



Betongelenke -Stand der Technik und Entwicklungspotential

Institiut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich

Prof. Dr. Walter Kaufmann, Tomislav Markić Dr. Martin Bimschas

cemsuisse-Projekt 201501 - Februar 2017 Diese Forschungsarbeit wurde durch cemsuisse, Verband der Schweizerischen Cementindustrie mitfinanziert

Vorwort der Begleitgruppe

Betongelenke werden im Hoch- und Brückenbau seit mehr als einem Jahrhundert erfolgreich eingesetzt und sind eine "gute" Alternative zu mechanischen Lagern, die regelmässig inspiziert und häufig nach einigen Jahrzehnten ersetzt werden müssen. Trotz zahlreicher Vorteile, insbesondere hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Dauerhaftigkeit, Robustheit und Nachhaltigkeit, haben Betongelenke in den vergangenen Jahrzehnten jedoch an Bedeutung verloren.

Die derzeitige Bemessung und konstruktive Durchbildung von Betongelenken beruht auf empirischen Regeln, die aus den 1960er Jahren stammen, und sind mit den heutigen Tragwerksnormen in der Schweiz nur eingeschränkt kompatibel. Aufgrund dieser Unsicherheit werden Betongelenke in der Praxis wenig geplant und ausgeführt.

Prof. Dr. W. Kaufmann und seine Mitarbeiter T. Markić und Dr. M. Bimschas haben sich zum Ziel gesetzt, das Tragverhalten von Betongelenken grundlegend zu untersuchen und bestehende Unsicherheiten bei der Bemessung von Betongelenken zu beseitigen, so dass sie in Zukunft vermehrt angewendet werden können.

Es ist ihnen gelungen, das Tragverhalten von Betongelenken mit einem neuen Modell auf der Basis der Plastizitätstheorie zu beschreiben und damit sowohl die mehraxiale Tragwirkung des Betons als auch die Wirkung der Bewehrung realistisch abzubilden.

Auf dieser Basis ist eine im Vergleich mit bestehenden Bemessungsrichtlinien weniger konservative Bemessung möglich, die zu effizienteren und besser funktionierenden Betongelenken führt. Damit ist ein erster Schritt für eine spätere, normative Umsetzung in den schweizerischen Tragwerksnormen gegeben.

Dr. Peter Lunk, Holcim (Schweiz) AG

cemsuisse Forschungsförderung

Die cemsuisse Forschungsförderung unterstützt Forschungsprojekte im Bereich der Betonanwendung, welche von kompetenten Forschergruppen an cemsuisse herangetragen werden. Mit der proaktiven Forschungsförderung definiert cemsuisse zudem Forschungsprojekte von spezifischem Interesse und trägt diese an kompetente Forschergruppen heran oder schreibt sie öffentlich aus. Die Projektnehmer werden jeweils von einer Begleitgruppe aus cemsuisse-Vertretern fachlich unterstützt.

Dr. Heiner Widmer, Leiter Umwelt, Technik, Wissenschaft, cemsuisse

Inhaltverzeichnis

Be	Bezeichnungen und Fachausdrückeii					
1.	Zusa	Zusammenfassung1				
2.	Proj	Projektvoraussetzungen und -ziele 1				
	2.1.	Problemstellung	1			
	2.2.	Ziele	2			
3.	Durc	hgeführte Arbeiten	2			
	3.1.	Das Grundprinzip von Betongelenken	2			
	3.1.1	Übersicht	2			
	3.1.2	Verhalten des Einschnürungsbereichs	2			
	3.1.3	Verhalten der Gelenkanschlusskörper	4			
	3.2.	Tragverhalten unter Normalkraft	5			
	3.2.1	Allgemeine Bemerkungen	5			
	3.2.2	Trajektorien-Ansatz	6			
	3.2.3	Diskontinuierliches Spannungsfeld (Fächer)	9			
	3.3.	Einfluss der Rotation 1	12			
	3.4.	Übertragung von Querkräften 1	14			
	3.5.	Tragverhalten in die starke Richtung1	14			
	3.6.	Einfluss der Steifigkeit der Umschnürung 1	15			
	3.7.	Anwendungspotential höherfester und faserbewehrter Betone 1	18			
4.	Schlu	issfolgerungen und Bedeutung für die Praxis1	18			
5.	Empfehlungen für die weitere Umsetzung 19					
6.	Finanzielles					
Li	teratur		•••			

Bezeichnungen und Fachausdrücke

Im Folgenden werden die wichtigsten in diesem Bericht verwendeten Bezeichnungen definiert. Weitere, nicht hier definierte Bezeichnungen werden im Text bei erstmaliger Benutzung eingeführt.

Koordinaten		Materialke	Materialkennwerte		
x	Axialrichtung Anschlussbauteil	f_{c0}	Zylinderdruckfestigkeit des Betons		
у	Querrichtung Gelenk (senkrecht zur Gelenksachse)	$f_{\scriptscriptstyle cc}$	Dreiachsige Druckfestigkeit des Betons		
Ζ	Längsrichtung Gelenk (= Gelenkachse = Rotationsachse)	E_{c}	Elastizitätsmodul des Betons		
		$k_c = \frac{f_{cc}}{f_{c0}}$	Druckfestigkeitsbeiwert		
Geometrische	Grössen	Einwirkungen und Auswirkungen			
d	Breite des Gelenkanschlusskörpers	Ν	Normalkraft (Druck positiv)		
с	Länge des Gelenkanschlusskörpers	$\sigma_{x0} = \frac{N}{A_G}$	Mittlere Spannung im Gelenkhals		
а	Gelenkhalsbreite		X 7 1 1		
	(Abmessung in Querrichtung)	α	Verdrehung		
b	Gelenkhalslänge	V_{y}	Querkraft in Gelenk-Querrichtung		
	(Abmessung in Längsrichtung)		(senkrecht zur Gelenkachse)		
a / d	Einschnürungsverhältnis	Vz	Querkraft in Gelenk-Längsrichtung (parallel zur Gelenkachse)		
t	Gelenkhalsdicke	M_y	Biegemoment um starke Achse		
$A_G = a \cdot b$	Gelenkhalsfläche	M_{z}	Biegemoment um Gelenkachse		
$b_{R} = \frac{1}{2}(c-b)$	Einkerbung an den Stirnseiten	Z_y	Spaltzugkraft in Querrichtung (senk- recht zur Gelenkachse)		
β	Neigung der Haupteinkerbung	Z_z	Spaltzugkraft in Längsrichtung (parallel zur Gelenkachse)		
r	Radius der Kerbenausrundung				

Normalkräfte und Normalspannungen werden positiv auf Druck definiert.

Im Text wird an einigen Stellen der englische Fachausdruck *Confinement* benutzt, um den (günstigen) Einfluss von Querpressungen auf die axiale Druckfestigkeit des Betons zu beschreiben, da dieser Begriff allgemeiner ist als der in Deutsch übliche Begriff der "Umschnürungswirkung".



Bezeichnungen am Betongelenk, nach [Marx 10]



Betongelenk (Liniengelenk), Ansicht in Längs- und Querrichtung unter allgemeiner Beanspruchung.

1. Zusammenfassung

Betongelenke werden seit mehr als einem Jahrhundert erfolgreich eingesetzt. Im Vergleich zu mechanischen Lagern, welche den gleichen Zweck erfüllen, weisen Betongelenke zahlreiche Vorteile auf, insbesondere hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Dauerhaftigkeit, Robustheit und Nachhaltigkeit. Trotz dieser Vorteile und der guten Erfahrungen mit Betongelenken haben sie in den vergangenen Jahrzehnten jedoch an Bedeutung verloren. Ein wichtiger Grund dafür ist, dass für die Bemessung und konstruktive Durchbildung nur relativ alte, auf empirischen Regeln beruhende Richtlinien zur Verfügung stehen, was mit heutigen Tragwerksnormen nur bedingt kompatibel ist. Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts war es daher, das Tragverhalten von Betongelenken grundlegend zu untersuchen und, darauf aufbauend, die bestehenden Unsicherheiten bei der Bemessung von Betongelenken zu beseitigen, so dass sie in Zukunft vermehrt angewendet werden können.

Der Fokus der Arbeit lag auf unbewehrten Betonliniengelenken, sogenannten Freyssinet-Gelenken. Basierend auf einer umfangreichen Literaturstudie wurde die Tragwirkung in einem ersten Schritt anhand von Ergebnissen früherer Versuche sowie mittels linear elastischer und nichtlinearer Finite Elemente-Analysen untersucht.

Anschliessend wurde das Tragverhalten von Betongelenken mittels diskontinuierlicher Spannungsfelder auf der Basis des unteren Grenzwertsatzes der Plastizitätstheorie untersucht. Mit diesen mechanisch konsistenten Modellen ist es – im Unterschied zu den bestehenden semi-empirischen Modellen – möglich, sowohl die mehraxiale Tragwirkung des Betons als auch die Wirkung der Bewehrung realistisch zu modellieren. Ergänzend dazu wurden Überlegungen zum Verhalten unter aufgezwungenen Gelenkrotationen sowie Beanspruchung durch Querkräfte und Biegemomente senkrecht zur Gelenkachse angestellt. Auf dieser Basis ist eine im Vergleich mit bestehenden Bemessungsrichtlinien weniger konservative Bemessung möglich, die zu effizienteren und besser funktionierenden Betongelenken führt. Bevor weniger konservative Bemessungsregeln für die Anwendung in der Praxis formuliert werden, sollten die Ergebnisse jedoch experimentell validiert werden.

Mit der vorliegenden Arbeit konnten wichtige Erkenntnisse zum Tragverhalten von Betongelenken gewonnen und ein Schritt in die Richtung der analytischen Modellierung gemacht werden. Verschiedene Punkte bleiben jedoch offen, insbesondere hinsichtlich des Verhaltens unter allgemeiner Beanspruchung. Aufgrund des komplexen Verhaltens im Bereich des Gelenkhalses können diese Fragen mit analytischen Modellen und numerischen Untersuchungen allein nicht abschliessend geklärt werden.

2. Projektvoraussetzungen und -ziele

2.1. Problemstellung

Geschichtliche Entwicklung

Betongelenke werden im Hoch- und Brückenbau seit mehr als einem Jahrhundert erfolgreich eingesetzt, um unerwünschte Beanspruchungen - insbesondere infolge von Zwängungen - zu reduzieren. Während in der Anfangszeit des Eisenbetons oft Gelenke vorgesehen wurden, um ein statisch bestimmtes Tragsystem zu gewährleisten, das mit den damaligen Berechnungsverfahren analysiert werden konnte, kommen Betongelenke heute primär zur Verminderung von Zwängungen bei monolithischen Bauwerken zum Einsatz. Die wirtschaftlichen, robusten und dauerhaften Betongelenke erlebten im Zuge des Autobahnbaus in den 1960er und 1970er Jahren eine eigentliche Blütezeit, als Betongelenke bei unzähligen Brücken zum Einsatz kamen. In den folgenden Jahrzehnten verloren die Betongelenke aber wieder an Bedeutung. Dies einerseits aufgrund der Weiterentwicklung mechanischer Lager, andererseits war jedoch entscheidend, dass ein mechanisch konsistentes Modell für das Verhalten von Betongelenken fehlte. In den letzten Jahren setzte sich die Erkenntnis durch, dass mechanische Lager Schwachstellen der Brückenkonstruktion sind, die regelmässig inspiziert und nach einigen Jahrzehnten ersetzt werden müssen. Vor diesem Hintergrund wurde in letzter Zeit die integrale Brückenbauweise als vielversprechende Alternative erkannt [Kaufmann 11]. Im Zuge dieser Entwicklung haben Betongelenke als wichtiges Konstruktionselement für diese Bauweise eine signifikante Wiederbelebung erfahren und kamen bei einer ganzen Reihe von grossen Brückenprojekten der vergangenen Jahre erfolgreich zum Einsatz. Die letzten Anwendungen in der Schweiz stellen der Viadukt Lugano-Bellinzona der Neubaustrecke Alp Transit (2014) und die Taminabrücke (2016) dar.

