

Bestimmung der PSV-Berechnungsformel bei Verwendung von Quarzkörnung als Poliermittel und Granitsplitt als Kontrollgestein

FA 6.093

Forschungsstelle: Technische Universität Darmstadt, Institut für Verkehr, Fachgebiet Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. J. S. Bald)

Bearbeiter: Böhm, S. / Schwebel, N.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Abschluss: Januar 2014

1 Aufgabenstellung

Der PSV (im Folgenden als PSV_{eng} bezeichnet) ist gemäß DIN EN 1097-8 [2009] zu bestimmen. Für die Prüfung ist ein Kontrollgestein aus einer anerkannten Bezugsquelle zu verwenden. Nach DIN EN 1097-8 [2009] ist derzeit die einzig anerkannte Bezugsquelle ein Quarzdoleritvorrat im Transport Research Laboratory (TRL) in England. Die Polierresistenz des englischen Kontrollgesteins hat nach anfänglichen Niveaustreunungen in beiden Richtungen in den letzten Jahren immer mehr nachgelassen [Kallert, 2007], zudem ist das englische Kontrollgestein aufgrund der europaweiten Anwendung des Verfahrens seit 2012 nicht mehr lieferbar [Dunford, 2012]. Um nicht in die unpässliche Lage zu geraten, aufgrund mangelndem englischen Kontrollgestein keine PSV-Prüfungen durchführen zu können, wurde in Deutschland frühzeitig ein Ersatzkontrollgestein gesucht. Nach mehreren Voruntersuchungen (u. a. einem Ringversuch mit 16 Laboratorien [Kallert, 2007]) wurde 2010 der Herrholzer Granit als mögliches PSV-Kontrollgestein in den TP Gestein-StB Teil 5.4.1 festgeschrieben.

Neben den Schwankungen und der fehlenden Verfügbarkeit des englischen Kontrollgesteins verfügt auch das nach DIN EN 1097-8 zu verwendende Poliermittel aus natürlichem Korund über schwankende Poliereigenschaften [Böhm, Riedl, 2005]. Daher wurde in Deutschland auch ein Ersatz für den Korund als Poliermittel gesucht. In Bald et al. [2010] wurde bestätigt, dass Quarzsand und Quarzmehl mit seinen relativ konstanten Eigenschaften sich als Poliermittel eignen.

Auf der Grundlage eines Ringversuchs wurde in Bald et al. [2010] eine Berechnungsformel PSV_{Qnat_alt} (Q = Quarz, nat = nationales Kontrollgestein, alt = Berechnungsformel aus Bald et al. [2010]) entwickelt. Mit ihr sollte es möglich sein, den ursprünglichen Bewertungshintergrund beizubehalten, obgleich die Polierprüfungen mit nationalem Kontrollgestein und Quarz als Poliermittel durchgeführt werden.

Die Anwendung der Formel zeigte, dass Gesteine mit einem niedrigen PSV_{eng} einen etwas höheren PSV_{Qnat} erhalten, während Gesteine mit hohem PSV_{eng} eher einen etwas zu niedrigen PSV_{Qnat} erhalten. Ziel dieses Forschungsprojekts ist es daher, die bestehende Berechnungsformel mittels Polierprüfungen von 25 Prüfgesteinen zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren.

2 Untersuchungsmethodik

Um die Berechnungsformel für nationales Kontrollgestein und Quarz als Poliermittel auf einer breiteren Datenbasis zu überprüfen, mussten zunächst Prüfgesteine ausfindig gemacht werden.

Die Prüfgesteine sollen den PSV_{eng} -Bereich von 30 bis 70 abdecken und ein möglichst breites Spektrum hinsichtlich ihrer Art, Herkunft und mineralogischen Zusammensetzung aufweisen. Parallel zur Gesteinssuche ist das im Projekt verwendete Poliermittel Quarz hinsichtlich seiner Beschaffenheit untersucht worden.

