

# **Bewehrung neu gedacht - Robotisierte Herstellung**

Dipl.-Ing. Mag. Matthias Rigler

Dipl.-Ing. Lukas Dusini

30.09.2025

<https://www.uibk.ac.at/de/ibt/>

1. Allgemeines zu Tübbing
2. Konstruktive Durchbildung
3. Krafteinleitungen
4. Roboter geschweißte Bewehrung
5. Zukünftige Möglichkeiten



[1]

# Tunnelbau

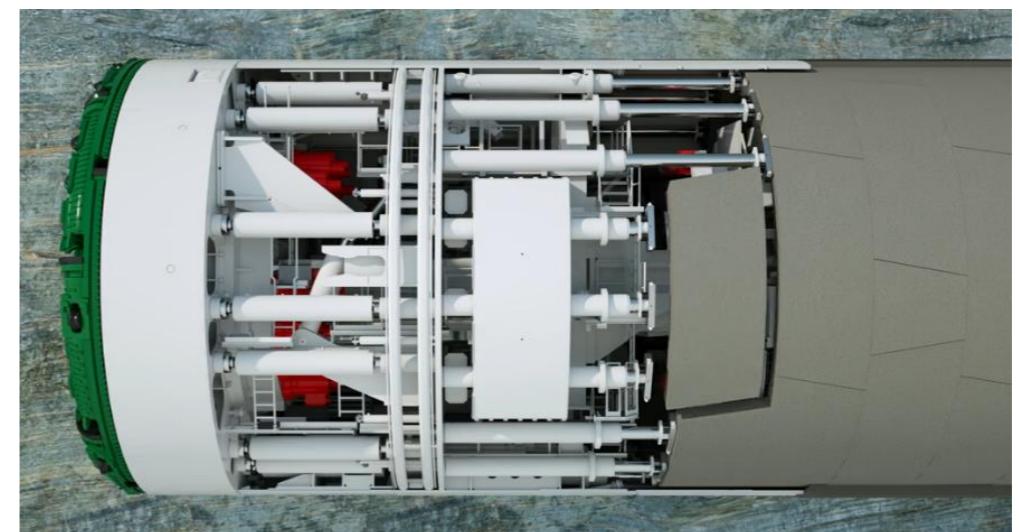
Konventionell –  
Sicherung mit Spritzbeton

Neue Österreichische  
Tunnelbauweise

Maschineller Vortrieb –  
Sicherung mit Tübbing

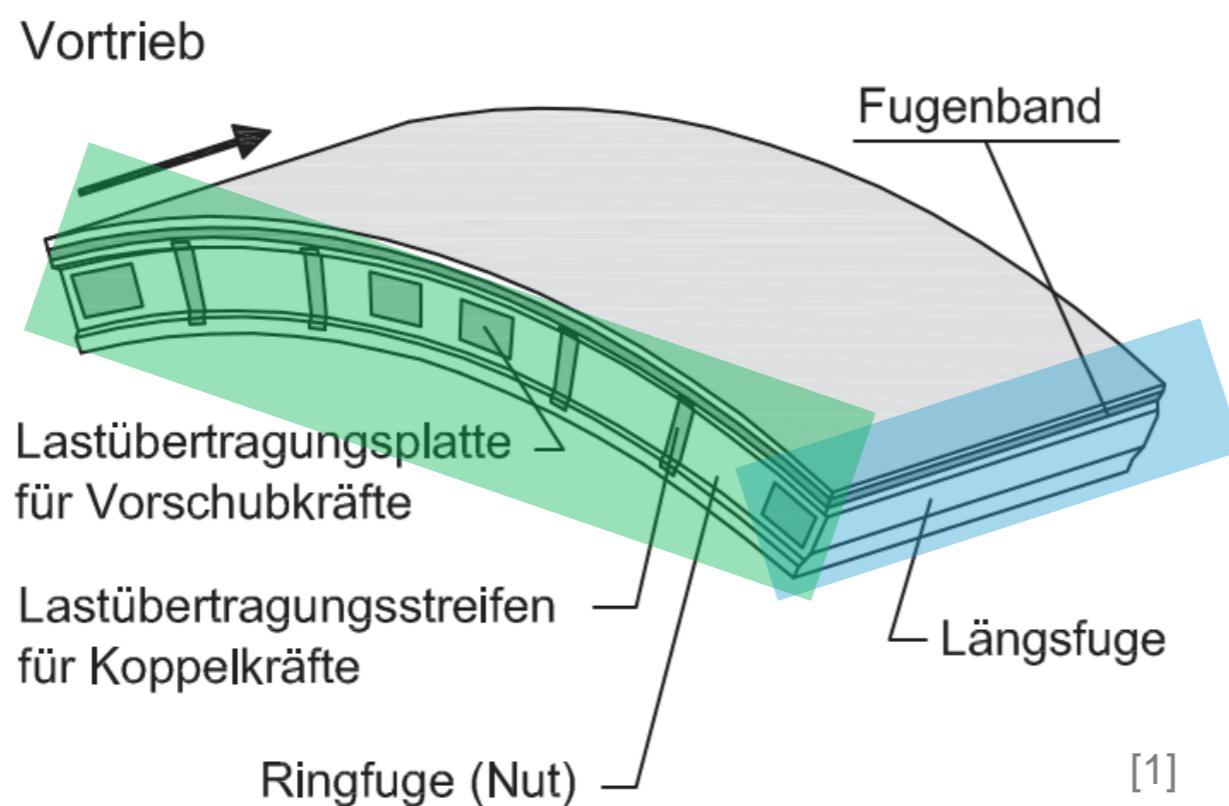
Einfachschild

Doppelschild



# Tübbing

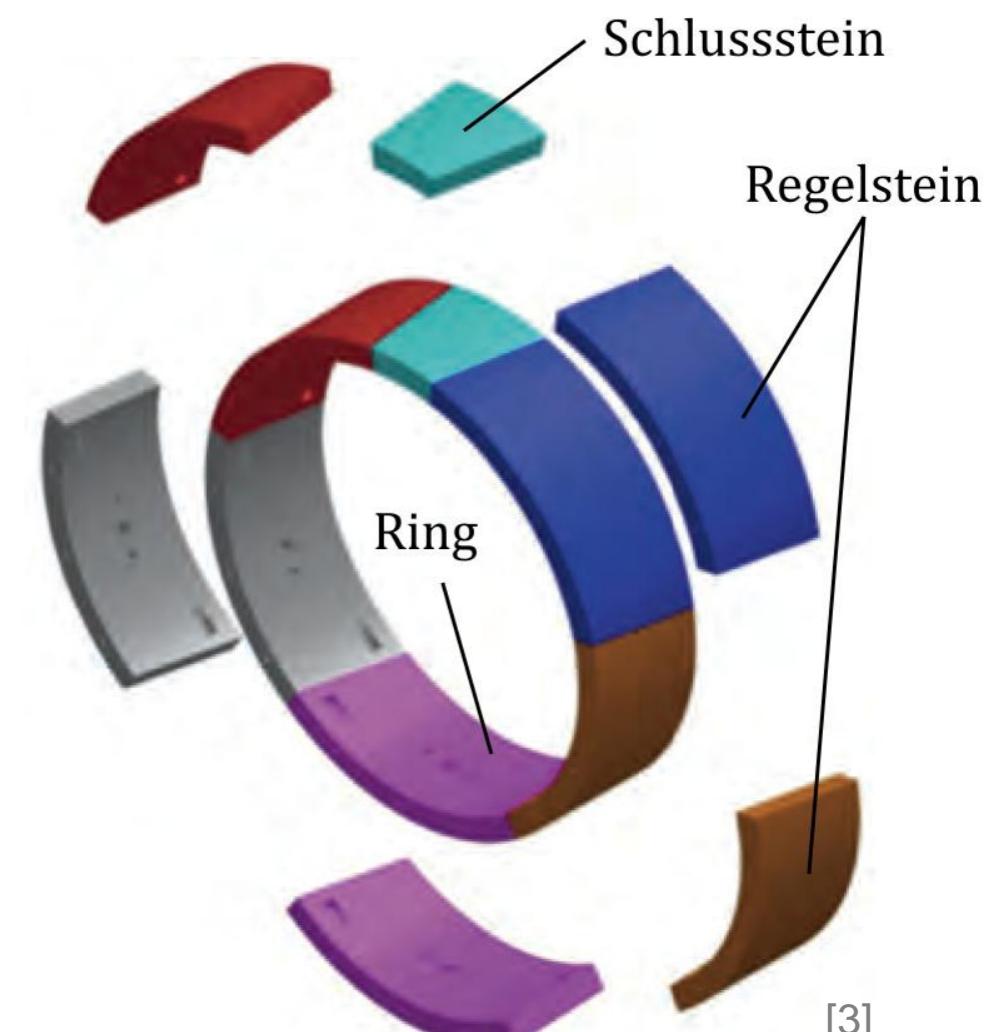
- Typisch ist der Einsatz von Blocktübbingen (konstante Dicke)
- Anordnung mehrerer Segmente zu einem Ring
- Daraus ergeben sich
  - **Längsfugen** zwischen Segmenten eines Ringes
  - **Ringfugen** zwischen den Ringen



[1]

PROGRESS GROUP

■ BERGMEISTER

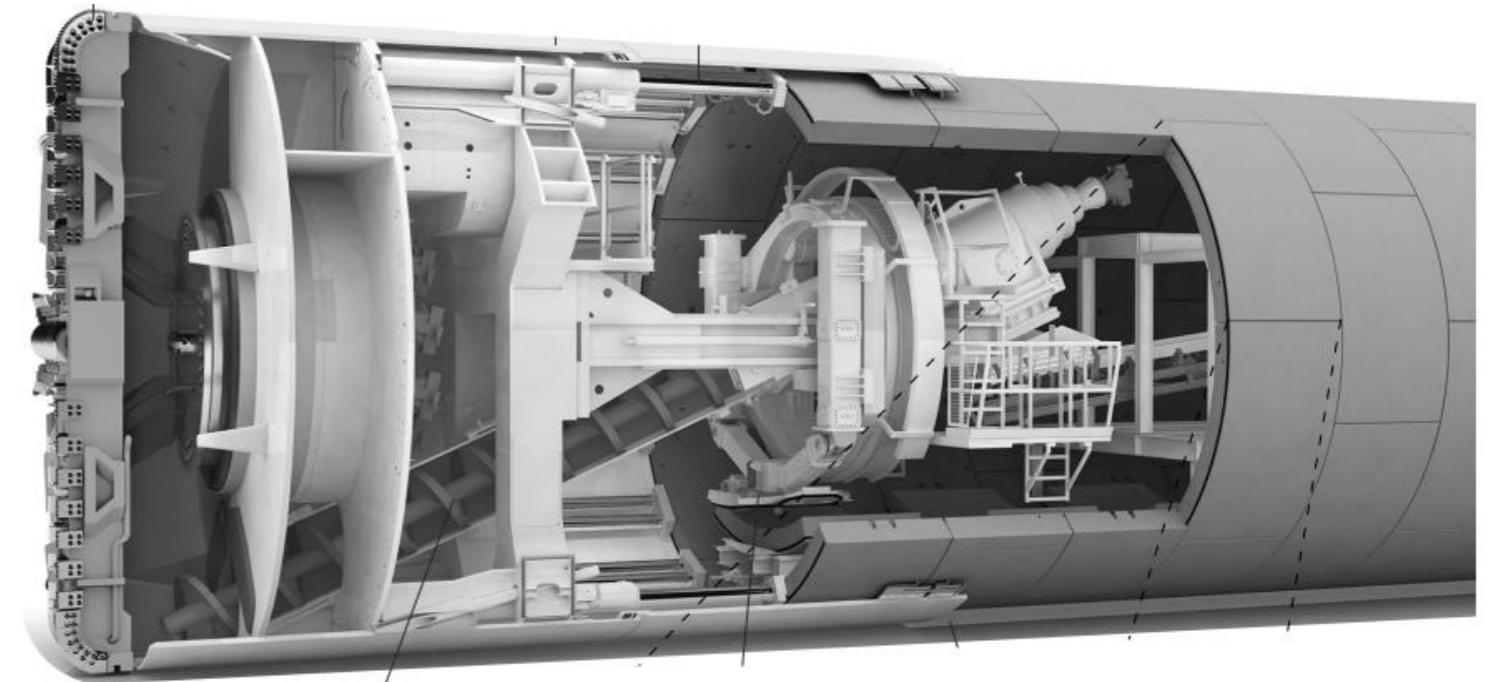
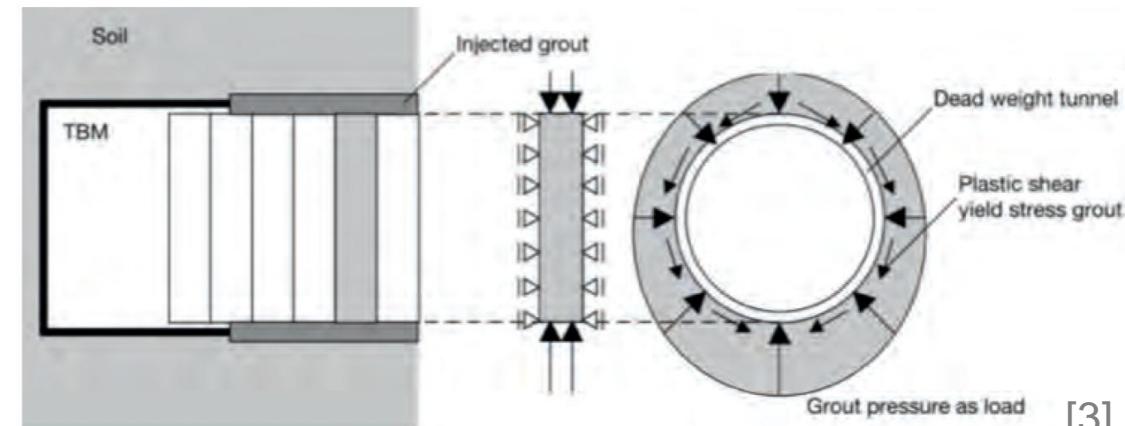


