



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Gebruik rekenmodel spoortrillingen

Colofon

© RIVM 2020

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

Arnaud Kok (auteur), RIVM
Arnold Koopman (auteur), Level Acoustics and Vibration
Theo Verheij (auteur), DGMR

Contact:
Arnaud Kok
MIL/LKG
Arnaud.kok@rivm.nl

Inhoudsopgave

Samenvatting—5

1 Inleiding—6

2 De rekenmethode—7

- 2.1 Algemeen—7
- 2.2 Toepassingsgebied—7
- 2.3 Bijzondere constructies—7
- 2.4 Beschikbaarheid bodemdata—8
- 2.5 Doorontwikkeling—11
- 2.6 Beknopte omschrijving eindresultaat—11

3 Prepareren invoergegevens en beoordelen rekenresultaten—13

- 3.1—13
- 3.2 invoer—13
 - 3.2.1 Rekenparameters—13
 - 3.2.2 Eigenschappen van het beoordelingspunt—13
 - 3.2.3 Eigenschappen van de bron—16
- 3.3 De stapsgewijze berekening—18
- 3.4 Het gebruik van de rekenresultaten—19
 - 3.4.1 Algemeen—19
 - 3.4.2 Eerste verwerking—19
 - 3.4.3 Bepaling toetswaardes—20
 - 3.4.4 Analyse betrouwbaarheid—20

4 Handleiding computerprogramma (OURS-UI versie 1.0)—22

- 4.1 Installatie—22
 - 4.1.1 Systeemeisen—22
 - 4.1.2 Installatie—22
 - 4.1.3 Locatie software en databestanden—23
- 4.2 De gebruikersinterface—24
 - 4.2.1 Opstartparameters—24
 - 4.2.2 De volledige gebruikersinterface—25
- 4.3 Bestandsformaten—26
 - 4.3.1 Modelleren—26
 - 4.3.2 Afspraken bestandsopbouw—27
 - 4.3.3 Het invoerbestand—27
 - 4.3.4 Het uitvoerbestand—28
 - 4.3.5 Detailresultaten—29
- 4.4 Architectuur UI—29
 - 4.4.1 Ontwikkelomgeving en taal—29
 - 4.4.2 Componenten—29
 - 4.4.3 Database—30
- 4.5 Beschrijving source code—31
 - 4.5.1 Datastructuur en flow—31

5 Meetvoorschriften voor uitbreiding model—33

- 5.1 Algemeen—33
- 5.2 Emissiemetingen—33

5.2.1	Algemeen—33
5.2.2	Vaststellen emissies—33
5.2.3	Bepalen bodemimpedantie—35
5.2.4	Verwerken data—36
5.2.5	Gebruik nabewerkingsscripts—36
5.2.6	Rapportage en opnemen data in database software—37
5.3	H _{gebouw} metingen—37
5.3.1	Algemeen—37
5.3.2	Meetvoorschrift H _{gebouw} in OURS—38
5.3.3	Verwerking van de meetdata—38

6 Referenties—40

Samenvatting

Dit document behoort bij het rekenmodel spoortrillingen. Het bestaat uit een omschrijving van het toepassingsgebied en de gebruikershandleiding bij de software. Tevens zijn er voorschriften opgenomen voor de uitbreiding van de dataset onderliggend aan het rekenmodel. Een separaat (Engelstalig) document geeft de wetenschappelijke onderbouwing van en gedetailleerde informatie over het rekenmodel.

Het toepassingsgebied van het rekenmodel kent beperkingen. Niet in alle situaties is dit model geschikt. De gebruiker zal zich er van moeten vergewissen dat de situatie welke berekend wordt binnen het toepassingsgebied ligt. Ook in situaties buiten dit toepassingsgebied zal het model resultaten produceren. Deze zijn echter niet betrouwbaar.

Ondanks de beperkingen van het toepassingsgebied is het model is geschikt voor de meeste voorkomende situaties, zoals doorgaand spoor. Als resultaat worden veel gebruikte trillingsparameters geleverd. Daarbij worden resultaten op de fundering, in een gebouw en in het maaiveld geproduceerd.

1 Inleiding

Het rekenmodel spoortrillingen is ontwikkeld om berekeningen te kunnen uitvoeren waarmee verwachte trillingsniveaus door treinpassages kunnen worden vastgesteld. Met deze versie worden professionals op het gebied van trillingen in staat gesteld om in veel voorkomende situaties berekeningen op een uniforme wijze uit te voeren, om verwachte trillingsniveaus in het maaiveld, op de fundering en in een gebouw vast te stellen.

De aanleiding van de ontwikkeling van dit model is dat er momenteel geen geschikt en uniform model aanwezig is terwijl die behoefte er wel is.

De ontwikkeling van het model is gebaseerd op een inventariserende studie [1], waarin gekeken is naar een groot aantal bestaande methodes en mogelijk nader te ontwikkelen methodieken. In de zomer van 2018 is gestart met het benodigde onderzoek om het model te bouwen. In de toekomst zal het model verder uitgebreid en verbeterd worden.

Het uniforme rekenmodel spoortrillingen kent een zeker toepassingsgebied. De methode is geschikt voor situaties die binnen dat toepassingsgebied vallen. Wanneer buiten het toepassingsgebied gerekend wordt, zal het model wel resultaten produceren, maar deze resultaten kunnen niet als betrouwbaar worden beschouwd. In hoofdstuk 2 van dit document wordt het toepassingsgebied nader toegelicht.

De software applicatie is 'open source'. Dit houdt in dat iedereen de code kan inzien. Omdat sprake is van een uniform rekenmodel zullen berekeningen altijd met de "officiële" versie moeten worden uitgevoerd. Verbeteringen in de code zijn mogelijk. Deze kunnen voorgelegd worden aan de beheerder¹ van het model, zodat deze kan beslissen om deze verbeteringen al dan niet te integreren in de officiële versie.

Leeswijzer

Deze handleiding gaat in hoofdstuk 2 in op rekenmethode op hoofdlijnen en het toepassingsgebied van deze methode. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de wijze waarop data geprepareerd en de resultaten beoordeeld moeten worden gepresenteerd. Hoofdstuk 4 gaat in op de werking van het computerprogramma zelf. Uiteindelijk volgt in hoofdstuk 5 meetvoorschriften waarmee aanvullende data ten behoeve van uitbreiding van het model verkregen kan worden. Aangezien dit document een handleiding is ontbreekt een conclusie.

¹ Momenteel RIVM

2 De rekenmethode

2.1 Algemeen

Het rekenmodel is ingericht om berekeningen uit te kunnen voeren voor doorgaande treinen op het hoofdspoor. Het doel van het model is om berekeningen te kunnen uitvoeren om te onderzoeken wat een kans is op een bepaald trillingsniveau in een gebouw en op de fundering. De berekende parameters komen overeen met veelgebruikte toetsingscriteria voor trillingen.

De bedoeling van het model is dat deze landelijk toepasbaar is. Er zijn echter situaties waar rekenresultaten onbetrouwbaar of niet beschikbaar zijn. Zo is bijvoorbeeld het model momenteel niet geschikt voor berekeningen bij lokaal spoor, in complexe situaties bij emplacementen en bij locaties met veel wissels vlak bij grote stations. Het verdere toepassingsgebied, de beperkingen voor bijzondere constructies en bodemdata en de mogelijkheden voor verdere ontwikkeling van het model zijn in dit hoofdstuk nader uitgewerkt.

2.2 Toepassingsgebied

Het toepassingsgebied is in de huidige versie beperkt tot doorgaand spoor en met een groot aantal treintypes. Er zijn enkele reizigerstreintypes die nog niet bemeten zijn en waarvan het treintype ook onvoldoende lijken op een ander treintype. De treinen waarmee met de versie 1.0 van het model gerekend kan worden zijn weergegeven in bijlage 1.

Het model kent geen invoer voor spoorsloten. Het generieke uitgangspunt is de aanwezigheid van een spoorvloot in het geval van een slappe bodem en geen spoorvloot bij een harde bodem. Dit geldt tevens voor de aan- of afwezigheid van een grondlichaam: een talud van 1 of 2 meter hoog bij slappe grond en geen of 1 meter talud bij stijve grond.

Het rekenmodel is niet gevalideerd voor situaties met veel wissels en veel parallelle sporen. Bij emplacementen of vlak bij grote stations wordt er veel door wissels gereden en lopen er veel sporen parallel aan elkaar. Bij dergelijke locaties kunnen de berekende resultaten (zeer) onbetrouwbaar zijn.

2.3 Bijzondere constructies

Indien er bijzondere constructies aanwezig zijn dan zal het rekenmodel daar geen rekening mee houden. Hierdoor zijn rekenresultaten bij dergelijk constructies niet betrouwbaar. In de toekomst kan het model uitgebreid worden met dergelijke constructies. In de huidige versie van het model zijn de volgende elementen/constructies niet meegenomen:

- Afwijkende dwarsliggers (anders dan de reguliere balken zoals de houten bielzen en de betonnen NS90)
- Verdiepte ligging (zoals een spoor in een bak) en tunnels
- Sterk verhoogde ligging en kunstwerken
- Maatregelen aan de bron

- Maatregelen in de overdracht
- Sommige treintypes

De volgende elementen zijn beperkt meegenomen:

- ES lassen
- Overwegen
- Wissels

Met beperkt geïmplementeerd wordt bedoeld dat er generieke verhoogde emissiewaarden worden gehanteerd. De mate van verhoging is gebaseerd op het schadeprotocol[3] van ProRail en is vastgesteld op een factor 1.5. Voor een meerge vaststelling zijn metingen conform het meetprotocol zoals beschreven in hoofdstuk 5 noodzakelijk.

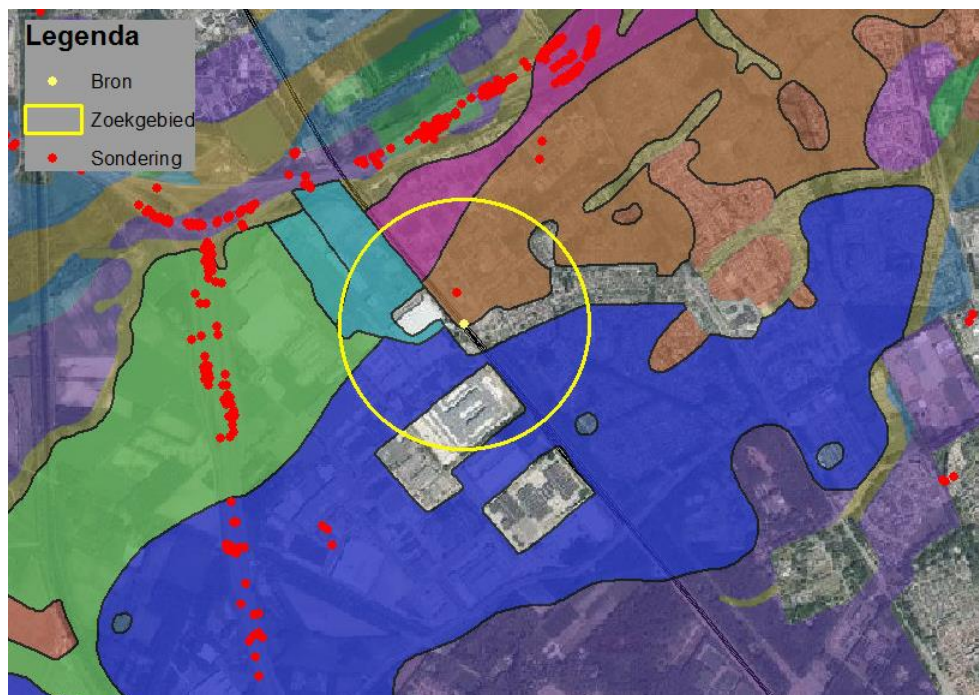
2.4 Beschikbaarheid bodemdata

Voor bodemdata maakt het rekenmodel gebruik van sonderingen die zijn opgenomen in de basisregistratie ondergrond (BRO). Daarnaast wordt gebruik gemaakt van een geomorfologische ondergrondkaart. Het rekenmodel zoekt in een straal van 600 meter rond de het bronpunt² naar zowel sonderingen als gebieden in de ondergrondkaart. Daar waar sonderingen worden gevonden, worden deze direct gebruikt. Als aanvullende stap wordt gekeken naar de gebieden in de ondergrondkaart binnen 600 meter. Per gevonden gebied wordt gekeken naar sonderingen binnen dat gebied.

Het is mogelijk dat er zowel binnen 600 meter van bron geen sondering aanwezig is en dat er geen sondering is in de gevonden gebieden. In dat geval zal er geen resultaat worden berekend. De geomorfologische ondergrondkaart kent geen gebieden in stedelijk gebied. Hier is het risico groter dan er geen sondering te vinden is en er niet gerekend kan worden.

