

# Integrales Talsperrenmodell zur Gesamtbewertung von Gewölbemauergeometrien

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) an der Fakultät für Bauingenieur- und  
Vermessungswesen an der Universität der Bundeswehr München.

Vorgelegt von:

Alexsandro Holzner

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Keuser, Universität der Bundeswehr  
Zweitgutachter: Prof. Dr. techn. H. Linsbauer, TU Wien

## **Angaben in den Pflichtexemplaren der Dissertation**

Universität der Bundeswehr München

Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema der Dissertation:      Integrales Talsperrenmodell zur Gesamtbewertung  
von Gewölbemauergeometrien

Verfasser:                      Alessandro Holzner

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:                Prof. Dr.-Ing. F.W. Günthert

1. Berichterstatter:        Prof. Dr.-Ing. M. Keuser

2. Berichterstatter:        Prof. Dr. techn. H. Linsbauer

Tag der Prüfung:              15.07.2011

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)

Neubiberg, den 15.07.2011

## Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den grundlegenden Randbedingungen bei der Formgebung von Gewölbemauern. Ausgehend von einer historischen Analyse der Entwicklung der Bogenstaumauer wird eine Zusammenfassung der Entstehungsgeschichte dieser Sperrbauwerke betrachtet. Mittels genauer Analyse der modernen Talsperrenformen, welche sich ursprünglich aus Kreisbögen, hinzu Ellipsen, Hyperbeln und Parabeln entwickelt haben, wird ein Zustandsbild der aktuellen Talsperrenplanung dargestellt.

Eine kurze Erläuterung der für die Talsperrenstatik maßgebenden Lastfälle und Randbedingungen stellt den Einstieg in die theoretische Thematik der Talsperrenanalyse dar. Ausgehend von den Regellastfällen für den Vorentwurf werden auch weiterführende Belastungsarten behandelt.

Im Weiteren werden die Grundgeometrieformen, wie Parabel und Hyperbel in ihrer Definition und Anwendung mathematisch dargestellt. Aus den einzelnen Geometrieformen wird anschließend ein einheitliches Geometriemodell erstellt. Dieses Modell dient der Grundlage für die durchgeführten Analysen. Es wird durch eine möglichst simple und robuste Art der Formdefinition ein Grundstein für die spätere eingehende Betrachtung der geometrischen Abhängigkeiten gelegt.

Um Rückschlüsse auf die Eignung einer Talsperrenform ziehen zu können, wird das Geometriemodell mit einem Berechnungs- und Auswertemodell kombiniert. Die damit erreichte volle Parametrisierung eines kompletten Talsperrenmodells ermöglicht eine genaue Analyse von Geometrievariationen, und die damit einhergehende Beurteilung von Änderungen in der Spannungssituation und Standsicherheit.

Am Beispiel der in Österreich errichteten 200m hohen Gewölbemauer Kölnbrein (Maltatal) wird die praktische Anwendung der Sensitivitätsanalyse und Parameterstudie demonstriert. Die Sperre Kölnbrein wird geometrisch erfasst und anschließend einer statischen Berechnung unterzogen. Aufbauend auf diese statische Berechnung werden Parametervariationen der Geometrie durchgeführt, und daraus eine Sensitivitätsanalyse erstellt.

Eine multidimensionale Bewertung der Analyseergebnisse, sowohl in Bezug auf Spannungen, als auch in Hinblick auf Sicherheiten und Volumen, ermöglicht Aussagen zur errichteten Geometrie. Eine Anpassung der ursprünglichen Talsperrenform, anhand von Ergebnissen der durchgeführten Bewertung, rundet den praktischen Teil der Arbeit ab.

## Vorwort und Dank

Diese Arbeit entstand aus dem Wunsch eine Gewölbemauer mit möglichst geringem Aufwand baupraktisch handhabbar darzustellen und zu entwerfen. Während meiner Tätigkeit bei Verbundplan GmbH in Salzburg wurden von mir viele Standsicherheitsberechnungen von großen Talsperren durchgeführt. Dazu zählten z.B. die Kölnbreinsperre (H=200m), Sperre Schlegeis (H=130m), die Möllsperre und die Magaritzensperre. Allen gemeinsam ist der Eigentümer Verbund Austrian Hydro Power AG (AHP). Der große Vorteil dieser Gegebenheit war, dass von einem Berechnungsprojekt zum anderen das Wissen und die Fertigkeiten entsprechend erweitert und verfeinert werden konnten.

Ab einem gewissen Punkt entstand das Verlangen, die sehr zeitintensiven Bereiche dieser Tätigkeit arbeitstechnisch zu vereinfachen. Im Detail ging es um die Geometriedefinition, die Erstellung des Berechnungsnetzes und die anschließende Auswertung und Darstellung der Finiten Elemente Ergebnisse. Die frei gewordenen Ressourcen sollten für Adaptionen der Geometrie, Parameterstudien und Entwurfsanpassungen verwendet werden. Die Idee eines integralen voll parametrisierten Talsperrenmodells war geboren, und wurde in den darauf folgenden 10 Jahren entwickelt, umgesetzt und stetig erweitert.

