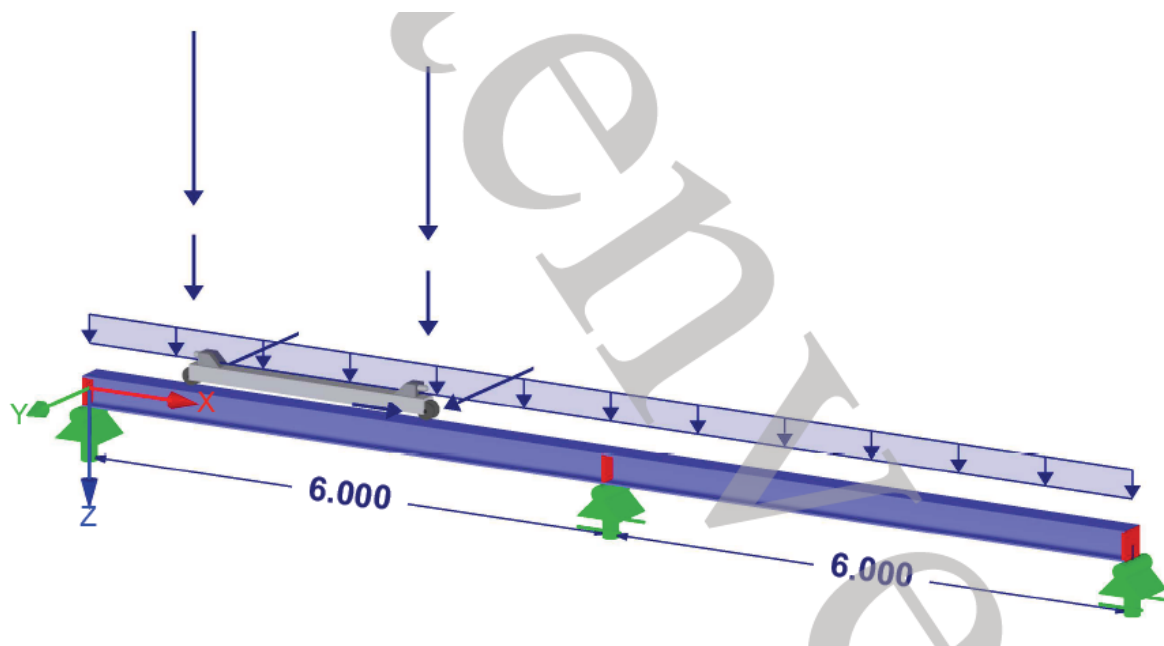


# Bachelor-Thesis

## Betrachtung unterschiedlicher Nachweiskonzepte einer Kranbahn in einer Stahlbauhalle

Pascal Bade



Modul:	BIBA 799 Bachelor-Abschlussarbeit
Erstgutachter	Prof. Dr.-Ing. Markus Enders-Comberg
Name:	Pascal Bade 3843513
Abgabedatum:	22.03.2024

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	4
Tabellenverzeichnis .....	5
1 Aufgabe.....	5
1.1 Stahlhalle .....	6
2 Grundlagen .....	8
2.1 Allgemeine Begriffe .....	8
2.1.1 Schientypen und Antrieb .....	10
2.2 Bemessungsgrundlagen .....	11
2.2.1 Hubklassen .....	12
2.2.2 Beanspruchungsklassen .....	13
2.3 Wesentliche Daten der Kranbahn .....	14
3 Bemessung nach Eurocode 3 .....	15
3.1 Vorbemessung .....	15
3.2 Dynamische Faktoren .....	16
3.3 Lastgruppen .....	17
3.4 Nachweise .....	21
3.4.1 Querschnittswerte .....	21
3.4.2 Nachweis des Querschnittes.....	23
3.4.3 Nachweis lokale Spannungen infolge Radlasten .....	24
3.4.4 Biegedrillknicknachweis .....	28
3.4.5 Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast.....	31
3.4.6 Schweißnähte .....	35
3.4.7 Nachweis der Durchbiegung (GZG).....	35
4 Bemessung nach DIN 18800 .....	38
4.1 Schnittkräfte .....	41
4.2 Nachweise .....	42
4.2.1 Allgemeine Querschnittsnachweise .....	43
4.2.2 Lokale Spannungen .....	44
4.2.3 Lokale Spannungen (Hertzsche Pressung) .....	44
4.2.4 Lokale Spannungen am Obergurt .....	46
4.2.5 Mehrachsige Spannung .....	47
4.2.6 Beulen .....	48
4.2.7 Kippsicherheit (Biegedrillknicken) .....	53

4.2.8	Gebrauchszustand (GZG).....	54
5	Vergleich der Bemessungskonzepte .....	55
6	Ermüdungsnachweis.....	56
6.1	Vorbemerkung .....	56
6.2	Detail 1: Bohrloch.....	58
6.3	Detail 2: Gewalzter Stegansatz.....	58
6.4	Detail 3: Quersteifenanschluss an Oberflansch.....	60
6.5	Detail 4: Quersteifenanschluss an Steg.....	61
6.6	Detail 5: Stirnplattenanschluss an Steg .....	61
6.7	Detail 6: Stirnplattenanschluss an Flansch.....	62
7	Fazit .....	63
8	Literaturverzeichnis.....	65
9	Anhang.....	66
	Eidesstaatliche Erklärung .....	90

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schnitt A-A Stahlhalle mit Kranbahn.....	6
Abbildung 2: Grundriss Stahlhalle mit Kranbahn OG .....	7
Abbildung 3: Kranbauformen [7] .....	8
Abbildung 4: Kranbahnkomponenten [8] Krane .....	9
Abbildung 5: Fahrtrichtungen und Belastungen [10] ST.2 .....	9
Abbildung 6: Kranschien und Befestigungen [10] ST.2 .....	10
Abbildung 7: Zuordnung der Bereiche [6] SBT .....	12
Abbildung 8: Einträgerbrückenkrane [14] .....	14
Abbildung 9: Einwirkungen auf die Kranbahn [6] SBT .....	15
Abbildung 10: Horizontale Radlasten [16] DIN 1991-3 .....	19
Abbildung 11: Statisches System des Kranbahnträgers .....	19
Abbildung 12: Kranbahntäger-Querschnitt .....	21
Abbildung 13: Obergurtquerschnitt .....	22
Abbildung 14: Spannungsverteilung EK 1 .....	26
Abbildung 15: Spannungsverteilung EK 5 .....	27
Abbildung 16: Biegeknicken und Biegedrillknicken [9] ST.1 .....	28
Abbildung 17: Skizze Beulfeld und Belastungen nach EK 1 .....	31
Abbildung 18: Darstellung der Lasteinleitung $s_s$ [6] SBT .....	32
Abbildung 19: Beulwerte für verschiedene Lasteinleitung [18] DIN 1993-1-5 .....	32
Abbildung 20: Schweißnähte an Stirnplatte .....	35
Abbildung 21: Entwicklung der Normen für Krane und Kranbahnen [12] .....	38
Abbildung 22: Schräglaufkraft $S$ und Horizontallasten $H_s$ bei Spurkranzführung [8] Krane ..	39
Abbildung 23: Wirkung der Kräfte auf die Kranbahn .....	41
Abbildung 24: Höhe $h$ für Lastausbreitung [23] DIN 4132 .....	46
Abbildung 25: Beulfeld .....	48
Abbildung 26: Systemgrößen zum Beulen [8] Krane .....	49
Abbildung 27: Beulwert $k_{\sigma x}$ [8] Krane .....	49
Abbildung 28: Definition der Beulfelder [10] ST.2 .....	50
Abbildung 29: Maßgebende Stellen zur Ermüdung .....	56
Abbildung 30: Zeitverlauf der Schnittgrößen in Feldmitte und am Auflager .....	57



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wesentliche Normen für Krane und Kranbahnen [10] ST.2.....	11
Tabelle 2: Hubklasse mit Faktoren ( $\beta_2$ und $\phi_{2,min}$ ) [10] ST.2 .....	12
Tabelle 3: Bezug von Kranarten in Hubklassen und Beanspruchungsklassen [10] ST.2.....	12
Tabelle 4: Abschätzung HEB-Profilgröße .....	15
Tabelle 5: Dynamische Faktoren [10] ST.2.....	16
Tabelle 6: Lastgruppen mit dynamischen Faktoren [16] DIN 1991-3 .....	17
Tabelle 7: Ausgewertete Lastgruppen .....	17
Tabelle 8: Auswahl der Knicklinie eines Querschnitts [17] DIN 1993-1-1 .....	29
Tabelle 9: Imperfektionsbeiwert der Knicklinien [17] DIN 1993-1-1 .....	29
Tabelle 10: Beiwerte Durchbiegung Kranbahn [6] SBT .....	36
Tabelle 11: Kraftschlußbeiwert $f$ [8] Krane.....	39
Tabelle 12: Faktoren zur Berechnung der Horizontalkräfte [24] DIN 15018.....	40
Tabelle 13: Zulässige Spannungen nach DIN 4114 [8] Krane.....	43
Tabelle 14: Herztsche Pressung [8] Krane .....	45
Tabelle 15: Zulässige Berührungspressung nach DIN 18800 Teil 1 [8] Krane .....	45
Tabelle 16: Beulwert $k_\tau$ [8] Krane .....	49
Tabelle 17: Beulwert $k_\tau$ [8] Krane .....	49
Tabelle 18: Abminderungsfaktor [21] DIN 18800.....	51
Tabelle 19: Momentenbeiwert $\zeta$ [21] DIN 18800 .....	53
Tabelle 20: Empfohlene Begrenzung [25] .....	54
Tabelle 21: Vergleich der Normen .....	55
Tabelle 22: Kerbfallzuordnung [19] DIN 1993-1-9 .....	58

## 1 Aufgabe

Die Aufgabe dieser Bachelor-Abschlussarbeit ist die Konstruktion sowie die Bemessung einer Kranbahn aus Stahl in einer Stahlbauhalle. Dabei soll neben der aktuell gültigen Norm, der DIN EN 1993-6, auch ein Blick auf die bis Juli 2012 gültige DIN-Norm 18800 geworfen werden.

Neben den maßgebenden Laststellungen, welche zu ermitteln sind, werden die Kranträger nach den beiden Normen bemessen. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden verglichen und interpretiert.

Zum Schluss werden an den maßgebenden Stellen die Ermüdungsbemessungen durchgeführt. Neben den händischen Berechnungen soll auch eine gängige Berechnungssoftware angewendet werden.

Die komplette Aufgabenstellung befindet sich im Anhang 1.

## 1.1 Stahlhalle

Um eine bessere Vorstellung der Krananlage zu erhalten, wird kurz die geplante Stahlhalle erläutert. Die Stahlhalle soll in Homburg, Saarland, gebaut werden und als Lokomotivwerkstatt dienen.

Sie ist mit einem Bürogebäudekomplex verbunden, der in Stahlbeton hergestellt wird. Die reine Stahlhalle hat eine Breite von 27,12 m und eine Länge von 71,82 m.

Die Halle besteht aus zwei Hallenschiffen, wobei das größere Schiff etwa doppelt so breit sein wird als das kleinere. Ausgestattet wird sie mit zwei Kranbahnen, jedoch wird in dieser Ausarbeitung nur die größere der beiden betrachtet.

In Abbildung 1 ist der Schnitt A-A sowie in Abbildung 2 der Grundriss im Obergeschoss dargestellt. Da ein kleiner Bereich der Halle ebenfalls als Büro genutzt wird, wird die Halle untypischer Weise auch in Geschosse eingeteilt.

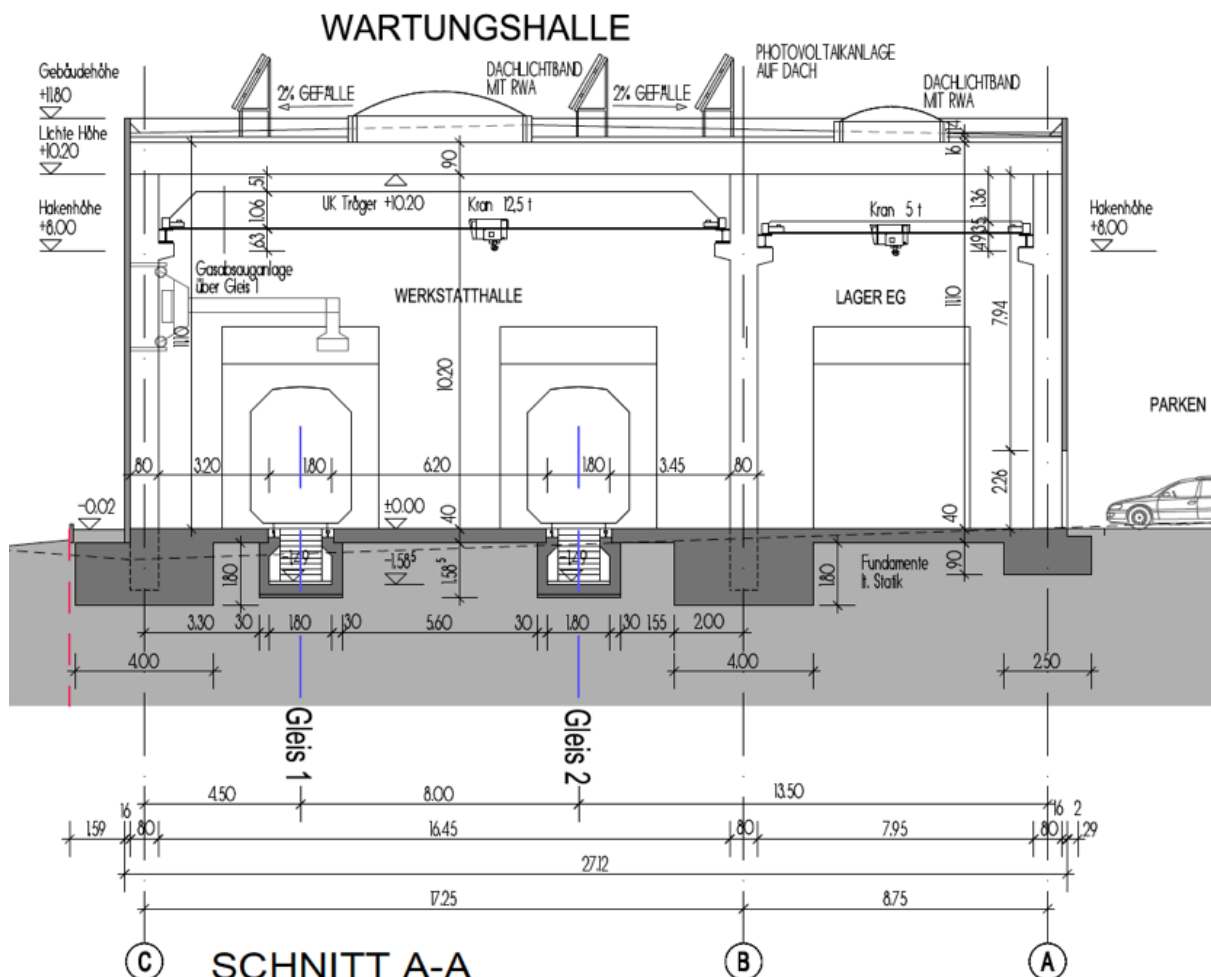
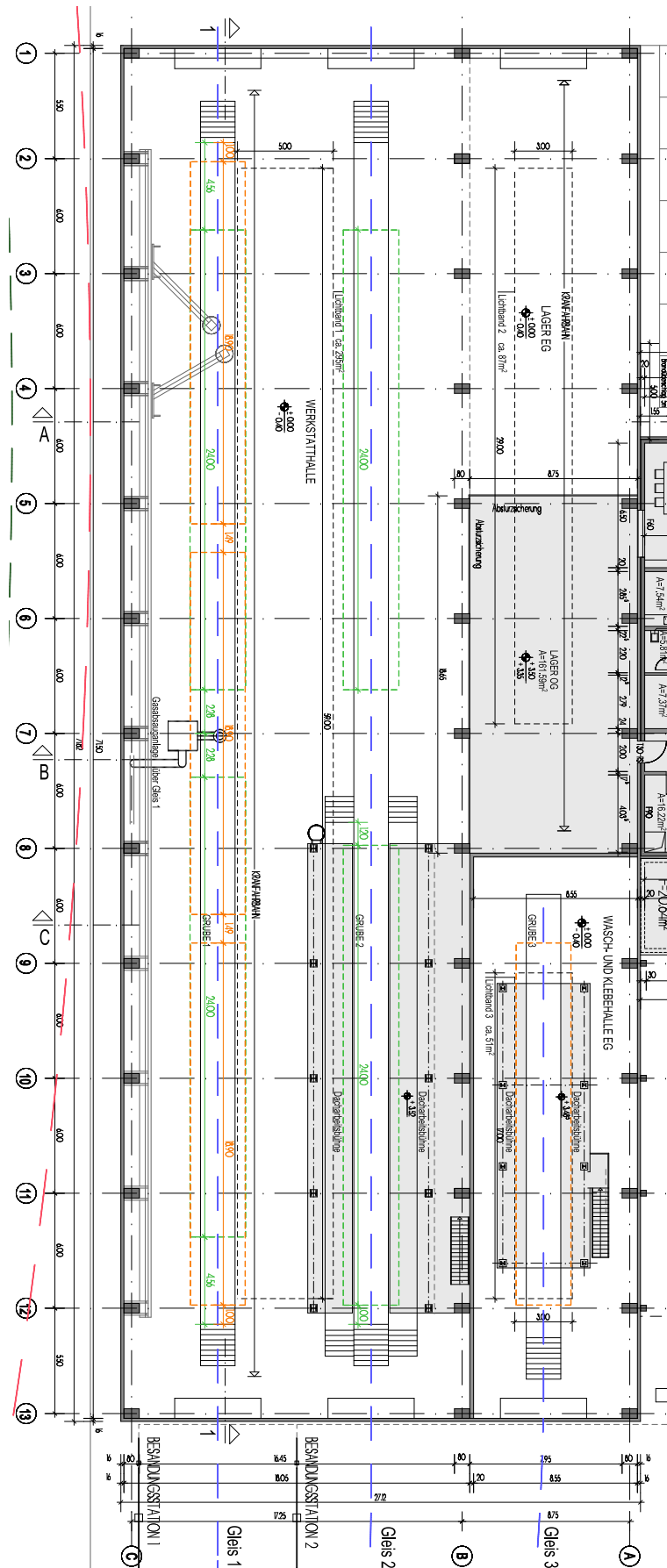


Abbildung 1: Schnitt A-A Stahlhalle mit Kranbahn



**Abbildung 2: Grundriss Stahlhalle mit Kranbahn OG**

## 2 Grundlagen

### 2.1 Allgemeine Begriffe

Im ersten Teil dieser Ausarbeitung wird eine allgemeine Übersicht der wichtigsten Bestandteile einer Kranbahn sowie eine kleine Auswahl der unterschiedlichen möglichen Kranbahnarten gegeben.

Im Allgemeinen befinden sich solche Krananlagen in fast allen Industriehallen, bei denen größere bzw. schwerere Teile angefertigt werden. Daher wird ein Bauingenieur in seiner Berufskarriere immer wieder mit dem Thema in Berührung kommen. Vor allem wenn er im Industriebau tätig ist.

Unter anderem ist das Besondere, dass die resultierenden Kräfte nicht vorwiegend ruhend sind, sondern aus zeitlich und örtlich veränderlichen Einwirkungen, sogenannten Wanderlasten, bestehen. Die Lasten können sich in der ganzen Halle „bewegen“ und erzeugen so unterschiedliche Laststellungen und Spannungen an den angrenzenden Bauteilen.

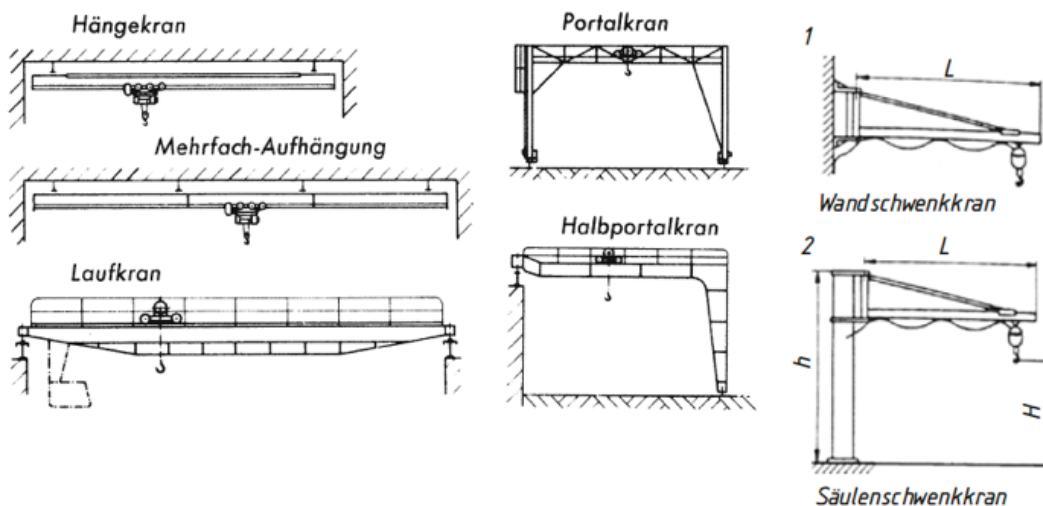


Abbildung 3: Kranbauformen [7]

Die Einordnung und Benennung einer Krananlage hängen mit der Bauart bzw. dem Verwendungszweck zusammen. So gibt es z.B. Einträgerlaufkrane, Hängekrane, Portalkrane, Wandlaufkrane, Werkstattkrane und Lagerkrane, wie eine Auswahl in der Abbildung 3 zeigt.

In der Regel wird der verwendete Kran in Abhängigkeit von den Wünschen und Anforderungen des Bauherrn gewählt. Wesentliche Aspekte der Wahl des Kranes ist die zu hebende Last und die zu überbrückende Strecke. Wobei hier auch der Kostentreiber liegt. Eine Last bis zu 150 t ist bei modernen Kranen bereits kein Problem.

Auch wenn es sehr viele unterschiedliche Krane gibt, ist der Aufbau meist identisch. Die einzelnen Kranbahnkomponenten sind in Abbildung 4 zu erkennen.

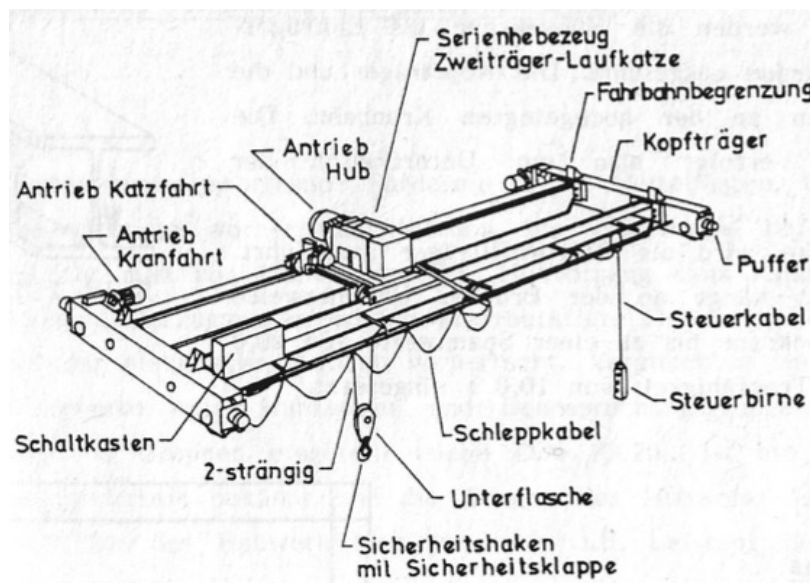


Abbildung 4: Kranbahnkomponenten [8] Krane

Die Last wird an einer Lastaufnahmeeinrichtung, meistens einem Haken mit Hilfe eines Stahlseiles und eines Hubantriebes, angehoben. Dabei ist der Hubantrieb auf einer sogenannten Laufkatze montiert, welche entlang des Brückenträgers fahren kann.

Dies ist die erste Fahrtrichtung quer zum zu bemessenen Kranbahnträger, wie auch in Abbildung 5 dargestellt. Der Brückenträger ist wiederum in den Kopfträgern gelagert. Diese sind mit Rädern auf dem Kranbahnträger aufgelagert und können in der zweiten Fahrtrichtung entlang des Trägers fahren.

Die Steuerung solcher Krane ist heutzutage über Funkfernbedienungen oder sogenannte kabelgebundene Steuerbirnen unter dem Kran möglich.

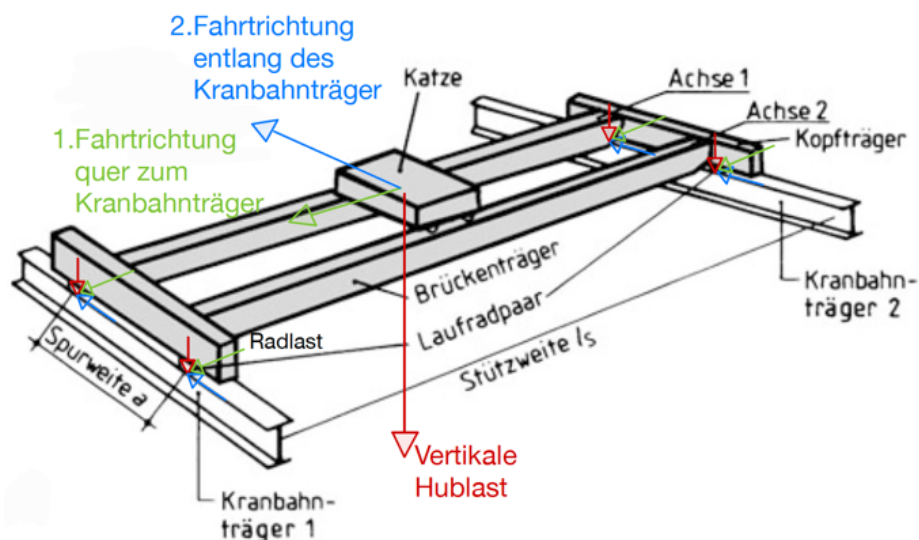


Abbildung 5: Fahrtrichtungen und Belastungen [10] ST.2

### 2.1.1 Schienentypen und Antrieb

Die Kranschiene stellt als Verbindung zwischen der Kranbahnbrücke und dem Kranbahnträger eine bedeutende Stelle der Konstruktion dar, die sehr hoch belastet ist. Daher wird sie oft so gewählt, dass sie nach Möglichkeit leicht ausgetauscht werden kann. In Abbildung 6 sind die möglichen Formen sowie eine kleine Auswahl ihrer Befestigungsmöglichkeiten dargestellt, auf die im Weiteren eingegangen wird.

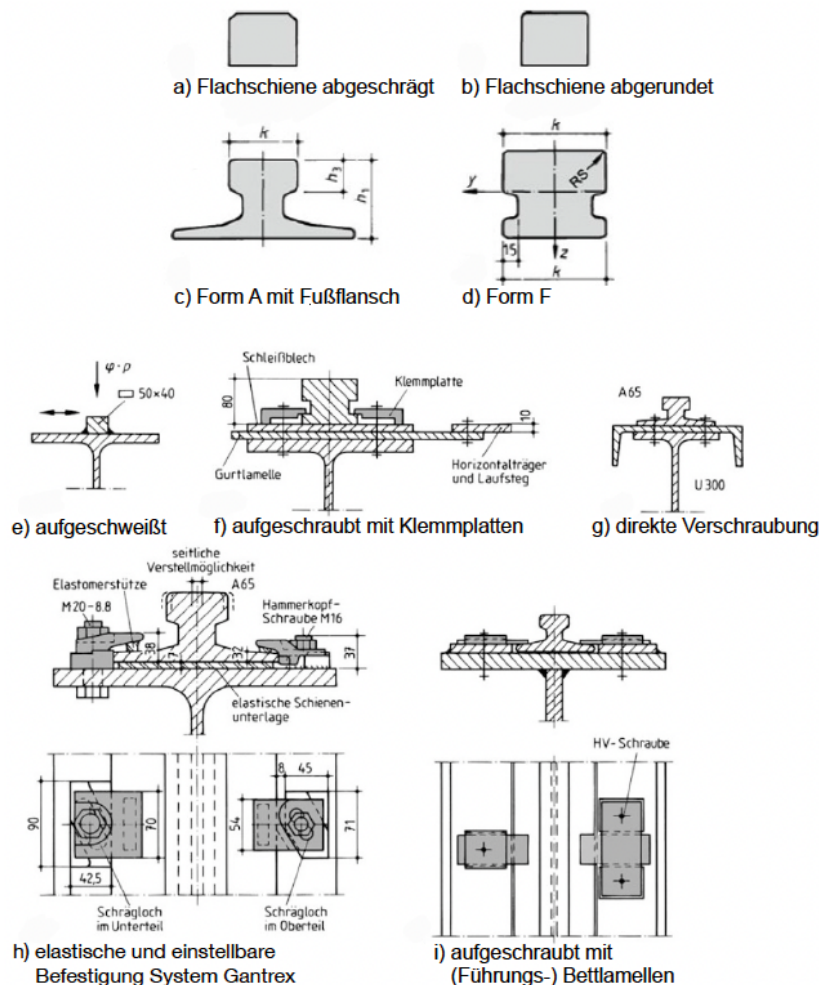


Abbildung 6: Kranschinen und Befestigungen [10] ST.2

Die zu unterscheidenden Schienentypen können vor allem in drei Grundformen eingeordnet werden. Zum einen die Flach- bzw. Vierkantschiene, die „nur“ auf den Obergurt des Kranbahnträgers aufgeschweißt werden kann. Durch die Schweißung resultiert, dass die Schiene somit später nur noch unter sehr großem Aufwand, bis gar nicht mehr ersetzt werden kann. Daher ist sie auch nur für schwachbelastete Krane zu empfehlen.

Die weiteren Kranschinen sind die Form A für den allgemeinen Gebrauch und die Form F (flach) für spurkranzlose Laufräder mit hohen Raddrücken und geringen Horizontalkräften. Diese Formen werden meist in möglichst großen Längen hergestellt, um eine große Anzahl an teuren Schienenstößen zu vermeiden. Des Weiteren können diese Formen an den Träger mit Hilfe von Klemmen angeschraubt werden, so dass sie einfacher zu wechseln sind.



Zu unterscheiden ist hierbei, ob die Schiene „schubfest“ oder „schwimmend“ mit dem Kranbahnträger verbunden ist. Wird bei einer angeschraubten Kranschiene eine elastische Schienenunterlagen mit mind. 6 mm dicke gewählt, wird die Schiene als „schwimmend“ bezeichnet und nicht zu dem tragenden Querschnitt gerechnet. Dagegen können schubfeste Schienen, wie z.B. geschweißte Schienen mit 75% ihres Querschnittes zum tragenden Kranbahnquerschnitt gerechnet werden.

Dabei sollen die fehlenden 25% des Schienenkopfes als abgefahren angesehen werden.

Neben den Schientypen werden auch die Seitenführungen der Kranbahn unterschieden. Oftmals kommt es hier auch auf das Material an, aus welchem die Laufräder gefertigt werden. So gibt es Gussstahl-, Gusseisen- und Kunststoffräder.

Die Räder aus Guss können dabei mit Spurkränzen ausgestattet werden, um die Kranbahn in der Spur zu halten. Eine Alternative dazu sind separate horizontale Führungsrollen, die seitlich an der Schiene mitlaufen.

## 2.2 Bemessungsgrundlagen

Wie bereits erwähnt hat sich die Bemessungsgrundlage durch die Einführung des Eurocodes im Jahr 2012 geändert. In Tabelle 1 sind die wesentlichen ehemaligen und aktuellen Normen dargestellt, welche auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit relevant sind.

	Früher	Aktuell
Bemessung von Kranen	DIN 15018	EN 13001
Bemessung von Kranbahnen	DIN 4132 mit Anpassungs-Richtlinie Stahlbau	EN 1993-6
Stahlbau Grund-norm	DIN 18800	EN 1993-1-1
Einwirkungen auf Kranbahnen	DIN 4132 DIN 15015	EN 1991-3
Weitere Einwirkungen	DIN 1055 (alt)	EN 1991
Ermüdung	DIN 4132	EN 1991-3 EN 1993-1-9 EN 1993-6

**Tabelle 1: Wesentliche Normen für Krane und Kranbahnen [10] ST.2**

Eine weitere wichtige Grundlage ist, dass der Kranbahnträger als fest verbundener Bestandteil einer baulichen Anlage den bauaufsichtlich eingeführten Bestimmungen unterliegt. Also der Landesbauordnung des jeweiligen Bundeslandes, so wie den gültigen DIN-Normen, in diesem Fall dem aktuellen Eurocode. Im Saarland gilt daher die „Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen“ (VVTB) des Saarlandes. Dagegen ist die Krananlage mit den Hebe- und Fördereinrichtungen nicht baugenehmigungspflichtig.

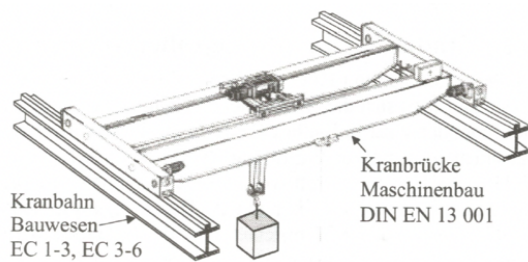


Abbildung 7: Zuordnung der Bereiche [6] SBT

Im Klartext bedeutet dies, dass der Kopfträger und der Brückenträger meist nicht in den Zuständigkeitsbereich eines Bauingenieurs fallen, sondern von dem Kranhersteller bemessen und über anerkannte Sachverständige durch Berufsgenossenschaften und technische Überwachungsvereine (TÜV) abgenommen werden. Bildlich noch einmal in Abbildung 7 dargestellt.

Aus diesem Grund wird auch im weiteren Verlauf nur der Kranbahnträger betrachtet.

### 2.2.1 Hubklassen

Bevor mit der Schnittgrößenbestimmung und Nachweisführung begonnen werden kann, muss der Kran in eine Hubklasse eingeordnet werden. In den früheren Normen DIN 15018 und DIN 4132 waren die Unterteilungen von H1 bis H4 geregelt. Im heutigen Eurocode werden sie in die Kategorien HC1 bis HC4 eingestuft.

Die Hubklasse gibt an, wie stark die dynamische Wirkung beim Anheben oder Absetzen der Last ist. Aus der Einordnung der Klasse resultierende Beiwerte sind mit den ermittelten Schnittgrößen zu multiplizieren. Dabei gibt eine höhere Klasse größere dynamische Stöße auf die Bauteile ab. In Tabelle 2 sind die jeweiligen Hubklassen und Faktoren nach DIN EN 1991-3 angegeben.

Hubklasse	Faktor $\beta_2$	Dynamischer Faktor $\varphi_{2,min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

Tabelle 2: Hubklasse mit Faktoren ( $\beta_2$  und  $\varphi_{2,min}$ ) [10] ST.2

So sind bspw. sehr langsam fahrende Kräne in die Klasse HC1 einzuordnen und Schiffskräne, die mit Magneten ausgestattet sind und somit die Last ruckartig anheben bzw. ablassen, in die Stufe HC4 einzugruppieren. Eine kleine Auswahl an Zuordnungen befindet sich in Tabelle 3.

Kranart		Hubklassen	Beanspruchungs- klassen (EC 1-3)	Beanspruchungs- gruppen (DIN 4132)
Maschinenhauskrane		HC1	S1, S2	B2, B3
Lagerkrane	Unterbrochener Betrieb	HC2	S4	B4
Lagerkrane, Traversen- krane, Schrottplatzkrane	Dauerbetrieb	HC3, HC4	S6, S7	B5, B6
Werkstattkrane		HC2, HC3	S3, S4	B3, B4
Brückenkrane, Fall- werkkrane	Greifer- oder Magnetbetrieb	HC3, HC4	S6, S7	B5, B6
Verladebrücken, Halb- portalkrane, Vollportal- krane mit Laufkatze oder Drehkran	Hakenbetrieb	HC2	S4, S5	B4, B5
	Greifer- oder Magnetbetrieb	HC3, HC4	S6, S7	B5, B6

Tabelle 3: Bezug von Kranarten in Hubklassen und Beanspruchungsklassen [10] ST.2

In der alten DIN 15018 war der sogenannte Hublastbeiwert  $\Psi$  direkt von der Hubgeschwindigkeit des Kranes abhängig und wurde mit den Hublasten vervielfältigt.



### 2.2.2 Beanspruchungsklassen

Eine weitere Klasse, zu der ein Kran eingeordnet werden muss, sind die Beanspruchungsklassen S0 bis S9. Dabei steigert sich pro Klasse die Belastungsform, so dass ein Kran in der Klasse S9 am stärksten belastet ist.

In der ehemaligen DIN 4132 fand diese Einstufung in Beanspruchungsgruppen von B1 bis B6 statt. Dabei lässt sich eine gewisse Abhängigkeit zwischen Verwendungszweck, Hubklasse und Beanspruchungsklasse des Kranes erkennen. Die Einordnung, früher wie heute, wird anhand der zu erwartenden Lastwechsel von Belastungsvorgängen mit hoher Last zum Vergleich der Gesamtzahl der Lastwechsel gewählt.