Een voorbeeld van sonderingen en gebieden is hieronder weergegeven:

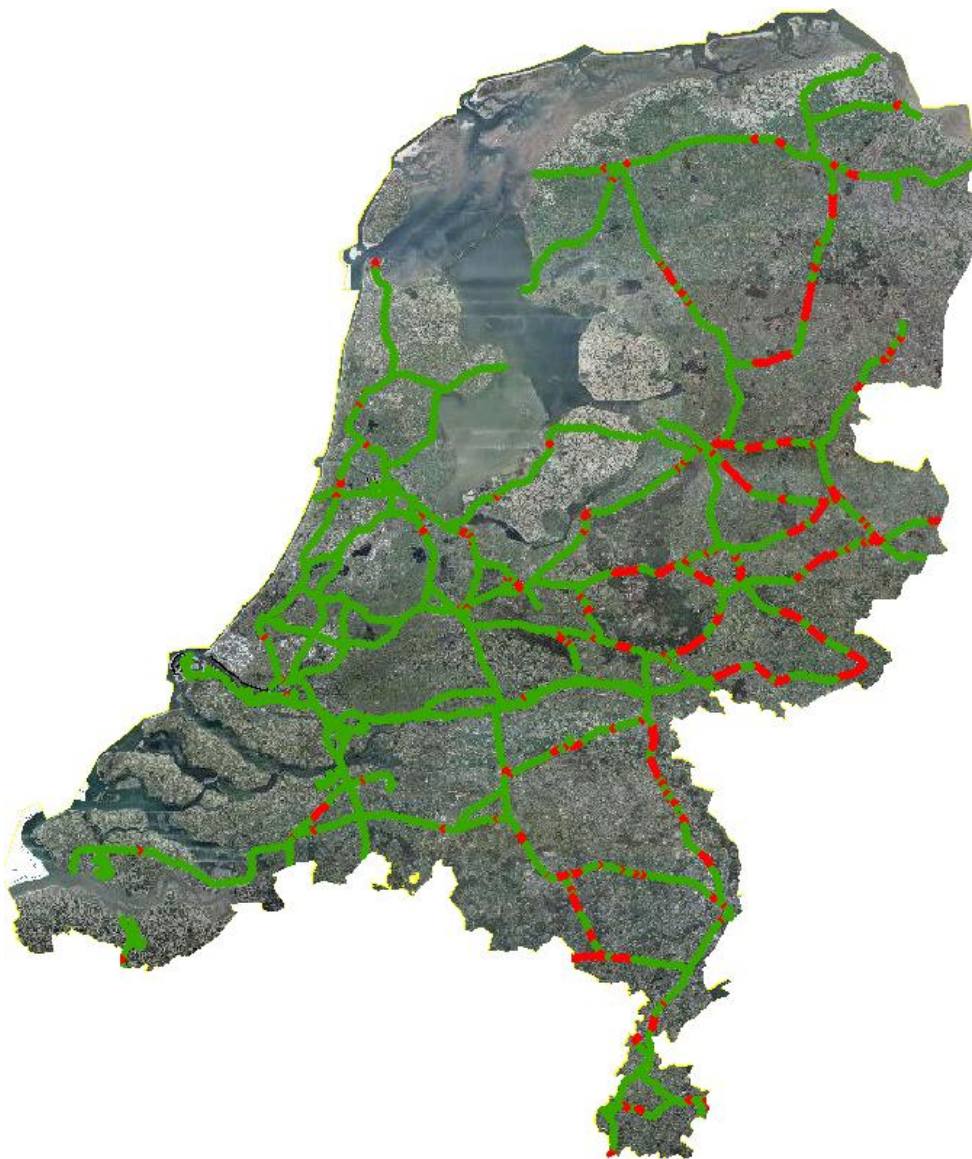
² Met bronpunt wordt bedoeld de locaties op het spoor dat in de berekening als emissiepunt wordt gebruikt. Dat het punt op het spoor of gedeelte van het spoor dat het dichtst bij het beoordelingspunt ligt.



Figuur 1: Voorbeeld van beschikbaarheid sonderingen en geomorfologische gebieden.

In Figuur 1 is te zien dat er binnen 600 meter 1 sondering beschikbaar is. Binnen die 600 meter vallen echter ook vijf geomorfologische gebieden. In die gebieden zijn tevens sonderingen aanwezig. Deze worden allen meegenomen. Tevens is te zien dat er in sterk bebouwd gebied geen geomorfologische gebieden aanwezig zijn.

In de loop der tijd zal het aantal beschikbare sonderingen blijven toenemen, waarmee de dekking wordt vergroot. Bij gebruik sonderingen zoals gepubliceerd begin januari 2020 is de dekking rond de 85% van het spoor. Een globaal overzicht is hieronder weergegeven.



Figuur 2: Globale dekking rekenmodel op basis geschikte sonderingen in de BRO (peildatum januari 2020)

In het kader van de projecten waarvoor het rekenmodel bedoeld is, zijn vaak al sonderingen uitgevoerd op het moment dat het rekenmodel wordt ingezet. Het is zaak deze sonderingen bij de BRO aan te bieden (conform de Wet Basisregistratie Ondergrond (BRO)). Na opname in de BRO zijn deze in een volgende download beschikbaar op PDOK voor gebruik in het rekenmodel. De update frequentie van de download op PDOK bedraagt momenteel 1 keer per week. Indien dergelijke sonderingen nog niet zijn uitgevoerd en het rekenmodel geen andere sonderingen vindt, is het zaak sonderingen te laten uitvoeren en die aan te bieden bij de BRO voor het rekenmodel.

2.5 Doorontwikkeling

Er zijn voor het rekenmodel een aantal doorontwikkel mogelijkheden. Hiermee kan het toepassingsgebied verruimd worden, maar kan het rekenmodel ook gebruikt worden voor berekeningen waarvoor het in deze fase niet primair bedoeld is. Onderstaand overzicht geeft de mogelijkheden weer. Het is niet gezegd dat deze ontwikkelingen daadwerkelijk plaats gaan vinden.

Ontwikkeling	Methode
Toevoegen treintypes	Uitvoeren metingen conform meetprotocol
Toevoegen trams	Uitvoeren metingen conform meetprotocol, aanvullend metingen alternatieve bovenbouwconstructies
Bepalen toeslag ES lassen en wissels	Uitvoeren metingen conform meetprotocol
Maatregelen aan de bron	Uitvoeren metingen conform meetprotocol
Maatregelen in de overdracht	Uitbreiden FEM ³ -module voor 3d FEM-berekening
Toevoegen afwijkende constructies	Metingen conform meetprotocol
Toevoegen kunstwerken	Nader (fundamenteel) onderzoek
Toevoegen tunnels	Nader (fundamenteel) onderzoek
Bodemgeluid ⁴ als uitvoer	Implementatie rekenregels

2.6 Beknopte omschrijving eindresultaat

Het rekenmodel levert per bron-ontvanger (vaak een gebouw)-combinatie een aantal resultaten op. Er worden getallen gegenereerd die representatief zijn voor in het gebouw, op de fundering en op het maaiveld.

Afhankelijk van de beoordelingslocatie worden de volgende parameters berekend:

V_{max}: De hoogste effectieve trillingssterkte, conform Bts (zie [4]) [dimensieloos]

V_{rms}: De kwadratisch gemiddelde (root-mean-square) effectieve trillingssterkte tijdens passages, conform [4]

V_{per}: De kwadratisch gemiddelde trillingssterkte gedurende de beoordelingsperiode, gewogen naar de duur van de blootstelling. [dimensieloos]

V_{top}: Grootste momentane pieksterkte [mm/s], ter beoordeling van de kans op schade (SBR A)

Bij deze generieke waarden hoort aanvullende informatie. Dit zijn:

Dir: Dominante trillingsrichting

³ Module dat reken volgens een eindige elementen methode (FEM in het Engels) om de overdracht te bapelen.

⁴ Met bodemgeluid wordt geluid bedoeld dat wordt opgewekt door het in trilling brengen van bijvoorbeeld muren/vloeren of plafonds in een woning. De oorsprong van dit geluid ligt daarmee in de trillingen door de bodem.

F_{dom}: Dominante trillingsfrequentie

Sigma: Standaarddeviatie interval van het eindresultaat

Variatiecoëfficiënt: De absolute deelbijdrage in de onzekerheid van bron, overdracht en gebouw

Bovenstaande parameters worden gegenereerd voor de berekening van alle treinen en voor goederen- en reizigerstreinen apart. In onderstaand overzicht is aangegeven voor welke positie welke parameter wordt berekend.

Tabel 1: Overzicht uitvoerparameters

Parameter	Gebouw	Fundering	Maaiveld
V _{max}	✓	✓	
V _{max,Dir}	✓	✓	
V _{max,Fdom}	✓	✓	
V _{max,sigma}	✓	✓	
V _{per}	✓		
V _{per,sigma}	✓		
V _{top}		✓	
V _{top,Dir}		✓	
V _{top,Fdpm}		✓	
V _{top,Vd}		✓	
V _{top,sigma}		✓	
V _{rms}			✓
V _{rms,sigma}			✓
Variatiecoëfficiënt	✓	✓	✓

In sectie 3.4 is aangegeven op welke wijze de getallen geïnterpreteerd moeten worden.

3 Prepareren invoergegevens en beoordelen rekenresultaten

3.1

Wanneer berekeningen uitgevoerd gaan worden zal een invoerbestand gegenereerd moeten worden. Dit invoerbestand bevat alle gegevens die de gebruiker kan meegeven aan het computerprogramma waarmee gerekend kan worden. Voorbeelden zijn de locatie waar gerekend wordt en welke type treinen er rijden.

Nadat het invoerbestand is gemaakt kan het computerprogramma de berekening uitvoeren. Uit die berekeningen volgt een zeker rekenresultaat. Dit rekenresultaat zal door een deskundige beoordeeld moeten worden. Er volgt namelijk een noodzakelijk (niet te automatiseren) nabewerking die door de deskundige uitgevoerd moet worden. Ook wordt er informatie gegeven over de betrouwbaarheid van het rekenresultaat zodat een deskundige kan beoordelen of de berekening voldoende bruikbaar is voor het doel waarmee de berekening is uitgevoerd.

Dit hoofdstuk gaat in op de wijze waarop het invoerbestand gegenereerd kan worden, inclusief de keuzevrijheid van de modelleur. Vervolgens over de stappen die het computerprogramma neemt om tot een berekende waarde te komen en uiteindelijk wordt ingegaan op de manier waarop het resultaat na bewerkt en beoordeeld moet worden.

3.2 **invoer**

3.2.1 *Rekenparameters*

Het rekenmodel kent een tweetal typen invoergegevens die nodig zijn voor de berekeningen. Het betreft gegevens over de ligging en eigenschappen van het beoordelingspunt en de eigenschappen van de bron.

Bij de gegevens over de bron en het beoordelingspunt horen verschillende invoerparameters. Sommige invoerparameters zijn verplicht en andere zijn optioneel. Hoe meer gegevens bekend en ingevoerd worden, hoe betrouwbaarder het resultaat wordt. Wel geldt dat als er voor een optionele parameter geen goede informatie beschikbaar is, deze het beste leeg gelaten kan worden. Het computerprogramma maakt dan zelf een inschatting (indien nodig).

In deze sectie wordt ingegaan op de benodigde gegevens bij het beoordelingspunt en de bron. De exacte syntax van het invoerbestand voor het computerprogramma is opgenomen in de handleiding van de gebruikersinterface (hoofdstuk 4).

3.2.2 *Eigenschappen van het beoordelingspunt*

Het beoordelingspunt omschrijft de te beoordelen locatie. Het gaat om de coördinaten en de eigenschappen van het object ter hoogte van die coördinaten. Alleen de coördinaten zijn verplichte invoer in het rekenmodel. De overige parameters zijn optioneel en hebben tot doel het rekenresultaat nauwkeuriger te kunnen bepalen. In zijn

algemeenheid zullen de hoogte van het gebouw en het bouwjaar bekend zijn. Het wordt aanbevolen om minimaal die waarden in te voeren.

Bij de berekening voor bebouwing zal het beoordelingspunt ter hoogte van de dichtstbijzijnde gevel van het gebouw tot het spoor geplaatst moeten worden. Bij meerdere sporen aan meerdere zijdes van het gebouw kan het noodzakelijk zijn meerdere beoordelingspunten te gebruiken.

Bij het beoordelingspunt horen de volgende (optionele) eigenschappen van het bijbehorende gebouw.

