RoadMind für FreeCAD 1.1



RoadMind ist die zentrale Arbeitsumgebung fÃ¼r Schwerlastingenieure, Transportplaner und SPMT-Operatoren. Die Software verbindet Ihr 3D-Transportmodell nahtlos mit allen Berechnungen, die fÃ¼r einen sicheren Transport entscheidend sind: StabilitÃ¤t, Achslasten, Ladungssicherung und Dokumentation â€“ komplett integriert in einem einzigen FreeCAD-Dokument.

©gottwald engineering

Inhaltsverzeichnis

RoadMind für FreeCAD 1.1 1
Wichtige Hinweise – Verwendungszweck, Verifizierung und Haftung 5
Verwendungszweck 5
Verifizierung der Berechnungsergebnisse 5
Haftung 6
Schlussbemerkung 6
Kapitel 1 – Einleitung 7
1.1 Zweck und Geltungsbereich 7
1.2 Anwendungsgrenzen 7
1.3 Normen und Richtlinien 7
1.4 Koordinatensystem und Vorzeichen 8
Kapitel 2 – Installation und Lizenz 9
2.1 Systemvoraussetzungen 9
2.2 Installation 9
2.3 Lizenz 9
Kapitel 3 – Der Workflow 10
3.1 Überblick 10
3.2 Ablauf im Detail 10
3.3 Grenzen 14
Kapitel 4 – Cargo erstellen oder importieren 15
4.1 Übersicht 15
4.2 Box 15
4.3 Zylinder 15
4.4 Import 15
4.5 Der COG – was er wirklich ist 15
4.6 Grenzen 16
Kapitel 5 – SPMT-Parameter 17
5.1 Übersicht 17
5.2 Herstellergeometrie 17
5.3 Modulauswahl 18
5.4 Anzahl Reihen 18
5.5 Lastfälle 18
5.6 Planungsstufen 19
5.7 Grenzen 19
Kapitel 6 – Zeichnung und Report 20
6.1 Zeichnung 20
6.2 Stabilitätspolygon in der Zeichnung 20
6.3 Report 20
6.4 Grenzen 21
Kapitel 7 – Berechnungsgrundlagen 21
7.0 Übersicht 21
7.1 Suspension Points (Aufhängungspunkte) 22
Was berechnet wird 22
Herleitung 22
Annahmen 22
Grenzen 23
Beispiel 96-t-Trafo 23

©gottwald engineering

7.2 Stability Margin..... 23
Was berechnet wird..... 23
Herleitung..... 23
Getrennte Auswertung in x und y..... 24
COG-Verschiebung durch Beschleunigung..... 24
Annahmen..... 24
Grenzen..... 24
Beispiel 96-t-Trafo..... 25
7.3 Tip Angle (Kippwinkel)..... 25
Was berechnet wird..... 25
Herleitung..... 25
Erforderliche Kippwinkel..... 26
Annahmen..... 26
Grenzen..... 26
Beispiel 96-t-Trafo..... 26
7.4 Reaktionskräfte..... 27
Was berechnet wird..... 27
Herleitung..... 27
Statische Bestimmtheit..... 27
Annahmen..... 28
Grenzen..... 28
Beispiel 96-t-Trafo..... 28
7.5 Achslastverteilung..... 28
Was berechnet wird..... 28
Herleitung..... 28
Annahmen..... 29
Grenzen..... 29
Beispiel 96-t-Trafo..... 29
7.6 Ground Pressure..... 30
Was berechnet wird..... 30
Herleitung..... 30
Annahmen..... 30
Grenzen..... 30
Beispiel 96-t-Trafo..... 31
7.7 Wind Envelope..... 31
Was berechnet wird..... 31
Herleitung..... 31
Annahmen..... 32
Grenzen..... 32
Beispiel 96-t-Trafo..... 32
7.8 Gesamtsystem-Kippen (Kippsystem A)..... 33
Was berechnet wird..... 33
Herleitung..... 33
Annahmen..... 33
Grenzen..... 33
Beispiel 96-t-Trafo..... 34
7.9 Zusammenfassung der Annahmen und Grenzen..... 34
Kapitel 8 – Lashing und Ladungssicherung..... 35
8.1 Übersicht..... 35
8.2 Lashpunkte..... 35

©gottwald engineering

8.3 Lashing-Typen....36
8.4 Geometrie und Kräftezerlegung....37
8.5 Balance of Forces (Gleiten)....37
Was berechnet wird....37
Herleitung....38
Annahmen....39
Grenzen....39
Beispiel 96-t-Trafo....39
8.6 Kippsystem B (Kippen auf dem SPMT)....40
Was berechnet wird....40
Herleitung....40
Wann Kippsystem B bindend ist....41
Beispiel 96-t-Trafo....41
8.7 Stopper....42
8.8 Bill of Materials....42
8.9 Zusammenfassung der Lashing-Grenzen....43
Kapitel 9 – Setup speichern und laden....44
9.1 Übersicht....44
9.2 Speichern....44
9.3 Laden....44
9.4 Aktualisieren....44
9.5 Referenzen....45
Kapitel 10 – Grenzen und Verantwortung....46
10.1 Was RoadMind nicht prüft....46
10.2 Wann ein Ingenieur zwingend drüberschauen muss....46
10.3 Verantwortung....46
10.4 Haftungsausschluss....47
Kapitel 11 – Anhang....48
11.1 Formelzeichen und Einheiten....48
11.2 Ausführliche Beispielrechnung....48
Ausgangsdaten....48
Schritt 1 – Sattelabstand und Mindestlänge....49
Schritt 2 – Modulauswahl....49
Schritt 3 – Anzahl Reihen....49
Schritt 4 – Reaktionen (statisch)....50
Schritt 5 – Reaktionen (Kurve links, a_y = 0,5 g)....51
Schritt 6 – Kippsystem B....51
Schritt 7 – Gesamtsystem....51
Schritt 8 – Lashing....51
11.3 Quellen....51
11.4 Glossar....52
Kapitel 12 – Anhang Beispielergebnisse....53

©gottwald engineering

Wichtige Hinweise – Verwendungszweck, Verifizierung und Haftung

Verwendungszweck

RoadMind ist eine Software zur Unterstützung ingenieurtechnischer Aufgaben im Bereich der Schwerlasttransporte mit SPMT (Self-Propelled Modular Transporter), insbesondere der SPMT-Konfiguration, Achslastverteilung, Stabilitätsberechnung, Kippnachweise, Ladungssicherung sowie verwandter statischer Berechnungen.

Die Software dient ausschließlich als Hilfsmittel für qualifizierte Anwender. Sie ersetzt weder die fachliche Beurteilung eines erfahrenen Schwerlast-Ingenieurs noch die Freigabe durch den verantwortlichen Planer, noch behördlich oder auftraggeberseitig vorgeschriebene Nachweise.

Verifizierung der Berechnungsergebnisse

Alle mit RoadMind erzeugten Berechnungen beruhen auf den vom Benutzer bereitgestellten oder importierten Eingabedaten. Für deren Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität ist ausschließlich der Benutzer verantwortlich.

Vor einer Verwendung der Berechnungsergebnisse für betriebliche Entscheidungen, Transportfreigaben, Achslastgenehmigungen oder sonstige sicherheitsrelevante Anwendungen sind sämtliche Ergebnisse durch den verantwortlichen Ingenieur unabhängig zu überprüfen.

Insbesondere sind die Berechnungsergebnisse mit den für den jeweiligen Transport gültigen und genehmigten Unterlagen abzugleichen. Hierzu gehören insbesondere:

- die Herstellerunterlagen und Betriebsgrenzen der eingesetzten SPMT-Module, einschließlich Achslastgrenzen, Hydraulikkapazität, Plattformhöhen und zulässiger Fahrgeschwindigkeiten,
- die gültigen Zertifikate und Prüfberichte für SPMT-Module, Achsen, Hydrauliksysteme und Steuerungen,
- die Herstellerunterlagen und gültigen Zertifikate für Anschlagmittel, Zurrmittel, Ketten, Spanngurte, Schäkel, Stopper und sonstige Lastaufnahme- und Ladungssicherungseinrichtungen,
- die genehmigten Lastgrenzen und Auflagebedingungen der Ladung, einschließlich Anschlagpunkte, Sattelauflagen und Schwerpunktangaben des Ladungsherstellers,
- die Ergebnisse der Streckenerkundung, einschließlich Bodenpressung, Brücken- und Durchlassklassifizierung, Steigungen, Gefälle, Kurvenradien und lichten Durchfahrtshöhen,
- die Anforderungen der zuständigen Genehmigungsbehörden für Grossraum- und Schwerlasttransporte,
- die Vorschriften der StVO, StVZO und der einschlägigen europäischen Regelwerke,

©gottwald engineering

- die Richtlinien der ALE (Association of Heavy Transport and Lifting) und der ESTA (European Association of Abnormal Road Transport and Mobile Cranes),
- die Normen EN 12195-1 und EN 12195-2 zur Ladungssicherung,
- sowie alle weiteren anwendbaren nationalen und internationalen Vorschriften.

Abweichungen zwischen den Berechnungsergebnissen von RoadMind und den genehmigten Unterlagen oder den Herstellerangaben sind vor einer Verwendung der Ergebnisse vollständig zu klären. Im Zweifelsfall haben stets die genehmigten Originalunterlagen, die Herstellerangaben sowie die Anforderungen der zuständigen Behörden und Auftraggeber Vorrang.

Haftung

RoadMind wurde mit größtmöglicher Sorgfalt entwickelt und anhand anerkannter ingenieurwissenschaftlicher Verfahren sowie internationaler Regelwerke implementiert und getestet.

Dennoch kann keine Gewähr dafür übernommen werden, dass die Software in jedem Einzelfall fehlerfrei arbeitet oder für jeden Anwendungsfall geeignete Ergebnisse liefert.

Soweit gesetzlich zulässig, übernimmt der Autor bzw. Lizenzgeber keine Haftung für unmittelbare oder mittelbare Schäden, Folgeschäden, Vermögensschäden, Betriebsunterbrechungen, Personen- oder Sachschäden oder entgangenen Gewinn, die aus der Nutzung oder Nichtnutzung der Software entstehen.

Die Haftung für Vorsatz, grobe Fahrlässigkeit sowie in gesetzlich zwingend vorgeschriebenen Fällen bleibt hiervon unberührt.

Mit Installation oder Verwendung der Software erkennt der Benutzer diese Bestimmungen an.

Schlussbemerkung

RoadMind wurde entwickelt, um die Planung, Berechnung, Verifizierung und Dokumentation von Schwerlasttransporten mit SPMT zu unterstützen. Die Software führt Berechnungen und technische Informationen aus unterschiedlichen Quellen zusammen und unterstützt den Ingenieur bei der Vorbereitung, Überprüfung und nachvollziehbaren Dokumentation technischer Entscheidungen.

RoadMind ersetzt weder die genehmigten Herstellerunterlagen noch die nach den geltenden Vorschriften erforderlichen Nachweise, Freigaben oder die fachliche Verantwortung des verantwortlichen Ingenieurs.

©gottwald engineering

Kapitel 1 – Einleitung

1.1 Zweck und Geltungsbereich

RoadMind ist eine FreeCAD-Workbench zur Planung und Berechnung von Schwerlasttransporten mit SPMT (Self-Propelled Modular Transporter). Sie deckt den gesamten Planungsablauf ab: von der Erfassung der Ladung über die SPMT-Konfiguration und den Stabilitätsnachweis bis zur Lashing-Berechnung, der technischen Zeichnung und dem PDF-Report.

Die Workbench ist für den **planenden Ingenieur** gedacht, nicht für den Bediener auf der Baustelle. Sie liefert die Zahlen, die ein erfahrener Schwerlast-Ingenieur braucht, um eine Transportkonfiguration zu bewerten und freizugeben.

1.2 Anwendungsgrenzen

RoadMind ist **kein** Ersatz für:

- die geotechnische Beurteilung des Baugrunds
- die statische Berechnung der Ladung selbst (Verformung, Spannungen, Anschlagpunkte)
- die Abstimmung mit dem SPMT-Hersteller zu Achslasten, Hydraulik und Betriebsgrenzen
- die Streckenerkundung (Brücken, Engstellen, Bodenverhältnisse)
- die Genehmigungsplanung nach StVO/StVZO
- die dynamische Analyse des Transports (Schwingungen, Resonanzen)

RoadMind ist ein **Planungswerkzeug**. Es liefert die Zahlen für die ersten Entwurfsschritte und für die Dokumentation. Die Freigabe und die Verantwortung für die Durchführung bleiben beim ausführenden Ingenieur.

1.3 Normen und Richtlinien

Die Berechnungen folgen:

- **ALE Engineering Guidelines, Section 03 Transport** – für Kippwinkel, Kapazitätsfaktoren und die 2°-Reserve
- **ESTA Best-Practice Guideline for SPMTs** – für die Lastannahmen und die Betriebsgrenzen
- **EN 12195-1** – für die Lashing-Berechnung (Zurrgurte, Ketten)
- **EN 12195-2** – für die Lashing-Kapazitäten (LC-Werte)

©gottwald engineering

Die Normen und Richtlinien werden **nicht** durch RoadMind interpretiert. RoadMind setzt die in den Richtlinien genannten Werte direkt um. Die Verantwortung für die richtige Anwendung der Richtlinien bleibt beim Nutzer.

1.4 Koordinatensystem und Vorzeichen

Alle Berechnungen in RoadMind verwenden ein einheitliches Koordinatensystem:

- **x = 0** an der Ladungsvorderkante, **+x** nach hinten
- **y = 0** auf der Mittellinie, **+y** nach links, **−y** nach rechts
- **z = 0** auf dem Boden, **+z** nach oben

Beschleunigungen:

- **a_x > 0** – Beschleunigung nach hinten (Bremsen ist negativ)
- **a_y > 0** – Beschleunigung nach links
- **a_x = 0,8 g** – übliche Annahme für Vorwärtsbeschleunigung
- **a_x = −0,5 g** – übliche Annahme für Bremsen
- **a_y = ±0,5 g** – übliche Annahme für Kurvenfahrt

Neigungen:

- **Slope long > 0** – Steigung (Gefälle ist negativ)
- **Slope lat > 0** – Neigung nach rechts

Wind:

- **Wind lateral > 0** – Wind von rechts
- **Wind long > 0** – Wind von hinten

Lashing:

- **Fwd** – sichert gegen Vorwärtsrutschen
- **Aft** – sichert gegen Rückwärtsrutschen
- **Left** – sichert gegen Rutschen nach rechts
- **Right** – sichert gegen Rutschen nach links

©gottwald engineering

•

Kapitel 2 – Installation und Lizenz

2.1 Systemvoraussetzungen

RoadMind läuft auf:

- **FreeCAD 1.1** oder neuer (Windows, Linux, macOS)
- Python 3.11 oder neuer
- SQLite (in FreeCAD enthalten)
- reportlab (in FreeCAD enthalten oder per pip nachinstallierbar)

2.2 Installation

Die Installation erfolgt über den RoadMind-Installer, der die Workbench in das FreeCAD-Modulverzeichnis kopiert:

- **Windows:** `%APPDATA%\FreeCAD\v1-1\Mod\RoadMind\`
- **Linux:** `~/.local/share/FreeCAD/v1-1/Mod/RoadMind/`
- **macOS:** `~/Library/Application Support/FreeCAD/v1-1/Mod/RoadMind/`

Nach der Installation muss FreeCAD neu gestartet werden. Die Workbench erscheint dann unter **Tools → Workbenches → RoadMind**.