Die Beanspruchungsklasse ist bei der Bemessung und konstruktiven Ausführung relevant. So dürfen z.B. ab der Beanspruchungsklasse S5 keine Querschnittsteifen an den Obergurt angeschweißt werden und ein Flachstahl für die Kranschiene ist nur bis zur Beanspruchungsklasse S3 zu empfehlen. Des Weiteren müssen genauere Nachweise geführt werden, da die Ermüdung der Bauteile zunimmt. Ab der Beanspruchungsklasse 3 muss so bspw. eine exzentrische Radlast für die Ermüdungsnachweise angesetzt werden.

Das Einordnen von Kranen in die Hubklasse, sowie die Beanspruchungsklasse erfordert ausreichende Berufserfahrung und wird meistens vom Kranhersteller durch die Angaben des Bauherrn durchgeführt.

Dabei ist zu beachten das in regelmäßigen Zyklen, meistens 1 bis 2 Jahren ein Gutachter die Kranbahn zu überprüfen hat. Vor allem bei wechselnden Aufgaben und daraus resultierender Mehrbeanspruchung muss die Einordnung der Hub- und Beanspruchungsklasse geändert werden.

## 2.3 Wesentliche Daten der Kranbahn



Abbildung 8: Einträgerbrückenkran [14]

Die zu konstruierende und zu bemessende Kranbahn befindet sich im größeren Hallenschiff. Dabei handelt es sich um einen Einträgerbrückenkran ähnlich wie in Abbildung 8 im Hakenbetrieb mit einer Hublast von 12,5 t (125 kN).

Der Brückenträger spannt von Achse C bis B über ca. 16,7 m. Da der Kran über die ganze Hallenlänge im Einsatz ist, reichen die Kranbahnträger von Achse 1 bis 13 also gute 71 m. Die Lieferung solch eines langen Trägers ist natürlich nicht möglich. Daher werden die Träger in sechs Zweifeldträger unterteilt mit einer Stützweite von 6 m, so dass die Träger in jeder zweiten Achse gestoßen werden.

Die Kranbahn kann bei der Bemessung auch den Kranträger „verlassen“ und auf den nächsten Zweifeldträger fahren.

Da es sich um einen Werkstattkran handelt, wird der Kran in die Hubklasse HC2 und in die Beanspruchungsklasse S3 eingeordnet. Der Radabstand beträgt  $a = 2,7$  m. Die Kranfahrgeschwindigkeit entlang des Kranbahnträgers wird mit max. 40 m/min, die Fahrgeschwindigkeit der Krankatze mit max. 20 m/min und die Hubgeschwindigkeit mit max. 5 m/min angenommen. Die max. Radlast infolge des Eigengewichtes des Kranes ist mit  $Q_{c,max} = 16,4$  kN angegeben. Dazu kommt noch die Hublast mit  $Q_{h,max} = 58,1$  kN.

Des Weiteren hat der Kranhersteller die horizontalen Seitenlasten wie folgt angegeben:  $H_{T,max} = 5,7$  kN,  $H_{s,max} = 22,1$  kN und  $H_L = 1,8$  kN. Eine außergewöhnliche Pufferkraft ist mit  $H_{B1} = 16,2$  kN anzunehmen.

### 3 Bemessung nach Eurocode 3

#### 3.1 Vorbemessung

Mit Hilfe der Schneider Bautabellen und der darin enthaltenen Tabelle 4 kann das benötigte HEB-Profil abgeschätzt werden. Zwar ist die Tabelle nur für Krane bis HC 2 und S 2 ausgelegt, jedoch kann hier ein erster Anhaltspunkt für die weitere Berechnung gefunden werden.

Hierbei errechnet sich die Radlast  $Q_r$  aus den max. Radlasten des Eigengewichtes und der Hublast:

$$Q_r = 16,4 \text{ kN} + 58,1 \text{ kN} = 74,5 \text{ kN} \approx 80 \text{ kN}$$

Daraus ergibt sich aus der Tabelle eine erf. Profilgröße von HEB 280. Da eine höhere Beanspruchung zu berücksichtigen ist, wird jedoch ein HEB 320 gewählt.

Um bei späterem Verschleiß die Schiene wechseln zu können, wird sich für eine Schiene der Form A 75 entschieden. Auch sind die Gussräder mit Spurkränzen ausgestattet.

So kommen neben den Radlasten noch das Eigengewicht des Trägers und der Schiene mit  $g_k = 1,83 \text{ kN/m}$  hinzu.

Bevor mit der Bemessung der Kranbahn begonnen werden kann, müssen die Lasten ermittelt und bestimmt werden. Dafür steht der Normteil DIN 1991-3 speziell für Kranbahnen zur Verfügung. In der Abbildung 9 werden die unterschiedlich auftretenden Einwirkungen dargestellt.

Radlast $Q_r$ (ohne $\phi$ ) in kN	Achsab- stand $a$ in m	Zweifeldträger				
		HEB-Profilgröße; Feldweite $l =$				
		5 m	6 m	7 m	8 m	10 m
15	1,9	180	200	220	240	260
	2,7	160	180	200	220	260
	3,8	160	180	200	220	260
20	1,9	180	200	220	240	280
	2,7	180	200	220	240	280
	3,8	160	180	200	240	280
25	1,9	200	220	240	260	300
	2,7	180	220	240	260	300
	3,8	180	200	220	240	280
30	1,9	200	240	260	280	320
	2,7	200	220	240	260	300
	3,8	200	220	240	260	300
	4,6	200	220	240	260	300
35	1,9	220	240	260	280	320
	2,7	200	240	260	280	320
	3,8	200	220	240	260	320
	4,6	200	220	240	260	300
40	2,7	200	240	260	300	340
	3,8	200	220	240	280	320
	4,6	200	220	240	260	320
50	2,7	220	260	280	300	360
	3,8	220	240	260	300	340
	4,6	220	240	260	300	340
60	2,7	240	260	300	320	400
	3,8	240	240	280	300	400
	4,6	240	240	280	300	360
	5,5	240	240	280	280	340
70	2,7	240	280	300	340	450
	3,8	240	260	280	320	450
	$\geq 4,6$	240	260	280	300	450
80	2,7	260	280	320	360	550
	3,8	260	280	300	340	550
	$\geq 4,6$	260	280	300	320	550

Tabelle 4: Abschätzung HEB-Profilgröße  
[6] SBT

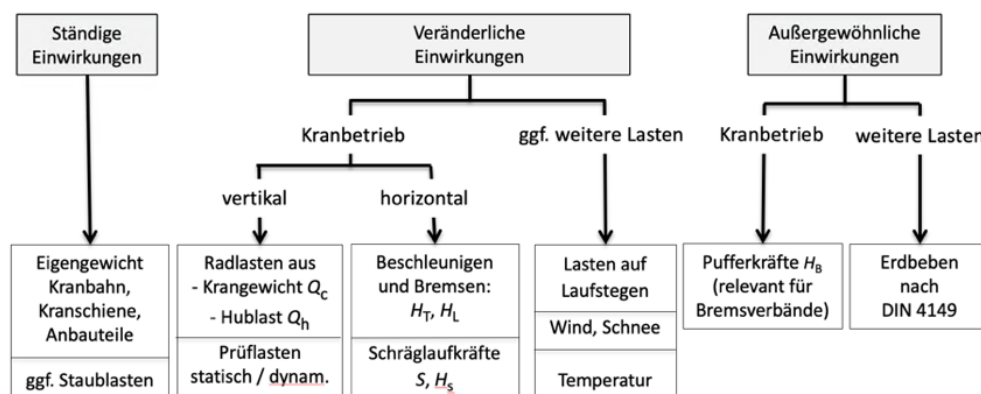


Abbildung 9: Einwirkungen auf die Kranbahn [6] SBT

### 3.2 Dynamische Faktoren

Um die maßgebenden Lastgruppen bestimmen zu können, müssen zuerst die dynamischen Faktoren bestimmt werden, mit welchen die Radlasten multipliziert werden. Diese decken die beim Hub- und Absetzvorgang des Kranes ausgelösten Stöße ab.

In der nachstehenden Tabelle 5 werden die unterschiedlichen dynamischen Faktoren und ihre Berechnung dargestellt. Des Weiteren sind die jeweils gewählten Faktoren für die Rechnung angegeben.

Ursache	Anzuwenden auf	Dynam. Vergröß.-faktor	Berechnung des Vergrößerungsfaktors	Gewählt															
Anheben der Hublast vom Boden	Eigengewicht des Krans $Q_c$	$\varphi_1$	$\varphi_1 = 1 \pm a, 0 < a < 0,1$	1,1 (Regelfall für Brückenkrane)															
Transferieren der Hublast vom Boden	Hublast $Q_h$	$\varphi_2$	$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 \cdot v_a$ $v_a$ – Hubgeschwindigkeit [m/s] nach Art des Hubwerkes $\beta_2$ – Beiwert $v_a = 5 \text{ [m/min]} = 0,08 \text{ [m/s]}$ $1,1 + 0,34 \cdot 0,08 = 1,13$	1,13															
	<table border="1"> <tr> <td></td><td>HC1</td><td>HC2</td><td>HC3</td><td>HC4</td></tr> <tr> <td><math>\varphi_{2,min}</math></td><td>1,05</td><td>1,10</td><td>1,15</td><td>1,20</td></tr> <tr> <td><math>\beta_2</math></td><td>0,17</td><td>0,34</td><td>0,51</td><td>0,68</td></tr> </table>		HC1	HC2	HC3	HC4	$\varphi_{2,min}$	1,05	1,10	1,15	1,20	$\beta_2$	0,17	0,34	0,51	0,68			
	HC1	HC2	HC3	HC4															
$\varphi_{2,min}$	1,05	1,10	1,15	1,20															
$\beta_2$	0,17	0,34	0,51	0,68															
Plötzliches Loslassen der Hublast oder eines Anteils der Hublast	Hublast $Q_h$	$\varphi_3$	$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m}{m} \cdot (1 + \beta_3)$ $\Delta m$ – losgelassene Teilhubmasse $m$ – Gesamthubmasse $\beta_3 = 0,5$ : Greiferkran, $\beta_3 = 1,0$ : Magnetkran	1,0 (vereinfacht plötz. Loslassen wird nicht betrachtet)															
Kranfahren auf Schienen oder Fahrbahnen	Eigengewicht des Kranes einschl. Hublast $Q_c, Q_h$	$\varphi_4$	$\varphi_4 = 1,0$ bei Kranschiene- toleranzen nach [5]	1,0															
Anfahren und Bremsen (Antriebskräfte)	Antriebskräfte $H_L, H_T$	$\varphi_5$	$\varphi_5 = 1,0$ : Fliehkräfte $1,0 \leq \varphi_5 \leq 1,5$ : Stetige Antriebskraft $1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$ : plötzliche Antriebskraftveränderung $\varphi_5 = 3,0$ Antriebe mit beträchtlichem Spiel	1,5 (Regelfall für Brückenkrane)															
Dynamische Prüflast	Dynamische Prüflast $\hat{=}$ 110 % von $Q_h$	$\varphi_6$	$\varphi_6 = 0,5(1 + \varphi_2)$ $0,5 \cdot (1 + 1,13) = 1,07$	1,07															
Statische Prüflast	Statische Prüflast $\hat{=}$ 125 % von $Q_h$	$\varphi_6$	$\varphi_6 = 1,0$	1,0															
Pufferkraft	Pufferkräfte $H_{B1}$	$\varphi_7$	$\varphi_7 = 1,25$ für $0 \leq \xi \leq 0,5$ $\varphi_7 = 1,25 + 0,7 \cdot (\xi - 0,5)$ für $0,5 \leq \xi \leq 1$ $\xi$ abhängig von Pufferkennlinie	1,25															
$\varphi_{fat,1}$	Eigengewicht des Krans bei Ermüdungsnachweis	$Q_c$	$\varphi_1 = (1 + \varphi_1)/2$ $(1 + 1,1) / 2 = 1,05$	1,05															
$\varphi_{fat,2}$	Hublast bei Ermüdungsnachweis	$Q_h$	$\varphi_2 = (1 + \varphi_2)/2$ $(1 + 1,13) / 2 = 1,07$	1,07															

Tabelle 5: Dynamische Faktoren [10] ST.2

### 3.3 Lastgruppen

		Symbol	Abschnitt	Lastgruppen									
				ULS							Prüf- last	Außer- ge- wöhn- lich	
				1	2	3	4	5	6	7			
1	Eigengewicht des Krans	$Q_c$	2.6	$\varphi_1$	$\varphi_1$	1	$\varphi_4$	$\varphi_4$	$\varphi_4$	1	$\varphi_1$	1	1
2	Hublast	$Q_h$	2.6	$\varphi_2$	$\varphi_3$	-	$\varphi_4$	$\varphi_4$	$\varphi_4$	$\eta^1$	-	1	1
3	Beschleunigung der Kranbrücke	$H_L, H_T$	2.7	$\varphi_5$	$\varphi_5$	$\varphi_5$	$\varphi_5$	-	-	-	$\varphi_5$	-	-
4	Schräglauf der Kranbrücke	$H_S$	2.7	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5	Beschleunigen oder Bremsen der Laufkatze oder Hubwerk	$H_{T3}$	2.7	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
6	Wind in Betrieb	$F_W^*$	Anhang A	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
7	Prüflast	$Q_T$	2.10	-	-	-	-	-	-	-	$\varphi_6$	-	-
8	Pufferkraft	$H_B$	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	$\varphi_7$	-
9	Kippkraft	$H_{TA}$	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

ANMERKUNG Zu Wind außerhalb Betrieb, siehe Anhang A.

<sup>1</sup>  $\eta$  ist der Anteil der Hublast, der nach Entfernen der Nutzlast verbleibt, jedoch nicht im Eigengewicht des Krans enthalten ist.

Tabelle 6: Lastgruppen mit dynamischen Faktoren [16] DIN 1991-3

Die Lastgruppen zur Ermittlung der maßgebenden Belastungen werden nach der Tabelle 6 in der DIN EN 1991-3 ermittelt.

Werden die Lastgruppen mit den angegebenen Radlasten und den ermittelten dynamischen Faktoren ausgewertet, stellen sich als maßgebende Lastgruppen die Lastgruppen 1 und 5 heraus.

1.Lastgruppe $Q_{c,k} = 18,04$ $Q_{h,k} = 65,65$ $H_{T,k} = 8,55$ $H_{L,k} = 2,70$ $V_k = 83,69$ $N_k = 2,70$ $H_{T,k} = 8,55$	2.Lastgruppe $Q_{c,k} = 18,04$ $Q_{h,k} = 58,10$ $H_{T,k} = 8,55$ $H_{L,k} = 2,70$ $V_k = 76,14$ $N_k = 2,70$ $H_{T,k} = 8,55$	3.Lastgruppe $Q_{c,k} = 16,40$ $Q_{h,k} = 0,00$ $H_{T,k} = 8,55$ $H_{L,k} = 2,70$ $V_k = 16,40$ $N_k = 2,70$ $H_{T,k} = 8,55$	4.Lastgruppe $Q_{c,k} = 16,40$ $Q_{h,k} = 58,10$ $H_{T,k} = 8,55$ $H_{L,k} = 2,70$ $V_k = 74,50$ $N_k = 2,70$ $H_{T,k} = 8,55$	5.Lastgruppe $Q_{c,k} = 16,40$ $Q_{h,k} = 58,10$ $H_{S,k} = 22,10$ $H_{L,k} = 0,00$ $V_k = 74,50$ $N_k = 0,00$ $H_{T,k} = 22,10$	6.Lastgruppe $Q_{c,k} = 16,40$ $Q_{h,k} = 58,10$ $H_{T,k} = 5,70$ $H_{L,k} = 0,00$ $V_k = 74,50$ $N_k = 0,00$ $H_{T,k} = 5,70$
7.Lastgruppe $Q_{c,k} = 16,40$ $Q_{h,k} = 0,00$ $H_{T,k} = 0,00$ $H_{L,k} = 0,00$ $V_k = 16,40$ $N_k = 0,00$ $H_{T,k} = 0,00$	8.Lastgr. dyn. $Q_{c,k} = 18,04$ $Q_{h,k} = 0,00$ $H_{T,k} = 8,55$ $H_{L,k} = 2,70$ $Q_{T,k} = 63,91$ $V_k = 81,95$ $N_k = 2,77$ $H_{T,k} = 8,55$	8.Lastgr. stat. $Q_{c,k} = 18,04$ $Q_{h,k} = 0,00$ $H_{T,k} = 8,55$ $H_{L,k} = 2,70$ $Q_{T,k} = 72,63$ $V_k = 90,67$ $N_k = 2,70$ $H_{T,k} = 8,55$	9.Pufferkraft $Q_{c,k} = 16,40$ $Q_{h,k} = 58,10$ $H_{T,k} = 0,00$ $H_{L,k} = 0,00$ $H_{B,k} = 17,34$ $V_k = 91,83$ $N_k = 17,33$ $H_{T,k} = 0,00$	10.Kippkraft $Q_{c,k} = 16,40$ $Q_{h,k} = 58,10$ $H_{T,k} = 0,00$ $H_{L,k} = 0,00$ $H_{B,k} = 17,34$ $V_k = 91,83$ $N_k = 17,33$ $H_{T,k} = 0,00$	

Tabelle 7: Ausgewertete Lastgruppen

Im Folgenden werden noch einmal übersichtlich die Daten der Kranbahn angegeben sowie als Beispiel die Lastgruppen 1 und 5 bestimmt, um das Vorgehen der Berechnung darzustellen.

zweifeldriger Kranbahnträger  $l = 6,0 \text{ m}$

Hublast:	125 kN	Stützweite:	$l_s = 16,7 \text{ m}$	
Hubklasse:	HC 2	Radabstand:	$a = 2,7 \text{ m}$	
Beanspruchungsklasse:	S3			
$Q_c =$	16,4 kN	$Q_h =$	58,1 kN	$Q_r = 74,5 \text{ kN}$
$H_{t,\max} =$	5,7 kN	$H_{s,\max} =$	22,1 kN	$H_L = 1,8 \text{ kN}$
Träger:	HEB 320	Kranschiene:	A 75	$g_k = 1,83 \text{ kN/m}$

#### Lastgruppe 1:

Vertikallasten:	$\gamma_G = 1,35$ (veränderlich, ungünstig)	$V_K = Q_c \cdot \varphi_1 + Q_h \cdot \varphi_2$ $V_K = 16,4 \cdot 1,1 + 58,1 \cdot 1,13$	$= 83,69 \text{ kN}$
Horizontallasten:	$\gamma_G = 1,35$ (veränderlich, ungünstig)	$N_k = H_L \cdot \varphi_5 = 1,80 \cdot 1,5$ $H_{T,k} = H_T \cdot \varphi_5 = 5,70 \cdot 1,5$	$= 2,70 \text{ kN}$ $= 8,55 \text{ kN}$

#### Lastgruppe 5:

Vertikallasten:	$\gamma_G = 1,35$ (veränderlich, ungünstig)	$V_K = Q_c \cdot \varphi_4 + Q_h \cdot \varphi_4$ $V_K = 16,4 \cdot 1,0 + 58,1 \cdot 1,0$	$= 74,50 \text{ kN}$
Horizontallasten:	$\gamma_G = 1,35$ (veränderlich, ungünstig)	$N_k = H_L \cdot 0 = 0 \text{ kN}$ $H_S = H_S \cdot 1,0 = 22,1 \cdot 1,0$	$= 0,00 \text{ kN}$ $= 22,10 \text{ kN}$

Zur besseren Darstellung sind in Abbildung 10 die horizontalen Radlasten, welche nach DIN 1991-3 auftreten können, mit ihrer Richtung dargestellt. Dabei wird unterschieden in Lasten infolge Beschleunigung und Bremsen, welche sowohl quer (Fahrtrichtung 1 nach Abbildung 5) als auch längs (Fahrtrichtung 2) zur Kranbahn auftreten können. Des Weiteren können horizontale Radlasten aus einem Schräglauf innerhalb der Kranbahn auftreten.

In der DIN 1991-3 werden die Kräfte infolge von Beschleunigung und Bremsen quer zur Kranbahn als  $H_T$  gekennzeichnet und die Kräfte längs des Trägers mit  $H_L$  gekennzeichnet.

Zur einfacheren Darstellung und um Verwechslungen vorzubeugen, wurden die Längskräfte in der obigen Berechnung direkt als Normalkraft  $N_k$  bezeichnet, welche so auch in den späteren Nachweisen auftauchen.

Die Kraft aus Schräglauf wird mit  $H_s$  gekennzeichnet. Wie in der Abbildung 10 dargestellt, treten die Lasten  $H_T$  als Kräftepaare und entgegengesetzt auf. Dagegen tritt pro Kranschiene bei Verwendung von Spurkränzen nur einmal die Schräglaufkraft  $H_s$  auf. Falls zusätzliche Führungsrollen an der Kranbahn vorhanden sind, muss eine andere Betrachtung gewählt werden.



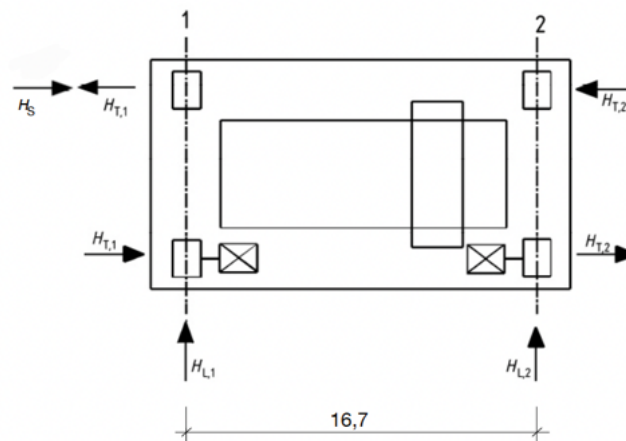


Abbildung 10: Horizontale Radlasten [16] DIN 1991-3

Nun können die berechneten Belastungen auf das statische System angewendet werden. Dafür wird nur eine der zwei Kranschiene betrachtet und zwar die mit den größeren Radlasten. Diese entstehen, wenn die Laufkatze am nächsten Punkt der Kranschiene ist. Daraus resultiert die Abbildung 11, bei der der Kran mittig in das erste Feld gesetzt wurde.

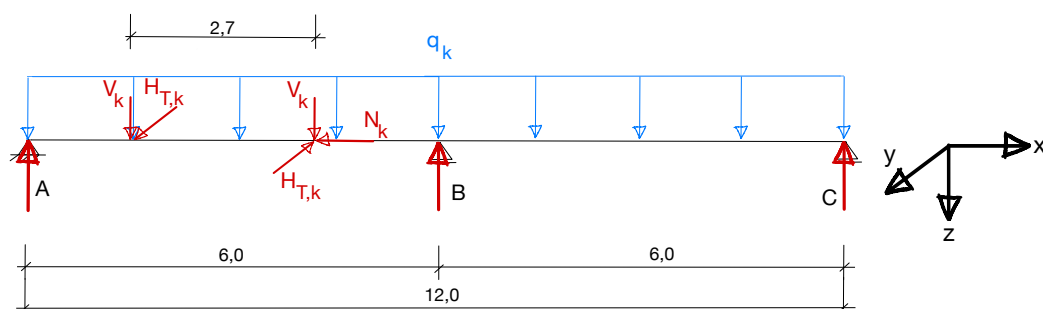


Abbildung 11: Statisches System des Kranbahnträgers

Dieses Lastbild ist nun auf dem statischen System frei gewählt. Durch die zeitliche und örtliche Veränderung der Krananlage können aber unzählige Lastbilder auftreten, bei denen der Kran immer weiter über die Schiene fährt. Es ist sogar möglich, dass nur eine Radlast am Anfang und Ende des statischen Systems auftritt, da sich daran noch weitere Träger anschließen oder der Kran das betrachtete System verlässt.

Werden nun diese sogenannten Wanderlasten entlang des Trägers geführt, treten immer wieder neue Schnittgrößen auf. Umso kleiner die Schrittweite der bewegenden Lasten dabei gewählt wird, umso größer wird die Anzahl der Schnittgrößen, die daraus resultieren.

Entweder können nun alle Schnittgrößen händisch berechnet werden, was sehr aufwendig wäre, ein EDV gestütztes Programm genutzt oder eine etwas ungenauere, aber auf der sicheren Seite liegende Schrittgrößenermittlung mit den Schneider Bautabellen durchgeführt werden.

Letzteres wird in diesem Fall getan. Dabei werden nur die Ergebnisse der Berechnung angegeben.

Bei der Berechnung der Bemessungsschnittgrößen fällt eine weitere Besonderheit und Ausnahme der DIN 1991-3 zu anderen Bemessungen nach dem Eurocode auf. Die Teilsicherheitswerte unterscheiden sich. Bei Kranbahnbemessungen wird auch die veränderliche Einwirkung mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_Q = 1,35$  multipliziert, genauso wie die ständigen Einwirkungen infolge des Eigengewichts.

Dies ist bei den meisten anderen Berechnungen nach dem Eurocode nicht der Fall.

### **Lastgruppe 1:**

#### Charakteristische Schnittgrößen:

max $M_F =$	123,78 kNm	$x_{MF} =$	2,15 m
max $M_{St,r} =$	- 81,10 kNm	$x_{MSt} =$	4,68 m
max $A_r =$	122,27 kN	max $B_r =$	155,50 kN
max $M_{Z,F,HAT} =$	10,62 kNm	$x_{MZ,F,HAT} =$	1,74 m
max $M_{St,z} =$	4,87 kNm	$x_{MSt,z} =$	3,30 m

### **Lastgruppe 5:**

#### Charakteristische Schnittgrößen:

max $M_F =$	110,19 kNm	$x_{MF} =$	2,15 m
max $M_{St} =$	- 72,19 kNm	$x_{MSt} =$	4,68 m
max $A_r =$	108,84 kN	max $B_r =$	138,42 kN
max $M_{Z,F,S} =$	27,39 kNm	$x_{MZ,F,HT} =$	2,59 m
max $M_{St,z} =$	12,80 kNm	$x_{MSt,z} =$	3,46 m

### **Eigengewicht:**

#### Charakteristische Schnittgrößen:

max $M_{F,g} =$	4,61 kNm		
max $M_{St,g} =$	- 8,24 kNm		
max $A_g =$	4,12 kN	max $B_g =$	13,73 kN

### **Einwirkungskombination 1: 1,35 • LG 1 + 1,35 • Eigengewicht**

max $M_{y,Ed} =$	173,33 kNm	max $M_{z,F,Ed} =$	14,34 kNm
max $M_{St,Ed} =$	-120,61 kNm	max $M_{z,St,Ed} =$	6,57 kNm
max $V_{Bz,li} =$	-157,64 kN	$N_{Ed} =$	3,65 kN

### **Einwirkungskombination 5: 1,35 • LG 5 + 1,35 • Eigengewicht**

max $M_{y,Ed} =$	154,98 kNm	max $M_{z,F,Ed} =$	36,98 kNm
max $M_{St,Ed} =$	-108,58 kNm	max $M_{z,St,Ed} =$	17,28 kNm
max $V_{Bz,li} =$	-132,08 kN	$N_{Ed} =$	0,00 kN



### 3.4 Nachweise

Mit den ermittelten Schnittgrößen können nun die erforderlichen Nachweise geführt werden. Dabei werden die Nachweise in allgemeine Querschnittsnachweise, Stabilitätsnachweise, sowie Betriebsfestigkeitsuntersuchungen unterschieden.

#### a) Allgemeine Querschnitte

Bei den allgemeinen Querschnittsnachweisen werden zum einen die Normalspannungen infolge der zweiachsigen Biegung um die y- und z-Achse betrachtet, wie auch die Normalspannung durch die Drucknormalkraft. Neben den Normalspannungen treten auch Schubspannungen infolge der Querkräfte auf, welche nachgewiesen werden müssen. Ebenfalls mit in die Betrachtung gehen erhöhte lokale Spannungen im Träger, welche durch die punktuelle Belastung aus den Radlasten resultieren.

Durch das gleichzeitige Auftreten der Normal- und Schubspannungen müssen die sogenannten Vergleichspannungen ermittelt werden. Diese Vergleichspannungen werden durch das Fließkriterium nachgewiesen, welchen den Grenzzustand der Materialfestigkeit sichert.

#### b) Stabilitätsnachweise

Eine weitere Besonderheit, die durch die zweiachsige Biegung auftritt, ist das Biegedrillknicken. Dieses fällt in die Kategorie der Stabilitätsnachweise. Ebenfalls ein Nachweis dieser Kategorie ist ein mögliches Beulen des Steges. Wobei bei einem Standardträger in der Regel keine Beulgefahr droht.

#### c) Betriebsfestigkeitsuntersuchungen

Zur Betriebsfestigkeit gehört der Ermüdungsnachweis. Des Weiteren muss auch der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) untersucht werden. Dafür werden zuerst gesonderte Lastgruppen ermittelt, da sich die Sicherheitsbeiwerte von den Standardwerten unterscheiden.

#### 3.4.1 Querschnittswerte

Um die Nachweise führen zu können, werden die einzelnen Querschnittswerte des Trägers benötigt. Diese werden im Folgenden berechnet. Dabei ist die Schiene „schwimmend“ mit einer elastischen Schienenunterlage auf dem Träger aufgeschraubt und wird daher nicht zum tragenden Träger gerechnet. In Abbildung 12 ist der Kranbahntäger mit seinen Maßen dargestellt. Des Weiteren sind auch die einzelnen Fasern gekennzeichnet, welche im weiteren Verlauf betrachtet werden müssen.

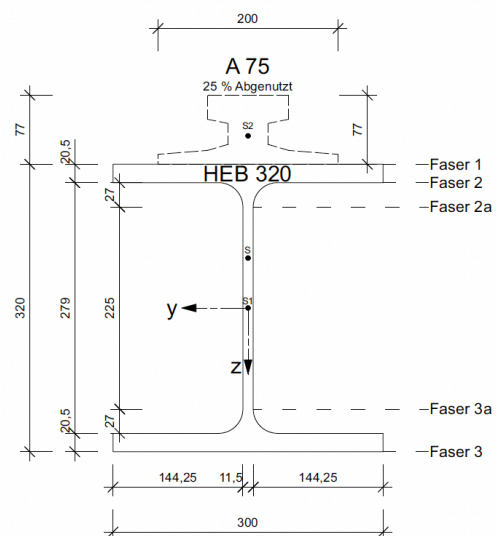


Abbildung 12: Kranbahntäger-Querschnitt

### Allgemeine Werte des HEB 320:

Fläche	$A =$	161,0 cm <sup>2</sup>
Trägheitsm.	$I_y =$	30820,0 cm <sup>4</sup>
Widerstandsm.	$W_{y,el} =$	1930,0 cm <sup>3</sup>
Schwerpkt.	$z_s =$	16,0 cm

### Widerstandsmomente:

Faser 1	$W_{y,1} =$	$-\frac{30820}{16} =$	- 1926,25 cm <sup>3</sup>
Faser 2	$W_{y,2} =$	$-\frac{30820}{13,95} =$	- 2209,32 cm <sup>3</sup>
Faser 2a	$W_{y,2a} =$	$-\frac{30820}{11,25} =$	- 2739,56 cm <sup>3</sup>
	$S_{y,2a} =$	$(30 \cdot 2,05) \cdot 14,975 + (1,15 \cdot 2,7) \cdot 12,6 =$	960,09 cm <sup>3</sup>
Schwerpunkt	$S_{y,max} =$	$960,09 + (1,15 \cdot 11,25) \cdot 5,625 =$	1032,86 cm <sup>3</sup>
Faser 3a	$W_{y,3a} =$	$- W_{y,2a} =$	2739,56 cm <sup>3</sup>
Faser 3	$W_{y,3} =$	$- W_{y,1} =$	1926,25 cm <sup>3</sup>

### Obergurtquerschnitt:

Fläche	$A_{Og} =$	$32 \cdot 2,05 + 5,58 \cdot 1,15 =$	72,02 cm <sup>2</sup>
Trägheitsm.	$I_{z,Og} =$	$\frac{2,05 \cdot 32^3}{12} + \frac{5,58 \cdot 1,15^3}{12} =$	5598,57 cm <sup>4</sup>
Widerstandsm.	$W_{z,Og} =$	$\frac{5598,57}{16,0} =$	349,91 cm <sup>3</sup>
Trägheitsradius	$i_{z,Og} =$	$\sqrt{\frac{I_{z,Og}}{A_{Og}}} = \sqrt{\frac{5598,57}{72,03}} =$	8,82 cm

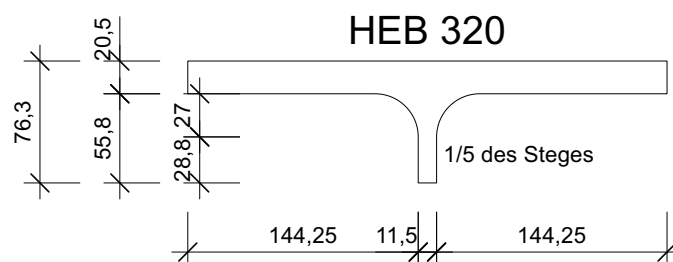


Abbildung 13: Obergurtquerschnitt

### 3.4.2 Nachweis des Querschnittes

Der allgemeine Spannungsnachweis wird nach DIN EN 1993-1-1, Abschnitt 6.2 geführt. Dabei werden die Einwirkungen als Normal- und Schubspannungen dem Bemessungswert der Beanspruchbarkeit gegenübergestellt.

Um den Bemessungswert der Beanspruchung ermitteln zu können, muss der Querschnitt zuerst in eine Querschnittsklasse eingeordnet werden. Diese gibt an, wie beulgefährdet der Querschnitt ist.

Falls der Träger nicht aus einem Standardprofil besteht, muss das  $c/t$ -Verhältnis bestimmt werden, um den Träger einer Querschnittsklasse zuzuordnen. Da der Kranbahnträger jedoch aus einem Standardprofil HEB 320 besteht, kann auch der Querschnitt mithilfe der Schneider Bautabellen schnell klassifiziert werden. So sind sowohl der Flansch als auch der Steg in die QK 1 einzuordnen.

Dies bedeutet, dass sowohl die Einwirkung als auch die Beanspruchung als plastisch angesehen werden darf und die Bemessung nach der Fließgelenktheorie durchgeführt wird.

Im Träger tritt neben den ermittelten zweiachsigen Biegungen zusätzlich noch eine Wölbkrafttorsion auf. Diese entsteht durch die außermittige horizontale Lasteinleitung zum Schubmittelpunkt am oberen Ende der Schiene.

Um die aufwändige Ermittlung des Wölbmomentes zu umgehen, darf auf der sicheren Seite liegend die Querbiegung  $M_z$  nur dem Obergurt  $A_{OG}$  zugeordnet werden. Dabei darf der Obergurt aus dem Flansch sowie  $1/5$  des Steges angenommen werden (dargestellt in Abbildung 13). Für die Hauptbiegung  $M_y$  wird weiterhin der ganze Querschnitt angesetzt.

Die auftretende Normalspannung kann somit mit nachfolgender Formel berechnet werden:

$$\sigma_{x,Ed1} = M_y / W_{y1} + M_z / W_{z,OG} + N / A$$

Zwar treten die größten Biegemomente an unterschiedlichen Stellen am Träger auf, jedoch wird vereinfacht und auf der sicheren Seite liegend das Maximum beider Biegungen an derselben Stelle angenommen.

Da die Normalspannungen durch die Biegung am Rande des Trägers am größten sind, wird der Normalspannungsnachweis an der Faser 1 geführt. Dagegentreten vereinfacht die Schubspannungen aus der Querkraft erst unterhalb des Flansches auf und erreichen ihren maximalen Wert im Schubmittelpunkt. Deshalb muss der Schubspannungsnachweis im Schubmittelpunkt geführt werden. An dieser Stelle gehen die Normalspannungen gegen Null. Die auftretende Schubspannung kann mit nachfolgender Formel berechnet werden:

$$\tau_{xz,Ed} = \frac{V_{z,d} \cdot S_y}{I_y \cdot t}$$

Beim Nachweis werden nun die Spannungen mit dem Materialwert der oberen Streckgrenze verglichen. Dieser lässt sich mit folgender Formel bestimmen:

$$f_{y,d} = f_{y,k} / \gamma_{Mi}$$

Dabei ist  $\gamma_{Mi} = \gamma_{M0} = 1,0$  bei Beanspruchungen von Querschnitten in ständigen und vorübergehenden Bemessungssituationen zu setzen. Der Kranträger besteht aus einem HEB 320 Stahlprofil der Güte S 235 und somit beträgt die Streckgrenze  $f_{y,k} = 235 \text{ N/mm}^2$ . Da nicht klar zu erkennen ist, welcher Nachweis ausschlaggebend ist, muss der Nachweis für beide Einwirkungskombinationen geführt werden.

#### Einwirkungskombination 1:

- Faser 1:

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Ed1} &= \frac{M_y}{W_{y1}} + \frac{M_z}{W_{z,OG}} + \frac{N}{A} \\ &= \frac{17333}{1926,25} + \frac{1434}{349,91} + \frac{3,65}{161} \\ &= 9,00 + 4,10 + 0,02 = 13,12 \text{ kN/cm}^2 < 23,5 \text{ kN/cm}^2 \quad \eta = 56 \%\end{aligned}$$

- Schwerpunkt:

$$\begin{aligned}\tau_{Ed} &= \frac{157,64 \cdot 1032,86}{30820 \cdot 1,15} = 4,59 \text{ kN/cm}^2 < \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{23,5}{1 \cdot \sqrt{3}} = 13,57 \text{ kN/cm}^2 \\ &\quad \eta = 34 \%\end{aligned}$$

#### Einwirkungskombination 5:

- Faser 1:

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Ed1} &= \frac{15498}{1926,25} + \frac{3698}{349,91} + \frac{0,00}{161,8} \\ &= 8,05 + 10,57 + 0,00 = 18,62 \text{ kN/cm}^2 < 23,5 \text{ kN/cm}^2 \quad \eta = 79 \%\end{aligned}$$

- Schwerpunkt:

$$\begin{aligned}\tau_{Ed} &= \frac{132,08 \cdot 1032,86}{30820 \cdot 1,15} = 3,85 \text{ kN/cm}^2 < 13,57 \text{ kN/cm}^2 \quad \eta = 28 \%\end{aligned}$$

Somit sind für beide Einwirkungskombinationen die Spannungsnachweise erfüllt.