Nachdem Gesteine ausgewählt wurden, konnte mit der eigentlichen Polierprüfung begonnen werden. Bei den Polierprüfungen wurde jeweils englisches und nationales Kontrollgestein verwendet. Jedes Prüfgestein wurde dreimal mit Korund und dreimal mit Quarz unter Beachtung der DIN EN 1097-8 [2009] geprüft. Insgesamt wurden 60 PSV-Räder poliert. Die Messwerte S der Prüfgesteine und der Messwert C der Kontrollgesteine wurden durch den Mittelwert von vier Probekörpern bestimmt.

Im Anschluss an die Polierprüfungen wurden die Ergebnisse analysiert und für die Überprüfung und Bestimmung der PSV_{Qnat} -Berechnungsformel aufbereitet. Hierzu wurden die Ergebnisse u. a. auf Ausreißer getestet.

Um die Veränderung der Gesteinsoberfläche während des Poliervorgangs mit Korund und Quarz analysieren zu können, wurden zusätzlich von einigen Gesteinen vor und nach den Poliervorgängen Aufnahmen mit einem optischen 3D-Messgerät gemacht.

3 Untersuchungsergebnisse

Die relativ konstanten Eigenschaften des Quarzes als Poliermittel konnten in diesem Forschungsprojekt bestätigt werden. Hierzu wurden die Kennwerte des in diesem Projekt verwendeten Poliermittels bestimmt und mit den bekannten Kennwerten des Vorgängerprojekts verglichen.

Es wurden unter den 25 Gesteinen 15 verschiedene Gesteinsarten aus fünf verschiedenen Ländern untersucht. Mit den ausgewählten Prüfgesteinen wurde ein PSV_{eng} -Bereich von 32 bis 66 abgedeckt (Bild 2).

Nach den Polierbeanspruchungen konnten direkt die PSV_{eng} nach DIN EN 1097-8 sowie PSV_{nat} (Polierprüfung mit nationalem Kontrollgestein und Korund als Poliermittel) nach TP Gestein-StB Teil 5.4.1 ermittelt werden. Zusätzlich wurden auch die PSV_{Qnat_alt} (Polierprüfung mit nationalem Kontrollgestein und Quarz als Poliermittel) mit der Berechnungsformel nach Bald et al. [2010] bestimmt.

Die wichtigsten Ergebnisse werden nachfolgend getrennt für den Poliervorgang mit Korund und den Poliervorgang mit Quarz aufgelistet.

Für den Poliervorgang mit Korund konnte festgestellt werden:

Gesteinskörnungen, Ungebundene Bauweisen

- Der Referenzwert ist mit 49,8 (Mittelwert aus 15 Prüfungen mit je vier Probekörpern) um 2,7 Einheiten geringer als nach DIN EN 1097-8 [2009], sowie um 0,9 Einheiten geringer als nach Kallert [2007]. Dies führt zu einem zu hohen PSV_{eng} der Prüfgesteine (Bild 1, Tabelle 1).
- Der Mittelwert des nationalen Kontrollgesteins ist 53,7 (Bild 1, Tabelle 1) (Mittelwert aus 15 Prüfungen mit je 4 Probekörpern). Der Messwert C_{nat} von 54 wird somit bestätigt.

Für den Poliervorgang mit Quarz konnte festgestellt werden:

- Der Mittelwert des englischen Kontrollgesteins beträgt 52,3 (Bild 1, Tabelle 1).
- Der Mittelwert des nationalen Kontrollgesteins beträgt 56,2 und ist damit um 1,7 Einheiten höher als unter Bald et al. [2010] (Bild 1, Tabelle 1).
- Eine Erhöhung der Spannweite der Messwerte durch eine Polierbeanspruchung mit Quarz kann nach Untersuchung von 25 Gesteinen nicht belegt werden. In

Bald et al. [2010] wurde vermutet, dass der Poliervorgang mit Quarz zu einer größeren Spannweite der Messwerte bei verschiedenen Gesteinen führt.

