïnvloeden en een aantal zijn gegeven. Zo kan ProRail bijvoorbeeld wel stijfheid van de railpad tussen spoorstaaf en dwarsligger beïnvloeden, maar niet de bodemeigenschappen van de kleigrond in de rivierendelta. ProRail heeft behoefte aan een rekenmodel/rekengereedschap waarmee zij kan bepalen wat het effect is van bepaalde interventies ('het draaien aan knoppen waar ze invloed op heeft') op spoortrillingen in een bepaalde omgeving of situatie (met 'knoppen' waar ProRail geen invloed op heeft).

Stand-der-techniek

Op dit moment heeft ProRail geen rekengereedschap tot haar beschikking waarmee interventies voor spoortrillingen kunnen worden doorgerekend en een dergelijk model is ook niet direct op de markt beschikbaar. Weliswaar wordt er bij diverse organisaties in binnen- en buitenland op dit moment gewerkt aan en met modellen voor spoortrillingen, maar deze zijn niet geschikt voor het rekenen aan interventies voor het Nederlandse spoor.

In Nederland wordt op dit moment onder leiding van RIVM een uniform rekenmodel spoortrillingen (OURS) ontwikkeld waarin met name is gewerkt aan een verbeterde beschrijving van de omgeving van het spoor (de actoren bodem en gebouw). Dit model bevat ook een basale (empirische) beschrijving van voertuig, bovenbouw en baanlichaam, maar daarin is het niet goed mogelijk om interventies aan voertuig, bovenbouw en baanlichaam door te rekenen. Daarnaast is het bedoeld als een survey-model waarmee trillingen over een groter gebied kunnen worden voorspeld, maar het is niet geschikt voor lokale studies bij bijvoorbeeld trillings-hotspots.

Bij universiteiten, onderzoeksinstituten en ingenieursbureaus in Nederland en daarbuiten zijn diverse andere modellen voorhanden maar ook deze zijn zomaar geschikt. Daarvoor zijn diverse redenen:

- De modellen laten niet toe om te interventies door te rekenen;
- De modellen zijn van academische aard en vergen grote rekencapaciteit en bediening door experts;

- De modellen zijn niet beschikbaar of makkelijk te gebruiken door ProRail en haar partners;
- De modellen zijn onvoldoende geschikt of gevalideerd om te rekenen aan het typisch Nederlandse spoorstelsel.

ProRail is van mening dat een investering noodzakelijk is om wel de beschikking te krijgen over een rekenmodel voor het doorrekenen van interventies voor typisch Nederlands spoor. Daarvoor zijn een drietal ontwikkelingen noodzakelijk:

- Kennisontwikkeling rondom het gedrag van spoor in de typisch Nederlandse context: van een relatief buigslappe bovenbouw met stijve railpads op een dijklichaam in een zacht bodemgebied.
- Kennisontwikkeling rondom het in rekening brengen van variatie en onzekerheden in de modelparameters en de uitwerking daarvan op de rekenresultaten;
- Gereedschapsontwikkeling om een voor vakspecialisten een bruikbare tool te krijgen om interventies aan het spoorstelsel of spooronderhoud door te rekenen om trillingsgerelateerde problemen te beheersen.

2. Doelstelling

Doelstelling van het programma is de ontwikkeling van een rekenmodel en -gereedschap om interventies voor spoortrillingen door te kunnen rekenen. Het rekenmodel is toegespitst op het Nederlandse spoorstelsel en houdt op een systematische wijze rekening met parameteronzekerheden en -variëaties.

Het model is geen vervanging voor het OURS-model, maar een toevoeging daaraan. Het beoogde model maakt een mathematische beschrijving van de 'eerste 25 meter' van het spoorstelsel waarin voertuig, spoor en onderbouwparameters kunnen worden aangepast. Dat is nu niet mogelijk. Daarnaast heeft het beoogde nieuwe model een hogere spatiale resolutie waardoor het, in tegenstelling tot OURS, geschikt is om (maatregel)studies uit te voeren ter plaatse van lokale trillingshinder.

3. Visie

Over vier jaar heeft ProRail een modelleergereedschap dat haar en haar partners ondersteunt bij de volgende taken:

- Het diagnosticeren van de oorzaak bij klachten en problemen rondom trillingen;

- Het kiezen en dimensioneren van maatregelen en interventies tegen trillingshinder;
- Het onderbouwen van keuzes voor het beleid om trillingshinder tegen te gaan, door middel van:
 - Specificaties en voorschriften voor onderhoud;
 - Onderbouwen van SPC's (specificaties voor aanschaf elementen);
 - Onderhoudsvoorschriften;
 - Eisen en/of aanbevelingen aan materieel.

Het gereedschap levert een nauwkeurige voorspelling van spectrale trillingsemissie-effecten van interventies in materieel en infra/baan.