### 3.4.3 Nachweis lokale Spannungen infolge Radlasten

Infolge der lokalen Radlasten muss der Punkt am Beginn der Abrundung nachgewiesen werden (Faser 2a). Um kritische Punkte nachzuweisen, bei denen mehrere Spannungen gleichzeitig wirken, wird nach DIN 1993-1-1 folgende Formel verwendet, um die Vergleichsspannung zu ermitteln:

$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_{y/\gamma_{M0}}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_{y/\gamma_{M0}}} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_{y/\gamma_{M0}}} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_{y/\gamma_{M0}}} \right) + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_{y/\gamma_{M0}}} \right)^2 \leq 1 \quad \text{DIN 1993-1-1 (6.1)}$$

Die Druckspannungen infolge Radlasten werden mit nachstehender Formel für Walzprofile errechnet:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{(l_{eff} + 2r) \cdot t_w} \quad \text{DIN 1993-6 (5.7.1)}$$

Diese konstante Druckspannung darf als Vereinfachung über die Lastverteilungsbreite  $l_{eff}$  angenommen werden. Die zugehörige Schubspannung darf mit 20% der Druckspannung angenommen werden:

$$\tau_{oxz,Ed} = 0,2 \cdot \sigma_{oz,Ed} \quad \text{DIN 1993-6 (5.7.2)}$$

Dabei muss, um  $I_{eff}$  zu ermitteln, unterschieden werden, ob die Kranschiene schubstarr am Flansch, nicht schubstarr am Flansch oder wie in diesem Fall, auf einer mindestens 6 mm dicken Elastomerunterlage befestigt wurde:

$$I_{eff} = 4,25 \cdot \left( \frac{I_r + I_{f,eff}}{t_w} \right)^{1/3} \quad \text{DIN 1993-6 (Tabelle 5.1)}$$

Da die Lastverteilungsbreite nur abhängig von dem gewählten Querschnitt ist, kann diese für alle Lastgruppen bestimmt werden.

$$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f < b \quad \rightarrow b_{fr} \text{ und } h_r \text{ sind Werte der Kranschiene}$$

$$b_{eff} = 20 + 7,7 + 2,05 = 29,75 \text{ cm} < 32 \text{ cm}$$

$$I_{f,eff} = \frac{b_{eff} \cdot t_f^3}{12} = \frac{29,75 \cdot 2,05^3}{12} = 21,36 \text{ cm}^4$$

$$I_r = 401 \text{ cm}^4$$

$$I_{eff} = 4,25 \cdot \left( \frac{401 + 21,36}{1,15} \right)^{1/3} = 30,44 \text{ cm}$$

$I_r$  ist dabei das Trägheitsmoment der 25% abgenutzten Schiene um dessen horizontale Schwerelinie. Dieser Wert kann aus einschlägigen Tabellen entnommen werden.

Die Spannungen selbst müssen nun wieder lastgruppenabhängig bestimmt werden. Dafür wird die jeweils größte auftretende Einzelradlast verwendet.

Da sich die lokalen Spannungen zwischen dem äußeren Rand und des Schwerpunktes des Querschnittes befinden, müssen hier die entsprechenden auftretenden Normal- und Schubspannungen bestimmt werden, welche nun kleiner als vorherige sein müssen.

#### Einwirkungskombination 1:

$$F_{z,ED} = 1,35 \cdot 83,69 = 112,98 \text{ kN}$$

- Faser 2a:

#### lokale Normal- und Schubspannungen:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{112,98}{(30,44 + 2 \cdot 2,7) \cdot 1,15} = 2,74 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{oxz,Ed} = 0,2 \cdot 2,74 = 0,55 \text{ kN/cm}^2$$

#### Normalspannungen:

$$\sigma_{x,Ed2a} = \frac{M_y}{W_{y,2a}} = \frac{17333}{-2739,56} = -6,33 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{oz,Ed} = 2,74 \text{ kN/cm}^2$$

#### Schubspannungen:

$$\tau_{Ed2} = \frac{V_{z,d} \cdot S_y}{I_y \cdot t} = \frac{157,64 \cdot 960,09}{30820 \cdot 1,15} = 4,27 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{oxz,Ed} = 0,55 \text{ kN/cm}^2$$

### Vergleichspannung:

$$\sigma_{v,d} = \sqrt{\sigma_{x,Ed2a}^2 + \sigma_{oz,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed2a} \cdot \sigma_{oz,Ed} + 3 \cdot (\tau_{Ed2} + \tau_{oxz,Ed})^2}$$

$$= \sqrt{6,33^2 + 2,74^2 + 6,33 \cdot 2,74 + 3 \cdot (4,27 + 0,55)^2} = 11,60 \text{ kN/cm}^2$$

### Nachweis:

$$\eta = \sigma_v / f_{yd} = 11,60 / 23,5 = 0,49 < 1,0 \quad \eta = 49 \%$$

In Abbildung 14 sind die ermittelten maximal auftretenden Spannungen mit ihren Verläufen für die Einwirkungskombination 1 dargestellt.

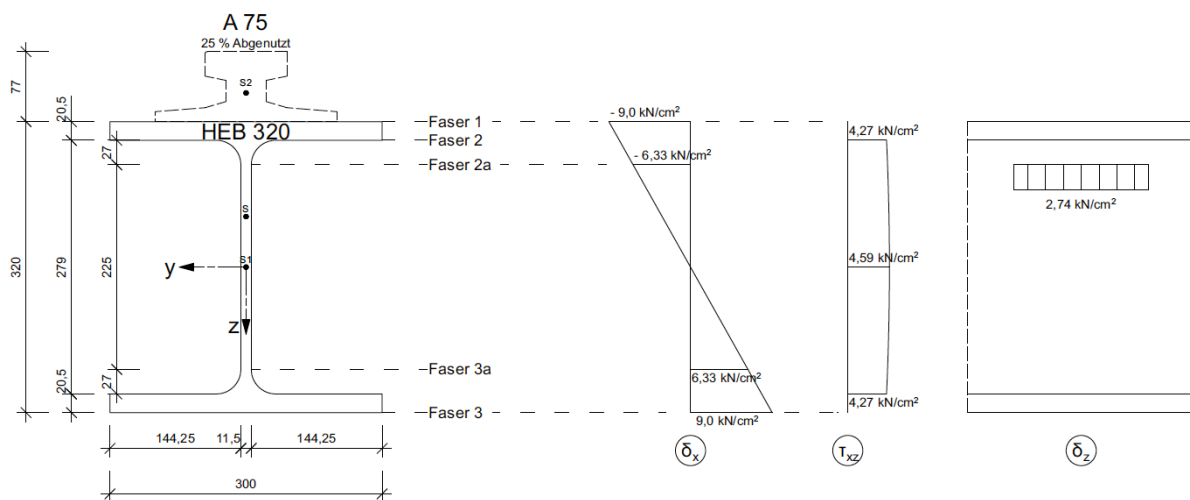


Abbildung 14: Spannungsverteilung EK 1

### Einwirkungskombination 5:

$$F_{z,ED} = 1,35 \cdot 74,5 = 100,58 \text{ kN}$$

- Faser 2a:

#### lokale Normal- und Schubspannungen:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{100,58}{(30,44 + 2 \cdot 2,7) \cdot 1,15} = 2,44 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{oxz,Ed} = 0,2 \cdot 2,44 = 0,49 \text{ kN/cm}^2$$

#### Normalspannungen:

$$\sigma_{x,Ed2a} = \frac{M_y}{W_{y3}} = \frac{15498}{-2739,56} = -5,66 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{oz,Ed} = 2,44 \text{ kN/cm}^2$$

#### Schubspannungen:

$$\tau_{Ed2} = \frac{V_{z,d} \cdot S_y}{I_y \cdot t} = \frac{132,08 \cdot 960,09}{30820 \cdot 1,15} = 3,58 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{oxz,Ed} = 0,49 \text{ kN/cm}^2$$

### Vergleichspannung:

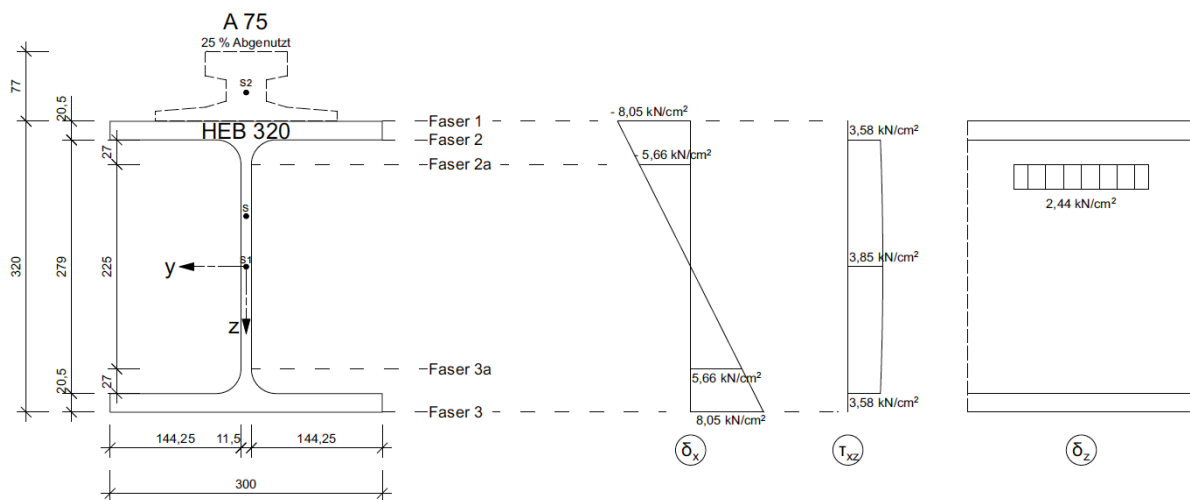
$$\sigma_{v,d} = \sqrt{\sigma_{x,Ed2a}^2 + \sigma_{oz,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed2a} \cdot \sigma_{oz,Ed} + 3 \cdot (\tau_{Ed2} + \tau_{oxz,Ed})^2}$$

$$= \sqrt{5,66^2 + 2,44^2 + 5,66 \cdot 2,44 + 3 \cdot (3,58 + 0,49)^2} = 10,07 \text{ kN/cm}^2$$

### Nachweis:

$$\eta = \sigma_v / f_{yd} = 10,07 / 23,5 = 0,43 < 1,0$$

$$\eta = 43 \%$$



**Abbildung 15: Spannungsverteilung EK 5**

In Abbildung 15 sind die ermittelten maximal auftretenden Spannungen mit ihren Verläufen für die Einwirkungskombination 5 dargestellt.

Somit sind alle allgemeinen Querschnittsnachweise eingehalten und die Stabilitätsnachweise können geführt werden.

### 3.4.4 Biegedrillknicknachweis

Das Biegedrillknicken ist ein globales Stabilitätsversagen, bei dem der Träger in der Biegedruckseite ausweicht und sich um den Schubmittelpunkt verdreht. Es entsteht durch das Auftreten einer Biegung um die y-Achse und wird durch die außermittige Lastenleitung in der z-Achse verstärkt.

Dagegen liegt zum Vergleich bei einer Drucknormalkraft nur das Biegeknicken vor. Zur besseren Verdeutlichung sind in Abbildung 16 sowohl das Biegeknicken als auch das Biegedrillknicken dargestellt.

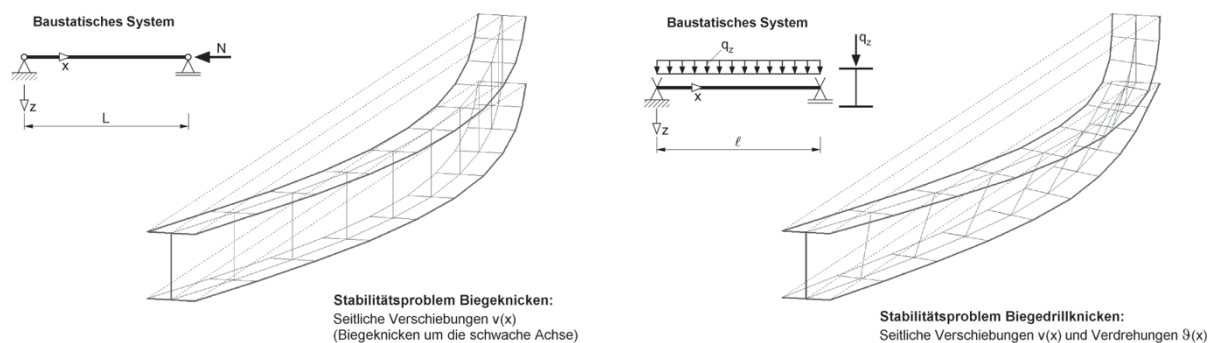


Abbildung 16: Biegeknicken und Biegedrillknicken [9] ST.1

Es gibt drei Möglichkeiten, den Nachweis gegen das Biegedrillknicken zu führen. Zum ersten als Schnittgrößennachweis mit Wölbkrafttorsion nach Theorie II. Ordnung (DIN 1993-1-1/5.3).

Die zweite Möglichkeit ist ein vereinfachtes Ersatzstabverfahren für Walzprofile im Anhang A der DIN 1993-6 extra für Kranbahnträger.

Die dritte und letzte Möglichkeit ist der Knicknachweis des Obergurts im Ersatzstabverfahren. Nachfolgend wird der Biegedrillknicknachweis in diesem Verfahren geführt.

Der Nachweis ist wie folgt zu erbringen:

$$\frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{W_{Og,z} \cdot f_y} \leq 1$$

Dabei wird zuerst das Biegemoment  $M_{y,Ed}$  in eine Gurtdruckkraft  $N_{Og,Ed}$  mit nachstehender Formel umgerechnet:

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h - t_f}$$

Das Biegemoment in  $M_{z,Ed}$  wird, genauso wie in den vorangegangenen Nachweisen, allein dem Obergurt zugewiesen. In diesem Fall dürfen dann die Torsionsmomente vernachlässigt werden.

Wie in der Formel zu erkennen ist, wird ein Abminderungsfaktor  $\chi_z$  benötigt.

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}}$$



Hierfür wird der bezogene Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_z$  sowie der Beiwert  $\Phi$  benötigt. Um diese zu berechnen, wird die Knicklänge des Ersatzdruckstabes ermittelt. Da es sich um einen Mehrfeldträger mit gleichen Feldlängen handelt ist die Knicklänge mit folgender Formel zu berechnen:

$$L_{cr} = 0,85 \cdot l = 0,85 \cdot 6,0 = 5,1 \text{ m}$$

Die weiteren Werte, um den Abminderungsfaktor zu berechnen, sind von dem gewählten Querschnitt abhängig, wie z.B. der Trägheitsradius  $i_{z,og} = 8,82 \text{ cm}$ , welcher in 3.4.1 Querschnittswerte berechnet wurde. Des Weiteren wird mit Hilfe der Stahlgüte und der Elastizitätsmodul der Schlankheitsgrad  $\lambda_1$  berechnet.

Nun muss der Träger einer Knicklinie zugeordnet werden. Dafür wird in der DIN 1993-1-1 die Tabelle 6.2 zur Verfügung gestellt. Diese beinhaltet die möglichen auftretenden Querschnitte. In Tabelle 8 ist der relevante Ausschnitt für das HEB-320 Profil dargestellt.

Querschnitt		Begrenzungen		Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knicklinie	
					S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
gewalzte I-Querschnitte		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a b	a <sub>0</sub> a <sub>0</sub>
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d	c c

Tabelle 8: Auswahl der Knicklinie eines Querschnitts [17] DIN 1993-1-1

Gemäß dieser Tabelle wird der Querschnitt der Knicklinie c zugeordnet. Daraus resultiert ein Imperfektionsbeiwert nach Tabelle 9 von  $\alpha = 0,49$ .

Knicklinie	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabelle 9: Imperfektionsbeiwert der Knicklinien [17] DIN 1993-1-1

Mit diesen Werten kann nun der Abminderungsfaktor berechnet werden.

Abminderungsfaktor  $\chi_z$

Knicklinie b  $\rightarrow \alpha = 0,49$

$L_{cr} = 5,1 \text{ m}$

Stahl S235  $\rightarrow \lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{f_y}{235}} = 93,9$

$i_{z,og} = 8,82 \text{ cm}$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,og} \cdot \lambda_1} = \frac{510}{8,82 \cdot 93,9} = 0,62$$

$$\begin{aligned}\Phi &= 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] \\ \Phi &= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,62 - 0,2) + 0,62^2] = 0,79 \\ \chi_z &= \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,79 + \sqrt{0,79^2 - 0,62^2}} = 0,78 < 1,0\end{aligned}$$

Des Weiteren wird ein Interaktionsbeiwert  $k_{zz}$  benötigt. Dieser ist jedoch von der auftretenden Gurtdruckkraft abhängig und muss für jede Einwirkungskombination bestimmt werden.

Anschließend kann der Nachweis für die maßgebenden Einwirkungskombinationen geführt werden.

#### Einwirkungskombination 1

$$N_{Og,Ed} = \frac{17333}{32 - 2,05} = 578,73 \text{ kN} \quad M_{z,Ed} = 1434 \text{ kNcm}$$

Interaktionsbeiwert  $k_{zz}$  für QK 1+2:

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left( 1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Og,Ed}}{N_{Og,Rd}} \right)$$

Dabei ist  $C_{mz} = 0,9$  für QKL 1 bis 3

$$N_{Og,Rd} = \frac{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,78 \cdot 72,02 \cdot 23,5}{1,1} = 1201,65 \text{ kN}$$

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left( 1 + (2 \cdot 0,62 - 0,6) \cdot \frac{578,73}{1201,65} \right) = 1,18$$

$$k_{zz} \leq C_{mz} \cdot \left( 1 + 1,14 \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right)$$

$$1,18 \leq 1,52 = 0,9 \cdot \left( 1 + 1,44 \cdot \frac{578,73}{1201,65} \right)$$

Nachweis:

$$\frac{578,73}{1201,65} + \frac{1,18 \cdot 1434 \cdot 1,1}{349,91 \cdot 23,5} = 0,71 \leq 1,0 \quad \eta = 71 \%$$

#### Einwirkungskombination 5

$$N_{Og,Ed} = \frac{15498}{32 - 2,05} = 517,46 \text{ kN} \quad M_{z,Ed} = 3698 \text{ kNcm}$$

Interaktionsbeiwert  $k_{zz}$  für QK 1+2:

$$N_{Og,Rd} = 1201,65 \text{ kN}$$

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left( 1 + (2 \cdot 0,62 - 0,6) \cdot \frac{517,46}{1201,65} \right) = 1,15$$

$$1,15 \leq 1,46 = 0,9 \cdot \left( 1 + 1,44 \cdot \frac{517,46}{1201,65} \right)$$

Nachweis:

$$\frac{517,46}{1201,65} + \frac{1,15 \cdot 3698 \cdot 1,1}{349,91 \cdot 23,5} = 1,0 \leq 1,0 \quad \eta = 100 \%$$

Da der Nachweis i.d.R. auf der sicheren Seite liegt ist eine Ausnutzung von 100% hinnehmbar.

### 3.4.5 Beulnachweis des Stegblechs unter der Radlast

Ein weiterer erforderlicher Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist der Beulnachweis für das Stegblech unter der Radlast. Dabei muss der Nachweis für eine einzelne Radlast (Fall I) sowie für die Summe beider Radlasten geführt werden (Fall II).

Zwar ist bei Walzprofilen ein Stegbeulen unter der Radlast in der Regel unkritisch, trotzdem wird der Nachweis im Folgenden geführt.

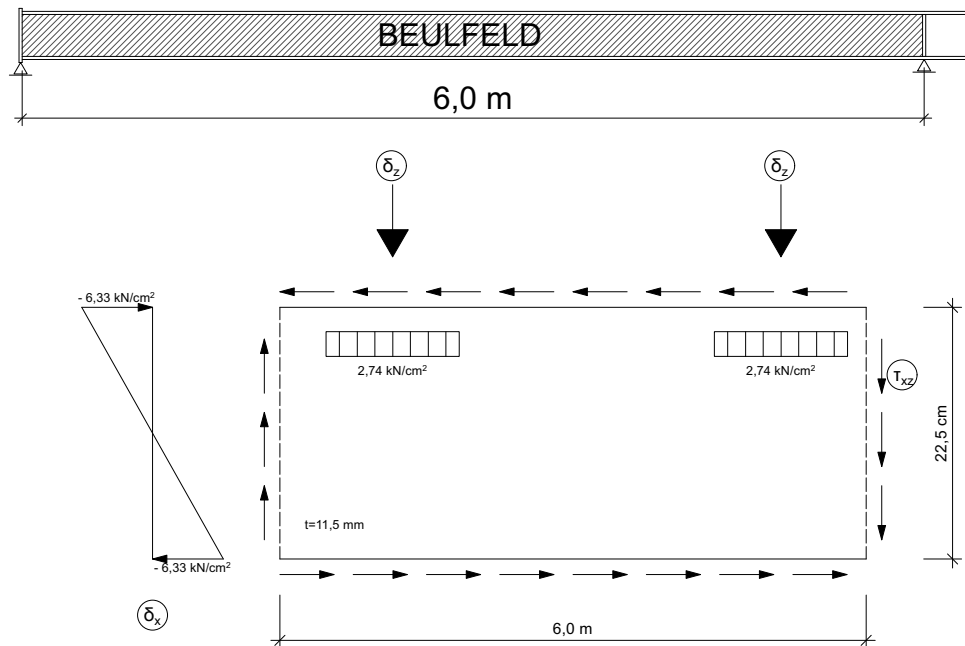


Abbildung 17: Skizze Beulfeld und Belastungen nach EK 1

In der Abbildung 17 werden das Beulfeld sowie die auftretenden Spannungen der Einwirkungskombination 1 dargestellt. Da sich am Anfang und am Ende des Trägers eine Kopfplatte zur Verbindung des nächsten Trägers befindet sowie über dem Auflager eine Steife eingefügt wird, spannt das Beulfeld von Lager zu Lager, also 6,0 m.

Bei dem Nachweis müssen nicht nur die Biegenormal- und Schubspannungen berücksichtigt werden, welche bereits in „3.4.2 Nachweis des Querschnittes“ nachgewiesen worden sind, sondern auch die lokalen senkrechten Druckspannungen  $\sigma_{oz,Ed}$ , welche aus der Radlasteinleitung resultieren.

Dabei wird der Nachweis nach DIN 1993-1-5, Kapitel 6, geführt. Hierzu wird als Erstes die Länge der starren Lasteinleitung  $s_s$  für die Fälle I und II bestimmt. Danach muss der Beulwert  $k_F$  bestimmt werden, welcher abhängig von der Lasteinleitung ist. Nun kann mit Hilfe der kritischen Beullast und weiteren Hilfsparametern der Beulnachweis geführt werden.

Da sowohl die größte Radlast als auch das größte Biegemoment in der Einwirkungskombination 1 auftritt, ist der Nachweis nur für diese Kombination erforderlich.

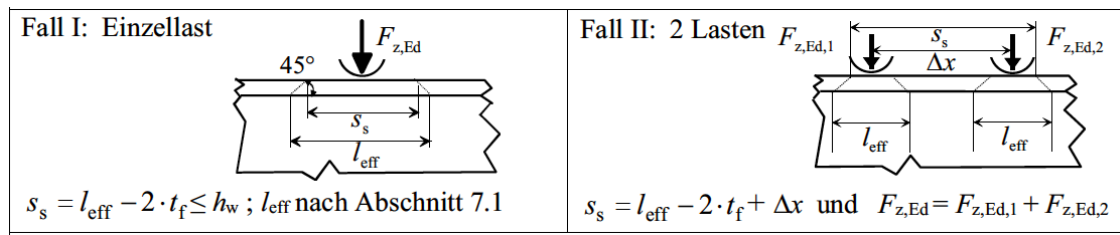


Abbildung 18: Darstellung der Lasteinleitung  $s_s$  [6] SBT

#### Fall I: Einzelradlast

$$F_{z,\text{ED}} = 1,35 \cdot 83,69 = 112,98 \text{ kN}$$

#### Berechnung $s_s$

Wie in Abbildung 18 dargestellt wird dafür  $l_{\text{eff}}$  benötigt, welche bereits in Abschnitt 3.4.3 mit  $l_{\text{eff}} = 30,44 \text{ cm}$  berechnet wurde.

$$s_s = 30,44 - 2 \cdot 2,05 = 26,34 \text{ cm} \leq 22,5 \text{ cm} \quad \rightarrow s_s = 22,5 \text{ cm}$$

#### Bestimmung $k_F$

Nach DIN EN 1993-1-5 werden drei unterschiedliche Lasteinleitungsmöglichkeiten unterschieden, dargestellt in Abbildung 19. Im vorliegenden Fall wird die Last über einen Flansch eingeleitet, also Typ (a).

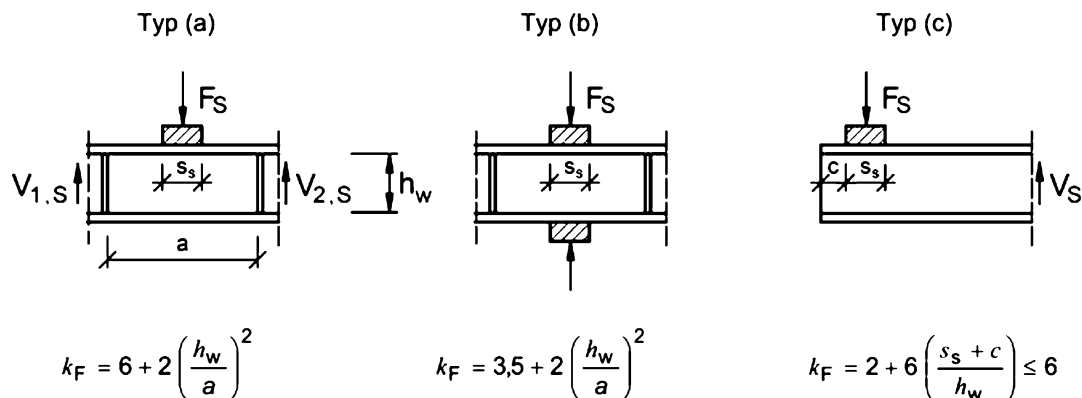


Abbildung 19: Beulwerte für verschiedene Lasteinleitung [18] DIN 1993-1-5

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left( \frac{22,5}{600} \right)^2 = 6,0$$

#### Hilfsparameter

Kritische Beullast:

$$F_{\text{cr}} = 0,9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w}$$

$$= 0,9 \cdot 6 \cdot 21000 \cdot \frac{1,15^3}{22,5} = 7665,21 \text{ kN}$$

Hilfswerte:

$$m_1 = \frac{b}{t_w} = \frac{32}{1,15} = 27,83$$

$$m_{2a} = 0,02 \cdot \left( \frac{h_w}{t_f} \right)^2 = 0,02 \cdot \left( \frac{22,5}{2,05} \right)^2 = 2,41$$

$$m_{2b} = 0$$

Länge:

$$l_{ya} = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_{2a}})$$

$$= 22,5 + 2 \cdot 2,05 \cdot (1 + \sqrt{27,83 + 2,41}) = 49,15 \text{ cm}$$

$$l_{yb} = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_{2b}})$$

$$= 22,5 + 2 \cdot 2,05 \cdot (1 + \sqrt{27,83 + 0}) = 48,23 \text{ cm}$$

Quetschgrenze:

$$F_{ya} = f_y \cdot t_w \cdot l_{ya} = 23,5 \cdot 1,15 \cdot 49,15 = 1328,28 \text{ kN}$$

$$F_{yb} = f_y \cdot t_w \cdot l_{yb} = 23,5 \cdot 1,15 \cdot 48,23 = 1303,42 \text{ kN}$$

Schlankheitswert:

$$\bar{\lambda}_a = \sqrt{\frac{F_{ya}}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{1328,28}{7665,21}} = 0,42$$

$$\bar{\lambda}_b = \sqrt{\frac{F_{yb}}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{1303,42}{7665,21}} = 0,41$$

Für  $\bar{\lambda}_a < 0,5 \rightarrow \bar{\lambda} = \bar{\lambda}_b$  und  $l_y = l_{yb}$

Abminderungsfaktor

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}} = \frac{0,5}{0,41} = 1,22 \leq 1,0$$

Es wird mit  $\chi_F = 1,0$  weiter gerechnet, da keine Abminderung möglich ist.

Wirksame Länge

$$L_{eff} = \chi_F \cdot l_y = 1,0 \cdot 48,23 = 48,23 \text{ cm}$$

**Beulnachweis Lasteinleitungsspannungen**

$$\eta_2 = \frac{F_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot L_{eff} \cdot t_w} = \frac{112,98 \cdot 1,1}{23,5 \cdot 48,23 \cdot 1,15} = 0,10 \leq 1,0 \quad \eta_2 = 10 \%$$

Damit ist eine rippenlose Krafteinleitung nachgewiesen.

**Interaktion Beulen infolge Lasteinleitungssp. und Biegenormalsp.**

$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{f_y \cdot W_{y,eff}} = \frac{17333 \cdot 1,0}{23,5 \cdot 1930} = 0,38$$

Für QK 1 – 3:  $W_{y,eff} = W_{y,el}$

**Nachweis**

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 \leq 1,4 \quad = 0,1 + 0,8 \cdot 0,38 = 0,40 \leq 1,4 \quad \eta = 29 \%$$

Fall II: 2 Lasten

$$F_{z,ED,1} = F_{z,ED,2} = 1,35 \cdot 83,69 = 112,98 \text{ kN}$$

$$F_{z,ED} = F_{z,ED,1} + F_{z,ED,2} = 225,96 \text{ kN}$$

Berechnung  $s_s$

$$s_s = 30,44 - 2 \cdot 2,05 + 270 = 296,34 \text{ cm}$$

### Bestimmung $k_F$

$$k_F = 6,0$$

### Hilfsparameter

Kritische Beullast:

$$F_{cr} = 7665,21 \text{ kN}$$

Hilfswerte:

$$m_1 = 27,83$$

$$m_{2a} = 2,41$$

$$m_{2b} = 0$$

Länge:

$$\begin{aligned} l_{ya} &= s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_{2a}}) \\ &= 296,34 + 2 \cdot 2,05 \cdot (1 + \sqrt{27,83 + 2,41}) = 322,99 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{yb} &= s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_{2b}}) \\ &= 296,34 + 2 \cdot 2,05 \cdot (1 + \sqrt{27,83 + 0}) = 322,07 \text{ cm} \end{aligned}$$

Quetschgrenze:

$$F_{ya} = f_y \cdot t_w \cdot l_{ya} = 23,5 \cdot 1,15 \cdot 322,99 = 8728,80 \text{ kN}$$

$$F_{yb} = f_y \cdot t_w \cdot l_{yb} = 23,5 \cdot 1,15 \cdot 322,07 = 8703,92 \text{ kN}$$

Schlankheitswert:

$$\bar{\lambda}_a = \sqrt{\frac{F_{ya}}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{8728,80}{7665,21}} = 1,07$$

$$\bar{\lambda}_b = \sqrt{\frac{F_{yb}}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{8703,92}{7665,21}} = 1,07$$

Für  $\bar{\lambda}_a > 0,5 \rightarrow \bar{\lambda} = \bar{\lambda}_a$  und  $l_y = l_{ya}$

### Abminderungsfaktor

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}} = \frac{0,5}{1,07} = 0,47 \leq 1,0$$

### Wirksame Länge

$$L_{eff} = \chi_F \cdot l_y = 0,47 \cdot 322,99 = 151,81 \text{ cm}$$

### Beulnachweis Lasteinleitungsspannungen

$$\eta_2 = \frac{F_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{f_y \cdot L_{eff} \cdot t_w} = \frac{225,96 \cdot 1,1}{23,5 \cdot 151,81 \cdot 1,15} = 0,06 \leq 1,0 \quad \eta_2 = 6 \%$$

### Interaktion Beulen infolge Lasteinleitungssp. und Biegnormalsp.

$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{f_y \cdot W_{y,eff}} = \frac{17333 \cdot 1,0}{23,5 \cdot 1930} = 0,38$$

Für QK 1 – 3:  $W_{y,eff} = W_{y,el}$

### Nachweis

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 \leq 1,4 \quad = 0,06 + 0,8 \cdot 0,38 = 0,36 \leq 1,4 \quad \eta = 26 \%$$

Nachdem für beide Fälle die Nachweise eingehalten werden, muss überprüft werden, ob ein Flanschinduziertes Stegblechbeulen vorliegt. Dabei wird der Druckflansch in den Steg gedrückt. Um das zu verhindern ist nach DIN EN 1993-1-5 Kapitel 8 folgendes Kriterium zu erfüllen:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_{yf}} \cdot \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

$$A_w = h_w \cdot t_w = 22,5 \cdot 1,15 = 25,9 \text{ cm}^2 \quad \rightarrow \text{Stegfläche}$$

$$A_{fc} = b \cdot t_f = 32 \cdot 2,05 = 65,6 \text{ cm}^2 \quad \rightarrow \text{eff. Fläche des Druckflansches}$$

$$k = 0,4 \quad \rightarrow \text{bei Ausnutzung des pl. Momentes}$$

$$\frac{22,5}{1,15} = 19,57 \leq 231,97 = 0,4 \cdot \frac{21000}{23,5} \cdot \sqrt{\frac{25,9}{61,5}} \quad \checkmark$$

### 3.4.6 Schweißnähte

Zwar wird in diesem Beispiel die Kranschiene mit Hilfe von Schrauben auf dem Träger befestigt, trotzdem treten in der Konstruktion Schweißnähte auf, die überprüft werden müssen. So werden die Zweifeldträger mit Stirnplatten an den nächsten Träger gestoßen, welche angeschweißt werden. Auch wird der Träger oberhalb der Stütze mit Aussteifungsblechen verstärkt.

Die Schweißnaht zwischen Stirnplatte und Trägersteg wird im Folgenden exemplarisch berechnet.

Dabei ist die auftretende Querkraft die von der Schweißnaht übertragen wird:

$$V_{Ed} = 122,27 \text{ kN}$$

Die Beanspruchbarkeit von Schweißnähten wird mit folgender Formel berechnet:

$$\sigma_{w,Rd} = f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{36}{\sqrt{3} \cdot 0,8 \cdot 1,25} = 20,78 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{DIN 1993-1-8}$$

Die Länge der Schweißnaht:

$$l_{eff} = 2 \cdot h_w = 2 \cdot 22,5 = 45 \text{ cm}$$

Die auftretende Spannung und daraus erf. Schweißnaht:

$$\tau_{\parallel,Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w} \leq \sigma_{w,Rd}$$

$$\rightarrow a_w \geq \frac{V_{Ed}}{l_{eff} \cdot \sigma_{w,Rd}} = \frac{123}{45 \cdot 20,78} = 1,3 \text{ mm}$$

$$\min a_w = \max \{3 \text{ mm}; \sqrt{\max t} - 0,5\} = \sqrt{30} - 0,5 = 5 \text{ mm}$$

gewählte Schweißnaht:  $a_w = 7 \text{ mm}$

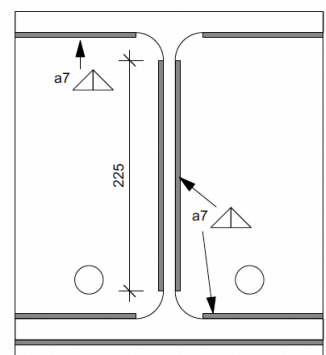


Abbildung 20: Schweißnähte an Stirnplatte

### 3.4.7 Nachweis der Durchbiegung (GZG)

Bei den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden die Verformungsbegrenzungen nachgewiesen. Sowohl die vertikalen als auch die horizontalen Durchbiegungen müssen betrachtet werden. Dabei muss erwähnt werden, dass die Verformungsbegrenzungen nach DIN EN 1993-6 eine Empfehlung sind, um einen verschleißarmen und störungsfreien

Kranbetrieb zu ermöglichen. Die vertikale Durchbiegung sollte kleiner als  $l/600$  und kleiner als 25 mm sein. Die horizontale Durchbiegung sollte  $l/600$  ebenfalls nicht überschreiten. Die Nachweise werden zwar empfohlen, sind aber nicht zwingend einzuhalten. Dabei sollte unbedingt eine Absprache mit dem Auftraggeber bzw. Kranhersteller gemacht werden.

Neben diesen „Standard“-Nachweisen der Durchbiegung sollte auch der Unterschied der vertikalen Verformungen zusammengehörender Kranbahnträger betrachtet werden, um eine Neigung des Kranes zu verhindern. Diese darf nicht größer als  $s/600$  oder 1 cm sein. Des Weiteren soll eine übermäßige Tragwerksschwingung durch seitliche Verschiebungen verhindert werden.

Wie bereits oben erwähnt, müssen für den Nachweis im GZG neue Einwirkungsgruppen unter Ansatz der Schwingbeiwerte  $\varphi_i = 1,0$  erstellt werden.

