7. Kolloquium

Bauen in Boden und Fels

26. und 27. Januar, 2010 in Stuttgart / Ostfildern

Der Einsatz von hochdeformierbaren Betonelementen beim Tunnelbau in druckhaften und quellfähigen Gebirgsverhältnissen

Markus Stolz
Solexperts AG, Mönchaltorf, Schweiz

Patrick Steiner
Solexperts AG, Mönchaltorf, Schweiz

Zusammenfassung

Der Vortrag beschreibt anhand verschiedener Tunnelbauprojekte den Einsatz von hochdeformierbaren Betonelementen im druckhaften und quellfähigen Gebirge. Durch Zulassen kontrollierter Verformungen werden Gebirgsspannungen abgebaut bzw. begrenzt. Im druckhaften Gebirge werden vorfabrizierte balkenförmige Elemente in die Spritzbetonschale integriert um einen nachgiebigen Ausbau zu erstellen. Die Spritzbetonschale wirkt während der gesamten Verformung tragend und wird vor Überbelastung geschützt. Nach Ausnutzung des Verformungsvermögens der Elemente, erreichtder Ausbau die volle Tragfähigkeit des Spritzbetons. In quellfähigem Gebirge werden nach dem Prinzip des modularen Knautschsystems hochdeformierbare Betonelemente zwischen Fels und Bauwerk eingesetzt, um Quellhebungen zuzulassen und resultierende Spannungen zu begrenzen. Durch den modularen Aufbau und die Zugänglichkeit der Knautschzone können die Elemente bei Bedarf einzeln ersetzt werden.
Die Deformierbarkeit der Elemente entsteht durch die Kompression des porösen Betonzuschlages. Nach Überschreiten des elastischen Materialverhaltens, kann eine nahezu konstante Last über einen grossen Verformungsweg mit einem Betrag von bis zu 50 % der ursprünglichen Elementhöhe aufgenommen werden. Durch die Variabilität von Form und Grösse der Elemente und durch Anpassungen von Rezepturen und Bewehrungsführung kann ein grosser Bereich an gewünschter Tragwirkung und benötigter Verformung abgedeckt werden.

1. Einleitung

Durch den weltweiten Ausbau von leistungsstarken Verkehrswegenetzen werden aufgrund von vorgegebenen Rahmenbedingungen oder einer effizienten Trassenführung, zunehmend Tunnel unter schwierigen geologischen Randbedingungen erstellt.
Bei den langen, zumeist tiefliegenden Eisenbahn Basistunneln, ist es nahezu unvermeidbar, geologische Formationen mit zum Teil stark druckhaftem Gebirgsverhalten auffahren zu müssen. Eine andere Form von schwer zu beherrschender Geologie im Tunnelbau, ist das quellfähige Gebirge, das z.B. im süddeutschen Raum angetroffen wird.
Die beiden genannten geologischen Erscheinungen haben aus unterschiedlichen Mechanismen heraus die Gemeinsamkeit, dass bei zunehmender Verformung des ausgebrochenen Hohlraums der aufzubringende Stützdruck zur Aufnahme der Gebirgsspannung reduziert wird.
In beiden Fällen ist es entweder aus technischen oder wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoller, anstatt den voll auftretenden Gebirgsdruck durch ein steifes Ausbaukonzept aufzunehmen, kontrolliert Verformungen zuzulassen, um die auf das Tragsystem wirkenden Kräfte zu reduzieren. Dies kann mit dem Einbau von verformbaren Elementen geschehen, die gezielt im jeweiligen Ausbausystem integriert werden.
Im Folgenden wird beschrieben, wie unter der Verwendung hochdeformierbarer Betonelemente (hiDCon® – high deformable concrete) Tunnelschalen erstellt werden können, die in der Lage sind, aufzunehmende Gebirgsspannungen auf ein tolerierbares Mass zu senken bzw. zu beschränken.