Fehlende Grundlagen und Forschungsbedarf

Wie sich bei den Anwendungen im Rahmen der neueren Brückenprojekte immer wieder gezeigt hat, stellt der Mangel an hinreichend abgesicherten Bemessungsregeln nach wie vor ein Hemmnis für den effizienten Einsatz von Betongelenken dar. Die Bemessung und konstruktive Durchbildung von Betongelenken beruht auf alten Richtlinien, die aus den 1960er Jahren stammen und mit den heutigen Tragwerksnormen (Partialsicherheitsfaktoren, Plastizitätstheorie) nur eingeschränkt kompatibel sind. Die meisten Modelle und Bemessungsregeln bestehen aus semi-empirischen Beziehungen zwischen der Geometrie des Gelenkkörpers, der Normalkraft und der zulässigen Gelenkverdrehung. Anstatt auf einem konsistenten mechanischen Modell, basieren sie oft auf Erfahrung und dem "Ingenieurgefühl" und führen teilweise zu divergierenden Empfehlungen. Ausserdem lassen sich zuverlässige Aussagen zum Tragverhalten von Betongelenken unter allgemeinen Beanspruchungskombinationen (Querkräfte, Torsions- und Querbiegemomente), wie sie nach den heutigen Tragwerksnormen (z.B. infolge Erdbeben) praktisch immer auftreten, mit diesen alten Richtlinien nicht abdecken.

Die Folge ist, dass bei der Planung von Betongelenken – obwohl sie seit mehr als einem Jahrhundert erfolgreich in verschiedenen Projekten eingesetzt worden sind – eine nicht unbeträchtliche Unsicherheit verbleibt. Um diese Ungewissheiten zu beseitigen, sind im Einzelfall umfangreiche gutachterliche Festlegungen und Betonierversuche erforderlich, was ein Hemmnis für den effizienten Einsatz von Betongelenken darstellt. Das Anwendungspotential von Betongelenken ist aufgrund der bestehenden Wissenslücken bei weitem nicht ausgeschöpft.

Daraus ergibt sich ein Forschungsbedarf, insbesondere hinsichtlich eines besseren Verständnisses des effektiven Tragverhaltens von Betongelenken.

2.2. Ziele

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, das Tragverhalten von Betongelenken grundlegend zu untersuchen und die bestehenden Wissenslücken durch die Entwicklung eines mechanisch konsistenten Modells zu schliessen. Damit sollen die bestehenden Unsicherheiten bei der Bemessung von Betongelenken vermindert werden, so dass sie in Zukunft vermehrt angewendet werden können, ohne dass spezielle Untersuchungen im Einzelfall erforderlich sind.

Zudem soll aufgezeigt werden, ob zur Klärung der offenen Fragen weiterer Forschungsbedarf besteht, insbesondere hinsichtlich ergänzender experimenteller Untersuchungen.

3. Durchgeführte Arbeiten

3.1. Das Grundprinzip von Betongelenken

3.1.1. Übersicht

Betongelenke sind monolithische, aber dennoch gelenkige Verbindungen im Massivbau. Durch eine Verjüngung des Querschnitts werden die Druckspannungen in einer schmalen Zone, dem sogenannten Gelenkhals, konzentriert. Dies ermöglicht die Aufnahme von verhältnismässig grossen Rotationen um die Gelenkachse, ohne dass unzulässig grosse Biegemomente resultieren. Aufgebrachte Verdrehungen um die Gelenkachse wirken sich somit, praktisch wie bei einem Liniengelenk, nur lokal auf den Gelenkbereich aus, ohne im übrigen Bauwerk signifikante Beanspruchungen zu verursachen.

Infolge der Umlenkung der Druckspannungstrajektorien durch den eingeengten Gelenkhals entstehen senkrecht zur axialen Druckrichtung Spaltzugspannungen in den Gelenkanschlusskörpern ("Gelenkköpfe") und Querdruckspannungen im Gelenkhals ("Einschnürungsbereich"). Aufgrund der Unterschiede hinsichtlich ihres Tragund Verformungsverhaltens (Spannungszustand, Kriechverhalten, Bruchprozesse) wird nachfolgend das Tragverhalten von Betongelenken für den Einschnürungsbereich und die Anschlusskörper getrennt beschrieben.

3.1.2. Verhalten des Einschnürungsbereichs

In verschiedenen experimentellen Untersuchungen wurde beobachtet, dass der Beton im Einschnürungsbereich axiale Druckspannungen weit über der einachsigen Druckfestigkeit aufnehmen kann. Die in den Versuchen beobachtete Duktilitätszunahme war sogar noch ausgeprägter. In den Versuchen von [Leonhardt 65] wurden durchschnittliche axiale Druckspannungen im Gelenkhals von bis zu $\sigma_{x0} = N/A_G = 2.8 f_{c0}$ ohne Anzeichen eines Versagens erreicht, bevor der Bruch schliesslich in einem der Anschlusskörper durch Versagen der Bewehrung eintrat. Die beobachtete Erhöhung der Betondruckfestigkeit und der Duktilität kann nur durch die Wirkung eines dreiachsigen Druckspannungszustands im Gelenkhals erklärt werden (Bild 1b): Mit einem zweiachsigen Druckspannungszustand liesse sich höchstens eine Festigkeitserhöhung von etwa 30% gegenüber der einachsi-

gen Druckfestigkeit [Kupfer 69] erklären. Somit ist eine Idealisierung von Betongelenken als Scheiben im ebenen Spannungszustand nicht zielführend. Vielmehr herrscht – zumindest im mittleren, von den Stirnseiten genügend weit entfernten Bereich langer Betongelenke – offensichtlich ein dreiachsiger Druckspannungszustand vor.

Das *Confinement* in Querrichtung (d.h. senkrecht zur Gelenkachse) ist primär durch die Umlenkung der Druckspannungstrajektorien gegeben. Infolge der höheren Druckspannungen erfährt der Hals grössere axiale Stauchungen und dadurch bedingte Querdehnungen in den beiden horizontalen Richtungen y und z als die danebenliegenden, axial weitgehend unbelasteten Schultern der Gelenkköpfe. Letztere behindern daher die Querdehnung des Gelenkhalses, woraus sich zusätzliche Querdruckspannungen (sowohl in Längs- als auch in Querrichtung des Gelenks) im Gelenkhals und Zugspannungen in den Schulterbereichen ergeben (Bild 1a). Aus diesen einfachen Verträglichkeitsüberlegungen können zwei wichtige Schlüsse gezogen werden:

- Um das *Confinement* des Gelenkhalses in dessen Längsrichtung auch bei hohen Beanspruchungen und Verformungen sicherzustellen und ein duktiles Bruchverhalten zu gewährleisten, ist eine entsprechende Längsbewehrung (parallel zur Gelenkachse) in der Schulter neben dem Gelenkhals von grosser Bedeutung. Für kleine Lasten (im Gebrauchszustand) können die Längszugkräfte in den Schulterbereichen durch die Betonzugfestigkeit aufgenommen werden, wie die Versuche von [Leonhardt 65] bestätigt haben. In diesen Versuchen war praktisch keine Schulterbewehrung parallel zum Gelenkhals vorhanden, die Druckfestigkeit im Versuch lag aber dennoch deutlich über der Zylinderdruckfestigkeit. Mit zunehmender Belastung treten jedoch sofern nicht vorher ein Versagen der Spaltzugbewehrung in Querrichtung auftritt, siehe Abschnitt 3.1.3 Risse auf, wodurch das *Confinement* schlagartig reduziert wird und ein Sprödbruch eintritt. Ein solches Versagen infolge mangelnder Längsbewehrung trat beispielsweise beim Versuchskörper III von [Leonhardt 65] auf.
- Eine Bewehrung in Querrichtung des Gelenks direkt über und unter dem Gelenkhals erzeugt eine zusätzliche Umschnürungswirkung, welche zur Erhöhung der axialen Druckfestigkeit im Gelenkhals beiträgt.

Bild 1c zeigt eine mögliche Bewehrungsanordnung, die beide obengenannten Punkte berücksichtigt. Die Wichtigkeit einer solchen Bewehrung bei Betongelenken wurde bis jetzt in keinem Bemessungskonzept explizit berücksichtigt; vielmehr basieren viele empirische Bemessungsregeln implizite auf der Aktivierung der Zugfestigkeit des Schulterbetons in Längsrichtung des Gelenks.



Bild 1 (a) Passives Confinement des Gelenkhalses infolge behinderter Querdehnung; (b) Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Beton unter einachsiger und dreiachsiger Druckbeanspruchung; (c) Mögliche Umschnürungsbewehrung unmittelbar über resp. unter dem Gelenkhals zur Sicherstellung des Confinements.

Zwischen dem Querdruck, welcher durch die Umlenkung der Druckspannungstrajektorien (infolge der Einschnürung im Gelenkhals) hervorgerufen wird und dem Querdruck, welcher durch die Behinderung der Querdehnungen entsteht, besteht ein wesentlicher Unterschied. Ersterer ist durch die Umlenkung der Druckspannungen infolge der Form bedingt und – bei gegebenem Verlauf der Trajektorien – proportional zur Axialbelastung und unabhängig von der Querdehnung ("aktives *Confinement"*); letzterer erfordert dagegen Querdehnungen, um aktiviert zu werden ("passives *Confinement"*). Dieser Unterschied kann mit einfachen linear elastischen Finite Elemente-Analysen eines Liniengelenks, mit unterschiedlicher Querdehnung (Poissonzahl v) des Betons, bestätigt werden: Während im Gelenkhals in Querrichtung für $\nu = 0$ (keine Querdehnung) nur unwesentlich kleinere Druckspannungen auftreten als für $\nu = 0.17$ (~ ungerissener Beton), verschwinden die Druckspannungen in Längsrichtung für $\nu = 0$.

Um unter hohen Pressungen Betonabplatzungen des Gelenkshalses zu vermeiden, muss das Gelenk auch in Längsrichtung an den Stirnseiten leicht eingeschnürt und der Gelenkhals umlaufend kreisförmig ausgerundet werden. Die leichte Einschnürung des Gelenks in Längsrichtung bewirkt ein gewisses aktives *Confinement* im Bereich der Stirnseiten, wodurch Abplatzungen verhindert werden. Im Gegensatz zur Querrichtung werden die Druckspannungstrajektorien aber nur sanft umgelenkt, so dass in Längsrichtung im Wesentlichen nur ein (passives) *Confinement* infolge der Querdehnungsbehinderung durch die Schultern wirksam ist.

Die hohe Festigkeit und Duktilität des Betons unter mehraxialen Druckspannungen machen eine den Gelenkhals durchdringende axiale Bewehrung zur Beteiligung an der Aufnahme der Axialkräfte nicht nur unnötig, sondern eine solche Bewehrung kann sogar kontraproduktiv sein. Dies aus folgenden Gründen [Dix 62]:

- Die Platzverhältnisse sind bereits ohne axiale Bewehrung eng; eine solche Bewehrung erschwert das Einbringen und Verdichten des Betons, der an dieser Stelle hoch beansprucht ist.
- Im Gelenkhals können lokal sehr grosse Stauchungen des Betons auftreten (deutlich grösser als die Fliessdehnung der Bewehrung), wodurch die Bewehrung Betonabplatzungen verursachen kann (als Folge davon könnte die Bewehrung ausknicken, wobei dies in keinem Versuch beobachtet wurde).
- Bei zyklischer Belastung resultiert infolge der alternierenden Verbundspannungen eine Spreizwirkung, was zu Betonabplatzungen führt und die Dauerhaftigkeit des Gelenks beeinträchtigt.
- Die Bewehrung behindert das Kriechen des Betons und reduziert damit dessen günstige Wirkung (Abbau der Beanspruchungen, beispielsweise Momente infolge Gelenkrotation).
- Sie vergrössert die Biegesteifigkeit (Drehwiderstand) des Gelenks, insbesondere bei grösseren Rotationen.

Falls für die Aufnahme von Querkräften (Abschnitt 3.4) und Biegemomenten quer zur Gelenkachse (starke Richtung, siehe Abschnitt 3.5) eine Bewehrung durch den Gelenkhals unabdingbar ist, sollte sie auf das notwendige Minimum beschränkt und in der Gelenkachse eingelegt werden.