[3]

4

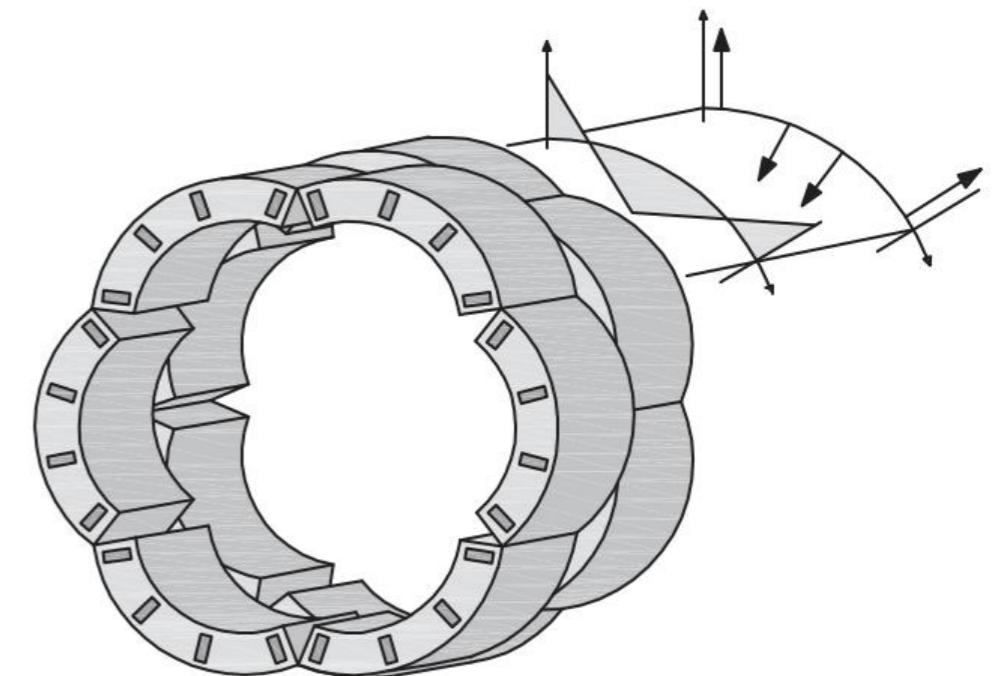
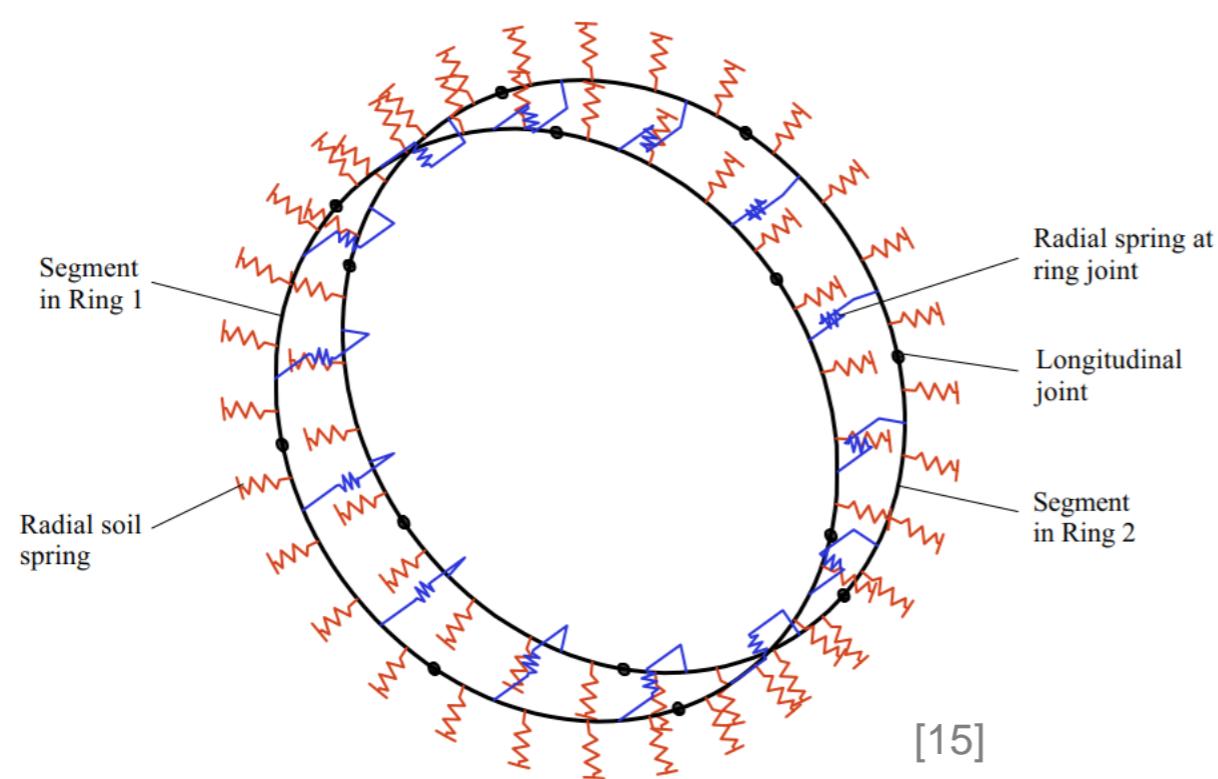
# Einwirkungen auf Tübbinge

- Ständige
  - Eigengewicht, Gebirgslast, Wasserdruck, etc.
- Veränderlich im Endzustand
  - Verkehrslasten Tunnelsohle, Oberlage
- Veränderlich im Bauzustand
  - Belastungen beim Einbau und Transport
  - Einleitung der Vortriebskräfte
  - Ringspaltverpressdruck
- Außergewöhnlich
  - Brand, Erdbeben, etc.



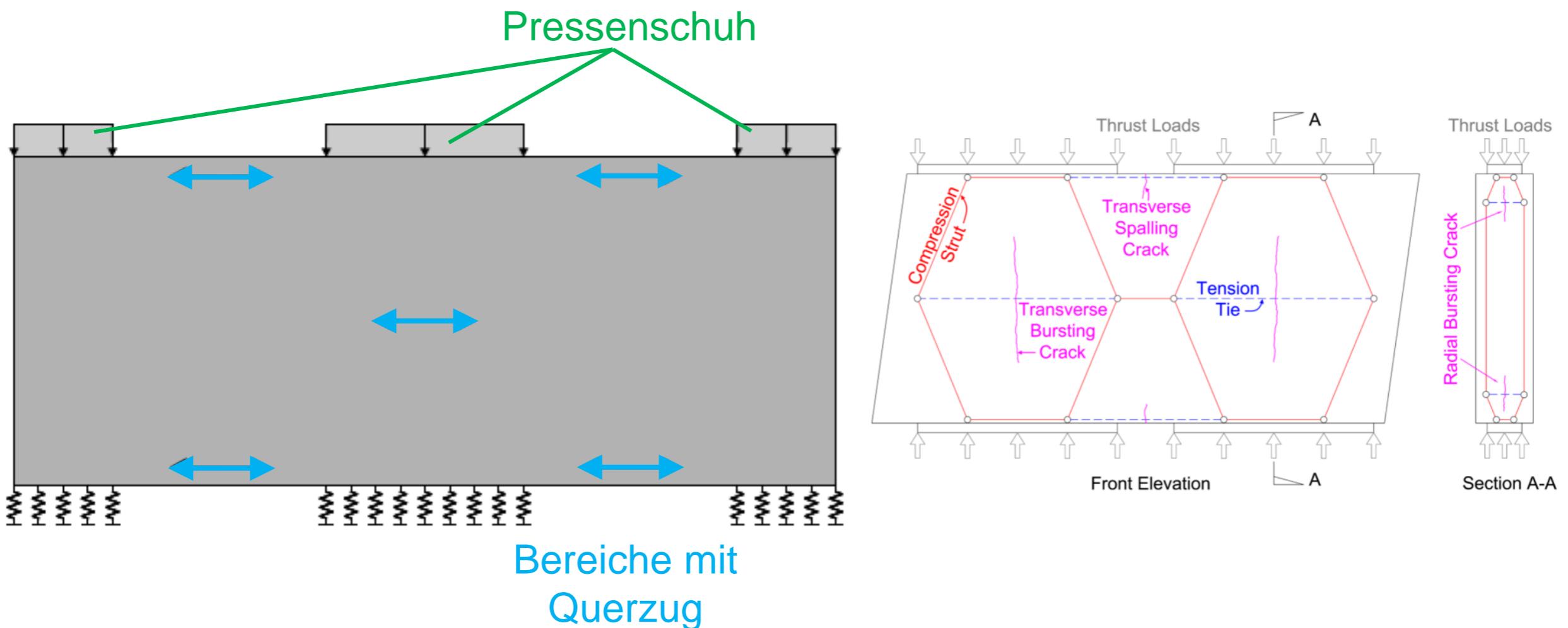
# Lastabtragung von Tübbingringen - Längsfugen

- Abtrag der Gebirgs- und Wasserdrücke über Schalentragwirkung
  - Stellt sich innerhalb eines Ringes ein
  - Überwiegend Druckkräfte in Ringrichtung mit geringen Biegemomenten
- Längsfugen stellen „Betongelenke“ dar
  - Über Beton-Beton-Kontaktflächen werden Ringnormalkräfte, geringe Biegemomente und Querkräfte übertragen



# Einleitung der Vortriebskräfte - Ringfugen

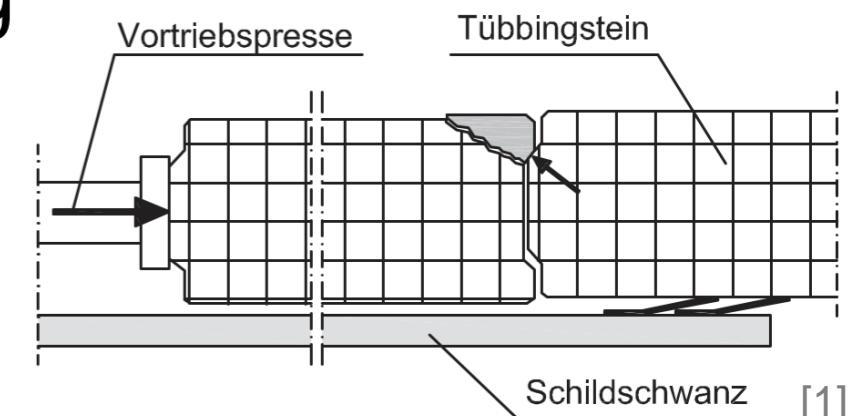
- Abstützung der Tunnelbohrmaschine an den Ringfugen
- Lokale Lasteinleitung über definierte Übertragungsflächen
  - Hohe Beanspruchung infolge Teilflächenpressungen
  - Mögliche Rissbildung infolge Spaltzug