2. Hochdeformierbare Betonelemente

Beton ist in der herkömmlichen Anwendung ein Werkstoff, der sich durch seine hohe Variabilität in der Formgebung und durch sein grosses Tragvermögen auszeichnet. In der modernen Betontechnologie gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Betonrezepturen, die auf die jeweiligen Bedürfnisse optimal abgestimmt sind. Alle bisherigen Anwendungen haben die Gemeinsamkeit, Verformungen des Werkstoffs unter Lasteinleitung zu minimieren oder auf eine maximale elastische Deformation zu beschränken. Die hier vorgestellten hochdeformierbaren Betonelemente behalten die positiven Werkstoffeigenschaften von Beton, sie werden jedoch um eine Dimension erweitert, der plastischen Verformbarkeit.
Anders als in der herkömmlichen Betontechnologie, wird bei der Herstellung dieser Elemente keine Mindestdruckfestigkeit, sondern eine definierte Druckfestigkeit angestrebt, die nach Überwinden des elastischen Bereichs, über einen möglichst langen plastischen Verformungsweg definierte Spannungseigenschaften aufweist.
Die Umsetzung dieser Ziele kann nur durch eine hochgenaue Dosierung von in sich nahezu homogenen Komponenten erfolgen. Die plastische Deformierbarkeit der Elemente wird durch einen porenhaltigen Zuschlag in Form von Glasschaumgranulat ermöglicht. Den nötigen Zusammenhalt des Gefüges während des Deformationsprozesses, wird durch spezielle Bewehrungsebenen in Form von Platten oder Ringbewehrungen sowie der Zugabe von Faserbewehrung gewährleistet.
Das in Figur 1 abgebildete Diagramm zeigt anhand von einaxialen Druckversuchen verschieden konzipierte Spannungs-Verformungs-Eigenschaften von hochdeformierbaren Betonelementen, die auf unterschiedliche Einsatzgebiete abgestimmt sind.

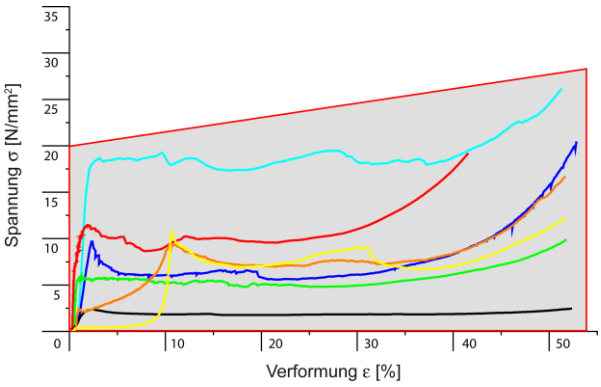

Fig. 1: Variationen einaxialer Spannungs-Verformungs-Kurven an quaderförmigen hiDCon-Elementen

Der Grau hinterlegte Bereich zeigt die derzeitigen Grenzen, innerhalb dieser eine Vielzahl an Kombinationen von gewünschter Tragfähigkeit und benötigter Verformung kreiert werden können. Als Steuermechanismen dienen dazu unter anderem die Betonrezeptur, die Faserbewehrung, die Bewehrung und der Einsatz von weichen oder harten Einlagen.

3. Druckhaftes Gebirge

Der Einsatz von tragfähigen aber nachgiebigen Spritzbetonschalen im Tunnelbau beruht auf folgender grundlegender Erkenntnis: Im druckhaften Gebirge nimmt der Gebirgsdruck mit zunehmender Gebirgsverformung ab (Kovari; 2009).

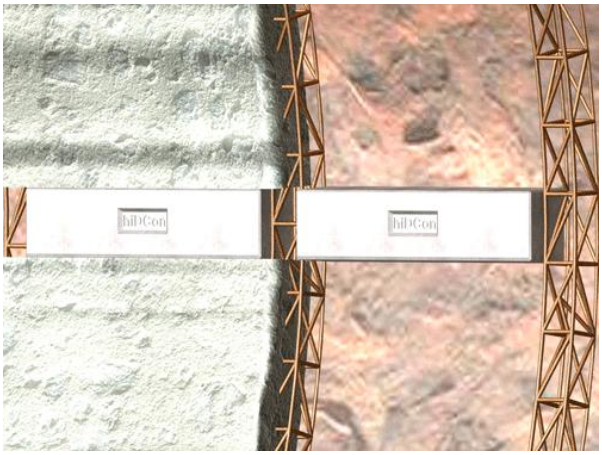

Fig. 2: Einbau von hiDCon-Balkenelementen in der Spritzbetonschale (Installationsschema mit Gitterträgern)