Het modelleergereedschap is beschikbaar als softwareapplicatie die door vakspecialisten te bedienen is. De software wordt als 'open-source' beschikbaar gesteld aan de sector. De software is modulair van opzet zodat het tamelijk eenvoudig is om delen van het model te hergebruiken in het RIVM-rekenmodel voor spoortrillingen.

In het programma wordt intensief en in maximale openheid met elkaar samengewerkt. Dit komt tot uitdrukking in de projectstructuur waarin teamwerk een belangrijke pijler is. Alle partijen onderschrijven het belang van deze open houding om tot een goed, door de branche gedragen, eindresultaat te komen. Juist door middel van het open delen van kennis zullen nieuwe inzichten worden opgedaan.

4. Scope

Het model is gericht op het rekenen en voorspellen van trillingen in de Nederlandse situatie met spoor aan de oppervlakte van het terrein, eventueel in een verdiepte ligging. Het model is niet bedoeld om te rekenen aan treinen op kunstwerken of in tunnels.

De interventies die moeten kunnen worden doorgerekend zijn aanpassingen of maatregelen aan het materieel (zoals bijv. snelheidsaanpassing of ander wielonderhoud) en aan de baan (bijv. de toepassing van under-sleeper-pads, ballastverstijving, shim-lifts e.d.).

5. Onderzoeksvragen

Op basis van een inventarisatie van de huidige stand-der-techniek zijn de onderzoeksvragen geformuleerd. Het onderzoek in dit programma moet een antwoord geven op de volgende vragen:

- Wat is het effect van het typisch Nederlandse baanlichaam (geometrie dwarsdoorsnede, materiaalopbouw) op de trillingen in de omgeving (spectrum, intensiteit, invloedsradius) als functie van de aslast, de aslastconfiguratie en de snelheid van het rollend materieel en van eigenschappen van de ondergrond?
- Hoe kunnen we de spoorgeometrie onder belasting karakteriseren en hoe verandert deze in de tijd onder invloed van dynamische belasting en zetting van de ondergrond?
- Hoe kunnen we de modelparameter 'dynamische stijfheid van het spoorstelsel' het beste karakteriseren en in het rekenmodel verwerken en op welke wijze kunnen we deze effectief registreren met een praktische meetmethode?
- Op welke manier kunnen we de intrinsieke variatie en onzekerheden in de verschillende modelparameters op systematische wijze in de modellen onderbrengen? Het gaat hierbij om zowel variatie in ruimtelijke zin als in de tijd.

6. Aanpak

Het antwoord op de onderzoeksvragen wordt geleverd door uitvoering van een onderzoeksprogramma door de kennisinstellingen TU Delft, Deltares en TNO. Zij zullen door een onderling intensieve samenwerking samen zorgen dat er een antwoord komt op elk van de onderzoeksvragen.

In het onderzoeksprogramma wordt wetenschappelijke vooruitgang geboekt op zowel het gebied van mathematische beschrijving van het ontstaan en de voorplanting van trillingen als vooruitgang op het gebied van meetmethodes en interpretatie van meetgegevens. Vooruitgang op beide terreinen moeten leiden tot een beter inzicht in het fysische proces en de parameters die het proces beïnvloeden.

Ontwikkeling rekengereedschap

Naast de wetenschappelijke vooruitgang is de parallelle ontwikkeling van een software-rekengereedschap een essentieel onderdeel van dit onderzoeksvoorstel. ProRail en ingenieursbureaus specificeren samen het functioneel ontwerp van het

gereedschap. Vervolgens wordt dit gereedschap met behulp van Agile ontwikkelmethode ontwikkeld in gelijke tred met de modelontwikkeling.

Beide ingrediënten samen zorgen ervoor dat de resultaten van dit onderzoekprogramma aan het einde van de uitvoering van dit programma ook daadwerkelijk in de praktijk kan en zal worden toegepast.

Samenwerken

Samenwerken tussen de instituten is een essentieel ingrediënt van dit programma want voor de beantwoording van de onderzoeksvragen moet de kennis uit verschillende achtergronden worden samengebracht en dat is vooral effectief in een intensieve interactie tussen de kenniswerkers. De ingenieursbureaus zullen in de modelontwikkeling bijdragen door de ontwikkelde rekenmodellen te gebruiken aan de hand van praktijkvoorbeelden om de modellen te valideren en te benchmarken en mede vorm te geven aan de ontwikkeling van de meetmethodes.

7. Werkzaamheden

De vier hoofdthema's van onderzoeksprogramma zijn:

- **Baanlichaam:** het beter begrijpen van de rol van het baanlichaam in het ontstaan en overdragen van spoortrillingen
- **Ruimtelijke variatie:** inzicht verkrijgen in de ruimtelijke verplaatsing van trillingen en wat de invloed is van de ruimtelijke variatie van eigenschappen van de baan (in langsrichting) en van de bodem (in dwarsrichting).
- **Tijdgedrag:** begrijpen op welke wijze veranderingen in de tijd van baan- en materieeigenschappen de spoortrillingen beïnvloeden, mede onder invloed van klimaat en seizoen.
- **Gereedschap:** het bouwen van een rekenmodel dat het hele domein van spoor tot ontvanger omvat in een gebruiksvriendelijke toolbox voor vakspecialisten.