2.3 Lizenz

RoadMind ist kommerzielle Software. Die Lizenz ist an einen Arbeitsplatz gebunden (Single Seat).

- **28-Tage-Trial:** Alle Funktionen frei, keine Registrierung, keine Wasserzeichen.
- **Vollversion:** 990 € einmalig, inkl. 12 Monate Updates und E-Mail-Support.
- **Update-Verlängerung:** 350 €/Jahr nach Ablauf der 12 Monate.

Die Lizenzdatei wird nach `%APPDATA%\FreeCAD\RoadMind\license.json` (Windows) bzw. `~/.FreeCAD/RoadMind/license.json` (Linux/macOS) kopiert. FreeCAD muss danach neu gestartet werden.

Grenzen:

- Die Lizenzprüfung erfolgt offline. Ein Umzug auf einen anderen Rechner ist ohne neue Lizenz nicht möglich.
- Die Lizenz ist nicht übertragbar.

©gottwald engineering

Kapitel 3 – Der Workflow

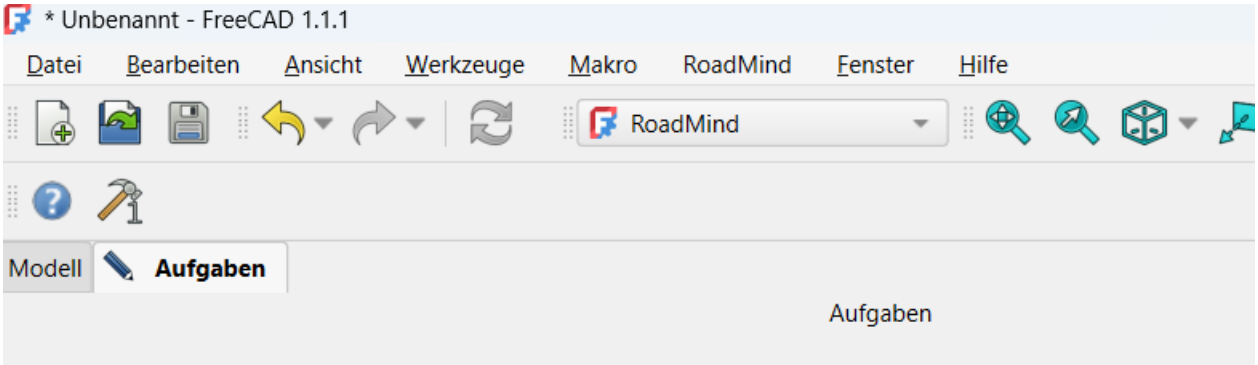
3.1 Überblick

RoadMind folgt einem festen Workflow:

1. **Cargo erstellen oder importieren** – Box, Zylinder oder STEP-Datei
2. **Sättel positionieren** – Auflagepunkte der Ladung auf dem SPMT
3. **SPMT konfigurieren** – Module auswählen, Lastfälle eingeben, berechnen
4. **3D-Modell generieren** – SPMT-Module, Sättel und Ladung im FreeCAD-Modell
5. **Lashing planen** – Lashpunkte setzen, Lashings definieren, Balance rechnen
6. **Zeichnung erstellen** – A2-TechDraw-Zeichnung mit allen Ansichten
7. **Report exportieren** – A4-PDF mit allen Berechnungsergebnissen
8. **Setup speichern** – alle Eingaben und Ergebnisse als FreeCAD-Objekt

3.2 Ablauf im Detail

Zunächst muß in FreeCAD die workbench RoadMind geladen werden:



start RoadMind by clicking : 

Schritt 1 – Cargo: Die Ladung kann als Box, Zylinder oder STEP-Datei erstellt werden. Die Masse, die Abmessungen und der COG werden automatisch aus der Geometrie abgeleitet. Für Boxen und Zylinder kann die Masse und der COG manuell überschrieben werden.

Schritt 2 – Sättel: Die Sättel sind die Auflagepunkte zwischen SPMT und Ladung. Sie werden als eigene Objekte im Dokument angelegt. Die Position (x) und die Höhe werden für die Berechnung verwendet.

Schritt 3 – SPMT: Aus einer SQLite-Datenbank werden die SPMT-Modelle geladen. Der Nutzer wählt ein Modell oder lässt RoadMind automatisch das passende auswählen. Die Lastfälle

©gottwald engineering

(Beschleunigung, Kurve, Neigung, Wind) werden eingegeben. Ein Klick auf "Calculate" startet die Berechnung.

Schritt 4 – 3D: Mit "Generate SPMT in FreeCAD" werden die SPMT-Module als 3D-Objekte im Dokument erzeugt. Die Module werden automatisch positioniert, die Ladung und die Sättel werden auf die richtige Höhe gesetzt.

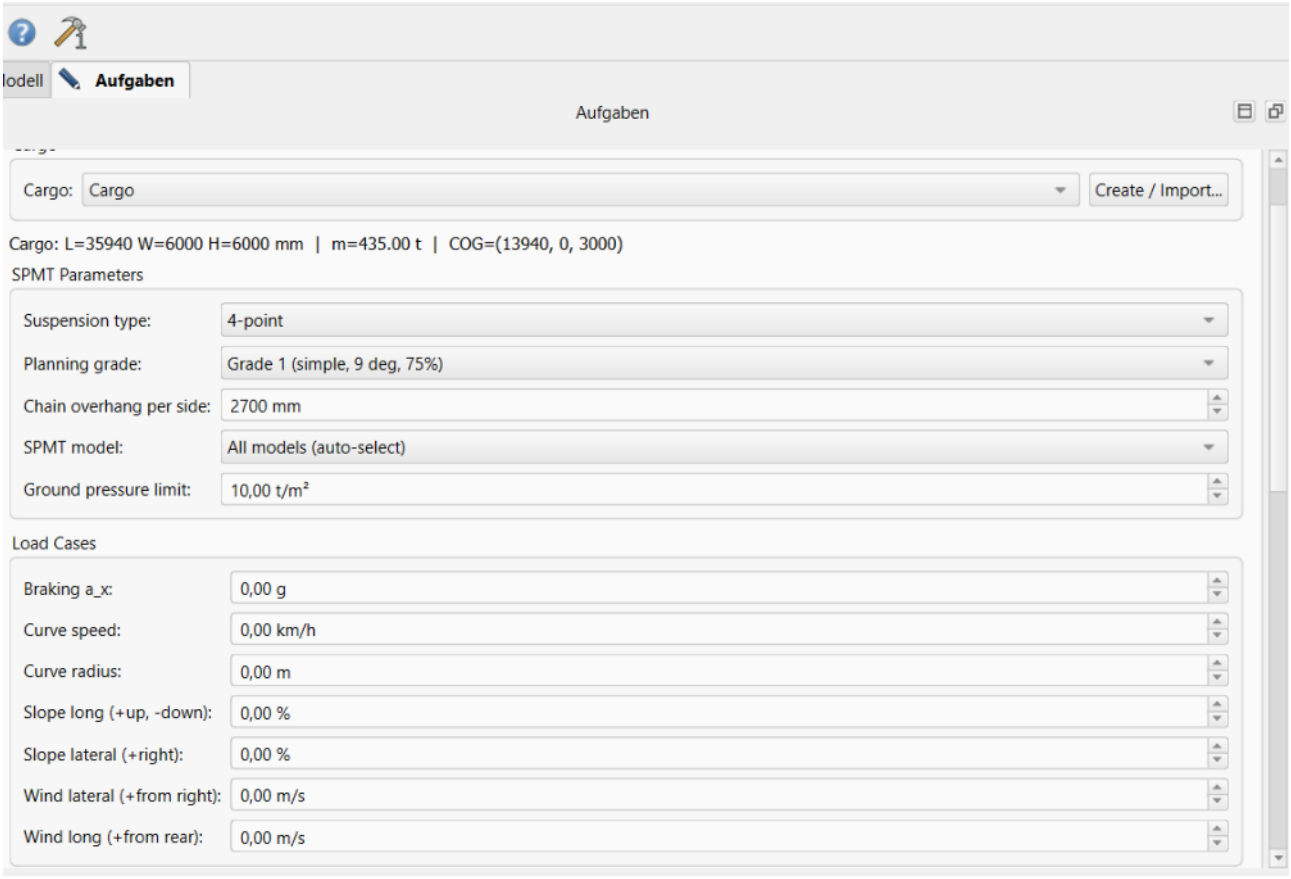
Schritt 5 – Lashing: Der Lashing-Editor öffnet sich als eigenes Fenster. Lashpunkte werden per Klick auf das 3D-Modell gesetzt. Lashings verbinden SPMT-Punkte mit Cargo-Punkten. Die Balance of Forces wird nach dem Setzen automatisch berechnet.

Schritt 6 – Zeichnung: Mit "Create Drawing" wird eine A2-TechDraw-Zeichnung erstellt. Sie enthält vier orthographische Ansichten (Vorder-, Seiten-, Drauf- und Iso-Ansicht) sowie eine zweite Draufsicht mit dem Stabilitätspolygon und dem COG.

Schritt 7 – Report: Der PDF-Report wird über "Export PDF..." erzeugt. Er enthält alle Berechnungsergebnisse: Ladungsdaten, Sattelpositionen, SPMT-Konfiguration, Stabilität, Achslasten, Reaktionen und den Self-Check.

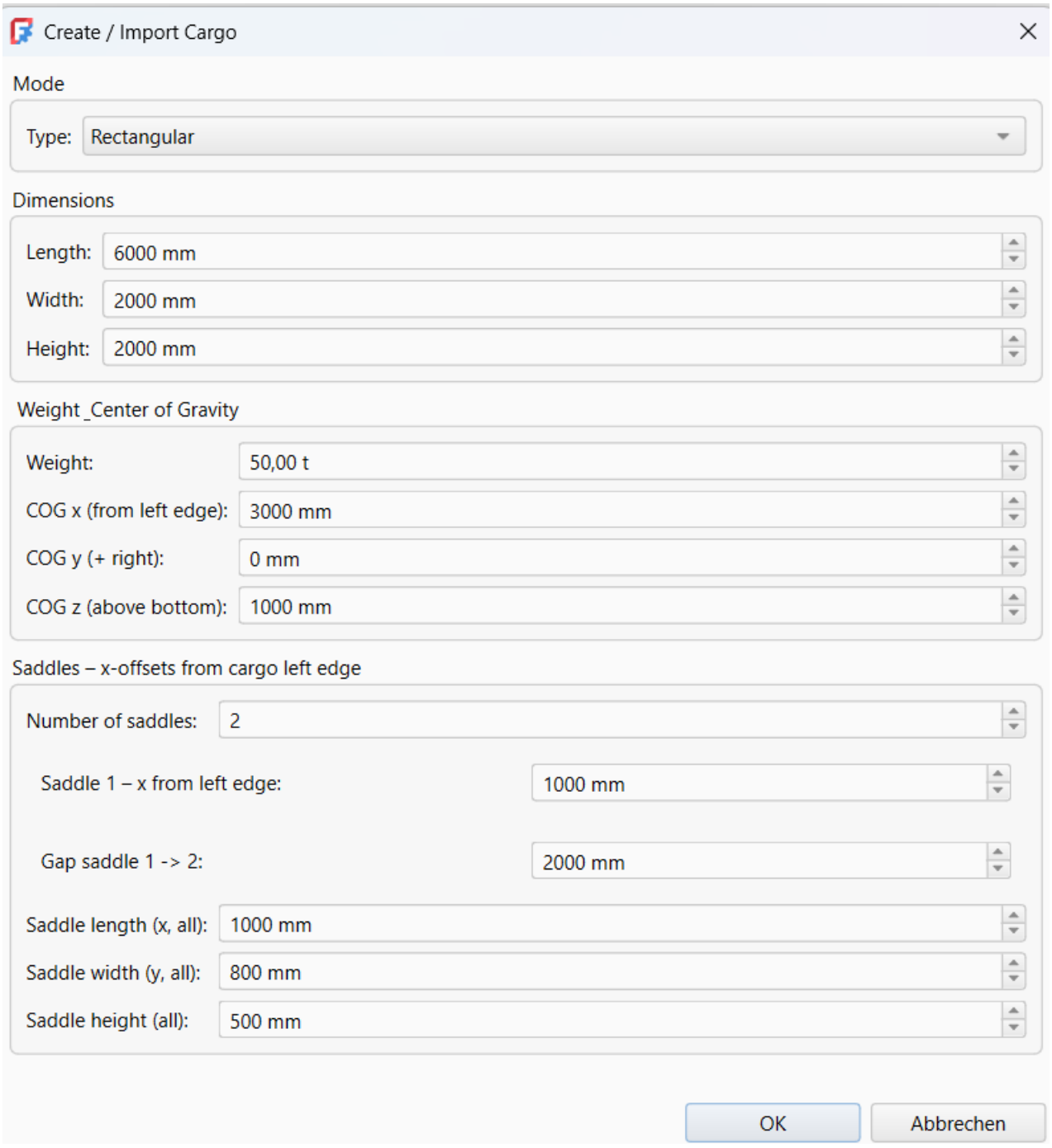
Schritt 8 – Setup: Mit "Save Setup..." werden alle Eingaben und Ergebnisse in einem FreeCAD-Objekt gespeichert. Beim Laden wird das Task Panel mit den gespeicherten Werten befüllt.