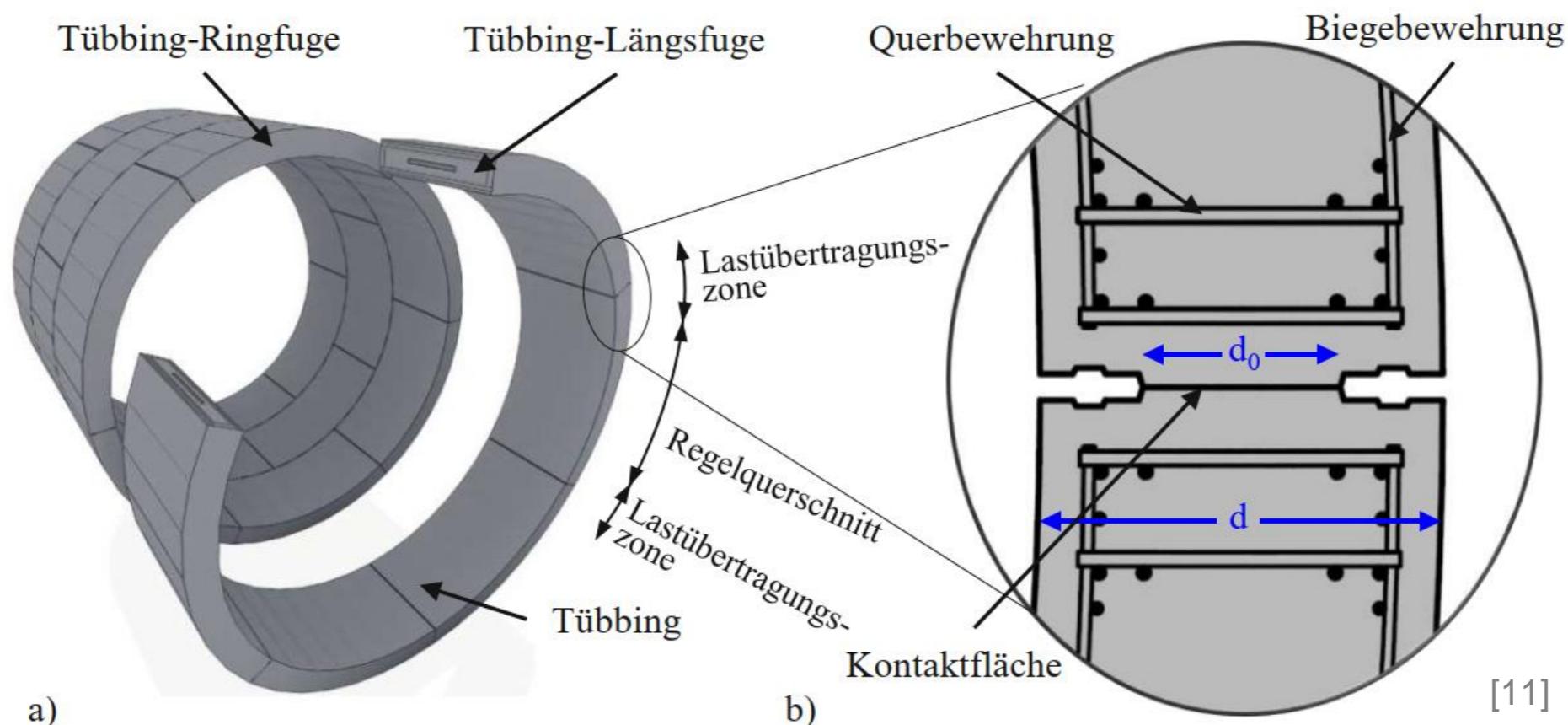
# Tübbingentwurf

- Möglichst robuste konstruktive Ausbildung

- Vorbeugung von Schäden
  - Nuten für Dichtbahnen
  - Einbauteile

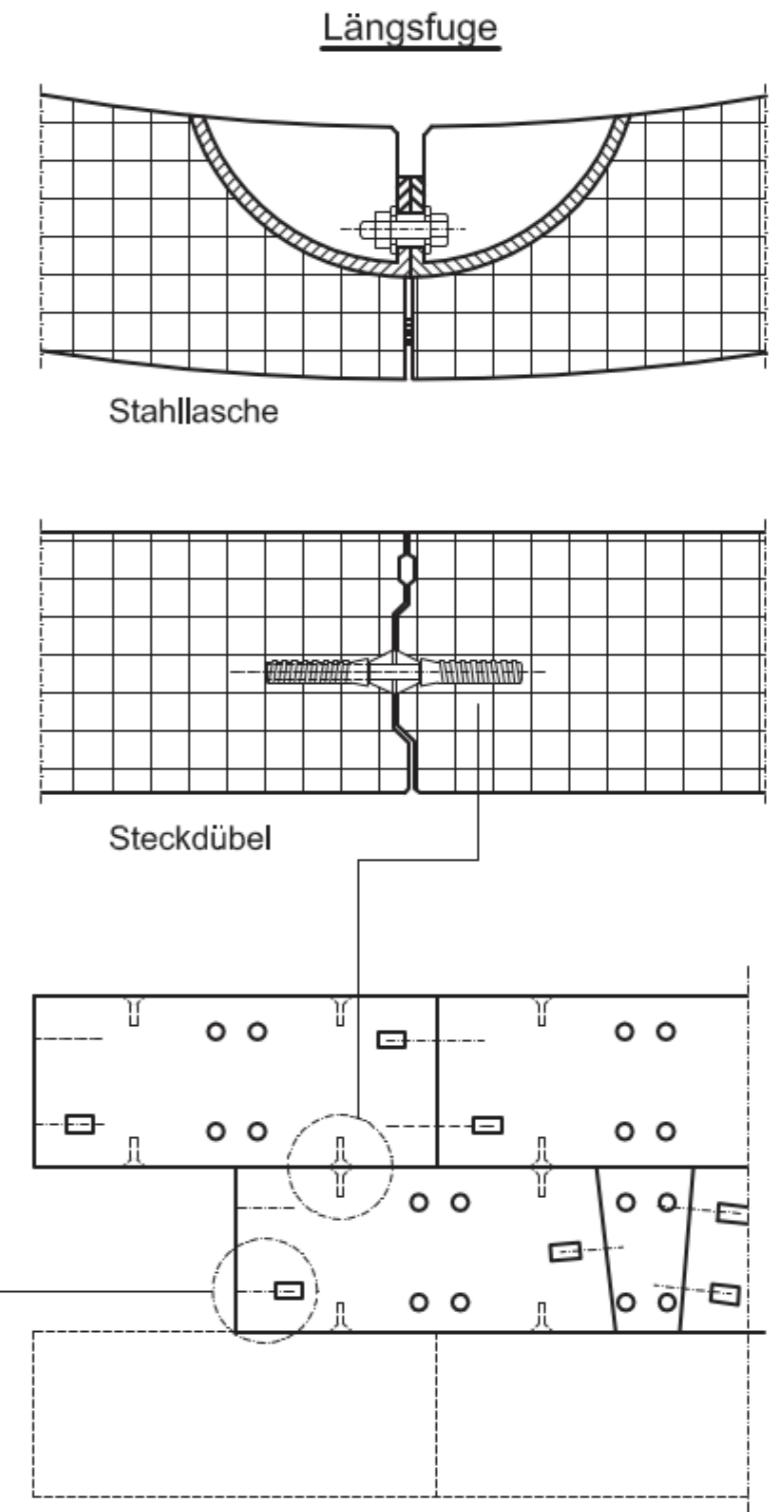
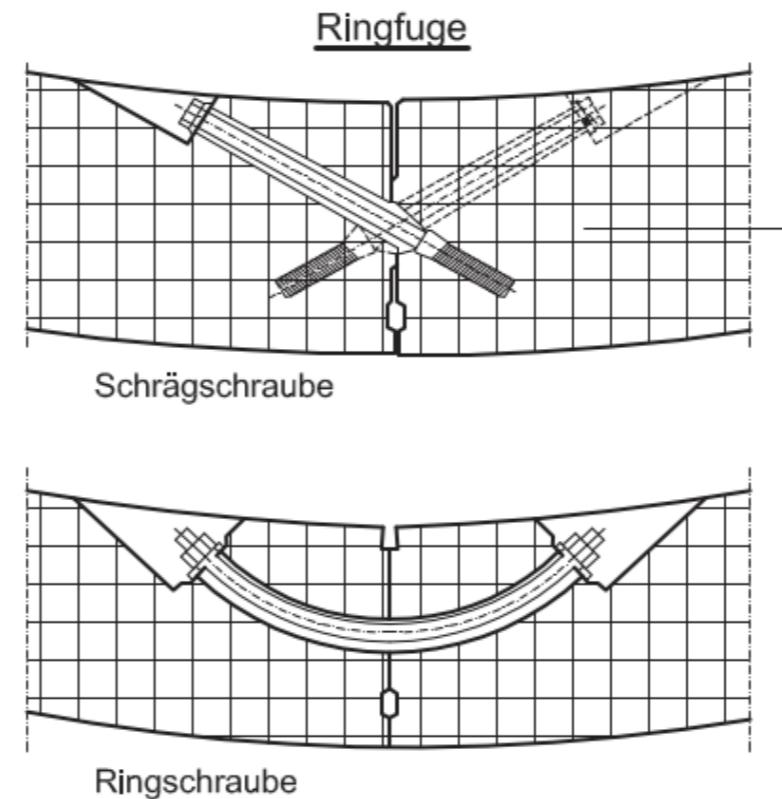


- Kontaktflächen  $d_0$  dadurch nicht über gesamte Tübbingbreite → Teilflächenpressung!



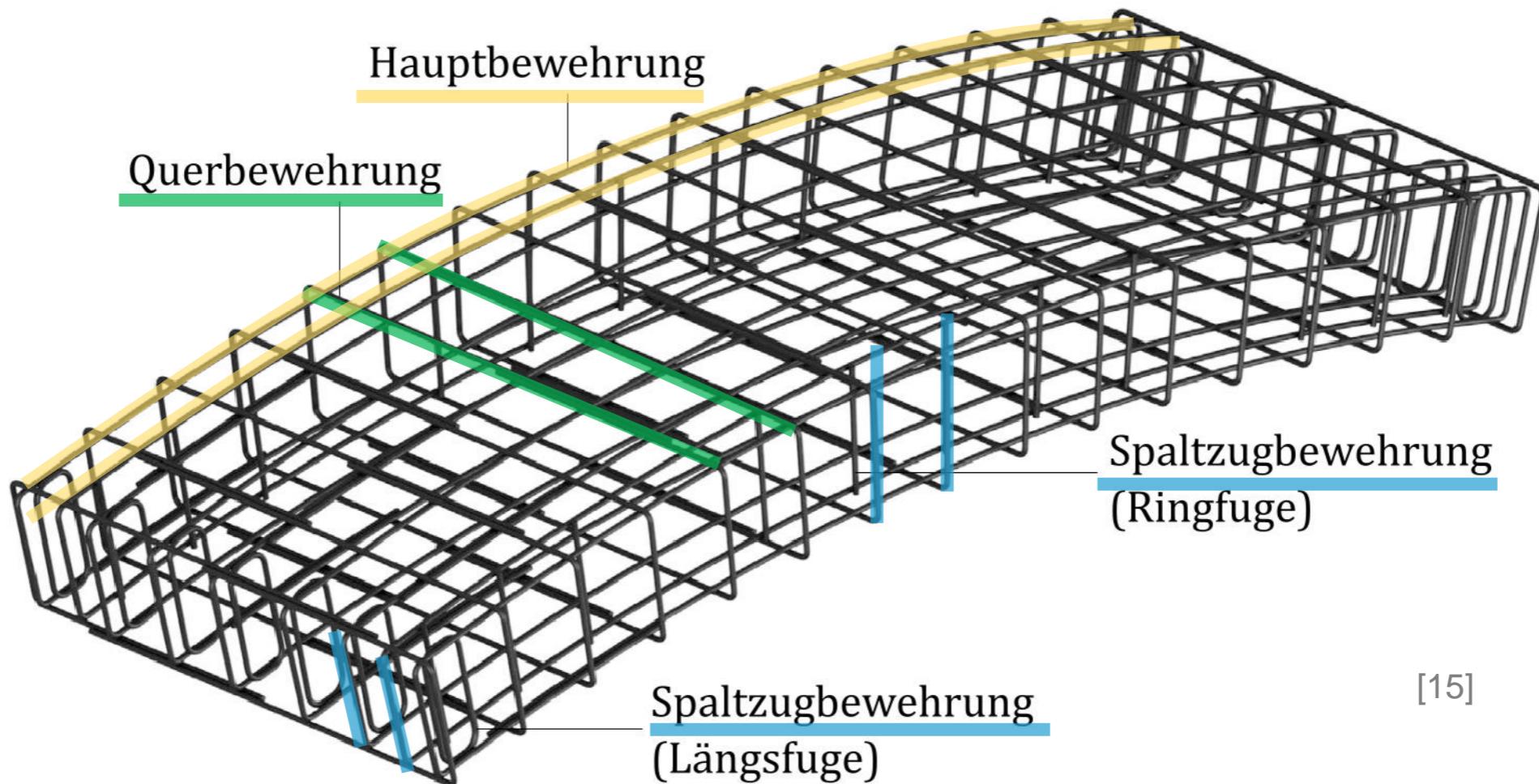
# Einbauteile

- Montagesicherung, konstruktive Zwecke
- Vorspannung der Dichtbänder
- Kraftschlüssige Verbindung an den Tunnelportalen
- Randabstände beachten



# Stab- und Mattenbewehrung

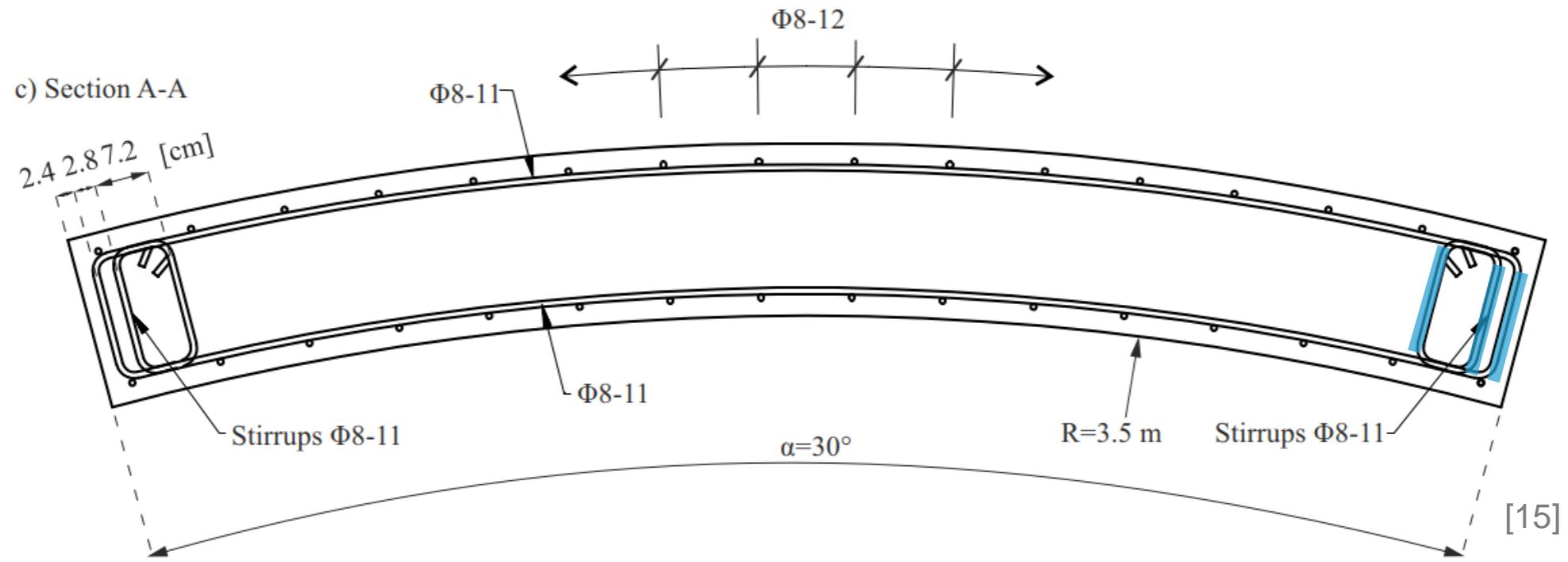
- Einteilung in drei Bewehrungsarten
  1. Hauptbewehrung in Umfangsrichtung des Rings
  2. Querbewehrung in Tunnellängsrichtung
  3. Spaltzugbewehrung – kritisch (Umschnürungswirkung?)