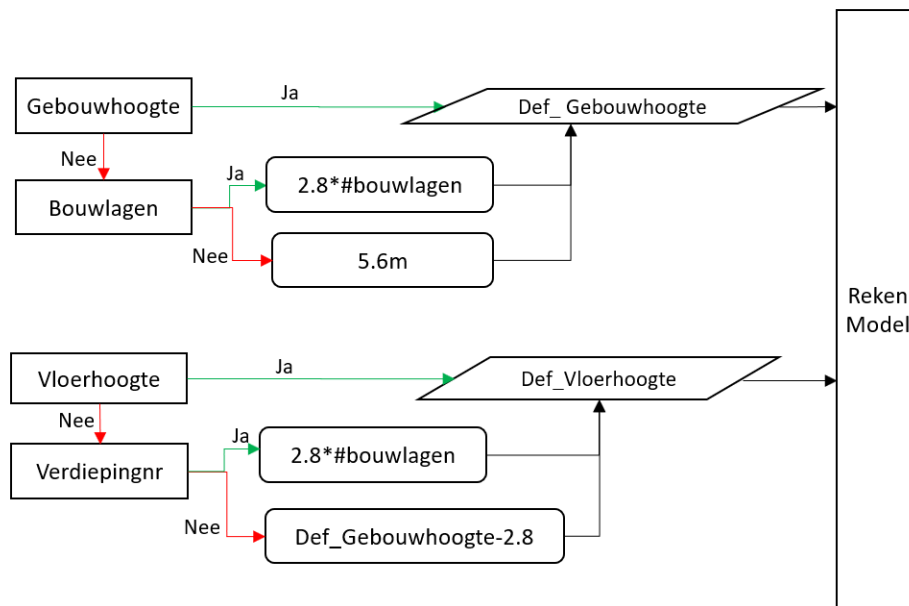
Tabel 2: Coördinaten en eigenschappen van het gebouw

Parameter	Term in invoerbestand	Omschrijving	Optioneel
Coördinaten	Location	Ligging van het beoordelingspunt	Nee
BAG ID	BagId	ID van het te beoordelen pand	Ja
Bouwjaar	YearOfConstruction	Bouwjaar van het pand	Ja
Gebouwhoogte	buildingHeight	Hoogte van het gebouw in meter	Ja
Aantal Bouwlagen*	numberOfFloors	Aantal bouwlagen van het gebouw	Ja
Vloerhoogte*	heightOfFloor	Hoogte van het beoordelingspunt	Ja
Verdieping nummer	Floornumber	Verdieping waarop beoordeeld wordt. Meestal de hoogste verdieping. De waarde 0 geeft een beoordeling op de begane grond aan en de waarde 1 op de eerste verdieping etc.	Ja
Appartement	Apartment	Is sprake van een appartement?	Ja
Wandlengte	WallLength	Diepte van gebouw ten opzichte van het spoor	Ja
Gevellengte	FacadeLength	Lengte van de gevel evenwijdig aan het spoor	Ja

*Deze waarde kan genegeerd worden door het programma indien er een nauwkeurigere invoer (hoogte in meter) wordt gebruikt.

De hoogte van een gebouw kan worden ingevoerd door uit te gaan van hoogte in meters of van aantal bouwlagen. Bij gebruik van aantal bouwlagen gaat het model uit van 2.8 meter per bouwlaag. Indien zowel aantal bouwlagen als bouwhoogte wordt ingevoerd, wordt de bouwhoogte gebruikt en de waarde over het aantal verdiepingen

genegeerd. Iets vergelijkbaars geldt voor de parameters verdiepingnummer en vloerhoogte. De vloerhoogte wordt berekend aan de hand van het verdiepingnummer, tenzij er een vloerhoogte wordt ingevoerd. In dat geval wordt de waarde van verdiepingnummer genegeerd. Dit is als volgt geïllustreerd:



Figuur 3: Overzicht keuzeboom gebouw en vloerhoogte.

In Figuur 3 is te zien dat wanneer gebouwhoogte of vloerhoogte ingevoerd worden, deze parameters worden gebruikt en overige velden genegeerd. Indien gebouwhoogte niet is ingevoerd en ook geen vloerhoogte bekend is, wordt uitgegaan van een hoogte van 5.6 meter. Dit is de definitieve hoogte die het rekenmodel gebruikt. Iets vergelijkbaars geldt voor vloerhoogte en verdiepingnummer. In dat geval wordt echter, als niets wordt ingevuld, de gebouwhoogte (verminderd met 2.8 meter) gebruikt die in het schema deel daarboven is bepaald. Er wordt in dat geval dus geen default waarde gebruikt.

Van alle variabelen kan ook een variabiliteit worden ingevoerd, dat is de onzekerheidsmarge van de ingevoerde parameter. Deze marges zijn geen verplichte invoer. Deze onzekerheidsmarge is als volgt gedefinieerd:

- Voor lengtes: twee keer de "standaard deviatie". Bijvoorbeeld wandlengte = 10 en var_wandlengte = 2 betekent dat de gebruiker verwacht dat met 95% zekerheid de wandlengte tussen 8 en 12 meter ligt
- Voor aantallen/verdiepingnr: twee keer de "standaard deviatie". Dit getal hoeft geen geheel getal te zijn.
- Voor keuzes ja/nee: de kans dat de keuze juist wordt geacht, als een fractie van 1. Mogelijke waarden: 1 (ik weet het zeker), 0.9 (ik weet het bijna zeker), 0,75 (niet zeker), 0,5 (geen idee) en waarden daar tussenin.

Naast het toevoegen van informatie over het gebouw is het ook mogelijk om specifieke informatie over de vloer bij te voegen. Dit is mogelijk voor de volgende parameters:

Tabel 3: Specifieke informatie over de vloer

Parameter ⁵	Omschrijving
frequenciesQuarterSpan	Frequenties met een knoop in het midden van de vloer (en buik rond een kwart van de overspanning, dus met een even aantal buiken in de overspanningsrichting)
frequenciesMidSpan	Frequenties met een buik in het midden van de vloer (dus met een oneven aantal buiken in de overspanningsrichting)
floorSpan	Overspanningslengte van de vloer, meestal de breedte van een kamer
woodenFloor	Draagvloer van hout ja/nee

Er wordt geadviseerd in ieder geval de `woodenFloor` en de `floorSpan` op te geven indien dit enigszins mogelijk is. Dit kan eventueel met kans resp. onzekerheidsmarge. Indien frequenties worden opgegeven, worden de parameters `woodenFloor` en `floorSpan` niet meer gebruikt. De lijst met frequenties van de vloer kan gebruikt worden bij een specifiek gebouwontwerp. Aangeraden wordt wel om eerst goed kennis te nemen van hoe deze lijst gebruikt wordt in het programma. Zonder specialistisch kennis over de dynamica en het computermodel zelf wordt sterk aangeraden hier een waarde in te voeren.

3.2.3

Eigenschappen van de bron

Als invoer voor de bron worden de eigenschappen van het spoor bedoeld. In de onderstaande tabel 4 staat een overzicht met de parameters die voor de bron moeten of kunnen worden ingevoerd. Daarna worden nog enkele aandachtspunten bij de invoer van spoorbanen toegelicht.

Tabel 4: Eigenschappen van de bron

Parameter	Term in invoerbestand	Omschrijving	Optioneel
Ligging	Location	Coördinaten van de het spoor	Nee
treintype	Material_id	Getalswaarde dat het type trein weergeeft (zijn bijlage 1)	Nee
Intensiteit (dag, avond en nacht)	qd, qe, qn	Aantallen treinen per uur per periode (dag, avond, nacht) over de betreffende spoorbaan, incl. categorie treinen	Nee
Snelheid (dag, avond en nacht)	vd, ve, vn	Snelheid van de betreffende treintype in een periode	Nee
Type spoor	sourcetype	Het spoorgedeelte is: doorgaand spoor, een ES las, een wissel of een overweg	Nee

⁵ Hier gelijk aan de term in het invoerbestand

Kilometrering spoor	kmstart kmend	Begin en eind kilometreringen van het spoor. Deze mogen fictief zijn, mits de opdeling in spoorgedeeltes uiteindelijk dezelfde begin- en eind-kilometrering hebben	Nee
Spoorligging	CgeoX CgeoY CgeoZ	Factoren waarmee de bronkracht vermenigvuldigd wordt vanwege andere dan gemiddelde spoorligging	Ja
Bovenbouw	Superstructure	Bovenbouw van het spoor	Ja
Onderbouw	Substructure	Onderbouw van het spoor	Ja

In het model zijn nog de parameters 'superstructure' en 'substructure' opgenomen. Momenteel kan alleen gekozen worden voor de waarde 1. Deze parameters zijn opgenomen zodat in de toekomst het model mogelijk uitgebreid kan worden met waarden voor onder- en bovenbouw.

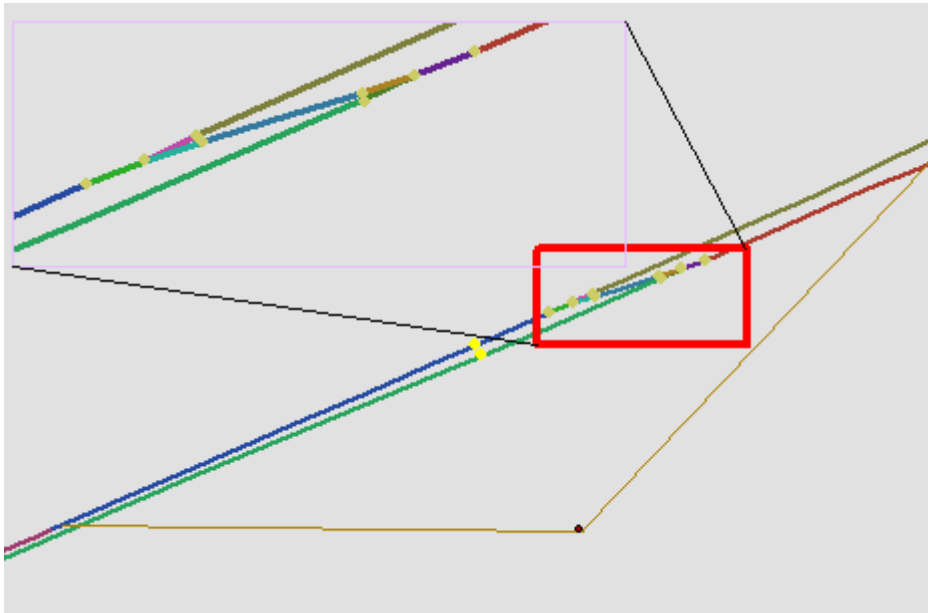
Het rekenmodel werkt met polylijn spoorbanen als basis. Het kan handig zijn om bij het invoeren meerdere polylijnen (sporen die vlak langs elkaar lopen) samen te voegen tot 1 lijn. In veel gevallen zal een gebruiker meerdere polylijnen invoeren als er meerdere sporen zijn. Voor ieder ingevoerde polylijn zal het rekenmodel een resultaat berekenen (mits een deel van de lijn binnen 300 meter uit het beoordelingspunt ligt). Uiteraard mag het relatieve afstandsverschil tussen sporen van de ene lijn naar de andere niet teveel afwijken. Het samenvoegen tot 1 lijn kan dus alleen als woningen niet te dicht bij de sporen staan.

Indien er sprake is van meerdere lijnen, dan dient de gebruiker hier rekening mee te houden met het eindresultaat. Om een V_{per} te bepalen moeten dan resultaten van meerdere lijnen bij elkaar worden opgeteld (kwadratisch).

Een volgend aandachtspunt is dat het rekenmodel een resultaat berekent per spoordeel. Voor het sommeren bij de V_{per} moet dan per spoorbaan het maatgevende resultaat worden genomen (zie ook sectie 3.4.2). Indien er veel spoordelen zijn zullen er veel bron-beoordelingspunt combinaties ontstaan. Bij een groot aantal van dergelijke combinaties zullen rekentijden oplopen en wordt de na verwerking ingewikkelder.

Bij gebruik van gedetailleerde spoorsegmenteringsdata zoals in het geluidregisterspoor⁶ kan het zijn dat er een groot aantal punt-bron-combinaties ontstaan. Om rekentijden te beperken zal het nuttig zijn om doorgaande sporen samen te voegen. Dit is geïllustreerd in Figuur 1.

⁶ Deze data staat op www.geluidregisterspoor.nl. Het wordt afgeraden om gebruik te maken van de intensiteiten en snelheden uit dit bestand. Deze zijn voor grote delen van Nederland niet actueel.



Figuur 4: Overzicht vaststellen bronzpunten op basis van spoorweggedeelten.

In de figuur is te zien dat er een wissel in het spoor nabij het beoordelingspunt ligt. De twee (felle) lichtgele punten zijn de punten die als doorgaand spoor het dichtst bij de beoordelingspunt liggen. Veelal zullen deze de maatgevende waarden geven. Daarnaast zijn er een groot aantal spoorsegmenten rond de wissel. Dit levert 6 tot 9 extra bronzpunten op afhankelijk van of er treinen door de wissel rijden. Dit is te zien in de detailweergave.

Indien er sprake is van een ES las, wissel of overweg dan wordt deze als apart spoor gemodelleerd.