Es öffnet sich das zentrale Taskpanel:



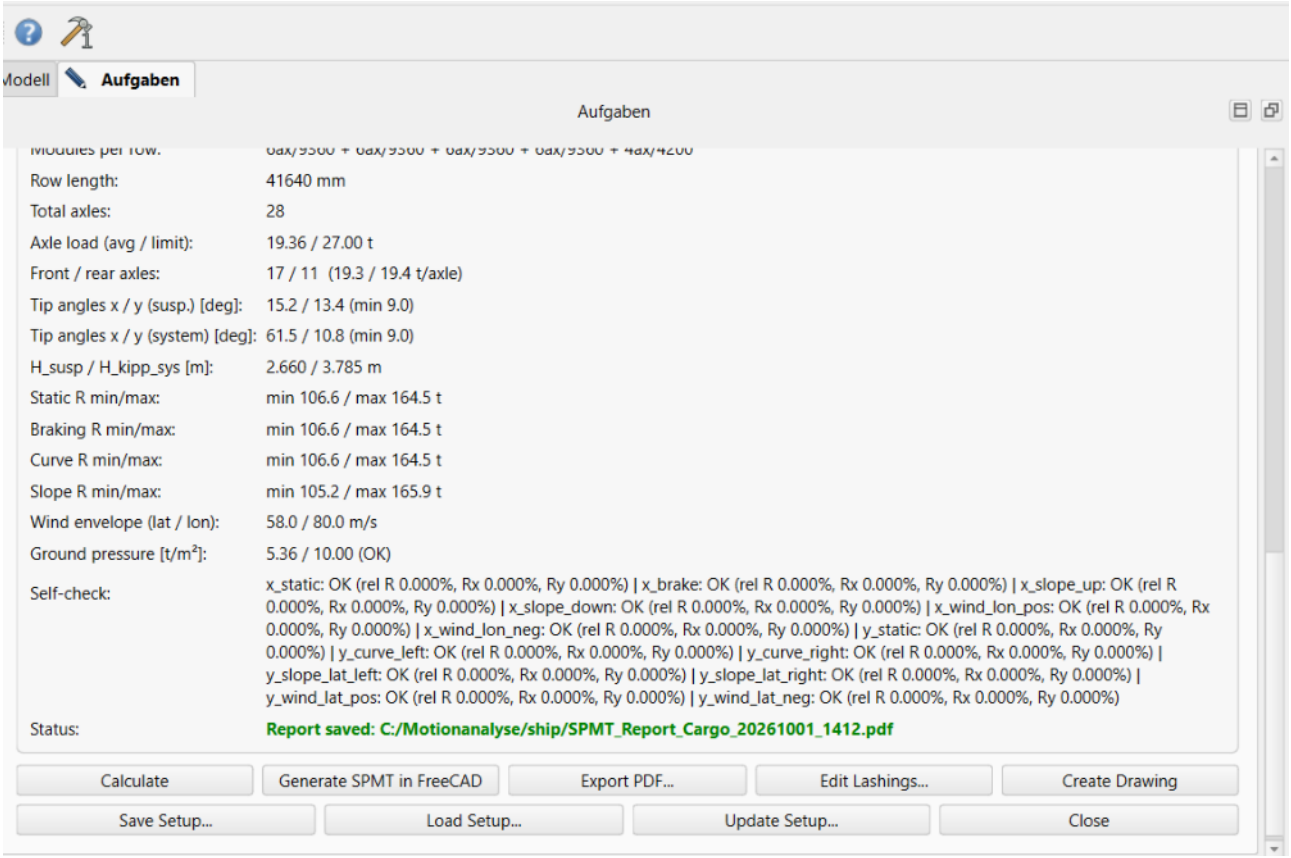
©gottwald engineering

Das Taskpanel um eine Ladung zu definieren:

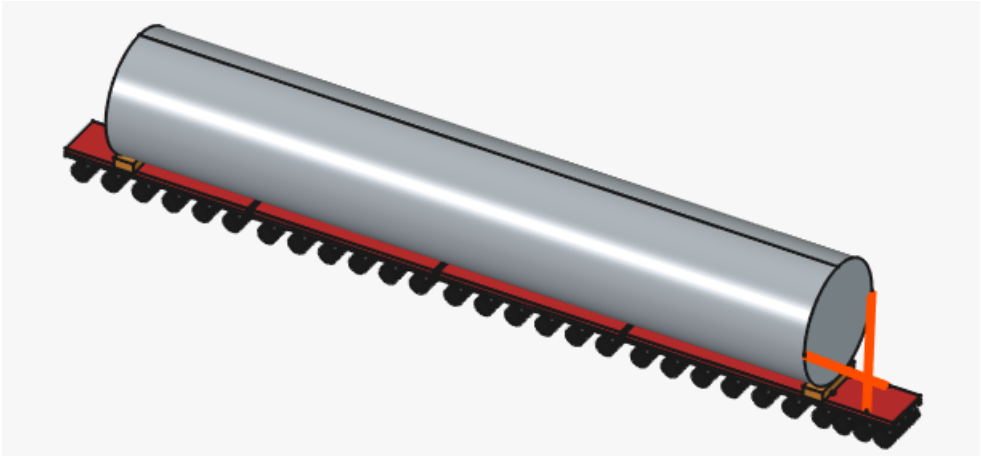


©gottwald engineering

und der untere Bereich des zentralen Task Panels für die Berechnungen:



das Ergebnis der automatisch generierten Ladung und SPMT:



©gottwald engineering

3.3 Grenzen

- Der Workflow ist **sequenziell**. Ein Zurückspringen zu einem früheren Schritt ist möglich, erfordert aber eine Neuberechnung.
- Die 3D-Generierung setzt voraus, dass die Ladung und die Sättel korrekt positioniert sind. Ein nachträgliches Verschieben der Ladung im 3D-Modell wird in der Berechnung **nicht** berücksichtigt.
- Die Lashing-Berechnung ist unabhängig von der SPMT-Berechnung. Änderungen an der SPMT-Konfiguration erfordern keine Neuberechnung des Lashings, aber umgekehrt.

©gottwald engineering

Kapitel 4 – Cargo erstellen oder importieren

4.1 Übersicht

Die Ladung ist der Ausgangspunkt jeder SPMT-Planung. RoadMind unterstützt drei Arten:

1. **Box** – rechteckige Ladung (z. B. Trafo, Maschinenteil)
2. **Zylinder** – zylindrische Ladung (z. B. Tank, Rohr)
3. **Import** – STEP/IGES/STL-Datei (beliebige Geometrie)

4.2 Box

Eine Box ist die einfachste Ladungsform. Sie wird durch Länge, Breite und Höhe definiert. RoadMind berechnet daraus:

- **Volumen** = L × B × H
- **Masse** = Volumen × Dichte (Dichte manuell eingebbar)
- **COG** = geometrischer Mittelpunkt, optional manuell verschiebbar

Der COG einer Box ist der Schwerpunkt des Quaders. Wenn die Masse ungleichmässig verteilt ist (z. B. Trafo mit schwerem Kern), muss der COG manuell eingegeben werden. RoadMind verwendet den manuell eingegebenen Wert, wenn er gesetzt ist.

4.3 Zylinder

Ein Zylinder wird durch Durchmesser und Länge definiert. Der COG liegt im geometrischen Mittelpunkt. Bei liegenden Zylindern (Achse horizontal) ist die Höhe des COG gleich dem Radius.

4.4 Import

STEP-, IGES- und STL-Dateien können importiert werden. Nach dem Import:

- wird die Masse manuell eingegeben (RoadMind kann sie nicht aus der Geometrie ableiten)
- wird der COG manuell eingegeben oder aus der Geometrie übernommen

Bei importierten Teilen ist die **Lage des Koordinatensystems** entscheidend. RoadMind nimmt an, dass das importierte Teil mit seinem lokalen Ursprung im FreeCAD-Ursprung liegt. Wenn das nicht der Fall ist, muss das Teil nach dem Import verschoben werden.

4.5 Der COG – was er wirklich ist

Der COG (Center of Gravity, Schwerpunkt) ist **der wichtigste Eingabeparameter** für die SPMT-Berechnung. Ein Fehler von 100 mm im COG kann die Achslastverteilung um mehrere Tonnen verschieben.

©gottwald engineering

Der COG wird in RoadMind **relativ zur Ladungsunterkante** angegeben, nicht absolut über dem Boden. Die z-Koordinate des COG ist also der Abstand vom Boden der Ladung bis zum Schwerpunkt.

Die absolute Höhe über dem Boden wird in der Berechnung ermittelt:

```
cog_z_abs = cog_z_local + saddle_height + platform_height    (4.1)
```

Wichtig: Wenn die Ladung auf dem SPMT montiert wird, ändert sich der COG der **Ladung** nicht. Der COG des **Gesamtsystems** (Ladung + SPMT) liegt woanders.

4.6 Grenzen

- RoadMind leitet den COG **nicht** aus der Massenverteilung ab. Er muss vom Nutzer korrekt eingegeben werden.
- Bei importierten Teilen ist die Koordinatenlage oft unklar. Eine Prüfung im 3D-Modell ist unerlässlich.
- Der COG wird als **punktförmig** angenommen. Bei langgestreckten Ladungen mit verteilter Masse ist das eine Vereinfachung.
- Die Masse ist eine **Nennmasse**. Fertigungstoleranzen, Anbauteile und Verpackung sind nicht automatisch enthalten.

©gottwald engineering

Kapitel 5 – SPMT-Parameter

5.1 Übersicht

Die SPMT-Konfiguration wird aus einer SQLite-Datenbank geladen. Die Datenbank enthält pro Modell:

- **Hersteller** und **Modellname**
- **Anzahl Achsen** (axle_lines)
- **Plattformlänge** (platform_length_mm)
- **Plattformbreite** (platform_width_mm)
- **Plattformhöhe** (platform_height_mm)
- **Rahmendicke** (frame_thickness_mm)
- **Reifenradius** (tire_radius_mm)
- **Reifenbreite** (tire_width_mm)
- **Drehkranzdurchmesser** (turntable_dia_mm)
- **Totgewicht** (dead_weight_tonnes)
- **Maximale Achslast** (max_axle_load_tonnes)

5.2 Herstellergeometrie

RoadMind kennt die Querabstände der Aufhängungspunkte für die gängigen Hersteller:

Hersteller	**Spurweite [mm]**	**y_half [mm]**
Scheuerle	1450	725
KAMAG	1450	725
Goldhofer	1450	725
Goldhofer PST/ES-E 285	1810	905
Cometto	1800	900
Nicolas Euro	1820	910
Nicolas AWL	2190	1095
Nicolas 365	2150	1075

Der y_half-Wert ist der Abstand eines äusseren Aufhängungspunkts von der Mittellinie bei einer Reihe. Bei mehreren Reihen wird er um (Modulbreite + Kupplungsspalt) pro zusätzliche Reihe verschoben.

©gottwald engineering

5.3 Modulauswahl

RoadMind wählt die Module automatisch aus. Der Algorithmus:

1. **Mindestlänge** = Sattelabstand + 2 × Überhang (Standard 700 mm)
2. **Sortierung** der Module nach Länge, absteigend
3. **Anzahl lange Module** = aufgerundet (Mindestlänge / längstes Modul)
4. **Restlänge** = Mindestlänge − (Anzahl lange Module − 1) × längstes Modul
5. **Kürzestes Modul** aus dem Rest, das die Restlänge abdeckt

Wenn die Restlänge von keinem kürzeren Modul abgedeckt wird, wird ein weiteres langes Modul hinzugefügt.

5.4 Anzahl Reihen

Die Anzahl Reihen (n_files) wird iterativ bestimmt:

- Start bei n_files = 1
- Berechnung aller Kriterien (Achslast, Kippwinkel, Hydraulik, Bodendruck, Gesamtsystem)
- Wenn alle Kriterien erfüllt → fertig
- Sonst n_files = 2, dann 3, bis maximal 8
- Wenn keine Anzahl alle Kriterien erfüllt, wird die Konfiguration mit den **wenigsten Verletzungen** gewählt

5.5 Lastfälle

RoadMind bewertet jeden Lastfall **signiert**, das heisst mit Vorzeichen. Dadurch werden die Extremwerte in beide Richtungen erfasst.

Standard-Lastfälle:

Lastfall	**a_x**	**a_y**
Static	0	0
Braking	−0,8 g	0
Braking (soft)	−0,5 g	0
Curve left	0	+0,5 g
Curve right	0	−0,5 g
Slope up	+0,35 g	0
Slope down	−0,35 g	0
Wind lateral	0	±a_wind
Wind longitudinal	±a_wind	0

©gottwald engineering

Die Neigungsbeschleunigung wird aus dem Neigungswinkel berechnet:

```
a_slope = sin(atan((slope_pct + 3,49) / 100))                (5.1)
```

Der Wert 3,49 % entspricht der ESTA-Reserve von 2°.

5.6 Planungsstufen

RoadMind unterscheidet zwei Planungsstufen:

Grade 1 (Standard):

- Kippwinkel ≥ 9,0°
- Kapazitätsfaktor 0,75 (75 % der Nennkapazität)
- Für einfache Transporte auf festem Boden mit direkter Kupplung

Grade 2 (komplex):

- Kippwinkel ≥ 7,0°
- Kapazitätsfaktor 0,90 (90 % der Nennkapazität)
- Für Barge-Transporte, Ballastierung, dynamische Lasten

Die Wahl der Planungsstufe liegt beim Nutzer. Im Zweifel ist Grade 1 zu wählen.

5.7 Grenzen

- Die Datenbank enthält **Beispielmodelle**. Der Nutzer muss die Modelle seiner tatsächlichen Flotte eintragen.
- Die Geometrie der Hersteller ist eine **Näherung**. Genaue Werte erhält man vom Hersteller.
- Die Lastfälle sind **Vorschläge**. Die tatsächlichen Lasten hängen vom Transportweg ab.
- Die Modulauswahl berücksichtigt **nicht**, ob Module verfügbar oder einsatzbereit sind.

©gottwald engineering

Kapitel 6 – Zeichnung und Report

6.1 Zeichnung

Die TechDraw-Zeichnung wird mit "Create Drawing" erzeugt. Sie enthält:

- **Vorderansicht** (Blick entlang +Y): Ladung mit SPMT, Höhenbemassung des COG
- **Seitenansicht** (Blick entlang +X): Ladung mit SPMT, Bemassung
- **Draufsicht** (Blick entlang +Z): Ladung mit SPMT, Sattelabstände, Längenmasse
- **Iso-Ansicht**: 3D-Darstellung, skaliert auf die Breite des Zeichnungskopfs
- **Zweite Draufsicht** (unter der ersten): nur SPMT-Module mit Stabilitätspolygon, COG und Lastfall-Envelope

Das Format ist A2-Querformat (594 × 420 mm). Die Skalierung wird automatisch gewählt (1:1 bis 1:1000), sodass alle Ansichten in ihre Zellen passen.

6.2 Stabilitätspolygon in der Zeichnung

In der zweiten Draufsicht wird das Stabilitätspolygon als Modellgeometrie eingezeichnet:

- **Rechteck** (schwarz) – bei 4-Punkt-Aufhängung
- **Dreieck** (schwarz) – bei 3-Punkt-Aufhängung
- **COG-Kreuz** (rot) – Position des Ladungs-COG, 3 m über Ladungsunterkante
- **Lastfall-Envelope** (grau, gestrichelt) – Bereich, in dem sich der COG unter allen Lastfällen bewegt

Der Envelope zeigt auf einen Blick, wie weit der COG unter den extremalen Lastfällen von der Ruhelage abweicht. Je näher er an den Rand des Polygons kommt, desto kritischer ist die Konfiguration.

6.3 Report

Der PDF-Report wird mit "Export PDF..." erzeugt. Er ist A4-Hochformat und enthält:

- **Kopfzeile:** Ladung, Datum, Planungsstufe, Support Type, Status, limitierender Faktor
- **Ladung:** Masse, COG-Koordinaten, Sattelhöhe
- **Sattelpositionen:** x-Koordinaten aller Sättel
- **SPMT-Konfiguration:** Kette, Achsen, Reihen, Plattformgeometrie, Gewichte
- **Stabilität (Suspension):** H_susp, r_poly, Neigung, Kippwinkel, Kriterien
- **Stabilität (Gesamtsystem):** H_kipp_sys, Kippwinkel, Kriterium
- **Neigung/Kurve/Wind:** alle Eingaben und Wind Envelope

©gottwald engineering

- **Achslast:** Durchschnitt, Grenzwert, Nennkapazität
- **Suspension Points:** x- und y-Koordinaten
- **Reaktionen pro Lastfall:** R-Werte an jedem Punkt
- **Self-Check:** Abweichung zwischen numerischer und analytischer Lösung

6.4 Grenzen

- Die Zeichnung ist eine **Planungszeichnung**, keine Fertigungszeichnung. Sie ersetzt keine technische Zeichnung mit Toleranzen.
- Der Report enthält **berechnete Werte**, keine gemessenen. Er ist eine Dokumentation der Planung, keine Freigabe.
- Die Wind Envelope wird als **konstanter Wert** angegeben. Die tatsächliche Windbelastung hängt von Böen und Richtungswechseln ab.
- Der Report hat **keine Seitenzahlen** und **kein Inhaltsverzeichnis**. Für die Dokumentation muss er manuell ergänzt werden.