3.1.3. Verhalten der Gelenkanschlusskörper

Die Ausbreitung der Hauptdrucktrajektorien im Gelenkanschlusskörper erzeugt Zugspannungen senkrecht zur Druckrichtung, welche als Spreizspannungen bezeichnet werden. Die Grösse und Verteilung dieser Spannungen hängt primär von der Normalkraft, dem Einschnürungsverhältnis, der Bewehrungsanordnung sowie insbesondere der Rissbildung ab. Bild 2a und b zeigen schematisch die Verteilung der Querspannungen in einer linear elastischen isotropen Scheibe unter lokaler Pressung; dies entspricht in etwa den Verhältnissen in ungerissenem Beton. Um ein günstiges Verhalten sowohl im Gebrauchs- als auch im Bruchzustand zu gewährleisten, sollten die Spannungsumlagerungen im Zuge der Rissbildung begrenzt werden. Es ist daher sinnvoll, die Bewehrung in Anlehnung an die elastische Lösung einzulegen.

Die Einleitung und Ausbreitung konzentrierter Kräfte ist eine grundlegende Fragestellung im Betonbau, und es liegen dafür verschiedene Lösungsansätze vor, siehe Abschnitt 3.2. Obschon in Betonliniengelenken näherungsweise ein ebener Dehnungszustand vorherrscht, kann die auf [Iyengar 60] zurückgehende analytische Lösung für linear elastische, unendlich lange $(h \gg d)$ Scheiben im ebenen Spannungszustand für die Untersuchung der Verhältnisse in den Gelenkanschlusskörpern von Betonliniengelenken verwendet werden, wie dreidimensionale linear elastische FE Analysen bestätigt haben [Markic 15]. Bereits mehr als 35 Jahre vor der Arbeit von [Iyengar 60] ermittelte [Mörsch 24] mit einem vereinfachten – aber für die Zeit sehr innovativen – Ansatz, nämlich der Zusammenfassung der Spannungstrajektorien zu Resultierenden, also einem Fachwerkmodell resp. diskontinuierlichen Spannungsfeld (Bild 2c), die Grösse der Spreizzugkraft in Abhängigkeit der aufgebrachten Belastung:

$$Z_{y} = 0.25N \left(1 - \frac{a}{d}\right) \tag{1}$$

Aus Bild 2d ist ersichtlich, dass Gl. (1) für Einschnürungsverhältnisse ab 0.3 gut mit Iyengars Lösung übereinstimmt (was nicht weiter erstaunt, da die Neigung der Druckstreben, und damit die Grösse der Spreizzugkräfte, in Anlehnung an elastische Spannungsverteilungen gewählt wurde), aber bei für die Praxis relevantesten Werten von 0.1 bis 0.3 zu kleineren Spaltzugkräften führt. [Mönnig 69] schlug eine zu (1) analoge Gleichung vor, die mit dem Wert 0.30 anstelle von 0.25 etwas grössere Spreizkräfte ergibt.



Bild 2 (a) Hauptdrucktrajektorien; (b) zugehörige Spannungen in Querrichtung und (c) Fachwerkmodell nach [Mörsch 24] zur Ermittlung der Spreizzugkraft; (d) Bezogene Spaltzugkraft.

[Leonhardt 86] schlug eine Schlaufenbewehrung (verteilt über eine Länge von je 0.7*d* über resp. unter dem Gelenkhals) zur Aufnahme der Spaltzugkraft vor, was sich in Versuchen und in praktischen Anwendungen bewährt hat. Aufgrund der Untersuchung des Einschnürungsbereichs (Abschnitt 3.1.2), welche die Anordnung einer Umschnürungsbewehrung gemäss Bild 1c unmittelbar neben dem Gelenkhals nahelegt, sollte aus praktischen Überlegungen angestrebt werden, diese Bewehrungsform auch für die Aufnahme der Spaltzugkraft zu benutzen; aufgrund der Versuche von [Dix 62] ist eine solche Umschnürungsbewehrung wirksamer als eine Schlaufenbewehrung nach [Leonhardt 86].

Im Hinblick auf ein günstigeres Riss- und Gebrauchsverhalten empfahl Leonhardt, die zulässige Spannung in der Spaltzugbewehrung $\sigma_{s,adm}$ auf einen Wert zu begrenzen, der (auch unter Berücksichtigung von Last- und Widerstandsbeiwerten) deutlich kleiner ist als die Fliessgrenze resp. deren Bemessungswert f_{sd} . Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 3.6 eingegangen.

3.2. Tragverhalten unter Normalkraft

3.2.1. Allgemeine Bemerkungen

Das Tragverhalten von Betongelenken unter Normalkraft (hier wird ausschliesslich Druck untersucht) stellt grundsätzlich ein Teilflächenbelastungsproblem dar, eine in der Baupraxis häufige Problemstellung (Spanngliedverankerungen, Brückenlager etc.). Für die Ermittlung der aufnehmbaren Teilflächenpressung existieren in der Fachliteratur unterschiedliche theoretische Untersuchungen, welche zumeist auf der Grundlage der Elastizitätstheorie beruhen. Diese sind für Bauteile aus Beton jedoch nur wenig aussagekräftig, da sie dessen ausgeprägt nichtlineares, zeitabhängiges Verhalten vernachlässigen, welches einen Abbau von Spannungsspitzen und damit einhergehende Umlagerungen der inneren Kräfte bewirkt. Die Schwierigkeit, diese vermeintlich einfache Problemstellung analytisch zutreffend zu beschreiben offenbart sich in der Tatsache, dass in den internationalen Normenwerken (SIA 262, DIN 1045-1, Eurocode-2, ACI 318-05, Model Code 2010) empirische Beziehungen der Form

$$\frac{f_{cc}}{f_{c0}} = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}}$$
(2)

als Bemessungsgrundlage verwendet werden. Gemäss dieser Beziehung ist die aufnehmbare lokale Pressung proportional zur einachsigen Druckfestigkeit des Betons und zur Quadratwurzel des Verhältnisses zwischen der Fläche A_{c1} , auf welche die Last ausgebreitet werden kann und der belasteten Fläche A_{c0} ; die Festigkeitserhöhung wird dabei üblicherweise auf $f_{cc}/f_{c0} \leq 3$ begrenzt. Diese Beziehung (nachfolgend als *Quadratwurzel-Ansatz* bezeichnet) wurde von [Spieth 61] aufgrund von Versuchsresultaten vorgeschlagen, und entsprechend ihrer empirischen Natur müssen für ihre Anwendung verschiedene Bedingungen erfüllt sein. Insbesondere wird vorausgesetzt, dass die Flächen A_{c1} und A_{c0} affin sind, womit die Ausbildung eines dreidimensionalen Spannungszustands unmittelbar unter der Lastfläche sichergestellt werden soll. Der Quadratwurzel-Ansatz stimmt für zentrisch belastete, unbewehrte Betonbauteile und übliche Flächenverhältnisse relativ gut mit Versuchsresultaten überein; da sowohl die Bewehrung als auch der Grad der Querdehnungsbehinderung unberücksichtigt bleiben, liefert der Ansatz jedoch für bewehrte Bauteile in der Regel zu konservative Resultate, so dass das Potential des Baustoffes Stahlbeton nicht ausgenutzt wird.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Tragverhalten von Stahlbeton unter hoher, konzentrierter Beanspruchung nicht ausreichend erforscht ist. Obschon lokale Krafteinleitungen, verbunden mit hohen örtlichen Pressungen, in der Praxis sehr häufig sind, existiert dafür – wie auch für Betongelenke im Allgemeinen – kein konsistentes mechanisches Modell, welches das Verhalten allgemein zu beschreiben vermag und als Grundlage für eine Bemessungsvorschrift geeignet wäre. Plastizitätstheoretische Lösungen aus der Bodenmechanik liefern zwar eine Erklärung für hohe Festigkeiten, sind jedoch wegen der begrenzten Abmessungen nicht direkt anwendbar. Beispielsweise liefert die vollständige Lösung nach Prandtl zwar für Beton (tan $\varphi = 0.75$, $c = f_c/4$) eine axiale Druckfestigkeit von $f_{cc} = 13.7 \cdot f_c$, die Querbewehrung müsste aber über die ganze Höhe der Gelenkanschlusskörper einen sehr hohen Querdruck vom Betrag f_c gewährleisten.

In der vorliegenden Arbeit wurden deshalb neue Modelle für lokale Beanspruchung entwickelt. Zwei davon werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.2.2. Trajektorien-Ansatz

Nach dem unteren Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie liefert jeder statisch zulässige Spannungszustand, der die Fliessbedingung nirgends verletzt, eine theoretische Traglast, welche nicht höher als der tatsächliche Tragwiderstand ist. Auf dieser Grundlage wird im Folgenden ein Spannungsfeld für Betonliniengelenke unter reiner Normalkraftbeanspruchung entwickelt. Vereinfachend wird dabei ein durch zwei senkrecht zur Gelenkachse stehende Ebenen begrenzter Ausschnitt des Gelenkes (Scheibe) mit Einheitsdicke untersucht, wobei angenommen wird, dass die Richtung der Gelenkachse eine Hauptspannungsrichtung ist.

Grundlage für die Konstruktion des Spannungsfeldes sind die Gelenkhalsbreite *a*, die für das Spannungsfeld zur Verfügung stehende Breite *d* des Anschlusskörpers und die Ausdehnung x_d der Diskontinuitätsregion, an deren Ende ein homogener Druckspannungszustand ($\sigma_x = \sigma_{xd}$, $\sigma_y = 0$) vorausgesetzt wird. Die Länge x_d kann grundsätzlich beliebig gewählt werden; es ist aber sinnvoll sie – in Anlehnung an das Prinzip von de Saint-Venant – etwa gleich der Gelenkbreite *d* zu wählen. Aus Symmetriegründen ist die Betrachtung eines Viertels des Gelenks ausreichend.

Das Spannungsfeld wird ausgehend von der äussersten Hauptdrucktrajektorie $y_1(x)$ entwickelt, deren Geometrie die Form des Lastausbreitungsbereichs definiert (Bild 3a). Dazu wird eine mathematische Funktion gewählt, die einen plausiblen Verlauf ergibt ("flaschenförmiger" Verlauf der Trajektorien mit einem Wendepunkt) und folgende Randbedingungen erfüllt:

$$y_1(x=0) = a$$
 , $y_1(x=x_d) = d$, $y_1'(x=0) = 0$, $y_1'(x=x_d) = 0$ (3)

Wird angenommen, dass die Breite der Trajektorie von dy_{xd} bei $x = x_d$ auf $dy_{0,1}$ bei x = 0 abnimmt, die Kraft in der Trajektorie jedoch über ihre gesamte Länge konstant ist, sowie dass im Gelenkhals gerade die einachsige Druckfestigkeit des Betons f_{c0} erreicht wird, ergibt sich die Kraft in der Trajektorie zu $dN_1 = \sigma_{xd} dy_{xd}$, und für ihre Breite im Gelenkhals folgt $dy_{0,1} = dN_1 / f_{c0}$ Die Trajektorie entspricht einem Druckband, das als Seil unter Druck ("Perlenkette") betrachtet werden kann: Sie kann nur Normalkräfte übertragen, die über ihre Länge konstant sind und aus Gleichgewicht folgt, dass ein gekrümmter Verlauf der Trajektorie Umlenkkräfte $u_1(x)$ erfordert, die senkrecht zu ihrer Achse angreifen. Die Grösse der Umlenkkräfte ergibt sich aus der Geometrie der Trajektorie und der Druckkraft zu

$$u_{i}(x) = \sigma_{xd} \, dy_{xd} \frac{y_{i}"(x)}{\left[1 + (y_{i}'(x))^{2}\right]^{3/2}}$$
(4)

Die Umlenkkräfte wirken mit umgekehrtem Vorzeichen auf den Beton ausserhalb der Trajektorie und erzeugen in diesem Querzug- oder Druckspannungen. Während die Querzugspannungen durch eine Spreizbewehrung aufgenommen werden müssen, bewirken die Druckspannungen eine Festigkeitserhöhung des Betons. Diese ist abhängig von der Grösse der Querdruckspannungen und dem gewählten Bruchkriterium für den Beton.