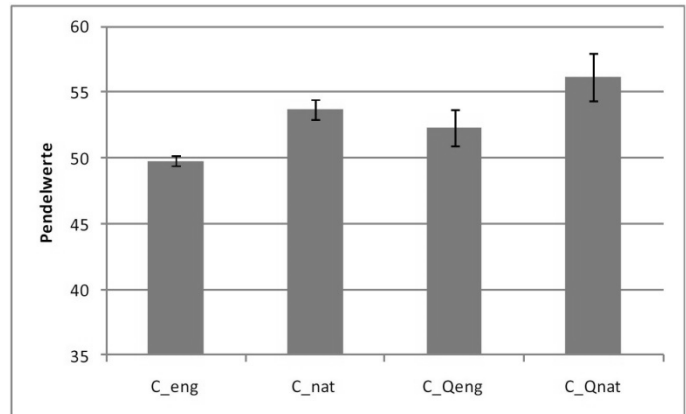


Bild 1: Mittelwerte und Standardabweichung der Messwerte der nationalen (nat) und englischen (eng) Kontrollgesteine unter Berücksichtigung des Poliermittels Quarz (Q) und Korund (K)

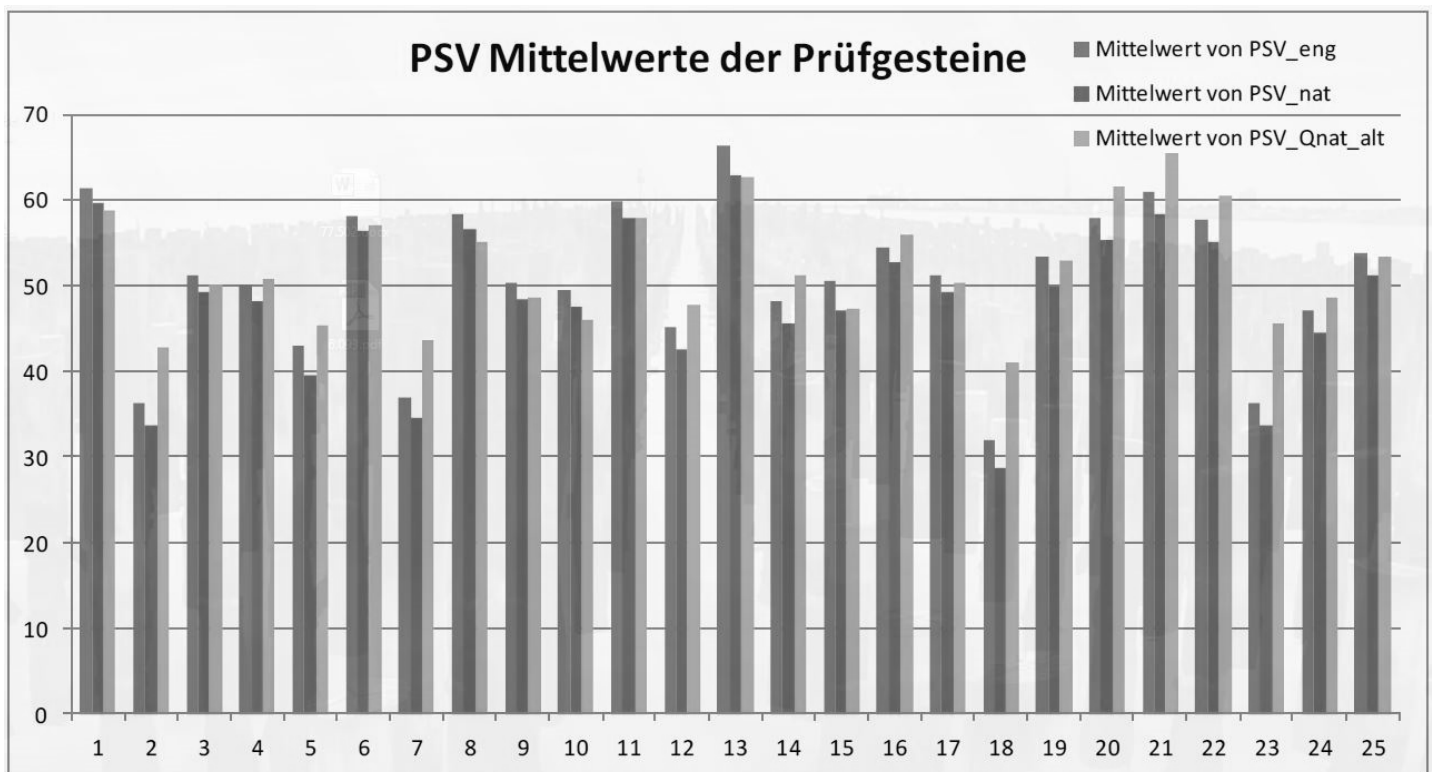


Bild 2: PSV-Mittelwerte der 25 Prüfgesteine aus drei Polierprüfungen

Für die Bestimmung der Berechnungsformel PSV_{Qnat} werden die Messwertdifferenzen ($SD = S_Q - C_{Qnat}$) für jede Prüfung gebildet (auf 0,1 Einheiten gerundet) und der Mittelwert des nationalen Kontrollgesteins (56) hinzuaddiert. Dieses Vorgehen entspricht der üblichen Bestimmung des PSV_{eng} nach DIN EN 1097-8 [2009] ($PSV_{Qnat} = S_Q + 56 - C_{Qnat}$). Die Ergebnisse eines Prüfgesteins werden gemittelt und als Schätzwert für PSV_{Qnat} angenommen.