#### Lastgruppe 12:

Vertikallasten:	$\gamma_G = 1,0$ (veränderlich, ungünstig)	$V_K = Q_c \cdot \varphi_1 + Q_h \cdot \varphi_2$ $V_K = 16,4 \cdot 1,0 + 58,1 \cdot 1,0 = 74,5 \text{ kN}$
Horizontallasten:	$\gamma_G = 1,0$ (veränderlich, ungünstig)	$N_k = H_L \cdot \varphi_5 = 1,80 \cdot 1,0 = 1,80 \text{ kN}$ $H_{T,k} = H_T \cdot \varphi_5 = 5,70 \cdot 1,0 = 5,70 \text{ kN}$

#### Lastgruppe 13:

Vertikallasten:	$\gamma_G = 1,0$ (veränderlich, ungünstig)	$V_K = Q_c \cdot \varphi_4 + Q_h \cdot \varphi_4$ $V_K = 16,4 \cdot 1,0 + 58,1 \cdot 1,0 = 74,5 \text{ kN}$
Horizontallasten:	$\gamma_G = 1,0$ (veränderlich, ungünstig)	$N_k = H_L \cdot 0 = 0 \text{ kN}$ $H_s = H_s \cdot 1,0 = 22,10 \cdot 1,0 = 22,10 \text{ kN}$

Die vertikale Durchbiegung kann nach den Schneider Bautabellen mit folgender Formel berechnet werden:

$$\delta_z = \frac{\gamma \cdot F \cdot l^3}{100 \cdot E \cdot I_y} + \beta \cdot \frac{g \cdot l^4}{E \cdot I_y}$$

Dabei kann der Beiwert  $\gamma$  aus der Tabelle 10 entnommen werden. Der Beiwert  $\beta$  ist für Zweifeldträger mit 0,0054 anzusetzen.

$$\frac{a}{l} = \frac{2,7}{6} = 0,45 \quad \rightarrow \gamma = 2,15$$

Die horizontale Durchbiegung kann mit nachstehender Formel bestimmt werden.

$$\delta_y = \frac{\gamma \cdot H \cdot l^3}{100 \cdot E \cdot I_{z,0g}}$$

Wobei hierbei  $\gamma = 1,50$  bei Zwei- oder Mehrfeldträger zu wählen ist.

$a / l$	Einfeld- träger $\gamma$	Zweifeld- träger $\gamma$
0,35	3,49	2,46
0,40	3,30	2,31
0,45	3,09	2,15
0,50	2,86	1,98
0,55	2,62	1,80
0,60	2,37	1,62
0,65	2,10	1,42 *)

Tabelle 10: Beiwerte Durchbiegung Kranbahn [6] SBT



### Lastgruppe 12

vertikale Durchbiegung

$$\delta_z = \frac{2,15 \cdot 74,5 \cdot 600^3}{100 \cdot 21000 \cdot 30820} + 0,0054 \cdot \frac{0,0183 \cdot 600^4}{21000 \cdot 30820}$$

$$\delta_z = 0,53 + 0,02 = 0,6 \text{ cm} \leq 2,5 \text{ cm} \quad \checkmark \quad \eta = 24 \%$$

$$\delta_z = \frac{l}{1091} < \frac{l}{600} = \delta_{\text{grenz}} \quad \checkmark \quad \eta = 55 \%$$

horizontale Durchbiegung

$$\delta_y = \frac{1,5 \cdot 5,70 \cdot 600^3}{100 \cdot 21000 \cdot 5598,57} = 0,16 \text{ cm}$$

$$\delta_y = \frac{l}{3750} < \frac{l}{600} = \delta_{\text{grenz}} \quad \checkmark \quad \eta = 16 \%$$

$$\Delta s = 2 \cdot 0,16 = 0,32 \text{ cm} \leq 1 \text{ cm} \quad \checkmark \quad \eta = 32 \%$$

### Lastgruppe 13

vertikale Durchbiegung

$$\delta_z = \frac{2,15 \cdot 74,5 \cdot 600^3}{100 \cdot 21000 \cdot 30820} + 0,0054 \cdot \frac{0,0183 \cdot 600^4}{21000 \cdot 30820}$$

$$\delta_z = 0,53 + 0,02 = 0,6 \text{ cm} \leq 2,5 \text{ cm} \quad \checkmark \quad \eta = 24 \%$$

$$\delta_z = \frac{l}{1091} < \frac{l}{600} = \delta_{\text{grenz}} \quad \checkmark \quad \eta = 55 \%$$

horizontale Durchbiegung

$$\delta_y = \frac{1,5 \cdot 22,10 \cdot 600^3}{100 \cdot 21000 \cdot 5598,57} = 0,61 \text{ cm}$$

$$\delta_y = \frac{l}{984} < \frac{l}{600} = \delta_{\text{grenz}} \quad \checkmark \quad \eta = 61 \%$$

$$\Delta s = 2 \cdot 0,61 = 1,22 \text{ cm} \leq 1 \text{ cm} \quad \text{X} \quad \eta = 122 \%$$

Da die Verformungsbegrenzungen nur eine Empfehlung darstellen, muss der erhöhte Nachweis mit dem Kranhersteller abgeklärt werden.

Somit sind auch die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eingehalten. Die Ermüdungsnachweise werden in Abschnitt 6 geführt. Der statische Nachweis des Kranbahnträgers nach EC 3 für ein Profil HEB 320 wurde hiermit erbracht.

## 4 Bemessung nach DIN 18800

Wie bereits mehrfach erwähnt wurde 2012 der Eurocode eingeführt. Bis zu diesem Zeitpunkt hat sich in der Normung von Kranen und Kranbahnen viel getan. Einen kleinen verständlichen Überblick gibt die Abbildung 21.

In chronologischer Reihenfolge wurde 1936 die DIN 120, 1974 die DIN 15018 und 1980 die DIN 4132 eingeführt, welche die Themen Kranbahn und Krane trennten und beschrieben. Ab 1995 trat die DIN 18800 in Kraft. Da jedoch zu diesem Zeitpunkt schon der Eurocode in der Entwicklung war, wurde die DIN 4132 nicht an die DIN 18800 angepasst, sondern nur eine „Anpassungsrichtlinie Stahlbau“ herausgebracht.

So war ab 1995 eine Mischung aus beiden Normteilen gültig. Dabei wurden die Spannungen und Stabilitäten nach der DIN 18800 berechnet und die Betriebsfestigkeiten nach DIN 4132.

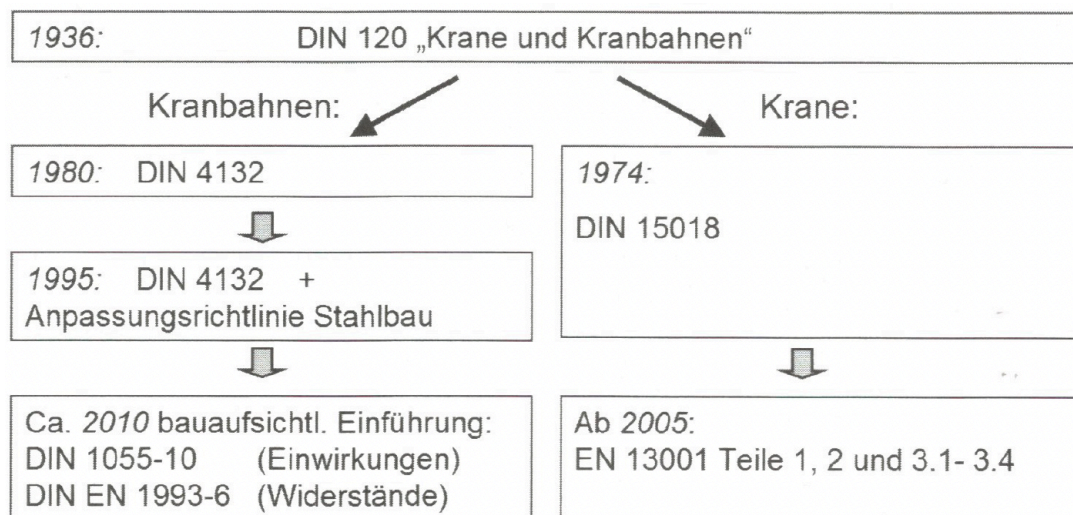


Abbildung 21: Entwicklung der Normen für Krane und Kranbahnen [12]

Die Grunddaten des Kranes bleiben die gleichen wie bei der Bemessung des EC3. Nur die Einordnung der Hubklasse verändert sich durch die geänderten Bezeichnungen.

So ist der Kran nun der Klasse H2 zuzuordnen. Eine weitere Änderung ist die Beanspruchungsgruppe, welche bei diesem Kran mit B3 gewählt wird. Diese Einordnung bedeutet auch nach DIN 4132, Kapitel 3.1.2, dass die Einwirkungen als planmäßig in Schienenkopfmittle angenommen werden dürfen. Ab der Beanspruchungsgruppe B4 muss eine Exzentrizität der vertikalen Lasten angenommen werden.

Im Gegensatz zum Eurocode 3 gibt es bei der DIN 4132 keine dynamischen Faktoren, sondern nur einen Schwingbeiwert, welcher abhängig von der Hubklasse ist. In diesem Fall beträgt der Schwingbeiwert  $\Phi_s = 1,2$ , bei Ansatz der Hubklasse 2.

Mit diesem Schwingbeiwert werden die vertikalen Lasten multipliziert. Daraus resultiert eine Radlast von:

$$Q_r = 74,5 \text{ kN} \cdot 1,2 = 89,4 \text{ kN}$$

Mithilfe diverser Formeln können nach DIN 15018 auch die horizontalen Lasten bestimmt werden, was im Folgenden exemplarisch durchgeführt wird.

- Schräglaufwinkel

infolge 75 % des Spurspieles min. 10 mm bei Spurkränzen

$$\alpha_f = 75\% \cdot \frac{10}{2700} \cdot 1000 = 2,78 \text{ ‰}$$

infolge Verschleißes des Schienenkopfes 10 % bei Spurkränzen

$$\alpha_v = 10\% \cdot 75 \text{ mm} = 7,5 \text{ mm}$$

$$\alpha_v = \frac{7,5}{2700} \cdot 1000 = 2,78 \text{ ‰}$$

infolge Toleranz des Kranes und der Kranbahn

$$\alpha_o = 1,0 \text{ ‰}$$

Schräglaufwinkel  $\alpha$

$$\alpha = \alpha_f + \alpha_v + \alpha_o = 2,78 + 2,78 + 1,0 = 6,56 \text{ ‰}$$

- Kraftschlußbeiwert abhängig von Schräglaufwinkel

$$f = 0,2414$$

$\alpha \text{ ‰}$	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	12,5	15,0	>15,0
f	0,094	0,118	0,139	0,158	0,175	0,190	0,203	0,214	0,233	0,248	0,259	0,268	0,275	0,287	0,293	0,300

Tabelle 11: Kraftschlußbeiwert f [8] Krane

- Kraft S infolge Schräglauf

$$S = \lambda \cdot f \cdot \sum Q_R$$

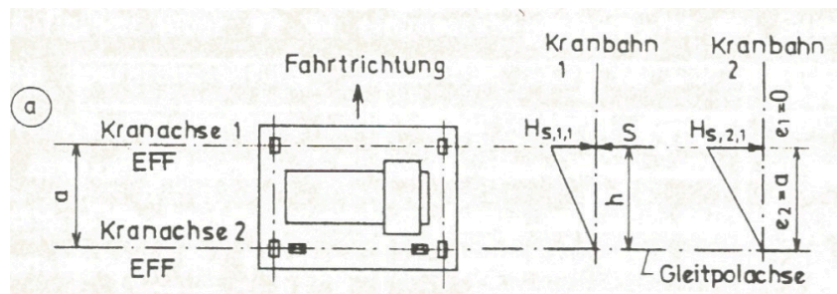


Abbildung 22: Schräglauflast S und Horizontallasten Hs bei Spurkranzführung [8] Krane

$$e_1 = 0 \quad e_2 = 2,7 \text{ m} \quad \sum e_i = 2,7 \text{ m}$$

$$n = 2 \quad h = 2,7 \text{ m}$$

$$\lambda = 1 - \frac{\sum e_i}{n \cdot h} = 1 - \frac{2,7}{2 \cdot 2,7} = 0,5$$

$$S = 0,5 \cdot 0,2414 \cdot 185,6 = 22,40 \text{ kN}$$

$$Q_{R,1,\min} = 16,7 \text{ kN} \quad Q_{R,2,\min} = 16,9 \text{ kN}$$

$$\sum Q_{R,\min} = 33,6 \text{ kN} \quad \sum Q_{R,\max} = 185,6 - 33,6 \text{ kN} = 152 \text{ kN}$$

$$R_{\max} = 76 \text{ kN}$$

$$\xi' = \frac{\sum Q_{R,\min}}{\sum Q_R} = \frac{33,6}{185,6} = 0,181$$

$$\xi = \frac{\sum Q_{R,\max}}{\sum Q_R} = \frac{152}{185,6} = 0,819$$

- Horizontalkraft  $H_S$  infolge Schräglauflauf

System	$\lambda_{1 ix}$	$\lambda_{1 iy}$	$\lambda_{2 ix}$	$\lambda_{2 iy}$
WFF	$\frac{e_i}{n} \cdot \frac{e_i}{h}$	$\frac{e_i}{n} \left(1 - \frac{e_i}{h}\right)$	$\frac{e_i}{n} \cdot \frac{e_i}{h}$	$\frac{e_i}{n} \left(1 - \frac{e_i}{h}\right)$
EFF	0	$\frac{e_i}{n} \left(1 - \frac{e_i}{h}\right)$	0	$\frac{e_i}{n} \left(1 - \frac{e_i}{h}\right)$
WFL	$\frac{e_i}{n} \cdot \frac{e_i}{h}$	$\frac{e_i}{n} \left(1 - \frac{e_i}{h}\right)$	$\frac{e_i}{n} \cdot \frac{e_i}{h}$	0
EFL	0	$\frac{e_i}{n} \left(1 - \frac{e_i}{h}\right)$	0	0

Tabelle 12: Faktoren zur Berechnung der Horizontalkräfte [24] DIN 15018

$$\lambda_{1,1,y} = \frac{0,181}{2} \cdot \left(1 - \frac{0}{2,7}\right) = 0,091$$

$$\lambda_{1,2,y} = \frac{0,181}{2} \cdot \left(1 - \frac{2,7}{2,7}\right) = 0$$

$$\lambda_{2,1,y} = \frac{0,819}{2} \cdot \left(1 - \frac{0}{2,7}\right) = 0,4095$$

$$\lambda_{2,2,y} = \frac{0,819}{2} \cdot \left(1 - \frac{2,7}{2,7}\right) = 0$$

$$\lambda_{1,1,x} = 0 \quad \lambda_{1,2,x} = 0$$

$$\lambda_{2,1,x} = 0 \quad \lambda_{2,2,x} = 0$$

- Kräfte quer zur Kranbahn

$$H_{S,1,i} = \lambda_{1,i,y} \cdot f \cdot \sum R$$

$$H_{S,1,1} = 0,091 \cdot 0,2414 \cdot 185,6 = 4,08 \text{ kN}$$

$$H_{S,1,2} = 0 \cdot 0,2414 \cdot 185,6 = 0 \text{ kN}$$

$$H_{S,2,i} = \lambda_{2,i,y} \cdot f \cdot \sum R$$

$$H_{S,2,1} = 0,4095 \cdot 0,2414 \cdot 185,6 = 18,35 \text{ kN}$$

$$H_{S,2,2} = 0 \cdot 0,2414 \cdot 185,6 = 0 \text{ kN}$$

- Kräfte längs zur Kranbahn

$$L_{S,1,i} = \lambda_{1,i,x} \cdot f \cdot \sum R$$

$$L_{S,2,i} = \lambda_{2,i,x} \cdot f \cdot \sum R$$

- Einwirkende Kräfte im Überblick

$$H_{s,links} = S - H_{S,1,1} = 22,4 - 4,08 = 18,32 \text{ kN}$$

$$H_{s,rechts} = H_{S,2,1} = 18,35 \text{ kN}$$

- Vereinfachung  $H_M$  erhöhung der Kräfte um 10 %

$$H_{ges,1,1} = 4,08 \cdot 1,1 = 4,49 \text{ kN}$$

$$H_{ges,2,1} = 18,35 \cdot 1,1 = 20,19 \text{ kN}$$

$$S_{ges} = 22,4 \cdot 1,1 = 24,64 \text{ kN}$$

- Pufferkräfte

$$P = \Phi_P \cdot P_{vorh} = 1,35 \cdot 16,2 = 21,87 \text{ kN}$$

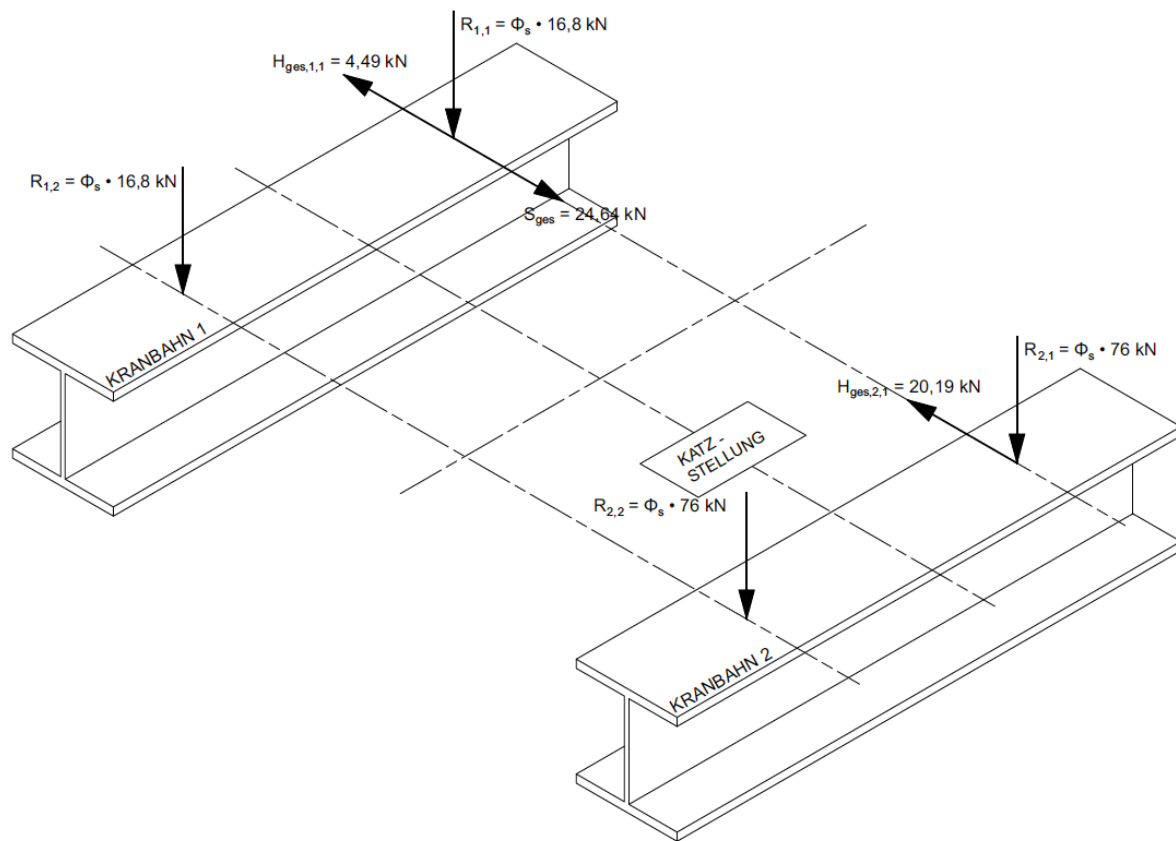


Abbildung 23: Wirkung der Kräfte auf die Kranbahn

#### 4.1 Schnittkräfte

Nachdem die einzelnen Belastungen bestimmt wurden, müssen ähnlich wie beim EC3 die Schnittkräfte bestimmt werden. Zwar wurden bereits in der DIN 18800 die Lasten in ständige, veränderliche und außergewöhnliche Lasten eingeteilt, jedoch werden in dieser Arbeit die Schnittkräfte nach der DIN 4132 berechnet. Hier tritt ein weiterer Unterschied zwischen den zwei Bemessungen auf. In der ehemaligen Norm DIN 4132 werden die drei Lastgruppen von der DIN 15018 übernommen.

Zum einen die Lastgruppe Hauptlasten (H), welche, wie der Name schon sagt, nur aus den Hauptlasten und zwar den Vertikallasten besteht. Zum zweiten die Lastgruppe der Zusatzlasten (HZ), welche vor allem die Horizontallasten beinhalten und als dritte und letzte Lastgruppe die Sonderlasten (HS), also die Pufferlasten.

Da in der Lastgruppe HZ sowohl die Vertikal- als auch die Horizontallasten enthalten sind, steigern sich die zulässigen Spannungen.

Die Schnittgrößenermittlung findet identisch zum Eurocode 3 mit Hilfe der Schneider Bautabellen statt.

#### Lastgruppe H:

$\max M_{y,(R\Phi S)} =$	132,22 kNm	$X_{MF} =$	2,15 m
$\min M_{y,(R\Phi S)} =$	- 86,63 kNm	$X_{MSt} =$	4,68 m
$\max Q_{z,(R\Phi S)} =$	61,38 kN		
$\min Q_{z,(R\Phi S)} =$	-117,42 kNm		

#### Lastgruppe HZ:

$\max M_{y,(R\Phi S)} =$	132,22 kNm	$X_{MF} =$	2,15 m
$\min M_{y,(R\Phi S)} =$	- 86,63 kNm	$X_{MSt} =$	4,68 m
$\max Q_{z,(R\Phi S)} =$	61,38 kN		
$\min Q_{z,(R\Phi S)} =$	-117,42 kNm		
$\max M_{z,(HZ)} =$	24,95 kNm		
$\min M_{z,(HZ)} =$	-10,18 kNm		
$Q_y =$	10,41 kN		
$M_T = H \cdot a =$	20,19 • 0,16 =	3,23 kNm	

## 4.2 Nachweise

Nachdem die Schnittgrößen ermittelt wurden, können die Nachweise geführt werden. Hierbei handelt es sich um die gleichen Nachweise wie beim Eurocode 3. Wie bereits beschrieben werden die Tragsicherheitsnachweise nach der DIN 18800 geführt. Zu diesen Nachweisen gehören der allgemeine Spannungsnachweis, Biegeknicken oder der Biegedrillknicknachweis und der Beulnachweis des Stegbleches unter der Radlast.

Die Betriebsfestigkeitsnachweise und die Gebrauchstauglichkeitsnachweise werden nach DIN 4132 geführt. Wobei auch hier die horizontale und vertikale Durchbiegung, ebenso wie eine niedrige Eigenfrequenz der Krananlage nachgewiesen werden muss.



#### 4.2.1 Allgemeine Querschnittsnachweise

Bei den allgemeinen Querschnittsnachweisen werden die auftretenden Spannungen aus den Schnittgrößen ermittelt und mit den Beanspruchungsspannungen des verwendeten Stahles verglichen. Bei Kranen ist hierbei ein Spannungsnachweis nach der Elastizitätstheorie vorgeschrieben, anders bei Kranbahnen. Bei diesen dürfen nach DIN 4132 in 4.1.1 auch die plastischen Reserven ausgenutzt werden, jedoch dürfen dann die Spannungen auch im Gebrauchszustand die Streckgrenze nicht überschreiten. In diesem Fall werden die Nachweise nach der Elastizitätstheorie nachgewiesen.

Die Nachweise sind in der DIN 18800 ab dem Kapitel 7.5.2 zu finden. Dabei muss im Allgemeinen nachgewiesen werden, dass das System im Gleichgewicht ist und in allen Querschnitten höchstens die Streckgrenze erreicht wird. Des Weiteren müssen entweder die Grenzwerte für  $\text{grenz } (b/t)$  und  $\text{grenz } (d/t)$  eingehalten werden oder eine ausreichende Beulsicherheit nach DIN 18800-3 nachgewiesen werden.

Die Spannungen werden mit denselben Formeln ermittelt wie im Eurocode. Dabei tritt in der Lastgruppe H, nur eine vertikale Belastung auf. Dagegen tritt bei der Lastgruppe HZ auch eine horizontale Belastung auf, die bei der Normalspannung betrachtet werden muss.

Anders als beim Eurocode 3 wird diese nicht als Vereinfachung dem Obergurt zu geschrieben, sondern dem ganzen Querschnitt, weshalb durch die außermittige Einleitung der Horizontalkraft auch die auftretenden Torsionsmomente betrachtet werden müssen.

Da die Vertikalkraft und die daraus resultierende Schubspannungen vereinfacht nur dem Steg zugeschrieben werden, muss auf diese Schubspannung in z-Richtung, welche identisch zu der Lastgruppe H ist, auch der Anteil der Torsionskraft im Steg addiert werden.

Die Horizontalkraft wird dagegen nur den Flanschen zu geschrieben, so dass zu ihr die Schubspannungen in y-Richtung addiert werden, welche aus der Torsionskraft resultieren.

Dabei muss die Torsionskraft aus zwei Anteilen errechnet werden. Zum einen aus einem Anteil der St. Venant-Torsion und zum anderen aus einem Anteil der Wölbkrafttorsion.

Die Streckgrenze wird nach Tabelle 13 gewählt. Dabei ist ein heutiger Stahlträger der Güte S 235 in der ehemaligen Norm in etwa mit der Stahlgüte St 37 zu vergleichen.

Stahlsorte der Bauteile		Lastfall	zulässige Vergleichs- spannung	zulässige Zugspannung	zulässige Druck- spannung	zulässige Schub- spannung
Kurzname	nach		zul $\sigma_Z$ N/mm <sup>2</sup>		zul $\sigma_d$ N/mm <sup>2</sup>	zul $\tau$ N/mm <sup>2</sup>
St 37 *)	DIN 17 100	H	160		140	92
		HZ	180		160	104
St 52-3	DIN 17 100	H	240		210	138
		HZ	270		240	156
*) Alle Gütegruppen, Erschmelzungs- und Vergießungsarten. In den Nachweisen nach DIN 4114 sind für "zul $\sigma$ " immer nur die Werte der Spalte "zul $\sigma_d$ " einzusetzen.						

Tabelle 13: Zulässige Spannungen nach DIN 4114 [8] Krane

### Lastgruppe H

$$\sigma_{x,My} = \frac{M_y}{W_{y,el}} = \frac{1,35 \cdot 13222}{1930} = 9,25 \text{ kN/cm}^2 < 14 \text{ kN/cm}^2 \quad \eta = 66 \%$$

$$\tau_{x,z} = \frac{Q_z \cdot S_y}{I_y \cdot b} \approx \frac{Q_z}{A_{Steg}} = \frac{1,35 \cdot 61,38}{32,09} = 2,58 \text{ kN/cm}^2 < 9,2 \text{ kN/cm}^2 \quad \eta = 28 \%$$

### Lastgruppe HZ

$$\begin{aligned} \sigma_{x,Mz} &= \frac{M_y}{W_{y,el}} + \frac{M_z}{W_{z,el}} \\ &= \frac{1,35 \cdot 13222}{1930} + \frac{1,35 \cdot 2495}{616} = 14,72 \text{ kN/cm}^2 < 16 \text{ kN/cm}^2 \quad \eta = 92 \% \end{aligned}$$

$$\tau_{x,y} = \frac{Q_y \cdot S_z}{I_z \cdot b} = \frac{1,35 \cdot 10,41 \cdot 230,63}{9240 \cdot 30} = 2,58 \text{ kN/cm}^2 < 10,4 \text{ kN/cm}^2 \quad \eta = 25 \%$$

### Torsion

$$M_T = H \cdot a = 3,23 \text{ kNm}$$

Steg:

$$\tau_{x,s} = \frac{M_T}{I_T} \cdot z = \frac{323}{225} \cdot 1,15 = 1,65 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{x,z} = 2,58 + 1,65 = 4,23 \text{ kN/cm}^2 < 9,2 \text{ kN/cm}^2 \quad \eta = 46 \%$$

Flansch:

$$\tau_{x,s} = \frac{M_T}{I_T} \cdot z = \frac{323}{225} \cdot 2,05 = 2,94 \text{ kN/cm}^2$$

$$\begin{aligned} \tau_{x,y} &= \frac{Q_y \cdot S_z}{I_z \cdot b} = \frac{1,35 \cdot 10,41 \cdot 230,63}{9240 \cdot 30} \\ &= 2,58 + 2,94 = 5,52 \text{ kN/cm}^2 < 10,4 \text{ kN/cm}^2 \quad \eta = 53 \% \end{aligned}$$

## 4.2.2 Lokale Spannungen

Genauso wie beim Eurocode 3 müssen auch in der ehemaligen Norm die lokalen Spannungen nachgewiesen werden. Während jedoch heute nur noch die lokalen Spannungen infolge der Radlasteinleitung betrachtet werden, musste früher auch die sogenannte Hertzsche Pressung berücksichtigt werden.

### 4.2.3 Lokale Spannungen (Hertzsche Pressung)

Die Hertzsche Pressung beschreibt die quasi unendliche Spannung im Berührungspunkt zwischen den Rädern und dem Träger. Diese entsteht dadurch, dass das Rad an einem sehr kleinen Punkt mit einer hohen Last angreift und somit keine Standardberechnung der Spannung vorgenommen werden kann.

Dabei darf die Hertzsche Pressung nur angewendet werden, wenn die Berührungskörper aus homogenem, isotropem und elastischem Material sind. Des Weiteren muss das Hook'sche Gesetz gültig und die Kontaktflächen im Vergleich zu den Körpern eben und klein sein. Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, kann die Hertzsche Pressung nach Tabelle 14 berechnet werden.



F = Gesamtkraft	Versch. Metalle $E_1 \neq E_2$	Gleiche Metalle: $E_1 = E_2 = E$ ; $\mu_1 = \mu_2 \sim 0,3$				
		Größte Normal-Spannung $\sigma_{HE}$	Größte Normal-Spannung $\sigma_{HE}$	Radius a der Berührungsfl.	Berührungsfläche A	im Abstand $y_m$ von der Berührungsfläche
1 Kugel-Ebene	$\sigma_{HE} = -0,578 \sqrt{\frac{F}{R^2 \cdot w^2}}$	$\sigma_{HE} = -0,388 \sqrt{\frac{F \cdot E^2}{R^2}}$	$a = 1,11 \sqrt{\frac{F \cdot R}{E}}$	Kreis $A = \pi \cdot 2a$	$\tau_{max} = 0,31 \sigma_{HE}$	$y_m = 0,47 a$
2 Kugel-Kugel	$\sigma_{HE} = -0,578 \sqrt{\frac{F \cdot u^2}{w^2}}$	$\sigma_{HE} = -0,388 \sqrt{\frac{F \cdot E^2 (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot R_2}}$	$a = 1,11 \sqrt{\frac{F (R_1 \cdot R_2)}{E (R_1 + R_2)}}$	Kreis $A = \pi \cdot 2a$	$\tau_{max} = 0,31 \sigma_{HE}$	$y_m = 0,47 a$
3 Kugel-Kugelsockel	$\sigma_{HE} = -0,578 \sqrt{\frac{F \cdot v^2}{w^2}}$	$\sigma_{HE} = -0,388 \sqrt{\frac{F \cdot E^2 \cdot v^2}{R_1 \cdot R_2}}$	$a = 1,11 \sqrt{\frac{F}{E \cdot v}}$	Kreis $A = \pi \cdot 2a$	$\tau_{max} = 0,31 \sigma_{HE}$	$y_m = 0,47 a$
4 Zylinder-Ebene	$\sigma_{HE} = -0,564 \sqrt{\frac{F}{R \cdot w \cdot L}}$	$\sigma_{HE} = -0,418 \sqrt{\frac{F \cdot E}{L \cdot R}}$	$a = 1,52 \sqrt{\frac{F \cdot R}{L \cdot E}}$	Rechteck $A = L \cdot 2a$	$\tau_{max} = 0,30 \sigma_{HE}$	$y_m = 0,79 a$
5 Zylinder-Zylinder	$\sigma_{HE} = -0,564 \sqrt{\frac{F \cdot u}{L \cdot w}}$	$\sigma_{HE} = -0,418 \sqrt{\frac{F \cdot E \cdot u}{L}}$	$a = 1,52 \sqrt{\frac{F}{L \cdot E \cdot u}}$	Rechteck $A = L \cdot 2a$	$\tau_{max} = 0,30 \sigma_{HE}$	$y_m = 0,79 a$
6 Zylinder-Mulde	$\sigma_{HE} = -0,564 \sqrt{\frac{F \cdot v}{L \cdot w}}$	$\sigma_{HE} = -0,418 \sqrt{\frac{F \cdot E \cdot v}{L}}$	$a = 1,52 \sqrt{\frac{F}{L \cdot E \cdot v}}$	Rechteck $A = L \cdot 2a$	$\tau_{max} = 0,30 \sigma_{HE}$	$y_m = 0,79 a$

Hilfsgrößen:  $u = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$ ;  $v = \frac{R_1 - R_2}{R_1 \cdot R_2}$ ;  $w = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}$ ;  $\mu$  = Querdehnungszahl  
Einheiten: E,  $\sigma_{HE}$ ,  $\tau$  in kN/cm<sup>2</sup>; F in kN; R, a, L in cm; A in cm<sup>2</sup>

Tabelle 14: Hertzsche Pressung [8] Krane

In diesem Fall wäre die Zeile 4 (Zylinder – Ebene) und verschiedene Materialien zu wählen, da der Träger aus Stahl der Klasse St 37 besteht und das Laufrad aus dem Gussstahl GG 15. Der Durchmesser des Laufrades beträgt 250 mm.

$$F = 89,4 \text{ kN} \quad R = \frac{D}{2} = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ cm} \quad L = 75 \text{ mm (Schienenkopf)}$$

$$\text{Rad} \rightarrow \text{GG 15} \quad E_{GG} = 10000 \text{ kN/cm}^2 \quad G_{GG} = 3800 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Schiene} \rightarrow \text{St 37} \quad E_{St} = 21000 \text{ kN/cm}^2 \quad G_{St} = 8100 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = \frac{E}{2 \cdot G} - 1$$

$$\mu_{St} = \frac{21000}{2 \cdot 8100} - 1 = 0,296 \approx 0,3 \quad \mu_{GG} = \frac{10000}{2 \cdot 3800} - 1 = 0,316 \approx 0,3$$

$$w = \frac{1 - 0,3^2}{21000} + \frac{1 - 0,3^2}{10000} = 1,34 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{kN/cm}^2}$$

### Nachweis

$$\sigma_{HE} = (-0,564) \cdot \sqrt{\frac{89,4}{12,5 \cdot 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot 7,5}} = -47,58 \text{ kN/cm}^2 < -50,0 \text{ kN/cm}^2 \quad \eta = 95 \%$$

Die zulässige Hertzsche Pressung kann nach Tabelle 15 bestimmt werden. Dabei ist in diesem Fall der Gussstahl GG 15 mit der geringeren Beanspruchbarkeit zu wählen.

Material									
GG 15		St 37		St 52		GS 52		C 35 N	
H	HZ	H	HZ	H	HZ	H	HZ	H	HZ
-50,0	-60,0	-65,0	-80,0	-85,0	-105,0	-85,0	-105,0	-80,0	-100,0

Tabelle 15: Zulässige Berührungspressung nach DIN 18800 Teil 1 [8] Krane

#### 4.2.4 Lokale Spannungen am Obergurt

Da trotz aller erforderlichen Bemessungen des Querschnittes in der Realität immer wieder Risse im Bereich des oberen Stegblechrandes auftraten, wurde dieser zusätzliche Nachweis notwendig. Denn durch die örtliche Lasteinleitung steigen in einem kleinen Bereich die Spannungen stark an. Die durch die Radlast auftretenden Spannungen werden in der DIN 4132 mit einem Überstrich gekennzeichnet.

Dabei muss zum einen ein allgemeiner Spannungsnachweis und zum anderen ein Betriebsfestigkeitsnachweis geführt werden.

Hierfür muss die Lastausbreitung bestimmt werden. Es wird angenommen, dass sich die Last unter einem 45° Winkel ausbreitet und in Richtung des Stegbleches stark abnimmt. Während im Eurocode die Lastausbreitung mit  $l_{eff}$  gekennzeichnet ist, wird sie in der DIN 4132 mit  $c$  bezeichnet. Sie ist vor allem abhängig von der Art des Trägers und der Höhe  $h$  nach Abbildung 24.