Die vorliegende Arbeit stellt einen Auszug der Möglichkeiten einer vollparametrisierten Geometriedefinition dar, und ist keinesfalls als vollständig oder umfassend zu beschreiben. Vielmehr handelt es sich um einen kleinen Aspekt der Möglichkeiten, fokussiert auf die Geometriemodellierung, Berechnung, Sensitivitätsanalyse und ein multidimensionales Bewertungsmodell für eine Gewölbemauer.

Ich danke herzlichst meinem Betreuer und Unterstützer dieser Arbeit Hr. Prof. Dr. Manfred Keuser (Universität der Bundeswehr, Neubiberg) für die außerordentlich tatkräftige Unterstützung und die vielfach eingesetzten Mühen.

Ich danke Hr. Prof. Dr. Herbert Linsbauer (TU Wien) für die fachlichen Anregungen und die Ausfertigung der Zweitbegutachtung.

Ich danke Hr. Dr. Reinhard Promper (Verbund AHP i.R.) und Hr. Dr. Pius Oberhuber (Verbund AHP) für die fachlichen Diskussionen und die Begleitung über knapp ein Jahrzehnt hinweg.

Ich danke meiner liebevollen Ehefrau Elisabeth für die unendliche Geduld, mich in diesem Vorhaben unablässig zu unterstützen.

Salzburg, 28. Februar, 2011

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>i</b>
<b>Vorwort und Dank .....</b>	<b>ii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise.....	2
<b>2 Historie.....</b>	<b>3</b>
2.1 Altertum.....	3
2.2 Römisches Imperium.....	4
2.3 Arabische Welt.....	5
2.4 Mittelalter .....	7
2.5 Neuzeit.....	10
2.6 Österreichische Talsperren .....	14
<b>3 Formgebung.....</b>	<b>16</b>
3.1 Geometrische Formen.....	16
3.1.1 Gerade.....	16
3.1.2 Kurven zweiter Ordnung.....	16
3.2 Geometriekonzept.....	19
3.2.1 Kegelschnitte.....	20
3.2.2 Geometrieabbildung .....	22
3.2.3 Österreichische Talsperren .....	24
3.3 Vorentwurf.....	39
3.4 Prototypsperre.....	42
<b>4 Grundlagen der Talsperrenstatik.....</b>	<b>47</b>
4.1 Wasserdruck .....	48
4.2 Lagerungsbedingungen.....	48
4.3 Kämpferkräfte.....	48
4.4 Fugen und Reibung.....	49
4.4.1 Sperrenaufstandsfuge, Basisfuge.....	49
4.4.2 Blockfugen .....	51
4.5 Auftrieb.....	52
4.6 Blockfugeninjektion .....	53
4.7 Grundsätzliche Sicherheitsüberlegungen .....	53
<b>5 Integrales Talsperrenmodell .....</b>	<b>56</b>
5.1 Konzept und Aufbau.....	57
5.2 Formgebung.....	58
5.2.1 Geometrie .....	58
5.2.2 Geländemodell.....	59
5.2.3 Stauraum .....	60
5.2.4 Blockfugen .....	60
5.2.5 Vorentwurf.....	62
5.3 Numerische Analyse .....	63
5.3.1 Pre-Processing.....	63
5.3.2 Berechnung.....	63
5.3.3 Post-Processing .....	64