Trägt man die "wahren Werte" PSV_{eng} über die Schätzwerte PSV_{Qnat} auf, kann mit Hypothesentests bestätigt werden, dass bei der entstehenden Regressionsgerade eine Korrelation der zwei PSV vorhanden ist, sowie dass der Regressionskoeffizient größer Null ist.

Tabelle 1: Kennwerte der Messwerte der nationalen und englischen Kontrollgesteine, poliert mit Quarz und Korund

	C _{eng}	C _{nat}	C _{Qeng}	C _{Qnat}
Mittelwert	49,8	53,7	52,3	56,2
Minimum	48,9	52,3	49,6	53,3
Maximum	50,7	55,3	54,3	58,3
Spannweite	1,8	3	4,7	5
Standardabweichung	0,366	0,708	1,413	1,813

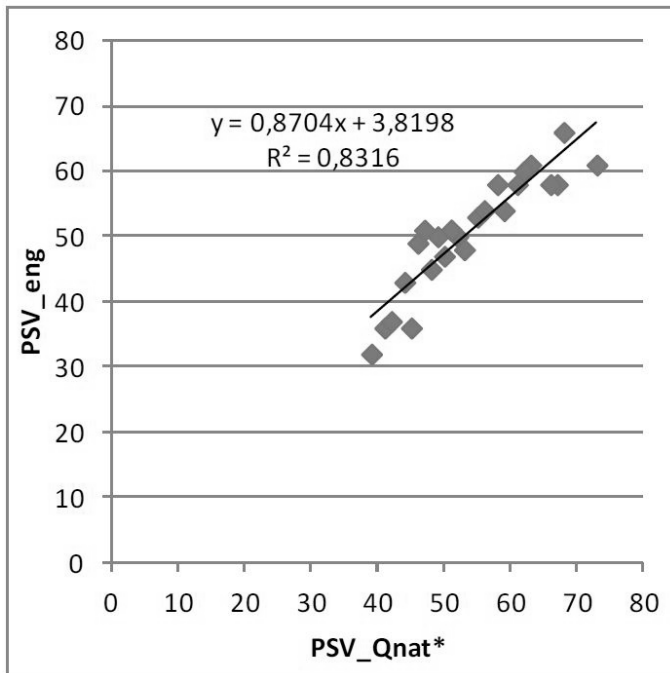


Bild 3: Darstellung des geschätzten mittleren PSV_{Qnat}* über PSV_{eng} mit Angabe der Regressionsgleichung und des Bestimmtheitsmaßes

Die Formel für PSV_{Qnat} wird anhand der 25 Prüfgesteine und der Regressionsgerade aus Bild 3 daher zu

$$PSV_{Qnat} = 0,87 (S + 56 - C_{Qnat}) + 4$$

bestimmt.