Kapitel 7 – Berechnungsgrundlagen

7.0 Übersicht

Dieses Kapitel beschreibt, welche Grössen RoadMind berechnet, auf welcher mathematischen Grundlage, mit welchen Annahmen und wo die Grenzen des Verfahrens liegen. Es ist als Nachschlagewerk für den prüfenden Ingenieur gedacht, nicht als Einführung in die SPMT-Planung.

Alle Berechnungen folgen dem in Kapitel 4 definierten Koordinatensystem:

- x = 0 an der Ladungsvorderkante, +x nach hinten
- y = 0 auf der Mittellinie, +y nach links
- z = 0 auf dem Boden, +z nach oben

Kräfte werden in Tonnen [t] angegeben, Momente in Tonnenmeter [t·m], Längen in Millimetern [mm], Winkel in Grad [°]. Beschleunigungen werden als Vielfache der Erdbeschleunigung g angegeben (1 g = 9,81 m/s²).

Alle Berechnungen werden pro **Anzahl Reihen** (n_files) durchgeführt. RoadMind sucht die kleinste Anzahl Reihen, für die alle Kriterien erfüllt sind. Wenn keine Anzahl alle Kriterien erfüllt, wird die Konfiguration mit den wenigsten Verletzungen gewählt – der Status wird dann explizit als "NOT OK" gekennzeichnet.

©gottwald engineering

7.1 Suspension Points (Aufhängungspunkte)

Was berechnet wird

RoadMind leitet aus den Sattelpositionen und der SPMT-Geometrie die Aufhängungspunkte ab, die das Stabilitätspolygon aufspannen. Bei 3-Punkt-Aufhängung entsteht ein Dreieck, bei 4-Punkt-Aufhängung ein Rechteck.

Herleitung

Die Sattelpositionen seien $x_1 < x_2 < \ldots < x_n$. Der Ladungsschwerpunkt liege bei x_{COG}. Die Aufhängungspunkte werden nicht direkt an den Sattelpositionen angesetzt, sondern an den **Mitten zwischen Sattel und COG** – das entspricht der tatsächlichen Lastabtragung, wenn die SPMT-Module über die gesamte Kettenlänge verteilt sind und die Last über die Sättel eingeleitet wird.

Der vordere Aufhängungspunkt liegt bei:

$$x_{fore} = (x_1 + x_{COG}) / 2 \qquad (7.1)$$

Der hintere Aufhängungspunkt liegt bei:

$$x_{aft} = (x_{COG} + x_n) / 2 \qquad (7.2)$$

Der seitliche Abstand y_{half} wird aus der Anzahl Reihen n_{files} und der Modulbreite b abgeleitet. Bei $n_{files} = 1$ ist y_{half} die halbe Spurweite des Herstellers (z. B. 725 mm bei Scheuerle). Bei $n_{files} > 1$ wird für jede zusätzliche Reihe um (b + 300 mm) nach aussen verschoben:

$$y_{half} = y_0 + (n_{files} - 1) \cdot (b + g) \qquad (7.3)$$

mit y_0 = halbe Spurweite bei einer Reihe, b = Modulbreite, g = 300 mm Kupplungsspalt.

Die Aufhängungspunkte sind dann:

3-Punkt:

$$P_1 = (x_{fore}, 0)$$
$$P_2 = (x_{aft}, -y_{half})$$
$$P_3 = (x_{aft}, +y_{half})$$

4-Punkt:

$$P_1 = (x_{fore}, -y_{half})$$
$$P_2 = (x_{fore}, +y_{half})$$
$$P_3 = (x_{aft}, -y_{half})$$
$$P_4 = (x_{aft}, +y_{half})$$

Annahmen

- Die Last wird gleichmässig auf alle Achsen einer Reihe verteilt. Das ist bei SPMT mit hydraulischer Niveauregulierung näherungsweise erfüllt.
- Der Kupplungsspalt zwischen zwei Modulen beträgt 300 mm. Das entspricht der Standard-Kupplung bei Scheuerle/KAMAG/Goldhofer.

©gottwald engineering

- Der COG liegt zwischen den beiden äusseren Sätteln. Andernfalls verschieben sich die Aufhängungspunkte so, dass das Polygon kleiner wird – die Rechnung ist dann konservativ.

Grenzen

- Das Verfahren prüft **nicht**, ob die tatsächliche hydraulische Lastverteilung mit der angenommenen übereinstimmt. Wenn einzelne Achsen abgeschaltet sind oder der Niveauausgleich gesperrt ist, kann die reale Lastverteilung erheblich abweichen.
- Bei mehr als zwei Sätteln (z. B. drei oder vier Auflagepunkten auf der Ladung) wird die Lastverteilung zwischen den Sätteln nicht explizit gelöst. RoadMind nimmt implizit an, dass die Sattelpositionen die Aufhängungspunkte dominieren.
- Das Polygon beschreibt nur die **Geometrie** der Aufhängung, nicht die Steifigkeit des Systems. Bei sehr weichen Lasten (z. B. langen Trägern) kann die reale Verformung das Kippverhalten beeinflussen.

Beispiel 96-t-Trafo

Ladung: 12 × 3 × 3,5 m, 96 t, COG mittig bei x_COG = 6000 mm. Sättel: zwei Stück bei x_1 = 2000 mm und x_2 = 10000 mm. SPMT: Scheuerle Gen3, 2 Reihen, Modulbreite 2430 mm, y_0 = 725 mm.

```
x_fore = (2000 + 6000) / 2 = 4000 mm
x_aft  = (6000 + 10000) / 2 = 8000 mm
y_half = 725 + (2 − 1) · (2430 + 300) = 3455 mm
```

Das Stabilitätsrechteck hat also die Eckpunkte:

```
P_1 = (4000, −3455)    P_2 = (4000, +3455)
P_3 = (8000, −3455)    P_4 = (8000, +3455)
```

7.2 Stability Margin

Was berechnet wird

Der Stability Margin ist der kleinste senkrechte Abstand des (statischen oder verschobenen) COG zu einer Kante des Stabilitätspolygons. Er ist das zentrale Mass für die Kippgefahr.

Herleitung

Sei das Stabilitätspolygon durch die geordneten Eckpunkte P_1 … P_n gegeben (gegen den Uhrzeigersinn sortiert). Sei p der zu prüfende COG-Punkt. Für jede Polygonseite zwischen P_i und P_{i+1} wird der **vorzeichenbehaftete** senkrechte Abstand berechnet:

```
d_i = (e_x · (p_y − y_i) − e_y · (p_x − x_i)) / |e|          (7.4)
```

mit e = P_{i+1} − P_i dem Kantenvektor. Das Vorzeichen ist positiv, wenn p auf der Innenseite der Kante liegt, und negativ, wenn p ausserhalb liegt.

Der Stability Margin ist das Minimum über alle Kanten:

©gottwald engineering

```
r = min(d_1, d_2, …, d_n)                                    (7.5)
```

RoadMind berechnet diesen Wert für **jeden Lastfall** und für **beide Vorzeichen der Verschiebung** (also +x und −x, +y und −y). Das Minimum über alle Lastfälle und beide Richtungen ist der massgebende Margin in x bzw. y.

Getrennte Auswertung in x und y

Für das Kippen um die Längsachse (y-Richtung) sind nur die **y-Kanten** des Polygons relevant, für das Kippen um die Querachse (x-Richtung) nur die **x-Kanten**. RoadMind klassifiziert jede Kante nach ihrer Orientierung:

- Eine Kante mit |e_x| ≥ |e_y| ist überwiegend x-parallel → sie liefert einen Beitrag zum **y-Margin**
- Eine Kante mit |e_x| < |e_y| ist überwiegend y-parallel → sie liefert einen Beitrag zum **x-Margin**

Das ist wichtig, weil eine schmale, lange Konfiguration in x-Richtung einen ganz anderen Margin hat als in y-Richtung.

COG-Verschiebung durch Beschleunigung

Für einen Lastfall mit Beschleunigung a_x in x-Richtung und a_y in y-Richtung verschiebt sich der wirksame COG um:

```
Δx = a_x · H_susp                                            (7.6)
Δy = a_y · H_susp                                            (7.7)
```

mit H_susp dem wirksamen Hebelarm zwischen COG und Aufhängungsebene. Der verschobene COG liegt dann bei (x_COG + Δx, y_COG + Δy) – das ist der Punkt, dessen Margin berechnet wird.

Annahmen

- Die Beschleunigung wirkt als **quasi-statische** Last. Dynamische Effekte (Schwingungen, Resonanzen) werden nicht berücksichtigt.
- Der COG der Ladung und der COG des SPMT werden getrennt behandelt und über die Massen gewichtet. Die Rechnung nimmt an, dass beide Massen starr gekoppelt sind.
- Bei Wind wird die Windkraft als Volllast auf die angeströmte Fläche angesetzt, ohne Berücksichtigung von Druckverteilung, Böen oder dynamischen Effekten.

Grenzen

- Der Margin ist ein **geometrisches** Kriterium. Er sagt nichts über die Verformung des Systems aus.
- Bei sehr hohen Aufbauten kann der Windangriffspunkt deutlich über dem COG liegen – dann ist das Kippmoment grösser als die Rechnung zeigt. RoadMind nimmt an, dass der

©gottwald engineering

Windangriffspunkt auf COG-Höhe liegt. Das ist für kompakte Ladungen vertretbar, für hohe, leichte Ladungen konservativ in die falsche Richtung.

- Die Kippkante ist **nicht** die äussere Modulkante, sondern die Linie durch die Suspension Points. Das ist die konservative Annahme. In der Realität kann die Kippkante näher an der Modulmitte liegen, wenn die Hydraulik ausfällt.

Beispiel 96-t-Trafo

COG: (6000, 0, 1500) mm über Ladungsboden. Sattelhöhe: 500 mm. SPMT-Plattformhöhe: 1500 mm. H_susp = COG über Aufhängungsebene = 1500 + 500 = 2000 mm = 2,0 m.

Lastfall "Kurve links" mit a_y = 0,5 g:

```
Δy = 0,5 · 2,0 = 1,0 m = 1000 mm
```

Verschobener COG: (6000, 1000). Die nächste Kante ist die linke Kante des Rechtecks bei y = +3455. Der Abstand ist:

```
r_y = 3455 − 1000 = 2455 mm
```

Der y-Margin beträgt also 2455 mm im Lastfall "Kurve links".

7.3 Tip Angle (Kippwinkel)

Was berechnet wird

Der Tip Angle ist der Winkel, um den die gesamte Konfiguration kippen müsste, damit der COG über die Kippkante wandert. Er ist das ingenieurmässige Mass für die Kippsicherheit.

Herleitung

Wenn der COG im Abstand r von der Kippkante liegt und die Aufhängungsebene um den Winkel α gekippt wird, wandert der COG um r · cos(α) in Richtung Kippkante. Die Kippkante wird erreicht, wenn:

```
tan(α) = r / H_susp                                    (7.8)
```

Der Kippwinkel ist also:

```
α = atan(r / H_susp)                                   (7.9)
```

RoadMind berechnet diesen Winkel **getrennt für x und y**:

```
α_x = atan(r_x / H_susp)                               (7.10)
α_y = atan(r_y / H_susp)                               (7.11)
```

mit r_x und r_y den Minima aus Abschnitt 7.2.

©gottwald engineering

Erforderliche Kippwinkel

RoadMind prüft gegen zwei Planungsstufen, die den ALE-Richtlinien und der ESTA-Empfehlung entsprechen:

Planungsstufe	**Erforderlicher Kippwinkel**
Grade 1 (einfach, fester Boden, direkte Kupplung)	9,0°
Grade 2 (auf Barge, Ballastierung, komplexe Konfigurationen)	7,0°

Die Werte ergeben sich aus einem Grundwert (7° bzw. 5°) plus einer Reserve von 2°.

Annahmen

- Die Kippachse liegt in der Aufhängungsebene. Das ist die konservative Annahme.
- Die Steifigkeit des Systems wird nicht berücksichtigt. Das System wird als starr angenommen.
- Der COG wird als punktförmig angenommen.

Grenzen

- Der Tip Angle ist ein **statisches** Kriterium. Er berücksichtigt keine dynamischen Verstärkungen durch Schwingungen.
- Bei sehr hohen Aufbauten oder sehr nachgiebigen Lasten kann die reale Kippgefahr deutlich höher sein als der berechnete Winkel. In solchen Fällen ist eine explizite dynamische Rechnung erforderlich, die RoadMind nicht leistet.
- Der Winkel sagt nichts über die **Geschwindigkeit** aus, mit der das Kippen abläuft. Ein System mit grossem Tip Angle kann trotzdem schnell kippen, wenn es einmal instabil wird.

Beispiel 96-t-Trafo

Mit H_susp = 2000 mm und r_y = 2455 mm im Lastfall "Kurve links":

```
α_y = atan(2455 / 2000) = 50,8°
```

Das ist der Kippwinkel im Lastfall "Kurve links". Im statischen Lastfall (a = 0) ist r_y = 3455 mm und damit α_y = atan(3455/2000) = 59,9°.

Für die Planungsstufe Grade 1 (mindestens 9°) sind beide Werte deutlich ausreichend.

©gottwald engineering

7.4 Reaktionskräfte

Was berechnet wird

RoadMind berechnet die vertikalen Reaktionskräfte an jedem Suspension Point für jeden Lastfall. Das sind die Kräfte, die das SPMT an den Aufhängungspunkten abstützen muss.

Herleitung

Die Reaktionskräfte R_i an den Suspension Points P_i müssen drei Gleichgewichtsbedingungen erfüllen:

Kräftegleichgewicht in z:

```
Σ R_i = W_total                                                    (7.12)
```

Momentengleichgewicht um die y-Achse:

```
Σ R_i · x_i = W_total · x_COG + M_y                                (7.13)
```

Momentengleichgewicht um die x-Achse:

```
Σ R_i · y_i = W_total · y_COG + M_x                                (7.14)
```

Die Momente M_x und M_y entstehen durch die Beschleunigungen:

```
M_y = −W_total · a_x · H_susp                                      (7.15)
M_x = +W_total · a_y · H_susp                                      (7.16)
```

Vorzeichen: Bei a_x > 0 (Beschleunigung nach hinten) wirkt die Trägheitskraft nach vorne, das Moment verschiebt die Last nach vorne. Bei a_y > 0 (Beschleunigung nach links) wirkt die Trägheitskraft nach rechts, das Moment verschiebt die Last nach rechts.

Statische Bestimmtheit

3-Punkt-Aufhängung: Drei Auflager, drei Gleichungen (7.12–7.14) – das System ist statisch bestimmt. Die Lösung ist eindeutig:

```
A · R = b                                                          (7.17)
```

mit A der 3×3-Matrix der Punktkoordinaten und b dem Vektor der rechten Seite. RoadMind löst dieses System direkt mit `numpy.linalg.solve`.