[15]

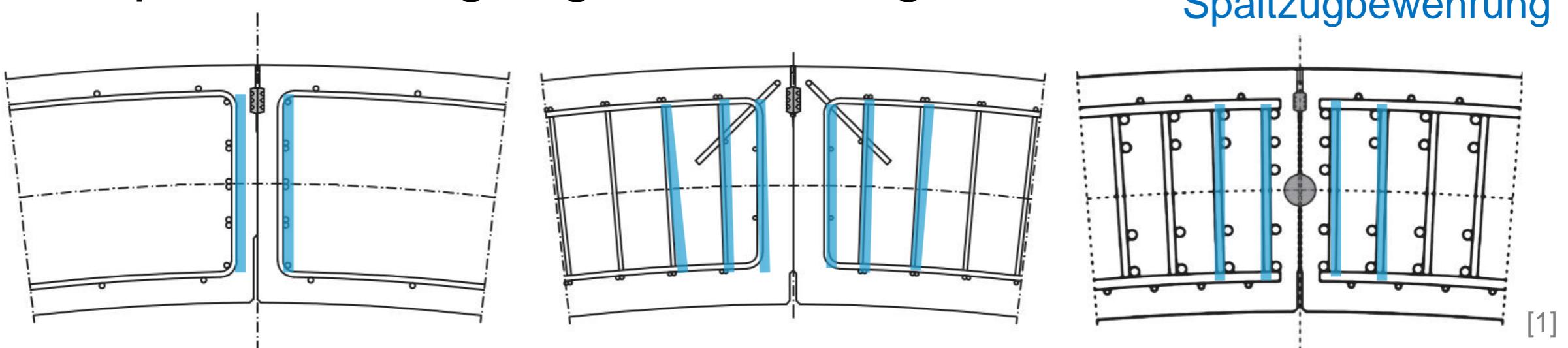
# Spaltzugbewehrung

## ■ Spaltzugbewehrung im Bereich der Fugen



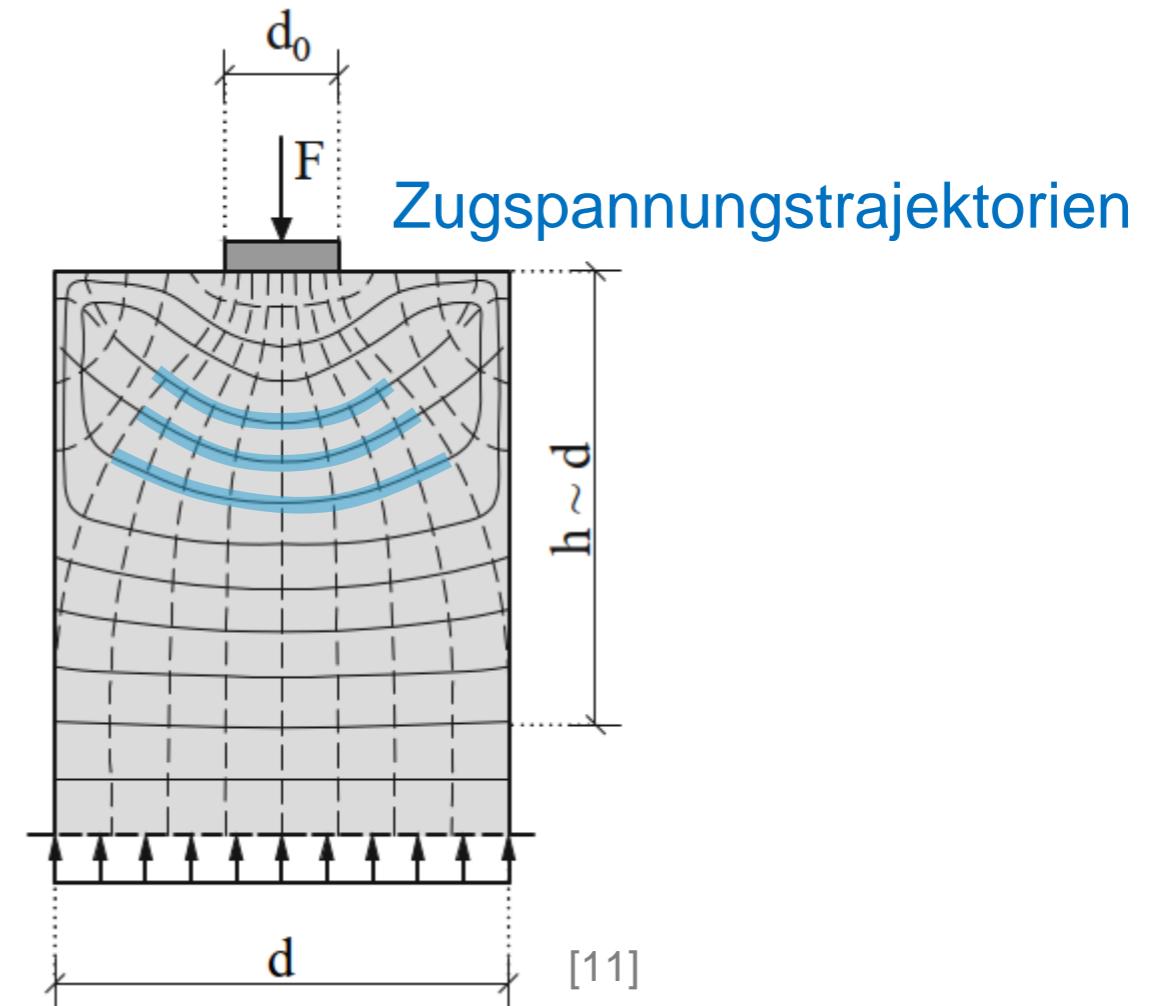
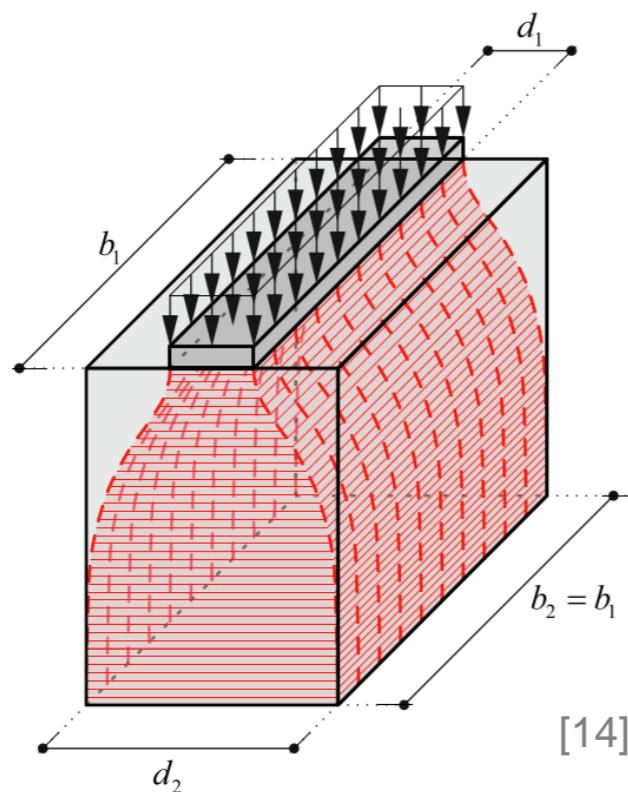
## ■ Beispiele der Längsfugenausbildung

Spaltzugbewehrung



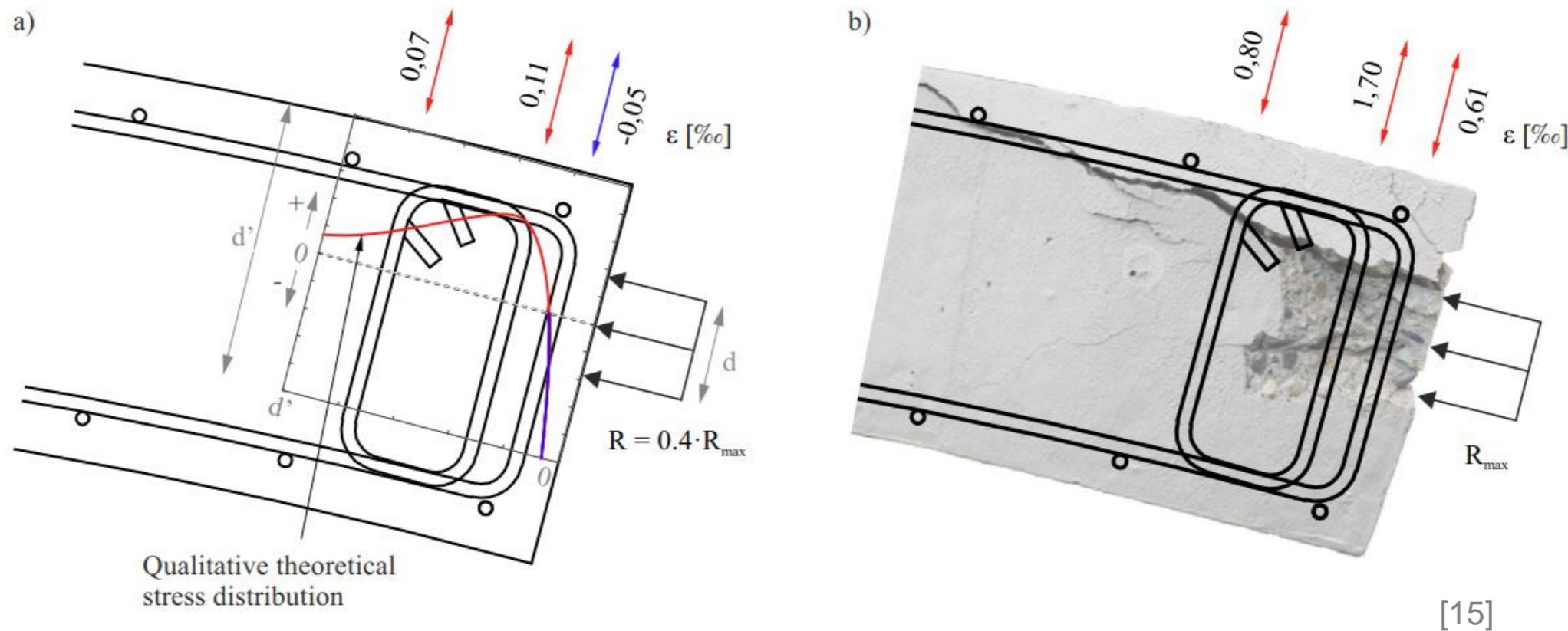
# Krafteinleitung - Teilflächenpressung in Beton-Kontaktflächen

- Der kritische Bemessungsbereich
- Lastausbreitung



- Aufnahme der Querzugkräfte
  - a. Fasern
  - b. Spaltzugbewehrung
  - c. Optimierung sinnvoll

# Kräfte in Bewehrung umsetzen

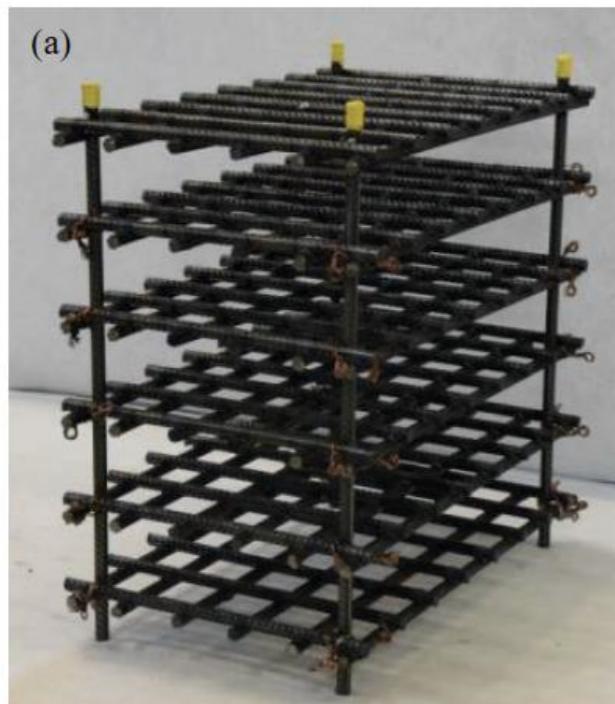


- Direkt bei der Kontaktfläche hoher mehraxialer Druckspannungszustand
- Angrenzend dazu entstehen Querzugkräfte
- **Spaltzugbewehrung** führt zu günstiger Umschnürungswirkung des Betons (erhöhte Druckfestigkeit)
- Kritisch ist oft Verankerung