Zum Vergleich die in Bald et al. [2010] bestimmte Formel:

$$PSV_{Qnat_alt} = 0,73 * (S + 54,5 - C_{Qnat}) + 14$$

Werden die Prüfgesteine auf die des Ringversuchs unter Bald et al. [2010] reduziert, entsteht nahezu die gleiche Formel (Bild 4):

$$PSV_{Qnat} = 0,73 * (S + 56 - C_{Qnat}) + 13,6$$

Alle Prüfgesteine weisen ein innerhalb der Toleranzen von ± 3 Einheiten abweichenden PSV_{Qnat} zu PSV_{eng} auf.

Es wird deutlich, dass die PSV-Spannweite einen Einfluss auf die PSV_Q-Formeln hat. Reduziert man die Spannweite auf Prüfgesteine auf den üblichen PSV_{eng}-Bereich von 43 bis 59, erhält man die Formel (Bild 5):

$$PSV_{Qnat} = 0,63 * (S + 56 - C_{Qnat}) + 17,8$$

In diesem Bereich wird die Steigung der Regressionsgerade, mit welcher die Formel bestimmt wird, geringer. Dies bedeutet, dass bei Polierungen mit Quarz in diesem Bereich zwischen den Prüfgesteinen deutlicher differenzieren, als bei Berücksichtigung von PSV_{eng} < 43 und > 59.

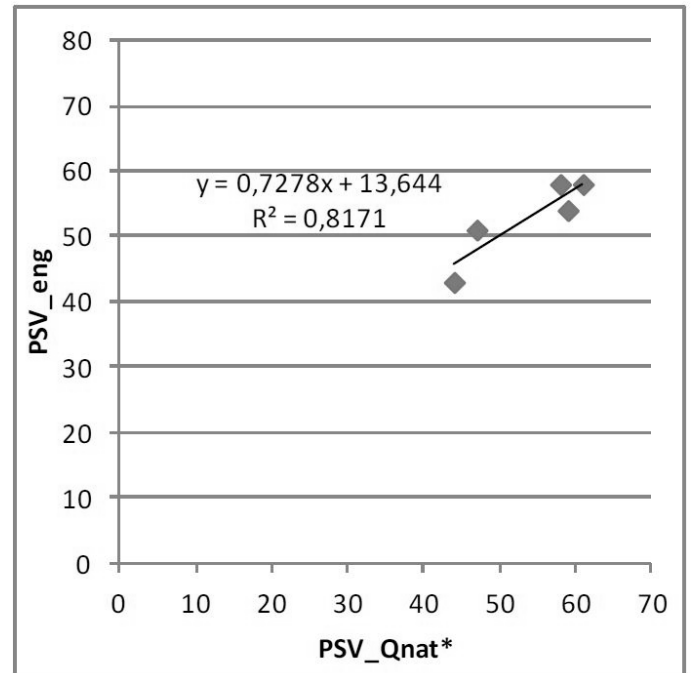


Bild 4: Darstellung des geschätzten mittleren PSV_{Qnat}* über PSV_{eng} mit Angabe der Regressionsgleichung und des Bestimmtheitsmaßes (unter Verwendung der fünf Prüfgesteine aus Bald et al. [2010])