Per thema volgt hierna een globale beschrijving van de werkzaamheden die worden uitgevoerd. In hoofdstuk 8 komt de globale planning van de werkzaamheden aan bod.

Baanlichaam

De modellering van het *baanlichaam* is tot nu toe onderbelicht geweest in de ontwikkeling van rekenmodellen. Binnen dit thema wordt beschrijving van het baanlichaam als onderdeel van het alomvattende model verbeterd.

Onderdeel B1 is het ontwikkelen van de mathematische beschrijving van het baanlichaam binnen het alomvattende rekenmodel. Hierbij wordt voortgebouwd op inzichten uit de wetenschappelijke literatuur. Dit model wordt gevoed en gevalideerd door de meetresultaten uit onderdeel B2.

Onderdeel B2 is een (mobiele) meetcampagne die wordt uitgevoerd om de dynamische stijfheid van verschillende baanlichamen onder verschillende omstandigheden tot kunnen bepalen. De meetmethode hiervoor wordt ontwikkeld binnen het thema 'ruimtelijke variatie'.

Onderdeel B3 omvat het inrichten en gebruiken van een zogenaamd ijkspoor: een referentiespoor/baanlichaam waarvan de gegevens goed bekend zijn en waaraan meetmethodes of een modelonderdelen kunnen worden geijkt.

Als onderdeel B4 van dit thema wordt gewerkt aan een meetmethode waarmee een baanlichaam voor langere tijd kan worden gemonitord, waarmee tijdafhankelijke effecten kunnen worden gevolgd. Hiermee worden meetgegevens verzameld die kunnen dienen als validatie voor de beschrijving uit onderdeel B1 en als input voor het onderzoek binnen het thema *tijdgedrag*.

Ruimtelijke variatie

Dit thema richt zich op onderzoek naar de verandering van de spoor en baaneigenschappen in ruimtelijke richting (in de langsrichting het spoor) en de invloed van verandering en onzekerheden in het voorplantingsgebied in de dwarsrichting op het spoor. Het idee is namelijk dat een specifieke combinatie van baan(onderdelen) en voorplantingsgebied ervoor zorgt dat er op sommige plaatsen geen en op sommige plaatsen wel trillingshinder optreedt. Laatstgenoemde plaatsen worden aangeduid met hot-spots.

In onderdeel R1 binnen dit thema wordt gezocht naar de specifieke omstandigheden die zich voordoen bij hotspots. De hotspots worden in eerste

instantie gevonden op basis van klachten en basis van gegevens over lassen, overwegen en spoordefecten. Op de hotspots wordt detail (meet)onderzoek verricht om de kenmerken van de locatie goed in beeld te krijgen.

Voor de metingen uit onderdeel R1 en uit het thema baanlichaam wordt in onderdeel R2 binnen dit thema de meetmethode voor dynamische stijfheid verbeterd. Allereerst wordt er een goede definitie opgesteld van het (container)begrip dynamische stijfheid en wordt er een praktische meetmethode uitgewerkt waarmee deze grootte kan worden vastgesteld voor gebruik in de modellen.

De spoorgeometrie is naast dynamische stijfheid een andere grootte die belangrijk is in modellen voor spoortrillingen en die ook varieert in langsrichting van het spoor. In onderdeel R3 wordt de meetmethode voor spoorgeometrie verbeterd omdat de huidige meetmethodes onvoldoende nauwkeurig zijn in het golflengtegebied tussen 25 cm en 3 m. Deze spoorgeometrie wordt voor de gelokaliseerde hotspots vastgesteld.

Op basis van de inzichten en methodes uit onderdelen R1, R2 en R3 wordt in onderdeel R4 een inventarisatie gemaakt van de voor trillingshinder kritische baanonderdelen. Op basis van deze inzichten worden specificaties en richtlijnen opgesteld voor deze kritische onderdelen.

In onderdeel R5 ligt de focus op de uitbreiding van de trillingen in dwarsrichting op het spoor. Uit de ontwikkeling van het bodemmodel voor trillingen van het RIVM is naar voren gekomen dat het noodzakelijk is om variatie in bodemeigenschappen expliciet in de modelvorming mee te nemen, omdat dit van grote invloed is op de mate van trillingshinder bij de omgeving. In dit onderdeel wordt onderzocht hoe deze variatie kan worden verdisconteerd in het onderdeel bodem van het alomvattend model.