Ausgehend vom Verlauf der ersten Trajektorie (i = 1) werden die weiteren Trajektorien (i > 1) ermittelt, indem für ihren Verlauf die gleiche mathematische Beziehung angesetzt wird, jedoch mit angepassten Randbedingungen. Während – wie bei der ersten Trajektorie – die Steigung im Gelenkhals und am Ende des Diskontinuitätsbereichs verschwinden muss, $y_i'(x=0)=0$, und $y_i'(x=x_d)=0$, folgt die Lage der Trajektorie i + 1 bei x=0und $x = x_d$ aus derjenigen der Trajektorie i sowie den Bedingungen, dass jede Trajektorie (Druckband) die gleiche Kraft aufnehmen soll, $dN_i = dN_1$, und dass im Gelenkhals (resp. am massgebenden Punkt der Trajektorie, siehe unten) die Betondruckfestigkeit f_{cc} gerade ausgenützt wird. Aus ersterer Bedingung folgt, dass bei $x = x_d$ alle Trajektorien die gleiche Breite dy_{xd} aufweisen. Im Gelenkhals (x = 0) nimmt die Breite der Trajektorien $dy_{0,i} = dN_i / f_{cc}$ dagegen mit *i*, also in Richtung des Gelenkinneren kontinuierlich ab, da die Druckfestigkeit f_{cc} des Betons durch den Querdruck, welcher aus der Umlenkung der äusseren Trajektorien resultiert, in Richtung des Gelenkinneren kontinuierlich zunimmt. Wird die Belastung σ_{xd} am Ende des Diskontinuitätsbereichs gesteigert, beanspruchen die Trajektorienbreiten im Gelenkhals eine immer grössere Breite. Die Traglast entspricht der Belastung σ_{xd} , bei welcher die ganze Gelenkhalsbreite ausgenutzt wird, das heisst wenn die Summe aller Trajektorienbreiten $dy_{0,i}$ bei x = 0 der Gelenkhalsbreite *a* entspricht.

Die Haupttrajektorien des resultierenden Spannungsfelds sind in Bild 3b (für den Trajektorienverlauf gemäss Gl. (5)) illustriert. Die Druckkraft der Trajektorie (des Druckbands), dividiert durch die jeweilige Breite, ergibt die Hauptdruckspannung σ_1 in jedem Punkt; ihre Richtung ist bei der Tangente zur Trajektorie gegeben. Die senkrecht dazu wirkende Hauptspannung kann durch Summation der Umlenkkräfte entlang der zur ersten Hauptdrucktrajektorienschar orthogonal stehenden Kurve ermittelt werden. Die Spannung σ_z in Längsrichtung, d.h. parallel zur Gelenkachse und orthogonal zur betrachteten Scheibe, stellt die dritte Hauptspannung dar; ihre Grösse kann frei gewählt resp. aufgrund der vorhandenen Bewehrung parallel zur Gelenkachse festgelegt werden (siehe unten und Abschnitt 3.1.2). Damit ist der Spannungszustand in jedem Punkt des Gelenkhalses und des Gelenkanschlusskörpers bekannt, und die Einhaltung des gewählten Bruchkriteriums für den Beton kann überprüft werden.

Je nach der für die Geometrie der Trajektorien gewählten Funktion und den daraus resultierenden Verläufen der Trajektorienbreite und der Querdruckspannungen wird das Bruchkriterium des Betons nicht im Gelenkhals, sondern an einer anderen Stelle der Trajektorie massgebend. In solchen Fällen sind die Spannungen σ_{xd} bei $x = x_d$ zu reduzieren, bis das Bruchkriterium des Betons über die ganze Länge der Trajektorien eingehalten ist. Die erforderliche Spreizbewehrung folgt aus der in Bild 3c dargestellten Verteilung der Spaltzugspannungen entlang der x-Achse.



Bild 3 Betongelenke mit Einschnürungsverhältnis a/d = 0.2 unter Druck-Normalspannung σ_{xd} : (a) Erstes Druckband; (b) Spannungsfeld mit Haupttrajektorien; (c) Querspannungsverteilung entlang x-Achse.

Ausgehend vom Trajektorien-Ansatz kann auch die günstige Wirkung einer unmittelbar über resp. unter dem Gelenkhals liegenden Umschnürungsbewehrung in Querrichtung berücksichtigt werden (Bild 4a). Eine solche Bewehrung bewirkt eine über die Gelenkbreite konstante Druckspannung in y-Richtung, die mit dem Spannungszustand gemäss Trajektorien-Ansatz superponiert werden kann. Es resultiert somit eine zusätzliche Festigkeitserhöhung des Halsbereiches und eine entsprechende Steigerung der maximal aufnehmbaren Belastung σ_{yd} .

Die in Richtung der Gelenkachse wirkende Spannung σ_z kann grundsätzlich in jedem Punkt unabhängig gewählt werden. Ihr Einfluss auf die mehrachsige Druckfestigkeit des Betons wird durch die Bruchbedingung erfasst. Hier wurde in jedem Punkt $\sigma_z = \max(\sigma_2, 0)$ angenommen (d.h. für Druckspannungen gleich gross wie σ_2 , für Zugspannungen = 0). Es ist wichtig, dass genügend Längsbewehrung in der Schulter eingelegt wird, so dass sich der angenommene Querdruck σ_z tatsächlich einstellen kann. Aus dem einfachen Fachwerkmodel in Bild 4b ist ersichtlich, dass die Zugkraft Z_{z3} in der Schulter, für welche diese Bewehrung bemessen werden muss, dem Integral aller Querdruckspannungen σ_z , die im Gelenkhalsbereich angesetzt werden, entspricht.



Bild 4 (a) Effekt einer Umschnürungsbewehrung in Querrichtung neben dem Gelenkhals; (b) Längsbewehrung zur Sicherstellung eines Querdrucks in Längsrichtung (σ_{-}).

Der Trajektorien-Ansatz, kombiniert mit der Aktivierung einer Querbewehrung unmittelbar über resp. unter dem Gelenkhals, kann für die Bemessung von Betonliniengelenken unter Normalkraft verwendet werden. Im Unterschied zu den bestehenden empirischen Richtlinien erfolgt die Bemessung nach diesem Ansatz anhand eines klar definierten, statisch konsistenten Spannungsfelds. Das Bruchkriterium kann für den dreidimensional beanspruchten Beton in jedem Punkt des Gelenks überprüft und die erforderliche Bewehrung kann ebenfalls ermittelt werden.

Vergleich mit anderen Bemessungsregeln und Versuchsergebnissen

Da es nur sehr wenige repräsentative Versuche von Betonliniengelenken gibt, wurde das auf dem Trajektorien-Ansatz basierende Modell für rotationssymmetrische Fälle verallgemeinert. Dies erlaubt den Vergleich mit bestehenden Bemessungsregeln für Teilflächenbelastungen und einer breiten Datenbank von Versuchen. Für die folgenden Vergleiche wurden exponentielle harmonische Funktionen der Form

$$y_i(x) = e^{C_{1i}x} C_{2i} \sin(C_{3i}x + C_{4i}) + C_{5i}$$
(5)

für den Trajektorienverlauf gewählt. Vier der Konstanten C_{1i} bis C_{5i} wurden durch die Randbedingungen (3) bestimmt; die verbleibende Konstante wurde so optimiert, so dass die Traglast maximiert wird. Als Bruchkriterium wurde die Fliessbedingung von Coulomb benutzt, die in Hauptspannungen wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$Y = \sigma_i \left(1 - \sin \varphi \right) - \sigma_k \left(1 + \sin \varphi \right) - 2c \cos \varphi = 0 \qquad (\sigma_i \ge \sigma_i \ge \sigma_k) \tag{6}$$

Für Beton wurden übliche Werte für den Winkel der inneren Reibung und die Kohäsion von $\tan \varphi = 0.75$ und $c = f_c / 4$ angesetzt. Für die Berechnungen wurde der Trajektorien-Ansatz, kombiniert mit der Aktivierung einer Querbewehrung unmittelbar über resp. unter dem Gelenkhals, im Programm *Matlab* implementiert, da die Methode relativ rechenintensiv ist.

Bild 5 zeigt den Vergleich zwischen verschiedenen Modellen und Versuchen an unbewehrten Bauteilen unter Teilflächenbelastung. Die axiale Druckspannung im Gelenkhals (= lokale Pressung bei der Lasteinleitung, beim Trajektorien-Ansatz Mittelwert) ist dabei in Funktion des Einschnürungsverhältnisses a/d dargestellt. Es zeigt sich, dass der Trajektorien-Ansatz gut mit Versuchsresultaten, aber auch mit dem Quadratwurzel-Ansatz [Spieth 61] übereinstimmt. Für starke Einschnürungen (a/d < 0.2), wie sie bei Betongelenken auftreten können, liegt der Trajektorien-Ansatz deutlich auf der konservativen Seite, er erlaubt aber im Vergleich mit heutigen Normbestimmungen (SIA 262: Wurzelansatz mit maximaler Festigkeitserhöhung um Faktor 3) und der von Leonhardt vorgeschlagenen empirischen Formel trotzdem eine beträchtlich höhere Ausnutzung der Kapazität. Zum Vergleich sind auch die Ergebnisse nach einem Modell von [Kupfer 05] dargestellt, der das Problem der Teilflächenbelastung in einer wenig bekannten Arbeit ebenfalls anhand der Untersuchung von Haupttrajektorienverläufen und der durch diese bewirkten Querpressungen analysierte, wobei aber nur einfache Kurvenverläufe untersucht und die Umlenkkräfte nur näherungsweise erfasst wurden.



Bild 5 Vergleich verschiedener Modelle mit Versuchen an unbewehrten Bauteilen unter Teilflächenbelastung.

Die wahre Stärke des Trajektorien-Ansatzes zeigt sich bei der Betrachtung bewehrter Bauteile unter örtlicher Pressung (Tabelle 1), unter Berücksichtigung der Aktivierung einer Umschnürungsbewehrung unmittelbar unter der Belastungsfläche. Das vorgeschlagene Modell stimmt wesentlich besser mit den in den Versuchen erreichten Bruchlasten überein als die Normbestimmung für Teilflächenbelastung.

Autor / Quelle	Versuch Nr.	Versuchsresultat f_{cc}/f_{c0}	Bruchlast nach Trajektorien-Ansatz f_{cc}/f_{c0}	Widerstand nach SIA 262 f_{cc}/f_{c0}
	3.1	10.0	7.1	3.0
[Spieth 61]	3.2	11.9	8.5	3.0
	3.3	10.4	6.0	3.0
Wurm/Daschner	19	3.1	2.4	2.0
[Wurm 77]	25	2.8	2.3	2.0

Tabelle 1 Vergleich verschiedener Modelle mit Versuchen an bewehrten Bauteilen unter Teilflächenbelastung

3.2.3. Diskontinuierliches Spannungsfeld (Fächer)

Der Trajektorien-Ansatz, welcher im durch die äusserste Trajektorie begrenzten Lastausbreitungsbereich einem kontinuierlichen Spannungsfeld mit variabler Druckfestigkeit entspricht, stimmt zwar gut mit Versuchsresultaten überein, ist jedoch verhältnismässig rechenintensiv und daher nur bedingt für die Anwendung in der Praxis geeignet. Nachfolgend wird ein diskontinuierliches Spannungsfeld untersucht, welches das Verhalten von Betonge-

lenken unter Normalkraft ähnlich zutreffend zu beschreiben vermag, jedoch wesentlich einfacher in der Anwendung ist. Das Modell beruht ebenfalls auf dem unteren Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie.