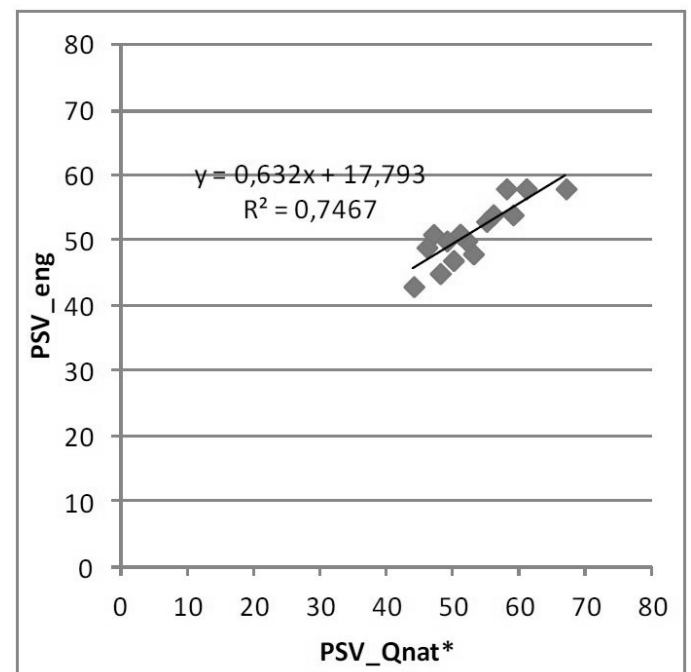


Bild 5: Darstellung des geschätzten mittleren PSV_{Qnat}* über PSV_{eng} mit Angabe der Regressionsgleichung und des Bestimmtheitsmaßes (ohne die Prüfgesteine Nr. 1, 2, 7, 11, 13, 18, 21, 22 und 23)

4 Folgerungen für die Praxis

Da die Anwendung der PSV_{Qnat} -Formel gezeigt hat, dass polierresistente Gesteine zu niedrig und leicht polierbare Gesteine zu hoch bewertet werden, wird die erste Formel als beste Annäherung an den PSV_{eng} betrachtet. Eine ideale Formel, in der die Differenzen von PSV_{eng} zu PSV_{Qnat} aller 25 Prüfgesteine innerhalb der tolerierbaren Grenze von ± 3 Einheiten (Wiederholgenauigkeit der Berechnungsformel nach DIN EN 1097-8 [2009]) liegen, konnte nicht gefunden werden. Die extremen Unterschiede von bis zu 12 Einheiten wurden jedoch auf maximal 7 Einheiten reduziert (Bild 6).

Acht der 25 Gesteine liegen außerhalb der Toleranzgrenze von ± 3 Einheiten, die als Wiederholgenauigkeit in der DIN EN 1097-8 [2009] für das Prüfverfahren mit Korund und englischem Kontrollgestein angegeben wird. Würde man die Toleranzgrenze auf ± 4 Einheiten erweitern, sind fünf Prüfgesteine außerhalb der Toleranz. Gesteine außerhalb der Toleranz sind Sandsteine, Kalksteine und Basalte. Die Vermutung, dass das Poliermittel Quarz quarzreiche Gesteine generell weniger stark poliert als quarzarme Gesteine, konnte nicht bestätigt werden.

Zusätzlich zur Bestimmung der Formel konnte die Wiederholgenauigkeit von PSV_{eng} , PSV_{nat} und PSV_{Qnat} bestimmt werden.

Hierzu wurden die Standardabweichungen der einzelnen Prüfgesteine gebildet und auf Korrelation mit den PSV überprüft. Da laut t-Test nicht von einer Korrelation ausgegangen werden kann, konnte über die Mittelwerte der Standardabweichung unter Wiederholbedingung die Wiederholgenauigkeit r mit W 95 % (3) bestimmt werden (Tabelle 2).

Die Wiederholgenauigkeit beträgt gerundet ± 3 Einheiten für alle Berechnungsformeln.

Die um 0,7 bessere Wiederholgenauigkeit bei PSV_{Qnat_alt} ist durch die geringere Steigung zu erklären.