5.4	Bewertung .....	65
5.5	Ausführung .....	66
5.6	Externe Schnittstellen .....	66
5.7	Zusammenfassung .....	66
<b>6</b>	<b>Parameteridentifikation .....</b>	<b>67</b>
6.1	Grundlagen der Sensitivitätsanalyse .....	68
6.1.1	Prinzipielles Schema .....	68
6.1.2	Berechnungsmethodik .....	69
6.2	Modell zur Parameterstudie .....	70
6.2.1	Berechnungsnetz .....	70
6.2.2	Materialkennwerte .....	71
6.2.3	Belastungen .....	71
6.3	Modellstatik und Parametervariationen .....	72
6.4	Darstellung der Sensitivitäten .....	74
6.5	Schlussfolgerung .....	76
<b>7</b>	<b>Bewertung .....</b>	<b>77</b>
7.1	Grundlagen der Optimierung .....	77
7.2	Optimierungsverfahren .....	77
7.3	Optimierungsmodell Gewölbemauer .....	78
7.4	Konkurrierende Zielsetzungen .....	81
7.5	Rechentchnische Umsetzung der Bewertung .....	81
7.6	Kontrollbereiche .....	82
7.7	Bewertungsfunktionen .....	83
7.7.1	Spannungen .....	83
7.7.2	Verformungen .....	85
7.7.3	Standsicherheit .....	87
7.7.4	Volumen .....	89
7.8	Auswahl der Bewertungsparameter .....	91
7.9	Visualisierung der Bewertungen .....	91
7.10	Resümee .....	95
<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiel Kölnbreinsperre .....</b>	<b>96</b>
8.1	Bauwerksgeschichte .....	96
8.2	Modell, Netz, Berechnung .....	97
8.3	Bewertung der Ausgangsgeometrie .....	100
8.4	Parameteridentifikation .....	102
8.5	Geometrievariationen .....	102
8.6	Schlussfolgerung .....	105
8.7	Geometrieanpassung .....	106
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>110</b>
<b>10</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>113</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sadd-el-Kafara Damm, aus [schni1], Foto von H. Fahlbusch .....	3
Abbildung 2: Monte Novo, Grundriss und Querschnitt, nach [quint2] .....	5
Abbildung 3: Kebar Talsperre, Schnitt und Grundriss, aus [schni1] .....	6
Abbildung 4: Kebar Talsperre, Foto Luftseite, aus [gobl1] .....	6
Abbildung 5: Kurit Talsperre, Foto Wasserseite, aus [schnitt1], Foto R. Carlin .....	7
Abbildung 6: Almansa Talsperre, Foto Luftseite, aus [schni1] .....	8
Abbildung 7: Vergleiche Almansa, Tibi und Elche, aus [schn11] .....	8
Abbildung 8: Talsperre Elche, Ansicht Reservoir, aus [schni1] .....	9
Abbildung 9: Ponte Alto Sperre, Schnitte und Grundrisse, aus [smit1] .....	9
Abbildung 10: Zola Talsperre, Foto Wasserseite, aus [schni1] .....	10
Abbildung 11: Salmon Creek Talsperre, Grundriss und Schnitt, aus [creag1] .....	11
Abbildung 12: Talsperre Montsalvens, Foto Luftseite, aus [schni1] .....	12
Abbildung 13: Talsperre Montsalvens, Grundriss und Schnitt, aus [mart1] .....	12
Abbildung 14: Talsperre Osiglietta, Grundriss und Schnitt, aus [schni1] .....	13
Abbildung 15: Talsperre Tolla, Talsperre Le Gage, Querschnitte, aus [smit1] .....	14
Abbildung 16: Bogenstaumauern in Österreich, Querschnitte, aus [drob1] .....	15
Abbildung 17: Bogenstaumauern in Österreich, Längenschnitte, aus [drob1] .....	15
Abbildung 18: Schnittebenen Kreiskegel, Kegelschnitte, aus [erla1] .....	17
Abbildung 19: Übersicht numerische Exzentrizität, nach [grei1] .....	19
Abbildung 20: Kegelschnittparameter, Bogen, aus [prom1] .....	21
Abbildung 21: Abbildung in R3 der Talsperre, Sperrengeometrie, aus [prisc1] .....	23
Abbildung 22: Parameter Scheitelabrückung $Y_s$ .....	25
Abbildung 23: Mittelschnitt, aus Scheitelabrückung und Scheitelstärke .....	26
Abbildung 24: Scheitelstärke $D_s$ , Kämpferstärke $D_k$ , Kämpferverstärkung .....	27
Abbildung 25: Bogenradius $R_s$ .....	27
Abbildung 26: Numerische Exzentrizität $e^2$ .....	28
Abbildung 27: Ende des Kämpfers $X_k$ , Ende des Scheitelbereiches $X_s$ = Beginn der Verstärkung .....	29
Abbildung 28: Zillergründl, Grundriss, Bögen .....	30
Abbildung 29: Zillergründl, Regelquerschnitte .....	30
Abbildung 30: Zillergründl, Parameterübersicht .....	31
Abbildung 31: Kölnbrein, Grundriss, Bögen .....	33
Abbildung 32: Kölnbrein, Schnitte .....	33
Abbildung 33: typischer Bereich der Kämpferverstärkung, Horizont $z=75m$ .....	34
Abbildung 34: Kölnbrein, Parameterübersicht .....	35
Abbildung 35: Schlegeis, Grundriss, Bögen .....	37
Abbildung 36: Schlegeis, Schnitte .....	37
Abbildung 37: Schlegeis, Parameterübersicht .....	38
Abbildung 38: Charakteristische Werte, Talform, aus [usace1] .....	39
Abbildung 39: Querschnittswerte, Vorentwurf, aus [usace1] .....	40
Abbildung 40: Stabilität Kämpfer, aus [iida1] .....	41
Abbildung 41: Vergleich der Volumina, Damm/Gewichtsmauer/Gewölbemauer, Prototyp .....	43
Abbildung 42: Vorentwurf nach USBR, Horizontalbögen, keine Verstärkung .....	44
Abbildung 43: Vorentwurf dieser Arbeit, Horizontalbögen, mit Verstärkung, Prototyp .....	44
Abbildung 44: Vorentwurf nach Usbr, Regelquerschnitte .....	45
Abbildung 45: Vorentwurf dieser Arbeit, Regelquerschnitte, Prototyp .....	45
Abbildung 46: Entwurfswerte nach USBR .....	46
Abbildung 47: Entwurfswerte dieser Arbeit, Prototyp .....	46
Abbildung 48: Typische Lastfälle in der Talsperrenberechnung, statisch .....	47