3.3 De stapsgewijze berekening

Het rekenprogramma kent een viertal stappen die doorlopen worden. De eerste stap is het zoeken van de juiste bronzpunten en bijbehorende emissiewaarden uit de emissiedatabase. Aan de hand van de ligging van de bronzpunten en de beoordelingspunten wordt als stap 2 de bodemmodule aangeroepen. Deze berekent mogelijke bodemscenario's per bronzpunt. Indien er meerdere bron-beoordelingspuntcombinaties zijn met een zelfde scenario, dan wordt dit geregistreerd zodat in een latere fase de overdrachtsberekening van dat scenario voor beide bron-beoordelingspuntcombinaties gebruikt kan worden. Het berekenen van bodemscenario's kan enige tijd duren. Afhankelijk van het aantal beschikbare sonderingen en de complexiteit van de ondergrond tussen 10 seconden en 15 minuten. Gemiddeld vergt één berekening 40 seconden⁷. Bij het beschikbaar komen van meer sonderingen zal deze rekentijd toenemen.

De derde stap is het uitvoeren van de FEM-berekeningen. Nadat de bodemscenario's zijn vastgesteld wordt een FEM-berekening aangeroepen. Per scenario wordt er één FEM-berekening uitgevoerd. Voor optimalisatie wordt de FEM-berekening door de FEM-module

⁷ Berekend op een laptop met AMD Ryzen 5 PRO 3500U met 16 Gb geheugen en SSD schijf.

uitgevoerd met een bepaalde afstand (tussen bronpunt en beoordelingspunt). Indien een scenario voor meerdere bron-beoordelingspuntlocaties geldt, dan wordt de grootste afstand genomen. De FEM levert resultaten op voor alle afstanden tot aan de maximale ingestelde afstand. Het beperken van de rekenafstand heeft sterke performance voordelen. De rekentijden van de FEM-module zijn afhankelijk van de complexiteit van de bodem en de rekenafstand. Typische rekentijden zijn 1 minuut voor een eenvoudige bodem en 50 meter afstand en 1 uur voor een complexe bodem en 250 meter afstand. In het laatste geval is ook veel geheugen (minimaal 16Gb) vereist van de computer.

Nadat de FEM-module gereed is, start de vierde stap met de naverwerkingscripts. Deze scripts combineren alle geleverde informatie uit bodem, FEM-berekeningen en emissiedatabase om tot resultaten te komen voor de parameters zoals toegelicht in paragraaf 2.6. De naverwerking duurt per bron-beoordelingspunt combinatie minder dan 1 minuut.

3.4 Het gebruik van de rekenresultaten

3.4.1 Algemeen

Het rekenmodel produceert een aantal resultaten, zoals genoemd in sectie 2.6. Om deze te beoordelen zullen deze door de gebruiker zelf verwerkt moeten worden. Het gaat daarbij om het beschouwen van de effecten van meerdere bronnen op een beoordelingspunt en het bepalen van de grootheden waarmee een toetsing kan plaatsvinden. Tevens kan inzicht verkregen worden in de betrouwbaarheid van de verschillende onderdelen van een rekenmodel zoals die voor een bepaalde bron-beoordelingspunt combinatie geldt.

3.4.2 Eerste verwerking

Indien er op één beoordelingspunt resultaten door het rekenmodel zijn berekend voor meerdere sporen of spoorgedeeltes, dan kan de gebruiker de V_{\max} , de V_{top} en de V_{rms} bepalen door de hoogste waarde te nemen van alle sporen(gedeeltes). De V_{per} kan worden bepaald door de individuele bijdragen van sporen kwadratisch te sommeren.

Bij het sommeren van een V_{per} moet per spoor de hoogste waarde gebruikt worden. Indien een spoor was opgedeeld in meerdere spoorgedeeltes, dan levert dat spoor meerdere resultaten op. In dit geval is het belangrijk dat er maar één resultaat wordt gebruikt van die spoorlijn bij de optelling. De achtergrond is dat iedere trein slechts een keer mee telt in de V_{per} -bepaling van het rekenmodel. Dezelfde trein, die over meerdere spoorsegmenten rijdt, mag maar één keer mee tellen in de optelling.

De bepaling van de V_{per} is een iets andere benadering dan bij sommige metingen waarbij er per 30 seconden een resultaat wordt gegenereerd. Dan kan 1 trein in twee periodes vallen, maar kunnen ook twee treinen in één periode vallen. Hier wordt iedere trein als één gebeurtenis beschouwd.

3.4.3 *Bepaling toetswaardes*

Na de eerste verwerking kunnen toetswaardes door de gebruiker worden bekerend. Voor de toetswaardes kan gekeken worden naar toetsing van hinder veroorzakende trillingen en toetsing van bouwkundige schade.

Voor de toetsing van hinder worden V_{\max} en V_{per} van het gebouw gebruikt. De berekende waardes voor V_{\max} en V_{top} zijn mediaanwaardes: de kans is 50% dat de werkelijke waarde hoger is. Om tot een toetswaarde te komen wordt een onzekerheidsmarge toegevoegd. Daartoe worden de "standaard deviatie" V_{\max_sigma} en $V_{\text{per_sigma}}$ gebruikt. Bij hinder veroorzakende omgevingsbeïnvloeding, zoals trillingen, is het gangbaar een 95% bovengrens als toetswaarde te hanteren. Dat betekent dat de toetswaardes als volgt berekend worden:

- $V_{\max, \text{toets}} = V_{\max} + 1,66 * V_{\max_sigma}$
- $V_{\text{per}, \text{toets}} = V_{\text{per}} + 1,66 * V_{\text{per_sigma}}$

Voor de toetsing van bouwkundige schade wordt de V_{top} op de fundering gebruikt. Ook hiervoor geldt dat de berekende V_{top} een mediaan van de prognose is en de onzekerheid daarin, $V_{\text{top_sigma}}$, in rekening dient te worden gebracht.

Voor schade veroorzakende omgevingsbeïnvloeding waarbij de veiligheid niet in het geding is, is het gangbaar een 1% bovengrens te hanteren wat betreft de kans op optreden van schade. De schade richtlijn SBR A stelt grenswaarden waarin een grote veiligheidsmarge zit. Dit gebeurt vanwege de grote variatie tussen gebouwen wat betreft trillingsgevoeligheid. Omdat hier al een grote veiligheidsmarge in zit, dient bij de berekening van een toetswaarde een onredelijke stapeling van veiligheidsfactoren te worden voorkomen. Dit zou het geval zijn als er voor de prognose een waarde van 99% zou worden gehanteerd. Indien voor de prognose een 95% bovengrens wordt gehanteerd, kan met medeneming van de variatie tussen panden in trillingsgevoeligheid de totale kans op schade worden geschat op 1%.

Tot slot is bij de schadebeoordeling van belang dat het een prognose van het funderingsniveau betreft. Dat betekent dat conform de richtlijn het niveau met 1,6 dient te worden vermenigvuldigd om opslingering van gebouw en van bouwdelen in rekening te brengen.

De toetswaarde voor V_{top} , in termen van SBR A de rekenwaarde van de meetwaarde V_d , wordt zodoende in totaal:

$$- V_d = 1,6 * (V_{\text{top}} + 1,66 * V_{\text{top_sigma}})$$

Deze waarde is ook te vinden in de uitvoer: $V_{\text{top_Vd}}$.

Deze waarde kan worden getoetst aan de rekenwaarde voor de grenswaarde V_r . Daarbij is overigens ook de dominante frequentie nodig, welke in de uitvoer is te vinden als $V_{\text{top_Fdom}}$.

3.4.4 *Analyse betrouwbaarheid*

Zoals in de paragraaf boven is benoemd wordt de betrouwbaarheid van het totaalresultaat met een sigma waarde weergegeven. Het model levert echter ook de variatiecoëfficiënten op zodat duidelijk is hoe die betrouwbaarheid is opgebouwd. Hiermee kan de gebruiker beoordelen op welk punt extra aandacht nodig is. Voorbeelden waar aan gedacht kan worden is het uitvoeren van een sondering, het gedetailleerde invoeren van informatie over het gebouw, of het uitvoeren een meting.

Bij de variatiecoëfficiënten zijn drie getallen zichtbaar. In sommige gevallen kan één van de getallen negatief zijn. De getallen representeren de bijdrage aan de totale onzekerheid in de einduitkomsten vanwege onzekerheid over respectievelijk de emissie, de bodemoverdracht en het gebouw. Deze bijdragen worden steeds bepaald op grond van resultaten op het emissiepunt, op de fundering en op de vloer.

Door de verandering van maatgevende frequentie en trillingsrichting, die vaak optreedt in de voortplanting van bron naar ontvanger, kan de totale onzekerheid anders groeien dan verwacht. Hierdoor is het zelfs mogelijk dat er negatieve waarden worden gepresenteerd. Een fictief voorbeeld is onder weergegeven:

Tabel 5: Voorbeeld verschillende onzekerheden variantiecoëfficiënten

	Bron	Bodem	Gebouw
Maatgevende frequentie	8 Hz	4 Hz	2 Hz
Maatgevende richting	Z	Z	X
Totale onzekerheid in XX	0.31	0.34	0.25
Vershil (gerapporteerde variatiecoëfficiënt) in XX	0.31	0.14	-0.23

In de tabel 5 is te zien dat door een verandering in maatgevende frequentie of richting de totale onzekerheid in het eindresultaat kan afnemen. Dit kan doordat voor die richting en frequentie de eerdere stappen betrouwbaarder was. Dit levert in de output een negatieve waarde op. De verschillen zijn energetisch.

Drie variatiecoëfficiënten worden per beoordelingspunt gegeven: maaiveld, fundering en gebouw. De drie representeren respectievelijk:

Tabel 6: Betekenis van de variatiecoëfficiënten.

	1 ^{ste} waarde	2 ^{de} waarde	3 ^{de} waarde
Maaiveld	Bronmeting	bodeminvloed op bronkracht	bodemoverdracht
Fundering	Bronkracht	bodemoverdracht	bodem-gebouwinteractie
Gebouw	Bronkracht	bodemoverdracht	gebouwreactie (inclusief bodem-gebouwinteractie)

In de tabel is te zien dat bijvoorbeeld de bodemoverdracht drie keer voorkomt. Omdat op de drie beoordelingspunten het spectrum en de dominante trillingsrichting steeds anders kan zijn zullen de drie waardes in principe onderling verschillen.

4 Handleiding computerprogramma (OURS-UI versie 1.0)

Dit hoofdstuk bevat de beschrijving van de software (OURS-UI) waarmee de berekeningen worden uitgevoerd: de gebruikersinterface (UI).

De UI voert zelf geen berekeningen uit, maar verzorgt alle datamanagement en het starten en monitoren van de benodigde berekeningen. De benodigde berekeningen worden met Python-scripts uitgevoerd. De UI verwerkt de gebruikersinvoer, genereert de te berekenen bronpunten, verzamelt alle resultaten en slaat deze op in een resultaatbestand.

Dit hoofdstuk geeft geen beschrijving van de meegeleverde Python-scripts zelf. Hiervoor wordt verwezen naar de Python-scripts zelf met hun meegeleverde documentatie.

Achtereenvolgens worden de volgende onderwerpen beschreven:

- Installatie van de UI, locatie van de benodigde bestanden en welke bestanden de eindgebruiker zelf dient aan te leveren;
- De gebruikersinterface; beschrijving en gebruik opstartparameters;
- Beschrijving formaat invoer- en uitvoerbestanden;
- Beschrijving van de architectuur;
- Beschrijving van de (open source) code.

4.1 Installatie

4.1.1 *Systeemeisen*

De software is desktop software die is ontwikkeld voor gebruik onder MS Windows. Er is geen software beschikbaar voor andere besturings-systemen zoals Unix, Linux of MacOS.

De meegeleverde installatiesoftware zal alleen de 64-bits versie van de software installeren. Met de bijgeleverde source code is het ook mogelijk een 32-bits versie compileren, maar de correcte werking van deze versie is niet getest.

De aanbevolen systeemconfiguratie:

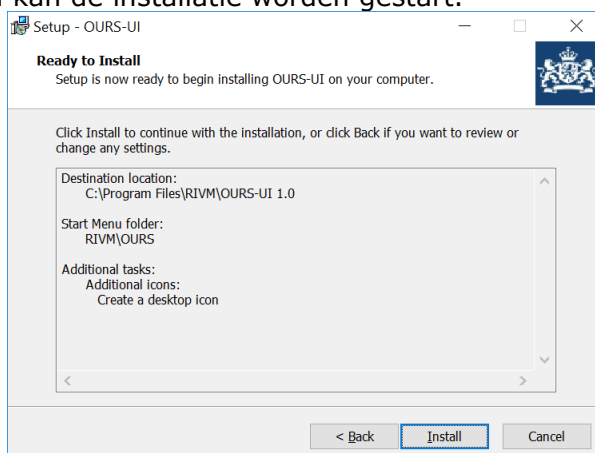
- Microsoft Windows 10.
- Intel Core i7 of AMD Ryzen 7. De software ondersteunt multi-core. Een quad-core of meer is zeer wenselijk.
- Geheugen: minimaal 8 Gb RAM, aanbevolen is 16Gb of meer eventueel aangevuld met virtueel geheugen
- 5 Gb vrije diskruimte is benodigd voor de programmatuur en de benodigde databestanden.
- Toegang tot internet voor het downloaden van de meest recente databestanden (BRO).