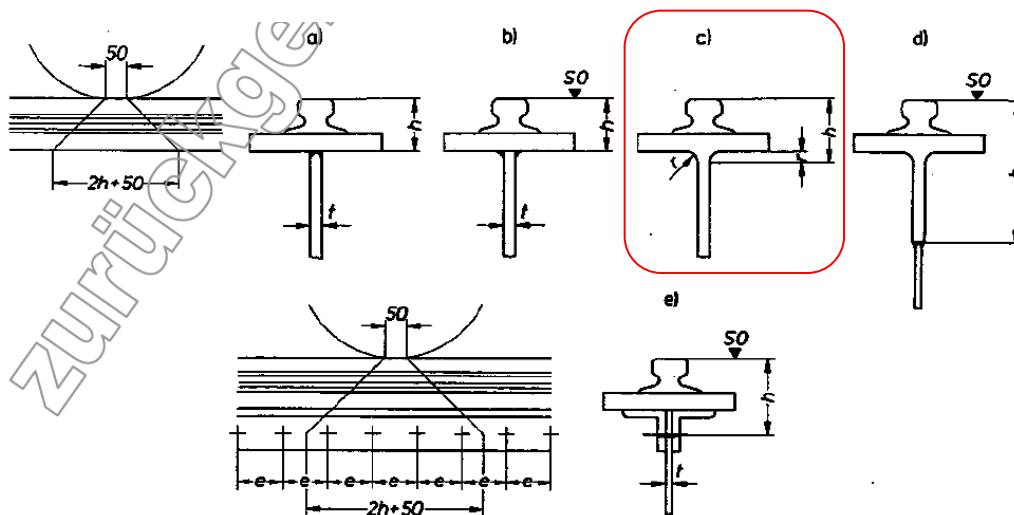


Abbildung 24: Höhe  $h$  für Lastausbreitung [23] DIN 4132

Mit dieser Lastausbreitung kann die vorhandene Normalspannung berechnet werden. Die zugehörige Schubspannung darf wiederum mit 20% der Druckspannung angenommen werden.

$$c = 2 \cdot h + 5 = 2 \cdot (2,7 + 2,05 + 7,7) + 5 = 29,9 \text{ cm}$$

$$\bar{\sigma}_z = \frac{\Phi_s \cdot R}{c \cdot s} = \frac{89,4}{29,9 \cdot 1,15} = 2,60 \text{ kN/cm}^2$$

$$\bar{\tau}_{z,x} = 0,2 \cdot 2,60 = 0,52 \text{ kN/cm}^2$$

### Nachweise:

a) allgemein

$$\bar{\sigma}_z \leq \bar{\sigma}_{zul} \rightarrow 2,60 \leq 14 \quad \checkmark$$

$$\eta = 19 \%$$

b) Betriebsfestigkeit

Kerbfall für Walzprofil nach DIN 4132 → W1

Beanspruchungsgruppe B4      St 37       $\kappa = 0$

Tabelle 10 der DIN 4132      →      zul  $\bar{\sigma}_{Be} = 24 \text{ kN/cm}^2$

$$\bar{\sigma}_z \leq \text{zul } \bar{\sigma}_{Be} \rightarrow 2,60 = 24,0 \text{ kN/cm}^2$$

Ist die lokale Spannung  $\bar{\sigma}_z$  kleiner als 85% der zulässigen Beanspruchung der Gruppe B6 darf auf folgende Nachweise verzichtet werden:

$$\tau_{z,x} + \bar{\tau}_{z,x} \leq \text{zul } \tau_{Be}$$

$$\sum \left( \frac{\max \sigma}{\text{zul } \sigma_{Be}} \right)_i^k + \left( \frac{\max \sigma}{\text{zul } \sigma_{Be}} \right)^k \leq 1,0$$

Tabelle 12 der DIN 4132      →      zul  $\bar{\sigma}_{Be} = 19,2 \text{ kN/cm}^2$

$$\bar{\sigma}_z = 2,6 < 0,85 \cdot 19,2 = 16,3 \text{ kN/cm}^2$$

Damit können die Nachweise entfallen.

### 4.2.5 Mehrachsige Spannung

Da im Allgemeinen die größten Beanspruchungen am Punkt zwischen Flansch und Steg auftreten muss dieser Punkt nachgewiesen werden. Dafür muss sowohl die Normal- als auch die Schubspannung an diesem Punkt bestimmt werden. Mit Hilfe nachstehender Formel kann die Vergleichsspannung berechnet und nachgewiesen werden.

Da die größten Spannungen in der Lastgruppe HZ auftreten muss nur diese Betrachtet werden.

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_x^2} \leq \text{zul } \sigma_v$$

### Lastgruppe HZ

$$\sigma_x = 14,72 \cdot \frac{11,25}{16} = 10,35 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_y = \bar{\sigma}_z = 2,60 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{x,z} = \frac{Q_z \cdot S_y}{I_y \cdot b} = \frac{1,35 \cdot 61,38 \cdot 960,09}{30820 \cdot 1,15} + \tau_{x,s} = 2,24 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_x = 2,24 + 1,65 = 3,89 \text{ kN/cm}^2$$

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \sqrt{10,35^2 + 2,60^2 + 10,35 \cdot 2,60 + 3 \cdot 3,89^2} \\ &= 13,65 \text{ kN/cm}^2 \leq 18 \text{ kN/cm}^2 \quad \checkmark \end{aligned}$$

$$\eta = 76 \%$$

#### 4.2.6 Beulen

Der Beulsicherheitsnachweis wird nach DIN 18800 Teil 3 geführt. Dabei beschreibt das Beulen, dass Ausweichen einer dünnen Platte durch eine Normalkraft. Zu vergleichen ist das Beulen bei Platten mit dem Knicken bei Stäben.

Im Allgemeinen kann der Beulnachweis vereinfacht mit dem einhalten von  $b/t$  – Werten geführt werden und darf bei Walzprofilen, wie dem HEB Träger vernachlässigt werden. Einzige Ausnahme ist beim Auftreten einer Spannung  $\sigma_y$ . Welche in diesem Fall durch die Radlast auftritt und das Führen des Nachweises notwendig macht.

Dabei wird der Nachweis nach Element 504 geführt:

$$\left( \frac{|\sigma_x|}{\sigma_{xP,R,d}} \right)^{e_1} + \left( \frac{|\sigma_y|}{\sigma_{yP,R,d}} \right)^{e_2} - V \left( \frac{|\sigma_x \cdot \sigma_y|}{\sigma_{xP,R,d} \cdot \sigma_{yP,R,d}} \right) + \left( \frac{\tau}{\tau_{P,R,d}} \right)^{e_3} \leq 1$$

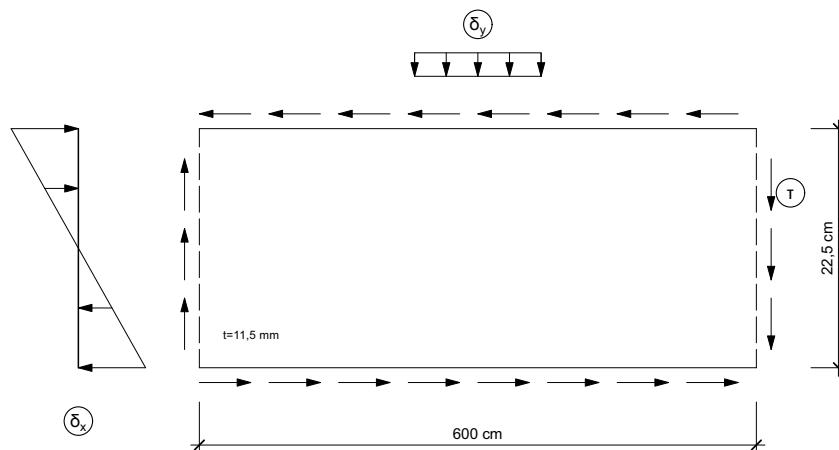


Abbildung 25: Beulfeld

Zuerst müssen dafür nach Element 113 der DIN 18800 die Systemgrößen ermittelt werden:

$$a = 600 \text{ cm} \quad b = 22,5 \text{ cm} \quad \text{Seitenverhältnis: } \alpha = a/b = 600/22,5 = 26,6$$

$$t = 1,15 \text{ cm} \quad c = 29,9 \text{ cm} \quad c/a = 29,9/600 = 0,05 \approx 0,0$$

$$\text{Bezugsspannung: } \sigma_e = 1,898 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 = 49,58 \text{ kN/cm}^2$$

$$\Psi = \frac{\delta_{x,2}}{\delta_{x,1}} = -1$$

#### Beulwerte :

Die Beulwerte welche benötigt werden, um die Beulspannungen zu berechnen werden ausfolgenden Tabellenwerken entnommen. Dabei stehen diese nicht in der Norm und müssen z.B. nach Petersen oder nach Protte aus Fachliteratur entnommen werden.



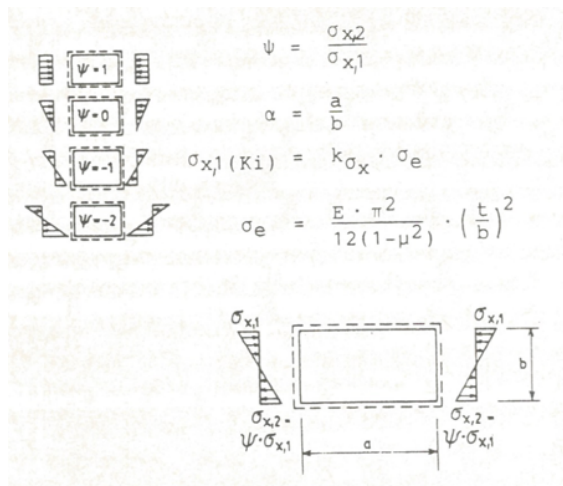


Abbildung 26: Systemgrößen zum Beulen [8] Krane

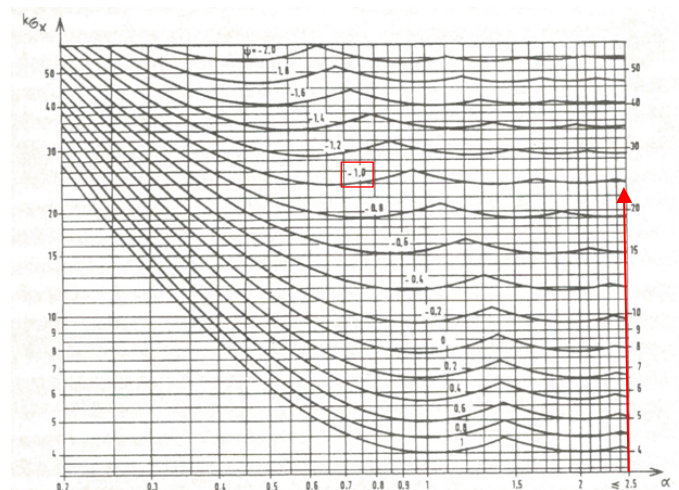


Abbildung 27: Beulwert  $k_{\sigma_x}$  [8] Krane

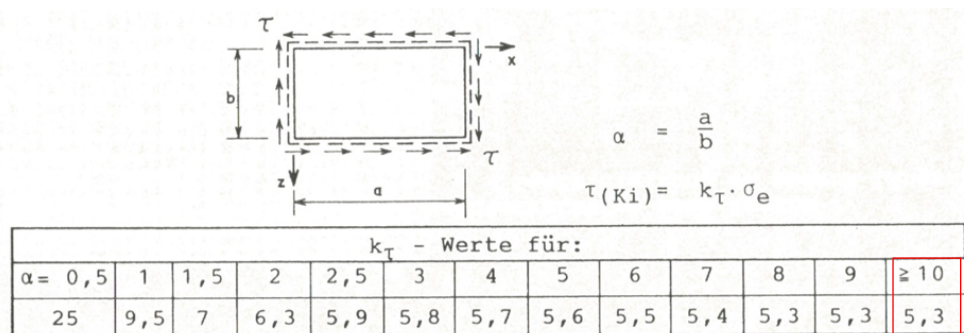


Tabelle 16: Beulwert  $k_{\tau}$  [8] Krane

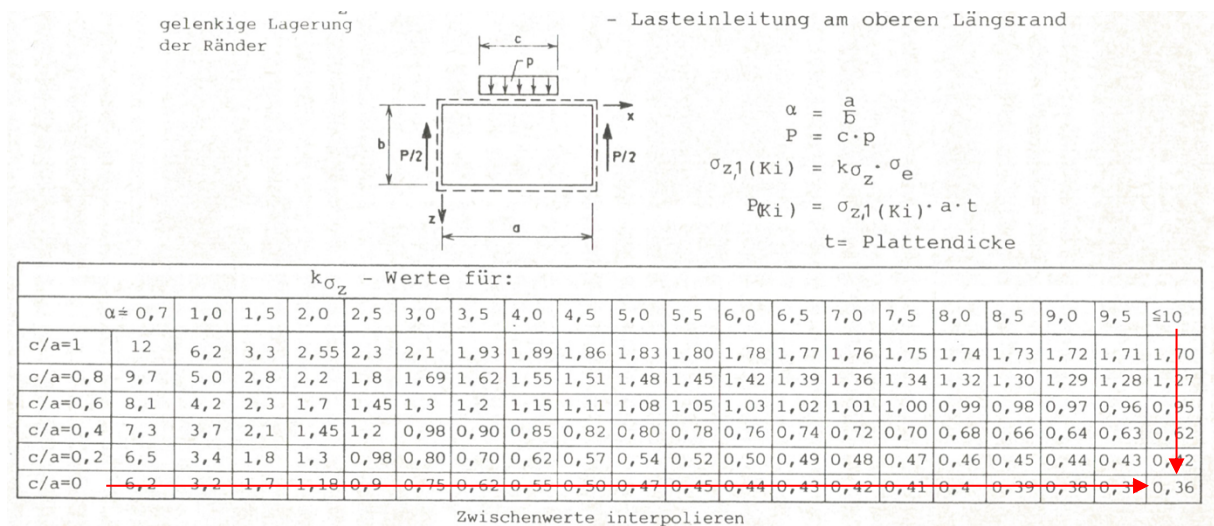


Tabelle 17: Beulwert  $k_{\sigma_z}$  [8] Krane

$k_{\sigma_x} = 26$

$k_{\sigma_z} = 0,36$

$k_{\tau} = 5,3$

### Beulspannungen :

$$\sigma_{xPi} = k_{\sigma x} \cdot \sigma_e = 26 \cdot 49,58 = 1289,08 \text{ kN/cm}^2 = \sigma_{Pi}$$

$$\sigma_{zPi} = k_{\sigma z} \cdot \sigma_e = 0,36 \cdot 49,58 = 17,85 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{Pi} = k_{\tau} \cdot \sigma_e = 5,3 \cdot 49,58 = 262,77 \text{ kN/cm}^2$$

### Abminderungsfaktoren :

Mit den Beulspannungen können die Abminderungsfaktoren bestimmt werden, mit welchen dann die Grenzbeulspannungen für den Nachweis errechnet werden. Dabei muss unterschieden werden um welches Feld es sich handelt eine Definition der einzelnen Felder ist in Abbildung 28 angegeben.

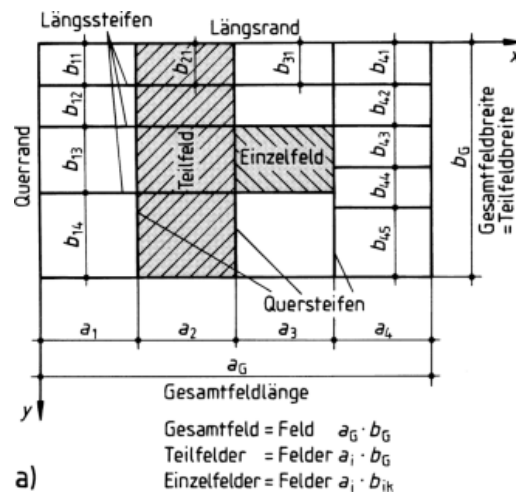


Abbildung 28: Definition der Beulfelder [10] ST.2

Da keine Steifen vorhanden sind, handelt es sich bei dem zu Betrachteten Beulfeld um ein sogenanntes Gesamtfeld. Mit dieser Einordnung und der allseitigen Lagerung der Platte, kann aus tabelle 14 der Bezogene Schlankheitsgrad und daraus der Abminderungsfaktor bestimmt werden.

Bezogener Schlankheitsgrad nach Tabelle 18:

$$\bar{\lambda}_{xP} = \sqrt{\frac{24}{1289,08}} = 0,14$$

$$\bar{\lambda}_{zP} = \sqrt{\frac{24}{17,85}} = 1,23$$

$$\bar{\lambda}_{\tau P} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\tau_{Pi} \cdot \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{24}{262,77 \cdot \sqrt{3}}} = 0,23$$

	1	2	3	4	5
	Beulfeld	Lagerung	Beanspruchung	Bezogener Schlankheitsgrad	Abminderungsfaktor
1	Einzel-feld	allseitig gelagert	Normalspannungen $\sigma$ mit dem Randspannungs-verhältnis $\psi_T \leq 1^a$	$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{pi}}}$	$\kappa = c \left( \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p^2} \right) \leq 1$ mit $c = 1,25 - 0,12 \psi_T \leq 1,25$
2		allseitig gelagert	Schubspannungen $\tau$	$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\tau_{pi} \cdot \sqrt{3}}}$	$\kappa_\tau = \frac{0,84}{\bar{\lambda}_p} \leq 1$
3	Teil- und Gesamt-feld	allseitig gelagert	Normalspannungen $\sigma$ mit dem Randspannungs-verhältnis $\psi \leq 1$	$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{pi}}}$	$\kappa = c \left( \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p^2} \right) \leq 1$ mit $c = 1,25 - 0,25 \psi \leq 1,25$
4		dreiseitig gelagert	Normalspannungen $\sigma$	$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{pi}}}$ b	$\kappa = \frac{1}{\bar{\lambda}_p^2 + 0,51} \leq 1$
5		dreiseitig gelagert	konstante Rand-verschiebung $u$	$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{pi}}}$ b	$\kappa = \frac{0,7}{\bar{\lambda}_p} \leq 1$
6		allseitig gelagert, ohne Längssteifen	Schubspannungen $\tau$	$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\tau_{pi} \cdot \sqrt{3}}}$	$\kappa_\tau = \frac{0,84}{\bar{\lambda}_p} \leq 1$
7		allseitig gelagert, mit Längssteifen	Schubspannungen $\tau$	$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\tau_{pi} \cdot \sqrt{3}}}$	$\kappa_\tau = \frac{0,84}{\bar{\lambda}_p} \leq 1$ für $\bar{\lambda}_p \leq 1,38$ $\kappa_\tau = \frac{1,16}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1$ für $\bar{\lambda}_p > 1,38$

a Bei Einzelfeldern ist  $\psi_T$  das Randspannungsverhältnis des Teilfeldes, in dem das Einzelfeld liegt.

b Zur Ermittlung von  $\sigma_{pi}$  ist der Beulwert  $\min k_G(\alpha)$  für  $\psi = 1$  einzusetzen.

Tabelle 18: Abminderungsfaktor [21] DIN 18800

$$c = 1,25 - 0,25 \cdot \Psi = 1,25 - 0,25 \cdot (-1) = 1,5 \leq 1,25 \quad \text{falsch}$$

→ Es wird mit  $c = 1,25$  weitergerechnet.

$$\kappa_x = 1,25 \cdot \left( \frac{1}{0,14} - \frac{0,22}{0,14^2} \right) = -5,1 \leq 1 \quad \text{falsch}$$

→ Es wird mit  $\kappa_x = 1,0$  weitergerechnet.

$$\kappa_y = 1,25 \cdot \left( \frac{1}{1,23} - \frac{0,22}{1,23^2} \right) = 0,83 \leq 1$$

$$\kappa_\tau = \frac{0,84}{\bar{\lambda}_P} = \frac{0,84}{0,23} = 3,65 \leq 1 \quad \text{falsch}$$

→ Es wird mit  $\kappa_\tau = 1,0$  weitergerechnet.

Knickstabähnliches Verhalten:

$$\rho = \frac{\Lambda - \sigma_{Pi}/\sigma_{Ki}}{\Lambda - 1} \geq 0$$

$$\Lambda = \bar{\lambda}_P^2 + 0,5 = 0,14^2 + 0,5 = 0,52, \text{ jedoch } 2 \leq \Lambda \leq 4$$

→ Es wird mit  $\Lambda = 2,0$  gerechnet.

$$\frac{\sigma_{Pi}}{\sigma_{Ki}} = k_{ox} \cdot \alpha^2 \cdot \frac{1 + \sum \delta^L}{1 + \sum \gamma^L} = 26 \cdot 26,6^2 \cdot \frac{1}{1} = 18396,56 \geq 1,0$$

$\delta^L$  und  $\gamma^L$  sind dabei die bezogene Querschnittsfläche und das bezogene Flächenmoment 2. Grades von verwendeten Steifen. Da in diesem Fall innerhalb des Beulfeldes keine Steifen vorhanden ist, sind die Werte entsprechend mit 0 anzusetzen.

$$\rho = \frac{2 - 18397}{2 - 1} = -18397 \geq 0 \quad \text{✗}$$

→ kein Knickstabähnliches Verhalten zu berücksichtigen

#### Grenzbeulspannungen:

$$\begin{aligned}\sigma_{P,R,d} &= \frac{\kappa \cdot f_{y,k}}{\gamma_M} \\ \sigma_{xP,R,d} &= \frac{1 \cdot 24}{1,1} = 21,82 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{yP,R,d} &= \frac{0,83 \cdot 24}{1,1} = 18,11 \text{ kN/cm}^2 \\ \tau_{P,R,d} &= \frac{1 \cdot 24}{\sqrt{3} \cdot 1,1} = 12,60 \text{ kN/cm}^2 \\ e_1 &= 1 + \kappa_x^4 = 1 + 1^4 = 2 \\ e_2 &= 1 + \kappa_y^4 = 1 + 0,83^4 = 1,47 \\ e_3 &= 1 + \kappa_x \cdot \kappa_y \cdot \kappa_t^2 = 1 + 1 \cdot 0,83 \cdot 1^2 = 1,83\end{aligned}$$

Da sowohl  $\sigma_x$  als auch  $\sigma_z$  eine Druckspannung ist, darf nach DIN 18800 Element 504 der Abminderungsfaktor V wie folgt berechnet werden:

$$V = (\kappa_x \cdot \kappa_y)^6 = (1 \cdot 0,83)^6 = 0,3$$

#### Lastgruppe H:

$$\begin{aligned}\max M_y &= 132,22 \text{ kN} \\ \max Q_z &= 61,38 \text{ kN} \\ \max \sigma_x &= \frac{13222}{2149} = 6,15 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_{x,1} &= 6,15 \cdot \frac{225/2}{320/2} = 4,32 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Druck)} \\ \sigma_{x,2} &= 6,15 \cdot \frac{225/2}{320/2} = -4,32 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Zug)} \\ \tau_m &= \frac{61,38}{1,15 \cdot 22,5} = 2,37 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_y &= \bar{\sigma}_z = 2,60 \text{ kN/cm}^2\end{aligned}$$

#### Nachweis:

$$\begin{aligned}\left(\frac{4,32}{21,82}\right)^2 + \left(\frac{2,60}{18,11}\right)^{1,47} - 0,33 \cdot \left(\frac{4,32 \cdot 2,60}{21,82 \cdot 18,11}\right) + \left(\frac{2,37}{12,6}\right)^{1,83} &\leq 1 \\ 0,04 + 0,06 - 0,01 + 0,05 &= 0,14 \leq 1 \quad \eta = 14 \%\end{aligned}$$



Obwohl der Nachweis für das Beulen erbracht wurde, wird empfohlen eine Kranbahn mit Steifen auszubilden. Dabei sollte der Abstand unter den Steifen nicht  $l/4$  der Spannweite übersteigen. Somit ergibt sich in diesem Fall ein Abstand von  $6/4 = 1,5$  m.

#### 4.2.7 Kippsicherheit (Biegedrillknicken)

Für Stäbe mit konstanter Normalkraft und doppelt- oder einfachsymmetrischen I-förmigen Querschnitt ist der Biegedrillknicknachweis mit nachfolgender Formel zu führen.

$$\frac{N}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} + \frac{M_y}{\kappa_M \cdot M_{pl,y,d}} \cdot k_y + \frac{M_z}{M_{pl,z,d}} \cdot k_z \leq 1,0 \quad \text{DIN 18800 Teil 3 Element 323}$$

Die Beiwerte  $k_y$  und  $k_z$  dürfen dabei nach DIN 18800 Element 323 Anmerkung 3 auf der sicheren Seite liegend mit  $k_y = 1$  und  $k_z = 1,5$  angenommen werden.

Da in der Lastgruppe keine Normalkraft anzusetzen ist, muss  $\kappa_z$  nicht ermittelt werden. Der Abminderungsfaktor  $\kappa_M$  wird mit dem bezogenen Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_M$  ermittelt, für dieses wiederum muss das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{KI,y}$  berechnet werden.

Lastgruppe HZ:

$$\begin{aligned} N &= 0 \text{ kN} & M_y &= 132,22 \text{ kNm} & M_z &= 24,95 \text{ kNm} \\ \text{HEB 320} &\rightarrow & M_{y,pl} &= 308 \text{ kNm} & M_{z,pl} &= 225 \text{ kNm} \\ k_y &= 1 & k_z &= 1,5 & \lambda_a &= \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} = 105 \end{aligned}$$

Ideales Biegedrillknickmoment:

$$M_{KI,y} = \zeta \cdot N_{KI,z} \cdot \left( \sqrt{c^2 + 0,25 \cdot z_p^2} + 0,5 \cdot z_p \right)$$

$$N_{KI,z} = \frac{EI_z \cdot \pi^2}{L^2} = \frac{21000 \cdot 9240 \cdot \pi^2}{600^2} = 5319,72 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} c^2 &= \frac{I_w + 0,039 \cdot l^2 \cdot I_T}{I_z} \\ &= \frac{2069000 + 0,039 \cdot 600^2 \cdot 225}{9240} = 565,80 \end{aligned}$$

$$z_p = -16 \text{ cm (Angriffspunkt vom Schwerpunkt aus)}$$

$$M_{KI,y} = 1,12 \cdot 5319,72 \cdot (\sqrt{565,80 + 0,25 \cdot (-16)^2} + 0,5 \cdot (-16)) = 101858,45 \text{ kNm}$$

Bezogener Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_M$ :

$$\bar{\lambda}_M = \sqrt{\frac{M_{pl,y}}{M_{KI,y}}} = \sqrt{\frac{308}{101858,45}} = 0,05$$

Abminderungsfaktor  $\kappa_M$

$$\kappa_M = \left( \frac{1}{1 + \bar{\lambda}_M^2 \cdot n} \right)^{1/n} \text{ für } \bar{\lambda}_M > 0,4$$

$$\kappa_M = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_M < 0,4$$




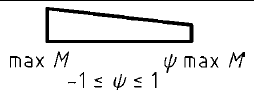
Zeile	Momentenverlauf	$\zeta$
1		1,00
2		1,12
3		1,35
4		$1,77 - 0,77 \psi$

Tabelle 19: Momentenbeiwert  $\zeta$  [21] DIN 18800

### Nachweis:

$$0 + \frac{132,22}{1,0 \cdot \frac{308}{1,1}} \cdot 1 + \frac{24,95}{\frac{225}{1,1}} \cdot 1,5 \leq 1,0$$

$$0 + 0,47 + 0,183 = 0,653 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

$$\eta = 65 \%$$

#### 4.2.8 Gebrauchszustand (GZG)

Zwar ist weder in der DIN 4132 noch in der Anpassungsrichtlinie Stahlbau ein Gebrauchstauglichkeitsnachweis gefordert, jedoch wurde meist von den Hersteller der Kranbrücke eine Begrenzung der Durchbiegung gefordert, um eine einwandfrei Funktion der Kranbahn zu gewährleisten und den Verschleiß so gering wie möglich zu halten.

Für die Durchbiegungsbeschränkung wurde sich an der Schweizer Norm orientiert. Dabei war die maximal zulässige Durchbiegung abhängig von der Beanspruchungsgruppe. In diesem Fall muss mit folgenden Werten von Tabelle 20 gerechnet werden:

a) vertikale Durchbiegung

$$l/700 \text{ der Spannweite}$$

b) horizontale Durchbiegung

$$l/800 \text{ der Spannweite}$$

Beanspruchungsgruppe	vertikale Durchbiegung	horizontale Durchbiegung
B1-B2	// 600	// 800
B3	// 700	// 800
B4	// 700	// 1000
B5-B6	// 800	// 1000

Tabelle 20: Empfohlene Begrenzung [25]

$$\begin{aligned} \text{a) } \delta_z &= \frac{2,15 \cdot 76 \cdot 600^3}{100 \cdot 21000 \cdot 30820} + 0,0054 \cdot \frac{0,0183 \cdot 600^4}{21000 \cdot 30820} \\ &= 0,545 + 0,02 \quad = 0,57 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\frac{l}{1062} < \frac{l}{700} \quad \checkmark$$

$$\eta = 66 \%$$

$$\text{b) } \delta_y = \frac{1,5 \cdot 20,19 \cdot 600^3}{100 \cdot 21000 \cdot 5598,57} = 0,56 \text{ cm}$$

$$\frac{l}{1079} < \frac{l}{800} \quad \checkmark$$

$$\eta = 74 \%$$

Somit sind auch die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eingehalten. Der statische Nachweis des Kranbahnträgers nach DIN 18800 für ein Profil HEB 320 wurde hiermit erbracht.

## 5 Vergleich der Bemessungskonzepte

In der nachstehenden Tabelle 21 sind die einzelnen Werte der jeweiligen Berechnung sowie die Differenz der beiden Normen aufgelistet. Dabei ist auffallend, dass sich hinsichtlich der Ausnutzung der Eurocode verschlechtert hat. Einzige Ausnahme stellt der allgemeine Spannungsnachweis dar. Dieser ist trotz höherer Einwirkungen um knapp 13% besser als in der DIN 18800.

Bei der Ausnutzung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist ausschlaggebend, dass der Nachweis im EC 3 mit einem deutlich geringeren Wert geführt wird, daher der Unterschied.

	EC 3	DIN 18 800	Differenz
max $M_y =$	173,33 kNm	132,22 kNm	- 31,1 %
min $M_y =$	- 120,61 kNm	- 86,63 kNm	- 39,2 %
max $M_z =$	36,98 kNm	24,95 kNm	- 48,2 %
max $\sigma_v =$	79 %	92 %	+ 13,0 %
Biegedrillknicknachweis	100 %	65 %	- 35,0 %
Beulen	29 %	14 %	- 15,0 %
GZG Vertikal	55 %	66 %	+ 11,0 %

**Tabelle 21: Vergleich der Normen**

Obwohl die Schnittgrößen im Eurocode 3 deutlich größer sind, ist der Unterschied in den Nachweisen überraschend gering. Wobei hier zu erwähnen ist, dass der Rechenaufwand bei dem Eurocode größer ist. Allein die Ermittlung aller dynamischen Faktoren ist deutlich aufwendiger als das in der ehemaligen Norm der Fall war. Des Weiteren ist eine händische Bemessung durch die Vielzahl an Lastgruppen fast unmöglich. Wobei es bei der Berechnung vor allem auf die Einordnung des Kranes ankommt.

Die Lebensdauer einer Kranbahn sollte mindestens 20 Jahre betragen, um wirtschaftlich zu sein. Dagegen ist meistens eine genaue Aussage darüber, wie der eingebaute Kran innerhalb dieser Lebenszeit eingesetzt wird, unmöglich. Nicht nur, dass sich in den meisten Unternehmen die Produktion in kürzerer Zeit ändert, sondern es ist auch möglich, dass ein Wechsel des Betriebes innerhalb der 20 Jahren vonstatten, geht. Dabei ist ganz klar, dass der Kran mehr oder weniger belastet wird.

Somit müsste der Kran in eine neue Belastungsklasse bzw. Hubklasse gruppiert werden. Dadurch entstehen neue dynamische Faktoren und somit auch größere bzw. kleinere Schnittgrößen.

Die ganze Bemessung wird also neu ausgeführt. Wenn es jetzt durch höhere Benutzung dadurch kommt, dass der Kranbahnträger größer dimensioniert werden muss, ist es nur noch möglich, einen neuen Kranbahnträger einzubauen.

Zwar ist eine wirtschaftliche Bemessung das Ziel und hinsichtlich Nachhaltigkeit und Umweltschutz sollten auch in Zukunft immer mehr diese Faktoren in das Zentrum rücken.

Trotzdem ist es fraglich, ob bei dem Thema Kranbahn eine so genaue Aussage getroffen werden kann.

Nichtsdestotrotz ist es auffällig, dass sich die Bemessung nicht groß unterscheidet. Vor allem die Querschnittsbemessung hat sich zwischen DIN 18800 und DIN EN 1993-1-1 nicht geändert. Allein die Beanspruchbarkeit hat sich geändert und die Betrachtung der einzelnen Faser gab es in der DIN 18800 auch nicht. Dabei ist aber festzuhalten, dass an diesen Stellen immer wieder Risse auftraten.

Die Berechnung der lokalen Spannungen hat große Ähnlichkeit, nur der Nachweis der Hertzsche Pressung muss heute nicht mehr geführt werden.

Anders sieht es bei den Beul- und Biegedrillknicknachweisen aus. Hier sind zwar immer wieder Ähnlichkeiten zu erkennen, trotzdem hat sich die Bemessung stark geändert. So wurde in der DIN 18800 die Bemessung nicht in zwei Fälle unterteilt und die Bemessung selbst wird anders geführt. Wobei hier zu erwähnen ist, dass der Beulnachweis nach DIN 1993 auch anders geführt werden kann und die Ermittlung der Beulwerte heute auch mit den Tabellen nach Petersen möglich ist. Auch die Einordnung in ein Knickstabähnliches Beulverhalten gibt es in der aktuellen Norm immer noch.

Beim Biegedrillknicken sieht es ganz ähnlich aus. Durch die Möglichkeit, den Nachweis heute in drei unterschiedlichen Verfahren zu führen ergeben sich hinsichtlich Sicherheit und Rechenaufwand Unterschiede. Der in dieser Arbeit gewählte Nachweis unterscheidet sich stark von der DIN 18800. In dieser Norm gab es aber auch bereits schon die Möglichkeit, den Nachweis in unterschiedlicher Art und Weise zu führen.

## 6 Ermüdungsnachweis

### 6.1 Vorbemerkung

Nach DIN EN 1993-6 muss an allen ermüdungskritischen Stellen ein Nachweis nach DIN EN 1993-1-9 geführt werden. Dabei sind solche kritische Stellen Bauteile die Spannungsänderungen infolge vertikaler Radlasten ausgesetzt sind.

Einen Überblick über die Stellen, an denen ein Ermüdungsnachweis geführt wird, zeigt Abbildung 29:

1. Bohrloch für Schienenbefestigung
2. Gewalzter Stegansatz mit Radlasteinleitung
3. Quersteifenanschluss an Oberflansch
4. Quersteifenanschluss an Steg
5. Stirnplattenanschluss an Steg
6. Stirnplattenanschluss an Flansch

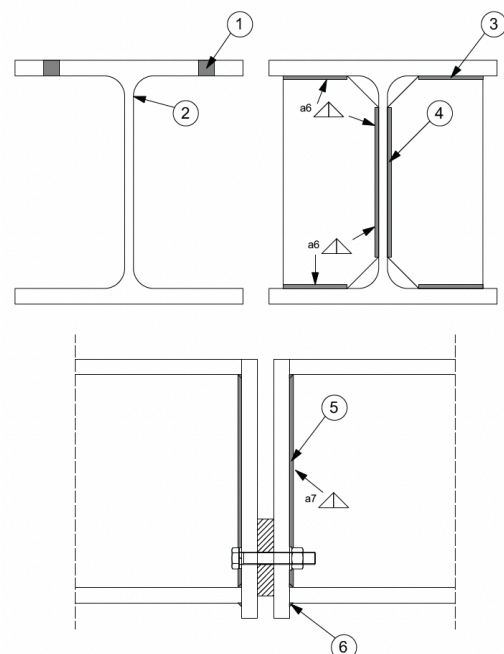


Abbildung 29: Maßgebende Stellen zur Ermüdung

Dabei werden nur die vertikalen Lasten als ermüdungsrelevant angesehen, da die horizontalen Lasten vernachlässigbar sind. Des Weiteren treten die horizontalen Lasten unregelmäßig und nur in wenigen Kranbahnbereichen auf.

Bei dem Nachweis werden folgenden Werte nach den jeweiligen Normen angewendet.

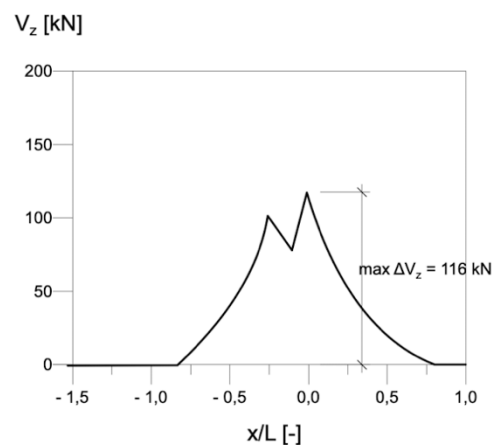
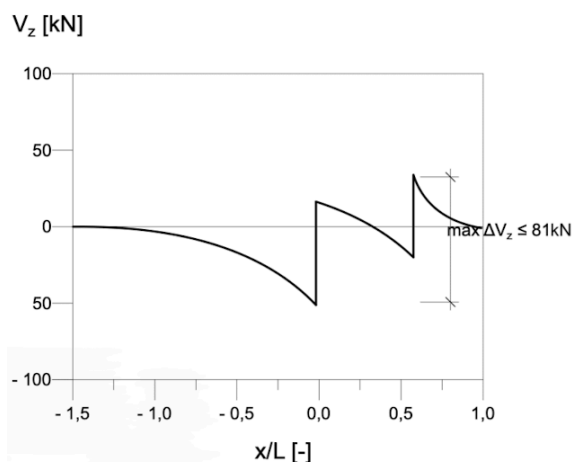
$$\gamma_{Ff} = 1,0 \text{ (DIN EN 1993-6)}$$

$$\gamma_{Mf} = 1,15 \text{ (DIN EN 1993-6/NA)}$$

$$\lambda_{\sigma} = 0,397 \text{ (DIN EN 1991-3 Tab. 2.12)}$$

$$\lambda_{\tau} = 0,575 \text{ (DIN EN 1991-3 Tab. 2.12)}$$

Dabei muss zuerst ein sogenanntes Arbeitsspiel betrachtet werden, um die auftretenden Querkräfte und Momente pro Arbeitsspiel, also pro Überfahrt der Kranbahn zu bestimmen. Dabei wird oftmals die Reservoir-Zählmethode angewendet.