Abbildung 49: Blockweise Aufstandsfläche, Blockaufstandskräfte, lokale Dreibeine.....	49
Abbildung 50: Überlagerung, Eigengewicht+Wasserlast, verformt+unverformt.....	50
Abbildung 51: Kontaktschnittgrößen, Öffnungen, exemplarisch, Zugausschluss .....	51
Abbildung 52: Stark vereinfachtes Schema einer blockweisen Errichtung einer Talsperre ...	52
Abbildung 53: Definition Sicherheiten, nach [wid1] .....	54
Abbildung 54: Standsicherheit, Betrachtungsarten Wasserlast, nach [rocha1] .....	55
Abbildung 55: Geometrieparametrisierung, Hierarchie, aus [choi1] .....	56
Abbildung 56: Geometrieparametrisierung, exemplarisch Gewölbemauer.....	57
Abbildung 57: Geometriemodell, zentrale Bedeutung und Anbindung .....	57
Abbildung 58: Kernmodelle "LX-DAM", Überblick Talsperrenkonzept.....	58
Abbildung 59: Untergrundkörper, Definition, exemplarisch, Prototyp .....	59
Abbildung 60: Blockfugendefinition, Variante oberflächennormal .....	61
Abbildung 61: Blockfugendefinition, Variante ebener Schnitt.....	61
Abbildung 62: Vorentwurfsmodul, Systemvergleiche, Variation Bogenradius $R_s$ +/- 15%....	62
Abbildung 63: Flussdiagramm, numerische Analyse, LX-DAM .....	63
Abbildung 64: Vektorplot, Hauptspannungen, Einheit [N/mm <sup>2</sup> ] .....	65
Abbildung 65: Bewertungsmodell, gekoppelte Bereiche .....	65
Abbildung 66: Sperre Zillergründl, Sperrenmodell und Belastungsgestänge, aus [prom1] ....	67
Abbildung 67: Abfolge der Bewertung und Optimierung, nach [choi1] .....	69
Abbildung 68: Vorwärtsdifferenzen, Einfluss der Schrittweite, [choi1].....	70
Abbildung 69: Berechnungsmodell, Netz, Prototyp-Talsperre.....	71
Abbildung 70: Spannungsbild, Bogenspannungen, Vollstau, Prototyp.....	72
Abbildung 71: Spannungsbild, Vertikalspannungen, Vollstau, Prototyp .....	73
Abbildung 72: Verformungsbild, Radialverformung, Prototyp.....	73
Abbildung 73: Sensitivität, Prototyp, Bogenspannung, "relativ", $R_s$ +/- 7%.....	75
Abbildung 74: Sensitivität, Prototyp, Bogenspannung, "absolut", $R_s$ +/- 7%.....	76
Abbildung 75: Struktureller Entwurfsprozess .....	80
Abbildung 76: Bewertungen, Anordnung der Kontrollbereiche, Ansicht Sperre.....	82
Abbildung 77: Bewertungsschema, Spannungen .....	85
Abbildung 78: Bewertungsschema, Radialverformungen.....	86
Abbildung 79: Radialverformungen in Abhängigkeit der Bogensteifigkeiten.....	86
Abbildung 80: Zuordnung der Betrachtungsbereiche für die Gleitsicherheiten .....	88
Abbildung 81: Bewertungsschema, Gleitsicherheiten .....	88
Abbildung 82: Bewertungsschema, Vergleichsvolumen.....	90
Abbildung 83: Ergebnisgrößen, Übersichtsdarstellung .....	91
Abbildung 84: Übersicht der Bewertungsgrößen, exemplarisch, Prototyp.....	92
Abbildung 85: Resultat der Bewertung, exemplarisches Ergebnis, Prototypalsperre .....	93
Abbildung 86: Gesamtbewertung, exemplarisches Ergebnis, Prototypalsperre .....	93
Abbildung 87: Vergleich Einzelbewertungen, Variation Bogenradius um 7%.....	94
Abbildung 88: Gesamtbewertung, Vergleich der Geometrievariationen, Prototypsperre .....	95
Abbildung 89: Kölnbrein, Mittelschnitt samt Stützgewölbe, aus [ödk1].....	97
Abbildung 90: Berechnungsnetz, Bewertung, Kölnbrein .....	98
Abbildung 91: Vertikalspannung, Mittelschnitt, Kölnbrein.....	99
Abbildung 92: Bogenspannung, Mittelschnitt, Kölnbrein .....	99
Abbildung 93: Bewertung, Kölnbrein, Ausgangsgeometrie .....	100
Abbildung 94: Einzelbewertung, Kölnbrein, Ausgangsgeometrie .....	101
Abbildung 95: Gesamtbewertung, Kölnbrein, Ausgangsgeometrie .....	101
Abbildung 96: Sensitivität, Bogenspannung, Variation Bogenradius $R_s$ , +/- 7%.....	102
Abbildung 97: Gegenüberstellung der Bewertungen.....	103
Abbildung 98: Gesamtbewertung, Ergebnis der Parametervariationen.....	104