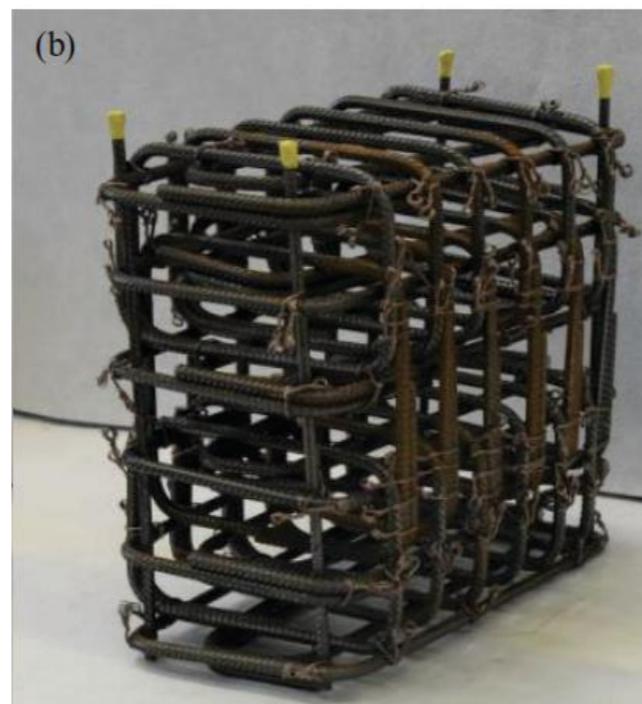
# Aufnahme des Spaltzugs mit Stabstahl

- Mögliche Ausführung der Spaltzugbewehrung

a) Geschweißte Gitter



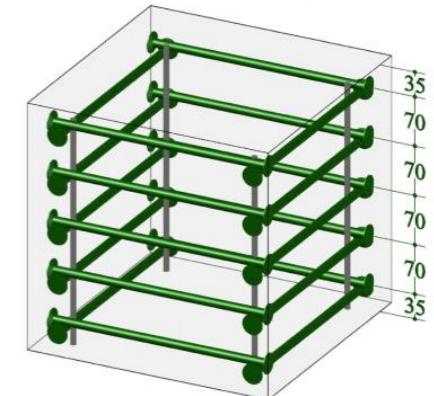
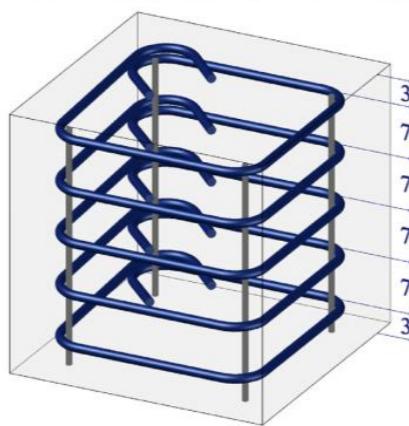
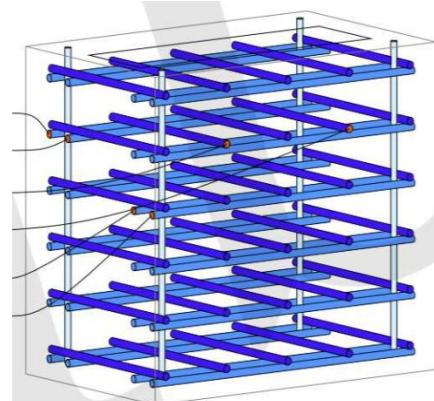
b) Bügel



c) Doppelkopfanker



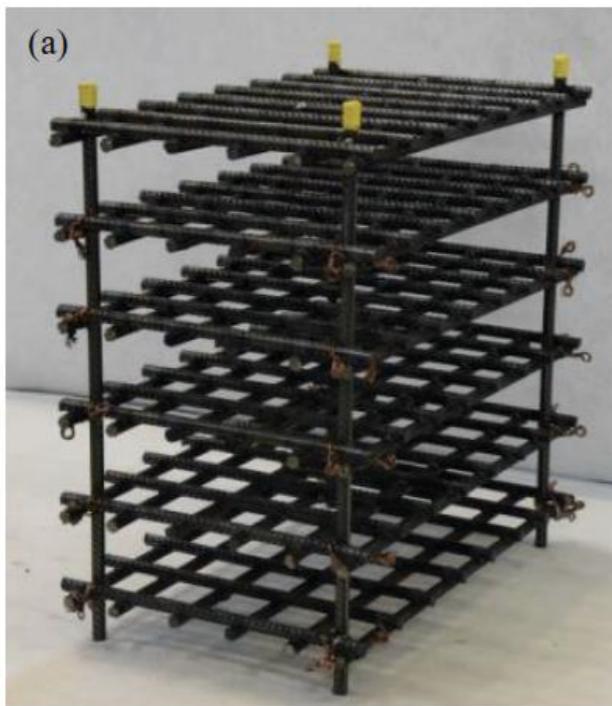
[26,  
27]



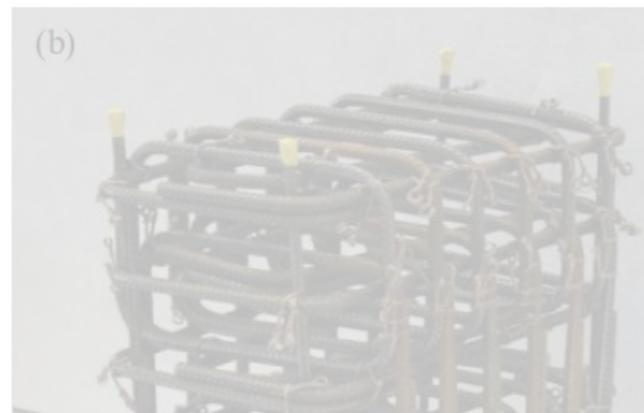
# Aufnahme des Spaltzugs mit Stabstahl

## ■ Mögliche Ausführung der Spaltzugbewehrung

a) Geschweißte Gitter



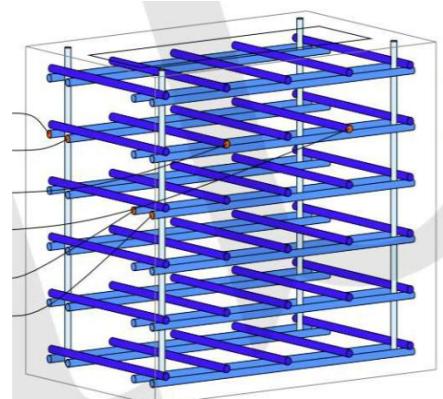
b) Bügel



c) Doppelkopfanker



- Sehr gut geeignet für roboterbasierte Schweißanlage
- Schneller Einbau
- Erhöhte Stabilität des Korbes
- Verbesserte Performance durch geschweißte als überlappte Stöße





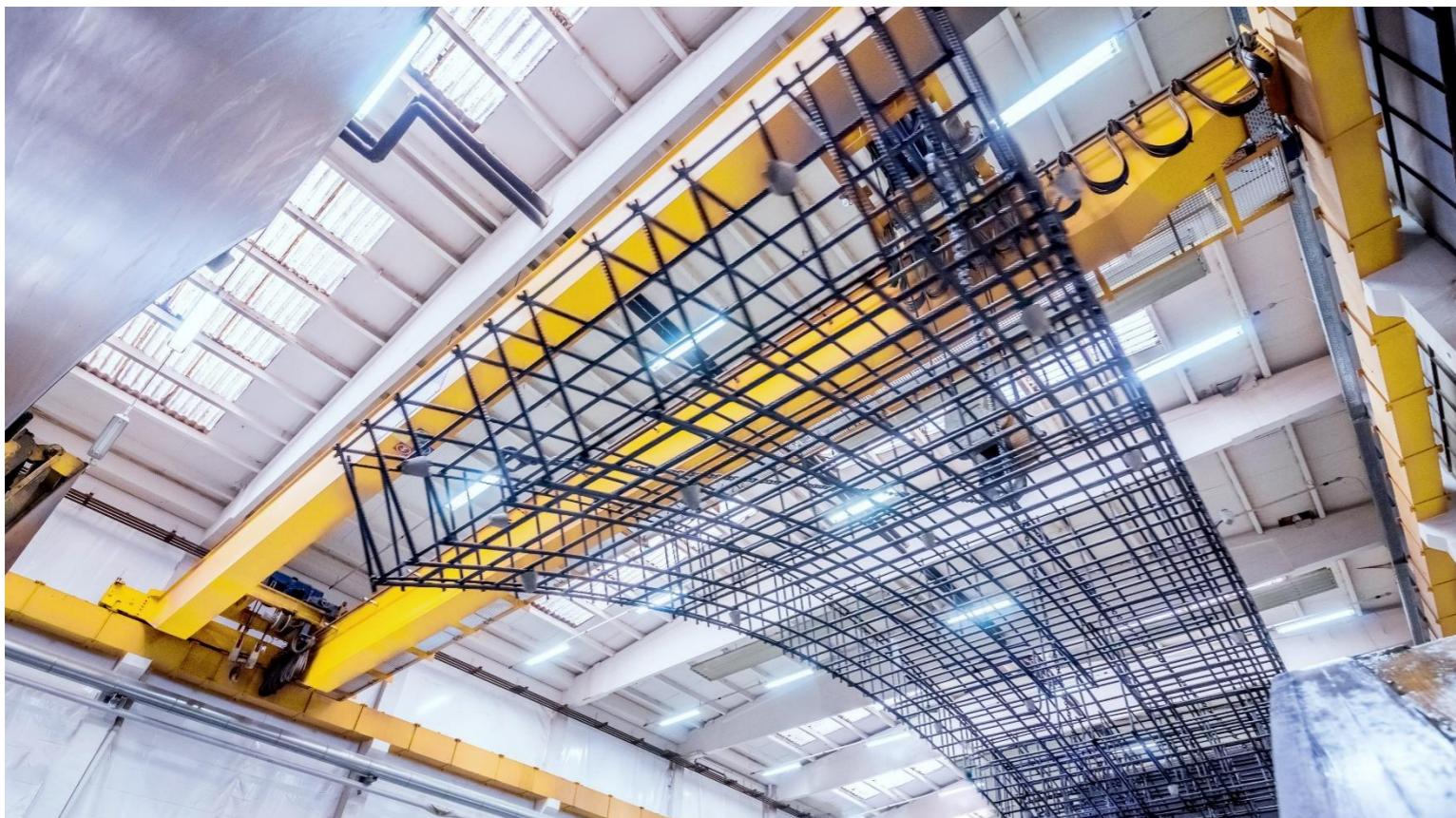
**PROGRESS** **GROUP**

# **Innovative bewehrungs- produktion für tunnelbau**

**LUKAS  
DUSINI**

**Sales Manager  
PROGRESS Maschinen & Automation  
AG**

Unser ziel



**Höchstes  
Automatisierungslevel**



**Mehr Output mit weniger  
Arbeitskräften**



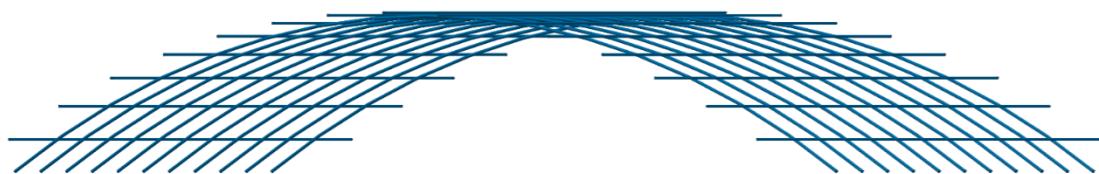
**Kontinuierlich hohe  
Qualität**



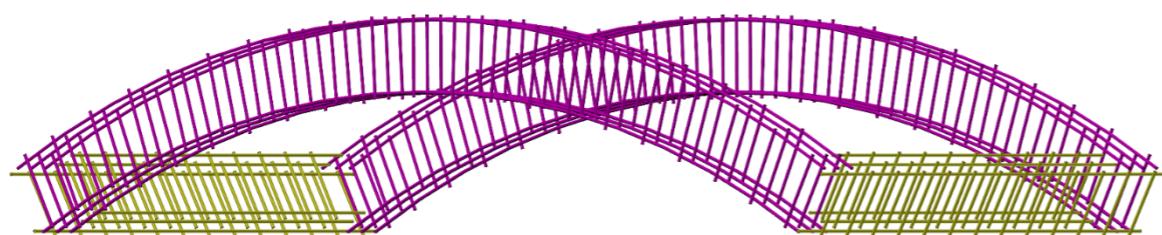
**Prozessüberwachung  
und Qualitätskontrolle  
in Echtzeit**

Wie wir das erreichen

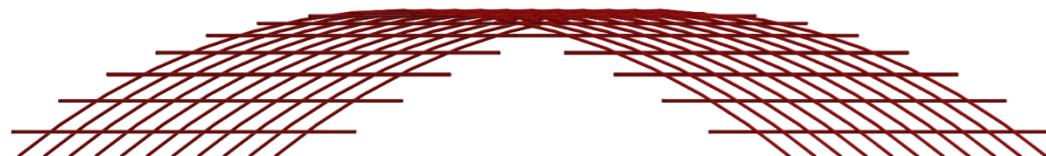
# Produkt-Design



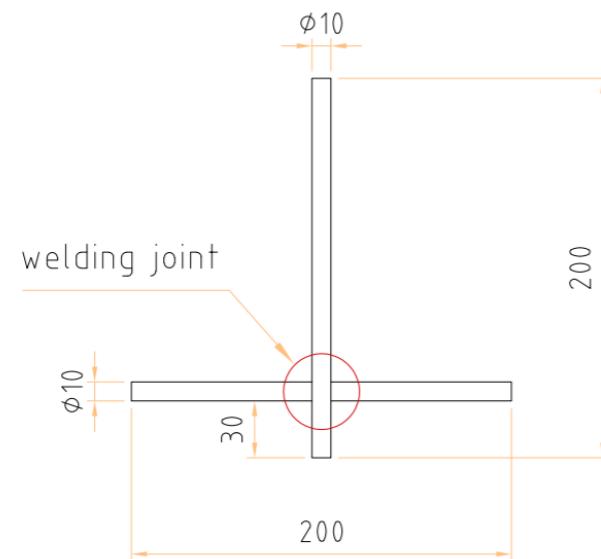
**Intelligentes  
Produktdesign**



**Korb Design  
Software**



- Norm für das Schweißen von Betonstahl, DIN EN ISO 17660-2
- Festlegung der Streckgrenze und Scherfestigkeit (bis max. SF 70)
- Definition und Kalibrierung der Schweißparameter



**ASSEMBLAGES PAR SOUDURES DES ARMATURES  
PRÉFABRIQUÉES DES VOUSSOIRS Suivant la norme NF EN ISO 17660-1:**

**- Cas n1 : Panneaux de treillis intrados & extrados des voussoirs**

Chacun des 2 panneaux est constitué par 2 nappes d'acier (de cercles HA14 et longitudinales HA14), qui seront soudées en usine par le préfabriquant (procédé 21) Facteur de cisaillement Sf à 30% (SF30 ; Fs=23,1kN)



**- Cas n2: Frettes en échelle renforçant les surfaces de contact**

CONTACT ENTRE ANNEAUX:  
échelles constituées de HA14 radiales et cercles HA14 , seront soudées en usine par le préfabriquant (procédé 21)  
Facteur de cisaillement Sf à 70% (SF70 ; Fs=54kN)



CONTACT ENTRE VOUSSOIRS:

échelles constituées de HA16 radiales et HA16 longitudinales, soudées en usine par le préfabriquant (procédé 21)  
Facteur de cisaillement Sf à 70% (SF70 ; Fs=70kN)



**- Cas n3: Assemblage des panneaux intrados & extrados avec échelles de frettés de surface**

CONTACT ENTRE ANNEAUX:  
Assemblage longe sur panneau de frette de surface, procédé 135: HA14 sur HA14  
Facteur de cisaillement Sf à 70% (SF70 ; Fs=54kN)



CONTACT ENTRE VOUSSOIRS:

Assemblage cercle sur panneau de frette de surface , procédé 135: HA14 sur HA16  
Facteur de cisaillement Sf à 70% (SF70 ; Fs=70kN)

- Durchführung von Scherfestigkeitsprüfungen an den geschweißten Prüfkörpern

- Schweißsystem wird unter Berücksichtigung der erforderlichen Scherfestigkeit der Schweißverbindungen anhand der folgenden Parameter eingestellt:

- Schweißstrom
- Schweißzeit
- Schweißdruck

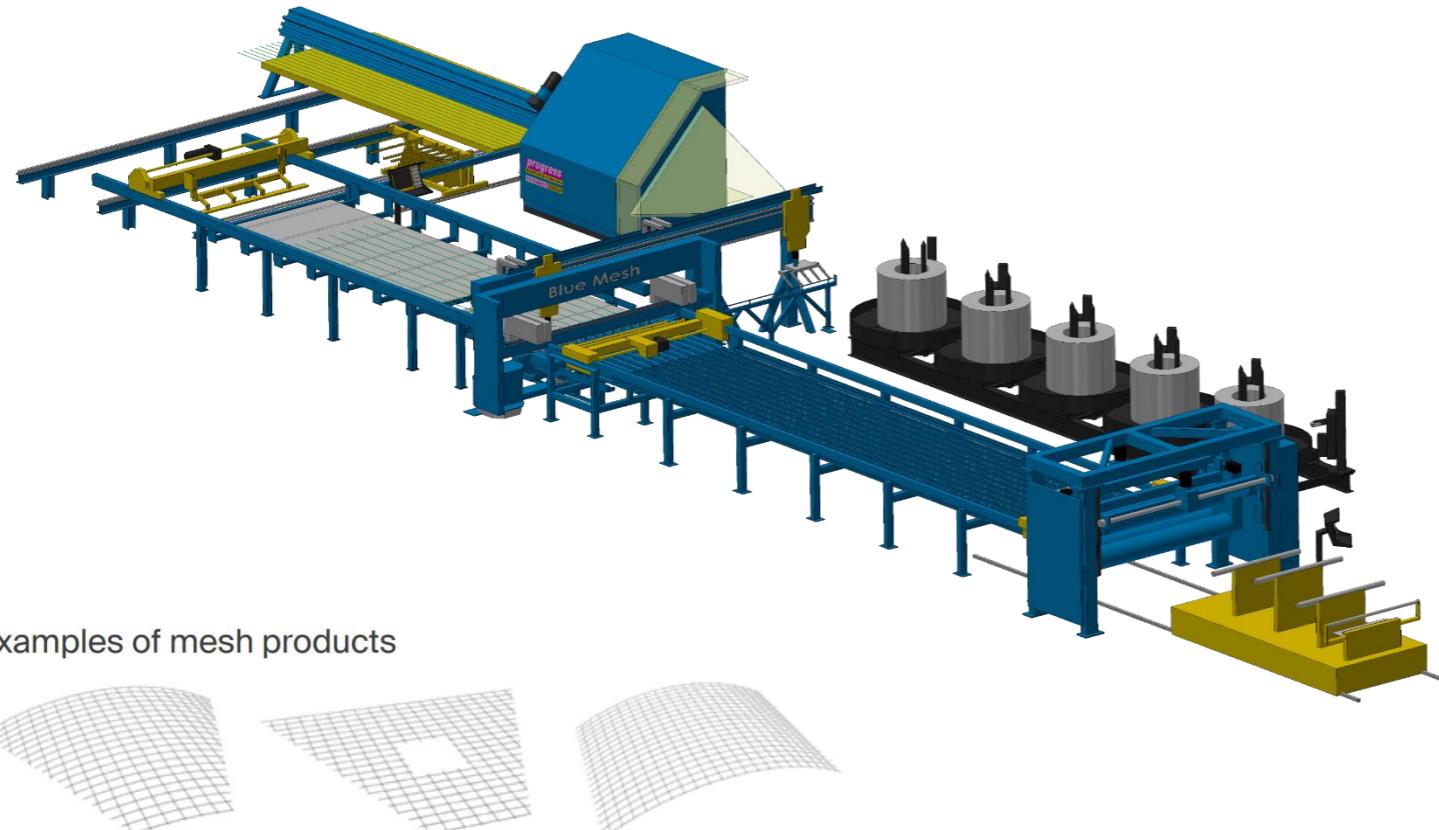
- Bei Abweichungen von den eingestellten Parametern wird eine Fehlermeldung ausgegeben und gewährleistet so eine Fehlererkennung in Echtzeit während des Prozesses.



Reinforcement cage welding protocol									
Profile: Standard									
Period: 14.03.2023/14:31:04-14:31:46									
Measuring	Time	Production batch	Product ID	Welding point ID	Welding time (ms)	Welding current (A)	Welding pressure [mbar]	Q-value	
1	14.03.2023 14:31:00	Project_345_lot_01	345_lot_01_6	345_lot_01_6_L02_P01	300	11966	6000	99,72%	
2	14.03.2023 14:31:05	Project_345_lot_01	345_lot_01_6	345_lot_01_6_L02_P02	300	12020	6000	100,17%	
3	14.03.2023 14:31:10	Project_345_lot_01	345_lot_01_6	345_lot_01_6_L02_P03	300	12032	6000	100,27%	
4	14.03.2023 14:31:15	Project_345_lot_01	345_lot_01_6	345_lot_01_6_L02_P04	300	11998	6000	99,98%	
5	14.03.2023 14:31:20	Project_345_lot_01	345_lot_01_6	345_lot_01_6_L02_P05	300	12016	6000	100,13%	
6	14.03.2023 14:31:25	Project_345_lot_01	345_lot_01_6	345_lot_01_6_L02_P06	300	11987	6000	99,89%	
7	14.03.2023 14:31:30	Project_345_lot_01	345_lot_01_6	345_lot_01_6_L02_P07	300	7898	6000	65,82%	
8	14.03.2023 14:31:35	Project_345_lot_01	345_lot_01_6	345_lot_01_6_L02_P08	300	12000	6000	100,00%	
9	14.03.2023 14:31:40	Project_345_lot_01	345_lot_01_6	345_lot_01_6_L02_P09	300	12045	6000	100,38%	
10	14.03.2023 14:31:45	Project_345_lot_01	345_lot_01_6	345_lot_01_6_L02_P10	300	11978	6000	99,82%	