4-Punkt-Aufhängung: Vier Auflager, nur drei Gleichungen – das System ist statisch unbestimmt. Es gibt unendlich viele Lösungen. RoadMind verwendet die **Minimum-Norm-Lösung**, also die Lösung mit der kleinsten Quadratsumme der Reaktionskräfte:

```
R = A^T · (A · A^T)^(−1) · b                                       (7.18)
```

Das ist die mathematisch "glatteste" Lösung. Sie ist nicht unbedingt die physikalisch richtige – die reale Lastverteilung hängt von der Steifigkeit des Systems ab.

©gottwald engineering

Annahmen

- Die Aufhängungspunkte sind **punktförmig**. Das ist bei SPMT mit hydraulischem Niveauausgleich näherungsweise erfüllt.
- Bei 4-Punkt wird die Minimum-Norm-Lösung verwendet. Das ist eine **Modellannahme**, keine physikalische Vorhersage.
- Die Steifigkeit der Module und der Ladung wird nicht berücksichtigt.

Grenzen

- **Bei 4-Punkt ist die Reaktionsverteilung nicht eindeutig.** Wenn ein Punkt versagt (z. B. Hydraulikausfall), verteilt sich die Last anders als berechnet. Die Minimum-Norm-Lösung ist ein Kompromiss, keine Garantie.
- Bei sehr unterschiedlichen Modulsteifigkeiten (z. B. Kombination aus kurzen und langen Modulen) kann die reale Lastverteilung erheblich von der berechneten abweichen.
- Die Reaktionen sind **Vertikalkräfte**. Horizontale Kräfte (z. B. aus Wind) werden nicht an den Suspension Points abgetragen, sondern über die Lashing und die Reibung.

Beispiel 96-t-Trafo

W_total = 96 t (Ladung) + 2 · 2 · 11,5 t (SPMT) = 96 + 46 = 142 t H_susp = 2,0 m

Statischer Lastfall (a = 0):

```
Σ R = 142 t
Σ R · x = 142 · 6000 = 852.000 t·mm
Σ R · y = 0
```

Mit den vier Punkten P_1 = (4000, −3455), P_2 = (4000, +3455), P_3 = (8000, −3455), P_4 = (8000, +3455):

```
R_1 = R_2 = 35,5 t
R_3 = R_4 = 35,5 t
```

Bei 4-Punkt-Aufhängung verteilt sich die Last also gleichmässig auf alle vier Punkte, weil der COG genau in der Mitte liegt.

7.5 Achslastverteilung

Was berechnet wird

RoadMind verteilt die Gesamtlast auf die vorderen und hinteren Achsen so, dass beide Sattel gleichmässig ausgelastet sind und keine Achse überladen wird.

Herleitung

Die Last auf den vorderen Sattel ergibt sich aus dem Momentengleichgewicht um den hinteren Sattel:

©gottwald engineering

```
F_fore = W_total · (x_aft − x_COG) / (x_aft − x_fore)        (7.19)
```

Die Last auf den hinteren Sattel:

```
F_aft = W_total · (x_COG − x_fore) / (x_aft − x_fore)        (7.20)
```

RoadMind sucht dann die Anzahl der Achsen n_fore und n_aft = n_total − n_fore so, dass gilt:

```
F_fore / n_fore ≤ cap_per_axle                               (7.21)
F_aft / n_aft ≤ cap_per_axle                                 (7.22)
F_fore / n_fore ≥ min_axle_load                              (7.23)
F_aft / n_aft ≥ min_axle_load                                (7.24)
```

Die Optimierung minimiert die maximale Auslastung:

```
util = max(F_fore / (n_fore · cap_per_axle),
           F_aft / (n_aft · cap_per_axle))                   (7.25)
```

Die Nebenbedingung min_axle_load stellt sicher, dass jede Achse eine Mindestlast trägt. Das ist für die Traktion erforderlich – eine Achse ohne Last kann nicht lenken.

Annahmen

- Die Last verteilt sich gleichmässig auf die Achsen eines Sattels. Das ist bei SPMT mit hydraulischem Niveauausgleich näherungsweise erfüllt.
- Die Achsen werden nur nach **Last** verteilt, nicht nach geometrischer Position. In der Realität sitzen die Achsen an festen Positionen; RoadMind nimmt an, dass die Zuordnung zu den Sätteln frei wählbar ist.
- Die Kapazität pro Achse ist `max_axle_load · capacity_factor`, also 75 % bei Grade 1 und 90 % bei Grade 2.

Grenzen

- **Die Achsverteilung ist eine Planungsgrösse, keine Messgrösse.** In der Realität zeigt das SPMT-Display die tatsächlichen Achslasten an. Diese können von der Berechnung abweichen, wenn die Hydraulik nicht sauber ausnivelliert ist.
- Bei Ausfall einer Hydraulikgruppe ändert sich die Lastverteilung schlagartig. RoadMind prüft **nicht**, was bei Ausfall einer Achse oder einer Hydraulikgruppe passiert. Für solche Fälle ist eine explizite Ausfallrechnung erforderlich.
- Der `capacity_factor` ist eine pauschale Reserve. Er berücksichtigt **nicht** die tatsächliche Lastwechselzahl, die dynamischen Lastspitzen oder die Ermüdung.

Beispiel 96-t-Trafo

W_total = 142 t, x_fore = 4000, x_aft = 8000, x_COG = 6000:

```
F_fore = 142 · (8000 − 6000) / (8000 − 4000) = 142 · 0,5 = 71 t
F_aft  = 142 · (6000 − 4000) / (8000 − 4000) = 142 · 0,5 = 71 t
```


©gottwald engineering

Beide Sättel tragen 71 t. Bei 4-Achs-Modulen mit 2 Modulen pro Sattel (also 8 Achsen pro Sattel):

```
Last pro Achse = 71 / 8 = 8,9 t
```

Bei Grade 1 (75 %) und max_axle_load = 12 t:

```
cap_per_axle = 9,0 t
8,9 t < 9,0 t → OK
```

Bei 6-Achs-Modulen mit 2 Modulen pro Sattel (12 Achsen pro Sattel):

```
Last pro Achse = 71 / 12 = 5,9 t → deutlich unter 9,0 t → OK
```

7.6 Ground Pressure

Was berechnet wird

RoadMind berechnet den mittleren Bodendruck unter der gesamten SPMT-Konfiguration und vergleicht ihn mit dem zulässigen Grenzwert.

Herleitung

Die Kontaktfläche ergibt sich aus der Kettenlänge L_row multipliziert mit der Gesamtbreite aller Reihen:

```
A_contact = L_row · (n_files · b)                                    (7.26)
```

mit L_row = Kettenlänge [m], b = Modulbreite [m].

Der mittlere Bodendruck ist dann:

```
p_ground = W_total / A_contact                                       (7.27)
```

RoadMind vergleicht p_ground mit dem zulässigen Grenzwert p_max, der aus der Streckenerkundung stammt (Standardwert: 10 t/m² nach ALE 3.10).

Annahmen

- Die Last verteilt sich **gleichmässig** über die gesamte Kontaktfläche. Das ist eine grobe Vereinfachung.
- Die Kontaktfläche wird als **Rechteck** angenommen, das sich aus der Kettenlänge und der Modulbreite ergibt. Die tatsächliche Kontaktfläche ist die Summe der Reifenaufstandsflächen.
- Die Reifen werden als starr angenommen – es gibt keine Einsinktiefe, keine Verformung.

Grenzen

- **Der mittlere Bodendruck ist kein Spitzendruck.** In der Realität treten unter einzelnen Reifen deutlich höhere Drücke auf als im Mittel. Der mittlere Druck ist nur dann

©gottwald engineering

aussagekräftig, wenn der Boden gleichmässig nachgiebig ist und die Last sich verteilen kann.

- Für weiche Böden (Sand, Schluff) ist der **Spitzendruck** unter dem am höchsten belasteten Reifen massgebend. RoadMind liefert diesen Wert nicht.
- Für die Streckenerkundung ist der mittlere Druck oft ausreichend, für die Beurteilung der Bodenpressung auf empfindlichen Oberflächen (z. B. Hallenböden, Brücken) ist er zu grob.
- Der Grenzwert p_max ist ein **Planungswert**. Er ersetzt nicht die geotechnische Beurteilung des tatsächlichen Baugrunds.

Beispiel 96-t-Trafo

Kettenlänge L_row = 12 m, n_files = 2, Modulbreite b = 2,43 m:

```
A_contact = 12 · (2 · 2,43) = 58,3 m²
p_ground = 142 / 58,3 = 2,44 t/m²
```

Bei einem Grenzwert von 10 t/m² ist das deutlich im grünen Bereich.

7.7 Wind Envelope

Was berechnet wird

Die Wind Envelope ist die maximale Windgeschwindigkeit, bei der die Konfiguration noch **vollständig** gültig ist – also nicht nur, dass der Margin positiv bleibt, sondern dass der Tip Angle noch über dem erforderlichen Wert liegt.

Herleitung

Die Windkraft auf eine angeströmte Fläche A bei Windgeschwindigkeit v ist:

```
F_wind = 0,0625 · A · v²                                    (7.28)
```

Der Faktor 0,0625 ergibt sich aus der Luftdichte ρ = 1,25 kg/m³ und dem Widerstandsbeiwert c_w = 1,0:

```
F_wind = 0,5 · ρ · c_w · A · v² / 1000                      (7.29)
       = 0,5 · 1,25 · 1,0 · A · v² / 1000 = 0,000625 · A · v²
```

in Tonnen, wenn A in m² und v in m/s.

Die Windbeschleunigung ist dann:

```
a_wind = F_wind / W_total                                   (7.30)
```

RoadMind sucht iterativ die grösste Windgeschwindigkeit, bei der sowohl der Margin positiv ist als auch der Tip Angle über dem erforderlichen Wert liegt, **und** alle Reaktionskräfte innerhalb der Kapazitätsgrenzen bleiben.

Die Iteration läuft in Schritten von 0,5 m/s bis maximal 80 m/s.

©gottwald engineering

Annahmen

- Der Windangriffspunkt liegt auf COG-Höhe. Das ist eine Vereinfachung.
- Der Widerstandsbeiwert c_w = 1,0 gilt für kompakte, quaderförmige Ladungen. Für andere Formen (z. B. zylindrische Behälter, Gitterstrukturen) ist der Wert zu hoch oder zu niedrig.
- Die Windkraft wird als statische Last angesetzt. Böen, Resonanzen und dynamische Effekte werden nicht berücksichtigt.
- Die Windrichtung wird als senkrecht zur angeströmten Fläche angenommen.

Grenzen

- **Der Windangriffspunkt liegt in der Realität oft über dem COG.** Bei hohen, leichten Ladungen (z. B. Containern, Tanks) kann der Windangriffspunkt deutlich höher liegen. Dann ist die Kippgefahr grösser als berechnet. In solchen Fällen ist eine explizite 3D-Windlastrechnung erforderlich.
- **Die Windgeschwindigkeit wird als konstant angenommen.** Böen mit Spitzen deutlich über dem Mittelwert werden nicht erfasst. Die DIN EN 1991-1-4 gibt Böenfaktoren an, die hier nicht berücksichtigt werden.
- **Die Windrichtung wird als konstant angenommen.** Ein plötzlicher Windrichtungswechsel kann die Lastverteilung erheblich verändern.
- Die Iteration liefert einen **konservativen** Wert: Die erste Geschwindigkeit, bei der ein Kriterium verletzt wird, ist die Obergrenze. Der tatsächliche Wert kann niedriger liegen, wenn mehrere Kriterien gleichzeitig versagen.

Beispiel 96-t-Trafo

Ladung: 12 m × 3,5 m (Längsseite), Windangriffsfläche A = 42 m². W_total = 142 t. H_susp = 2,0 m, r_y = 3455 mm (statisch).

Die Windkraft bei v = 20 m/s:

```
F_wind = 0,0625 · 42 · 400 = 1050 kg = 1,05 t
```

Windbeschleunigung:

```
a_wind = 1,05 / 142 = 0,0074 g
```

Verschiebung des COG:

```
Δy = 0,0074 · 2,0 = 0,0148 m = 14,8 mm
```

Das ist vernachlässigbar klein. Die Wind Envelope wird für den Trafo also sehr hoch sein – begrenzt durch den Tip Angle. RoadMind gibt sie in der Konsole aus; im Beispiel liegt sie bei über 60 m/s.

©gottwald engineering

7.8 Gesamtsystem-Kippen (Kippsystem A)

Was berechnet wird

RoadMind prüft zusätzlich zum Kippen um die Suspension Points das Kippen des **Gesamtsystems** (Ladung + SPMT) um die Aufstandskante des SPMT. Das ist die konservativere Betrachtung.

Herleitung

Der wirksame Hebelarm für das Gesamtsystem ist:

```
H_kipp = cog_z_sys_abs − z_kipp                                    (7.31)
```

mit:

- `cog_z_sys_abs` = gemeinsamer COG von Ladung und SPMT über Boden
- `z_kipp` = Höhe des Kipppunkts über Boden. Standard: 375 mm (Normalfahrt) oder 225 mm (abgesenkt).

Der gemeinsame COG ist:

```
cog_z_sys_abs = (W_cargo · cog_z_abs + W_spmt · cog_spmt_abs)
                / W_total                                          (7.32)
```

mit:

- `cog_z_abs` = COG der Ladung über Boden
- `cog_spmt_abs` = COG des SPMT über Boden. RoadMind nimmt 50 % der Plattformhöhe an.

Der Kippwinkel für das Gesamtsystem ist dann:

```
α_x_sys = atan(r_x / H_kipp)                                       (7.33)
α_y_sys = atan(r_y / H_kipp)                                       (7.34)
```

mit r_x und r_y den Minima aus Abschnitt 7.2 (unverschobener COG).

Annahmen

- Der Kipppunkt liegt bei 375 mm (Normalfahrt) oder 225 mm (abgesenkt). Das entspricht den ALE-Richtlinien.
- Der COG des SPMT liegt bei 50 % der Plattformhöhe. Das ist ein Erfahrungswert.
- Die Steifigkeit des Systems wird als starr angenommen.

Grenzen

- Das Gesamtsystem-Kippen ist **konservativer** als das Suspension-Kippen. Wenn nur das Gesamtsystem versagt, kann die Konfiguration in der Realität trotzdem fahrbar sein – aber nur, wenn die Hydraulik einwandfrei funktioniert und der Niveauausgleich aktiv ist.

©gottwald engineering

- Bei sehr hohen Aufbauten (z. B. Türmen, Kaminen) ist das Gesamtsystem-Kippen oft das massgebende Kriterium.
- Die Wahl zwischen 375 mm und 225 mm hängt von der Betriebsart ab. RoadMind nimmt standardmässig 375 mm an; der Wert kann über `tip_point_height_mm` angepasst werden.