Abbildung 99: Gesamtbewertungen, Ergebnis der Parametervariationen, Details .....	105
Abbildung 100: Geometriedaten, Kölnbrein modifiziert .....	106
Abbildung 101: Bewertung, Kölnbrein modifiziert.....	107
Abbildung 102: Vergleichsbewertung, Ausgangsgeometrie Vs. modifizierte Geometrie.....	107
Abbildung 103: Vergleich der Gesamtbewertungen, Kölnbrein orig. zu modif.....	108
Abbildung 104: Gesamtbewertung, Kölnbrein orig. zu modifiziert .....	109

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich Almansa, Tibi und Elche Talsperre.....	8
Tabelle 2: Klassifizierung, Kurven zweiter Ordnung.....	17
Tabelle 3: Klassifizierung, numerische Exzentrizität, Kurven zweiter Ordnung .....	18
Tabelle 4: Zillergründl, Einreichgeometrie.....	24
Tabelle 5: Kölnbrein, Einreichgeometrie .....	32
Tabelle 6: Schlegeis, Einreichgeometrie.....	36
Tabelle 7: Anforderungen an externen Berechnungskern („Solver“) .....	64
Tabelle 8: Materialkennwerte, Talsperre, Prototyp.....	71
Tabelle 9: Haupt- und Nebenbedingungen, Optimierung .....	79

## Formelverzeichnis

Formel 1: Parallelkoordination, Gerade .....	16
Formel 2: Achsenabschnittsform, Gerade.....	16
Formel 3: Grundgleichung, Kurven zweiter Ordnung .....	16
Formel 4: Matrixschreibweise, Kurven zweiter Ordnung .....	17
Formel 5: Scheitelgleichung, Kegelschnitte .....	18
Formel 6: Scheitelgleichung, numerische Exzentrizität, Kegelschnitte.....	18
Formel 7: allgemeiner Kegelschnitt, Grundfunktion .....	20
Formel 8: Sperrenbogen auf Höhe z, Grundprinzip, nach [prom1].....	21
Formel 9: Kronenbogenradius, nach [usace1] .....	40
Formel 10: Abschätzung Volumen, nach [usace1].....	40
Formel 11: Ringformel, nach [lins1] .....	40
Formel 12: Finite Differenzen Methode, Vorwärtsdifferenzen .....	69
Formel 13: Finite Differenzen Methode, Zentraldifferenzen .....	69
Formel 14: Zulässige Spannungen.....	83
Formel 15: Zulässige Ausnutzungsgrade.....	83
Formel 16: Gleitsicherheit.....	87
Formel 17: Gesamtkosten, Zusammensetzung .....	89

## 1 Einleitung

Talsperren zählen zu den bemerkenswertesten Bauwerken seit Menschen Gedenken. Bereits die ersten aufgezeichneten antiken Kulturen versuchten sich die Eigenschaften des Wassers zu Nutze zu machen, indem sie künstliche Staubecken anlegten und die Reservoirs bewirtschafteten. Die Beweggründe für diese aufwändigen Unterfangungen reichten von Bewässerungszwecken, über Retentionsbecken zum Hochwasserschutz hin zu Trinkwasserversorgungen. Mit dem weiteren Fortschritt der technischen Entwicklung fiel auch die Gewinnung von Strom mithilfe des gespeicherten Wasservolumens in den Vordergrund.

Die Sperrenbauwerke, welche primäre baukonstruktive Bestandteile eines komplexen Aufstauvorhabens sind, werden in Dämme und Mauern unterschieden. Dämme werden aus Losematerial geschüttet und mit erdbautechnischen Maschinen verdichtet. Sie bilden meist eine zur Wasser- und Luftseite dreiecksförmige Querschnittsform mit breiter Aufstandsfläche, die Lastabtragung ist rein über Gewichtswirkung bedingt, die Hauptabmessungen des Querschnittes richten sich primär nach dem inneren Reibungswinkel des verwendeten Schüttmaterials.

Mauern können in Gewichtsmauern und Gewölbemauern unterschieden werden. Bei den Gewichtsmauern steht die Standsicherheit der Talsperre primär über Eigengewicht und einer möglicherweise teilweise klaffenden Aufstandsfuge im Vordergrund. Auch hier ist der Querschnitt der Sperre geprägt von einer meist vertikalen Wasserseite und einer geneigten Luftseite.

Bei den Gewölbemauern handelt es sich um Zylinder- bzw. Schalentragerwerke, welche durch eine anspruchsvolle Formgebung eine räumliche Lastabtragung der Wasserlast über Gewölbewirkung erzielen. Die Aufstandsfläche einer Gewölbesperre ist meist von geringem Ausmaß im Vergleich zu ähnlich hohen Dämmen und Gewichtsmauern.

### 1.1 Problemstellung

Der Entwurf und die Berechnung von Gewölbemauern ist in der Regel ein sehr zeit- und Know-How intensiver Prozess. Da die Geometrie und die Form jeder einzelnen Sperre ein Unikat darstellt, werden sehr viele Ressourcen in die Findung eines für die jeweiligen Randbedingungen und maßgebenden Kriterien optimalen Entwurfes investiert.