Tijdgedrag

De eigenschappen van spoor en baanlichaam (en bodem) zijn niet onveranderlijk in de tijd: als gevolg van zetting, slijtage, weer, seizoenen en klimaat zijn deze eigenschappen aan veranderingen onderhevig. En deze veranderingen zorgen er

voor de opwekking en voorplanting van trillingen in een bepaalde situatie verandert in de tijd.

In onderdeel T1 van dit thema wordt het inzicht in het tijdgedrag van spoor, baan(lichaam) en materieel samengebracht in een model. Dit model wordt gevoed uit deelonderzoeken naar het tijdgedrag van de verschillende domeinen in de volgende onderdelen:

In onderdeel T2 wordt onderzocht via literatuur en metingen hoe stijfheid en spoorgeometrie van de baan in de tijd veranderen. In onderdeel 3 wordt daarbij gekeken naar de specifieke invloed van meteo, seizoenen en waterhuishouding.

In onderdeel T4 wordt onderzocht op welke wijze het materieel in de tijd verandert in relatie tot spoortrillingen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de kennis bij materieelleveranciers en -beheerders. Dit resulteert in een database met materieelgegevens voor verschillende treintypes en waar mogelijk ook van het tijdgedrag van dit materieel als functie van het onderhoud.

In onderdeel T5 wordt geïnventariseerd welke bestaande inzichten er zijn over het onderhoud van de spoorbaan en de invloed daarvan op stijfheden en spoorgeometrie. Als het tijdgedragmodel van onderdeel T1 beschikbaar komt kunnen er binnen dit onderdeel ook onderhoudsvoorschriften worden ontwikkeld om het tijdgedrag gunstig te beïnvloeden.

Gereedschap

Binnen het thema *gereedschap* wordt de inzichten uit de drie onderzoeksthema's vertaald naar een praktisch rekengereedschap. Dit rekengereedschap beschrijft het complete domein van voertuig, bovenbouw, baanlichaam en bodem.

Het alomvattende model wordt gebouwd in onderdeel G1 van dit thema. Dit is een samenvoeging van de deelbeschrijvingen en koppelingen van de onderdelen voertuig/bovenbouw, bovenbouw/baanlichaam en baanlichaam/bodem. Deze worden in respectievelijk de onderdelen G2, G3 en G4 binnen dit thema uitgewerkt. In dit onderzoeksvorstel zijn deze domeinonderdelen opgesplitst, maar het is zeer wel mogelijk dat uit het onderzoek blijkt dat deze opsplitsing helemaal niet logisch, wenselijk of noodzakelijk is. In dat geval zullen afzonderlijk gedefinieerd stappen binnen deze onderdelen samenvallen tot een geïntegreerde mathematische beschrijving.

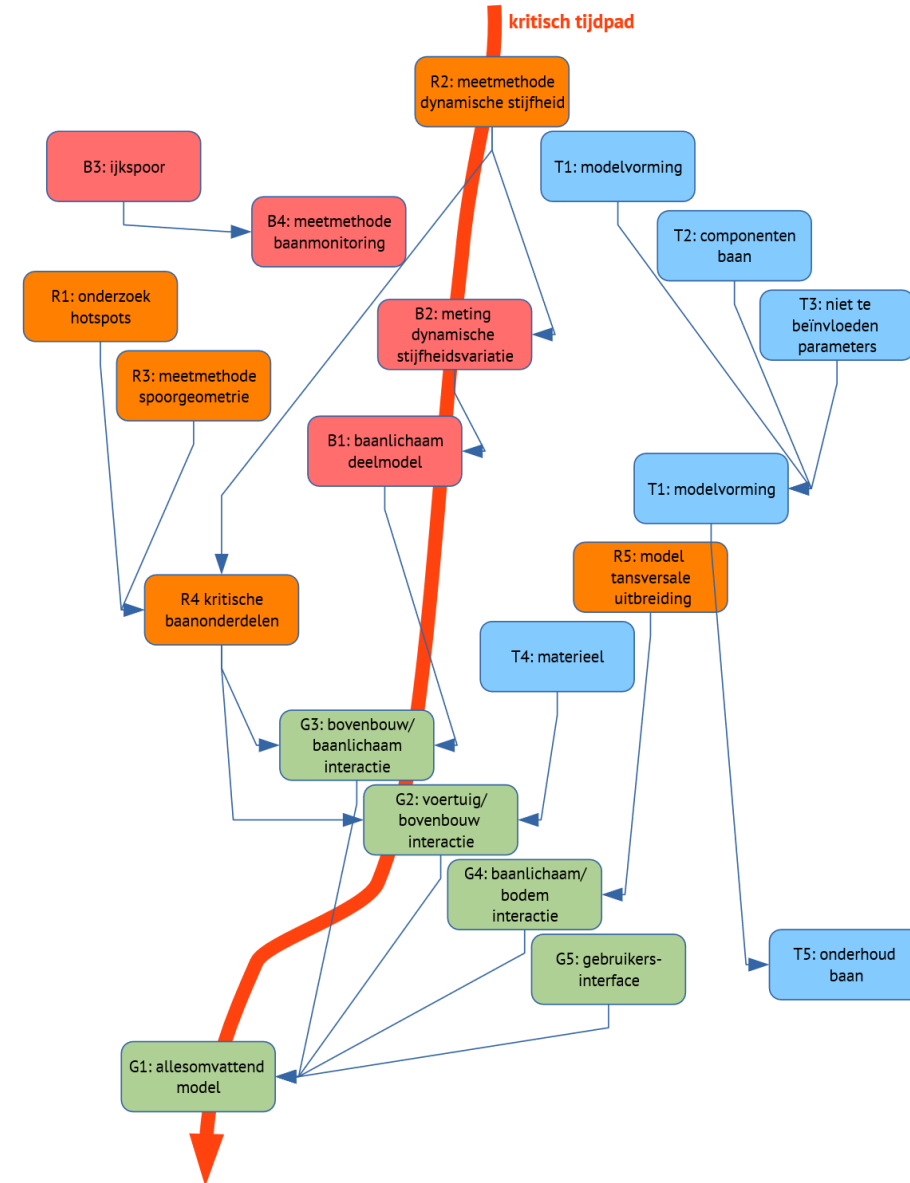
In onderdeel G5 van dit thema wordt tenslotte de gebruikersinterface van het rekenmodel ontworpen en ontwikkeld. Daarbij wordt de set aan benodigde invoerparameters bepaald evenals een database met invoergegevens voor een aantal standaardconfiguraties voor baan, materieel en bodem.