Das untersuchte Spannungsfeld ist in Bild 6a dargestellt, wobei wiederum ein Viertel einer durch zwei senkrecht zur Gelenkachse stehende Ebenen begrenzten Scheibe des Gelenks betrachtet und vorausgesetzt wird, dass die Richtung der Gelenkachse eine Hauptspannungsrichtung ist. Für den Beton wird auch hier die Fliessbedingung von Coulomb angenommen. Das Spannungsfeld setzt sich aus in der Scheibenebene einachsig beanspruchten Streben und Fächern sowie zweiachsig beanspruchten Knotenbereichen zusammen (da die Spannung σ_{\cdot} in Längsrichtung, d.h. parallel zur Gelenkachse, im Allgemeinen nicht Null ist, sind die Bereiche effektiv zweiresp. dreiachsig beansprucht; für den Beschrieb des Spannungsfelds wird der Einfachheit halber von $\sigma_{z} = 0$ ausgegangen). Ausgangspunkt für die Konstruktion des Spannungsfelds sind wiederum die Gelenkhalsbreite a und die für das Spannungsfeld zur Verfügung stehende Breite d des Anschlusskörpers, wobei aber hier eine über die Breite a des Gelenkhalses konstante Spannung σ_{x0} vorausgesetzt wird. Der Knoten ABK gibt die Normalkraft $a \cdot \sigma_{x0}$ and ie im Winkel α gegenüber der x-Achse geneigte, einachsig mit $\sigma_{c1} = f_{c0}$ beanspruchte Druckstrebe BCHK ab. Der Winkel γ folgt aus den Gleichgewichtsbedingungen und der Annahme, dass das Bruchkriterium im Knoten ABK gerade erfüllt ist, wobei senkrecht zur Scheibe die mittlere Hauptspannung vorausgesetzt wird. Bis hier entspricht das Spannungsfeld der von [Chen 75] angegebenen Lösung. Diese wird um den Fächer CDGH erweitert, der die Normalkraft über die ganze zur Verfügung stehende Breite gleichmässig verteilt. Über die an den Fächer anschliessende, zweiachsig beanspruchte Druckzone DEFG (Hauptdruckspannungen σ_{e} und σ_{vd}) werden die Horizontalkomponenten der Kräfte im Fächer an eine Spreizbewehrung abgegeben, die das horizontale Gleichgewicht gewährleistet. Im Knoten CH herrscht ein zweiachsig gleichförmiger Druckspannungszustand, $\sigma_{c1} = \sigma_{c2} = f_{c0}$. Die Druckspannungen im Fächer nehmen entlang der geraden Trajektorien, ausgehend vom entlang der Fächerberandung CH vorausgesetzten Wert $\sigma_{c1} = f_{c0}$, in Richtung des Randes DG ab. Die Geometrie der Fächerberandungen CH und DG kann durch Formulieren der Gleichgewichtsbedingungen an einer Fächerstrebe und Lösen der resultierenden Differentialgleichungen ermittelt werden [Marti 99].

Der günstige Effekt einer unmittelbar über resp. unter dem Gelenkhals liegenden Umschnürungsbewehrung kann durch die Superposition einer einachsig mit $\sigma_{c1} = \sigma_{conf}$ beanspruchten Drucktrebe ABIJ berücksichtigt werden. Durch die damit verbundene Erhöhung der horizontalen Hauptdruckspannung in Knoten ABK wird die aufnehmbare vertikale Hauptdruckspannung σ_{x0} wesentlich erhöht (vorausgesetzt, dass in Richtung der Gelenkachse eine Druckspannung aktiviert werden kann, die mindestens gleich gross ist wie die horizontale Druckspannung in der Scheibenebene). Durch Superposition mit dem oben beschriebenen Spannungsfeld resultiert im Bereich BHK ein zweiachsiger Druckspannungszustand, der für die Tragsicherheit aber nicht massgebend wird resp. nicht für eine Erhöhung der Druckspannung in der Strebe BCHK genutzt werden kann, da diese in Bereich BCH einachsig beansprucht bleibt.

Die Hauptspannung $\sigma_3 = \sigma_z$ in Längsrichtung (parallel zur Gelenkachse) wird im Bereich der Region ABHK gleich σ_2 gewählt, in den anderen Bereichen zu Null gesetzt. Die in Richtung der Gelenkachse erforderliche Bewehrung, um diesen Querdruck σ_z sicherzustellen, kann wie beim Trajektorien-Ansatz anhand des in Bild 4b dargestellten Fachwerkmodells bestimmt werden. Aus diesem Spannungsfeld kann die maximal aufnehmbare, gleichmässig verteilte Beanspruchung σ_{xd} im Gelenkhals in Funktion des Einschnürungsverhältnisses a/d und der Spreiz- und Umschnürungsbewehrung (beziehungsweise des durch diese erzeugten Querdrucks σ_s resp. σ_{conf}) ermittelt werden. Die Abmessung h_F kann grundsätzlich frei gewählt werden, bei gegebenen σ_{conf} und σ_s resultiert die grösste Traglast jedoch stets für $h_F = 0$; der Winkel α und die Abmessung x_d des Diskontinuitätsbereichs resultieren aus dem Gleichgewicht.

Bild 6b zeigt, dass das diskontinuierliche Spannungsfeld bei starken Einschnürungen (kleines Verhältnis a/d), in Übereinstimmung mit dem praxiserprobten Ansatz von Leonhardt, deutlich grössere Festigkeitserhöhungen ergibt als der Trajektorien-Ansatz; der Unterschied zwischen den beiden Ansätzen nimmt mit zunehmendem Verhältnis a/d ab. Aufgrund der Übereinstimmung mit dem Ansatz von Leonhardt und der Tatsache, dass es sich um Lösungen nach dem unteren Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie handelt, dürfte das diskontinuierliche Spannungsfeld besser mit der tatsächlichen Bruchlast korrelieren als der Trajektorien-Ansatz. Da das diskontinuierliche Spannungsfeld nicht auf rotationssymmetrische Fälle verallgemeinert werden kann und für Liniengelenke kaum Versuchsresultate vorliegen, kann dies allerdings nicht direkt experimentell überprüft werden. Gewiss ist jedoch, dass das diskontinuierliche Spannungsfeld den Vorteil hat, dass der günstige Einfluss einer Spreizbewehrung auf die Bruchlast, welcher in Versuchen beobachtet wurde, direkt erfasst wird. Eine kräftige Spreizbewehrung (resp. der dadurch aktivierbare Querdruck) führt in diesem Modell zu einer massiven Erhöhung der aufnehmbaren Beanspruchung im Gelenkhals. Der Trajektorien-Ansatz liefert dagegen lediglich die für eine gewählte Geometrie erforderliche Spreizbewehrung; wird diese darüber hinaus verstärkt, resultiert keine höhere Bruchlast; eine Anpassung der Geometrie zur Ausnützung der Spreizbewehrung wäre sehr aufwändig.

Aus Bild 6c kann für eine gegebene Belastung des Anschlusskörpers σ_{xd} und ein angenommenes Bewehrungslayout (σ_s und σ_{conf}) die maximal zulässige Einschnürung (minimales Einschnürungsverhältnis a/d) abgelesen werden. Dies ist für die Bemessung von Betongelenken – bei denen zwecks Minimierung der Rotationssteifigkeit eine möglichst kleine Gelenkhalsbreite angestrebt wird – relevant. Aus Bild 6d und e ist ersichtlich, das die Bruchlast bei einer Erhöhung der Spannung σ_s infolge Spreizbewehrung über einen Wert von etwa $\sigma_s = 0.2...0.3 f_{c0}$ nicht mehr stark zunimmt, resp. die Spreizkräfte bei zunehmender Bruchlast überproportional anwachsen. Grössere Werte von σ_s sind daher kaum wirtschaftlich.



Bild 6 (a) Diskontinuierliches Spannungsfeld für bewehrte Bauteile unter Teilflächenbelastung; maximale Druckspannungen (b) σ_{x0} und (c) σ_{xd} in Funktion des Einschnürungsverhältnisses a/d und der durch die Spreiz- resp. Umschnürungsbewehrung erzeugten Querdruckspannungen σ_s und σ_{conf} ; (d) maximale Druckspannung σ_{x0} und (e) totale Spaltzugkraft Z_{γ} in Funktion von σ_s und σ_{conf} .

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem in diesem Abschnitt vorgeschlagenen diskontinuierlichen Spannungsfeld die Bewehrungsanordnung und der Bewehrungsgehalt der Spreiz- und Umschnürungsbewehrung ermittelt, die Betonabmessungen überprüft und die minimal erforderliche Gelenkhalsbreite für eine gegebene Drucknormalkraft bestimmt werden können. Ausserdem wird die Wirkung einer Spreizbewehrung berücksichtigt und es resultieren höhere Werte für die Traglast als nach dem Trajektorien-Ansatz (Absatz 3.2.2), bei welchem zudem die Spannungsverteilung im Gelenkhals (Maximalwert in Achse) stark von der elastischen Lösung (Maximalwert am Rand) abweicht, was grössere Umlagerungen erfordert. Für die Praxis ist daher das diskontinuierliche Spannungsfeld (Fächer) gemäss Abschnitt 3.2.2 zu empfehlen, das auch in der Anwendung einfacher ist (bei der Bemessung interessieren primär die Grösse und Lage der Spreizkräfte, die für übliche Verhältnisse in guter Näherung durch Betrachtung eines vereinfachten Fachwerkmodells – ohne genaue Bestimmung des Verlaufs der Fächerberandungen – ermittelt werden können).

3.3. Einfluss der Rotation

Betongelenke müssen grosse Druckkräfte übertragen, dürfen Verdrehungen um die Gelenkachse aber möglichst wenig Widerstand entgegensetzen. Auch bei grösseren Rotationen sollen nur untergeordnete Biegemomente entstehen. Da die Rotationssteifigkeit mit der Breite *a* des Gelenkhalses überproportional zunimmt, wird dieser möglichst schmal ausgebildet. Dies ist der Grund, weshalb die maximal aufnehmbare Druckspannung im Gelenkhals möglichst zutreffend erfasst werden muss, was mit den in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Modellen untersucht wurde.

Die Grösse der Biegemomente, welche durch eine Verdrehung um die Gelenkachse hervorgerufen werden, hängt neben der Breite des Gelenkhalses primär von der Steifigkeit des Betons ab. Aufgrund des zeitabhängigen Verhaltens von Beton spielt die Geschwindigkeit, mit welcher eine Rotation aufgebracht wird, eine entscheidende Rolle. Insbesondere erreichen die Biegemomente infolge von langsam auftretenden Rotationen (z.B. durch Schwinden und Kriechen eines Brückenträgers hervorgerufene Verdrehungen) dank des Kriechvermögens des Betons nur einen Teil des Wertes, den sie bei kurzfristigem Eintreten verursacht hätten, und durch Rotationen in jungem Bauwerksalter hervorgerufene Biegemomente bauen sich im Laufe der Zeit stark ab. Diese Effekte können mit den für die Untersuchung von Langzeiteinflüssen üblichen Verfahren untersucht werden, beispielsweise nach dem Verfahren von Trost, wobei die Kriechzahl φ für Beton unter dreiachsiger Druckbeanspruchung zu verwenden ist. Näherungsweise kann, wie von Leonhardt empfohlen, der günstige Einfluss des Kriechens berücksichtigt werden, indem langfristig eintretende resp. wirkende Verdrehungen α_G um den Faktor $(1+\varphi)$ reduziert werden, wobei Leonhardt zur Berücksichtigung der dreiachsigen Beanspruchung eine reduzierte Kriechzahl von $\varphi \approx 1$ empfahl.

Wie Versuche und Analysen bestehender Betongelenke gezeigt haben, können bereits bei relativ geringen Verdrehungen Risse im Gelenkhals entstehen. Durch alternierende Rotationen (beispielsweise infolge zyklischer Temperaturänderungen des Brückenüberbaus) kann es sogar sein, dass der Gelenkhals über seine gesamte Breite gerissen ist. Solange die Druckzone – bei geschlossenen Rissen – intakt ist, beeinträchtigen solche Risse die Tragfähigkeit des Betongelenkes jedoch nicht, und sofern die aufgezwungenen Verdrehungen nicht allzu gross sind, zeigen Betongelenke mit gerissenem Hals auch keinerlei Zeichen von Ermüdung unter zyklischer Verdrehung mit wechselndem Vorzeichen [Dix 62], [Fessler 67]. Da die Kraftübertragung über den Beton erfolgt und höchstens eine sehr leichte Bewehrung durch den Hals verläuft, beeinträchtigt das Reissen des Gelenkhalses auch die Dauerhaftigkeit kaum; jedenfalls liegen keine Berichte über Probleme mit Betongelenken vor, die mit einer Betonierfuge im Gelenkhals ausgeführt wurden (in den USA verbreiteten Praxis, insbesondere bei Betongelenken am Pfeilerfuss im Übergang zur Fundation [Saiidi 88]).