Die statische Bearbeitung eines Gewölbesperrenprojektes ist ein hochkomplexes Vorhaben, welches von den verschiedensten Fragestellungen und Randbedingungen beeinflusst wird. Angefangen von der Formfindung, über die Berechnungsdurchführung, bis hin zu Detailfragen im Bauablauf und der Hydrationswärmeentwicklung bzw. Betonkühlung, werden umfangreiche Anforderungen an den Planer gestellt.

Ein großer Teil der Ressourcen ist in der Handhabung der arbeitsintensiven Berechnungsmodelle gebunden. Sowohl eine praktische Handhabung der Geometrie, als auch eine zeiteffiziente und möglichst automatisch durchführbare Berechnung, sind die Hauptansatzpunkte zur Reduktion des hohen erforderlichen Zeitbedarfes im Entwurfsprozess. Die Anwendung einer rein analytischen Definition der Geometrieform führt zu einer nicht anpassbaren „Blackbox“-Lösung, weil die Möglichkeiten zur Anpassung stark eingeschränkt werden. Die aus der Berechnung ermittelten Ergebnisgrößen, wie z.B. Spannungen, Verformungen und Gleitsicherheiten, stellen große Anforderungen an die korrekte Auswahl und Berücksichtigung in der Entwurfs- und Standsicherheitsbewertung.

Es existiert kein baupraktisches Modell, um in einer einzigen Darstellung bzw. mithilfe einer einzigen Zahl einen kompletten Talsperrenentwurf zu bewerten. Die Eignung der jeweiligen

Geometrie ist damit abhängig von subjektiven Festlegungen und folgt keinem genau definierten Bewertungsschema.

## 1.2 Zielsetzung

Basierend auf wissenschaftlichen Grundlagen soll dem entwerfenden Ingenieur ein Modell bereitgestellt werden, die umfangreichen Ergebnisse der Gewölbesperrenberechnung in verschiedenen Aspekten objektiv zu bewerten.

Dafür soll ein nachvollziehbares Bewertungsmodell für eine Gewölbesperrengeometrie entwickelt werden. Dieses soll neben einem voll parametrisierten Geometriemodell auch Anbindungsmöglichkeiten an ein Berechnungsmodell bereitstellen. Um die Auswirkungen von Änderungen an Geometrieparametern darstellen zu können, sollen Sensitivitätsanalysen ermöglicht werden. Die jeweiligen Ergebnisse sollen möglichst einfach mittels einer einzigen Zahl zur Gesamtbewertung herangezogen werden. Zusätzlich soll mittels einer einzigen Abbildung ein charakterisierendes Bewertungsbild der Talsperre ermöglicht werden.

Mittels dieses integralen Bewertungsmodells, welches verschiedene Parameterdimensionen in eine daraus ermittelbare Gesamtbewertung zusammenfasst, soll ein einheitlicher Entwurfsprozess und eine durchgängig objektive Systemcharakterisierung durchgeführt werden.

## 1.3 Vorgehensweise

In den nachfolgenden Kapiteln werden Schritt für Schritt die Historie und die Formentwicklung erläutert. Begleitend von den maßgebenden Ansatzpunkten der Talsperrenstatik wird ein Geometriemodell entwickelt. Durch die volle Parametrisierung dieses Geometriemodells werden effiziente Möglichkeiten geschaffen, „Was-wäre-Wenn“-Situationen und umfangreiche Anpassungen an der Formgebung einfach und rasch durchzuführen.

Durch Erweiterung dieser parametrisierten Talsperre um ein Berechnungsmodell werden Sensitivitätsanalysen und Variationsstudien ermöglicht, d.h. es können Geometrieparameter geändert werden und die Auswirkungen dieser Änderungen dargestellt werden. Diese Variantenstudien sind Grundvoraussetzungen für eine zusammenfassende Bewertungslogik, welche die Situation von Sperre, Fels, Interaktionen und Volumen übersichtlich in einer einzigen Abbildung darstellt.

Die große Anzahl der durch die Variantenstudien entstehenden Ergebnisgrößen soll mittels eines integralen Bewertungsmodells auf eine Auswahl von maßgebenden Kennwerten reduziert werden. Diese Gesamtbewertung soll eine kennzeichnende Größe zur „Brauchbarkeit“ des Gewölbesperrenentwurfes geben.

Um das in dieser Arbeit entwickelte Werkzeug eines integralen Talsperrenmodells, und den damit einhergehenden Entwurfsmöglichkeiten „Sensitivität“ und „Bewertung“, entsprechend anwenden zu können, ist ein gutes Verständnis der inneren Wirkungsweisen der Gewölbemauern, sowie der zugrunde liegenden ingenieurmäßigen Rahmenbedingungen notwendig. Die praxisnahe Anwendung dieser Methodik wird am Beispiel der Gewölbemauer „Kölnbreinsperre“ dargestellt.

## 2 Historie

In der nachfolgenden Zusammenfassung wird die wesentliche historische Entwicklung der Gewölbesperren dargelegt. Es soll vor allem Hinblick auf die Form und die Baukörpergröße im Verhältnis zur geschichtlichen Epoche gezeigt werden, um einen Vergleich zu den heutigen Baukörperabmessungen zu ermöglichen.