8. Planning

De planning van het onderzoeksproject volgt het tijdskritische pad in het onderzoek (zie figuur hiernaast): er zal een goede meetmethode moeten zijn om de eigenschappen van het baanlichaam te karakteriseren en de resultaten van metingen van deze metingen geven richting aan de keuze van de modelvorming. Dit model zal moeten worden geïmplementeerd, gevalideerd en beschikbaar gemaakt via een gebruikersinterface. Dit totale pad beslaat een tijdruimte van ongeveer 3-4 jaar.

Parallel aan dit tijdskritische pad worden de andere onderdelen opgestart en uitgevoerd. De afhankelijkheden van de verschillende onderdelen van de verschillende thema's is weergegeven in nevenstaand diagram.

Een meer gedetailleerd tijdplanning van het onderzoeksprogramma en de onderverdeling van de werkzaamheden zal voor aanvang van het project worden



gemaakt door de onderzoeksinstellingen gezamenlijk, onder goedkeuring van de kerngroep. Deze planning zal vervolgens halfjaarlijks worden aangepast op basis van behaalde resultaten en voortschrijdend inzicht.

9. Sturing en begeleiding

De inhoudelijke sturing en begeleiding van het onderzoeksprogramma vindt plaats op drie niveaus:

- Via zelfsturende teams voor de dagelijkse gang van zaken;
- Via een kernteam dat toeziet op de inhoudelijke en procesmatige voortgang en die dat de belangrijke beslissingen neemt;
- Via een gebruikersgroep dat een klankbord vormt voor de uitvoerders en opdrachtgever en waarin utilisatie van de resultaten uit het project in de branche wordt besproken.

Parallel aan inhoudelijke projectstructuur zal er een programmamanagement-structuur worden opgezet. Hierin zal een programmamanager van ProRail de financiële begeleiding van het project organiseren met projectmanagers van de betrokken partijen en het ministerie.

Zelfsturende teams

Het onderzoekswerk wordt uitgevoerd en afgestemd in teamverband. Deze teams bestaan uit tenminste een persoon uit de verschillende organisaties die bij een thema betrokken zijn. Waar mogelijk werken de teamleden in elkaars nabijheid waardoor informeel overleg en afstemming makkelijk plaatsvindt en er op dit niveau niet veel formele structuren nodig zijn. Wekelijks praten de teams elkaar bij via een gezamenlijke 'stand-up' meeting die zowel fysiek als virtueel kan worden uitgevoerd.

Kernteam

Het kernteam is het commandocentrum van het project. In dit team wordt de procesmatige en inhoudelijke voortgang bewaakt, worden besluiten genomen die die richting van het onderzoek bepalen en wordt geborgd dat onderzoeksresultaten gericht blijven op het einddoel: het rekengereedschap voor trillingen. Om de sturende rol te kunnen invullen bevat dit team zowel de uitvoerders van het

onderzoek als de beoogde gebruikers (ingenieursbureaus) en ProRail. De programmamanager is bij voorkeur ook onderdeel van het kernteam.

Het kernteam komt op regelmatige basis samen om de sturing vorm te geven. De frequentie is afhankelijk van de status van het onderzoek, maar ligt typisch tussen de twee en acht weken.