# Mattenschweiß-Anlage

PROGRESS GROUP



**Höchste Flexibilität für unterschiedliche Mattenformen**



**Vollautomatisierte Produktion**



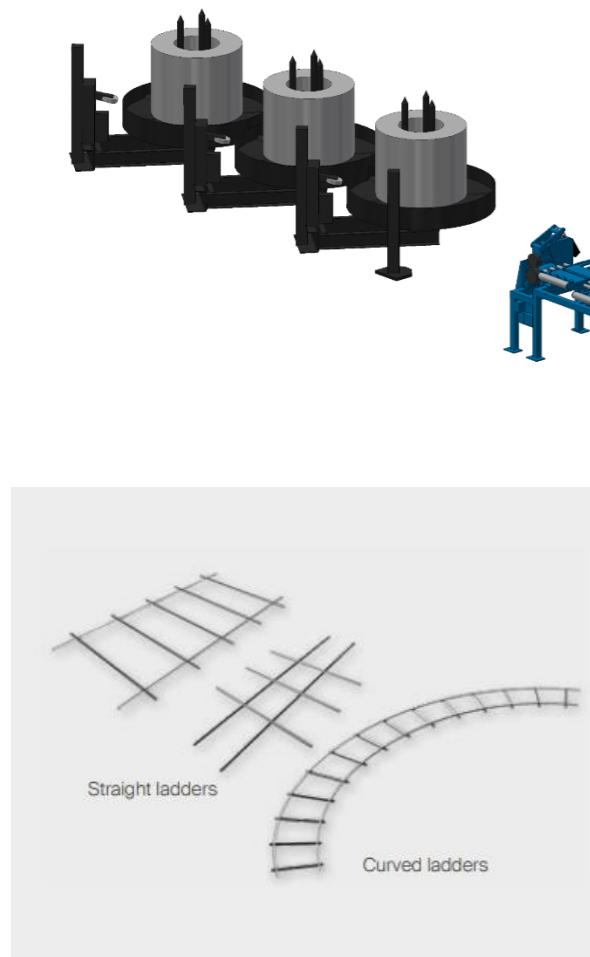
**Just in time Produktion**



**Echtzeit-Feedback der Produktion**

# Leiternschweiß-Anlage

PROGRESS GROUP



**Höchste Flexibilität  
für unterschiedliche  
Leitern**



**Automatisierte  
Produktion von  
geraden Leitern und  
Kurvenleitern**



**Just in time  
Produktion**



**Echtzeit-Feedback  
der Produktion**

# Matten- & Leiternschweißanlage

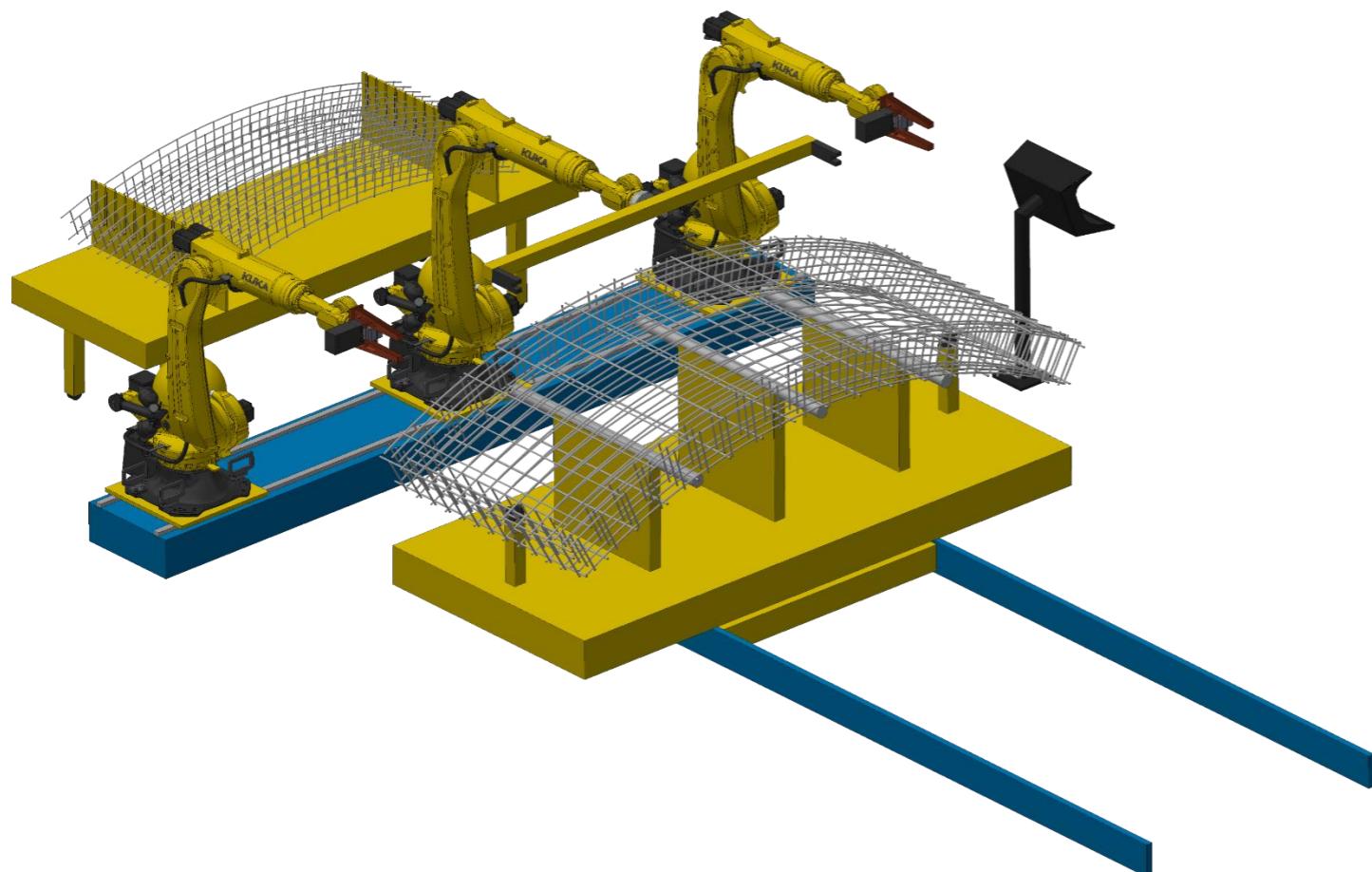
---

**PROGRESS** **GROUP**

**PROGRESS** **GROUP**

# Korbschweißmaschine

PROGRESS GROUP



**Automatischer  
Korbzusammenbau**



**Automatisches  
Korbschweißen**



**Just in time  
Produktion**



**Echtzeit-Feedback  
der Produktion**

# Korbschweißmaschine

PROGRESS GROUP





**Detaillierte  
Produktionsplanung**



**Maschinenintegration für  
maximale Genauigkeit in  
der Produktion**



**Maschinen-Feedback**



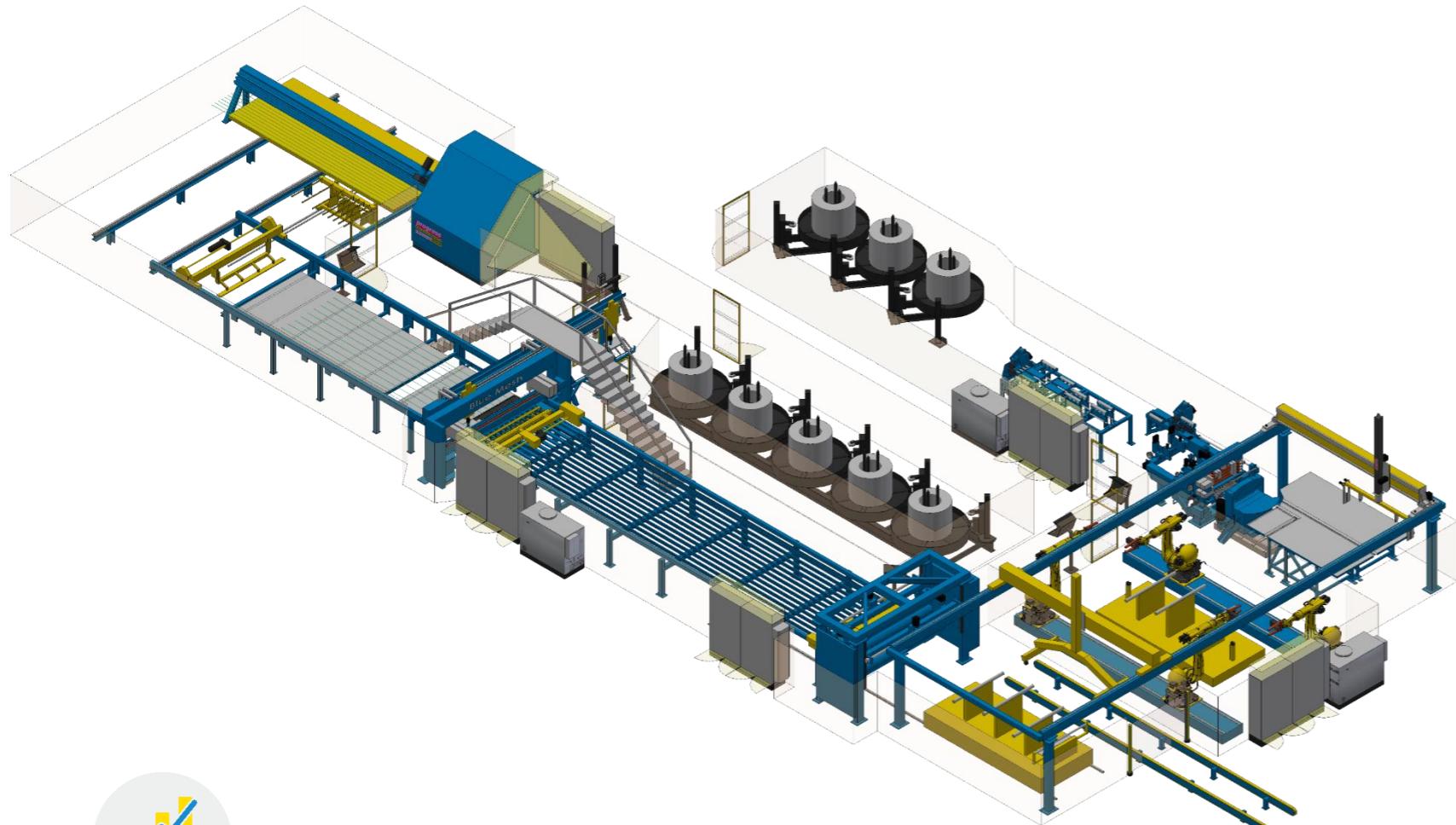
**Materialrückverfolgung**



**Automatische  
Qualitätskontrolle**

# Schlüsselfertige Komplettlösung

PROGRESS GROUP



**3 – 12 Körbe pro Stunde  
mit 2 – 5 Arbeitern**



**Vollautomatisierte  
Korbproduktion**



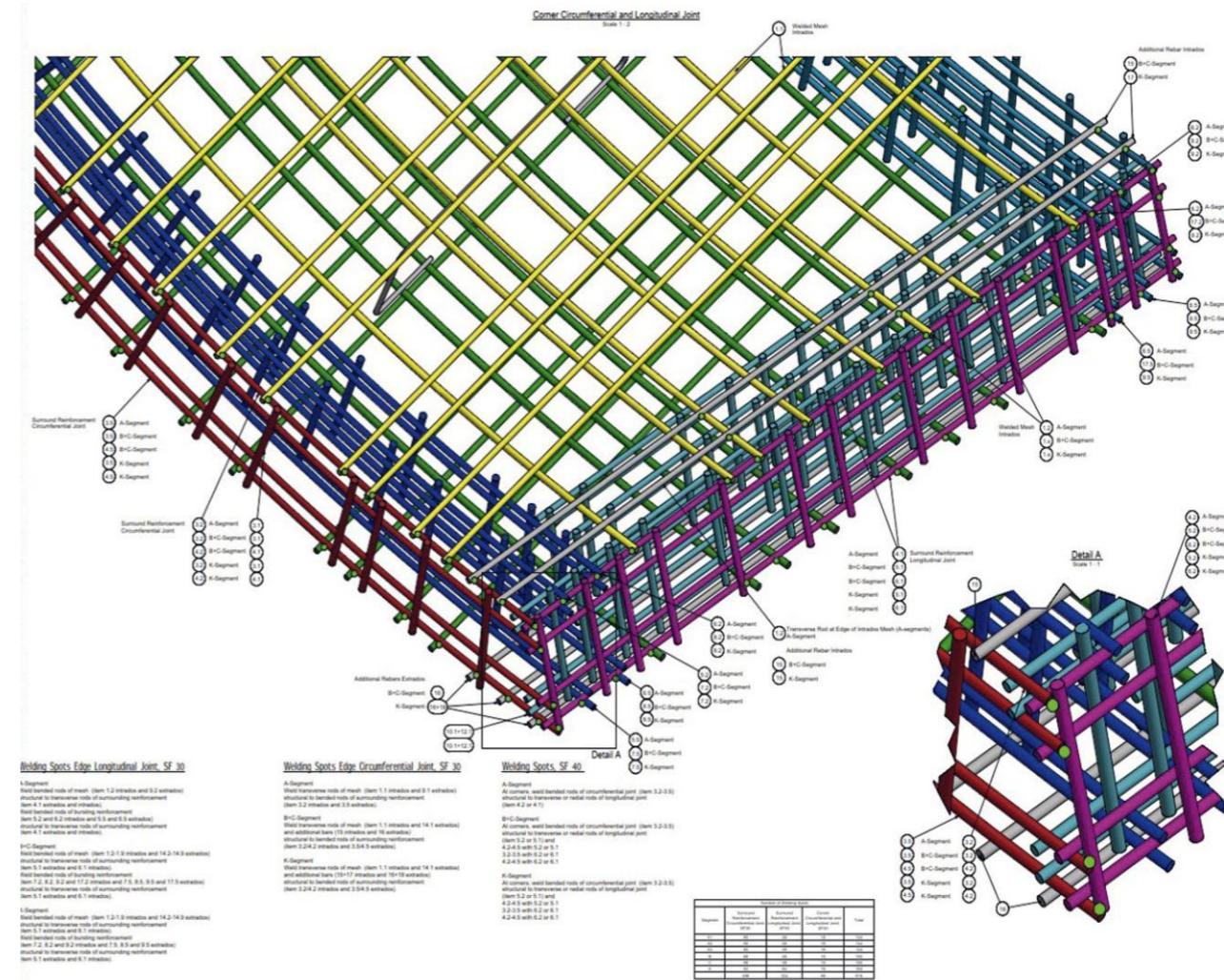
**Komplett  
schlüsselfertig**



**Automatische  
Prozessüberwachung**

# Ressourceneffiziente Tübbinge durch robotergeschweißte Bewehrung

- Hoher Automatisierungsgrad
  - Einsatz von Robotern bei der Bewehrungskorb-Herstellung
    - Hohe Qualität (insbesondere der Schweißnähte)
    - Hohe Genauigkeit (wichtig aufgrund hohe Maßhaltigkeitsanforderungen)
    - Reduzierter Verlegeaufwand
    - Exzellent für Leiterelemente



# FRAGEN?



## **MATTHIAS RIGLER**

**Project Engineer + Doktorand  
BERGMEISTER ZT GmbH**

**[matthias.rigler@bergmeister.eu](mailto:matthias.rigler@bergmeister.eu)**



## **LUKAS DUSINI**

**Sales Manager  
PROGRESS Maschinen und Automation  
AG**

**[dusini@progress-m.com](mailto:dusini@progress-m.com)**

# Referenzen

- [1] G. Behnen und O. Fischer, *Tübbingfertigteile im Tunnelbau*, 114. Jahrgang. in Beton-Kalender, no. 114. Jahrgang (2025). Berlin, Germany: Ernst & Sohn, 2024. doi: 10.1002/9783433611999.
- [2] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB), *Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen*, 2013.
- [3] ITA, *Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Linings*, ITA Report 22, 2019.
- [4] C. Proksch-Weilguni, H. Wolfger, und J. Kollegger, „Optimized reinforcement in longitudinal joints of segmental tunnel linings“, *Geomech. Tunn.*, Bd. 14, Nr. 4, S. 390–399, Aug. 2021, doi: 10.1002/geot.202000046.
- [5] Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen, *Empfehlung für Dichtungsrahmen in Tübbingauskleidungen*. in Forschung + Praxis, no. 54. Köln: STUVA (Selbstverlag), 2019.
- [6] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), *Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“*, 2009.
- [7] G. F. Schmidt-Thrö, „Zum Tragverhalten der Tübbinglängsfuge“, Dissertation, Technische Universität München, 2019.
- [8] Austrian Standards International, *Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen*, ÖNORM B 1992-1-1, 2018.
- [9] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), *Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton“*, 2015.
- [10] Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, *Baulicher Brandschutz in Straßentunnel*, RVS 09.01.45, 2015.
- [11] C. Proksch-Weilguni, „Zum Tragverhalten von hoch beanspruchten Lastübertragungszonen im Segmenttunnelbau“, Dissertation, Technische Universität Wien, 2024.
- [12] H. Kupfer, Hrsg., *Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung*. in DAfStb-Heft, no. 229. 1973.
- [13] DAfStb, Hrsg., *Hilfsmittel zur Schnittgrößenermittlung und zu besonderen Detailnachweisen bei Stahlbetontragwerken*. in DAfStb-Heft, no. 631. Berlin: Beuth Verlag, 2019.
- [14] T. Markic, F. Morger, und W. Kaufmann, „Partially loaded areas in reinforced concrete: Mechanical modelling“, *Eng. Struct.*, Bd. 271, S. 114938, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114938.
- [15] D. N. Petraroi, „Hybrid lining segments for mechanized tunneling - Design, fabrication, and large-scale experiments“, Dissertation, Ruhr University Bochum, 2023.
- [16] Z. Ouyang, H. Zheng, C. Patmanidis, C. Naito, S. Quiel, und M. Mooney, „Full-scale testing of precast tunnel lining segments under thrust jack loading: Design limits and ultimate response“, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, Bd. 142, S. 105446, Dez. 2023, doi: 10.1016/j.tust.2023.105446.
- [17] A. Conforti, I. Trabucchi, G. Tiberti, G. A. Plizzari, A. Caratelli, und A. Meda, „Precast tunnel segments for metro tunnel lining: A hybrid reinforcement solution using macro-synthetic fibers“, *Eng. Struct.*, Bd. 199, S. 109628, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109628.
- [18] E. Griniov, „Einleitung von TBM-Vortriebspressenkräften in Faserbetontübbing“, Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2024.
- [19] D. N. Petraroi, M. A. Ahrens, und P. Mark, „Materialeffiziente Tübbings mit Hybridbewehrung – Entwurf, Herstellung und Bauteilexperimente“, *Beton-Stahlbetonbau*, Bd. 118, Nr. 2, S. 98–109, Feb. 2023, doi: 10.1002/best.202200100.
- [20] D. N. Petraroi und P. Mark, „Variable, full-scale tester for tunnel linings“, *Struct. Concr.*, Bd. 22, Nr. 6, S. 3353–3367, Dez. 2021, doi: 10.1002/suco.202000806.
- [21] D. N. Petraroi, S. Plückelmann, P. Mark, und R. Breitenbücher, „Tunnel lining segments with enhanced bearing capacity using hybrid concrete concepts“, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, Bd. 143, S. 105484, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.tust.2023.105484.
- [22] R. Suter und K. Bergmeister, „Tübbinge aus Stahlfaserbeton: Optimierung der Bewehrung durch experimentelle Untersuchungen“, *Beton-Stahlbetonbau*, Bd. 99, Nr. 11, S. 858–864, Nov. 2004, doi: 10.1002/best.200490246.
- [23] H. Wolfger, C. Proksch-Weilguni, und J. Kollegger, „Longitudinal joints of tubbings with newly designed high-strength reinforcement“, *Struct. Concr.*, Bd. 22, Nr. 3, S. 1708–1719, Juni 2021, doi: 10.1002/suco.202000670.
- [24] C. Proksch-Weilguni, M. Decker, und J. Kollegger, „Load distribution and passive confinement in reinforced concrete: Development of a mechanical model“, *Eng. Struct.*, Bd. 304, S. 117562, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.117562.
- [25] C. Proksch-Weilguni, M. Decker, und J. Kollegger, „Hochbelastete Lastübertragungszonen mit stumpf gestoßener Bewehrung: Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen“, *Beton-Stahlbetonbau*, Bd. 117, Nr. 11, S. 913–927, Nov. 2022, doi: 10.1002/best.202200075.
- [26] F. Morger und W. Kaufmann, „Experimental investigation of welded reinforcement grids for partial area loading“, in *Proceedings of the 15th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, International Federation for Structural Concrete, Aug. 2024, S. 181–188. doi: 10.3929/ethz-b-000711139.
- [27] F. Morger und W. Kaufmann, „Design of longitudinal tunnel lining joints - experimental investigation on partially loaded reinforced concrete blocks“, in *Proceedings of the 14th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, International Federation for Structural Concrete, 2022, S. 467–474. doi: 10.3929/ethz-b-000572924.
- [28] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), *Richtlinie „Faserbeton“*, 2008.
- [29] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, *DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton*, 2021.
- [30] K. Holschemacher, F. Dehn, T. Müller, und F. Lobisch, *Grundlagen des Faserbetons*, 114. Jahrgang. in Beton-Kalender, no. 106. Jahrgang (2017). Berlin, Germany: Ernst & Sohn, 2017.
- [31] K.-Ch. Thienel, *Faserbeton*. Universität der Bundeswehr München, 2018.
- [32] T. V. Muthukumarana, M. A. V. H. M. Arachchi, H. M. C. C. Somaratna, und S. N. Raman, „A review on the variation of mechanical properties of carbon fibre-reinforced concrete“, *Constr. Build. Mater.*, Bd. 366, S. 130173, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130173.
- [33] S. B. Singh und M. Madasamy, „Investigation of aggregate size effects on properties of basalt and carbon fibre-reinforced pervious concrete“, *Road Mater. Pavement Des.*, Bd. 23, Nr. 6, S. 1305–1328, Juni 2022, doi: 10.1080/14680629.2021.1886158.
- [34] „Toray Chopped Carbon Fibers“. Zugegriffen: 17. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.cf-composites.toray/products/carbon\\_fiber/chopped.html](https://www.cf-composites.toray/products/carbon_fiber/chopped.html)
- [35] „Fibermax Carbonfaser geschnitten“. Zugegriffen: 17. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fibermax.eu/carbon-fabrics/carbon-yarns/chopped-carbon-fibers>
- [36] E. T. Al-Rousan, H. R. Khalid, und M. K. Rahman, „Fresh, mechanical, and durability properties of basalt fiber-reinforced concrete (BFRC): A review“, *Dev. Built Environ.*, Bd. 14, S. 100155, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.dibe.2023.100155.
- [37] X. Wang, J. He, A. S. Mosallam, C. Li, und H. Xin, „The Effects of Fiber Length and Volume on Material Properties and Crack Resistance of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC)“, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, Bd. 2019, S. 1–17, Okt. 2019, doi: 10.1155/2019/7520549.
- [38] „Basaltex“. Zugegriffen: 17. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.basaltex.com/>
- [39] „Technobasalt“. Zugegriffen: 17. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://technobasalt.com/>
- [40] Deutsches Institut für Bautechnik, *Polymermakrofasern mit Basaltfaserbewehrung für die Verwendung im Beton*, ETA-20/0599, 2020.
- [41] D. Veit, *Fasern: Geschichte, Erzeugung, Eigenschaften, Markt*, 1. Aufl. 2023. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023. doi: 10.1007/978-3-662-64469-0.
- [42] B. Wietek, *Faserbeton: im Bauwesen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. doi: 10.1007/978-3-658-30875-9.
- [43] Comité euro-international du béton, Hrsg., *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.
- [44] P. Gehwolf, „Tragverhalten von Tübbingen im maschinellen Tunnelbau - Experimentelle und numerische Analyse“, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2018.
- [45] Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV), *Richtlinie „Innenschalenbeton“*, 2012.
- [46] ITAtech, *Design Guidance for Precast Fibre Reinforced Concrete Segments - Vol. 1: Design Aspects*, ITAtech Report 7, 2016.
- [47] Austrian Standards International, *Fasern für Beton - Teil 1: Stahlfasern- Begriffe, Festlegungen und Konformität*, ÖNORM EN 14889-1, 2006.
- [48] C. Gong, W. Ding, K. M. Mosalam, S. Günay, und K. Soga, „Comparison of the structural behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete tunnel segmental joints“, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, Bd. 68, S. 38–57, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.tust.2017.05.010.
- [49] „Fiber Reinforced Concrete Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts Up To 2030“. Zugegriffen: 14. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/fiber-reinforced-concrete-frc-market>
- [50] „Concrete Fibers Market - By Product, By Application, By End Use and Forecast, 2025-2034“. Zugegriffen: 14. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/concrete-fiber-market>
- [51] Austrian Standards International, *Fasern für Beton - Teil 2: Polymerfasern - Begriffe, Festlegungen und Konformität*, ÖNORM EN 14889-2, 2006.
- [52] D. Patel, C. Pleesudjai, V. Bui, P. Pridemore, S. Schaeff, und B. Mobasher, „Mechanical response of precast tunnel segments with steel and synthetic macro-