### 2.1 Altertum

Mehr als 85% der Stauanlagen sind seit 1950 errichtet worden, aber die Wurzeln der ersten Entwicklungen liegen mehr als 5000 Jahre zurück. [schni1],[smit1]

Die ersten Spuren auf Wasserhaltung mittels Staudämmen gehen 5000 Jahre zurück und sind im Niltal zu finden. Als einer der ersten Staudämme ist die Trinkwasserversorgung für Jawa in Jordanien zu nennen. Eine Reihe von antiken Dämmen findet sich auch im heutigen armenischen Raum. Der Hauptverwendungszeck der Dämme ist auf die Wasserregulierung bzw. Wasserspeicherung für die Trockenperioden bzw. des Schutzes vor Überschwemmungen zurückzuführen.

Großteils handelte es sich um eine Vielzahl kleinerer Dämme die im Einflussbereich des Nils angelegt wurden. Erwähnenswert ist der Sadd-el-Kafara Damm, welcher bereits 2600 v.Chr. die beeindruckenden Abmessungen von 14m Höhe und 113m Kronenlänge aufwies (Abbildung 1). Der Querschnitt des Damms war für heutige Maßstäbe reichlich überdimensioniert, welches primär auf das schlechte zur Verfügung stehende Material bzw. auf noch keine ausreichenden Erfahrungen im Bau mit solch großen Abmessungen zurückzuführen ist.

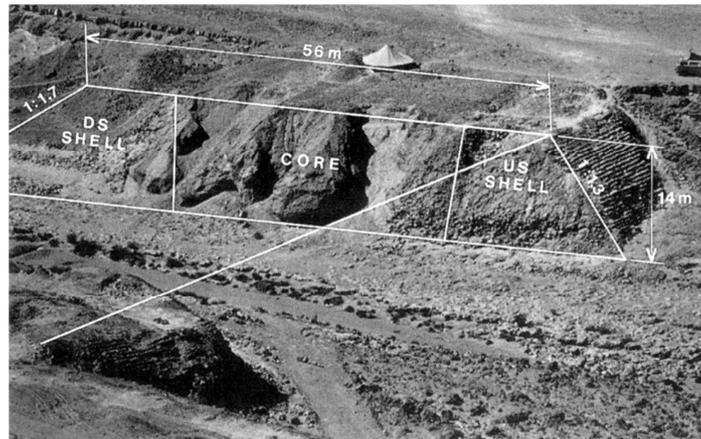


Abbildung 1: Sadd-el-Kafara Damm, aus [schni1], Foto von H. Fahlbusch

Weitere Spuren der geschichtlichen Entwicklung von Dämmen lassen sich über den Sudan (Semna und Mala's Dämme, 1800 v.Chr.), Griechenland (Kofini Damm mit Hochwasserentlastung, 1260 v.Chr.) bis hin zu den Kriegen der Spartaner um 400 v.Chr. verfolgen, welche gezielt die Errichtung von Dämmen benutzten um dem Gegner die Wasserversorgung abzuschneiden bzw. künstliche Überschwemmungen zu erzeugen.

In den folgenden Epochen entwickelte und perfektionierte sich die Bemessung und die Bauausführung der gebauten Schüttdämme und Gewichtsmauern, was am besser ausgenutzten Querschnitt dieser Bauwerke zu erkennen ist.

## 2.2 Römisches Imperium

Die Anfänge der wasserbaulichen Entwicklung der Römer gehen auf 500 v.Chr. mit den ersten Kanalisationen (Cloaca Maxima) zurück [bonn1]. Der Beginn des römischen Sperrenbaues wurde bereits mit vergleichsweise hochtechnischen Gerätschaften und Vorgehensweisen durchgeführt. Neben den eigenen Baugeräten war auch die Vermessung während und nach der Errichtung von Bedeutung [grewe1]. Als bedeutendste bautechnische Errungenschaft ist die großvolumige Anwendung von Zement bzw. Beton zu nennen [lamp1], inklusive der Anwendung von Holzschalungen. Die Bauweise mittels Bögen wurde von den Etruskern übernommen [Smit1]. Die Stabilität der Sperrenbauwerke wurde entsprechend vorab analysiert und in Hinblick auf die Standsicherheit bewertet.

Bei den römischen Bauwerken ist vereinzelt die erste Krümmung der Sperrenachse im Grundriss zu sehen, voraussichtlich um eine Bogentragwirkung zu erreichen. Die ersten Anwendungen dieser Konstruktionsweise sind in der Gewölbereihenmauer nahe Esparragalejo in Spanien zu finden. Die Höhe der Sperre betrug 5.6m, die Länge 320m, der Mittelteil war mit 12 Gewölbereihen mit einem Versatz von 8.6m ausgeführt [garc1].