Gebruikersgroep

De gebruikersgroep vertegenwoordigt de stem van de eindgebruikers van de resultaten van dit onderzoek. De onderzoekers presenteren eenmaal per half jaar de voortgang aan een bredere vertegenwoordiging van ProRail en de ingenieursbureaus. Het thema hierbij is vooruit te kijken naar het gebruik van de resultaten van het onderzoek in de dagelijkse praktijk.

10. Budget

Het begroten van onderzoeksprogramma's is complex. De inschatting van de benodigde inspanning op de verschillende onderdelen van de verschillende thema's hangt van de behaalde vooruitgang gedurende het project. Die voortuitgang bestaat uit een verbeterd inzicht en verbetering van modellen en meetmethodes. Op sommige onderdelen zal minder progressie kunnen worden behaald dan voorzien, en op andere onderdelen kunnen weer onvoorziene doorbraken worden bereikt. Kortom, het is eigenlijk onmogelijk om de vooruitgang in het project vooraf te voorspellen en daarmee een nauwkeurige schatting per onderdeel van het projectplan te maken. We denken echter wel dat het totale budget redelijk is in te schatten als we gebruik maken van het inzicht van veel verschillende partijen met kennis van zaken en van het feit dat de meevallers de tegenvallers kunnen opvangen.

Ramingsmethode

Het benodigde budget voor de uitvoering van dit onderzoeksprogramma is geraamd op basis van een inschatting van de benodigde inspanning in mensmaanden per thema en per onderdeel. Deze raming is tot stand gekomen met inbreng van de diverse stakeholders (onderzoeksinstituten, ingenieursbureaus en ProRail) en

geeft dus op dit moment de meest nauwkeurige raming van de totale omvang van de benodigde inspanningen.

Scenario's

De budgetraming is uitgewerkt voor drie scenario's: een minimaal, balans en optimaal scenario. Daarbij is per onderdeel uitwerkt welke stappen/taken er nodig zijn om het onderdeel uit te voeren. Deze uitwerking is in bijlage A weergegeven.

Voor elke stap is ingeschat hoe noodzakelijk die is om het onderdeel te realiseren. In het minimale scenario worden alleen de absoluut onmisbare stappen uitgevoerd om tot een model te komen, maar worden niet alle onderzoeksvragen goed beantwoord. In het balans-scenario worden de onmisbare en de zeer wenselijke stappen uitgevoerd, maar worden een aantal onderzoeksvragen maar ten dele beantwoord. In het optimale scenario worden alle onderzoeksvragen beantwoord.

Van mensmaanden naar kosten

Om tot een geldbudget te komen voor de scenario's is het noodzakelijk om de inspanning uitgedrukt in mensmaanden om te zetten naar euro's. De omrekenfactor hangt af van de wijze van contractering van de uitvoerenden (promotieplaats, detachering, inhuur, consultancy), het kennisniveau (en dus kostenniveau) van de uitvoerders en de looptijd van de contractering. De kostprijs per mensmaand bevindt zich in het bereik van €5.000 per maand voor een promovendus met een vier jaar contract bij een tweede geldstroomproject¹ tot €20.000 voor een senior consultant voor een beperkte adviesopdracht².

Het werk voor dit onderzoeksprogramma bestaat uit meetwerk, onderzoekswerk, begeleiding, ondersteuning en dat voor langere contractperiodes. Voor de kostenberekening gaan we daarom uit van een gemiddelde kostprijs van €12.500 per mensmaand.

Totale budgetraming

In de volgende tabel is de budgetraming uitgewerkt per thema voor de drie scenario's:

thema	scenario		
	minimaal	balans	optimaal
Baanlichaam	78	91	127
Ruimtelijke variatie	57	95	103
Tijdgedrag	18	53	83
Gereedschap	131	146	146
totaal	283	385	458
totaalkosten	3.5 M€	4.8 M€	5.7 M€

Hierbij komen nog de kosten voor deelname van projectleiders aan kernteam-bijeenkomsten en het projectmanagement. Dit is geraamd op in totaal 15 mensmaanden voor een periode van 4 jaar. Die inspanning is niet afhankelijk van het scenario. Tegen het maximale mensmaandtarief vraagt dit nog een budget van 0.3 M€.

In deze raming zijn we verder vanuit gegaan dat de zelfsturing in de teams geen extra budget vraagt en dat deelname aan de gebruikersbijeenkomsten voor eigen rekening is van de deelnemers. Verder is er ook geen aparte post voor investeringen opgenomen omdat er vanuit het project niet direct investeringen noodzakelijk zijn. Het gebruik van meetapparatuur is in principe gedekt zijn door de mensmaandtarieven die worden gehanteerd door bijvoorbeeld de ingenieursbureaus.

¹ Lumpsum bedrag gehanteerd door NWO in 2019.

² De genoemde bedragen zijn richtbedragen om een globale budgetschatting te maken. Hieraan kunnen geen rechten worden ontleend, noch door ProRail, noch door een in het kader van dit onderzoeksvoorstel te contracteren partij.