# Referenzen

- fibers", *Cem. Concr. Compos.*, Bd. 144, S. 105303, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105303.
- [53] P. N. Ojha, B. Singh, und V. Patel, „Mechanical and durability properties of cement mortar and concrete reinforced with glass micro fibre“, *Res. Eng. Struct. Mater.*, 2021, doi: 10.17515/resm2021.350ma1007.
- [54] E. Lorenz, „Endverankerung und Übergreifung textiler Bewehrungen in Betonmatrices“, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2014.
- [55] S. Anand, „Evaluation of Environmental and Technical Performance of Alternate Fibres for Shotcrete in Tunnels“, Master Thesis, KTH School of ABE, 2021.
- [56] M. Macha und K. Bergmeister, „Recycled Aggregate Concrete reinforced with a Novel Fiber Cocktail“, in *Proceedings of the 15th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, International Federation for Structural Concrete, Aug. 2024, S. 1033-1040. doi: 10.3929/ethz-b-000711139.
- [57] N. Alqbour, M. Shehata, Z. Elsayad, und S. Rababeh, „Sustainable Concrete-Based Structures: Review for the Potential Benefits of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC) in Enhancing the Environmental Performance of Buildings“, *KEEP Plan. REAL WORLD Clim. Change Calls Nat.-Based Solut. Smart Technol. Proc. REAL CORP 2024*, Bd. 29th International Conference on Urban Development and Regional Planning in the Information Society, S. 775786, 2024, doi: 10.48494/REALCORP2024.4007.
- [58] V. J. John und B. Dharmar, „Influence of basalt fibers on the mechanical behavior of concrete - A review“, *Struct. Concr.*, Bd. 22, Nr. 1, S. 491-502, Feb. 2021, doi: 10.1002/suco.201900086.
- [59] J. Ma, X. Qiu, L. Cheng, und Y. Wang, „Experimental Research on the Fundamental Mechanical Properties of Presoaked Basalt Fiber Concrete“, in *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, L. Ye, P. Feng, und Q. Yue, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 85-88. doi: 10.1007/978-3-642-17487-2\_16.
- [60] C. Jiang, K. Fan, F. Wu, und D. Chen, „Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete“, *Mater. Des.*, Bd. 58, S. 187-193, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.01.056.
- [61] J. Branston, S. Das, S. Y. Kenno, und C. Taylor, „Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete“, *Constr. Build. Mater.*, Bd. 124, S. 878-886, Okt. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.009.
- [62] K. Bergmeister, „Emissionsarme, kreislaufgerechte Innenschalen – Aktuelle Forschungen“, Nov. 2024, doi: 10.14459/MBS28.12.
- [63] Austrian Standards International, *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, ÖNORM EN 15804, 2022.
- [64] A. D. Bischofberger, „Nachhaltigkeit im Tunnelbau - Einsatzpotential des ressourceneffizienten Tübbings im maschinellen Tunnelbau“, Masterarbeit, Technische Universität Wien, 2024.
- [65] MPA/CSMA/UKQAA, *Fact Sheet 18 - Embodied CO<sub>2</sub>e of UK cement, additions and cementitious material*, 2012.
- [66] Austrian Standards International, *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton*, ÖNORM B 4710-1, 2018.
- [67] J. Juhart, M. Autischer, M. Sakoparnig, und M. Krüger, „The Realization of Clinker-Reduced, Performance-Based Sustainable Concrete by the Micro-Filler, Eco-Filler Concept“, *Materials*, Bd. 14, Nr. 17, S. 4958, Aug. 2021, doi: 10.3390/ma14174958.
- [68] W. Aldrian, A. Bantle, und J. Juhart, „CO<sub>2</sub>-reduction in tunnel construction from a material technology point of view“, *Geomech. Tunn.*, Bd. 15, Nr. 6, S. 799-810, Nov. 2022, doi: 10.1002/geot.202200036.
- [69] N.V. Bekaert S.A., *Environmental Product Declaration - Dramix Steel fibres for Concrete Reinforcement*, Type III ITB No. 215/2021, 1. Juni 2021.
- [70] ArcelorMittal Europe - Long Products, *Environmental Product Declaration - Steel Fibres EAF-base*, EPD-IES-0016437, 5. September 2024.
- [71] ReforceTech, *Environmental Product Declaration - Basalt Minibars*, NEPD-3317-1954-EN, 1. Juni 2021.
- [72] The Euclid Chemical Company, *Environmental Product Declaration - Fiber Reinforcement Products for Concrete*, NRMCAEPD:20080, 31. Januar 2023.
- [73] Polyfibers Reinforcement Solutions, *Environmental Product Declaration - Polymacros*, S-P-04127, 20. April 2022.
- [74] Owens Corning, *Environmental Product Declaration - Cem-FIL AR Glass fibers*, 16. März 2021.
- [75] M. Haist, K. Bergmeister, M. Curbach, P. Forman, und G. Gaganelis, *Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton*, 111. Jahrgang, in Beton-Kalender, no. 111. Jahrgang (2022). Berlin, Germany: Ernst & Sohn, 2022. doi: 10.1002/9783433611999.
- [76] solidian GmbH, *Environmental Product Declaration - solidian GRID and solidian REBAR*, EPD-SGR-GB-65.0, 11. Dezember 2022.
- [77] P. Spyridis und K. Bergmeister, „Sustainable tunnel design: concepts and examples of reducing greenhouse gas emissions through basic engineering assumptions“, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, Bd. 152, S. 105886, Okt. 2024, doi: 10.1016/j.tust.2024.105886.
- [78] D. Hansel und P. Guirguis, „Steel-fibre-reinforced segmental linings: State-of-the-art and completed projects“. Zugegriffen: 20. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel\\_2011-01\\_Steel-fibre-reinforced\\_segmental\\_linings\\_State-of-the-art\\_and\\_completed-1076896.html](https://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel_2011-01_Steel-fibre-reinforced_segmental_linings_State-of-the-art_and_completed-1076896.html)
- [79] R. Hu, K. Iturrealde, W. Pan, T. Linner, und T. Bock, *Bauautomatisierung und Robotik im Betonbau: Fallstudien zu Forschung, Entwicklung und Innovation*, 113. Jahrgang, in Beton-Kalender, no. 113. Jahrgang (2024). Berlin, Germany: Ernst & Sohn, 2024. doi: 10.1002/9783433611999.
- [80] P. Mayer, S. Wild, K. Usel, und W. Friedemann, „Innovativer Einsatz von Industrierobotern in einer teilautomatisierten Tübbingproduktion“, *Geomech. Tunn.*, Bd. 16, Nr. 2, S. 205-215, Apr. 2023, doi: 10.1002/geot.202200076.
- [81] S. Plückelmann, R. Breitenbücher, M. Smarslik, und P. Mark, „Aufnehmbare Teillächenspannung von hochfestem Stahlfaserbeton“, *Beton- Stahlbetonbau*, Bd. 114, Nr. 9, S. 653-662, Sep. 2019, doi: 10.1002/best.201900015.
- [82] L. Kützig und G. König, „Duktiler Hochleistungsbeton mit Fasercocktail - Technologie, Bemessung, Anwendungen“, *Bautechnik*, Bd. 78, Nr. 2, S. 105-114, Feb. 2001, doi: 10.1002/bate.200100550.
- [83] G. König und L. Kützig, „Mit einem Fasercocktail zur Duktilität von Druckgliedern aus Hochleistungsbeton“, *Bautechnik*, Bd. 75, Nr. 2, S. 62-66, Feb. 1998, doi: 10.1002/bate.199800730.
- [84] G. Meschke, R. Breitenbücher, S. Freitag, M. König, und M. Thewes, Hrsg., *Interaction Modeling in Mechanized Tunneling*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-24066-9.
- [85] F. Song, „Steel Fiber Reinforced Concrete Under Concentrated Load“, Dissertation, Ruhr University Bochum, 2017.
- [86] Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz, „Grazer Stahlbetonleichtbauexpertise für den Werkhof in Bludenz“. Zugegriffen: 20. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tugraz.at/institute/ite/forschung/forschungsprojekte/3d-betondruckflachdach-fuer-werkhof-in-bludenz>
- [87] 3D Druck München, „3D-Druck im Tiefbau: Revolutionäre Anwendungen und Vorteile“. Zugegriffen: 20. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://3ddruckmuENCHEN.com/storys-und-anwendungen/3d-druck-im-tiefbau-revolutionare-anwendungen-und-vorteile/>
- [88] D. P. Phillips und T. M. A. Delport, „3D printing of tunnels“, in *Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*, 1. Aufl., London: CRC Press, 2023, S. 2501-2509. doi: 10.1201/9781003348030-301.
- [89] „Prognose: Umsatz der Branche Brücken- und Tunnelbau in Italien von 2012 bis 2018 und Prognose bis zum Jahr 2025 (in Millionen Euro)“, Statista. Zugegriffen: 21. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/prognosen/704213/bruecken-und-tunnelbau-umsatz-in-italien>
- [90] „Prognose: Umsatz der Branche Brücken- und Tunnelbau in Österreich von 2012 bis 2018 und Prognose bis zum Jahr 2025 (in Millionen Euro)“, Statista. Zugegriffen: 21. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/prognosen/403980/bruecken-und-tunnelbau-umsatz-in-oesterreich>
- [91] „Prognose: Umsatz der Branche Brücken- und Tunnelbau in Deutschland von 2012 bis 2019 und Prognose bis zum Jahr 2025 (in Millionen Euro)“, Statista. Zugegriffen: 21. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/prognosen/313903/bruecken-und-tunnelbau-umsatz-in-deutschland>
- [92] „Tunnelbau in Deutschland: Statistik (2018/2019), Analyse und Ausblick - tunnel“. Zugegriffen: 21. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel\\_Tunnelbau\\_in\\_Deutschland\\_Statistik\\_2018\\_2019\\_Analyse\\_und\\_Ausblick-3471811.html](https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel_Tunnelbau_in_Deutschland_Statistik_2018_2019_Analyse_und_Ausblick-3471811.html)
- [93] „Concrete Reinforcing Fiber Market Size, Share & Industry Analysis Source“. Zugegriffen: 14. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fortunebusinessinsights.com/concrete-reinforcing-fiber-market-106752>
- [94] „Concrete Fiber Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Fiber Type, by Application : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031“. Zugegriffen: 14. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.alliedmarketresearch.com/concrete-fiber-market>