Die Verwendung von Quarz als Poliermittel hat somit die Präzision des Verfahrens nicht verbessert. Aufgrund der größeren Gleichmäßigkeit und Verfügbarkeit war eine Verwendung bisher empfohlen worden (Bald et al. [2010]). Die nunmehr breitere Untersuchung mit einer deutlich höheren Anzahl an Prüfgesteinen relativiert diese Empfehlung aufgrund der Ergebnisse bei hohen und niedrigen PSV. Solange daher nicht geklärt ist, warum eine befriedigende Korrektur solcher Ergebnisse nicht gelingt, sollte die Prüfung vorläufig mit Herrenholzer Granit und Korund weitergeführt werden. Mit diesem Forschungsprojekt wurde dennoch eine Rückfallebene für den Fall geschaffen, dass kein Korund mehr lieferbar ist. Weitere petrografische und mineralogische Untersuchungen zur Ermittlung einer späteren Verwendbarkeit können erwogen werden.

Tabelle 2: Wiederholpräzision der verschiedenen PSV-Formeln

	s_r	Wiederholgenauigkeit $r = 3,31 * s_r$	berechnet aus X Prüfgesteinen
PSV_{eng}	0,892	3,0	23 (ohne Nr. 2 und 7)
PSV_{nat}	0,970	3,2	23 (ohne Nr. 2 und 7)
PSV_{Qnat_alt}	0,792	2,6	20 (ohne Nr. 6, 17, 18, 21 und 23)
PSV_{Qnat}	1,005	3,3	20 (ohne Nr. 6, 17, 18, 21 und 23)

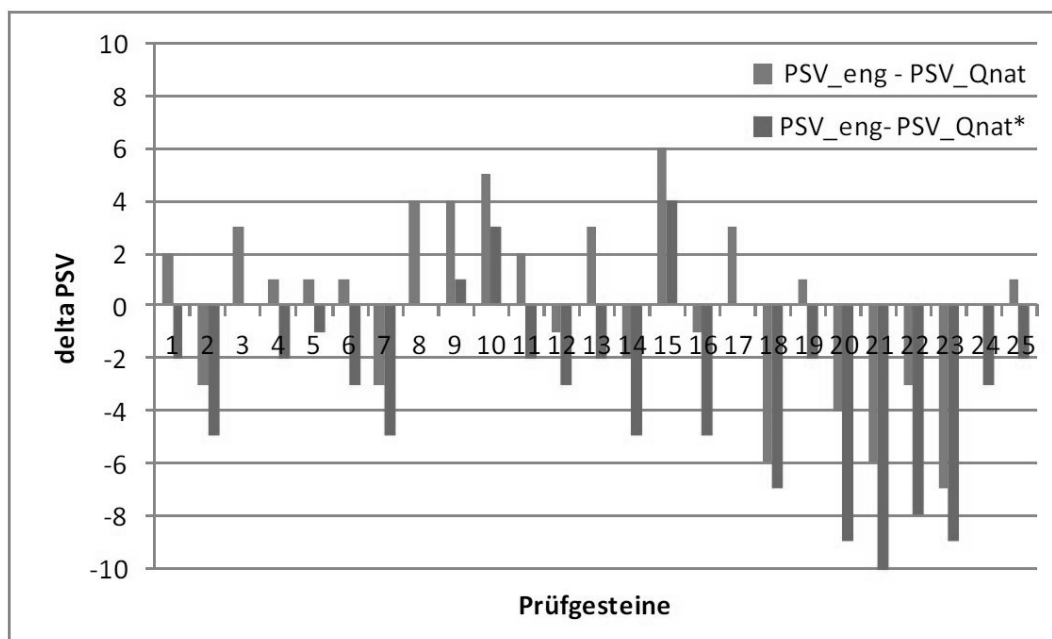


Bild 6: Differenzen der 25 Prüfgesteine von PSV_{eng} zu PSV_{Qnat}^* (Schätzwert) und von PSV_{eng} zu PSV_{Qnat} (mit der Korrekturformel)