Beispiel 96-t-Trafo

W_cargo = 96 t, W_spmt = 46 t, W_total = 142 t cog_z_abs = 1500 + 500 + 1500 = 3500 mm cog_spmt_abs = 0,5 · 1500 = 750 mm z_kipp = 375 mm

```
cog_z_sys_abs = (96 · 3500 + 46 · 750) / 142
              = (336.000 + 34.500) / 142
              = 2609 mm = 2,609 m

H_kipp = 2609 − 375 = 2234 mm = 2,234 m
```

Im statischen Lastfall ist r_y = 3455 mm:

```
α_y_sys = atan(3455 / 2234) = 57,1°
```

Das ist deutlich über dem erforderlichen Wert von 9° (Grade 1).

7.9 Zusammenfassung der Annahmen und Grenzen

Die folgende Tabelle fasst die zentralen Annahmen und Grenzen aller Berechnungen zusammen.

Bereich	**Annahme**	**Grenze**
Suspension Points	Gleichmässige Lastverteilung auf alle Achsen einer Reihe	Gilt nicht bei gesperrtem Niveauausgleich
Suspension Points	Kupplungsspalt 300 mm	Herstellerabhängig
Stability Margin	Starr gekoppelte Massen	Gilt nicht bei sehr nachgiebigen Lasten
Stability Margin	Windangriffspunkt auf COG-Höhe	Bei hohen, leichten Ladungen zu optimistisch
Tip Angle	Starr angenommene Kippachse	Vernachlässigt Steifigkeit und Dämpfung
Reaktionen 3-Punkt	Statisch bestimmt	Eindeutig, aber nur bei idealer Punktlagerung
Reaktionen 4-Punkt	Minimum-Norm-Lösung	Nicht eindeutig; reale Verteilung hängt von Steifigkeit ab
Achslastverteilung	Gleichmässige Verteilung auf alle Achsen	Gilt nicht bei Hydraulikausfall
Achslastverteilung	Achsen frei zuordenbar	In der Realität an feste Positionen gebunden

©gottwald engineering

Bereich	Annahme	Grenze
Ground Pressure	Gleichmässige Kontaktfläche	Spitzendruck unter Reifen höher
Ground Pressure	Grenzwert aus Streckenerkundung	Ersetzt keine geotechnische Beurteilung
Wind Envelope	Konstanter Wind, c_w = 1,0	Böen, Formbeiwerte, Richtungswechsel nicht erfasst
Gesamtsystem	COG-SPMT bei 50 % Plattformhöhe	Erfahrungswert, nicht gemessen
Alle	Statische Lastannahme	Dynamik, Resonanz, Ermüdung nicht erfasst

Wichtig: RoadMind ist ein Planungswerkzeug. Es ersetzt nicht die ingenieurmässige Beurteilung durch einen erfahrenen Schwerlast-Ingenieur, nicht die Streckenerkundung und nicht die Abstimmung mit dem SPMT-Hersteller. Die Berechnungen folgen den ALE-Richtlinien und der ESTA-Empfehlung, aber die Verantwortung für die Durchführung des Transports bleibt beim ausführenden Unternehmen.

Kapitel 8 – Lashing und Ladungssicherung

8.1 Übersicht

Die Lashing-Berechnung prüft, ob die Ladung gegen Verrutschen und Kippen auf dem SPMT ausreichend gesichert ist. Sie folgt dem **Advanced Calculation Method** der EN 12195-1 und den Vorgaben der ALE/ESTA-Richtlinien für Schwertransporte.

RoadMind unterscheidet zwei getrennte Nachweise:

- **Balance of Forces (Gleiten)** – sichert die Ladung gegen horizontales Verrutschen
- **Kippsystem B (Kippen auf dem SPMT)** – sichert die Ladung gegen Kippen um die Sattelkante

Beide Nachweise werden parallel geführt. Ein Lashing kann für den Gleitnachweis ausreichend sein, aber für den Kippnachweis nicht – und umgekehrt.

8.2 Lashpunkte

Lashpunkte sind die Verbindungspunkte zwischen SPMT und Ladung. Sie werden als eigene 3D-Objekte im Modell platziert.

Ein Lashpunkt hat:

- **Rolle:** `SPMTAttachment` (am SPMT) oder `CargoAttachment` (an der Ladung)
- **Position:** (x, y, z) in Weltkoordinaten

©gottwald engineering

- **Zulässige Last:** Allowable Load in kN
- **Referenzobjekt:** das Objekt, an dem der Lashpunkt hängt

RoadMind unterscheidet die Rollen, weil ein Lashing **immer** einen SPMT-Punkt mit einem Cargo-Punkt verbinden muss. Zwei SPMT-Punkte oder zwei Cargo-Punkte können nicht verbunden werden.

Grenzen:

- Die zulässige Last ist ein **Nennwert**. Sie muss vom Hersteller des Anschlagpunkts bestätigt sein. RoadMind prüft die Befestigung des Punktes selbst nicht.
- Die Position ist ein **Punkt im Raum**. In der Realität hat jeder Anschlagpunkt eine Ausdehnung und eine definierte Zugrichtung. Die Richtungsabhängigkeit wird nicht erfasst.

8.3 Lashing-Typen

RoadMind kennt acht Lashing-Typen mit ihren LC-Werten (Lashing Capacity) nach EN 12195-2:

Typ	**LC [daN]**	**LC [kN]**
Chain 13 mm	10.000	100
SpanSet 24 mm (LC 400)	400	4
SpanSet 35 mm (LC 1000)	1.000	10
SpanSet 50 mm (LC 2000)	2.000	20
SpanSet 50 mm (LC 2500)	2.500	25
SpanSet 55 mm (LC 5000)	5.000	50
Chain (LC 10000)	10.000	100
Chain (LC 25000)	25.000	250

Die LC ist die **zulässige Zugkraft** des Lashings, nicht die Bruchlast. Sie ist bereits mit dem in der EN 12195-2 vorgesehenen Sicherheitsfaktor versehen.

Grenzen:

- Die LC-Werte sind **Nennwerte**. Sie gelten für neue, unbeschädigte Lashings. Verschleiss, Alterung und Beschädigung reduzieren die LC.
- Die LC gilt nur für **axiale Zugbelastung**. Querbelastung, Biegung oder Verdrehung reduzieren die Kapazität.
- Die Werte sind **herstellerabhängig**. Die Tabelle enthält typische Werte; der Nutzer muss die LC seiner tatsächlichen Lashings verwenden.

©gottwald engineering

8.4 Geometrie und Kräftezerlegung

Ein Lashing verbindet einen SPMT-Punkt mit einem Cargo-Punkt. Der Vektor zwischen den beiden Punkten definiert die **Zugrichtung** des Lashings:

```
v = P_cargo − P_spmt                                    (8.1)
```

Die Länge des Vektors:

```
L = |v|                                                 (8.2)
```

Die Winkel:

```
α_vert = atan(|v_z| / √(v_x² + v_y²))                   (8.3)
α_hor  = atan(v_y / v_x)                                (8.4)
```

Die Kraftkomponenten auf die Ladung (Reaktionskraft, entgegen der Zugrichtung):

```
F_x = −LC · v_x / L                                     (8.5)
F_y = −LC · v_y / L                                     (8.6)
F_z = −LC · v_z / L                                     (8.7)
```

mit LC der effektiven Lashing-Kapazität.

Die **effektive Lashing-Kapazität** ist das Minimum aus:

- LC des Lashings
- zulässige Last des SPMT-Anschlagpunkts
- zulässige Last des Cargo-Anschlagpunkts

  LC_eff = min(LC_lashing, LC_spmt, LC_cargo) (8.8)

Der schwächste Punkt im System bestimmt die Kapazität.

Grenzen:

- Die Kraftzerlegung setzt voraus, dass das Lashing **gerade** gespannt ist. Durchhang oder Vorspannung werden nicht erfasst.
- Die **Vorspannung** (Pre-Tension) eines Lashings wird nicht berücksichtigt. Sie ist für die Gleitsicherung oft wichtiger als die LC.
- Die Kräftezerlegung berücksichtigt **nicht** die Verformung des Lashings unter Last (Dehnung, Setzen).

8.5 Balance of Forces (Gleiten)

Was berechnet wird

Die Balance of Forces prüft für jede der vier Richtungen (Fwd, Aft, Left, Right), ob die verfügbare Sicherung die erforderliche Sicherung übersteigt.

©gottwald engineering

Herleitung

Die erforderliche Sicherungskraft in Richtung i ist:

$$F_{req,i} = W_{total} \cdot a_i \quad (8.9)$$

mit a_i der Beschleunigung in Richtung i. Für Fwd/Aft ist a_i = 0,8 g bzw. 0,5 g, für Left/Right ist a_i = 0,5 g.

Die verfügbare Sicherung setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

1. Reibung:

$$F_{friction} = \mu \cdot N \quad (8.10)$$

mit μ dem Reibwert und N der Normalkraft. Die Normalkraft ist die Gewichtskraft **minus** der Summe der vertikalen Lashing-Kräfte:

$$N = W_{total} - \Sigma F_{z,lashing} \quad (8.11)$$

Wenn Lashings nach oben ziehen (F_z < 0), reduzieren sie die Normalkraft und damit die Reibung. Das ist ein **kritischer Effekt**, der oft übersehen wird.

2. Lashings:

Für jede Richtung wird die Summe der Lashing-Komponenten in dieser Richtung gebildet. Für Fwd:

$$F_{lashing,Fwd} = \Sigma \max(0, F_{x,lashing}) \quad (8.12)$$

Für Aft:

$$F_{lashing,Aft} = \Sigma \max(0, -F_{x,lashing}) \quad (8.13)$$

Analog für Left/Right mit F_y.

3. Stopper:

Stopper sind **starre** Blockierungen (Holzkeile, Stahlblöcke). Sie werden mit ihrer LC angesetzt:

$$F_{stopper,i} = \Sigma LC_{stopper,i} \quad (8.14)$$

Wichtig: Stopper haben einen Sicherheitsbeiwert f = 1,0 (nach ALE-Richtlinie). Wenn ein Stopper in Richtung i vorhanden ist, werden die Lashings in dieser Richtung **nicht** mitgezählt – der Stopper übernimmt die Last allein. Das ist die konservative Annahme: Ein Lashing neben einem Stopper kann nicht gleichzeitig wirken.

Die verfügbare Sicherung in Richtung i ist dann:

$$F_{avail,i} = F_{friction} + F_{lashing,i} + F_{stopper,i} \quad (8.15)$$

$$F_{avail,i} = F_{friction} + F_{stopper,i} \text{ (wenn Stopper vorhanden)}$$

$$F_{avail,i} = F_{friction} + F_{lashing,i} \text{ (wenn kein Stopper)}$$

Der Nachweis ist erfüllt, wenn:

$$F_{avail,i} \geq F_{req,i} \quad (8.16)$$

©gottwald engineering

Annahmen

- Die Reibung wirkt **gleichmässig** in alle Richtungen. Das ist eine Vereinfachung – bei anisotropen Reibpaarungen (z. B. Stahl auf Holz) kann der Reibwert in verschiedene Richtungen unterschiedlich sein.
- Der Reibwert μ ist ein **Nennwert**. Er hängt von der Oberfläche, der Feuchtigkeit und der Vorspannung ab.
- Die Lashings werden mit ihrer **vollen LC** angesetzt, ohne Berücksichtigung der Vorspannung oder des Setzverhaltens.
- Stopper werden mit **f = 1,0** angesetzt, das heisst ohne zusätzlichen Sicherheitsfaktor.

Grenzen

- **Die Reibung ist der wichtigste Faktor – und der unsicherste.** Ein Reibwert von 0,30 (Neopren auf Stahl) kann bei Nässe auf 0,15 fallen. RoadMind nutzt den eingegebenen Wert; die Wahl liegt beim Nutzer.
- **Stahl auf Stahl ist zu vermeiden** (ALE-Richtlinie). RoadMind warnt bei μ ≤ 0,11, erzwingt aber keine Änderung.
- **Die Vorspannung wird nicht erfasst.** In der Realität müssen Lashings mit der vorgeschriebenen Vorspannung angezogen werden. Ein nicht vorgespanntes Lashing wirkt erst nach einer gewissen Verschiebung.
- **Der Reibwert kann durch Zwischenlagen verbessert werden.** RoadMind erfasst diese nicht automatisch; der Nutzer muss den erhöhten μ-Wert eingeben.

Beispiel 96-t-Trafo

W_total = 142 t, μ = 0,30. Vier Lashings mit je 50 kN LC, vertikal 45°, horizontal 0°. Keine Stopper.

Normalkraft nach (8.11):

```
N = 142 − 4 · (50 · sin(45°)) / 9,81
  = 142 − 4 · (50 · 0,707) / 9,81
  = 142 − 14,4 = 127,6 t
```

Reibung nach (8.10):

```
F_friction = 0,30 · 127,6 = 38,3 t
```

Lashing-Komponenten in Fwd-Richtung (F_x = 50 · cos(45°) = 35,4 kN = 3,6 t pro Lashing):

```
F_lashing,Fwd = 4 · 3,6 = 14,4 t
```

Verfügbare Sicherung Fwd:

```
F_avail,Fwd = 38,3 + 14,4 = 52,7 t
```

Erforderliche Sicherung Fwd:

©gottwald engineering

```
F_req,Fwd = 142 · 0,8 = 113,6 t
```

Ergebnis: 52,7 t < 113,6 t → NOT OK.

Das ist ein typisches Ergebnis: Mit vier normalen Lashings lässt sich eine 96-t-Ladung nicht gegen 0,8 g sichern. Es braucht entweder Stopper, mehr Lashings oder eine Kombination aus beidem.

8.6 Kippsystem B (Kippen auf dem SPMT)

Was berechnet wird

Kippsystem B prüft, ob die Ladung unter Querbeschleunigung um die **Sattelkante** kippt. Das ist ein reiner Momentennachweis.

Herleitung

Das **Kippmoment** aus der Querbeschleunigung ist:

```
M_tip = W_cargo · a_y · H_cargo                                    (8.17)
```

mit:

- W_cargo = Masse der Ladung [t]
- a_y = Querbeschleunigung [g]
- H_cargo = COG der Ladung über Sattelunterkante [m]

Das **rückstellende Moment** aus der Gewichtskraft ist:

```
M_gravity = W_cargo · b_half                                       (8.18)
```

mit b_half = halbe Auflagebreite [m]. Die Auflagebreite ist das Minimum aus Sattelbreite und Plattformbreite:

```
b_half = min(saddle_width, platform_width) / 2                     (8.19)
```

Das **Lashing-Moment** ergibt sich aus den Kräften der Lashings um die Kippkante:

```
M_lashing = Σ (r_y · F_z − r_z · F_y)                              (8.20)
```

mit r = Abstand zwischen Lashpunkt und Kippkante, F = Kraftkomponenten des Lashings. Das Vorzeichen ist so definiert, dass eine **rückstellende** Wirkung positiv ist.

Das **gesamte rückstellende Moment**:

```
M_restore = M_gravity + M_lashing                                  (8.21)
```

Der Nachweis ist erfüllt, wenn:

```
M_restore ≥ M_tip                                                  (8.22)
```

Die **Auslastung** ist:

```
util = M_tip / M_restore                                           (8.23)
```


©gottwald engineering

Die **kritische Querbeschleunigung** (ab der die Ladung kippt):

```
a_crit = M_restore / (W_cargo · H_cargo)                    (8.24)
```

Wann Kippsystem B bindend ist

RoadMind vergleicht die kritische Querbeschleunigung von Kippsystem B mit der kritischen Querbeschleunigung des Gesamtsystems (Kippsystem A, Abschnitt 7.8).