**Abbildung 30: Zeitverlauf der Schnittgrößen in Feldmitte und am Auflager**

Dabei wird in Abbildung 30 ein Arbeitsspiel mit einer Überfahrt dargestellt. Wird dieses Arbeitsspiel gedanklich mit Wassergefühl entsteht ein Reservoir. Am tiefsten Punkt wird nun das Wasser entfernt. Die Veränderung des Wasserstands entspricht der größten Schwingbreite. Im Fall der Schnittgrößen in Feldmitte wären das ca. 81 kN. Nun bleibt jedoch ein Restreservoir übrig. An dieser Stelle muss ein extra „Ablass“ angebracht werden. Somit tritt neben der größten Schwingbreite noch eine von untergeordneter Größe auf.

Nun muss für jede Stelle, an der der Ermüdungsnachweis geführt werden soll, eine Kerbfallgruppe bestimmt werden. Die Kerbfallgruppe gibt eine Beurteilung des Bauteilwiderstandes anhand der Wöhler-Linien an. Dabei steht zur Zuordnung in der DIN EN 1993-1-9 eine ausführliche Tabelle zur Verfügung. Einen kleinen Ausschnitt zeigt Tabelle 22.

Mit Hilfe nachstehender Formel kann so die Ermüdung nach zwei Millionen Überfahrten bestimmt werden:

$$\frac{\lambda_{\sigma} \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_x}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}}$$



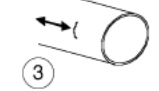




Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160	ANMERKUNG Der Kerbfall 160 ist der höchst mögliche; kein Kerbfall kann bei irgendeiner Anzahl an Spannungsschwingspielen eine höhere Ermüdungsfestigkeit erreichen.   	<u>AC</u> Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse: <u>AC</u> 1) <u>AC</u> Bleche und Flachstähle mit gewalzten Kanten; <u>AC</u> 2) <u>AC</u> Walzprofile mit gewalzten Kanten; <u>AC</u> 3) Nahtlose rechteckige oder runde Hohlprofile.	Kerbfälle 1) bis 3): Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.
140		<u>Gescherte oder brenngeschnittene Bleche:</u> 4) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung 5) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennriefen oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung. Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.	4) Alle sichtbaren Randkerben sind zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen. Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z. B. Schleifen) müssen parallel zu den Spannungen verlaufen. <u>Kerbfälle 4) und 5):</u> Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq 1/4$ ) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut
125			
100 $m = 5$	 	6) und 7) <u>AC</u> Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse entsprechend der Kerbfälle 1), 2), 3) <u>AC</u>	<u>Kerbfälle 6) und 7):</u> $\Delta \tau$ berechnet nach: $\tau = \frac{V S(t)}{I t}$

Tabelle 22: Kerbfallzuordnung [19] DIN 1993-1-9

## 6.2 Detail 1: Bohrloch

$$\sigma_x \rightarrow \text{Kerbfall 90} \quad \Delta \sigma_c = 90 \frac{N}{mm^2}$$

$$M_y = 118 \text{ kNm}$$

Da es sich um ein Walzprofil handelt darf der Druckanteil der Schwingbreite nach DIN 1993-1-9 Absatz 7.2.1 auf 60% reduziert werden.

$$\Delta \sigma_x = 0,6 \cdot \frac{\Delta M_y}{W_{y,1}} = 0,6 \cdot \frac{11800}{1926,25} = 3,68 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_x}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{0,397 \cdot 1,0 \cdot 3,68}{9,0 / 1,15} = 0,19 < 1,0 \quad \checkmark$$

$$\eta = 19 \%$$

## 6.3 Detail 2: Gewalzter Stegansatz

Beim Stegansatz treten mehrere Spannungen gleichzeitig auf. Für jede Spannung wird im Einzelnen der Nachweis geführt, desweiteren muss nach DIN 1993-1-9 bei gleichzeitiger Wirkung mehrer Spannungsschwingbreiten folgender Nachweis erfüllt sein:

$$\left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_E}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_\tau}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0$$

### Kerbfälle

Längsspannung  $\Delta \sigma_x \rightarrow$  Kerbfall 160

$$\Delta \sigma_c = 160 \frac{N}{mm^2}$$

Lokale Drucksp.  $\Delta \sigma_z \rightarrow$  Kerbfall 160

$$\Delta \sigma_c = 160 \frac{N}{mm^2}$$

Schubspannung  $\Delta \tau \rightarrow$  Kerbfall 100

$$\Delta \sigma_c = 100 \frac{N}{mm^2}$$

- Globale Biegespannungen

Bei dieser Betrachtung tritt eine komplette Schwingbreite der Biegespannungen mit Zug- und Druckanteil auf. Somit darf die Spannung nicht reduziert werden.

$$\Delta\sigma_x = \frac{\Delta M_y}{W_{y,2a}} = \frac{11800}{2739,56} = 4,31 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_x}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{0,397 \cdot 1,0 \cdot 4,31}{16,0 / 1,15} = 0,12 < 1,0 \quad \checkmark \quad \eta = 12 \%$$

$$D_{\sigma_x} = 0,12^3 = 0,00$$

- Lokale Druckspannung zentrisch

$$l_{\text{eff}} = 30,44 \text{ cm}$$

$$\sigma_{oz} = \frac{F_z}{l_{\text{eff}} \cdot t_w} = \frac{74}{30,44 \cdot 1,15} = 2,11 \text{ kN/cm}^2$$

- Lokale Druckspannung exzentrisch

Da der Kran in die Beanspruchungsgruppe 3 eingeordnet wurde, muss eine exzentrische Radlast nach DIN 1993-6 Absatz 5.7.3 bei der Ermüdungsberechnung angenommen werden. Diese Biegespannungen  $\sigma_{T,Ed}$  infolge des Torsionsmomentes werden wie folgt berechnet.

Abstand der Quersteifen:  $a = 6000 \text{ cm}$

$$h_w = 22,5 \text{ cm} \quad h_w/a = 0,0015$$

$$\text{Torsionsträgheitsmoment des Flansches: } I_{T,f} = \frac{30 \cdot 2,05^2}{3} = 86,15 \text{ cm}^4$$

$$\text{Exzentrizität der Radlast: } e_y = 0,25 \cdot b_{fr} = 0,25 \cdot 20 = 5 \text{ cm} \quad (\text{DIN 1991-3 2.5.2.1})$$

$$\text{Torsionsmoment: } T_{Ed} = F_{z,Ed} \cdot e_y = 74 \cdot 5 = 370 \text{ kNcm}$$

$$\eta = \left[ \frac{0,75 \cdot a \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot h_w/a)}{\sinh(2 \cdot \pi \cdot h_w/a) - 2 \cdot \pi \cdot h_w/a} \right]^{0,5}$$

$$= \left[ \frac{0,75 \cdot 6000 \cdot 1,15^3}{86,15} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot 0,015)}{\sinh(2 \cdot \pi \cdot 0,015) - 2 \cdot \pi \cdot 0,015} \right]^{0,5} = 35,56$$

$$\sigma_T = \frac{6 \cdot T_{Ed}}{a \cdot t_w^2} \cdot \eta \cdot \tanh(\eta) = \frac{6 \cdot 370}{6000 \cdot (1,15)^2} \cdot 35,56 \cdot \tanh(35,56)$$

$$= 0,28 \cdot 35,56 \cdot 1 = 9,96 \text{ kN/cm}^2$$

Überlagerung der lokalen Druckspannungen

$$\sigma_z = \sigma_{oz} + \sigma_T = 2,11 + 9,96 = 12,07 \text{ kN/cm}^2$$

- Schadensakkumulation

Schädigung aus der einzelnen Schwingbreite:

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_z}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{0,397 \cdot 1,0 \cdot 12,07}{16,0 / 1,15} = 0,34 < 1,0 \quad \checkmark \quad \eta = 34 \%$$

$$D_{\sigma_z} = 0,34^3 = 0,04$$



Schädigung aus einer Überfahrt mit 2 Rädern:

$$\sum D_{\sigma_z} = 2 \cdot 0,04 = 0,08 \leq 1 \quad \checkmark \quad \eta = 08 \%$$

- globale Querkraftschubspannung

Feldmitte

$$\max \Delta V_z = 80,6 \text{ kN}$$

$$\max \Delta \tau_{xz} = \frac{V_z \cdot S_{y,2a}}{I_y \cdot t_w} = \frac{80,6 \cdot 960,09}{30820 \cdot 1,15} = 2,18 \text{ kN/cm}^2$$

Auflager

$$\max \Delta V_z = 116 \text{ kN}$$

$$\max \Delta \tau_{xz} = \frac{V_z \cdot S_{y,2a}}{I_y \cdot t_w} = \frac{116 \cdot 960,09}{30820 \cdot 1,15} = 3,14 \text{ kN/cm}^2$$

zentrische Radlasteinleitung

$$\Delta \tau_{oxz} = 2 \cdot 0,2 \cdot \sigma_{oz} = 2 \cdot 0,2 \cdot 2,11 = 0,84 \text{ kN/cm}^2$$

Überlagerung von lokalen und globalen Schubspannungen in Feldmitte

$$\Delta \tau = \Delta \tau_{xz} \cdot \Delta \tau_{oxz} = 2,18 \cdot 0,84 = 3,02 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_T \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \tau}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mf}} = \frac{0,575 \cdot 1,0 \cdot 3,02}{10,0 / 1,15} = 0,20 < 1,0 \quad \checkmark \quad \eta = 20 \%$$

Überlagerung von lokalen und globalen Schubspannungen am Auflager

$$\Delta \tau = 3,14 + 0,84 = 3,98 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_T \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \tau}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mf}} = \frac{0,575 \cdot 1,0 \cdot 3,984}{10,0 / 1,15} = 0,26 < 1,0 \quad \checkmark \quad \eta = 26 \%$$

$$D_{\sigma_\tau} = 0,26^5 = 0,00$$

Kombinierte Schädigung verschiedener Spannungsarten

$$D = D_{\sigma_x} + D_{\sigma_z} + D_{\sigma_\tau} = 0,00 + 0,08 + 0,00 = 0,08 < 1,0 \quad \checkmark \quad \eta = 08 \%$$

#### 6.4 Detail 3: Quersteifenanschluss an Oberflansch

- Grundmaterialversagen:  $\Delta \sigma_x \rightarrow$  Kerbfall 80  $\Delta \sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$
- Nahtversagen:  $\Delta \sigma_z \rightarrow$  Kerbfall 36  $\Delta \sigma_c = 36 \text{ N/mm}^2$
- globale Biegespannungen

$$M_y = 118 \text{ kNm}$$

$$\Delta \sigma_x = \frac{\Delta M_y}{W_{y,2}} = \frac{11800}{2209,32} = 5,34 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_x}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{0,397 \cdot 1,0 \cdot 5,34}{8,0 / 1,15} = 0,30 < 1,0 \quad \checkmark \quad \eta = 30 \%$$



- lokale Druckspannung aus zentrischer Radlasteinleitung

Steg an der Unterkante des Oberflansches

$$l_{\text{eff},1} = 4,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{rf}}{t_w}} = 4,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{422,36}{1,15}} = 30,44 \text{ cm}$$

Quersteifen ( $t_s = 15 \text{ mm}$ )

$$l_{\text{eff},2} = 4,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{rf}}{t_s}} = 4,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{422,36}{1,5}} = 27,86 \text{ cm}$$

- Spannungen in Schweißnähten ( $a = 6 \text{ mm}$ )

$$\sigma_{oz} = \frac{F_z}{(l_{\text{eff},1} \cdot t_w + l_{\text{eff},2} \cdot 2 \cdot a)} = \frac{74}{(30,44 \cdot 1,15 + 30,44 \cdot 2 \cdot 0,6)} = 1,03 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_{oz}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{0,397 \cdot 1,0 \cdot 1,03}{3,6 / 1,15} = 0,13 < 1,0 \quad \checkmark$$

$$\eta = 13 \%$$

## 6.5 Detail 4: Quersteifenanschluss an Steg

Normalspannung quer zur Naht

$$\Delta \sigma_x \rightarrow \text{Kerbfall 80} \quad \Delta \sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{wie bei Detail 3: } D_{\sigma_x} \leq 0,30^3$$

Lokale Druckspannung längs der Naht

$$\Delta \sigma_z \rightarrow \text{Kerbfall 100} \quad \Delta \sigma_c = 100 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_{oz}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{0,397 \cdot 1,0 \cdot 1,03}{10,0 / 1,15} = 0,047 < 1,0 \quad \checkmark$$

$$\eta = 5 \%$$

$$D_{\sigma_{oz}} \leq 0,047^3$$

$$D = D_{\sigma_x} + D_{\sigma_{oz}} = 0,3^3 + 0,047^3 = 0,03 < 1,0 \quad \checkmark$$

$$\eta = 3 \%$$

## 6.6 Detail 5: Stirnplattenanschluss an Steg

- Schubspannung:  $\Delta \tau \rightarrow \text{Kerbfall 80} \quad \Delta \sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$

Doppelkehlnaht ( $2 \cdot 7 \text{ mm}$ )

$$\max \Delta V \leq 116 \text{ kN}$$

$$\max \Delta \tau_{xz} = \frac{V \cdot S_{y,\max}}{I_y \cdot t} = \frac{116 \cdot 1032,86}{30820 \cdot 2 \cdot 0,7} = 2,78 \text{ kN/cm}^2$$

Im Schwerpunkt abgeklungen nach DIN EN 1993-6 [Abs. 5.7.2(2)]

$$z = 160 \text{ mm} > 0,2 \cdot h_w = 0,2 \cdot 225 = 45 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$\frac{\lambda_T \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_{oz}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mf}} = \frac{0,575 \cdot 1,0 \cdot 2,78}{8,0 / 1,15} = 0,23 < 1,0 \quad \checkmark$$

$$\eta = 23 \%$$

## 6.7 Detail 6: Stirnplattenanschluss an Flansch

- Normalspannung quer zur Naht

$$\Delta \sigma_z \rightarrow \text{Kerbfall 80} \quad \Delta \sigma_c = 80 \, \text{N/mm}^2$$

$$\text{Kopfplatte: } b = 32 \, \text{cm} \quad t = 3 \, \text{cm}$$

$$\max \Delta V \leq 116 \, \text{kN}$$

$$\max \Delta \sigma_z = \frac{V}{b \cdot t} = \frac{116}{32 \cdot 3} = 1,21 \, \text{kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \sigma_z}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{0,397 \cdot 1,0 \cdot 1,21}{8,0 / 1,15} = 0,07 < 1,0 \quad \checkmark$$

$$\eta = 7 \, \%$$

Somit sind auch die Ermüdungsnachweise nach EC 3 erbracht.

## 7 Fazit

Die Einführung des Eurocodes war in diesem Themengebiet dringend notwendig. Durch die Vielzahl von unterschiedlichen Normen war die Bemessung mit viel Lesearbeit verbunden. Ohne Fachliteratur war es fast unmöglich, in dem Wirrwarr der DIN 4132 und DIN 18800 einen Durchblick zu erhalten.

Trotzdem ist die Schnittgrößenermittlung heute deutlich aufwändiger und ohne den Computer fast unmöglich. Durch die Vielzahl an Lastgruppen und daraus resultierenden Lastbildern ist es nur möglich, eine ungefähre händische Schnittgrößenermittlung durchzuführen. Wenn man dann den Unterschied zu den Schnittgrößen der ehemaligen Norm betrachtet, ist die Frage gerechtfertigt, ob sich der Mehraufwand lohnt.

Bei den Nachweisen ist diese Pauschalaussage nicht so einfach zu treffen. Bei einzelnen Nachweisen ist die DIN 18800 einfacher anzuwenden, bei anderen wiederum die DIN EC 1993. Die Ergebnisse zeigen, dass nach beiden Normenteilen der gewählte Träger einzusetzen ist.

Im Vergleich zwischen händischen Berechnungen und Computerprogrammen ist es schon deutlich komplizierter. Vor allem durch die dynamischen Faktoren und unzähligen Lastgruppen ist es schwer, „hinter“ die Berechnung zu sehen. Auffällig bei den Frilo- und bei den Dlubal-Ausdrucken, die sich auch im Anhang befinden, ist dass die Nachweise mit den händisch berechneten Nachweisen gut einhergehen. Dabei stellt bei Dlubal das Kranbahnprogramm ein unabhängiges Einzelprogramm da, welches nur für die Kranbahn benutzt werden kann.

Die Ausdrücke zeigen nur die wichtigsten Daten der Ausgabe. Die Anwendung der Programme erschien auf den ersten Blick einfach, jedoch ergaben die ersten Ergebnisse große Abweichungen im Vergleich zu den händischen Berechnungen. Dabei waren es oft die Kleinigkeiten, welche im Programm gesucht werden mussten, wie z.B. die Eingabe der dynamischen Faktoren. In dem Dlubal-Ausdruck sind auch die Schnittgrößen zu erkennen, während diese leider bei Frilo nicht ausgegeben werden. Dabei ist gut zu erkennen, dass die Schnittgrößen in etwa mit der Berechnung der Schneider Bautabellen übereinstimmen. Vor allem die Momente sind genauso groß wie nach der händischen Bemessung. So wundert es auch nicht, dass der Spannungsnachweis fast mit dem gleichen Wert geführt wird.

Anders sieht es beim Beul- wie auch bei den Verformungsnachweisen aus. Diese sind zwar eingehalten, weichen jedoch von den händischen Ergebnissen ab. Im Programm selbst konnte ein genauer Beulnachweis betrachtet werden, der zeigte, dass die Beiwerte identisch zu den händischen Werten sind. Daher verwundert das Endergebnis.

Leider wird im Programm kein Biegedrillknicknachweis angeboten, sodass dieser Nachweis mit einem extra Programm geführt werden muss.

Ähnlich sieht es auch bei dem Programm von Frilo aus. Die Querschnittsnachweise und lokalen Lasteinleitungen sind mit ähnlichen Ergebnissen wie nach der händischen Bemessung geführt. Positiv ist hierbei, dass die Eingabe direkt in das Biegedrillknickprogramm übernommen werden kann. Dieser Nachweis hat einen extra Ausdruck, zeigt aber eine größere Ähnlichkeit zu den berechneten Ergebnissen.

Interessant wäre es sicherlich, die Schadensbilder bestehender Kranbahnen zu betrachten und auszuwerten, um zu erkennen, nach welcher Norm eine Kranbahn einen Lebenszyklus von 20 Jahren „besser“ übersteht.

Mein ganz persönliches Fazit fällt positiv aus. Zwar fiel man innerhalb der Bearbeitungszeit immer wieder in ein „Loch“, in welchem das Ende nicht mehr zu sehen war. Doch durch eine kleine Anzahl an Fachliteratur ist das Themengebiet gut zu bearbeiten. Es ist beeindruckend, wie ein dynamisches System heruntergebrochen werden und durch simple, manchmal auch etwas kompliziertere Gleichungen berechnet werden kann.

Die Betrachtung der ehemaligen Norm erlaubte es mir auch, manche Hintergründe des Eurocodes besser zu verstehen. Hinsichtlich der aktuellen Tendenz weg vom Neubau und hin zu Ertüchtigungen der aktuellen Bauwerke ist es ein Vorteil, auch ältere Normen zu kennen und zu verstehen.

Das Themengebiet der Kranbahn wirkt im ersten Augenblick nicht als Bestandteil des Aufgabengebietes eines Bauingenieurs. Jedoch darf man nicht unterschätzen, wie häufig eine solche anzufinden ist. Ich bin froh, dass ich innerhalb dieser Arbeit einen guten Eindruck des Themas erhalten habe. Wobei es auch ganz klar ist, dass zur Kranbahn noch einiges mehr dazu gehört. So müssen auch die Auflager, Stützen und konstruktiven Anschlüsse betrachtet werden. Auch durch eine höhere Einstufung oder einen geschweißten Träger wird das Thema Kranbahn noch einmal ein bisschen komplizierter.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Skripte Prof. Dr.-Ing. Markus Enders-Comberg
- [2] Skripte Prof. Dr.-Ing. Christian Lang
- [3] Dlubal Software GmbH. RStab 8. Tiefenbach, DE
- [4] FRILO Software GmbH. FRILO. Stuttgart, DE
- [5] ComputerWorks GmbH. Vectorworks. Lörrach, DE
- [6] Bautabellen Schneider, 20. Auflage 2012
- [7] Handbuch Maschinenbau, Springer, 24 Auflage 2021
- [8] Krane und Kranbahnen, Teubner, 1988
- [9] Stahlbau 1, Springer, 25. Auflage 2016
- [10] Stahlbau 2, Springer, 21. Auflage 2020
- [11] Lastannahmen-Einwirkungen auf Tragwerke, Springer, 2019
- [12] Praxisbeispiele für Einwirkungen nach neuen Normen, Bauwerk, 2007
- [13] <https://www.frilo.eu/handbuecher-frilo-statik-programme/> (Stand: 21.08.2023)
- [14] <https://vogt-hebetechnik.de/krantechnik/hallenkrane/eintraegerbrueckenkran/> (Stand: 02.02.2024)
- [15] <https://sf-ag.com/bibliothek/berechnungs-und-nachweisverfahren-fuer-kranbahntraeger/> (Stand: 01.03.2024)
- [16] DIN EN 1991-3 Einwirkung infolge von Kranen und Maschinen
- [17] DIN EN 1993-1-1 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
- [18] DIN EN 1993-1-5 Eurocode 3: Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile
- [19] DIN EN 1993-1-9 Eurocode 3: Teil 1-9: Ermüdung
- [20] DIN EN 1993-6 Kranbahnen
- [21] DIN 18800 Stahlbauten
- [22] Anpassungsrichtlinie Stahlbau zu DIN 18800 (November 1990)
- [23] DIN 4132 Kranbahnen
- [24] DIN 15018 Teil 1 Krane
- [25] Aktuelle Berechnungs- und Nachweisverfahren für Kranbahnträger, Christoph Seeßelberg

## 9 Anhang

### Anhang 1: Aufgabenstellung

architektur und  
bauingenieurwesen  
htw saar

Prof. Dr.-Ing. Markus Enders-Comberg  
M.Enders-Comberg@htwsaar.de

Hochschule für  
Technik und Wirtschaft  
des Saarlandes  
University of  
Applied Sciences

Fakultät für  
Architektur und  
Bauingenieurwesen  
School of Architecture  
and Civil Engineering

Januar 2024

# BACHELORAUFGABE – PASCAL BADE

aus dem Gebiet des Konstruktiven Ingenieurbaus (Stahlbau)

## BETRACHTUNG UNTERSCHIEDLICHER NACHWEISKONZEPTE EINER KRANBAHN IN EINER STAHLBAUHALLE

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist eine Kranbahn aus Stahl mit einer maximal anzuhängenden Last von 12,5 t in einer Stahlindustriehalle zu konstruieren und zu bemessen. Hierfür soll die Bemessung nach Eurocode 3 erfolgen und mit der ehemals gültigen nationalen Norm DIN 18800 verglichen werden.

Im Rahmen der Bachelorarbeit sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- a) Darstellung und Ermittlung der maßgebenden Laststellungen
- b) Händische Bemessung des Kranträgers nach Eurocode 3 und DIN 18800
- c) Vergleich der zwei unterschiedlichen Bemessungskonzepte
- d) Ermüdungsbemessung an maßgebenden Stellen

Die Ergebnisse der Bachelorarbeit sollen in einem 20-minütigen Vortrag vorgestellt werden.

**Ausgabe:** 25.01.2024

**Abgabe:** 22.03.2024

**Abgegeben am:**



Prof. Dr.-Ing. M. Enders-Comberg

## Anhang 2: Frilo Ausgabe

### Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 1

### Position: Nachweis Kranbahnträger

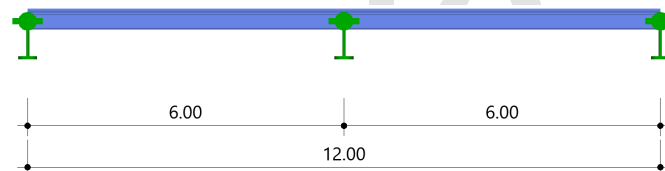
Kranbahnträger (x64) S9+ 01/2023 (FRILO R-2023-1/P06)

#### Grundparameter

Bemessungsnorm	:	DIN EN 1993-6/NA-2010-12
Sicherheitskonzept/Lastkombinatorik	:	DIN EN 1990/NA:2010-12
Kombination ständiger Lasten	:	untereinander mit $\gamma_{G,sup}$ und $\gamma_{G,inf}$
Querschnittsbemessung	:	elastisch
Systemtragfähigkeit	:	Theorie II. Ordnung
Bemessungskonzept	:	Konzept der Schadenstoleranz
Inspektionsintervalle	:	3
Schubspannungen infolge primärer Torsion	:	berücksichtigt
Schubspannungen infolge sekundärer Torsion	:	berücksichtigt
Bemessungssituation Gebrauchstauglichkeit	:	charakteristisch
Nachweis Absolutverformung in y mit $\delta_{lim}$	=	1.0 cm
Nachweis Absolutverformung in z mit $\delta_{lim}$	=	1.2 cm

#### System

Maßstab 1 : 100



#### Kranbahnträger

Gesamtlänge = 12.00 m  
Material S235

#### Querschnitt KBTR

##### Statische Werte

Bezeichnung	$I_y$ [cm <sup>4</sup> ]	$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	$I_t$ [cm <sup>4</sup> ]	$I_w$ [cm <sup>6</sup> ]	$\max_w$ [cm <sup>2</sup> ]	$A$ [cm <sup>2</sup> ]	$z_s$ [mm]	$z_M$ [mm]
KBTR	31365.0	10249.0	438.1	2068712	224.6	161.3	0	0
Schiene 75 %	31201.7	10216.9	225.1	2068712	224.6	161.3	0	0
Schiene 87.5 %	31347.4	10247.6	225.1	2068712	224.6	161.3	0	0

#### Abmessungen

Profil HEB 320	$h$ = 320 mm	
Steg (lichte Höhe)	$h_1$ = 225 mm	$s$ = 12 mm
Obergurt	$b_o$ = 300 mm	$t_o$ = 21 mm
Untergurt	$b_u$ = 300 mm	$t_u$ = 21 mm
Kranschiene KSA 75 (nicht mittragend)		
Abmessungen	$b_o$ = 75 mm	$b_u$ = 200 mm
Kopfdicke	$t_o$ = 35 mm	$c_o$ = 40 mm
Abnutzung	$t_{o,red}$ = 26 mm	$t_{o,red,fat}$ = 31 mm
Gesamtquerschnitt		
Schwerpunkt zu Profilmitte	$z_s$ = 0 mm	Schwerpunkt zu Stegmitte $z_s$ = 0 mm
Schwerpunkt zu Schubmittelpunkt	$z_m$ = 0 mm	

## Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 2

### Spannungspunkte

Punkt	O-Punkt		S-Punkt		M-Punkt		Verwölbung $\omega$ [cm <sup>2</sup> ]	Kerfallart	Kerfall		
	$y_o$ [mm]	$z_o$ [mm]	$y_s$ [mm]	$z_s$ [mm]	$y_M$ [mm]	$z_M$ [mm]			$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_z$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{xz}$
1	-150	-160	-150	-160	-150	-160	-224.6	Profil	160	160	100
2	0	-160	0	-160	0	-160	0.0				
3	150	-160	150	-160	150	-160	224.6	Profil	160	160	100
4	-150	160	-150	160	-150	160	224.6	Profil	160	160	100
5	0	160	0	160	0	160	0.0				
6	150	160	150	160	150	160	-224.6	Profil	160	160	100
7	-6	-113	-6	-113	-6	-113	0.0	Profil	160	160	100
8	-6	113	-6	113	-6	113	0.0	Profil	160	160	100
9	-6	0	-6	0	-6	0	0.0				
17	6	-113	6	-113	6	-113	0.0	Profil	160	160	100
18	6	113	6	113	6	113	0.0	Profil	160	160	100
19	6	0	6	0	6	0	0.0				

### Auflager

#### Lagerbedingungen - Verschiebung

Nr	$x$ [m]	Verschiebungen *)		Abstände	
		$v$ [kN/m]	$w$ [kN/m]	$y$ [mm]	$z$ [mm]
1	0.00	-1	-1	0	0
2	6.00	-1	-1	0	0
3	12.00	-1	-1	0	0

\*) -1 = starr, 0 = frei, > 0 = elastisch

#### Lagerbedingungen - Verdrehungen

Nr	$x$ [m]	Verdrehungen *)			Verwölbung *) $\Omega_{y,z}$ [kNm <sup>3</sup> ]
		$\Phi_x$ [kNm/rad]	$\Phi_y$ [kNm/rad]	$\Phi_z$ [kNm/rad]	
1	0.00	-1	0.0	0.0	0.00
2	6.00	-1	0.0	0.0	0.00
3	12.00	-1	0.0	0.0	0.00

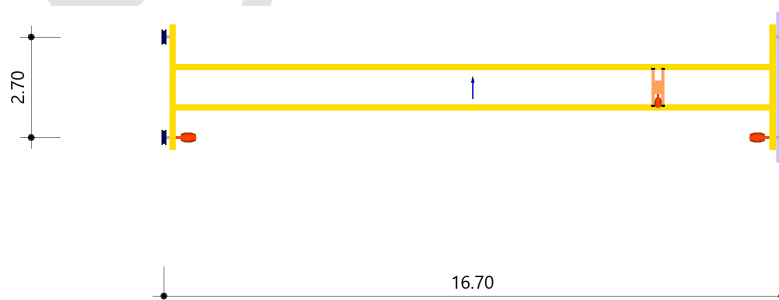
\*) -1 = starr, 0 = frei, > 0 = elastisch

### Belastung

#### Kransystem und Krane

##### Kranparameter

Kranart : Aufgesetzter Brückenlaufkran  
Anzahl Krane = 1  
Spannweite Kranbrücke = 16.70 m  
Erdbebenlasten : nicht berücksichtigt





## Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 3

### Kran

Kran [Nr]	Bezeichnung	HC	Si	System	Spurführung	v0 [m/min]	vh [m/min]
1	Kran 1	2	3	IFF	Spurkranz	40.00	5.00

### Kranlasten

Kran [Nr]	Achse [j]	ai [m]	ei [m]	Qc [kN]	Qh [kN]	Qr [kN]	Qr,min [kN]	HT [kN]	HS [kN]
1	1	0.00	0.00	15.9	58.1	74.0	13.2	5.7	18.0
	2	2.70	2.70	16.4	58.1	74.5	13.4	-5.7	0.0

### Lastdefinitionen

Art 1 =	Gleichlast	kN/m	5 =	Dreieckslast über l	kN/m
2 =	Einzellast	kN	6 =	Trapezlast über l	kN/m
3 =	Einzelmoment	kNm	7 =	Bereichstorsionsmoment	kNm/m
4 =	Trapezlast	kN/m	8 =	Normalkraftverlauf	kN/m

### Lastfall 1: Eigengewicht

Art	in/um	Pli	a [m]	Pre	l [m]	ey [mm]	ez [mm]	Bemerkungen zur Last
1	z	1.27				0	0	Träger-g0
1	z	0.57				0	-195	Schiene-g1

Einwirkungsgruppe 99 - ständig

### Lastfall 2: Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max

Art	in/um	Pli	a [m]	Pre	l [m]	ey [mm]	ez [mm]	Bemerkungen zur Last
2	z	15.9	2.70				-245	Qc,2,1,max,ncrane=1
2	z	16.4	0.00				-245	Qc,2,2,max,ncrane=1

Einwirkungsgruppe 120 - Kranlastgruppe - Qc  
Einzellasten werden als bewegte Lasten angesetzt

### Lastfall 3: Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max

Art	in/um	Pli	a [m]	Pre	l [m]	ey [mm]	ez [mm]	Bemerkungen zur Last
2	z	58.1	2.70				-245	Qh,2,1,max,ncrane=1
2	z	58.1	0.00				-245	Qh,2,2,max,ncrane=1

Einwirkungsgruppe 121 - Kranlastgruppe - Qh  
Einzellasten werden als bewegte Lasten angesetzt

### Lastfall 4: Kran 1 - Massekräfte HT

Art	in/um	Pli	a [m]	Pre	l [m]	ey [mm]	ez [mm]	Bemerkungen zur Last
2	y	5.7	2.70			0		HT,2,1,ncrane=1
3	x	1.40	2.70					Mx(HT,2,1,ncrane=1)
2	y	-5.7	0.00			0		HT,2,2,ncrane=1
3	x	-1.40	0.00					Mx(HT,2,2,ncrane=1)

Einwirkungsgruppe 121 - Kranlastgruppe - Qh  
Einzellasten werden als bewegte Lasten angesetzt

### Lastfall 5: Kran 1 - Schräglaufräfte HS

Art	in/um	Pli	a [m]	Pre	l [m]	ey [mm]	ez [mm]	Bemerkungen zur Last
2	y	18.0	2.70			0		HS,2,1,ncrane=1
3	x	4.41	2.70					Mx(HS,2,1,ncrane=1)

Einwirkungsgruppe 121 - Kranlastgruppe - Qh  
Einzellasten werden als bewegte Lasten angesetzt

# Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 4

## Berechnung nach DIN EN 1993-6/NA-2010-12

Kranfahrt 1: LG 1: Qc+Qh+HT - STR P/T

### Überlagerungsfaktoren

Nr.	Lastfall	LG	$\phi$	$\gamma$	$\psi$	$\phi \cdot \gamma \cdot \psi$
1	Eigengewicht		1.00	1.35	1.00	1.35
2	Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max	1	1.10	1.35	1.00	1.49
3	Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max	1	1.13	1.35	1.00	1.52
4	Kran 1 - Massekräfte HT	1	1.50	1.35	1.00	2.03

Querschnittsnachweis nach Gleichung 6.1 - Theorie II. Ordnung  $\gamma_{M0} = 1.10$

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
0.00	19	1	0.0	-52.3	90.5	213.6	0.42
0.12	19	1	-0.04	-52.2	90.4	213.6	0.42
0.23	19	1	-0.1	-52.2	90.4	213.6	0.42
0.23	17	1	-13.6	-18.2	34.4	213.6	0.16
0.35	8	1	15.5	-18.2	35.2	213.6	0.16
0.47	17	1	-17.4	-18.2	36.0	213.6	0.17
0.59	5	1	27.5	14.7	37.5	213.6	0.18
0.70	5	1	30.2	14.7	39.5	213.6	0.18
0.82	1	1	-38.3	10.2	42.2	213.6	0.20
0.94	1	1	-43.3	10.1	46.7	213.6	0.22
1.06	1	1	-48.3	9.9	51.2	213.6	0.24
1.17	1	1	-53.2	9.7	55.8	213.6	0.26
1.29	1	1	-58.2	9.4	60.4	213.6	0.28
1.41	1	1	-63.2	9.0	65.1	213.6	0.30
1.53	1	1	-68.1	8.7	69.8	213.6	0.33
1.64	1	1	-73.1	8.2	74.5	213.6	0.35
1.76	1	1	-78.1	7.7	79.2	213.6	0.37
1.88	1	1	-83.1	7.2	84.0	213.6	0.39
2.00	1	1	-88.1	6.6	88.8	213.6	0.42
2.35	1	1	-103.2	4.4	103.5	213.6	0.48
2.47	1	1	-108.3	3.5	108.4	213.6	0.51
2.58	1	1	-113.4	2.6	113.5	213.6	0.53
2.70	1	1	-118.6	1.6	118.6	213.6	0.56
2.82	1	1	-123.8	0.6	123.8	213.6	0.58
2.94	1	1	-129.1	0.6	129.1	213.6	0.60
3.05	1	1	-121.2	1.7	121.3	213.6	0.57
3.17	1	1	-113.4	2.7	113.5	213.6	0.53
3.29	1	1	-105.7	3.7	105.9	213.6	0.50
3.41	1	1	-97.9	4.6	98.3	213.6	0.46
3.53	1	1	-90.3	5.4	90.8	213.6	0.42
3.64	1	1	-82.6	6.1	83.3	213.6	0.39
3.76	1	1	-75.1	6.7	75.9	213.6	0.36
3.88	1	1	-67.5	7.3	68.7	213.6	0.32
4.00	1	1	-59.9	7.8	61.4	213.6	0.29
4.11	1	1	-52.4	8.2	54.3	213.6	0.25
4.23	18	1	21.0	25.4	48.7	213.6	0.23
4.35	18	1	17.7	25.6	47.8	213.6	0.22
4.47	19	1	0.2	27.4	47.4	213.6	0.22
4.59	19	1	0.2	27.6	47.7	213.6	0.22
4.70	19	1	0.1	27.7	48.0	213.6	0.22
4.82	19	1	0.1	27.8	48.1	213.6	0.23
4.94	19	1	0.02	27.9	48.2	213.6	0.23
5.06	19	1	-0.03	27.9	48.3	213.6	0.23
5.18	19	1	-0.1	27.9	48.3	213.6	0.23
5.29	19	1	-0.1	27.8	48.2	213.6	0.23
5.41	19	1	-0.2	27.7	48.0	213.6	0.22
5.53	19	1	-0.2	27.6	47.8	213.6	0.22
5.65	18	1	-19.0	25.8	48.6	213.6	0.23
5.76	1	1	52.7	7.0	54.1	213.6	0.25
5.88	1	1	60.4	6.4	61.4	213.6	0.29
6.00	1	1	68.2	5.7	68.9	213.6	0.32
6.12	1	1	65.1	5.0	65.7	213.6	0.31
6.24	1	1	62.1	4.4	62.6	213.6	0.29