4.1.2 *Installatie*

De installatiesoftware zal de software (UI, runtime versie van Python en Python-scripts), databestanden en een voorbeeld invoerbestand installeren.

Zorg ervoor dat de gebruiker voldoende rechten heeft om de installatiesoftware te starten en software te installeren in de "Program files" folder en in de gedeelde folder voor documenten.

De installatie procedure wijst zich verder van zelf. Nadat alle gegevens zijn ingevoerd kan de installatie worden gestart.



Figuur 5: Screenshot van de installatie

4.1.3 Locatie software en databestanden

De UI maakt gebruik van meerdere externe bestanden en programma's. Deze dienen op een vaste locatie aanwezig te zijn. Het gaat hierbij om:

- De database met vastgelegde data (zoals metingen, rekenparameters, treintypen) waarmee wordt gerekend. De naam van dit bestand is "OURS.sqlite" en staat in dezelfde folder als de UI zelf (OURS_UI.exe);
- De runtime versie van Python (versie 3.11) is aanwezig in de folder "Python" welke zich in de programmapolder bevindt;
- De Python scripts voor het uitvoeren van de berekeningen (Cpt_tool, Fem_main, Naverwerking, BodemOnzekerheid, Hgebouw en DeFormule) staan ook in deze Python folder of een subfolder;
- Na installatie van de software is in de folder voor gedeelde documenten (onder Windows 10 is dit standaard C:\Users\Public\Documents) een folder "OURS" aanwezig.

In deze folder staan de meegeleverde bestanden geomorph.dat, geomorph.idx, peilgebieden_jp_250m.nc, bufftrack.dat en buff_track.idx. Deze bestanden worden gebruikt door de cpt_tool, die de bodemopbouw voor de berekening bepaalt.

De gebruiker dient hier zelf de BRO-data bij te plaatsen. Deze data zijn beschikbaar bij PDOK onder downloads met de naam "BRO Geotechnisch sondeeronderzoek". Het is een bestand van circa 22 Gb en heet brocptvolledigeset_v2_0.gpkg. Ten tijde van het opstellen van dit document was de download-link voor dit bestand: https://service.pdok.nl/bzk/brocptvolledigeset/atom/v1_0/brocptvolledigeset.xml

Om het zoeken in dit bestand te versnellen zal de cpt_tool deze indexeren.

- In de programmapolder zal een voorbeeld invoerbestand worden geplaatst: OURS_input.xml. Dit bestand bevat fictieve data en zal

door de UI worden geladen als de UI zonder parameter wordt gestart.

Bij het starten van de UI zal in de folder voor tijdelijke bestanden (de temp-folder) een folder worden aangemaakt met de naam "OURS_<pid>". Hier staat <pid> voor de process identifier; een door Windows gegenereerde unieke code. Het is dus mogelijk de UI meerdere keren gelijktijdig te starten. Kanttekening is wel dat dit niet is getest en het niet duidelijk is hoe Python hierop reageert. De tijdelijke folder is noodzakelijk voor het correct functioneren van de UI. De UI plaats in deze folder tijdelijke bestanden, bijvoorbeeld invoerbestanden voor de Python scripts. De Python scripts zullen in deze folder dan weer de resultaten van de berekening opslaan. Bij het correct afsluiten van de UI zal deze folder weer worden verwijderd.

4.2 De gebruikersinterface

4.2.1 *Opstartparameters*

De software kan met en zonder gebruikersinterface worden gestart. Het gedrag van de software wordt bepaald door een aantal mogelijke opstartparameters.

De mogelijkheden zijn:

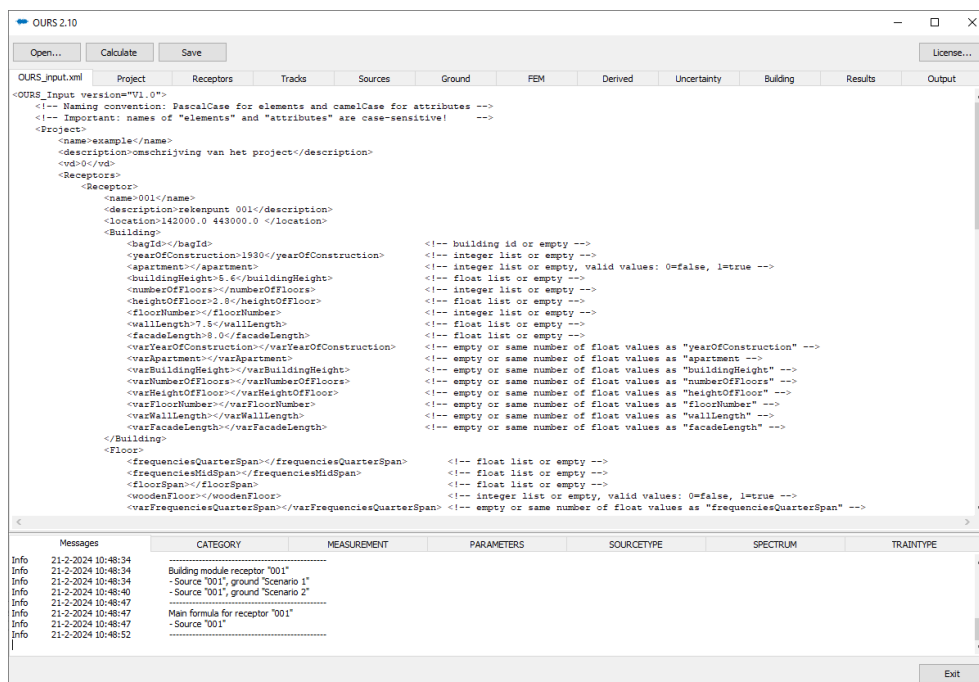
- Zonder opstartparameter
De UI wordt gestart in testmodus met volledige gebruikersinterface en het bestand OURS_input.xml wordt gebruikt als invoerbestand.
- 1 opstartparameter
Dit geeft hetzelfde resultaat als het opstarten zonder parameter, maar nu zal de invoer gelezen worden uit het bestand die als parameter wordt meegegeven. Voorbeeld:
`OURS_UI.exe "c:\users\ve\desktop\invoer.xml"`
- 2 opstartparameters
De eerste parameter wordt gebruikt als invoerbestand. Na het lezen van dit bestand zal de berekening direct worden gestart. De berekende resultaten worden weggeschreven naar het bestand in de tweede parameter. Na het wegschrijven van de resultaten wordt het programma afgesloten. Er is alleen een voortgangsvenster met voortgang en berichten zichtbaar.
Voorbeeld:
`OURS_UI.exe "c:\OURS\invoer.xml" "c:\OURS\uitvoer.xml"`
- 3 of meer parameters
Hetzelfde als twee parameters, maar met extra opties (deze kunnen worden gecombineerd):
 - /TEST: de software wordt gestart in testmodus met volledige gebruikersinterface en gedetailleerde resultaten worden naar een TXT-bestand geschreven.
 - /SILENT: de software wordt zonder formulier opgestart en zal dus voor de gebruiker niet zichtbaar zijn. Verder is de functionaliteit identiek aan de optie met 2 parameters.
 De software wordt afgesloten wanneer de berekening is voltooid. De optie SILENT overruled de optie TEST. Dit betekent dat er geen formulier zichtbaar is als /SILENT wordt meegegeven, ongeacht of er wel of niet /TEST wordt meegegeven. Voorbeeld:


```
OURS_UI.exe "c:\OURS\invoer.xml" "c:\OURS\uitvoer.xml"
/SILENT
```

4.2.2

De volledige gebruikersinterface

Deze paragraaf beschrijft de UI voor de situatie waarbij deze met de volledige gebruikersinterface wordt gestart. De volledige gebruikersinterface is op één hoofdformulier zichtbaar.



Figuur 6: Overzicht van de gebruikers interface

Onderin het formulier wordt op een tabblad een berichtenscherm (*Messages*) getoond waarin de (fout)meldingen en de voortgang worden getoond. De overige tabbladen tonen de inhoud van de standaard database.

Bovenin het formulier wordt in verschillende tabbladen alle relevante invoer getoond, die gelezen wordt uit het invoerbestand. Het eerste tabblad zal de inhoud van het invoerbestand tonen. In de drie volgende tabbladen (*Project*, *Receptors* en *Tracks*) worden de gegevens uitgesplitst voor het project, de rekenpunten en de spoortrajecten. Op het volgende tabblad (*Sources*) zullen de gegevens van de individuele (punt)bronnen worden getoond. De resterende tabbladen geven de resultaten van de verschillende berekeningsstappen weer (*Ground*, *FEM*, *Derived*, *Uncertainty*, *Building* en *Results*). Het allerlaatste blad geeft de resultaten weer zoals deze in een XML-bestand worden opgeslagen.

Met de knoppen helemaal bovenin (*Open*, *Calculate* en *Save*) kan het invoerbestand opnieuw worden geladen (alle eventueel aanwezige resultaten gaan verloren), de berekening worden gestart of de berekende resultaten worden opgeslagen.

Als de UI met twee parameters wordt gestart zal een formulier zichtbaar zijn met alleen de inhoud van het tabblad "Messages" en een "Cancel" knop om de berekening af te breken.

4.3 Bestandsformaten

De UI werkt met invoer- en uitvoerbestanden. De gebruikersinterface is alleen bedoeld om data en (tussen)resultaten te tonen. Dit is voor controle van de berekeningen.

Het bestandsformaat voor de invoergegevens en de uitvoer van de resultaten is XML (eXtensible Markup Language).

Dit formaat biedt een groot aantal voordelen, zoals:

- Veel gebruikt formaat;
- Voor de gebruiker leesbaar;
- Gestructureerd, eenvoudig uit te breiden en biedt de mogelijkheid om commentaar op te nemen;
- Kan verschillende entiteiten bevatten (project, rekenpunten, trajectformatie, treininformatie).

Met XML kunnen gegevens op een gestructureerde manier vastgelegd worden. XML bevat niet alleen de data zelf, maar ook een goede omschrijving van de betekenissen van deze data. Dit maakt XML een zelf beschrijvende taal, leesbaar voor zowel mens als machine.

Door het meegeleverde voorbeeld invoerbestand (OURS_input.xml) is het hierdoor relatief eenvoudig zelf invoerbestanden met eigen data te maken.

4.3.1 Modelling

Het model berekent per rekenpunt trillingsniveaus door bronpunten. Deze bronpunten worden bepaald uit de invoergegevens. Hierbij levert iedere baan (track) één bronpunt.

Een baan is een aaneengesloten polylijn van een enkel spoor, dus bij dubbelspoor moeten 2 banen worden gedefinieerd. Het brontype voor dit spoor moet over de gehele lengte gelijk zijn, zoals doorgelast spoor, wissel of overgang. Het bronpunt ligt op de dichtstbijzijnde positie van de baan. Dit kan dus het uiteinde van een baan zijn of een positie ergens op de baan. De positie van de bron kan voor ieder rekenpunt een andere positie op de baan zijn. Iedere baan wordt met RD-coördinaten vastgelegd. Daarnaast heeft iedere baan ook een begin- en eindkilometrage uitgedrukt in millimeters.

Een baan is opgedeeld in baanvakken (trackpart). Voor een baanvak geldt dat alle eigenschappen gelijk zijn. Een reden om een baan op te delen in verschillende baanvakken kan een andere snelheid van de treinen zijn, maar ook een andere boven- of onderbouw. Met behulp van begin- en eindkilometrage wordt de locatie van het baanvak op de baan vastgelegd.

Over een baanvak rijden treinen. Van deze treinen wordt het materieelsoort (bijvoorbeeld DDM-1 of ICM-4) opgegeven met een gemiddeld aantal eenheden per uur en een snelheid in km/uur. Deze gegevens worden voor de dag (07:00 – 19:00), avond (19:00 – 23:00) en nacht (23:00 – 07:00) vastgelegd.

4.3.2 Afspraken bestandsopbouw

Voor de inhoud van de XML-bestanden gelden de volgende afspraken:

- Naamgevingsconventie: PascalCase voor elementen en camelCase voor attributen.
Belangrijk: namen van "elementen" en "attributen" zijn hoofdlettergevoelig!
- Commentaar (uitleg) is opgenomen door deze tussen "<!--" en "-->" te plaatsen.
- Als decimaal scheidingsteken wordt de punt (.) gebruikt.
- Alle coördinaten zijn in RD.
- De X- en Y-coördinaten (van een rekenpunt) worden met een spatie gescheiden.
- De coördinaten van banen worden met een lijst van X- en Y-coördinaten vastgelegd waarbij alle waarden gescheiden zijn door 1 of meerdere spaties (dus "X1 Y1 X2 Y2 X3 Y3 ...").
- Bij een reeks van getallen (bijvoorbeeld Quarterspan) worden de getallen gescheiden door 1 of meerdere spaties.

4.3.3 Het invoerbestand

In het invoerbestand wordt alle data voor de berekening vastgelegd. Naast algemene projectgegevens gaat het hierbij om de rekenlocaties, banen, baanvakken en treinen. De inhoud en structuur van het bestand is zelf beschrijvend en behoeft, afgezien van de rekenpunten, geen verdere toelichting.