Kippsystem B ist bindend, wenn a_crit_B < a_crit_A. Dann ist der Nachweis nach Kippsystem B massgebend für die Freigabe.

Kippsystem B ist informativ, wenn a_crit_B ≥ a_crit_A. Dann ist das Gesamtsystem massgebend, und Kippsystem B wird nur zur Information ausgegeben.

Grenzen:

- Kippsystem B prüft nur das Kippen **um die Längsachse** (Querneigung). Das Kippen um die Querachse (Längsneigung) wird nicht geprüft. Es ist in der Regel unkritisch, weil die Auflagebreite in Längsrichtung grösser ist.
- Die **Verformung** der Ladung und der Sättel wird nicht erfasst.
- Die **Vorspannung** der Lashings wird nicht erfasst. Ein nicht vorgespanntes Lashing wirkt erst nach einer gewissen Kippbewegung.
- Die Kippkante wird als **scharfe Linie** angenommen. In der Realität ist die Kante abgerundet oder verformt.

Beispiel 96-t-Trafo

W_cargo = 96 t, H_cargo = 1500 + 500 = 2000 mm = 2,0 m Sattelbreite = 600 mm, Plattformbreite = 2430 mm b_half = min(600, 2430) / 2 = 300 mm = 0,3 m a_y = 0,5 g

M_tip nach (8.17):

```
M_tip = 96 · 0,5 · 2,0 = 96 t·m
```

M_gravity nach (8.18):

```
M_gravity = 96 · 0,3 = 28,8 t·m
```

Ohne Lashings:

```
M_restore = 28,8 t·m
util = 96 / 28,8 = 3,33 → 333 %
```

a_crit nach (8.24):

```
a_crit = 28,8 / (96 · 2,0) = 0,15 g
```

Ergebnis: Die Ladung würde bei einer Querbeschleunigung von 0,15 g kippen. Das ist deutlich unter 0,5 g. Es sind zusätzliche Lashings erforderlich.

©gottwald engineering

Mit vier Lashings à 50 kN (vertikal 45°, an den Längsseiten der Ladung):

Nehmen wir an, jedes Lashing liefert ein rückstellendes Moment von 0,5 t·m:

```
M_lashing = 4 · 0,5 = 2,0 t·m
M_restore = 28,8 + 2,0 = 30,8 t·m
util = 96 / 30,8 = 3,12 → 312 %
a_crit = 30,8 / 192 = 0,16 g
```

Ergebnis: Auch mit vier Lashings ist die Kippgefahr deutlich. Es braucht entweder **Stopper** (die als direkte Blockierung wirken), eine **breitere Auflage** oder eine **Reduktion der Querbeschleunigung** (langsamere Kurvenfahrt).

8.7 Stopper

Stopper sind starre Blockierungen, die die Ladung gegen Verrutschen in einer Richtung sichern. RoadMind kennt drei Materialien:

- **Steel** – Stahlblock, LC nach Eingabe
- **Chain / D-Ring** – Kette oder D-Ring, LC nach Eingabe
- **Timber chock** – Holzkeil, LC nach Eingabe

Stopper werden im 3D-Modell platziert. Sie haben:

- **Richtung:** Fwd, Aft, Left oder Right
- **LC:** zulässige Last in kN
- **Material:** für den BOM-Report

Stopper werden mit **f = 1,0** angesetzt, das heisst ohne zusätzlichen Sicherheitsfaktor. Die Begründung: Stopper sind so ausgelegt, dass sie die Last direkt aufnehmen; sie werden nicht durch Reibung oder Vorspannung gehalten.

Grenzen:

- **Stopper müssen formschlüssig anliegen.** Ein Stopper mit Spiel wirkt erst nach einer Verschiebung um das Spiel.
- **Stopper können die Ladung beschädigen.** Bei empfindlichen Oberflächen ist eine Zwischenlage erforderlich.
- **Stopper sind nur so gut wie ihre Befestigung.** Ein Stopper, der nicht am SPMT befestigt ist, kann wegrutschen.

8.8 Bill of Materials

RoadMind erzeugt eine BOM (Bill of Materials) mit allen Lashings und Stoppers:

- Lashing-Typ, LC, Anzahl
- Stopper-Material, LC, Anzahl

©gottwald engineering

Die BOM erscheint im PDF-Report und kann für die Beschaffung verwendet werden.

Grenzen:

- Die BOM enthält **keine** Verschleissteile, Ersatzteile oder Werkzeuge.
- Die BOM enthält **keine** Anschlagpunkte am SPMT oder an der Ladung – diese müssen separat beschafft werden.

8.9 Zusammenfassung der Lashing-Grenzen

Bereich	**Annahme**	**Grenze**
Lashpunkte	Punktuell, mit Nennlast	Befestigung nicht geprüft
Lashing-Typen	LC nach EN 12195-2	Verschleiss, Alterung nicht erfasst
Geometrie	Gerade gespannt	Durchhang, Vorspannung nicht erfasst
Kräftezerlegung	Statisch, ohne Verformung	Dehnung, Setzen nicht erfasst
Balance of Forces	Reibung gleichmässig	Reibwert unsicher, anisotrop
Balance of Forces	Stopper f = 1,0	Spiel, Befestigung nicht erfasst
Kippsystem B	Kippen um Längsachse	Kippen um Querachse nicht geprüft
Kippsystem B	Scharfe Kippkante	Abrundung, Verformung nicht erfasst
Alle	Statische Lastannahme	Dynamik, Resonanz nicht erfasst

©gottwald engineering

Kapitel 9 – Setup speichern und laden

9.1 Übersicht

RoadMind speichert den gesamten Planungsstand – Eingaben, Ergebnisse, Lashings, Stopper und den letzten Lashing-Balance – in einem einzigen FreeCAD-Objekt namens `SPMT_Setup`. Das erlaubt es, mehrere Transportvarianten in einem Dokument zu halten und zwischen ihnen zu wechseln.

9.2 Speichern

Mit "Save Setup..." öffnet sich ein Dialog:

- **Setup-Name:** frei wählbar (Default: Name der Ladung)
- **Version:** z. B. "Rev A", "Rev B"
- **Notes:** Freitext für Anmerkungen

Nach dem Speichern wird ein `SPMT_Setup`-Objekt angelegt. Es enthält:

- **Eingaben:** Cargo-Masse, COG, Sattelpositionen, SPMT-Parameter, Lastfälle
- **Ergebnisse:** alle Resultate aus `SPMTCalculator.result`
- **Lashings:** alle Lashing-Objekte mit ihren Parametern
- **Stopper:** alle Stopper-Objekte
- **Lashing-Balance:** das Ergebnis der letzten Balance-Berechnung
- **Referenzen:** auf die Cargo-, Sattel- und Lashing-Objekte im Dokument
- **Metadaten:** Erstellungsdatum, letzte Änderung, Version, Notes

9.3 Laden

Mit "Load Setup..." öffnet sich eine Liste aller `SPMT_Setup`-Objekte im Dokument. Der Nutzer wählt eines aus. RoadMind:

- füllt das Task Panel mit den gespeicherten Werten
- stellt den letzten Berechnungsstand wieder her
- lädt die gespeicherten Lashings und Stopper (falls sie im Dokument noch existieren)
- zeigt in der Statuszeile, ob der gespeicherte Lashing-Balance bestanden wurde

9.4 Aktualisieren

Mit "Update Setup..." wird ein bestehendes Setup mit dem aktuellen Stand überschrieben. Der Dialog warnt, dass die vorherigen Werte verloren gehen.

©gottwald engineering

9.5 Referenzen

Die Setup-Objekte speichern **Namen** (nicht Objekte) der Cargo-, Sattel- und Lashing-Objekte. Wenn ein Objekt gelöscht oder umbenannt wird, kann das Setup die Referenz nicht mehr auflösen. Beim Laden zeigt RoadMind dann an, welche Referenzen fehlen.

Grenzen:

- Ein Setup ist **an das Dokument gebunden**. Es kann nicht ohne Weiteres in ein anderes FreeCAD-Dokument übertragen werden.
- Wenn ein referenziertes Objekt gelöscht wird, ist die Referenz **verloren**. Das Setup speichert die Zahlen, aber nicht die Geometrie.
- Das Setup speichert **keine** 3D-Modelle. Die SPMT-Module müssen nach dem Laden neu generiert werden.

©gottwald engineering

Kapitel 10 – Grenzen und Verantwortung

10.1 Was RoadMind nicht prüft

RoadMind ist ein Planungswerkzeug. Es prüft **nicht**:

- die **Befestigung** der Lashpunkte am SPMT oder an der Ladung
- die **Tragfähigkeit** der Anschlagpunkte an der Ladung
- die **Verformung** der Ladung unter Eigengewicht und Beschleunigung
- die **Standsicherheit** der Ladung auf den Sätteln (Verrutschen auf dem Sattel)
- die **Tragfähigkeit** des Bodens unter dem SPMT
- die **Tragfähigkeit** von Brücken und Durchlässen auf der Strecke
- die **Verkehrsregeln** (Gewicht, Achslast, Höhe, Breite)
- die **Genehmigungsfähigkeit** des Transports
- die **dynamischen** Lasten (Schwingungen, Resonanzen, Stoss)
- die **Ermüdung** von Bauteilen
- die **Betriebsgrenzen** des SPMT (Hydraulik, Lenkung, Antrieb)

10.2 Wann ein Ingenieur zwingend drüberschauen muss

RoadMind liefert Zahlen. Die Freigabe erfordert immer eine **ingenieurmässige Beurteilung**. Ein Ingenieur muss insbesondere dann hinzugezogen werden, wenn:

- der COG **nicht mittig** liegt (asymmetrische Last)
- die Ladung **hoch** ist (Höhe > Breite)
- die Ladung **leicht** ist (Windangriff)
- die Strecke **komplex** ist (Steigungen, Kurven, Brücken)
- die Konfiguration **mehrere Reihen** erfordert
- Kippsystem B **bindend** ist
- die Kippwinkel **nahe** an den Grenzwerten liegen
- die Balance of Forces **nur knapp** erfüllt ist
- die tatsächlichen Achslasten **nicht gemessen** werden können

10.3 Verantwortung

Die Verantwortung für die Durchführung des Transports liegt beim ausführenden Unternehmen. RoadMind ist ein Werkzeug, das die Planung unterstützt, aber nicht ersetzt.

©gottwald engineering

Der Nutzer ist verantwortlich für:

- die korrekte Eingabe aller Daten
- die Auswahl der richtigen Planungsstufe
- die Wahl der richtigen Reibwerte
- die Auswahl der richtigen Lashings
- die Überprüfung der Berechnungsergebnisse
- die Freigabe der Konfiguration
- die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben
- die Abstimmung mit dem SPMT-Hersteller
- die Streckenerkundung
- die Schulung des Bedienpersonals

10.4 Haftungsausschluss

Die Berechnungen in RoadMind folgen den veröffentlichten Richtlinien (ALE, ESTA, EN 12195). Sie sind eine **Planungshilfe**, keine Freigabe. Der Nutzer trägt die alleinige Verantwortung für die Verwendung der Ergebnisse.

©gottwald engineering

Kapitel 11 – Anhang

11.1 Formelzeichen und Einheiten

Zeichen	Bedeutung	Einheit
W	Gewichtskraft	t
m	Masse	t
a	Beschleunigung	g
g	Erdbeschleunigung	9,81 m/s²
H	Hebelarm	m
r	Abstand	mm
α	Winkel	°
μ	Reibwert	–
LC	Lashing Capacity	kN
F	Kraft	t oder kN
M	Moment	t·m
x, y, z	Koordinaten	mm
p	Druck	t/m²

11.2 Ausführliche Beispielrechnung

Ausgangsdaten

Ladung:

- Typ: Box
- Länge: 12.000 mm
- Breite: 3.000 mm
- Höhe: 3.500 mm
- Masse: 96 t
- COG: (6000, 0, 1500) mm über Ladungsboden

Sättel:

- Anzahl: 2
- Position: x = 2000 mm und x = 10000 mm
- Höhe: 500 mm

©gottwald engineering

- Breite: 600 mm

SPMT:

- Hersteller: Scheuerle Gen3
- Plattformbreite: 2430 mm
- Plattformhöhe: 1500 mm
- Totgewicht pro Modul: 11,5 t
- Maximale Achslast: 12 t
- Überhang: 700 mm

Lastfälle:

- Grade 1 (9°, 75 %)
- a_x_brake = −0,5 g
- a_y_curve = 0,5 g (Kurve links)
- Slope long = 0 %
- Slope lat = 0 %
- Wind = 0 m/s

Schritt 1 – Sattelabstand und Mindestlänge

```
Span = 10000 − 2000 = 8000 mm
Min_length = 8000 + 2 · 700 = 9400 mm
```

Schritt 2 – Modulauswahl

Längstes Modul in der Datenbank: 6-Achs, 8400 mm. Anzahl lange Module:

```
n_long = ceil(9400 / 8400) = 2
```

Restlänge:

```
Rest = 9400 − 8400 = 1000 mm
```

Kürzestes Modul, das die Restlänge abdeckt: 2-Achs, 2800 mm. Also:

```
Combo = [6-Achs, 6-Achs, 2-Achs]  (nicht ganz richtig, weil n_long = 2)
Korrektur: n_long = 2, also Combo = [6-Achs, 4-Achs] mit L = 8400 + 5600 = 14000
mm
```

RoadMind wählt die Kombination, die die Mindestlänge abdeckt und die wenigsten Achsen hat.

Schritt 3 – Anzahl Reihen

n_files = 1:

- W_spmt = 1 · (11,5 + 11,5) = 23 t

©gottwald engineering

- W_total = 96 + 23 = 119 t
- Total axles = 1 · 10 = 10
- y_half = 725 mm
- Suspension Points: P1 = (4000, −725), P2 = (4000, +725), P3 = (8000, −725), P4 = (8000, +725)
- Stability margin in y: 725 mm
- H_susp = 1500 + 500 = 2000 mm = 2,0 m
- Tip angle y: atan(725/2000) = 19,9° → über 9° → OK
- Tip angle x: r_x = 2000 mm (halbe Spanweite), atan(2000/2000) = 45° → OK
- Achslast: 119/10 = 11,9 t > 12 · 0,75 = 9 t → **NOT OK**
- Bodendruck: 119 / (14 · 2,43) = 3,5 t/m² → OK

n_files = 2:

- W_spmt = 46 t
- W_total = 142 t
- Total axles = 20
- y_half = 725 + (2430 + 300) = 3455 mm
- Suspension Points: P1 = (4000, −3455), P2 = (4000, +3455), P3 = (8000, −3455), P4 = (8000, +3455)
- Stability margin in y: 3455 mm
- H_susp = 2,0 m
- Tip angle y: atan(3455/2000) = 59,9° → OK
- Tip angle x: 45° → OK
- Achslast: 142/20 = 7,1 t < 9 t → OK
- Bodendruck: 142 / (14 · 4,86) = 2,1 t/m² → OK
- Hydraulik: 142 / 20 = 7,1 t/Achse → OK

Ergebnis: n_files = 2 erfüllt alle Kriterien.