**Bachelorthesis**

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 5

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
6.36	1	1	59.3	3.8	59.7	213.6	0.28
6.48	1	1	56.6	3.3	56.9	213.6	0.27
6.60	1	1	54.1	2.8	54.3	213.6	0.25
6.72	1	1	51.7	2.3	51.8	213.6	0.24
6.84	1	1	49.3	1.9	49.5	213.6	0.23
6.96	1	1	47.1	1.6	47.2	213.6	0.22
7.08	1	1	45.0	1.3	45.1	213.6	0.21
7.80	1	1	34.0	0.05	34.0	213.6	0.16
8.40	1	1	26.6	0.6	26.6	213.6	0.12
8.52	1	1	25.3	0.7	25.3	213.6	0.12
9.00	1	1	20.4	0.9	20.4	213.6	0.10
11.16	18	1	-2.2	-2.8	5.3	213.6	0.02
11.88	19	1	-0.01	-2.4	4.2	213.6	0.02
12.00	19	1	0.0	-2.3	4.0	213.6	0.02

**Lokale Radlasteinleitung am Obergurt bei x = 6.12 m**

$\eta = 0.47 \leq 1$  Nachweis erfüllt

Kranschiene : Höhe  $h_{eff} = 76$  mm Obergurt : Breite  $b_{eff} = 297$  mm  
 Querschnitt : Breite  $b_r = 200$  mm Dicke  $t_o = 21$  mm  
 Fläche  $A_{eff} = 125.6$  cm<sup>2</sup>  $I_{y,effektiv}$  : gesamt  $I_{rf} = 911.3$  cm<sup>4</sup>  
 Schwerpunkt  $e_1 = 40$  mm Kranschiene  $I_r = 381.7$  cm<sup>4</sup>  
 Stegdicke  $t_w = 12$  mm Obergurt  $I_{f,eff} = 21.3$  cm<sup>4</sup>  
 Lastausbreitungslänge : effektiv  $l_{eff} = 229$  mm  
 gesamt  $x_w = 283$  mm Unterkante Obergurt  $z = 27$  mm

x [m]	$Q_{r,Ed}$ [kN]	$\sigma_{oz,Ed}$	$\tau_{oxz,Ed}$	$\tau_{  ,Ed}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{  }$	$\sigma_{x,Ed}$	$\sigma_v$	$\eta$
6.12	112.9	34.7	6.9	53.9	60.8	29.7	109.5	0.47
5.88	112.1	34.4	6.9	54.3	61.1	21.8	106.7	0.45

## Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 6

### Nachweis auf Stegbeulen im Feld bei $x = 5.88 \text{ m}$

Abmessungen  
Beulfeld:  $a = 12000 \text{ mm}$  Länge = Abstand der Quersteifen  
 $b = 279 \text{ mm}$  Breite = Steghöhe  
 $t_w = 12 \text{ mm}$  Dicke = Stegdicke

Bemessungswerte:  $F_{Ed} = 112.1 \text{ kN}$  Radlast einschließlich Schwingbeiwert  
 $M_{y,Ed} = -59.54 \text{ kNm}$  Biegemoment  
 $V_{z,Ed} = -190.4 \text{ kN}$  Querkraft

Beanspruchbarkeit des Steges : Plattenbeulen bei Querbelastung EN1993-1-5 Abs.6  $\gamma_{M1} = 1.10$

$F_{Ed}/F_{R,d} =$   $F_{R,d} = 1077.4 \text{ kN}$   
 $\eta_2 = 0.10 \leq 1$   
Ideale Verzweigungslast  $F_{cr} = 6181.6$   
starre Lastausbreitungslänge  $s = 188 \text{ mm}$   $I_{eff} \cdot 2 \cdot t_{\text{Flansch}}$   
Beiwerte  $m_1 = 26.09$   
 $m_2 = 0.00$   
Beulwert  $k_F = 6.00$   
Schlankheitsgrad  $\Lambda_F = 0.44$   
Abminderungsfaktor  $\chi_F = 1.00$   
wirksame Lastausbreitungslänge  $I_y = 439 \text{ mm}$   $I_y \cdot \chi_F$   
 $L_{eff} = 439 \text{ mm}$

Beanspruchbarkeit des Steges : Schubbeulen EN1993-1-5 Abs.5  $\gamma_{M1} = 1.10$

$V_{Ed}/V_{b,Rd} =$   $V_{b,Rd} = 474.9 \text{ kN}$   
 $\eta_3 = 0.40 \leq 1$   
 $M_{Rd} = 432.85 \text{ kNm}$  Interaktion M/N nicht erforderlich  
Schlankheitsgrad  $\Lambda_w = 0.008$   
Abminderungsfaktor  $\chi_w = 1.20$

Nachweis der Längsspannungen mit wirksamen Querschnittsgrößen  $\gamma_{M0} = 1.00$

$\eta_1 = 0.13 \leq 1$   
 $W_{eff} = 1926.0 \text{ cm}^3$

Interaktion zwischen Biegung und Querlast nach EN1993-1-5 Gl(7.2)

$\eta_{7.2} = 0.15 \leq 1$   $(\eta_1 + 0.8 \cdot \eta_2)/1.4$

Interaktion zwischen Querkraft und Querlast nach DIN EN1993-1-5/NA Gl(NA.7)

$\eta_{DIN} = 0.00 \leq 1$

Nachweisführung

$\eta_{max} = 0.40 \leq 1$

Nachweis erfüllt

### Kranfahrt 2: LG 5: Qc+Qh+HS - STR P/T

#### Überlagerungsfaktoren

Nr.	Lastfall	LG	$\phi$	$\gamma$	$\psi$	$\phi \cdot \gamma \cdot \psi$
1	Eigengewicht		1.00	1.35	1.00	1.35
2	Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max	5	1.00	1.35	1.00	1.35
3	Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max	5	1.00	1.35	1.00	1.35
5	Kran 1 - Schräglaufräfte HS	5	1.00	1.35	1.00	1.35

#### Querschnittsnachweis nach Gleichung 6.1 - Theorie II. Ordnung $\gamma_{M0} = 1.10$

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{y,d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
0.00	19	1	0.0	-52.8	91.5	213.6	0.43
0.12	19	1	0.1	-52.7	91.3	213.6	0.43
0.23	19	1	0.1	-52.6	91.0	213.6	0.43
0.35	19	1	0.2	-52.4	90.7	213.6	0.42
0.35	5	1	24.9	26.0	51.5	213.6	0.24
0.47	1	1	-40.5	21.4	54.9	213.6	0.26
0.59	1	1	-45.9	21.1	58.7	213.6	0.27
0.70	1	1	-51.4	20.8	62.8	213.6	0.29
0.82	1	1	-57.0	20.4	67.0	213.6	0.31
0.94	1	1	-62.5	19.9	71.4	213.6	0.33
1.06	1	1	-68.1	19.4	75.9	213.6	0.36
1.17	1	1	-73.7	18.7	80.6	213.6	0.38
1.29	1	1	-79.4	18.1	85.4	213.6	0.40
1.41	1	1	-85.1	17.3	90.3	213.6	0.42
1.53	1	1	-90.9	16.5	95.3	213.6	0.45

Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 7

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
1.64	1	1	-96.8	15.6	100.5	213.6	0.47
1.76	1	1	-102.7	14.6	105.7	213.6	0.49
1.88	1	1	-108.7	13.6	111.2	213.6	0.52
2.00	1	1	-114.7	12.4	116.7	213.6	0.55
2.23	1	1	-127.1	9.8	128.3	213.6	0.60
2.35	1	1	-133.5	8.4	134.3	213.6	0.63
2.47	1	1	-140.0	6.8	140.5	213.6	0.66
2.58	1	1	-146.6	5.2	146.8	213.6	0.69
2.70	1	1	-153.3	3.4	153.4	213.6	0.72
2.82	1	1	-160.2	1.5	160.2	213.6	0.75
2.94	1	1	-167.3	0.6	167.3	213.6	0.78
3.05	1	1	-174.5	2.8	174.6	213.6	0.82
3.17	1	1	-162.7	5.0	162.9	213.6	0.76
3.29	1	1	-151.1	7.0	151.5	213.6	0.71
3.41	1	1	-139.6	8.8	140.4	213.6	0.66
3.53	1	1	-128.3	10.4	129.6	213.6	0.61
3.64	1	1	-117.1	11.9	118.9	213.6	0.56
3.76	1	1	-106.1	13.2	108.5	213.6	0.51
3.88	1	1	-95.2	14.4	98.4	213.6	0.46
4.00	1	1	-84.4	15.4	88.5	213.6	0.41
4.11	1	1	-73.7	16.3	78.9	213.6	0.37
4.23	1	1	-63.1	17.0	69.6	213.6	0.33
4.35	1	1	-52.5	17.6	60.8	213.6	0.28
4.47	19	1	0.5	31.4	54.4	213.6	0.25
4.47	19	1	0.5	31.4	54.5	213.6	0.25
4.59	19	1	0.4	31.7	54.9	213.6	0.26
4.59	19	1	0.4	31.7	55.0	213.6	0.26
4.70	19	1	0.3	31.9	55.3	213.6	0.26
4.82	19	1	0.2	32.1	55.6	213.6	0.26
4.94	19	1	0.1	32.1	55.7	213.6	0.26
4.94	19	1	0.1	32.2	55.7	213.6	0.26
5.06	19	1	-0.1	32.1	55.7	213.6	0.26
5.06	19	1	-0.1	32.2	55.7	213.6	0.26
5.18	19	1	-0.2	32.1	55.5	213.6	0.26
5.18	19	1	-0.2	32.1	55.6	213.6	0.26
5.29	19	1	-0.3	31.9	55.3	213.6	0.26
5.41	19	1	-0.4	31.7	54.9	213.6	0.26
5.53	1	1	51.5	16.5	58.8	213.6	0.28
5.65	1	1	62.1	15.6	67.7	213.6	0.32
5.76	1	1	72.8	14.6	77.0	213.6	0.36
5.88	1	1	83.6	13.4	86.8	213.6	0.41
6.00	1	1	94.5	12.1	96.9	213.6	0.45
6.12	1	1	90.0	10.8	91.9	213.6	0.43
6.24	1	1	85.7	9.5	87.2	213.6	0.41
6.36	1	1	81.6	8.4	82.9	213.6	0.39
6.48	1	1	77.7	7.4	78.8	213.6	0.37
6.60	1	1	74.1	6.4	74.9	213.6	0.35
6.72	1	1	70.6	5.5	71.3	213.6	0.33
6.84	1	1	67.3	4.7	67.8	213.6	0.32
6.96	1	1	64.2	4.0	64.6	213.6	0.30
7.08	1	1	61.2	3.4	61.5	213.6	0.29
7.20	1	1	58.4	2.8	58.6	213.6	0.27
7.32	1	1	55.7	2.2	55.8	213.6	0.26
7.44	1	1	53.1	1.7	53.2	213.6	0.25
7.56	1	1	50.7	1.2	50.7	213.6	0.24
7.68	1	1	48.3	0.8	48.3	213.6	0.23
7.80	1	1	46.1	0.4	46.1	213.6	0.22
7.92	1	1	43.9	0.1	43.9	213.6	0.21
8.04	1	1	41.8	0.2	41.8	213.6	0.20
8.16	1	1	39.8	0.5	39.8	213.6	0.19
8.28	1	1	37.9	0.8	37.9	213.6	0.18
8.40	1	1	36.1	1.0	36.1	213.6	0.17
8.52	1	1	34.3	1.2	34.3	213.6	0.16
9.00	1	1	27.7	1.9	27.9	213.6	0.13
10.92	1	1	8.1	2.9	9.5	213.6	0.04
11.04	1	1	7.1	2.9	8.7	213.6	0.04
11.16	1	1	6.1	2.9	7.9	213.6	0.04
11.28	1	1	5.2	2.9	7.2	213.6	0.03

## Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 8

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
11.40	5	1	-1.9	3.7	6.7	213.6	0.03
11.52	5	1	-1.4	3.7	6.6	213.6	0.03
11.64	5	1	-1.1	3.7	6.5	213.6	0.03
11.76	5	1	-0.7	3.7	6.4	213.6	0.03
11.88	5	1	-0.3	3.6	6.3	213.6	0.03
12.00	5	1	0.0	3.6	6.3	213.6	0.03

### Lokale Radlasteinleitung am Obergurt bei x = 6.12 m

$\eta = 0.44 \leq 1$  Nachweis erfüllt

Kranschiene :	Höhe	$h_{eff} = 76$	mm	Obergurt :	Breite	$b_{eff} = 297$	mm
	Breite	$b_r = 200$	mm		Dicke	$t_o = 21$	mm
Querschnitt :	Fläche	$A_{eff} = 125.6$	cm <sup>2</sup>	lyeffektiv :	gesamt	$I_{r,i} = 911.3$	cm <sup>4</sup>
	Schwerpunkt	$e_1 = 40$	mm		Kranschiene	$I_r = 381.7$	cm <sup>4</sup>
	Stegdick	$t_w = 12$	mm		Obergurt	$I_{i,eff} = 21.3$	cm <sup>4</sup>
Lastausbreitungslänge :	effektiv	$l_{eff} = 229$	mm	Unterkante	Obergurt	$z = 27$	mm
	gesamt	$x_w = 283$	mm				

x [m]	$Q_{r,Ed}$ [kN]	$\sigma_{oz,Ed}$	$\tau_{oxz,Ed}$	$\tau_{  ,Ed}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{  }$	$\sigma_{x,Ed}$	$\sigma_v$	$\eta$
6.12	100.6	30.9	6.2	52.3	58.5	27.4	104.3	0.44
5.88	99.9	30.7	6.1	47.8	54.0	19.6	94.3	0.40

### Nachweis auf Stegbeulen im Feld bei x = 5.88 m

Abmessungen	a = 12000	mm	Länge = Abstand der Quersteifen
Beulfeld:	b = 279	mm	Breite = Steghöhe
	$t_w = 12$	mm	Dicke = Stegdicke

Bemessungswerte:	$F_{Ed} = 99.9$	kN	Radlast einschließlich Schwingbeiwert
	$M_{y,Ed} = -54.18$	kNm	Biegemoment
	$V_{z,Ed} = -170.6$	kN	Querkraft

Beanspruchbarkeit des Steges : Plattenbeulen bei Querbelastung EN1993-1-5 Abs.6  $\gamma_{M1} = 1.10$

$F_{Ed}/F_{R,d} =$	$F_{R,d} = 1077.4$	kN
Ideale Verzweigungslast	$\eta_2 = 0.09 \leq 1$	
starre Lastausbreitungslänge	$F_{cr} = 6181.6$	
Beiwerte	$s = 188$	mm
	$m_1 = 26.09$	
	$m_2 = 0.00$	
Beulwert	$k_F = 6.00$	
Schlankheitsgrad	$\Lambda_F = 0.44$	
Abminderungsfaktor	$\chi_F = 1.00$	
wirksame Lastausbreitungslänge	$I_y = 439$	mm
	$L_{eff} = 439$	mm
	$I_y \cdot \chi_F$	

Beanspruchbarkeit des Steges : Schubbeulen EN1993-1-5 Abs.5  $\gamma_{M1} = 1.10$

$V_{Ed}/V_{b,Rd} =$	$V_{b,Rd} = 474.9$	kN
	$\eta_3 = 0.36 \leq 1$	
	$M_{Rd} = 432.85$	kNm
Schlankheitsgrad	$\Lambda_w = 0.008$	
Abminderungsfaktor	$\chi_w = 1.20$	
	Interaktion M/N nicht erforderlich	

Nachweis der Längsspannungen mit wirksamen Querschnittsgrößen  $\gamma_{M0} = 1.00$

$\eta_1 = 0.12 \leq 1$
$W_{eff} = 1926.0$

Interaktion zwischen Biegung und Querkraft nach EN1993-1-5 Gl(7.2)

$\eta_{7.2} = 0.13 \leq 1$	$(\eta_1 + 0.8 \cdot \eta_2)/1.4$
----------------------------	-----------------------------------

Interaktion zwischen Querkraft und Querkraft nach DIN EN1993-1-5/NA Gl(NA.7)

$\eta_{DIN} = 0.00 \leq 1$
----------------------------

Nachweisführung

$\eta_{max} = 0.36 \leq 1$
----------------------------

Nachweis erfüllt

## Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 9

### Kranfahrt 3: LG 12: Qc+Qh+HT - SERV

#### Überlagerungsfaktoren

Nr.	Lastfall	LG	$\phi$	$\gamma$	$\psi$	$\phi*\gamma*\psi$
1	Eigengewicht		1.00	1.00	1.00	1.00
2	Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max	12	1.00	1.00	1.00	1.00
3	Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max	12	1.00	1.00	1.00	1.00
4	Kran 1 - Massekräfte HT	12	1.00	1.00	1.00	1.00

#### Verformungsnachweis

Teilsicherheitsfaktor für Widerstände  
Nachweisstelle für horizontale Verformungen  
Horizontale Verschiebung des Schubmittelpunktes  
Verdrehung des Trägers um die x-Achse  
Abstand zwischen Schubmittelpunkt und Lastangriffspunkt  
Horizontale Verformung am Lastangriffspunkt  
Grenzwert für die horizontale Verformung  
Nachweis für horizontale Verformung

$\gamma_{M,f} = 1.00$   
 $x_{dy} = 9.24 \text{ m}$   
 $d_{y0} = 0.1 \text{ cm}$   
 $\phi_x = 0.0071 \text{ rad}$   
 $e_{M,z} = 235 \text{ mm}$   
 $\delta_y = 0.3 \text{ cm}$   
 $\delta_{y,lim} = 1.0 \text{ cm}$   
 $\delta_y / \delta_{y,lim} = 0.26$

Nachweisstelle für vertikale Verformungen  
Vertikale Verschiebung des Schubmittelpunktes  
Grenzwert für die vertikale Verformung  
Nachweis für vertikale Verformung

$x_{dz} = 2.82 \text{ m}$   
 $\delta_z = 0.5 \text{ cm}$   
 $\delta_{z,lim} = 1.2 \text{ cm}$   
 $\delta_z / \delta_{z,lim} = 0.46$

#### Vorverformungen: parabelförmig

Nr.	min x[m]	max x[m]	max y[cm]	max z[cm]	max theta[rad]
1	0.00	6.00	1.2	0.0	0.0
2	6.00	12.00	-1.2	0.0	0.0

#### Kranbahnspezifische Nachweise

##### Nachweis auf Stegblechatmen

Steghöhe  $h_w = 225 \text{ mm}$   
Stegdick  $t_w = 12 \text{ mm}$

nach EN 1993-6, Absatz 7.4 :  $h_w / t_w = 20 < 120$  Nachweis erfüllt

##### Schwingungsbeschränkung des Unterflansches

Abstand der seitlichen Halterung  $L = 6.00 \text{ m}$   
Trägheitsradius  $i_{z,fu} = 83 \text{ mm}$

nach EN 1993-6, Absatz 7.6 :  $L / i_{z,fu} = 72 < 250$  Nachweis erfüllt

### Kranfahrt 4: LG 13: Qc+Qh+HS - SERV

#### Überlagerungsfaktoren

Nr.	Lastfall	LG	$\phi$	$\gamma$	$\psi$	$\phi*\gamma*\psi$
1	Eigengewicht		1.00	1.00	1.00	1.00
2	Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max	13	1.00	1.00	1.00	1.00
3	Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max	13	1.00	1.00	1.00	1.00
5	Kran 1 - Schräglaufräfte HS	13	1.00	1.00	1.00	1.00

#### Verformungsnachweis

Teilsicherheitsfaktor für Widerstände  
Nachweisstelle für horizontale Verformungen  
Horizontale Verschiebung des Schubmittelpunktes  
Verdrehung des Trägers um die x-Achse  
Abstand zwischen Schubmittelpunkt und Lastangriffspunkt  
Horizontale Verformung am Lastangriffspunkt  
Grenzwert für die horizontale Verformung  
Nachweis für horizontale Verformung

$\gamma_{M,f} = 1.00$   
 $x_{dy} = 2.82 \text{ m}$   
 $d_{y0} = 0.3 \text{ cm}$   
 $\phi_x = 0.0187 \text{ rad}$   
 $e_{M,z} = 235 \text{ mm}$   
 $\delta_y = 0.7 \text{ cm}$   
 $\delta_{y,lim} = 1.0 \text{ cm}$   
 $\delta_y / \delta_{y,lim} = 0.73$

Nachweisstelle für vertikale Verformungen  
Vertikale Verschiebung des Schubmittelpunktes  
Grenzwert für die vertikale Verformung  
Nachweis für vertikale Verformung

$x_{dz} = 2.82 \text{ m}$   
 $\delta_z = 0.5 \text{ cm}$   
 $\delta_{z,lim} = 1.2 \text{ cm}$   
 $\delta_z / \delta_{z,lim} = 0.46$



## Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 10

### Vorverformungen: parabelförmig

Nr.	min x[m]	max x[m]	max y[cm]	max z[cm]	max theta[rad]
1	0.00	6.00	1.2	0.0	0.0
2	6.00	12.00	-1.2	0.0	0.0

### Kranbahnspezifische Nachweise

#### Nachweis auf Stegblechatmen

Steghöhe  $h_w = 225$  mm  
Stegdick  $t_w = 12$  mm

nach EN 1993-6, Absatz 7.4 :  $h_w / t_w = 20 < 120$  Nachweis erfüllt

#### Schwingungsbeschränkung des Unterflansches

Abstand der seitlichen Halterung  $L = 6.00$  m  
Trägheitsradius  $i_{z, fu} = 83$  mm

nach EN 1993-6, Absatz 7.6 :  $L / i_{z, fu} = 72 < 250$  Nachweis erfüllt

#### Kranfahrt 5: LG 14: Qc+Qh - FAT

#### Überlagerungsfaktoren

Nr.	Lastfall	LG	$\phi$	$\gamma$	$\psi$	$\phi \cdot \gamma \cdot \psi$
1	Eigengewicht		1.00	1.00	1.00	1.00
2	Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max	14	1.05	1.00	1.00	1.05
3	Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max	14	1.06	1.00	1.00	1.06

### Eingangswerte Ermüdungsnachweis

#### Teilsicherheitsbeiwerte

Teilsicherheitsfaktor für Widerstände  $\gamma_{M, f} = 1.15$   
Teilsicherheitsfaktor für Einwirkungen  $\gamma_{F, f} = 1.00$

#### Ermüdungsnachweis am Querschnitt

Querschnittspunkt 7(Profil) Kerbfall  $\sigma_x 160$   $\sigma_y 160$   $\tau_{xz} 100$  bei  $x = 5.88$  m

$\eta = 0.23 \leq 1$  Nachweis erfüllt

x	Nr.		$\lambda_\sigma$	$\Delta\sigma_c$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\Delta\sigma_{E,2}$	$\eta_\sigma$	$\eta_I$
[m]			$\lambda_\tau$	$\Delta\tau_c$	$\tau_{max}$	$\tau_{min}$	$\Delta\tau_{E,2}$	$\eta_\tau$	
					[N/mm <sup>2</sup> ]				
5.88	7	$\sigma$	0.397	160.0	27.4	2.7	9.8	0.07	
		$\tau$	0.575	100.0	36.7	1.8	20.0	0.23	0.00

### Lokale Radlasteinleitung am Obergurt bei $x = 6.12$ m

$\eta = 0.34 \leq 1$  Nachweis erfüllt

Kranschiene : Höhe  $h_{eff} = 81$  mm Obergurt : Breite  $b_{eff} = 300$  mm  
Breite  $b_r = 200$  mm Dicke  $t_o = 21$  mm  
Querschnitt : Fläche  $A_{eff} = 129.5$  cm<sup>2</sup> Iy effektiv : Igesamt  $I_r = 1057.1$  cm<sup>4</sup>  
Schwerpunkt  $e_i = 43$  mm Kranschiene  $I_r = 451.3$  cm<sup>4</sup>  
Stegdick  $t_w = 12$  mm Obergurt  $I_{r, eff} = 21.5$  cm<sup>4</sup>  
Lastausbreitungslänge : I effektiv  $I_{eff} = 242$  mm  
gesamt  $x_w = 296$  mm Unterkannte Obergurt  $z = 27$  mm

Werte für die Ermittlung der Spannungen infolge exzentrischer Radlast

Querstreifen Abstand  $\alpha = 12.00$  m Exzentrizität Radlast  $e_y = 19$  mm  
Steghöhe  $h_w = 279$  mm Kranschiene  $I_t = 353.7$  cm<sup>4</sup>  
Beiwert  $\eta = 6.31$   
 $T_{Ed} = 1.48$  kNm  $\sigma_{TEd} = 35.3$  N/mm<sup>2</sup>

x	Q <sub>r, Ed</sub>		$\lambda_\sigma$	$\Delta\sigma_c$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\Delta\sigma_{E,2}$	$\eta_\sigma$	$\lambda_\tau$	$\Delta\tau_c$	$\tau_{max}$	$\tau_{min}$	$\Delta\tau_{E,2}$	$\eta_\tau$
[m]	[kN]				[N/mm <sup>2</sup> ]						[N/mm <sup>2</sup> ]			
6.12	79.0	z	0.500	160.0	58.6	-12.1	35.3	0.25	0.660	100.0	36.7	1.8	29.2	0.34
		x	0.500	160.0	27.4	2.7	12.4	0.09						
5.88	79.0	z	0.500	160.0	58.2	-12.0	35.1	0.25	0.660	100.0	36.7	1.8	29.1	0.33
		x	0.500	160.0	27.4	2.7	12.4	0.09						

## Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Nachweis Kranbahnträger

16.03.2024

Seite: 11

### Zusammenfassung aller Berechnungsergebnisse

#### Auslastung - Tragsicherheit

Nr	Kranüberfahrt	Querschnitt	Lokale Lasteinleitung	Stegbeulen
1	LG 1: Qc+Qh+HT - STR P/T	0.60	0.47	0.40
2	LG 5: Qc+Qh+HS - STR P/T	0.82	0.44	0.36

#### Auslastung - Gebrauchstauglichkeit

Nr	Kranüberfahrt	Verformungsnachweis Y			Verformungsnachweis Z		
		$v_{max}$ [cm]	$\delta_{lim}$ [cm]	$\eta$	$w_{max}$ [cm]	$\delta_{lim}$ [cm]	$\eta$
3	LG 12: Qc+Qh+HT - SERV	0.26	1.00	0.26	0.55	1.20	0.46
4	LG 13: Qc+Qh+HS - SERV	0.73	1.00	0.73	0.55	1.20	0.46

Nr	Kranüberfahrt	Stegblechatmen	Unterflanschschwingung
3	LG 12: Qc+Qh+HT - SERV	0.16	0.29
4	LG 13: Qc+Qh+HS - SERV	0.16	0.29

#### Auslastung - Ermüdung

Nr	Kranüberfahrt	Querschnitt	Lokale Lasteinleitung
5	LG 14: Qc+Qh - FAT	0.23	0.34

## Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Biegedrillknicknachweis

16.03.2024

Seite: 1

### Position: Biegedrillknicknachweis

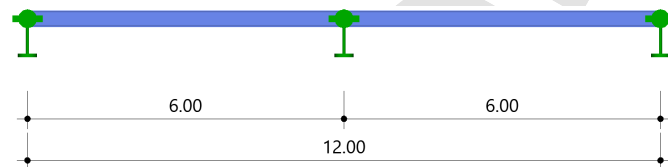
Biegetorsionstheorie (x64) BTII+ 01/2023 (FRILO R-2023-1/P06)

#### Grundparameter

Bemessungsnorm	:	DIN EN 1993-1-1/NA:2015-08
Sicherheitskonzept/Lastkombinatorik	:	DIN EN 1990/NA:2010-12
Kombination ständiger Lasten	:	untereinander mit $\gamma_{G,sup}$ und $\gamma_{G,inf}$
Querschnittsbemessung	:	elastisch
Systemtragfähigkeit	:	Theorie II. Ordnung
Schubspannungen infolge primärer Torsion	:	berücksichtigt
Schubspannungen infolge sekundärer Torsion	:	berücksichtigt
Nachweis Absolutverformung in y mit $\delta_{lim}$	=	1.0 cm
Nachweis Absolutverformung in z mit $\delta_{lim}$	=	1.2 cm

#### System

Maßstab 1 : 100



#### Stabzug

Gesamtlänge = 12.00 m  
Material S235

#### Querschnitte

##### Statische Werte

Nr	Name	$I_y$ [cm <sup>4</sup> ]	$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	$I_t$ [cm <sup>4</sup> ]	$I_w$ [cm <sup>6</sup> ]	$\max_w$ [cm <sup>2</sup> ]	A [cm <sup>2</sup> ]
1	HEB 320	30820.0	9239.0	226.0	2068712	224.6	161.3

#### Abmessungen

##### Querschnitt Nr. 1 - HEB 320

Profil	$h$ = 320 mm	
Steg (lichte Höhe)	$h_1$ = 225 mm	$s$ = 12 mm
Ober- und Untergurt	$b$ = 300 mm	$t$ = 21 mm
Ausrundung	$r$ = 27 mm	

#### Spannungspunkte

Nr Name	Punkt	O-Punkt		S-Punkt		M-Punkt		Verwölbung $\omega$ [cm <sup>2</sup> ]
		$y_o$ [mm]	$z_o$ [mm]	$y_s$ [mm]	$z_s$ [mm]	$y_M$ [mm]	$z_M$ [mm]	
1 HEB 320	1	-150	-160	-150	-160	-150	-160	-224.6
	2	0	-160	0	-160	0	-160	0.0
	3	150	-160	150	-160	150	-160	224.6
	4	-150	160	-150	160	-150	160	224.6
	5	0	160	0	160	0	160	0.0
	6	150	160	150	160	150	160	-224.6
	7	-6	-113	-6	-112	-6	-113	0.0
	8	-6	113	-6	113	-6	113	0.0
	9	-6	0	-6	0	-6	0	0.0
	17	6	-113	6	-112	6	-113	0.0
	18	6	113	6	113	6	113	0.0
	19	6	0	6	0	6	0	0.0

## Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Biegedrillknicknachweis

16.03.2024

Seite: 2

System: 1 Abschnitte, Gesamtlänge = 12.00 m

Nr	von x [m]	bis x [m]	Länge [m]	Querschnitt [Nr. Anfang]	Querschnitt [Nr. Ende]
1	0.00	12.00	12.00	1	1

### Auflager

#### Lagerbedingungen - Verschiebung

Nr	x [m]	Verschiebungen *)		Abstände	
		v [kN/m]	w [kN/m]	y [mm]	z [mm]
1	0.00	-1	-1	0	0
2	6.00	-1	-1	0	0
3	12.00	-1	-1	0	0

\*) -1 = starr, 0 = frei, > 0 = elastisch

#### Lagerbedingungen - Verdrehungen

Nr	x [m]	Verdrehungen *)			Verwölbung *) $\Omega_{y,z}$ [kNm <sup>3</sup> ]
		$\Phi_x$ [kNm/rad]	$\Phi_y$ [kNm/rad]	$\Phi_z$ [kNm/rad]	
1	0.00	-1	0.0	0.0	0.00
2	6.00	-1	0.0	0.0	0.00
3	12.00	-1	0.0	0.0	0.00

\*) -1 = starr, 0 = frei, > 0 = elastisch

## Belastung

### Lastdefinitionen

Art 1 =	Gleichlast	kN/m	5 =	Dreieckslast über l	kN/m
2 =	Einzellast	kN	6 =	Trapezlast über l	kN/m
3 =	Einzelmoment	kNm	7 =	Bereichstorsionsmoment	kNm/m
4 =	Trapezlast	kN/m	8 =	Normalkraftverlauf	kN/m

#### Lastfall 1: Eigengewicht

Art	in/um	Pli	a [m]	Pre	l [m]	ey [mm]	ez [mm]	Bemerkungen zur Last
1	z	1.27				0	0	Träger-g0
1	z	0.57				0	-195	Schiene-g1

Einwirkungsgruppe 99 - ständig

#### Lastfall 2: Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max

Art	in/um	Pli	a [m]	Pre	l [m]	ey [mm]	ez [mm]	Bemerkungen zur Last
2	z	15.9	2.70				-245	Qc,2,1,max,ncrane=1
2	z	16.4	0.00				-245	Qc,2,2,max,ncrane=1

Einwirkungsgruppe 120 - Kranlastgruppe - Qc  
Einzellasten werden als bewegte Lasten angesetzt

#### Lastfall 3: Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max

Art	in/um	Pli	a [m]	Pre	l [m]	ey [mm]	ez [mm]	Bemerkungen zur Last
2	z	58.1	2.70				-245	Qh,2,1,max,ncrane=1
2	z	58.1	0.00				-245	Qh,2,2,max,ncrane=1

Einwirkungsgruppe 121 - Kranlastgruppe - Qh  
Einzellasten werden als bewegte Lasten angesetzt

## Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Biegedrillknicknachweis

16.03.2024

Seite: 3

### Lastfall 4: Kran 1 - Massekräfte HT

Art	in/um	Pli	a [m]	Pre	l [m]	ey [mm]	ez [mm]	Bemerkungen zur Last
2	y	5.7	2.70			0		HT,2,1,ncrane=1
3	x	1.40	2.70					Mx(HT,2,1,ncrane= 1)
2	y	-5.7	0.00			0		HT,2,2,ncrane=1
3	x	-1.40	0.00					Mx(HT,2,2,ncrane= 1)
Einwirkungsgruppe 121 - Kranlastgruppe - Qh Einzellasten werden als bewegte Lasten angesetzt								

### Lastfall 5: Kran 1 - Schräglaufkräfte HS

Art	in/um	Pli	a [m]	Pre	l [m]	ey [mm]	ez [mm]	Bemerkungen zur Last
2	y	22.1	2.70			0		HS,2,1,ncrane=1
3	x	5.41	2.70					Mx(HS,2,1,ncrane=1)
Einwirkungsgruppe 121 - Kranlastgruppe - Qh Einzellasten werden als bewegte Lasten angesetzt								

### Berechnung nach DIN EN 1993-1-1/NA:2015-08

#### Überlagerung 1: LG 1: Qc+Qh+HT - STR P/T

#### Überlagerungsfaktoren

Nr	Lastfall	$\gamma$
1	Eigengewicht	1.35
2	Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max	1.49
3	Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max	1.52
4	Kran 1 - Massekräfte HT	2.03

#### Querschnittsnachweis nach Gleichung 6.1 - Theorie II. Ordnung $\gamma_{M0} = 1.10$

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
0.00	19	1	0.0	-52.8	91.5	213.6	0.43
0.12	9	1	0.04	-52.8	91.4	213.6	0.43
0.23	9	1	0.1	-52.8	91.4	213.6	0.43
0.23	8	1	13.7	-18.4	34.7	213.6	0.16
0.35	8	1	15.7	-18.4	35.5	213.6	0.17
0.47	8	1	17.6	-18.4	36.4	213.6	0.17
0.59	5	1	27.8	14.9	37.9	213.6	0.18
0.70	5	1	30.6	14.8	39.9	213.6	0.19
0.82	1	1	-39.0	10.3	42.8	213.6	0.20
0.94	1	1	-44.1	10.1	47.5	213.6	0.22
1.06	1	1	-49.3	9.9	52.2	213.6	0.24
1.17	1	1	-54.4	9.7	56.9	213.6	0.27
1.29	1	1	-59.5	9.4	61.7	213.6	0.29
1.41	1	1	-64.6	9.1	66.5	213.6	0.31
1.53	1	1	-69.8	8.7	71.4	213.6	0.33
1.64	1	1	-74.9	8.3	76.2	213.6	0.36
1.76	1	1	-80.0	7.8	81.1	213.6	0.38
1.88	1	1	-85.1	7.2	86.1	213.6	0.40
2.00	1	1	-90.3	6.6	91.0	213.6	0.43
2.35	1	1	-105.9	4.4	106.2	213.6	0.50
2.47	1	1	-111.1	3.5	111.3	213.6	0.52
2.58	1	1	-116.4	2.6	116.5	213.6	0.55
2.70	1	1	-121.7	1.6	121.7	213.6	0.57
2.82	1	1	-127.1	0.6	127.1	213.6	0.59
2.94	1	1	-132.5	0.6	132.5	213.6	0.62
3.05	1	1	-124.4	1.7	124.5	213.6	0.58
3.17	1	1	-116.4	2.7	116.5	213.6	0.55
3.29	1	1	-108.5	3.7	108.7	213.6	0.51
3.41	1	1	-100.6	4.6	100.9	213.6	0.47
3.53	1	1	-92.7	5.4	93.2	213.6	0.44
3.64	1	1	-84.9	6.1	85.5	213.6	0.40