Alle attributen binnen de elementen <Building> en <Floor> zijn facultatief, maar als een attribuut beginnend met "var" is gevuld, dan moet deze exact evenveel waarden bevatten als het attribuut met dezelfde naam zonder "var".

Opbouw bestand:

```
<OURS_Input version="V1.0">
  <Project>
    <name>example</name>
    <description>omschrijving van het project</description>
    <Receptors>
      <Receptor>
        <name>001</name>
        <description>rekenpunt 001</description>
        <location>142000.0 443000.0 </location>
        <Building>
          <bagId></bagId>
          <yearOfConstruction>1930</yearOfConstruction>
          <apartment></apartment>
          <buildingHeight>5.6</buildingHeight>
          <numberOfFloors></numberOfFloors>
          <heightOfFloor>2.8</heightOfFloor>
          <floorNumber></floorNumber>
          <wallLength>7.5</wallLength>
          <facadeLength>8.0</facadeLength>
          <varYearOfConstruction></varYearOfConstruction>
          <varApartment></varApartment>
          <varBuildingHeight></varBuildingHeight>
          <varNumberOfFloors></varNumberOfFloors>
          <varHeightOfFloor></varHeightOfFloor>
          <varFloorNumber></varFloorNumber>
          <varWallLength></varWallLength>
          <varFacadeLength></varFacadeLength>
        </Building>
        <Floor>
          <frequenciesQuarterSpan></frequenciesQuarterSpan>
          <frequenciesMidSpan></frequenciesMidSpan>
          <floorSpan></floorSpan>
          <woodenFloor></woodenFloor>
          <varFrequenciesQuarterSpan></varFrequenciesQuarterSpan>
          <varFrequenciesMidSpan></varFrequenciesMidSpan>
          <varFloorSpan></varFloorSpan>
          <varWoodenFloor></varWoodenFloor>
        </Floor>
      </Receptor>
    </Receptors>
  </Project>
</OURS_Input>
```

```

    <Receptor>
      <!-- Gegevens volgend rekenpunt -->
    </Receptor>
  </Receptors>
  <Tracks>
    <Track>
      <name>001</name>
      <description>track 001</description>
      <branch_id>23698</branch_id>
      <kmstart>46810000</kmstart>
      <kmend>47040000</kmend>
      <sourcetype>track</sourcetype>
      <location>142025.0 442500.0 142025.0 443500.0</location>
      <Trackpart>
        <name>1_001</name>
        <description>trackpart 1_001</description>
        <kmstart>46810000</kmstart>
        <kmend>46980000</kmend>
        <superstructure_id>1</superstructure_id>
        <substructure_id>1</substructure_id>
        <Train>
          <material_id>1</material_id>
          <qd>4.4</qd>
          <vd>100</vd>
          <qe>2.8</qe>
          <ve>100</ve>
          <qn>0.8</qn>
          <vn>100</vn>
        </Train>
        <Train>
          <!-- Gegevens volgende trein -->
        </Train>
      </Trackpart>
    </Trackpart>
    <!-- Gegevens volgend baanvak -->
  </Trackpart>
</Track>
<Track>
  <!-- Gegevens volgend baan -->
</Track>
</Tracks>
</Project>
</OURS_Input>

```

Figuur 7: Voorbeeld invoerbestand

4.3.4 Het uitvoerbestand

Het uitvoerbestand met totaalresultaten is net als het invoerbestand in XML-formaat. Per rekenpunt worden de resultaten weergegeven.

In de huidige, voorlopige versie van het rekenmodel worden voor ieder rekenpunt, per bronpunt de resultaten gegeven. Aan het eind van het bestand worden alle meldingen uit het voortgangsformulier toegevoegd. Hierdoor kan de gebruiker controleren of er fouten zijn opgetreden.

Voorbeeld uitvoerbestand:

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<OURS_Output version="V1.0">
  <Project name="example" description="omschrijving van het project">
    <Receptors>
      <Receptor>
        <name>001</name>
        <description>rekenpunt 001</description>
        <Source>
          <name>001</name>
          <description>track 001</description>
          <distance>25</distance>
          <AlleTreinen>
            <Fundering>
              <vmax>0.49</vmax>
              <vmax_Dir>zz</vmax_Dir>
              <vmax_Fdom>8 Hz</vmax_Fdom>
              <vmax_sigma>0.197</vmax_sigma>
              <vtop>1.17</vtop>
              <vtop_Dir>zz</vtop_Dir>
              <vtop_Fdom>8 Hz</vtop_Fdom>
              <vtop_Vd>3.12</vtop_Vd>
              <vtop_sigma>0.472</vtop_sigma>
              <variaticoeffs>0.39; 0.25; -0.29</variaticoeffs>
            </Fundering>
            <Gebouw>
              <vmax>1.51</vmax>
              <vmax_Dir>zx</vmax_Dir>
              <vmax_Fdom>32 Hz</vmax_Fdom>
              <vmax_sigma>0.543</vmax_sigma>
              <vper>0.174; 0.138; 0.077</vper>
              <vper_sigma>0.0433; 0.0344; 0.019</vper_sigma>
              <variaticoeffs>0.39; 0.25; -0.29</variaticoeffs>
            </Gebouw>
          </AlleTreinen>
        </Source>
      </Receptor>
    </Receptors>
  </Project>
</OURS_Output>

```