11. Belemmeringen, risico's en beheersmaatregelen

Voor de uitvoering van het project zijn een aantal belemmeringen en risico's geïdentificeerd. Deze worden hieronder benoemd, samen met de beheersmaatregelen om dit risico zoveel mogelijk te beperken.

De onderzoekers werken op hun eiland en verliezen de samenhang met de andere thema's uit het oog

Dit risico speelt met name in onderzoeksprogramma's waarin partijen afzonderlijk aan een werkpakket werken en onvoldoende met elkaar communiceren. In dit programma is dit risico beheerst door de projectstructuur. Per thema en onderdeel werken tenminste twee organisaties samen. En per thema zijn de samenstellende organisaties ook telkens anders. Dat maakt dat er binnen een organisatie ook altijd verbanden zijn met andere thema's en daardoor gaat de afstemming tussen de thema's redelijk vanzelf. Als tweede maatregel wordt een kernteam geformeerd dat de taak heeft om de focus op het eindresultaat te houden en waar nodig de ruimte heeft om sturend op te treden. Voor de balans zitten in deze kerngroep niet alleen de uitvoerders en ProRail, maar ook een vertegenwoordiging van de eindgebruikers/ingenieursbureaus.

Wetenschappelijke voortuitgang leidt niet noodzakelijkerwijs tot een praktische tool voor ProRail

In dit voorstel is uitdrukkelijk ruimte gemaakt voor de (software)ontwikkeling van een rekengereedschap in de vorm van een toolbox. Het rekengereedschap is de materialisatie van de wetenschappelijke inzichten: de toolbox moet worden gevoed met inzichten en resultaten uit de andere drie thema's. Door al vroeg in de tijdlijn te starten met dit thema en daar in het kernteam aandacht voor te vragen wordt voorkomen dat de toolontwikkeling een bijzaak wordt die pas op het laatste moment wordt ingevuld.

Samenwerken met een partij voor de ontwikkeling van de mobiele meetmethode voor dynamische stijfheden

Een goede meting van de dynamische stijfheid in de spoor/baanconstructie is cruciaal voor de modelvorming. Als deze grootte goed is gedefinieerd en er een goede meetmethode is ontworpen, dan moet deze in de praktijk worden gebracht. Dit vereist medewerking van een (commerciële) partij die

dit kan uitvoeren. Op dit moment is een dergelijke partij nog niet bij het project betrokken. Het risico bestaat dat deze partij niet kan worden gevonden of dat deze partij een flink beslag legt op het onderzoeksproject.

De beheersmaatregel voor dit risico is om dit onderdeel van het project als eerste op te starten en slechts verder te gaan als hiervoor een bevredigende samenwerking kan worden aangegaan met een marktpartij. Als het niet lukt moet de markt worden gestimuleerd om toch mee te doen of het onderzoeksprogramma worden aangepast.

Sleutelfiguren uit het onderzoek vallen weg

De kennis voor het uitvoeren van dit onderzoek is verspreid over verschillende organisaties en verschillende personen. Deze kennis is ook deels overlappend. Daarnaast is het uitdrukkelijk de bedoeling om samen te werken aan eenzelfde onderdeel met meerdere onderzoekspartijen. Dit garandeert een continue kennisoverdracht en afstemming van werkzaamheden. Daarmee kan het onderzoek doorgaan zonder al te veel vertraging als sleutelfiguren zouden wegvallen.

A. Bijlage: budgetraming projectthema's

In deze bijlage is de raming van het budget per thema en onderdeel uitgewerkt aan de hand van de uit te voeren taken/stappen. Voor elke stap is een score voor de noodzakelijkheid aangegeven op basis van de MoSCoW³-methode. Dit leidt tot drie scenario's. In het minimale scenario worden alleen de 'must-haves' uitgevoerd, in het balans-scenario komen daar de 'should-haves' bij en in het optimale scenario worden ook de 'could-haves' uitgevoerd. De 'won't-haves' zijn al uit deze raming gefilterd.

onderdeel/stap/taakbeschrijving	scenario			
	score	minimaal	balans	optimaal
Baanlichaam	78	91	127	
B1: Baanlichaam deelmodel		34	48	48
Literatuurstudie	M	2	2	2
Begrenzing baanlichaam bepalen	M	4	4	4
Implementatie baan-lichaammodel	M	14	14	14
Seismische sondering	M	9	9	9
validatie baanlichaam model	M	6	6	6
model => optimaal spoorontwerp	S		5	5
model => optimaal onderhoud	S		8	8
B2: Meting dynamische stijfheidsvariatie		32	32	32
ontwerp meetcampagne	M	9	9	9
uitvoeren meetcampagne	M	18	18	18
gegevens uitwerken voor validatie	M	5	5	5
B3: IJkspoor		11	11	11
eisen aan ijkspoor definiëren	M	3	3	3
locatie voor ijkspoor zoeken	M	2	2	2
ijkspoor karakteriseren en in gebruik	M	6	6	6
B4: Meetmethode monitoring		0	0	36
meetmethode monitoring ontwikkelen	C			9
meetmethode valideren op ijkspoor	C			7
meetmethode breder uitrollen	C			14
monitoregegevens uitwerken voor validatie	C			6