**Bachelorthesis**

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Biegedrillknicknachweis

16.03.2024

Seite: 4

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
3.76	1	1	-77.1	6.7	77.9	213.6	0.36
3.88	1	1	-69.3	7.3	70.4	213.6	0.33
4.00	1	1	-61.6	7.8	63.0	213.6	0.30
4.11	1	1	-53.8	8.2	55.7	213.6	0.26
4.23	18	1	21.2	25.7	49.2	213.6	0.23
4.35	18	1	17.9	25.9	48.3	213.6	0.23
4.47	19	1	0.2	27.7	47.9	213.6	0.22
4.59	19	1	0.2	27.8	48.2	213.6	0.23
4.70	19	1	0.1	28.0	48.5	213.6	0.23
4.82	19	1	0.1	28.1	48.6	213.6	0.23
4.94	19	1	0.02	28.1	48.8	213.6	0.23
5.06	19	1	-0.03	28.2	48.8	213.6	0.23
5.18	19	1	-0.1	28.2	48.8	213.6	0.23
5.29	19	1	-0.1	28.1	48.7	213.6	0.23
5.41	19	1	-0.2	28.0	48.5	213.6	0.23
5.53	19	1	-0.2	27.9	48.3	213.6	0.23
5.65	18	1	-19.3	26.1	49.1	213.6	0.23
5.76	1	1	53.9	7.1	55.3	213.6	0.26
5.88	1	1	61.8	6.5	62.8	213.6	0.29
6.00	1	1	69.8	5.8	70.5	213.6	0.33
6.12	1	1	66.6	5.0	67.2	213.6	0.31
6.24	1	1	63.6	4.4	64.1	213.6	0.30
6.36	1	1	60.8	3.8	61.1	213.6	0.29
6.48	1	1	58.0	3.3	58.3	213.6	0.27
6.60	1	1	55.4	2.8	55.7	213.6	0.26
6.72	1	1	53.0	2.3	53.1	213.6	0.25
6.84	1	1	50.6	2.0	50.7	213.6	0.24
6.96	1	1	48.4	1.6	48.4	213.6	0.23
7.08	1	1	46.2	1.3	46.3	213.6	0.22
7.80	1	1	35.0	0.05	35.0	213.6	0.16
8.40	1	1	27.4	0.6	27.4	213.6	0.13
8.52	1	1	26.0	0.7	26.1	213.6	0.12
9.00	1	1	21.0	0.9	21.1	213.6	0.10
11.16	18	1	-2.2	-2.8	5.3	213.6	0.02
11.88	19	1	-0.01	-2.4	4.2	213.6	0.02
12.00	19	1	0.0	-2.4	4.1	213.6	0.02

**Überlagerung 2: LG 5: Qc+Qh+HS - STR P/T**

**Überlagerungsfaktoren**

Nr	Lastfall	$\gamma$
1	Eigengewicht	1.35
2	Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max	1.35
3	Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max	1.35
5	Kran 1 - Schräglaufräfte HS	1.35

**Querschnittsnachweis nach Gleichung 6.1 - Theorie II. Ordnung  $\gamma_{M0} = 1.10$**

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
0.00	19	1	0.0	-55.8	96.7	213.6	0.45
0.12	19	1	0.1	-55.7	96.5	213.6	0.45
0.23	19	1	0.2	-55.6	96.2	213.6	0.45
0.23	19	1	0.2	-55.5	96.2	213.6	0.45
0.35	19	1	0.3	-55.3	95.9	213.6	0.45
0.35	5	1	25.2	31.0	59.4	213.6	0.28
0.47	1	1	-44.5	25.8	63.0	213.6	0.29
0.59	1	1	-50.9	25.4	67.3	213.6	0.32
0.70	1	1	-57.3	25.0	71.9	213.6	0.34
0.82	1	1	-63.8	24.5	76.7	213.6	0.36
0.94	1	1	-70.4	24.0	81.7	213.6	0.38
1.06	1	1	-77.0	23.3	86.9	213.6	0.41
1.17	1	1	-83.6	22.6	92.3	213.6	0.43
1.29	1	1	-90.3	21.8	97.9	213.6	0.46
1.41	1	1	-97.1	20.9	103.6	213.6	0.49
1.53	1	1	-104.0	19.9	109.5	213.6	0.51
1.64	1	1	-110.9	18.8	115.6	213.6	0.54

Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Biegedrillknicknachweis

16.03.2024

Seite: 5

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
1.76	1	1	-117.9	17.7	121.8	213.6	0.57
1.88	1	1	-125.1	16.4	128.2	213.6	0.60
2.00	1	1	-132.3	15.0	134.8	213.6	0.63
2.23	1	1	-147.1	11.9	148.6	213.6	0.70
2.35	1	1	-154.7	10.2	155.8	213.6	0.73
2.47	1	1	-162.5	8.3	163.2	213.6	0.76
2.58	1	1	-170.4	6.3	170.8	213.6	0.80
2.70	1	1	-178.5	4.2	178.7	213.6	0.84
2.82	1	1	-186.8	1.9	186.9	213.6	0.87
2.94	1	1	-195.3	0.6	195.3	213.6	0.91
3.05	1	1	-204.1	3.3	204.1	213.6	0.96
3.17	1	1	-190.1	5.9	190.4	213.6	0.89
3.29	1	1	-176.4	8.4	177.0	213.6	0.83
3.41	1	1	-163.0	10.6	164.0	213.6	0.77
3.53	1	1	-149.7	12.5	151.2	213.6	0.71
3.64	1	1	-136.6	14.3	138.8	213.6	0.65
3.76	1	1	-123.6	15.9	126.7	213.6	0.59
3.88	1	1	-110.9	17.4	114.9	213.6	0.54
4.00	1	1	-98.2	18.6	103.4	213.6	0.48
4.11	1	1	-85.7	19.6	92.2	213.6	0.43
4.23	1	1	-73.3	20.5	81.5	213.6	0.38
4.35	1	1	-61.1	21.3	71.3	213.6	0.33
4.47	1	1	-48.9	21.8	61.8	213.6	0.29
4.59	19	1	0.5	34.1	59.0	213.6	0.28
4.59	19	1	0.5	34.1	59.1	213.6	0.28
4.70	19	1	0.4	34.3	59.4	213.6	0.28
4.70	19	1	0.4	34.3	59.5	213.6	0.28
4.82	19	1	0.2	34.5	59.7	213.6	0.28
4.82	19	1	0.2	34.5	59.8	213.6	0.28
4.94	19	1	0.1	34.6	59.9	213.6	0.28
5.06	19	1	-0.1	34.5	59.8	213.6	0.28
5.06	19	1	-0.1	34.6	59.9	213.6	0.28
5.18	19	1	-0.2	34.4	59.7	213.6	0.28
5.18	19	1	-0.2	34.5	59.7	213.6	0.28
5.29	19	1	-0.3	34.3	59.3	213.6	0.28
5.29	19	1	-0.3	34.3	59.4	213.6	0.28
5.41	1	1	47.4	20.8	59.5	213.6	0.28
5.53	1	1	59.6	19.9	68.8	213.6	0.32
5.65	1	1	71.8	18.9	78.9	213.6	0.37
5.76	1	1	84.2	17.7	89.6	213.6	0.42
5.88	1	1	96.7	16.3	100.8	213.6	0.47
6.00	1	1	109.4	14.7	112.4	213.6	0.53
6.12	1	1	104.1	13.1	106.6	213.6	0.50
6.24	1	1	99.1	11.6	101.2	213.6	0.47
6.36	1	1	94.4	10.3	96.1	213.6	0.45
6.48	1	1	90.0	9.0	91.3	213.6	0.43
6.60	1	1	85.8	7.9	86.8	213.6	0.41
6.72	1	1	81.8	6.8	82.6	213.6	0.39
6.84	1	1	78.0	5.9	78.7	213.6	0.37
6.96	1	1	74.4	5.0	74.9	213.6	0.35
7.08	1	1	71.0	4.2	71.4	213.6	0.33
7.20	1	1	67.7	3.4	68.0	213.6	0.32
7.32	1	1	64.7	2.8	64.8	213.6	0.30
7.44	1	1	61.7	2.2	61.8	213.6	0.29
7.56	1	1	58.9	1.6	58.9	213.6	0.28
7.68	1	1	56.2	1.1	56.2	213.6	0.26
7.80	1	1	53.6	0.6	53.6	213.6	0.25
7.92	1	1	51.1	0.2	51.1	213.6	0.24
8.04	1	1	48.7	0.2	48.7	213.6	0.23
8.16	1	1	46.4	0.5	46.4	213.6	0.22
8.28	1	1	44.2	0.9	44.3	213.6	0.21
8.40	1	1	42.1	1.1	42.2	213.6	0.20
8.52	1	1	40.1	1.4	40.1	213.6	0.19
9.00	1	1	32.5	2.2	32.8	213.6	0.15
9.84	1	1	21.4	3.1	22.0	213.6	0.10
9.96	1	1	19.9	3.2	20.7	213.6	0.10
10.08	1	1	18.6	3.2	19.4	213.6	0.09
10.20	1	1	17.2	3.3	18.1	213.6	0.08



# Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Biegedrillknicknachweis

16.03.2024

Seite: 6

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
10.32	1	1	15.9	3.4	16.9	213.6	0.08
10.44	1	1	14.6	3.4	15.7	213.6	0.07
10.56	1	1	13.3	3.4	14.6	213.6	0.07
10.68	1	1	12.1	3.5	13.5	213.6	0.06
10.80	1	1	10.9	3.5	12.4	213.6	0.06
10.92	1	1	9.7	3.6	11.5	213.6	0.05
11.04	1	1	8.5	3.6	10.5	213.6	0.05
11.16	1	1	7.4	3.6	9.6	213.6	0.05
11.28	1	1	6.3	3.6	8.9	213.6	0.04
11.40	1	1	5.2	3.6	8.1	213.6	0.04
11.52	5	1	-1.5	4.5	8.0	213.6	0.04
11.64	5	1	-1.1	4.5	7.9	213.6	0.04
11.76	5	1	-0.7	4.5	7.8	213.6	0.04
11.88	5	1	-0.3	4.5	7.8	213.6	0.04
12.00	5	1	0.0	4.5	7.7	213.6	0.04

## Überlagerung 3: LG 12: Qc+Qh+HT - SERV

### Überlagerungsfaktoren

Nr	Lastfall	$\gamma$
1	Eigengewicht	1.00
2	Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max	1.00
3	Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max	1.00
4	Kran 1 - Massekräfte HT	1.00

### Vorverformungen: parabelförmig

Nr.	min x[m]	max x[m]	max y[cm]	max z[cm]	max theta[rad]
1	0.00	6.00	1.2	0.0	0.0
2	6.00	12.00	-1.2	0.0	0.0

## Überlagerung 4: LG 13: Qc+Qh+HS - SERV

### Überlagerungsfaktoren

Nr	Lastfall	$\gamma$
1	Eigengewicht	1.00
2	Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max	1.00
3	Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max	1.00
5	Kran 1 - Schräglaufkräfte HS	1.00

### Vorverformungen: parabelförmig

Nr.	min x[m]	max x[m]	max y[cm]	max z[cm]	max theta[rad]
1	0.00	6.00	1.2	0.0	0.0
2	6.00	12.00	-1.2	0.0	0.0

## Überlagerung 5: LG 14: Qc+Qh - FAT

### Überlagerungsfaktoren

Nr	Lastfall	$\gamma$
1	Eigengewicht	1.00
2	Kran 1 - Kraneigengewicht Qc,max	1.05
3	Kran 1 - Kranbetrieb Qh,max	1.06

### Querschnittsnachweis nach Gleichung 6.1 - Theorie II. Ordnung $\gamma_{M0} = 1.10$

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
0.00	19	1	0.0	-11.2	19.5	213.6	0.09
0.12	19	1	0.0	-11.2	19.3	213.6	0.09
1.76	1	1	-32.7	1.0	32.8	213.6	0.15
2.70	1	1	-48.3	0.04	48.3	213.6	0.23
2.82	1	1	-50.1	0.1	50.1	213.6	0.23
2.94	1	1	-51.9	0.2	51.9	213.6	0.24

# Bachelorthesis

Pascal Bade

Matr.: 3843513

Projekt: Kranbahnträger

Position: Biegedrillknicknachweis

16.03.2024

Seite: 7

x [m]	Pkt	Qkl	$\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{yd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\eta$
3.05	1	1	-53.6	0.3	53.6	213.6	0.25
3.17	1	1	-55.4	0.5	55.4	213.6	0.26
3.53	1	1	-45.6	0.8	45.6	213.6	0.21
5.65	18	1	-10.6	15.6	29.0	213.6	0.14
5.88	18	1	-15.4	15.6	31.0	213.6	0.15
5.88	19	1	0.0	39.9	69.1	213.6	0.32
6.00	19	1	0.0	39.9	69.0	213.6	0.32
6.00	1	1	33.8	0.5	33.8	213.6	0.16
6.12	1	1	32.4	0.4	32.4	213.6	0.15
6.60	1	1	27.3	0.02	27.3	213.6	0.13
7.32	1	1	20.9	0.3	20.9	213.6	0.10
8.40	6	1	-14.4	0.2	14.4	213.6	0.07
8.64	6	1	-13.1	0.2	13.1	213.6	0.06
9.00	6	1	-11.3	0.1	11.3	213.6	0.05
9.24	6	1	-10.1	0.1	10.1	213.6	0.05
9.60	6	1	-8.5	0.0	8.5	213.6	0.04
10.08	6	1	-6.4	0.1	6.4	213.6	0.03
11.88	19	1	0.0	-1.4	2.5	213.6	0.01
12.00	19	1	0.0	-1.4	2.4	213.6	0.01

## Zusammenfassung aller Berechnungsergebnisse


### Auslastung - Tragsicherheit

Nr	Lastkombination	Querschnitt	Stabilität
1	LG 1: Qc+Qh+HT - STR P/T	0.62	-
2	LG 5: Qc+Qh+HS - STR P/T	0.96	-
5	LG 14: Qc+Qh - FAT	0.32	-

### Auslastung - Gebrauchstauglichkeit

Nr	Lastkombination	Verformungsnachweis Y			Verformungsnachweis Z		
		V <sub>max</sub> [cm]	$\delta_{lim}$ [cm]	$\eta$	W <sub>max</sub> [cm]	$\delta_{lim}$ [cm]	$\eta$
3	LG 12: Qc+Qh+HT - SERV	0.10	1.00	0.10	0.56	1.20	0.46
4	LG 13: Qc+Qh+HS - SERV	0.39	1.00	0.39	0.56	1.20	0.46

## Anhang 3: Rstab Ausgabe



Kranbahnträgerbemessung

### 216355 - Bade

Seite: 1/5  
Blatt: 1

**MODELL**

Projekt: Bachelorthesis

Modell: Kranabahn EC3

Datum: 21.03.2024

#### 1.2 MATERIALIEN

Mat. Nr.	Modul E [kN/cm <sup>2</sup> ]	Modul G [kN/cm <sup>2</sup> ]	Spez. Gewicht γ [kN/m <sup>3</sup> ]	Wärmedehn. α [1/°C]	Teilsich.-Beiwert γ <sub>M</sub> [-]	Material-Modell
1	Baustahl S 235   DIN EN 10025-2:1995 21000.00	8076.92	78.50	1.20E-05	1.00	Isotrop linear elastisch

#### 1.3 QUERSCHNITTE

Quers. Nr.	Mater. Nr.	I <sub>T</sub> [cm <sup>4</sup> ] A [cm <sup>2</sup> ]	I <sub>y</sub> [cm <sup>4</sup> ] A <sub>y</sub> [cm <sup>2</sup> ]	I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ] A <sub>z</sub> [cm <sup>2</sup> ]	Hauptachsen α [°]	Drehung α' [°]	Gesamtabmessungen [mm]	
							Breite b	Höhe h
1	HE B 320   DIN 1025-2:1995 1	226.00 161.00	30820.00 102.48	9240.00 32.08	0.00	0.00	300.0	320.0

#### DETAILS

Verwendete Norm: DIN\* - DIN EN 1993-6

Trägerlänge: 12.000 m

Das Gesamtgewicht des Trägers: 2191.1 kg

Querschnittsgewicht pro Meter: 182.6 kg/m

Das Gesamtgewicht des Trägers mit Schiene abgenutzt um 25%: 2139.3 kg

Querschnittsgewicht pro Meter: 178.3 kg/m

**Ermittlungsart der Schnittgrößen**

Schnelle Berechnung: Berechnung der maßgebenden Laststellungen mit BGDK7

**Schiene-Flansch-Verbindung**

Die Kranschiene ist auf einer Elastomerunterlage montiert

Höhe der Elastomerunterlage h<sub>e</sub>: 6.0 mm

**Imperfektion-Abminderungen**

0.5 Abminderung für Biegedrillknicken EN 1993-1-1, 5.3.4 ☐

**Zugelassene Verformung**

Zugelassene Verformung Vertikale: L / 600

Zugelassene Verformung Horizontale: L / 600

Maximale vertikale Verformung nach EN 1993-6, Tab. 7.2 a: 25.0 mm

Verfahren 1: Verformung bezogen auf unverformtes System (empfohlen für feste Lager) ☒

Verfahren 3: Verformung bezogen auf die Wendepunkte der verformten Stabachse verbindende Linie ☐

Ermittlung der horizontalen Verformungen unter Berücksichtigung der Stützenhöhe nach EN 1993-6, Tab. 7.1 b ☐

Bemessung der außen liegenden Kranbahnen nach EN 1993-6, Tab. 7.1 d ☐

**Einstellungen**

Angebotene Länge FE-Elements: 500.0 mm

Anzahl der zu berechnenden Knickfiguren für Auswahl des Imperfektionsansatzes: 1

**Iterationsangaben**

Max. Anzahl der Gleichgewichtssimulationen: 40

**Querschnittswerte**

Schubsteifigkeit (Querschnittsflächen A<sub>y</sub>, A<sub>z</sub>) der Stäbe aktivieren ☒

#### GEOMETRIE - LAGERUNG

Lager Nr.	Stelle x [m]	Lagertyp	Verschiebung			Drehung			Wölbeins	Gelenk	Lager [mm]	
			in X	in Y	in Z	um X	um Y	um Z			Steife	Länge a
1	0.000	Gelenkig	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Starre	
2	6.000	Gelenkig	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Starre	
3	12.000	Gelenkig verschiebl.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Starre	

#### GEOMETRIE - STEIFEN

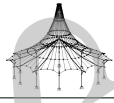
Feld Nr.	Länge L [m]	Anzahl Innenfelder	Art des Standorts
1	6.000	1	Regelmäßig x[m]: {0.000; 6.000}
2	6.000	1	Regelmäßig x[m]: {0.000; 6.000}

#### MATERIAL

Material- Bezeichnung	: Baustahl S 235	DIN EN 10025-2:2004-11
-----------------------	------------------	------------------------

#### QUERSCHNITTE

Träger	: Walzprofil HE B 320   DIN 1025-2:1995
Schienenprofil	: Schiene SA 75 (Kopfabnutzt)
Querschnittsbezeichnung	: HE B 320   DIN 1025-2:1995 + SA 75 (Kopfabnutzt)
25%-Reduktion der Schiene durch Abnutzung	: <input checked="" type="checkbox"/>
Mitwirkung des Schienenprofils bei Ermittlung der Querschnittswerte	: <input type="checkbox"/>
Zusätzliche Nachweise	
Ermüdungsnachweis durchführen	: <input checked="" type="checkbox"/>



216355 - Bade

Seite: 2/5

Blatt: 1

KRANBAHN

Projekt: Bachelorthesis

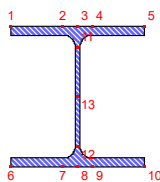
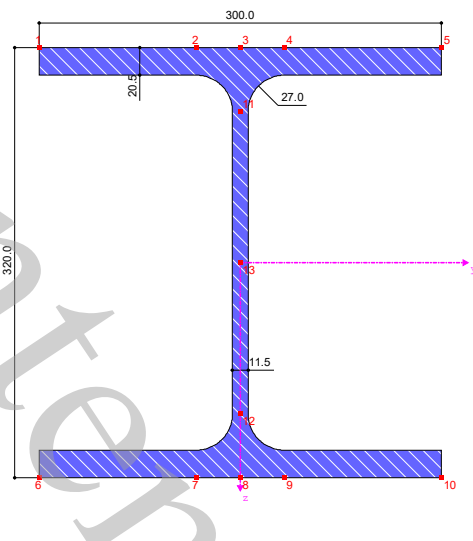
Modell: Kranabahn EC3

Datum: 21.03.2024

## QUERSCHNITTE

Nachweis der Schweißnähte durchführen : ☐  
Unterbrochene Schweißnähte zwischen Schiene und Flansch : ☐  
Flansch

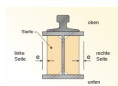
## HE-B 320



## KERBFALL - SPANNUNGSPUNKTE

Punkt Nr.	Koordinaten [cm]		Dicke t [cm]	Kerbfall - Zuordnung			
	y	z		Vorhanden	für $\sigma_x$	für $\sigma_z$	für $\tau_{xz}$
1	-15.00	-16.00	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	160		100
2	-3.27	-16.00	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	125		80
3	0.00	-16.00	2.05	<input type="checkbox"/>	160		100
4	3.27	-16.00	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	125		80
5	15.00	-16.00	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	160		100
6	-15.00	16.00	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	160		100
7	-3.27	16.00	2.05	<input type="checkbox"/>	160		100
8	0.00	16.00	2.05	<input type="checkbox"/>	160		100
9	3.27	16.00	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	160		100
10	15.00	16.00	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	160		100
11	0.00	-11.25	1.15	<input checked="" type="checkbox"/>	160	160	100
12	0.00	11.25	1.15	<input checked="" type="checkbox"/>	160	160	100
13	0.00	0.00	1.15	<input checked="" type="checkbox"/>	160		100

Kranbahnträgerbemessung

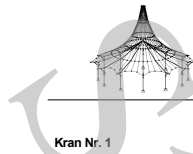


## KERBFALL - SPANNUNGSPUNKTE - QUERSTEIFEN

Punkt Nr.	Koordinaten [cm]		Dicke t [cm]	Kerbfall - Zuordnung		Abstand e [cm]
	y	z		Vorhanden	für $\sigma_x$	
14	-15.00	-13.95	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	80	0.00
15	15.00	-13.95	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	80	0.00
16	-15.00	13.95	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	80	0.00
17	15.00	13.95	2.05	<input checked="" type="checkbox"/>	80	0.00

## EINWIRKUNGEN BASISANGABEN

Anzahl Krane : 1  
Zusätzliche ständige Lasten g : 0.00 kN/m  
Zusätzliche veränderliche Lasten w : 0.00 kN/m  
Kranlasten nur am Träger mit  $R_{max}$   
Schnittweite : 0.200 m  
Anzahl der zu erzeugenden Kran-Laststellungen : 77  
Anzahl der zu erzeugenden Lastkombinationen : 386



216355 - Bade

Seite: 3/5

Blatt: 1

KRANBAHN

Projekt: Bachelorthesis

Modell: Kranabahn EC3

Datum: 21.03.2024

## KRANPARAMETER

Dynamischer Beiwert für

- Krangewicht

- Lastheben

- plötzliche Entlastung

- Kranfahrten

- Antriebskraft

- Pufferkräfte

S-Klasse

Kranpuffer links

Kranpuffer rechts

Anzahl Kranachsen

Achsabstände

Pufferkraft

$\phi_1$  : 1.100

$\phi_2$  : 1.130

$\phi_3$  : 1.000

$\phi_4$  : 1.000

$\phi_5$  : 1.500

$\phi_7$  : 1.250

S3

$a_L$  : 0.000 m

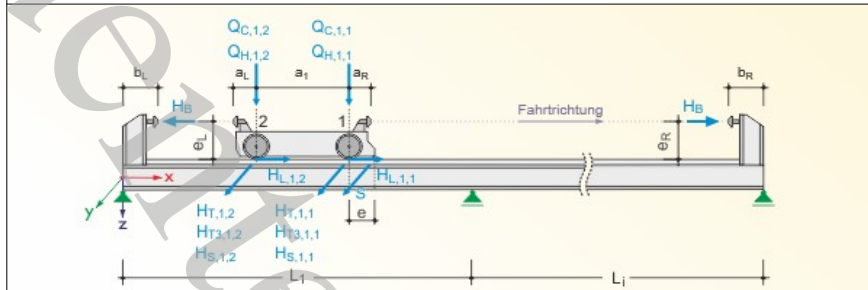
$a_R$  : 0.000 m

2

$a_1$  : 2.700 m

$H_B$  : 16.20 kN

## BILD



## KRANLASTEN

Achse Nr.	Vertikale Radlasten $Q_C$ [kN]	$Q_H$ [kN]	Horizontale Radlasten $H_T$ [kN]	$H_S$ [kN]	$H_{T3}$ [kN]	Längsbelastungen $H_L$ [kN]	Abstand $e$ [m]	Schräglaukraft $S$ [kN]
1	15.90	58.10	5.70	0.00	0.00	1.80		
2	16.40	58.10	5.70	18.00	0.00	0.00	16.700	22.10

## ZUSAMMENFASSUNG DER NACHWEISE

Nachweisart	Stab Nr.	Stelle x [m]	Nachweiskriterium vorhanden	grenz	Maßgebende Lastkombination
2.4 Spannungsnachweis	1	2.400	0.816	< 1.00	LK135
2.5 Verformungsnachweis - Horizontal	1	2.700	765.653	> 600.000	LK140
2.5 Verformungsnachweis - Vertikal	1	2.800	980.665	> 600.000	LK116
2.6 Ermüdungsnachweis	1	5.900	0.479	< 1.00	
2.7 Beulnachweis	1	0.200	0.436	< 1.00	
2.10 Kritische Lastfaktoren	1		6.837	> 1.00	LK252

## SNITTGRÖSSEN - TRAGFÄHIGKEIT - NUR MAX / MIN

Stab Nr.	max min	Maßgeb. LK	Kräfte [kN]				Momente [kNm]			Momente [kNm <sup>2</sup> ], [kNm]		
			x [m]	N	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>T</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	M <sub>0</sub>	M <sub>T,pr</sub>	M <sub>T,sek</sub>
1	max N	LK127	0.000 I	4.10	7.52	81.23	3.22	-0.01	-0.01	0.00	2.02	1.19
	min N	LK271	6.000 -0.06	-0.04	-23.52	-0.28	-97.79	0.23	-0.58	0.02	-0.22	-0.49
	max V <sub>y</sub>	LK72	0.000 I	3.88	16.75	170.13	2.25	0.09	-0.01	0.00	1.47	0.78
	min V <sub>y</sub>	LK172	5.900 r	0.64	-18.89	-190.88	-5.42	-59.76	5.90	-1.43	-0.92	-4.50
	max V <sub>z</sub>	LK72	3.000 I	3.67	17.03	170.13	2.25	0.09	0.01	0.00	1.47	0.78
	min V <sub>z</sub>	LK152	6.000 I	0.62	-18.80	-191.13	-5.42	-78.87	7.75	-1.88	-0.85	-4.57
	max M <sub>T</sub>	LK135	0.200 I	0.38	12.54	66.25	4.40	13.28	-2.52	0.33	2.75	1.65
	min M <sub>T</sub>	LK152	6.000 I	0.62	-18.80	-191.13	-5.42	-78.87	7.75	-1.88	-0.85	-4.57
	max M <sub>y</sub>	LK127	2.200 r	3.58	-4.71	-36.95	-0.74	172.57	-19.85	3.31	0.64	-1.38
	min M <sub>y</sub>	LK187	6.000 I	3.75	-10.63	-112.70	-2.93	-113.19	10.75	-2.17	-0.16	-2.77
	max M <sub>z</sub>	LK300	6.000 I	-0.05	-2.45	-19.41	-0.67	-73.14	14.68	-2.98	1.38	-2.05
	min M <sub>z</sub>	LK140	2.600 I	0.06	12.91	54.14	3.38	148.85	-33.78	5.29	0.19	3.19
	max M <sub>0</sub>	LK135	2.400 r	-0.05	-13.01	-39.24	-2.82	152.47	-33.69	5.32	0.42	-3.24
	min M <sub>0</sub>	LK300	6.000 I	-0.05	-2.45	-19.41	-0.67	-73.14	14.68	-2.98	1.38	-2.05
	max M <sub>T,pr</sub>	LK135	0.000 I	0.38	12.34	66.77	4.40	-0.01	-0.01	0.00	2.77	1.63
	min M <sub>T,pr</sub>	LK140	4.800 I	0.24	-13.45	-51.25	-3.94	42.47	-1.93	-0.09	-1.97	-1.97
	max M <sub>T,sek</sub>	LK135	2.400 I	0.10	13.96	60.65	3.75	152.45	-33.69	5.32	0.42	3.32
	min M <sub>T,sek</sub>	LK152	6.000 I	0.62	-18.80	-191.13	-5.42	-78.87	7.75	-1.88	-0.85	-4.57
2	max N	LK252	0.800 r	4.39	16.17	152.84	4.77	14.26	-0.80	-0.04	1.65	3.12
	min N	LK127	0.000 I	-0.08	1.88	25.19	0.70	-107.83	11.29	-2.66	-1.19	1.89
	max V <sub>y</sub>	LK222	0.000 I	3.86	19.08	194.08	2.68	-73.78	7.18	-1.74	0.78	1.90
	min V <sub>y</sub>	LK307	6.000 I	0.24	-16.74	-170.06	-2.25	-0.79	-0.01	0.00	-1.48	-0.78
	max V <sub>z</sub>	LK222	0.000 I	3.86	19.08	194.08	2.68	-73.78	7.18	-1.74	0.78	1.90
	min V <sub>z</sub>	LK307	6.000 I	0.24	-16.74	-170.06	-2.25	-0.79	-0.01	0.00	-1.48	-0.78
	max M <sub>T</sub>	LK252	0.000 I	4.28	15.17	154.87	4.85	-108.85	11.42	-2.68	1.20	3.65



216355 - Bade

Seite: 4/5

Blatt: 1

KRANBAHN

Projekt: Bachelorthesis

Modell: Kranabahn EC3

Datum: 21.03.2024

### ■ SCHNITTGRÖSSEN - TRAGFÄHIGKEIT - NUR MAX / MIN

Stab Nr.	max min	Maßgeb. LK	Stelle x [m]	N	Kräfte [kN] V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	M <sub>T</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	Momente [kNm <sup>2</sup> ], [kNm] M <sub>0</sub>	M <sub>T,pr</sub>	M <sub>T,sek</sub>
	min M <sub>T</sub>	LK300	5.700 r	0.65	-10.26	-139.45	-3.68	41.93	-3.09	0.37	-2.44	-1.24
	max M <sub>y</sub>	LK252	3.900 r	0.20	-9.41	-79.56	-2.82	172.36	-19.85	3.30	-0.75	-2.07
	min M <sub>y</sub>	LK187	0.000 l	3.64	10.85	113.86	2.33	-113.18	10.75	-2.17	-0.16	2.49
	max M <sub>z</sub>	LK300	0.000 l	0.23	14.60	74.71	4.46	-73.14	14.67	-2.98	1.38	3.08
	min M <sub>z</sub>	LK300	3.000 l	0.07	16.40	67.07	3.94	139.29	-32.84	5.14	0.25	3.68
	max M <sub>0</sub>	LK300	3.000 r	-0.02	-10.59	-32.82	-2.62	139.30	-32.84	5.14	0.25	-2.88
	min M <sub>0</sub>	LK300	0.000 l	0.23	14.60	74.71	4.46	-73.14	14.67	-2.98	1.38	3.08
	max M <sub>T,pr</sub>	LK300	1.200 l	0.30	15.47	71.63	4.39	14.73	-3.02	0.08	2.07	2.32
	min M <sub>T,pr</sub>	LK300	6.000 l	0.66	-9.70	-140.21	-3.68	-0.01	-0.01	0.00	-2.47	-1.21
	max M <sub>T,sek</sub>	LK300	3.000 l	0.07	16.40	67.07	3.94	139.29	-32.84	5.14	0.25	3.68
	min M <sub>T,sek</sub>	LK300	3.000 r	-0.02	-10.59	-32.82	-2.62	139.30	-32.84	5.14	0.25	-2.88

### ■ LAGERKRÄFTE - NUR MAX/MIN & ERWEITERT

Knoten Nr.	Maßgeb. LK	P <sub>x</sub> [kN]	Horizontale Lagerkräfte P <sub>y</sub> [kN]			Vertikale Lagerkräfte P <sub>z</sub> [kN]			Kommentar
			Gesamt	Aus Kran	Aus Wind	Gesamt	Aus Kran	Aus ständig	
1	Extrem im Knoten Nr.1 - max P <sub>x</sub>								
2	LK187	2.70	0.68	0.68	0.00	10.90	6.86	4.04	
3	LK187	0.00	15.89	15.89	0.00	167.83	154.51	13.32	
	LK187	0.00	0.53	0.53	0.00	9.50	5.46	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.1 - min P <sub>x</sub>								
2	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
3	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	0.00	13.32	
	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.1 - max P <sub>y</sub>								
2	LK75	0.00	18.00	18.00	0.00	112.73	108.70	4.04	
3	LK75	0.00	0.00	0.00	0.00	59.62	46.31	13.32	
	LK75	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.47	-6.50	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.1 - min P <sub>y</sub>								
2	LK290	0.00	-1.73	-1.73	0.00	-5.07	-9.10	4.04	
3	LK290	0.00	13.66	13.66	0.00	82.38	69.06	13.32	
	LK290	0.00	6.07	6.07	0.00	92.58	88.55	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.1 - max P <sub>z</sub>								
2	LK72	2.70	12.49	12.49	0.00	126.04	122.00	4.04	
3	LK72	0.00	5.38	5.38	0.00	65.47	52.16	13.32	
	LK72	0.00	-0.77	-0.77	0.00	-3.28	-7.32	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.1 - min P <sub>z</sub>								
2	LK257	2.70	-1.28	-1.28	0.00	-8.22	-12.26	4.04	
3	LK257	0.00	11.83	11.83	0.00	128.22	114.91	13.32	
	LK257	0.00	6.56	6.56	0.00	68.23	64.19	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.2 - max P <sub>x</sub>								
2	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
3	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	0.00	13.32	
	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.2 - min P <sub>x</sub>								
2	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
3	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	0.00	13.32	
	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.2 - max P <sub>y</sub>								
2	LK225	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.91	-6.95	4.04	
3	LK225	0.00	18.00	18.00	0.00	142.42	129.10	13.32	
	LK225	0.00	0.00	0.00	0.00	30.39	26.35	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.2 - min P <sub>y</sub>								
2	LK5	0.00	0.00	0.00	0.00	78.04	74.00	4.04	
3	LK5	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	0.00	13.32	
	LK5	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.2 - max P <sub>z</sub>								
2	LK187	2.70	0.68	0.68	0.00	10.90	6.86	4.04	
3	LK187	0.00	15.89	15.89	0.00	167.83	154.51	13.32	
	LK187	0.00	0.53	0.53	0.00	9.50	5.46	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.2 - min P <sub>z</sub>								
2	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
3	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	0.00	13.32	
	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.3 - max P <sub>x</sub>								
2	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
3	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	0.00	13.32	
	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.3 - min P <sub>x</sub>								
2	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
3	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	0.00	13.32	
	LK1	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.3 - max P <sub>y</sub>								
2	LK380	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.00	4.04	
3	LK380	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	0.00	13.32	
	LK380	0.00	18.00	18.00	0.00	78.54	74.50	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.3 - min P <sub>y</sub>								
2	LK160	0.00	6.07	6.07	0.00	28.71	24.68	4.04	
3	LK160	0.00	13.66	13.66	0.00	143.52	130.20	13.32	
	LK160	0.00	-1.73	-1.73	0.00	-2.34	-6.37	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.3 - max P <sub>z</sub>								
2	LK307	2.70	-0.77	-0.77	0.00	-3.29	-7.33	4.04	
3	LK307	0.00	5.38	5.38	0.00	65.53	52.21	13.32	
	LK307	0.00	12.49	12.49	0.00	125.99	121.95	4.04	
1	Extrem im Knoten Nr.3 - min P <sub>z</sub>								
2	LK117	2.70	6.84	6.84	0.00	71.04	67.01	4.04	
3	LK117	0.00	11.54	11.54	0.00	125.40	112.09	13.32	
	LK117	0.00	-1.28	-1.28	0.00	-8.22	-12.26	4.04	



216355 - Bade

Seite: 5/5

Blatt: 1

KRANBAHN

Projekt: Bachelorthesis

Modell: Kranabahn EC3

Datum: 21.03.2024

### ■ SPANNUNGSNACHWEIS - GESAMTWEISE

Stab-Nr.	x-Stellen [m]	Sp.-Punkt	Maßgeb. LK	Spannung Art	Spannung [kN/cm²]	Aus-nutzung
1	2.400 r	1	LK135	$\sigma_v$	19.17	0.816

### ■ VERFORMUNGSNACHWEIS - GESAMTWEISE

Richtung	Stab Nr.	Stelle x [m]	Maßgeb. LK	Verschiebung u [mm]	L/u	zul L/u
Horizont.	1	2.700	LK140	7.8	765.653	> 600.000
Vertikal	1	2.800	LK116	6.1	980.665	> 600.000

### ■ ERMÜDUNGSNACHWEIS - GESAMTWEISE

Stab Nr.	Stelle x [m]	S-Punkt Nr.	Aus-nutzung	Maßgebende Nachweisart
2	2.400	1	0.218	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
2	2.400	2	0.279	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
2	2.400	4	0.279	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
2	2.400	5	0.218	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
2	2.400	6	0.218	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
2	2.400	10	0.218	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
1	5.900	11	0.479	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
2	0.000	12	0.243	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
2	0.000	13	0.260	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
1	6.000	14	0.185	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
1	6.000	15	0.185	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
1	6.000	16	0.185	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$
1	6.000	17	0.185	Bemessung $\Delta \sigma_{E2(v)}$

### ■ BEULNACHWEIS - GESAMTWEISE

Stab Nr.	Beufeld Nr.	Stelle x [m]	Aus-nutzung	
1	1	0.200	0.436	$\eta_{LT,Ed}$ - Lokale Spannung
2	1	0.100	0.436	$\eta_{LT,Ed}$ - Lokale Spannung



## Eidesstaatliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich erkläre hiermit weiterhin, dass die vorgelegte Arbeit zuvor weder von mir noch von einer anderen Person an dieser oder einer anderen Hochschule eingereicht wurde.

Darüber hinaus ist mir bekannt, dass die Unrichtigkeit dieser Erklärung eine Benotung der Arbeit mit der Note "nicht ausreichend" zur Folge hat und einen Ausschluss von der Erbringung weiterer Prüfungsleistungen zur Folge haben kann.

22.03.24, Saarwellingen

---

Datum, Ort



---

Unterschrift