Um dieses Phänomen in der Praxis auszunützen, wurden in der jüngeren Tunnelbaupraxis unterschiedliche Methoden angewandt, um einen verformbaren primären Ausbau zu erhalten. Ein Ansatz ist das Erstellen einer Spritzbetonschale mit offenen Schlitzen in Längsrichtung, um Verformungen aufnehmen zu können. Eine andere Methode stammt aus dem Bergbau, bei der Stahlbögen mit Gleitschlössern zum Einsatz kommen. Beide Verfahren haben die Gemeinsamkeit, dass die Hauptsicherungsmassnahme des Ausbruchs die Systemankerung darstellt. In beiden Fällen wird erst nach Erreichen einer bestimmten Verformung eine geschlossene, steife Spritzbetonschale erstellt. Um diese konzeptionellen Lösungen im Umgang mit stark druckhaftem Gebirge zu optimieren, werden hochdeformierbare Betonelemente zwischen Stahlbögen mit Gleitschlössern, oder zwischen Gitterträger eingesetzt. Anschliessend wird die Spritzbetonschale erstellt und später die Systemankerung installiert. Figur 2 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen konvergenzfähigen Spritzbetonschale mit Gitterträgern.
Durch dieses Vorgehen wird gegenüber den oben genannten Ansätzen die Arbeitssicherheit erhöht, da schon von Beginn an ein grosser Teil der zu tragenden Last von der geschlossenen Spritzbetonschale abgetragen wird.
Geometrie und Anzahl der Elemente im Querschnitt bestimmen die zugelassene kontrollierte radiale Verschiebung, welche die Spritzbetonschale mit einem vorgegebenen Ausbauwiderstand ohne Überbeanspru-

chung aufnehmen kann. Nachdem der Arbeitsweg der Elemente aufgebraucht ist, weist die Schale nur noch geringe Verformung auf, leistet jedoch den vollen Ausbauwiderstand der Spritzbetonschale.
Neueste Berechnungen an der ETH Zürich zeigen darüber hinaus, dass durch den frühzeitigen Einbau von Stauchelementen mit hoher Festigkeit, der endgültig erreichte Deformationsgrad des Hohlraumes gegenüber den Systemen mit offenen Schlitzen oder reinem Stahlbogenausbau geringer ausfällt, auch wenn ein äquivalenter Ausbauwiderstand nach dem Abklingen der Verformungen herrscht(Cantieni, Anagnostou; 2009).

4. Zugangstollen St. Martin la Porte

Der Zugangsstollen St. Martin la Porte dient als Zwischenangriff zum Bau des 53 km langen Basistunnel innerhalb der neuen hochgeschwindigkeits Bahnverbindung zwischen Lyon und Turin. In einer Karbonzone mit einer Überlagerungshöhe von 250 – 350 m traten aussergewöhnlich grosse Konvergenzen auf. Der ursprüngliche temporäre Ausbau in dieser Zone bestand aus TH-Stahlprofilen (TH44/58) mit Gleitschlössern, einer 200 mm dicken Spritzbetonschale mit offenen Schlitzen in Tunnellängsrichtung und einer dicht gestaffelten Radialankerung, welche auch in der Tunnelsohle ausgeführt wurde. Wegen der durchgehenden Schlitze konnte die Spritzbetonschale keinen nennenswerten Ausbauwiderstand entwickeln. Die grössten Konvergenzen traten nach 145 Tagen und einem Abstand von 60 m hinter der Ortsbrust auf und betrugen bis zu 2 m (Mathieu 2008).
Die Konvergenzgeschwindigkeit in dieser Zone lag an der Ortsbrust zwischen 30 bis 50 mm pro Tag und ca. 50 % der totalen Deformation traten auf den ersten 20 m auf. Um die Gebirgsverformungen besser steuern zu können und um kostspielige und mühsame Reprofilierungsarbeiten zu vermeiden, wurde auf ein neues Ausbaukonzept umgestellt. Dies beinhaltet einen nahezu kreisförmigen Querschnitt mit dem Einbau von 9 der oben beschriebenen hiDCon-Elemente pro Tunnelmeter und einer 20 cm dicken Spritzbetonschale (Fig. 3).