Schritt 4 – Reaktionen (statisch)

```
Σ R = 142 t
Σ R · x = 142 · 6000 = 852.000 t·mm
Σ R · y = 0
```

Mit 4-Punkt-Lösung (Minimum-Norm):

©gottwald engineering

```
R1 = R2 = 35,5 t (vorne)
R3 = R4 = 35,5 t (hinten)
```

Schritt 5 – Reaktionen (Kurve links, a_y = 0,5 g)

```
M_x = 142 · 0,5 · 2,0 = 142 t·m = 142.000 t·mm
Σ R · y = 0 + 142.000 = 142.000 t·mm
Σ R · x = 852.000 t·mm
Σ R = 142 t
```

Lösung:

```
R1 = 30,9 t  (vorne rechts)
R2 = 40,1 t  (vorne links)
R3 = 30,9 t  (hinten rechts)
R4 = 40,1 t  (hinten links)
```

Die linken Punkte tragen mehr Last, weil die Ladung nach links kippt.

Schritt 6 – Kippsystem B

```
b_half = min(600, 2430) / 2 = 300 mm = 0,3 m
H_cargo = 1500 + 500 = 2000 mm = 2,0 m
M_tip = 96 · 0,5 · 2,0 = 96 t·m
M_gravity = 96 · 0,3 = 28,8 t·m
M_restore = 28,8 t·m (ohne Lashings)
a_crit = 28,8 / (96 · 2,0) = 0,15 g
```

Ergebnis: Kippsystem B ist bindend, weil a_crit_B = 0,15 g < a_crit_A.

Schritt 7 – Gesamtsystem

```
cog_z_abs = 1500 + 500 + 1500 = 3500 mm
cog_spmt_abs = 0,5 · 1500 = 750 mm
cog_z_sys_abs = (96 · 3500 + 46 · 750) / 142 = 2609 mm
z_kipp = 375 mm
H_kipp = 2609 − 375 = 2234 mm = 2,234 m
Tip angle y: atan(3455/2234) = 57,1° → OK
Tip angle x: atan(2000/2234) = 41,8° → OK
```

Schritt 8 – Lashing

Vier Lashings mit 50 kN LC, vertikal 45°, horizontal 0°:

```
F_friction = 0,30 · (142 − 4 · 50 · 0,707 / 9,81) = 0,30 · 127,6 = 38,3 t
F_lashing,Fwd = 4 · 50 · 0,707 / 9,81 = 14,4 t
F_avail,Fwd = 38,3 + 14,4 = 52,7 t
F_req,Fwd = 142 · 0,8 = 113,6 t
```

Ergebnis: NOT OK. Zusätzliche Sicherung erforderlich.

11.3 Quellen

- **ALE Engineering Guidelines, Section 03 Transport.** Heavy Transport Association, aktuellste Fassung.

©gottwald engineering

- **ESTA Best-Practice Guideline for SPMTs.** European Association of Abnormal Road Transport and Mobile Cranes, aktuellste Fassung.
- **EN 12195-1:** Ladungssicherung auf Strassenfahrzeugen – Berechnung von Sicherungskräften.
- **EN 12195-2:** Ladungssicherung auf Strassenfahrzeugen – Zurrgurte aus Chemiefasern.
- **IMO CSS Annex 13:** Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing.

11.4 Glossar

Begriff	**Bedeutung**
SPMT	Self-Propelled Modular Transporter
COG	Center of Gravity (Schwerpunkt)
LC	Lashing Capacity (zulässige Zugkraft)
MSL	Maximum Securing Load
Suspension Point	Aufhängungspunkt, an dem das SPMT die Last abstützt
Stability Polygon	Vieleck aus den Suspension Points
Stability Margin	Kleinster Abstand des COG zum Polygonrand
Tip Angle	Kippwinkel, bei dem der COG über die Kippkante wandert
H_susp	Hebelarm zwischen COG und Suspension-Ebene
H_kipp_sys	Hebelarm zwischen Gesamt-COG und Kipppunkt
Kippsystem A	Kippen des Gesamtsystems (Ladung + SPMT)
Kippsystem B	Kippen der Ladung auf dem SPMT
Envelope	Bereich, in dem sich der COG unter Lastfällen bewegt
n_files	Anzahl Reihen (transversale Modulreihen)
Grade 1	Planungsstufe für einfache Transporte (9°, 75 %)
Grade 2	Planungsstufe für komplexe Transporte (7°, 90 %)
Reibwert μ	Verhältnis von Reibkraft zu Normalkraft
Stopper	Starre Blockierung gegen Verrutschen
Balance of Forces	Gleichgewicht der Kräfte in alle Richtungen

©gottwald engineering

Kapitel 12 – Anhang Beispielergebnisse

©gottwald engineering

SPMT Transport Calculation Report

Cargo:	Cargo
Date:	2026-10-01 18:38
Planning grade:	1 (tip >= 9.0 deg, capacity factor 75 %)
Support type:	4point
Status:	OK
Limiting factor:	none

Cargo

Mass [t]	435.00
COG x [mm]	13940
COG y [mm]	0
COG z above cargo bottom [mm]	3000
COG z above ground [mm]	5000
COG z above suspension plane [mm]	3500
Saddle height [mm]	500

Saddle positions (x, from cargo front edge)

Saddle	x [mm]
1	0
2	35450

SPMT configuration

Saddle span [mm]	35450
Chain overhang per side [mm]	2700
Min chain length [mm]	40850
Modules per row	6ax/9360 + 6ax/9360 + 6ax/9360 + 6ax/9360 + 4ax/4200
Row length [mm]	41640
Axles per row	28
Files (rows)	1
Total axles	28
Platform width [mm]	2430
Platform height [mm]	1500
y_half [mm]	725
SPMT dead weight [t]	107.12
Total weight [t]	542.12

Stability (suspension)

H_susp (COG above suspension plane) [m]	2.660
r_poly (min edge dist) [m]	0.725
slope_x / slope_y [%]	27.25 / 23.77

ALE op limit x / y [%]	13.63 / 11.88
Tip angle x / y (suspension) [deg]	15.24 / 13.37
Required tip angle [deg]	9.0
Geometric OK x	yes
Geometric OK y	yes
Hydraulic OK	yes
Axle OK	yes

Stability (overall system, tipping point 225 mm above ground, ALE 3.6.5)

H_kipp_sys (COG above ground - 225 mm) [m]	3.785
Tip angle x / y (overall system) [deg]	61.49 / 10.84
Required tip angle [deg]	9.0
Overall system OK	yes

Slope / Curve / Wind

Slope long (user) [%]	0.00
Slope lateral (user) [%]	0.00
Slope long effective (incl. ESTA +2 deg) [%]	3.49
Slope lateral effective (incl. ESTA +2 deg) [%]	3.49
Curve a_y [g]	0.000
Slope a_x [g]	0.035
Wind speed lat / lon [m/s]	0.0 / 0.0
Wind area lat / lon [m2]	None / None
Wind accel lat / lon [g]	0.0000 / 0.0000
Wind envelope lateral [m/s]	58.0
Wind envelope longitudinal [m/s]	80.0

Axle load

Average axle load [t]	19.36
Axle load limit [t]	27.00
Nominal max axle load [t]	36.00

Suspension points

#	x [mm]	y [mm]
P1	6970	-725
P2	6970	725
P3	24695	-725
P4	24695	725

Reactions per load case

Case	P1 [t]	P2 [t]	P3 [t]	P4 [t]

Static	164.5	164.5	106.6	106.6
Braking	164.5	164.5	106.6	106.6
Curve	164.5	164.5	106.6	106.6
Slope	165.9	165.9	105.2	105.2

Reaction self-check (numeric vs analytical)

Case	dSum_R [t]	rel [%]	dSum_Rx [t*m]	rel [%]	dSum_Ry [t*m]	rel [%]

Report generated by RoadMind. Criteria follow ESTA Best-Practice Guideline for SPMTs and the ALE Engineering Guidelines (Section 03 Transport). Suspension stability uses the suspension-point polygon; overall-system tipping assumes the tipping point 225 mm above ground. The 2 deg ESTA slope reserve is always added to every slope. This report is a planning aid, not a certification.

SPMT LASHING CALCULATION

Balance of Forces · ESTA / ALE Acceleration Envelope · Restraint per certified LC (EN 12195-2), used directly; no additional reduction factor.

OVERALL RESULT: PASS

Cargo	**Cargo**	Envelope Fwd	**0.8 g**
Mass	**435.000 t**	Envelope Aft	**0.5 g**
Normal force N	**447.342 t**	Envelope Left/Right	**0.5 g**
Friction μ	**0.60**	Sum Fz (lashings)	**-12.34 t**
Date	**2026-10-01 18:39**	Kippsystem B	**informational / binding (see below)**

Securing Arrangement – Lashings

Dir	Lashing	LC daN	LC kN	α vert °	α hor °	Fx kN	Fy kN	Fz kN	Restr kN
Right	Lashing 1 (Cargo Point 3 -> SPMT Point 1)	10000	100.0	38.0	-115.6	+34.0	+71.1	-61.5	**71.1**
Left	Lashing 2 (Cargo Point 4 -> SPMT Point 2)	10000	100.0	36.6	117.1	+36.6	-71.5	-59.6	**71.5**

Stoppers / Blocking Devices (f = 1.0)

Dir	Stopper	Material	LC kN
Fwd	Stopper 1 (Fwd)	Steel	500.0
Fwd	Stopper 2 (Fwd)	Steel	500.0

Balance of Forces (Sliding)

Direction	Req t	Friction t	Lashings t	Stopper t	Avail t	Source	Status
Fwd	348.00	268.40	0.00	101.94	**370.34**	Stopper(2) + Friction	**OK**
Aft	217.50	268.40	0.00	0.00	**268.40**	Lashings + Friction	**OK**
Left	217.50	268.40	7.25	0.00	**275.65**	Lashings + Friction	**OK**
Right	217.50	268.40	7.29	0.00	**275.69**	Lashings + Friction	**OK**

Kippsystem B – Cargo Tipping on the SPMT

Saddle width: 2800 mm | Platform width: 2430 mm | H_cargo: 3000 mm (cargo COG above saddle bottom) | Tipping edge: +/-1215 mm

n_files = 1 -> Kippsystem A (overall system) is governing. Kippsystem B is informational only.

Side	M_tip (0.5 g) t·m	M_gravity t·m	M_lashings t·m	M_restore t·m	Util (0.5 g)	a_crit g	Status
Left	652.50	528.53	+14.52	**543.05**	120.2%	**0.416**	informational
Right	652.50	528.53	+15.47	**543.99**	119.9%	**0.417**	informational

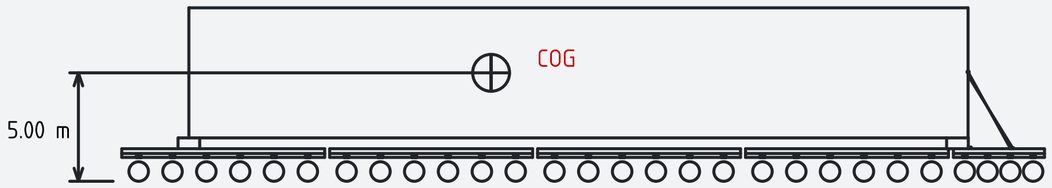
Bill of Materials

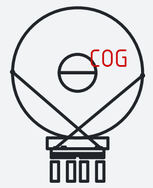
Item	Count
Chain 13 mm | LC=10000 daN	**2**
Stopper Fwd | Steel | LC=500 kN	**2**

*Envelope: Fwd 0.8 g, Aft 0.5 g, Left/Right 0.5 g. Effective restraint = min(lashing LC, both point loads); no additional safety factor (EN 12195-1). Stopper: f = 1.0; lashings alongside a stopper count 0 for sliding. Kippsystem B: moment balance about the saddle edge, with the gravity restoring moment m * half_base.*

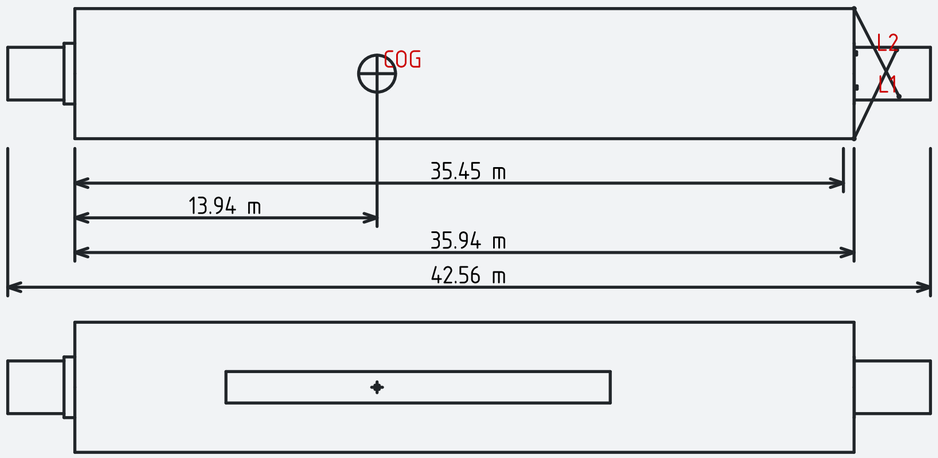
roadexpedition

Length: 42.56 m
Width: 6.10 m
Height: 8.00 m
Weight: 435 t

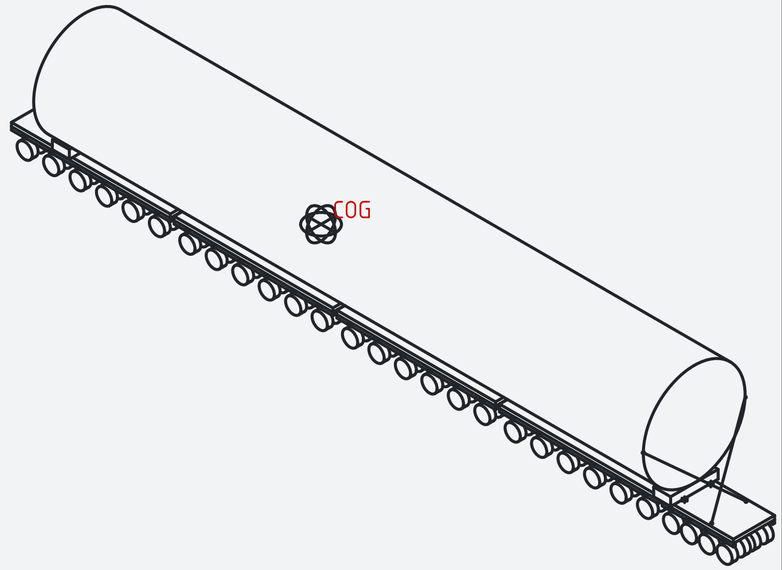




COG (cargo): x=13940 y=0 z=5001 mm



4-point suspension | tip x=15.2° y=13.4° (min 9.0°) | r_poly=0.72 m



Title: **SPMT Transport**		
Cargo: Cargo		Drawn by: -
Date: 2026-10-01	Scale: 1:200	Sheet: 1/1