³ MoSCoW-methode (M=must have, S=should have, C=could have, W=won't have. <https://nl.wikipedia.org/wiki/MoSCoW-methode>)

onderdeel/stap/taakbeschrijving	scenario			
	score	minimaal	balans	optimaal
Ruimtelijke variatie	57	95	103	
R1: Hotspots onderzoeken	0	21	21	
bestaande locaties klachten	S		8	8
Bepalen locaties met lassen/defecten	S		4	4
detail meetonderzoek bij hotspots	S		10	10
R2: Meetmethode dynamische stijfheid	20	37	37	
definitie dyn. stijfheid opstellen	M	5	5	5
betere mobiele meetmethode	M	11	11	11
landelijke meetcampagne	S		17	17
gegevens uitwerken voor model	M	4	4	4
R3: Spoorgeometrie	15	15	15	
mobiele meetmethode korte golflengtes	M	8	8	8
meten spoorgeometrie hotspots	M	4	4	4
beschikbaar hebben spoorgeometriedata	M	4	4	4
R4: Maatgegeven /kritische baanonderdelen	8	8	15	
Inventariseren maatgevende discrete baanonderdelen	M	8	8	8
Opstellen specificaties/richtlijnen voor discrete baanonderdelen	C			8
R5: Transversele uitbreiding	14	14	14	
Noodzaak verfijning bodemmodel (=OURS) vaststellen	M	1	1	1
Trillingsuitbreiding in variabel bodemmodel verbeteren	M	12	12	12

onderdeel/stap/taakbeschrijving	scenario			
	score	minimaal	balans	optimaal
Tijdgedrag	18	53	83	
T1: Modelvorming	0	15	25	
Model maken van tijdgedrag en meteogedrag componenten	S		15	15
Gebruik emissiemodel om tijdgedrag componenten te onderzoeken	C			10
T2: Componenten baan	4	14	14	
literatuurstudie	M	4	4	4
meetonderzoek	S		10	10
T3: Niet te beïnvloeden parameters	4	4	4	
Literatuurstudie verandering in meteo/seizoen/waterstand	M	4	4	4
T4: Materieel	4	14	25	
(Literatuur)studie naar tijdgedrag rijdend materieel	S		5	5
Onderzoek bij leveranciers/materieelbeheerders	S		5	5
Vul database met materieelgegevens	M	4	4	4
Parameterstudie/simulatie om tijdgedrag materieel te onderzoeken	C			11
T5: Onderhoud baan	6	6	15	
Literatuurstudie naar tijdgedrag stijfheden i.r.t. onderhoud baan	M	6	6	6
Onderhoudsspecificaties opstellen	C			9

onderdeel/stap/taakbeschrijving	scenario			
	score	minimaal	balans	optimaal
Gereedschap		131	146	146
G1: Allesomvattend model		45	52	52
Opstellen basis voor allesomvattend model	M	16	16	16
Samenvoegen deelmodellen en overnemen delen OURS	M	9	9	9
Onzekerheidsanalyse van deelmodellen en allesomvattend model	M	12	12	12
Samenvoegen gebruikersinterface met rekendeel	S		7	7
Validatie allesomvattend model in een aantal case studies	M	8	8	8
G2: Voertuig/bovenbouw		24	24	24
Inventariseren interface en discretisatiebehoefte	M	5	5	5
Literatuurstudie opties deelmodel	M	4	4	4
Implementatie voertuig/bovenbouw interactie in model	M	8	8	8
Validatie deelmodel voertuig/bovenbouw	M	6	6	6
G3: Bovenbouw /baanlichaam		24	24	24
Inventariseren interface en discretisatiebehoefte	M	5	5	5
Literatuurstudie opties deelmodel	M	4	4	4
Implementatie bovenbouw/baanlichaam interactie in model	M	9	9	9
Validatie deelmodel bovenbouw/baanlichaam	M	7	7	7
G4: Baanlichaam/bodem		23	23	23
Inventariseren interface en discretisatiebehoefte	M	5	5	5
Literatuurstudie opties deelmodel	M	4	4	4
Implementatie baanlichaam/bodem interactie in model	M	9	9	9
Validatie deelmodelbaanlichaam/bodem	M	6	6	6
G5: Gebruikersinteractie		14	23	23
Inventariseren behoefte gebruikersinterface model	M	5	5	5
Definieer (formaat)invoergegevens en bepalingsmethode	M	3	3	3
Database samenstellen standaard invoergegevens	M	6	6	6
Implementatie gebruikersinterface voor model	S		8	8