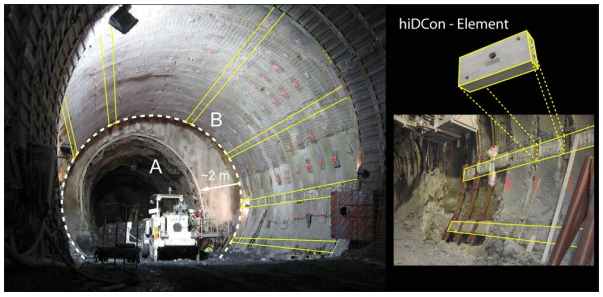

Fig. 3: Zugangsstollen St. Martin la Porte, Lyon-Turin Ferroviaire: Konvergenzen bis zu 2 m (Profil A), Reprofilierung mit dem Einbau hochdeformierbarer Betonelemente (Profil B)

Die balkenförmigen Elemente (Höhe 400mm / Länge 800 mm / Dicke 200 mm) wurden so bemessen, dass sie bis 40 % Verformung eine nahezu konstante Lastaufnahme von ca. 8.5 N/mm2 aufwiesen (Barla et al, 2008). Zwischen 2006 bis 2008 wurden durch dieses Ausbausystem ca. 450 m der Störzone durchörtert wobei sich dieses Ausbaukonzept als sehr erfolgreich herausstellte.

5. Quellfähiges Gebirge

Ton- und anhydridführende Gesteine haben die Eigenschaft ihr Volumen durch Aufnahme von Wasser zu vermehren. Man spricht vom Quellen dieser Gesteine. Beim Tunnelvortrieb in quellfähigem Gebirge können normalerweise 2 unterschiedliche Typen von Schäden am Ausbau auftreten. Der erste Typ kennzeichnet sich durch Schäden im Sohlgewölbe durch den Aufbau von Quelldrücken aus dem anstehenden Fels. Der zweite Typ tritt unter Bedingungen mit geringer Überlagerungshöhe auf, indem die Tunnelröhre im gesamten angehoben wird. Die bei diesem Vorgang in Tunnellängsrichtung auftretenden Hebungsdifferenzen führen unter anderem zu typischen Diagonalrissen in der Tunnelschale, die ebenfalls Sanierungsmassnahmen zur Folge haben. Dem Anheben des Bauwerkes sind insbesondere bei Eisenbahntunnel für Hochgeschwindigkeitszüge enge Grenzen gesetzt, so dass in diesem Falle die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit oft schwieriger zu erfüllen sind als jene der Tragfähigkeit. (Kovári, Chiaverio; 2007)
Der zweite Schadensmechanismus ist beim 1.5 km langen Chienberg Strassentunnel in der Nähe von Basel in grösserem Umfang aufgetreten. Der Tunnel wurde im Kreisprofil mit einer bis zu 1.0 m dicken Innenschale erstellt, um den grossen Quelldrücken widerstehen zu können.

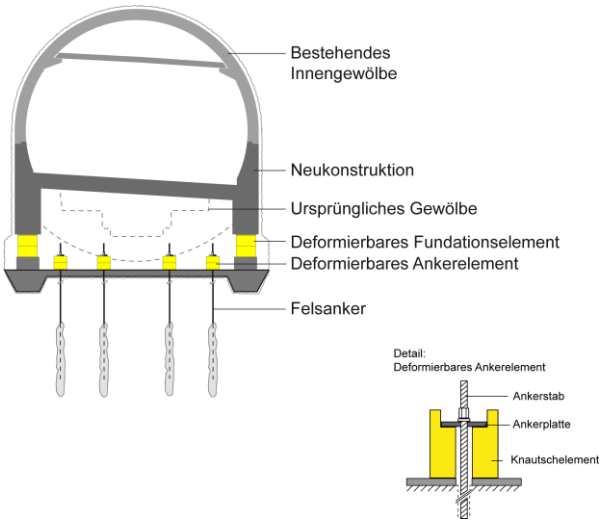

Fig. 4: Chienberg Strassentunnel in stark quellfähigem Gebirge – „Modulares Knautschsystem"