Der Einfluss einer aufgezwungenen Rotation auf die aufnehmbare Normalkraft kann berücksichtigt werden, indem die Gelenkhalsbreite *a* durch die effektiv gedrückte Halsbreite $a^* = a - r$ ersetzt wird, wobei *r* die Breite des dekomprimierten Bereichs ("klaffende Fuge") des Gelenkhalses bezeichnet, welche unter der Annahme einer linearen Spannungsverteilung im Gelenkhals – unter Vernachlässigung von Zugspannungen – ermittelt werden kann. Nach dem semi-empirischen Modell von Leonhardt (Bild 7a) erhält man für a^* resp. das effektive Einschnürungsverhältnis a^*/d in Funktion der auftretenden Gelenkrotation α_d und der maximal zulässigen, zur Druckspannung proportionalen Gelenkrotation α_{Rd} : Betongelenke

$$\frac{a^*}{d} = \begin{cases} \frac{a}{d} & , \quad \frac{\alpha_{Rd}}{\alpha_d} < \frac{64}{9} \\ \frac{a}{d} \sqrt{\frac{9}{64} \frac{\alpha_{Rd}}{\alpha_d}} & , \quad \frac{\alpha_{Rd}}{\alpha_d} \ge \frac{64}{9} \end{cases} \quad \text{mit} \qquad \alpha_{Rd} = \frac{128}{9} \frac{\sigma_{x0}}{E_{cm}}$$
(7)

Die Normalkraft spielt dabei eine zentrale Rolle: Bei kleiner Druckkraft treten bereits früher Risse auf, und bei gleichem Drehwinkel sind die Risse bei kleineren Druckkräften länger. Die Grösse der maximal zulässigen Rotation α_{Rd} (entsprechend einer klaffenden Fuge = Risslänge von r = 0.625a) wurde von Leonhardt rein empirisch auf der Basis von Versuchsresultaten und Erfahrungen mit ausgeführten Betongelenken festgelegt.

Alternativ zum Modell von Leonhardt kann die Breite a^* (resp. das effektive Einschnürungsverhältnis a^*/d) ermittelt werden, indem der gedrückte Bereich des Gelenkhalses als Flächenlast auf einem elastischen Halbraum behandelt wird, wie dies bei der Ermittlung der Steifigkeit von Flachfundamenten üblich ist (Bild 7b). Mit den aus der Geotechnik bekannten Näherungsformeln von [Gorbunov 61] kann damit auch die Rotationssteifigkeit sehr einfach ausgedrückt werden, und es resultieren ähnliche Verhältnisse wie mit dem Modell von Leonhardt. Die maximal zulässige Rotation könnte mit diesem Ansatz grundsätzlich bestimmt werden, indem die maximale Pressung im Gelenkhals – beispielsweise unter der Annahme einer linearen Dehnungsverteilung – mit der (mehrachsigen) Druckfestigkeit des Betons gleichgesetzt wird. Da weder die Spannungsverteilung noch die Druckfestigkeit f_{cc} bekannt sind (es sind keine Versuche bekannt, in denen die Spannungs- oder Dehnungsverteilung im Gelenkhals gemessen wurde), kann jedoch kein verlässlicher Wert von α_{Rd} ermittelt werden.

Die Beziehung zwischen Rückstellmoment M_y und Rotation α spielt für die praktische Bemessung von Betongelenken nur eine untergeordnete Rolle, dient aber der Prüfung der Modellannahmen. Bild 7c zeigt den Verlauf der auf die Gelenkhalsbreite bezogenen Exzentrizität $m = M_y / (Na)$ in Funktion der normalisierte Rotation $\overline{\alpha} = \alpha E_{cm} / \sigma_{x0}$ nach den beiden Modellen im Vergleich mit in Versuchen an Betongelenken mit und ohne Gelenkhalsbewehrung gemessenen Werten. Obwohl die Spannungen im Gelenkhals weit über den elastischen Bereich hinausgehen, zeigen die beiden stark vereinfachten, auf der Elastizitätstheorie basierenden Modelle eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Versuchen.



Bild 7 (a) Angenommene Spannungs- und Dehnungsverteilung im Gelenkhals unter Drucknormalkraft und Rotation, nach [Leonhardt 65]; (b) Steifigkeitsabschätzung von Flachfundamenten mit Federn; (c) Vergleich der Modelle mit Versuchsergebnissen, nach [Mönnig 69].

Ungelöst bleibt die Frage nach der Grösse der maximal zulässigen Rotation α_{Rd} bei gegebener Geometrie und Normalkraft. Der von Leonhardt vorgeschlagene Wert von α_{Rd} ist rein empirisch und vernachlässigt den Einfluss der Gelenkgeometrie, so dass die Anwendung dieses Werts auf Gelenke mit anderer Geometrie als in den Versuchen von Leonhardt nicht ohne weiteres möglich ist. Versuche zeigen jedenfalls, dass Gelenke mit einer kleineren Halsbreite *a* sich bei gleichem Einschnürungsverhältnis a/d unter aufgezwungenen Verdrehungen wesentlich besser verhalten als solche mit breiterem Gelenkhals. Daraus folgt die Vermutung, dass nicht wie von Leonhardt postuliert primär das Einschnürungsverhältnis a/d, sondern die absolute Breite *a* des Gelenkhalses relevant ist [Dix 62]. Die Breite des Gelenkhalses sollte demnach so klein wie möglich gewählt werden, und um eine bestimmte Verdrehung erreichen zu können, müsste ein Maximalwert der Gelenkhalsbreite eingehalten werden. Da kein mechanisches Modell verfügbar ist, welches die Ermittlung der Grösse der zulässigen Rotation α_{Rd} (basierend auf Festigkeits- oder Dehnungskriterien) erlaubt, besteht hier ein Forschungsbedarf.

3.4. Übertragung von Querkräften

Neben den Druck-Normalkräften N und den Gelenkrotationen α müssen Betongelenke in der Regel auch Querkräfte V_y senkrecht zur Gelenkachse übertragen. Diese sind betragsmässig in der Regel wesentlich kleiner als die Normalkräfte und sollten nicht für sich allein betrachtet, sondern zusammen mit der Normalkraft untersucht werden: Die Querkräfte bewirken eine Schrägstellung der Normalkraft.

Basierend auf dieser Betrachtungsweise, resp. dem von [Dix 62] vorgeschlagenen Reibungsmodell, begrenzen alle aktuellen Bemessungsregeln für Betongelenke die Querkraft V_y auf einen bestimmten Prozentsatz der Normalkraft. Dabei bleiben viele Fragen offen, was sich in sehr unterschiedlichen und konservativen Annahmen für den Wert des Reibungskoeffizienten manifestiert. Obwohl in den Versuchen von [Base 65] an unbewehrten Betongelenken Verhältnisse von $V_y / N > 1$ bei gleichzeitigen Gelenkrotationen von bis zu 6° erreicht wurden, begrenzte beispielsweise Leonhardt die Querkraft auf $V_y / N \le 0.25$, wobei er bereits für $V_y / N > 0.125$ eine Bewehrung im Gelenkhals forderte. Selbst diese strengen Begrenzungen können aber in der Praxis meist eingehalten werden, sofern das Verhältnis V_y / N für Lastkombinationen im Gebrauchszustand untersucht wird. Nachweise im Grenzzustand der Tragsicherheit (mit $\gamma_G = 0.8$, $\gamma_Q = 1.5$) sind dagegen eher kritisch. Als Ausweg bietet es sich bei zu hohen Querkräften (und nicht stark variierender Richtung der Resultierenden aus N und V_y) an, die Gelenkachse zu neigen, was mit beträchtlichem Aufwand für die Ausführung verbunden, aber einer starken Bewehrung im Gelenkhals vorzuziehen ist, siehe Abschnitt 3.1.2.

Da in der Zeit, als Betongelenke intensiv erforscht wurden, Nachweise unter Gebrauchslasten den Stand der Technik darstellten und aussergewöhnliche Einwirkungen von untergeordneter Bedeutung waren, wurde das komplexe Tragverhalten von Betongelenken unter hohen Querkräften bisher nicht näher untersucht, insbesondere nicht experimentell. [Tue 09] untersuchte das Problem, indem er den gerissenen Hals als unbewehrte, raue Fuge betrachtete. Allgemeiner kann das Verhalten entsprechend dem Kenntnisstand zur Schubübertragung in Kontaktfugen anhand der folgenden Mechanismen untersucht werden: (i) mechanische Verzahnung und adhäsiver Verbund; (ii) Reibung infolge äusseren und aus einem inneren Gleichgewichtszustand resultierenden Drucknormalkräften orthogonal zur Fläche; (iii) Dübelwirkung einer allfälligen Gelenkhalsbewehrung. Diese Mechanismen interagieren miteinander, erreichen ihre Maxima bei verschiedenen Verschiebungen und sind nicht duktil. Sie können daher nicht ohne genauere Untersuchungen superponiert werden; für ein mögliches Vorgehen siehe fib Model Code [fib 10]. Vereinfachend kann, auf der sicheren Seite liegend, nur der Reibungsmechanismus berücksichtigt werden. Damit verbleibt als einziger Parameter der Reibungskoeffizient µ in der "Fuge" zwischen den Gelenkhalshälften, welcher direkt dem Verhältnis V_y / N entspricht. Gemäss fib Model Code kann für glatte Betonoberflächen $\mu = 0.5...0.7$ und für aufgeraute Flächen $\mu = 1.4$ angesetzt werden; die [SIA 262] empfiehlt ähnliche, leicht konservativere Werte. Selbst wenn man davon ausgeht, dass wiederkehrende zyklische Belastungen mit der Zeit eine Glättung der Betonkontaktflächen bewirken, scheint somit eine Begrenzung des Verhältnisses $V_y / N \le 0.5$ für unbewehrte Gelenkhälse konservativ zu sein. Da die über Reibung übertragbare Querkraft nur von der Grösse der Normalkraft abhängt, welche sich durch eine aufgezwungene Rotation nicht ändert, ist der zulässige Wert von V_v / N grundsätzlich unabhängig von der Grösse der Gelenkrotation. In den Versuchen von [Base 65] zeigte sich zwar eine gewisse Abhängigkeit des Querkraftwiderstands vom Rotationswinkel, aber selbst bei grossen Gelenkrotationen konnten deutlich höhere Querkräfte über den unbewehrten Gelenkhals übertragen werden als nach den bestehenden, konservativen Bemessungsregeln zulässig wäre.

3.5. Tragverhalten in die starke Richtung

In ausserordentlichen Situationen wie Anprall oder Erdbeben können Betongelenke durch grosse Querkräfte V_z in Längsrichtung (parallel zur Gelenkachse) und zugehörige Biegemomente M_y um die starke Achse beansprucht werden.

Saiidi et al. [Saiidi 88], [Saiidi 93], [Saiidi 95] untersuchten das Tragverhalten von Betonliniengelenken in der starken Richtung experimentell und analytisch. Dabei bestätigte sich die zentrale Rolle der Normalkraft bei der Übertragung von Querkräften: Je grösser die Normalkraft, desto grösser war der Schubwiderstand in den Versuchen. Abhängig vom Verhältnis zwischen N, V_z und M_y kann es zur Dekompression eines Teils der Gelenk-

halslänge (Dekompression über die ganze Gelenkhalsbreite *a*) kommen, was mit einer Reduktion der Kontaktfläche zur Übertragung der Normal- und Querkraft einhergeht und zu lokal hohen Spannungen führen kann. Unter dieser Belastung kann ein Schub - oder Biegeversagen des Betongelenks eintreten, wobei Schubbrüche deutlich spröder sind und vermieden werden sollten. Wie bei reiner Druckbeanspruchung erreicht der Beton im Gelenkhals infolge des dreiachsigen Spannungszustands eine deutlich höhere Druckfestigkeit und Bruchstauchung als bei üblichen Biegeproblemen. In [Saiidi 93] wurden Betonstauchungen bis 3% beobachtet, also rund zehnmal mehr als in einachsigen Druckversuchen.