```

        </Gebouw>
        <Maaiveld>
            <vrms>0.27</vrms>
            <vrms_sigmax>0.108</vrms_sigmax>
            <variatiecoeffs>0.39; 0.25; -0.29</variatiecoeffs>
        </Maaiveld>
    </AlleTreinen>
    <Goederen>
        <!-- Resultaten goederentreinen -->
    </Goederen>
    <Reizigers>
        <!-- Resultaten reizigerstreinen -->
    </Reizigers>
</Source>
<Source>
    <!-- Resultaten volgende bron -->
</Source>
</Receptor>
<Receptor>
    <!-- Resultaten volgend rekenpunt -->
</Receptor>
</Receptors>
</Project>
<Messages>
    <lines0>Info          11-03-2020 09:07:44 OURS started</lines0>
    <lines1>Info          11-03-2020 09:07:44 Table "CATEGORY" loaded</lines1>
    <!-- Resterende meldingen -->
</Messages>
</OURS_Output>

```

Figuur 8: Voorbeeld uitvoerbestand

4.3.5 Detailresultaten

In testmode worden ook alle tussenresultaten uitgevoerd. Deze worden uitgevoerd naar een bestand met dezelfde naam als het uitvoerbestand, maar dan met extensie '.TXT'. Dit tekstbestand bevat de inhoud van alle tabbladen.

4.4 Architectuur UI

4.4.1 Ontwikkelomgeving en taal

De software is ontwikkeld in Delphi 10.3, update 2, uitgegeven door Embarcadero. Voor de ontwikkeling zijn alleen standaard meegeleverde componenten en bibliotheken gebruikt, met uitzondering van 2 externe componenten:

- SQLite (Versie 3.25.2 van 2018-09-25).
Deze bibliotheek wordt gebruikt voor het benaderen van een sqlite database.
Website: <https://www.sqlite.org/download.html>
- VerySimpleXML (Versie 2.0.4 van 2018-01-30)
Deze bibliotheek wordt gebruikt voor het lezen en schrijven van xml-bestanden.
Website: <https://github.com/Dennis1000/verysimplexml>

De software is standaard in 64-bit geleverd, maar kan eventueel ook in 32-bit worden gecompileerd.

4.4.2 Componenten

De software voor de eindgebruiker bestaat uit een executable, met een aantal andere bestanden:

- OURS_UI.exe
Dit is het programma dat wordt uitgevoerd, welke alle data leest, schrijft en de berekeningen uitvoert en/of aanstuurt;
- sqlite3.dll
Dit bestand is noodzakelijk om de meegeleverde SQLite database te kunnen lezen en schrijven;

- **OURS.sqlite**
Dit is de SQLite database waarin zich de data bevindt welke gevuld is binnen het OURS project. Opbouw en inhoud worden verder in dit document toegelicht.
- **Python**
Alle berekeningen worden uitgevoerd met Python-scripts. Om deze scripts te kunnen uitvoeren wordt een runtime omgeving van Python (versie 3.7.5) meegeleverd. Alle benodigde bestanden (circa 740 Mb) staan in de folder Python onder de programmapolder.
- **CPT_tool**
Dit omvat een verzameling van Python-scripts waarmee de bodemopbouw wordt bepaald. Dit script staat in de Python-folder. De `cpt_tool` bestaat uit de volgende bestanden:
 - `cpt_tool.py`
 - `bro.py`
 - `cpt_module.py`
 - `gen_doc.py`
 - `inv_dist.py`
 - `log_handler.py`
 - `netcdf.py`
 - `robertson.py`
 - `tools_utils.py`
 - `shapefiles\Robertson.*`
- **FEM**
Voor de berekening van de trillingsoverdracht van bronpunt naar rekenpunt wordt gebruikt gemaakt van een FEM-berekening. Dit script staat in de Python folder en bestaat uit de volgende bestanden:
 - `fem_main.py`
 - `book_keeping.py`
 - `fem_routines.py`
 - `input_output.py`
 - `mesh.py`
 - `numerical_routines.py`
 - `wave_velocity.py`
- Voor de naverwerking van de FEM-resultaten, de gebouwmodule, berekening van de bodemonnauwkeurigheid en de berekening van de totaalresultaten wordt gebruik gemaakt van de volgende Python-scripts:
 - `Naverwerking.py`
 - `BodemOnzekerheid.py`
 - `Hgebouw.py`
 - `DeFormule.py`

4.4.3 Database

Alle standaard gegevens worden vastgelegd in een SQLite database. SQLite is een lichtgewicht databasesysteem dat geen aparte installatie of drivers nodig heeft. Er is alleen een dll benodigd (`sqlite3.dll`). De gegevens van alle tabellen worden in één enkel bestand opgeslagen (`OURS.sqlite`).

Binnen de database zijn de volgende tabellen aanwezig zijn:

- **Parameters**
In deze tabel zijn de rekenparameters vastgelegd. Denk hierbij aan de maximale rekenafstand en rekendiepte voor de

overdrachtsberekening en de minimale laagdikte voor de bodemopbouw.

- **Measurement**
Deze tabel bevat de gegevens van metingen van treinen. Daarbij verwijst ieder record naar het treintype waarvoor de meting geldt.
- **treintype**
Tabel met namen van treinen en in welke categorie de trein valt voor de berekeningen.
- **Category**
Alle treinen zijn in een categorie ingedeeld. Deze tabel bevat de ondersteunde categorieën.
- **Spectrum**
Alle spectra staan in deze tabel. Met name vanuit de measurement-tabel wordt naar deze tabel verwezen voor de spectrale data van een record.

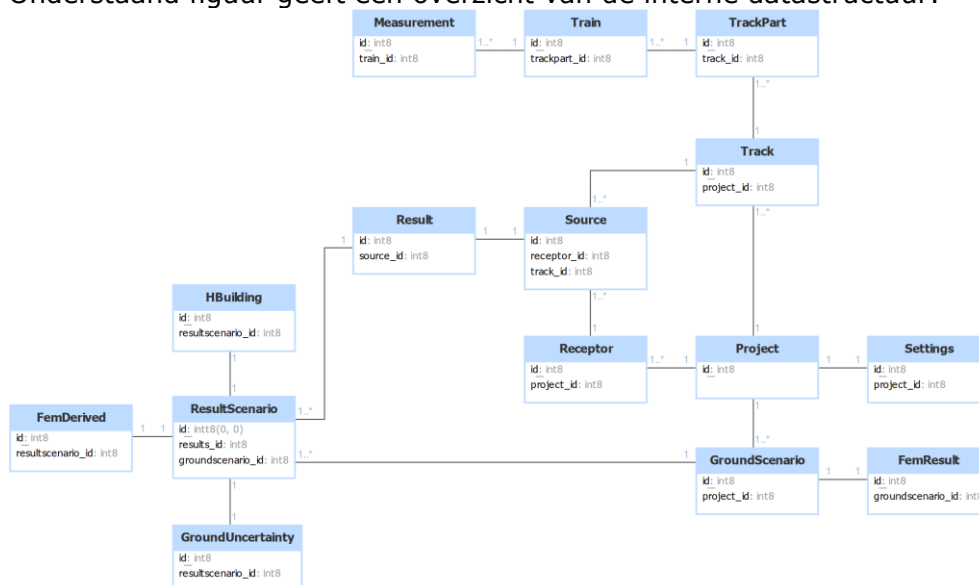
Het programma "OURS_UI.exe" zal deze database alleen raadplegen en is niet in staat om deze database te wijzigen. Voor het wijzigen/aanpassen van SQLite databases zijn vele programma's beschikbaar. In dit project is het programma "SQLite Developer" gebruikt voor het definiëren en vullen van de tabellen. Dit programma is vanaf de eerder genoemde sqlite.org website te downloaden.

4.5 Beschrijving source code

De beschrijving van de code staat in de vorm van HTML-bestanden in een folder met de naam "Documentation" welke na de installatie van de software in de programmapolder staat. De documentatie kan worden bekeken door het bestand `Index.html` te openen.

4.5.1 Datastructuur en flow

Onderstaand figuur geeft een overzicht van de interne datastructuur:



Figuur 9: Interne datastructuur

De gegevens van "Project", "Track", "TrackPart" en "Receptor" worden gelezen uit het invoerbestand. De gegevens van "Settings" en "Measurement" worden gelezen uit de meegeleverde database.

Per Receptor en per Track wordt één bron gegenereerd. Voor deze bron worden alle relevante resultaten berekend. Omdat een gelijke bodemopbouw meerdere keren kan voorkomen, worden deze apart bijgehouden. Hierdoor hoeft een FEM-berekening maar eenmalig voor een bepaalde bodemopbouw te worden uitgevoerd, ongeacht hoe vaak deze voorkomt. In "ResultScenario" wordt bijgehouden wat de kans op een bepaalde bodemopbouw is.

De overige zaken worden gevuld door de verschillende Python-scripts:

- FemResult wordt gevuld door FEM_main.py;
- FemDerived wordt gevuld door de Naverwerking.py;
- GroundUncertainty wordt gevuld door BodemOnzekerheid.py;
- HBuilding wordt gevuld door HGebouw.py;
- Result wordt gevuld door DeFormule.py.

5 Meetvoorschriften voor uitbreiding model

5.1 Algemeen

Veel gegevens in het rekenmodel zijn gebaseerd op metingen. Als er sprake is van een situatie waar niet gerekend kan worden doordat er geen metingen uitgevoerd zijn kunnen aanvullende metingen worden uitgevoerd. Deze metingen worden dan gebruikt om het rekenmodel uit te breiden. Een aanleiding om metingen uit te voeren kan zijn emssiegegevens van een bepaald type railvoertuig te verkrijgen die nu nog ontbreekt of om emssiegegevens over emissies van bijzondere constructies toe te voegen. Daarnaast kunnen metingen uitgevoerd worden waarmee de schematisering van de opslinging van het gebouw beter wordt gemodelleerd. Om bruikbaar te zijn voor het rekenmodel zijn er voorwaarden gesteld aan de manier waarop de metingen worden uitgevoerd. Deze voorwaarden zijn als voorschriften in dit hoofdstuk opgenomen.

5.2 Emissiemetingen

5.2.1 Algemeen

Voor het vaststellen van emissiekentallen van treintypes wordt de volgende procedure gehanteerd. De procedure kent drie onderdelen. Het eerste onderdeel is het uitvoeren van metingen aan voorbij rijdende treinen. Het tweede gaat over valproefmetingen om de bodemimpedantie vast te stellen. Daarna is er de verwerkingsmethode om al deze data om te zetten in kentallen voor het bronbestand.

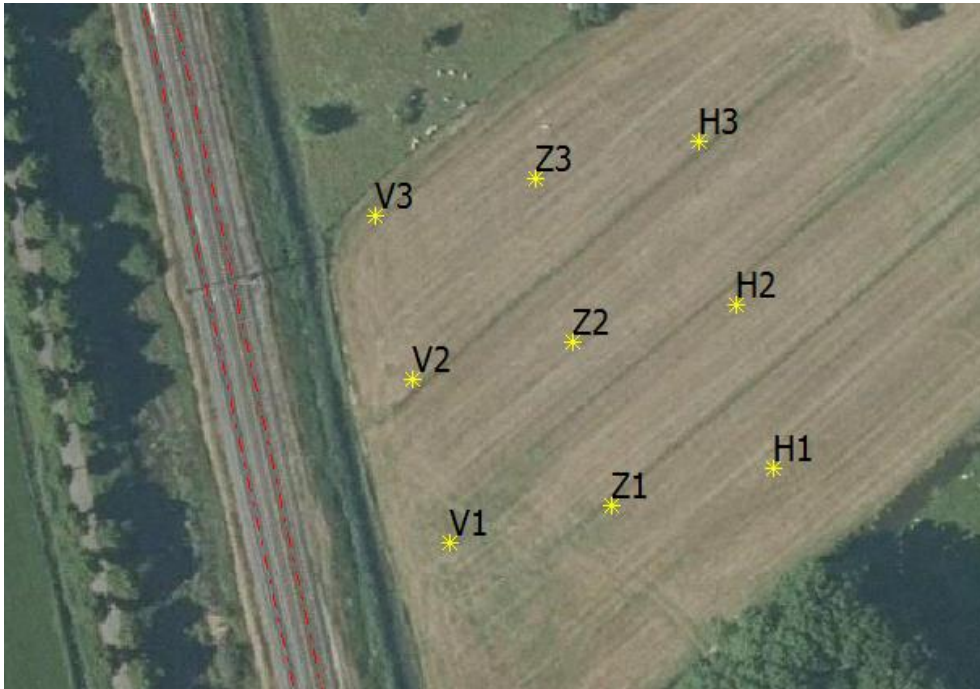
De verwerkingsmethode is complex en daardoor gevoelig voor fouten en interpretatieverschillen. Daarom zijn in de bijlage scripts opgenomen die de implementatie vormen van de methode in de computertaal Matlab.

Emissiekentallen voor algemeen gebruik dienen verzameld te worden voor tenminste 2 verschillende bodems: homogeen zand versus gelaagd met veel klei in de bovenste meters. Voor een specifiek project vervalt die eis en geldt slechts dat de metingen plaatsvinden op een voor dat project representatieve bodem (in het algemeen: de bodem ter plekke).

5.2.2 Vaststellen emissies

Wanneer emissiemetingen worden uitgevoerd vindt dat in principe plaats aan regulier voorbij rijdende treinen. Er worden trillingsniveaus, rijnsnelheid, bereden spoor en treintype geregistreerd. De ruimtelijk eisen aan de meetopstelling zijn als volgt:

- 9 meetpunten, in rooster van 3x3
- onderlinge afstand: 25 meter (dus een vierkant van 50x50 meter)
- afstand van het rooster tot midden van 2 dichtstbij gelegen sporen: 25 meter
- eerste lijn (dichtst bij spoor) heet V-lijn (V_{rms} lijn)
- tweede lijn heet Z-lijn (Impedantielij)
- derde lijn heet H-lijn (Overdrachtslijn)
- nummering (kijkend naar spoor, van links naar rechts): 1, 2, 3



Figuur 9: Voorbeeld van een meetlocatie, gele sterren geven de locatie van de trillingsopnemers weer, inclusief de verplichte notatie.

Het onderzoeksveld, en een strook van 25 meter daar rondom, dient wat betreft oppervlak en bodemopbouw zo homogeen als mogelijk te zijn. Een uitzondering hierop vormt het gebied tussen het meetveld en het spoor: aanwezigheid van afwijkende begroeiing en/of een spoorstoot is niet te vermijden.

Het veld dient vrij te zijn van bomen en van gebouwen. Binnen een hoek van 45 graden met de loodlijn op het spoor vanuit de achterste buitenpunten (H1 en H3) dient het veld ook vrij te zijn en homogeen.

De eisen aan de te gebruiken apparatuur zijn:

- Elk meetpunt meet in tenminste 2 richtingen (horizontaal richting de bron en verticaal);
- Trillingsapparatuur welke voldoet aan de eisen uit SBR-B, met mogelijkheid tot uitvoer ruwe meetdata met samplefrequentie van minimaal 500 Hz;
- Webcam (minimaal foto opname per passage);
- Snelheidsmeter (meetonzekerheid $\pm 3\%$).

Bij het plaatsen van een sensor dient de toplaag van de bodem, zoals een graszode, te worden verwijderd. In het algemeen moet rekening worden gehouden met ongeveer 0,5 meter geroerde grond. Tot die diepte zal dan een gat moeten worden gegraven. Bij voorkeur wordt de sensor geplaatst op een (lichte, stijve) tussenplaat die goed contact maakt met de grond. Plaatsing op een enkele pint (in plaats van een tussenplaat) is niet toegestaan. De tussenplaat mag wel voorzien zijn van pinnen, mits niet dragend. Met bijvoorbeeld een heeldrop wordt gecheckt of de sensoren geen lokale opslingering vertonen (vanwege bodem-sensor interactie, een rotatie vrijheid, geen goed bodemcontact, etc.).

Per vast te leggen treintype worden tenminste 50 passages gemeten. Per passage worden de volledige trillingssignalen opgeslagen met een samplefrequentie van tenminste 500 Hz. De 9 meetpunten mogen asynchroon meten. Daarnaast wordt per passage de rijsnelheid opgeslagen alsmede een foto eventueel aangevuld met een filmopname van de treinpassage.

Van het trillingssignaal wordt het volgende vastgelegd:

- Ruwe signalen in een format dat door derden uit te lezen is (bijvoorbeeld wav).
- Metadata in meetjournaal (volgens ProRail's Meetjournaal format)
- Halffabrikaten: (V_{rms},5s) in (zelfde) meetjournaal)

5.2.3 *Bepalen bodemimpedantie*

Als is voldaan aan de eisen van het aantal te meten passagemetingen worden de valgewichtmetingen uitgevoerd. De valgewichtmetingen vinden dus na de passagemetingen plaats en wel in een verder nog niet beroerd meetveld. De reden dat de valgewichtmetingen na de passagemetingen worden uitgevoerd is dat dit type meting de bodem kan verstoren. Passagemetingen na uitvoering van de valgewicht metingen kunnen derhalve afwijkingen geven. In tegenstelling tot de passagemetingen moeten bij deze meting de 9 meetpunten synchroon lopen (identieke klok en tijdsignaal). Eventueel worden daartoe extra sensoren geplaatst. In ieder geval blijven de sensoren van de passagemetingen onberoerd en actief.

Er worden 4 verticale sensoren (bronpunten) toegevoegd, meereizend met het valgewicht, steeds geplaatst rond de voetplaat, in een vierkant, op 1 meter van de rand van de voetplaat en synchroon (met elkaar en de overige meetpunten) mee gemeten.

Tot slot wordt de kracht gemeten. Dit kan door middel van een krachtplaat (plaat met daarin 3 of meer krachtdozen) of door middel van een versnellingsopnemer op het valgewicht (waarvan het signaal wordt vermenigvuldigd met de valmassa om tot een kracht te komen). De kracht wordt synchroon (met de overige meetpunten) mee gemeten.

Bij elk van de 9 meetpunten wordt een valgewichttest gedaan. De locatie van het valgewicht wordt gezocht op een afstand van 1 meter van het meetpunt. Bij de overige punten wordt op dezelfde relatieve positie gemeten als bij het eerste punt. Hierdoor ontstaat voor de valgewicht posities ook een regelmatig 3x3 raster 1 meter verschoven van het meetpuntraster

De metingen worden altijd in dezelfde volgorde uitgevoerd. Er wordt begonnen bij meetpunt V1. De totale volgorde is: V1, V2, V3, Z3, Z2, Z1, H1, H2, H3. Op elk punt worden (tenminste) 6 klappen gegeven, oplopend in % van het maximale impulsmoment