Als der Bau nahezu fertig gestellt war, kam es in zwei unabhängigen Zonen, von 60 bzw. 370 m Länge und einer Überlagerungshöhe von 30 – 40 m, zu Quellhe-

bungen der ganzen Röhre mit bis zu 100 mm. Diese beiden Tunnelabschnitte wurden nach dem Konzept „Modulares Knautschsystem“ (Kovári,Chiaverio; 2007) saniert. Dies sah deformierbare Fundationselemente auf Betonbasis vor, die unter den Paramenten eingebaut werden. Andere deformierbare Betonelemente wurden als verformbare Ankerköpfe für die Rückverankerung der Tunnelsohle vorgesehen (Fig. 4, die gestrichelte Linie zeigt das Originalprofil).
Um dieses Konzept umzusetzen, wurde in der unteren Profilhälfte die bestehende Innenschale etappenweise rückgebaut und das Profil nach unten mit einer flachen Sohle ausgeweitet. Die neu betonierten Paramente wurden auf hiDCon-Elemente (ø 90 cm, H =100cm) und die darunter liegenden Fundamentbalken gegründet. Die eingebauten sogenannten Fundationskörper begrenzen den Quelldruck auf die Innenschale, lassen aber gleichzeitig Hebungen der Sohle in beschränktem Umfang zu.
Das Konzept „Modulares Knautschsystem“ basiert auf der Beschränkung des Quelldruckes beim Zulassen von Sohlhebungen. Figur 5 zeigt die qualitative Beziehung zwischen Sohlhebung u_a und des nötigen Ausbauwiderstandes p_a für quellfähiges Gebirge (Kovári et al, 1998). Das Zulassen von Langzeitverformungen der Sohle durch den Einsatz von verformbaren Bauelementen führt zur Reduktion der Vertikalspannungen p_a.

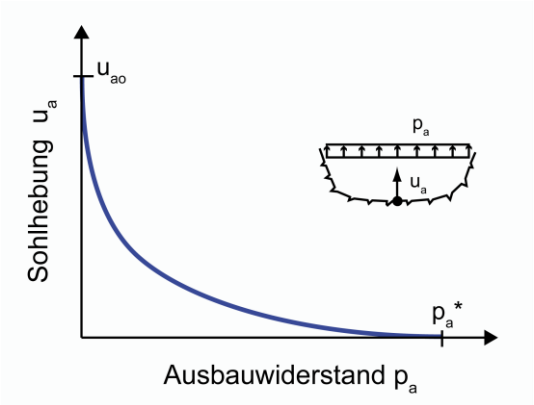

Fig. 5: Charakteristische Kurve für quellfähiges Gebirge

Die im Chienbergtunnel eingebauten Fundationskörper wurden wegen der veränderlichen Überlagerungshöhe entlang der beiden Sanierungsbereiche für 3 unterschiedliche Lastklassen entworfen. Jeder Typ hat definierte minimale und maximale Werte der Traglast zu erfüllen. Der minimale Wert schützt den Tunnel vor Setzungen, der maximale Wert schützt die Schale vor Überbelastung und verhindert weitere Hebungen des Tunnels. Innerhalb der definierten Grenzen können die Elemente je nach Lastklasse etwa 30 – 40 % ihrer ursprünglichen Höhe als Deformationsweg freisetzen.
Das unterschiedliche Tragvermögen der verschiedenen Lasttypen wurde durch Anpassungen in Rezepturen und Bewehrungen gesteuert. Um die unterschiedlichen Typen festzulegen, wurden mehrere Versuche auf einer 20 MN Presse gefahren. Figur 6 zeigt Resultate dieser einaxialen Druckversuche an den zylinderförmigen Fundationskörpern.

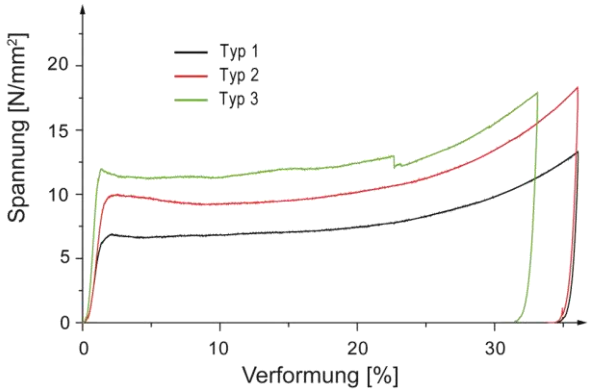

Fig. 6: Einaxiale Druckversuche an Fundationselementen unterschiedlicher Festigkeitsklassen: Foto – Verformung ca. 30 %