Falls die Biegung durch eine Exzentrizität der Druckresultierenden allein nicht aufgenommen werden kann, muss eine Gelenkhalsbewehrung eingelegt werden; diese sollte in der Gelenkachse angeordnet werden, um Rotationen um die schwache Achse möglichst wenig zu behindern. In [Saiidi 95] wurden drei mögliche Anordnungen einer solchen Gelenkhalsbewehrung untersucht: (i) entlang der Gelenkachse homogen verteilte vertikale Stäbe; (ii) in den Randseiten (Stirnzonen) konzentrierte vertikale Stäbe und (iii) entlang der Gelenkachse verteilte, in *z*-Richtung geneigte Stäbe. Keine der drei Bewehrungsausbildungen zeigte gegenüber den anderen klare Vor- oder Nachteile; die Verfasser empfehlen die Ausbildung (i), wobei die Bewehrungsstäbe leicht in *y*-Richtung (kreuzweise) geneigt werden sollen, damit sie zugleich einen Beitrag zur Aufnahme von Schubkräften in die Querrichtung (V_y) zu leisten vermögen.

Der Biege- und Querkraftwiderstand $(M_{y,R}$ bzw. $V_{z,R})$ eines Betongelenkes in die starke Richtung kann näherungsweise anhand einer Querschnittsbetrachtungen (Bild 8) untersucht werden, wobei folgende Vereinfachungen getroffen werden:

- Ebenbleiben der Querschnitte;
- Bewehrung nur auf Zug wirksam (Druckbewehrung vernachlässigt);
- Schubübertragung ausschliesslich über Reibung in der Druckzone, mit $\mu = 0.5$ (Dübelwirkung der Gelenkhalsbewehrung und Rissverzahnung im dekomprimierten Bereich vernachlässigt);
- Mittelwert der Betondruckfestigkeit f_{cc} entlang der Gelenkhalsbreite gemäss Abschnitt 3.2.3 (Spannungsfeld);
- Druckspannungsverteilung als Spannungsblock der Länge c = 0.85x vereinfacht (konservativ, da mehrachsig gedrückter Beton ein deutlich längeres Fliessplateau aufweist als einachsig gedrückter Beton, siehe Bild 1b);
- Berücksichtigung einer allfälligen Verdrehung um die Rotationsachse durch Reduktion der Halsbreite a^* gemäss Abschnitt 3.3.

Bei der Ermittlung des Biegewiderstands sind die Beton- und Stahldehnungen zu kontrollieren. Aufgrund der deutlich höheren Duktilität des Betons unter dreiachsiger Druckbeanspruchung (etwa fünfmal so gross wie die Festigkeitserhöhung) wird der Biegewiderstand praktisch immer durch Reissen der Bewehrung erreicht.

Trotz der vielen Vereinfachungen führt diese Betrachtung zu einer sehr guten Übereinstimmung mit Versuchsresultaten. Eine Nachrechnung der Grossversuche SD1M und SD2M von [Saiidi 93] ergibt beispielsweise Abweichungen von lediglich 6.5% beziehungsweise 4.7% gegenüber den Bruchlasten in den Versuchen.

3.6. Einfluss der Steifigkeit der Umschnürung

Wie bereits in Abschnitt 3.1.2 erläutert, besteht das *Confinement* des Gelenkhalses bewehrter Betongelenke einerseits aus aktiven Querdrücken infolge Umlenkung der Trajektorien und andererseits aus passiven Querdrücken, die durch eine Umschnürungsbewehrung unmittelbar über und unter dem Gelenkhals (Querrichtung) resp. in der Gelenkschulter direkt neben dem Gelenkhals (Längsrichtung) erzeugt werden. Die Aktivierung der durch eine Bewehrung erzeugten Querdrücke setzt relativ grosse Querdehnungen des Gelenkhalsbetons voraus.

Für Körper, bei denen die gesamte (umschnürte) Fläche gedrückt ist, hat sich in zahlreichen Versuchen gezeigt, dass die Umschnürungsbewehrung problemlos aktiviert werden kann. Bei genügend starker Umschnürung gilt dies auch für höhere Festigkeiten der Bewehrung [Cusson 95]. Bei Betongelenken ist die Situation jedoch insofern anders, als die zu umschnürende Fläche (Gelenkhals) nur einem kleinen Teil der gesamten Fläche (Gelenkanschlusskörper) entspricht, in dem die Umschnürungsbewehrung eingelegt ist. Nachfolgend wird daher untersucht, ob die Querdehnungen zur Aktivierung des *Confinements* ausreichen, indem der Einfluss der Querdehnungen auf die dreiachsige Druckfestigkeit mit einer vereinfachten nichtlinearen Berechnung analysiert wird.



Bild 8 Querschnittsbetrachtung zur Bestimmung des Biege- und Querkraftwiderstands eines (a) unbewehrten und (b) bewehrten Betongelenkes in die starke Richtung.

In erster Näherung wird dazu die in Bild 9a dargestellte, rotationssymmetrische Scheibe mit einem Durchmesser d betrachtet. Die Scheibe weist eine Umschnürungsbewehrung (Querschnitt A_s , Elastizitätsmodul E_s) mit einem Spiraldurchmesser d_s auf und ist im inneren Bereich mit dem Durchmesser a durch eine axiale Druckspannung σ_{x0} belastet. Zwischen dem inneren, belasteten Bereich und dem umgebenden Betonring wird eine Diskontinuitätslinie angenommen, die nur Druckspannungen übertragen kann. Die Querdehnung ε_r der belasteten Betonfläche wird anhand des Sekantenmoduls und der Querdehnung des Betons – welche in Anlehnung an [Mander 88] angesetzt wird – berechnet. Diese Querdehnung wird vom umgebenden Betonring behindert, wodurch ein passives *Confinement* resultiert; die Bewehrung kann dabei, solange der Beton ungerissen ist, vernachlässigt werden. Wird die Druckspannung σ_{x0} erhöht, nehmen die Querdehnung ε_r des belasteten Bereichs und die Zugspannungen im umgebenden Betonring zu, bis die Zugfestigkeit (am inneren Rand des Rings) erreicht wird. In diesem Moment entstehen im umgebenden Betonring radiale Risse.

Sobald die Scheibe gerissen ist, wird der Querdruck ausschliesslich durch die zugbeanspruchte Umschnürungsbewehrung erzeugt: Die Umlenkkräfte, welche die Bewehrung an den Beton abgibt, werden über den im gerissenen Zustand einachsig radial gedrückten Betonring an die belastete Fläche übertragen, die dadurch einen Querdruck erfährt. Die Grösse dieses Querdrucks ist von der axialen Spannung σ_{x0} , dem Verhältnis a/d_s und der Dehnsteifigkeit $E_s A_s$ der Bewehrung abhängig. Mit zunehmenden axialen Spannungen nehmen auch die Querdrücke zu. Die Bruchspannung $\sigma_{x0} = f_{cc}$ ist erreicht, wenn die erzeugten Querdrücke (resp. die damit einhergehende Steigerung der Druckfestigkeit) nicht mehr ausreichen, um die axiale Spannung aufzunehmen.

Bild 9b und c illustrieren den Verlauf der tangentialen Dehnung ε_t bzw. der radialen Spannung σ_r über den Radius der Scheibe bei Erreichen der Bruchspannung für verschiedene Verhältnisse a/d_s und eine konstante Bewehrung (Fliessgrenze 500MPa, Stabdurchmesser 20mm, Ganghöhe 100 mm). Man erkennt, dass die Dehnungen der Bewehrung (ε_t bei $r = d_s/2$) mit der Grösse der belasteten Fläche korrelieren; bei kleinen belasteten Flächen können also nur relativ geringe Bewehrungsdehnungen mobilisiert werden. Der auf die belastete Fläche wirkende Querdruck (σ_r bei r = a/2), und damit die maximale Bruchspannung, verläuft dagegen nicht monoton. Vielmehr weist er ein Maximum bei demjenigen Verhältnis a/d_s (im Beispiel von Bild 9 bei

Schlussbericht

 $a/d_s = 0.4$) auf, für welches die Bewehrung gerade die Fliessgrenze erreicht. Grössere Verhältnisse von a/d_s führen zu einer kleineren Festigkeitserhöhung, wie Bild 9d bestätigt. Somit existiert für jeden Durchmesser a der gedrückten Zone ein optimaler (Spiral-)Durchmesser d_s , der die Druckfestigkeit maximiert. Bild 9e zeigt die resultierende bezogene Bruchlast in Funktion von a/d_s .



Bild 9 (a) Örtlich belastete Scheibe; (b)Verlauf der tangentialen Dehnung ε_t bzw. (c) der radialen Spannung σ_r über den Scheibenradius für verschiedene Verhältnisse a/d_s bei Erreichen der Bruchspannung; (d) Festigkeitserhöhung und (e) bezogene Bruchlast in Funktion von a/d_s .

Diese Überlegungen für eine axialsymmetrische Belastung sind ein erster Schritt zur Untersuchung des Einflusses der Grösse der belasteten Fläche und der Steifigkeit der Umschnürungsbewehrung auf die Druckfestigkeit bei Teilflächenpressung. Die Übertragung der Überlegungen auf Betongelenke wäre mit verschiedenen Modifikationen grundsätzlich möglich, aber aufwändig. Offen bleibt auch die Frage des Einflusses der grossen Querdehnungen, welche der dreiachsig gedrückte Beton bei passiver Umschnürung, nicht aber bei aktivem *Confinement* erfährt. [Richart 29] zeigte vor über 80 Jahren in umfangreichen Versuchen an Betonzylindern, dass die Festigkeit von mit Bewehrung umschnürten Prüfkörpern praktisch gleich gross ist wie diejenige von Prüfkörpern unter äquivalenten, aktiv (in einer Triaxialversuchsanordnung mit Flüssigkeitsdruck) aufgebrachten Querdruckspannungen. Seine Folgerung der Unabhängigkeit der dreiachsigen Druckfestigkeit von der Steifigkeit der Umschnürung wurde seither als Basis für verschiedene Stoffgesetze und Fliessbedingungen herangezogen, oftmals ohne sie kritisch zu hinterfragen. Dies ist umso erstaunlicher, als die Betonfestigkeiten in den damaligen Versuchen aus heutiger Sicht sehr gering waren. Neuere Untersuchungen (u.a. [Fam 01], [Moghaddam 09], [Shin 10], [Xiong 16]) deuten darauf hin, dass sowohl die Steifigkeit als auch die Festigkeit von dreiachsig druckbeanspruchtem Beton querdehnungsabhängig sind: Beton unter aktiv aufgebrachtem Querdruck zeigte ein steiferes axiales Verhalten und eine leicht höhere Festigkeit als passiv umschnürter Beton (Bild 10).



Bild 10 Schematisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für passives und aktives Confinement, nach [Moghaddam 09].

3.7. Anwendungspotential höherfester und faserbewehrter Betone

Bei der Bemessung von Betongelenken wird ein möglichst schmaler Gelenkhals angestrebt, um möglichst grosse Gelenkrotationen und kleine Rückstellmomente zu gewährleisten (die Rotationssteifigkeit nimmt mit der Breite *a* des Gelenkhalses überproportional zu). Die minimal erforderliche Gelenkhalsbreite wird durch die dreiachsige Betondruckfestigkeit bestimmt. Diese kann, wie in Abschnitt 3.2 aufgezeigt, mit weniger konservativen Berechnungsmodellen und einer geeigneteren Bewehrungsausbildung, höher ausgenützt werden.