- 3x 30%
- 3x 100%

Van alle sensoren worden de signalen vastgelegd met een samplefrequentie van tenminste 1000 Hz, een duur van tenminste 8 seconden inclusief een pretrigger van 1 seconde.

De eisen aan de apparatuur zijn:

- mobiel valgewicht met instelbaar impulsmoment met een bereik van minimaal 1000 Ns op een valplaat van 1 m² (groter impulsmoment = evenredig grotere valplaat)
- Trillingsmeter bij valgewichtmeting minimaal 10 keer gevoeliger dan SBR-B specificatie

5.2.4 *Verwerken data*

De ruwe data wordt verwerkt tot de volgende grootheden die gebruikt worden in het emissiebestand:

F_{eq}	Equivalente aanstootkracht van een treintype
Z_o	Overdrachtsimpedantie, over 25 meter

Hiervoor zijn de volgende tussenresultaten nodig:

V_{rms}	Gemiddelde snelheid op 25 meter van het spoor
Z_p	Puntimpedantie
H_{pas}	Overdracht over 25 meter, bij passage

De verwerkingsmethode wordt hieronder beschreven.

- F_{eq} is de bronsterkte, dus directe invoer voor het model.
- Z_o is invoer voor het model. Het wordt gebruikt als onderdeel van een weegfactor in verband met de bodemeigenschappen van de meetlocaties. Z_o wordt in de verwerkingsmethode, samen met V_{rms} , gebruikt om F_{eq} te bepalen.
- V_{rms} wordt, samen met Z_o , in de verwerkingsmethode gebruikt om F_{eq} te bepalen.
- Z_p wordt gebruikt in de verwerkingsmethode en dient om de validiteit van elk van de 9 punten te wegen, vanwege het gegeven dat de meetresultaten van nabijgelegen meetpunten zonder duidelijk oorzaak toch sterk onderling sterk kunnen verschillen.
- H_{pas} wordt in de verwerkingsmethode gebruikt om de V_{rms} van de tweede en derde lijn te vertalen naar de eerste lijn, waardoor ze meekunnen in het bepalen van een gemiddelde V_{rms} .

De algemene aanpak is als volgt.

- De meetpunten krijgen een gewicht α , aan de hand van de puntimpedantiemetingen en de passagemetingen.
- Met het gewicht worden de definitieve impedanties bepaald (punt en overdracht) en de overdrachten, gemiddeld over het hele rooster.
- Mede met behulp van de overdrachten, wordt V_{rms} bepaald, gemiddeld over het hele rooster.

5.2.5 *Gebruik nabewerkingsscripts*

Voor de verwerking van meetgegevens kan specifiek hiervoor geschreven code worden gebruikt. Deze code in 'matlab' vergt een

voorbewerking van de data tot een specifieke structuur. Na die voorbewerking zal de code de benodigde input parameters voor het rekenmodel berekenen. De code is met omschrijving is gepubliceerd op github (<https://github.com/rivm-syso/OURS>).

5.2.6 *Rapportage en opnemen data in database software*

Na verwerking van de data kan de data worden opgenomen in de database van de software. De procedure is dat de verwerkte data, met onderbouwing, wordt aangeboden aan de beheerder van de software (vooralnog RIVM). Na een kwaliteitscontrole zal de beheerder de data opnemen in een nieuwe versie van de software zodat met de aanvullende gegevens gerekend kan worden.

Voor de opname van de data in de software worden de volgende eisen gesteld aan de rapportage:

- Overzicht meetlocatie incl. foto's
- Gebruikte meetapparatuur en meetmethode
- Omschrijving aantallen treinen en treintypes
- Eindresultaat

Daarnaast dienen digitaal bijgevoegd te worden:

- Meetjournaal
- Ruwe meetdata
- Invoerbestanden scripts
- Tabel met eindresultaat

5.3 **H_{gebouw} metingen**

5.3.1 *Algemeen*

De emissiemetingen (zie vorige paragraaf) leveren de bronsterkte op. De voortplanting door de bodem wordt berekend met een eindige elementen model . De overdracht⁸ () van maaiveld naar onderdelen van het gebouw wordt berekend met een analytisch model. Om dit model te valideren, of eventueel in specifieke gevallen te vervangen, worden metingen uitgevoerd volgens het voorschrift in deze paragraaf.

Het analytisch model dat is ontwikkeld voor het computerprogramma houdt rekening met een aantal factoren: de interactie tussen bodem en fundering, het zwaaien van een gebouw en het opslingeren van vloeren. De overdracht wordt bepaald naar de fundering en naar de verdiepingsvloeren.

De naverwerkingsmethode voor de Beleidsregel Trillinghinder Spoor[2] (Bts) kent ook het begrip H_{gebouw}. H_{gebouw} is daar de overdracht van fundering naar verdiepingsvloer. H_{gebouw} in Ours is een module, met een bredere range aan output. Naast de overdracht van fundering naar vloer zoals in de BTS-methodiek wordt ook de overdracht van maaiveld naar fundering en maaiveld naar vloer berekend. Dit wordt gedaan voor de verschillende combinaties aan trillingsrichtingen.

⁸ Dit wordt in de signaalverwerking met de letter H aangeduid als het de ratio tussen ingang en uitgang van een bepaalde fysische grootheid betreft.

5.3.2 Meetvoorschrift H_{gebouw} in OURS

Synchroon worden er 8 meetpunten geplaatst. Per meetpunt wordt er gemeten in 3 richtingen. De locatie van de meetpunten is als volgt:

- 2 meetpunten op de fundering: 1 op de voorgevel en 1 op de achtergevel, elk op een hoek van twee dragende muren (zoals twee gevels of een gevel en een dragende binnenmuur). Meetpunten worden op de buitenzijde op een beugel, max 25cm boven maaiveld, geschroefd tegen de gevel. Als alternatief kan het ook op dezelfde plek binnen in de woning.
- 2 meetpunten op maaiveldhoogte, op 25 meter afstand van de woning, vanuit het spoor gezien naast de woning, ter hoogte van de respectievelijke funderingsmeetpunten. Meetpunten dienen te worden ingegraven, met gebruik van een grondplaat (zie emissiemetingen).
- 2 meetpunten op de begane grond vloer: midden op de overspanning en op een kwart van de overspanning.
- 2 meetpunten op de hoogst bewoonde verdiepingsvloer: midden op de overspanning en op een kwart van de overspanning.

Er dienen minimaal 25 passages van reizigersmaterieel te worden gemeten. Daarnaast worden er bij de meetpunten op de begane grond en de verdiepingsvloer 3 hieldrop metingen uitgevoerd.

Van iedere treinpassage wordt het tijdsignaal vastgelegd. Dit signaal heeft een duur van 5 sec pre- tot 10 sec posttrigger. De triggerwaarde is afhankelijk van de locatie en afstand tot het spoor en ligt meestal rond de 0,05 mm/s met uitloop tot circa 0,1 mm/s.

Het meetsysteem dient een samplefrequentie te hebben van tenminste 1000 Hz. De meetpunten moeten in tijd synchroon lopen met een afwijkingen van maximaal 1 seconde.

5.3.3 Verwerking van de meetdata

Alle signalen (per passage zijn dat er 8x3) worden verwerkt tot $V_{\text{rms},5s}$ spectrum. Dit gebeurt in de volgende volgorde:

1. Per passage en per signaal wordt het moment van $V_{\text{eff,max}}$ bepaald.
2. De signalen worden gefilterd met het 5,6 Hz filter zoals beschreven in SBR B.
3. De signalen worden via een filterbank uitgesplitst naar de 6 octaafbanden (implementatie via fft en ifft is toegestaan).
4. De signalen worden geconvolueerd met het fast filter zoals beschreven in SBR B.
5. Van de signalen wordt de $V_{\text{rms},5s}$ (per octaafband) bepaald door het nemen van de root-mean-square van 5 seconde van het signaal rond het moment van de $V_{\text{eff,max}}$ (zie stap 1).

Er vinden reductie van het aantal signalen plaats. Voor de twee meetpunten op maaiveld geldt het volgende:

- Van de verticale maaiveldrichting van de twee sensoren op maaiveld wordt het gemiddelde genomen.

- Van de horizontale van de sensoren op maaiveld wordt per meetpunt de maximale gekozen; vervolgens wordt het gemiddelde van de twee meetpunten genomen.

Voor alle overige punten wordt van de twee horizontale meetrichtingen steeds de grootste gekozen.

Er blijft hiermee één (gemiddeld) maaiveldpunt over met een waarde voor horizontaal en een waarde voor verticaal en er blijven 6 overige punten over met ieder een waarde voor horizontaal en een waarde voor verticaal.

Per passage worden de overdrachtsverhoudingen bepaald door spectra op elkaar te delen:

- Maaiveld naar fundering:
 - o Hfxx: horizontaal naar horizontaal
 - o Hfzz: verticaal naar verticaal
- Funderingspunten naar vloervelden, per funderingspunt en per vloerpunt:
 - o Hxx: horizontaal op de fundering naar horizontaal op de vloer
 - o Hxz: horizontaal op de fundering naar verticaal op de vloer
 - o Hzx: verticaal op de fundering naar horizontaal op de vloer
 - o Hzz: verticaal op de fundering naar verticaal op de vloer

De overdrachtsverhoudingen worden gemiddeld over alle passages:

- Er worden gemiddelde overdrachtsspectra bepaald.
- Er worden bijbehorende varianties bepaald, in de vorm van covariantiematrices (elk 6x6).

6 Referenties

- [1] D de Gruijter et al, Een uniform rekenmodel voor spoortrillingen 2016, RIVM Briefrapport 2016-0209, 2017
- [2] Beleidsregel trillingshinder spoor,
<https://wetten.overheid.nl/BWBR0031466/2014-03-27>
- [3] W. Roos, Protocol voor het beoordelen van klachten of claims inzake schade door trillingen afkomstig van railverkeer, TBO rapport 2004-CI-R0082, 2003
- [4] A. Koopman, C. Ostendorf, Herziening BTS, Level Acoustics and Vibration memo LA.131001a.M04

Bijlage 1: Overzicht treintypes software versie 1.0

In onderstaande tabel zijn de treintypes weergegeven waarvan de trillingsniveaus berekend kunnen worden, omdat er emissiedata beschikbaar is.

De emissiedata is beschikbaar vanwege directe metingen aan een specifiek treintype of door een treintype in te delen in een categorie op basis van eigenschappen van dat treintype.

In onderstaande tabel zijn beide soorten types weergegeven:

Gemeten		Ingedeeld	
Treintype	categorie nr	Treintype	categorie nr
RT VIRM	1	DDM-1	4
RT ICR+	2	DDM-2/3	4
RT ICM	3	DDZ-MR	4
RT DDM	4	DDZ-R	4
RT Flirt/SLT	5	GOEDEREN	11
RT SGM	6	GOEDEREN-ALT	11
RT ICE	7	GTW2/6-EMU	5
GT container/bont	11	GTW2/8-EMU	5
GT erts/kolen	12	GTW-R-EMU	5
GT ketel	13	ICE-3	7
		ICM-3	3
		ICM-4	3
		ICMm-R	3
		IC-R	2
		IC-R-ALT	2
		IC-R-SR	2
		INT-R	2
		IRM-3	1
		IRM-4	1
		MDDM	4
		SGM-2	6
		SGM-3	6
		SGM-R	6
		SLT-4	5
		SLT-6	5
		SLT-R	5
		VIRM-4	1
		VIRM-6	1
		VIRM-R	1

Bijlage 2: Structuur softwarecode

Onderstaand een korte beschrijving van de bestanden welke de code voor de UI vormen.

Gedetailleerde informatie is beschikbaar na installatie van de software welke na installatie in de vorm van HTML-bestanden in een folder met de naam "Documentation" in de programmapolder staat.

De documentatie kan worden bekeken door het bestand Index.html te openen. De code zelf, inclusief het Delphi-project, staat na installatie in de folder "UI Source Code".

- OURS_UI.*
Het OURS_UI-project. Importeert alle relevante codebestanden, initialiseert de applicatie, maakt het hoofdformulier en start de applicatie.
- F_Main.pas en F_Main.dfm
Het hoofdformulier van de applicatie. Dit formulier verzorgt alle interactie met de gebruiker.
- F_Stamtabel.pas en F_Stamtabel.dfm
Dialog om de inhoud van tabel uit de database weer te geven. Deze wordt in het informatiegedeelte van het hoofdformulier weergegeven.
- OursStrings.pas
Dit bestand bevat alle gebruikte teksten. Om de gebruikersinterface in een andere taal te gebruiken is het voldoende om alle teksten in dit bestand te vertalen.
- OursMessage.pas
Dit bestand verzorgt het managen en weergeven van alle berichten voor de eindgebruiker.
- OursDatabase.pas
Dit bestand verzorgt de toegang tot de meegeleverde database.
- OursTypes.pas
Dit bestand bevat generieke type en class definities. Denk hierbij aan omgang met lijsten van teksten en getallen, maar ook aan frequenties en spectra.
- OursUtils.pas
Dit bestand bevat classes voor uitlopende ondersteunende zaken zoals conversies, geometrische berekeningen en bestandbenadering.
- OursData.pas
Dit bestand bevat alle datastructuren (class definities) voor een project en alle onderliggende data en resultaten.
- OursData_Xml.pas
Dit bestand bevat helper classes om de project data uit XML-bestanden te lezen en om de resultaten naar XML te schrijven.
- OursResultGround .pas
Bevat de datastructuren voor het lezen van de resultaten van de CPT tool (bepalen bodemopbouw).
- OursResultFem.pas
Bevat de datastructuren voor het lezen van de resultaten van de FEM-berekening de de scripts voor de naverwerking en de bodemonzekerheid.
- OursResultBuilding.pas
Bevat de datastructuren voor het schrijven van de invoer voor de gebouwmodule en lezen van de resultaten hiervan.

- OursResultMain.pas
Bevat de datastructuren voor het lezen en opslaan van de resultaten van de hoofdformule.
- OursCalcBase.pas
Bevat de generieke en gedeeltelijk abstracte code voor het uitvoeren en beheren van berekeningen via Python scripts.
- OursCalcGround.pas
Verzorgt het uitvoeren van het script om de bodemopbouw te bepalen (CPT_tool.py).
- OursCalcFem.pas
Verzorgt het uitvoeren van het script voor de FEM-berekening (FEM_main.py).
- OursCalcFemDerived.pas
Verzorgt het uitvoeren van het script voor de naverwerking van de FEM-resultaten (Naverwerking.py).
- OursCalcFemUncertainty.pas
Verzorgt het uitvoeren van het script voor de bepaling van de bodemonzekerheid (Bodemonzekerheid.py).
- OursCalcBuilding.pas
Verzorgt het uitvoeren van het script voor de gebouwmodule (Hgebouw.py).
- OursCalcMain.pas
Verzorgt het uitvoeren van het script voor de totaalformule (DeFormule.py).