Die verformbaren Elemente in der Sohle wurden eingebaut um die Hebungsgeschwindigkeit der Sohle zu vermindern. Das Prinzip der Ankerelemente beruht auf einem Einstanzmechanismus einer Ankerplatte mit kleinerem Durchmesser als dem Durchmesser des Elementes (Siehe auch Detail in Fig. 4). Dieses Prinzip funktioniert auch, falls Imperfektionen der Lasteinleitung auftreten. Figur 7 zeigt ein Versuchsresultat an einem dieser Ankerelemente.

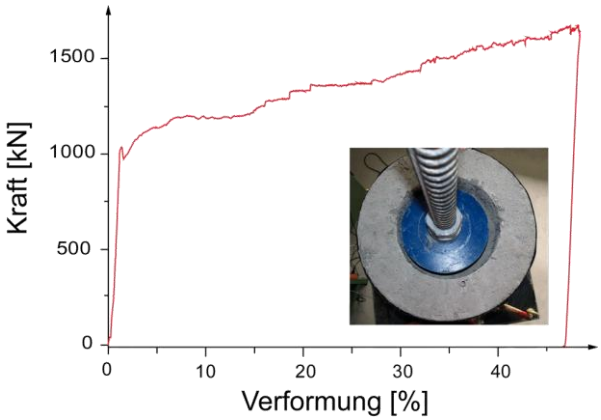

Fig. 7: Einstanzversuche mit einer Ankerzugpresse an einem Ankerelement

Die Fundationselemente im Chienberg Strassentunnel wurden für eine Lebensdauer von 25 Jahren konzipiert. Der Vorteil des „Modularen Knautschsystems“ besteht in der Zugänglichkeit der Knautschzone, um den Bereich zu überwachen und gegebenenfalls einzelne Elemente zu ersetzen, ohne der Verkehr zu beeinträchtigen.

Eine weitere potentielle Anwendung die das Modulare System bietet, ist die Kombination in Fig. 8 mit dem flächenhaften Knautschsystem in der Sohle und Fundationselementen unter den Paramenten, die eine sichere Fundation der Tunnelschale gewährleisten.

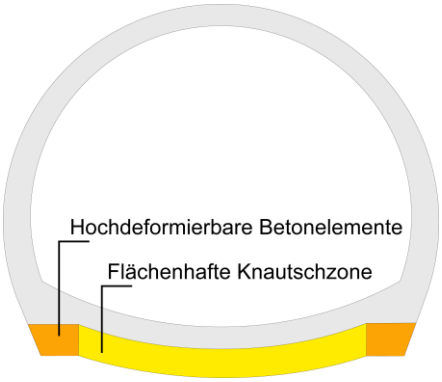

Fig. 8: Kombination von flächenhaftem und modularem Knautschsystem

5. Literatur

Barla, G., Rettighieri, M., Fournier, L., Fava, A., Triclot, J. (2008) Saint Martin Squeeze, Tunnels & Tunnelling, Focus on Europe (May), pp. 15-19

Cantieni, L. and Anagnostou, G.(2009), “The interaction between yielding supports and squeezing ground” Tun-nelling and Underground Space Technology, Vol. 24, No. 3. (May 2009), pp. 309-322

Kovári, K., (1998): „Tunnelling in Squeezing Rock“, Tunnel 5/98, pp. 12-31

Kovári, K., Chiaverio, F. (2007) “ Modulares Knautschsystem für Tunnel in stark quellfähigem Gebirge”, STUVA TAGUNG’07, Forschung + Praxis 42, bau verlag, Gütersloh, pp. 195-200

Kovári, K. (2009) “Design methods with yielding support in squeezing and swelling rocks” World Tunnel Con-gress, May 23 – 28, Budapest, Hungary, Proceedings O-12-04

Mathieu, E. (2008) „At the mercy of the mountain“, Tunnels & Tunnelling, Focus on Europe (October), pp. 21-24

Thut, A., Steiner, P., Stolz, M. (2006) „Tunnelling in Squeezing Rock – Yielding Elements and Face Control“, 8th International Con. on Tunnel Constructions and Underground Structures, Ljubljana, Slovenia, pp. 150-157