Ein anderer Weg zur Optimierung des Tragverhaltens von Betongelenken, resp. zur Minimierung der erforderlichen Gelenkhalsbreite besteht darin, hochfesten Beton einzusetzen: Da die Festigkeitszunahme unter dreiachsiger Beanspruchung ausgehend von der einachsigen Druckfestigkeit ermittelt wird, ist die erforderliche Breite des Gelenkhalses faktisch umgekehrt proportional zur Druckfestigkeit des verwendeten Betons. Allerdings ist eine gewisse Vorsicht geboten, da bisher keine Versuche an hochfesten Betongelenken durchgeführt wurden und solche Betone ein deutlich spröderes Bruchverhalten zeigen als normalfeste Betone. Eine weitere Optimierung wäre daher durch den Einsatz von ultrahochfestem Faserbeton möglich. Einerseits könnte damit die Duktilität unter Druckbeanspruchung leicht erhöht werden, andererseits sollte durch die Fasern die aufwändige Spreiz- und Umschnürungsbewehrung mindestens teilweise ersetzt werden können, wodurch sich die Ausführbarkeit unter baupraktischen Bedingungen verbessern liesse. Zudem könnten die Fasern ein zusätzliches *Confinement* im Bereich des Gelenkhalses bewirken, da ein steiferes Umschnürungsverhalten erzielt werden könnte (siehe Abschnitt 3.6).

Aufgrund der Komplexität des Tragverhaltens im Gelenkhalsbereich, der begrenzten Erfahrung mit diesen Baustoffen und der fehlenden experimentellen Datenbasis wären grossmassstäbliche Versuche erforderlich, um dieses vermutete grosse Potential der Anwendung höherfester Betone und von UHFB in Betongelenken ausschöpfen zu können.

4. Schlussfolgerungen und Bedeutung für die Praxis

Aufgrund der durchgeführten analytischen und numerischen Untersuchungen und deren Vergleich mit älteren Versuchsresultaten können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

 Der theoretische Kenntnisstand im Bereich lokaler Druckbeanspruchung (Teilflächenpressung) ist äusserst limitiert. Insbesondere ist der in praktisch allen Normen verwendete Quadratwurzel-Ansatz rein empirischer Natur. Die in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagenen Modelle weisen im Vergleich dazu wesentliche Vorteile auf: Sie basieren auf einem konsistenten, mechanischen Modell, erlauben dadurch die Berücksichtigung des günstigen Einflusses einer Querbewehrungen und stimmen besser mit Versuchsresultaten überein.

- Die bestehenden Bemessungsregeln für Betongelenke sind konservativ. Dies betrifft sowohl die Kapazität zur Aufnahme von Normalkräften als auch die zulässigen Gelenkverdrehungen und – in besonderem Ausmass – die aufnehmbaren Querkräfte. Für eine Bemessung resp. Überprüfung von Betongelenken unter aussergewöhnlichen Einwirkungen (Erdbeben, oder Anprall) eignet sich der in Abschnitt 3.5 hergeleitete Bemessungsvorschlag.
- Die Wirksamkeit der Umschnürungsbewehrung hängt von den geometrischen Verhältnissen und der Steifigkeit ab und ist analytisch schwierig zu quantifizieren. In der vorliegenden Arbeit wurden die grundlegenden Zusammenhänge mit einem vereinfachten Modell untersucht, das plausible Resultate liefert, aber noch experimentell validiert werden sollte.
- Bestehende Bemessungsregeln berücksichtigen keine Umschnürungsbewehrung unmittelbar über und unter dem Gelenkhals. Da ohne eine solche Bewehrung nach der Rissbildung kein dreiachsiger Druckspannungszustand erzeugt werden kann (fehlendes *Confinement* in Längsrichtung), wie er aber zur Gewährleistung der von den gleichen Regeln vorausgesetzten Druckfestigkeit erforderlich ist, basieren diese Regeln implizite auf der Betonzugfestigkeit.
- Eine Faserbewehrung würde sich mutmasslich sehr günstig auf das Verhalten von Betongelenken auswirken und könnte einen Teil der Umschnürungs- und Spreizbewehrung ersetzen, was die Bauausführung stark erleichtern würde.
- Es existieren nur wenige aussagekräftige Versuche an Betongelenken und keine aussagekräftige Messungen von Spannungs- resp. Dehnungsverteilungen im Bereich des Gelenkhalses. Auch für die vermeintlich einfachere Problemstellung der Teilflächenpressung liegen praktisch keine solchen Messungen vor.

Aufgrund des komplexen Verhaltens im Bereich des Gelenkhalses und der fehlenden experimentellen Datengrundlage kann die tatsächliche Kapazität von Betongelenken – insbesondere unter allgemeiner Beanspruchung und aufgezwungenen Rotationen – mit analytischen Modellen und numerischen Untersuchungen allein nicht abschliessend geklärt werden.

5. Empfehlungen für die weitere Umsetzung

Die Tragwirkung von Betongelenken ist komplex und entzieht sich weitgehend der Behandlung mit klassischen Modellvorstellungen des Stahlbetonbaus. Die bisherigen Bestrebungen, das Verhalten von Betongelenken analytisch zu beschreiben, waren daher nicht erfolgreich, was sich in der semi-empirischen Natur der bestehenden Bemessungsregeln äussert.

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass die bestehenden Bemessungsregeln konservativ sind, und dass eine Behandlung von Betongelenken auch unter allgemeiner Beanspruchung mit mechanischen Modellen möglich ist. Allerdings bleiben noch verschiedene Aspekte offen, und aufgrund der Resultate älterer Experimente (oftmals scheibenförmige Versuchskörper ohne realistische Ausdehnung in Längsrichtung) können die Modelle insbesondere für allgemeine Beanspruchung und aufgezwungene Rotationen nicht ausreichend validiert werden. Auch kann der mutmasslich günstige Einfluss einer Faserbewehrung damit nicht quantifiziert werden. Dazu wären repräsentative, grossmassstäbliche Versuche unter allgemeiner Beanspruchung erforderlich, in welchen das lokale Verhalten im Gelenkhalsbereich mittels moderner Messtechnik möglichst detailliert untersucht wird.

Es wird daher empfohlen, solche Versuche durchzuführen. Aufgrund der engen Verwandtschaft mit der im Betonbau weit verbreiteten und relevanten Fragestellung der Teilflächenpressung sollten in einem ersten Schritt einfachere Versuche zu diesem Thema durchgeführt werden, deren Resultate sodann für die Festlegung der Versuchsparameter der aufwändigeren Versuche an Betongelenken herangezogen werden können.

Auf Basis der Versuchsresultate wird es möglich sein, die Resultate der vorliegenden Arbeit zu validieren und, darauf aufbauend, auf klaren mechanischen Modellen basierende Bemessungsvorschriften für Teilflächenpressung und Betongelenke herzuleiten.

6. Finanzielles

Die vorliegende Arbeit wurde durch cemsuisse mit einem Beitrag von CHF 70'000.- unterstützt, wofür sich die Verfasser aufrichtig bedanken.

Literatur

[BE 5/75]	BE 5/75, "Technical Memorandum (Bridges) - Rules for the Design and Use of Freyssinet Concrete Hinges in Highway Structures", Design manual for roads and bridges, Volume 1, 1975.
[Chen 75]	Chen, W., "Limit Analysis and Soil Plasticity", Elsevier, 1975, pp. 140-152.
[Cusson 95]	Cusson, D., Paultre, P., "Stress-strain model for confined high-strength concrete", Journal of Structural Engineering, Volume 121 Issue 3, 1995.
[Dix 62]	Dix, J., "Betongelenke unter oftmals wiederholter Druck- und Biegebeanspruchung", DAfSt-Heft 150, Berlin 1962.
[Fam 01]	Fam, A. Z., Rizkalla, S. H., "Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular Fiber-Reinforced Polymer Tubes", Structural Journal, Vol. 98, Issue 4, 2001.
[Fessler 67]	Fessler, E. O., "Die EMPA-Versuche an armierten Betongelenken für den Hardturm-Viadukt", Schweizerische Bauzeitung, Heft 34, 1967.
[fib 10]	fib Model Code for Concrete Structures 2010.
[Gorbunov 61]	Gorbunov-Possadov, M.I., and Serebrajanyi, V., "Design of Structures upon Elastic Founda- tions", Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics, Paris, 1961, pp. 643-648.
[Held 09]	Held, M., Welsch, T., "Zum Nachweis der Teilflächenbelastung nach DIN 1045-1 (08/2008)", Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 104, Nr. 8, 2009.
[Iyengar 60]	Iyengar, K. T. S. R., "Der Spannungszustand in einem elastischen Halbstreifen und seine tech- nische Anwendung", Hannover, TH, Lehrstuhl für Massivbau, Dissertation, 1960.
[Kaufmann 11]	Kaufmann, W., Alvarez, M., "Swiss Federal Roads Office Guidelines for Integral Bridges", Structural Engineering International, Volume 21, 2011.
[Kupfer 69]	Kupfer, H., "Das Verhalten des Betons unter zweiachsiger Beanspruchung", Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, Bericht No. 78, 1969.
[Kupfer 05]	Kupfer, H., " <i>Theorie der Druckfestigkeit des Betons bei Teilflächenbelastung</i> ", Massivbau in ganzer Breite, 2005, pp.401-411.
[Leonhardt 65]	Leonhardt, F., Reimann, H., "Betongelenke - Versuchsbericht, Vorschlage zur Bemessung und konstruktiven Ausbildung", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 175, 1965.
[Leonhardt 66]	Leonhardt, F., Reimann, H., "Betongelenke", Der Bauingenieur 41, Heft 2, 1966.
[Leonhardt 86]	Leonhardt, F., Mönnig, E., "Vorlesungen über Massivbau. Teil 2: Sonderfälle der Bemessung im Stahlbetonbau", Springer, 1986.
[Mander 88]	Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R., "Theoretical stress-strain model for confined con- crete", Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, 1988.
[Markic 15]	Markic, T., "Concrete Hinges", Masterarbeit, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 2015.
[Marti 99]	Marti, P., Alvarez, M., Kaufmann, W., Sigrist, V., "Tragverhalten von Stahlbeton", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 1999.
[Marx 10]	Marx, S., Schacht, G., "Betongelenke im Brückenbau – Bericht zum DBV-Forschungsvorhaben 279", Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V, 2010.
[Moghaddam 09	Moghaddam, H., Samadi, M., Pilakoutas, K., Mohebbi, S., "Compressive behavior of concrete actively confined by metal strips, Part A: experimental study", Materials and Structures, Vol. 43, 2010.
[Mönnig 69]	Mönnig, E., Netzel, D., "Zur Bemessung von Betongelenken", Der Bauingenieur, Heft 12, 1969.

[Richart 29]	Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L. (1929). " <i>The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression</i> ", Bulletin 190, Univ. of Illinois Engineering Experimental Station, 1929.
[Saiidi 09]	Saiidi, M., Cheng, Z., Sanders, D., "Experimental Study of Two-Way Reinforced Concrete Column Hinges under Seismic Loads", ACI Structural Journal, Vol 09, Issue 3, 2009.
[Saiidi 88]	Saiidi, M., Orie, J. L., Douglas, B., "Lateral Load Response of Reinforced Concrete Bridge Columns with a One-Way Pinned End", ACI Structural Journal, Vol 85, Issue 6, 1988.
[Schacht 13]	Schacht, G., Hoffmann, N., Marx, G., "Federgelenke - Anwendung im Hoch- und Brückenbau", Stahlbau 82, Heft 12, 2013.
[Shin 10]	Shin, M., Andrawes, B., "Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys", Engineering Structures, Volume 32, Issue 3, 2010.
[Spieht 61]	H.P. Spieht, "Das Verhalten von Beton unter hoher örtlicher Pressung", Beton- und Stahlbe- tonbau 56, 1961.
[Willam 75]	K. J. Willam, E. P. Warnke, " <i>Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete</i> ", International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 19, 1975.
[Wurm 77]	Wurm, O., Daschner, F., "Versuche über Teilflächenbelastung von Normalbeton", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 286, 1977.
[Xiong 16]	Xiong, H., Li, B., Jiang, J., "Load path dependence of strain and stress for confined concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 68, Issue 12, 2016.