Eine Reihe von Talsperren aus der römischen Zeit sind als die ersten Bogentalsperren einzustufen. Als Beispiel dieser ersten Gewölbemauern wird die Barcinas Umleitung am Fluß Cubillas (nahe Granada, Spanien) genannt. Der rechteckige Querschnitt mit einer Höhe von 4.5m und einer Bogenlänge von 40m, wies in der linken Seite der Mauer eine Krümmung mit 12m Radius und einem Öffnungswinkel von  $100^\circ$  auf. [Ferna1]

Ein nach heutigen Maßstäben als richtige Bogenmauer zu bezeichnendes Sperrenbauwerk wurde nahe Saint-Remy de Provence in Südfrankreich errichtet. Entsprechend den Aushubplänen wies die Talsperre eine Höhe von 12m auf, eine Länge von 18m, der Radius war 14m bei einem Öffnungswinkel von  $73^\circ$  [benoit1].

Als weitere nennenswerte Bogenmauer ist die Monte Novo Sperre in Portugal zu nennen. Die Sperre war 5.7m hoch mit einer Gesamtlänge von 52m (Abbildung 2). Der mittlere Teil der Sperre war gekrümmt mit einem Radius von 19m und einem zentralen Öffnungswinkel von circa  $90^\circ$  [quint1]. Ein ähnlicher Entwurf diente rund 1300 n.Chr. bei der Kebar Talsperre im Iran als Vorlage.

Zu erwähnen ist auch die Bogensperre Glanum in Südfrankreich nahe St. Remy-de-Provence. Die ursprüngliche römische Bogensperre wurde Ende des 19. Jahrhunderts von einer neuen Talsperre überdeckt [smit1][benoit]. Das originale Bauwerk wies eine Bogenform mit einer Höhe von 6m auf, und stammt vermutlich aus dem 1. Jahrhundert nach Christus, womit diese Sperre als eine der ersten Bogenmauern angesehen werden kann.

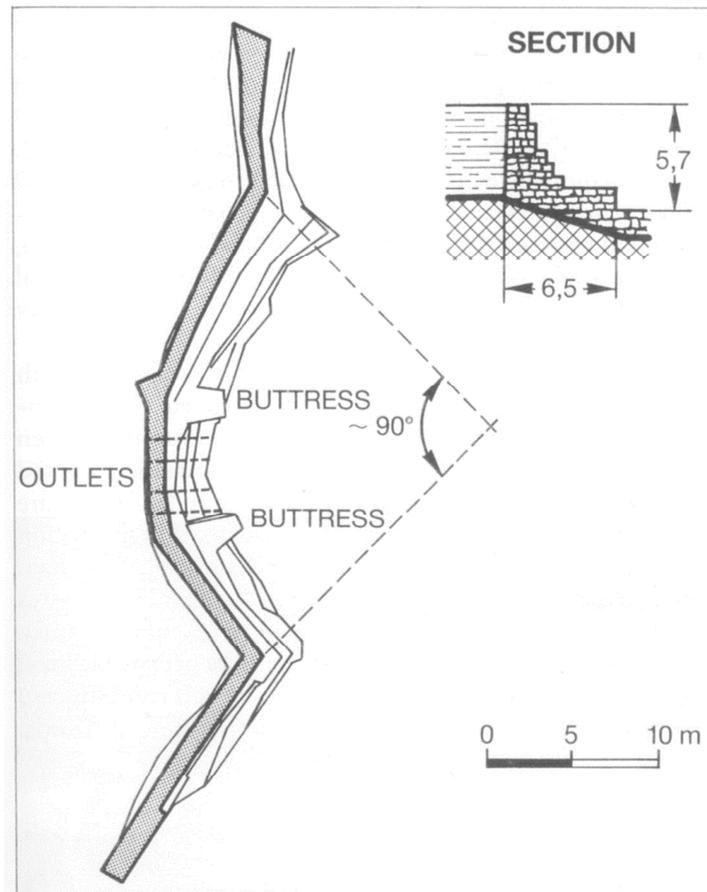


Abbildung 2: Monte Novo, Grundriss und Querschnitt, nach [quint2]

### 2.3 Arabische Welt

Bemerkenswert ist eine Reihe von Talsperren welche rund um 1300 n.Chr. im heutigen Iran errichtet wurden.

Als erstes Beispiel soll die Kebar Talsperre dienen, welche als Bogenmauer mit einer Höhe von 26m und einer Länge von 55m bereits nennenswerte Abmessungen aufwies (Abbildung 3). Das mittlere Drittel der Sperre war mit 35m Radius und  $40^\circ$  Öffnungswinkel ausgeführt. Ähnlich der vorgenannten Talsperre Monte Novo aus Portugal stützte sich der Bogen auf die beiden geraden seitlichen Mauerabschnitte ab [gobl1]. Die Bogenform war ein Kreisbogen mit konstantem Radius über die Höhe. Im Laufe der Jahre wurde die Sperre erhöht und mit geraden Seitenwangen verlängert (Abbildung 4).

Ein weiteres Beispiel von den Baumöglichkeiten der damaligen Zeit spiegelt die Kurit Talsperre wieder [gobl2]. Die Sperre wies eine Höhe von 60m auf, und war in einem engen Tal situiert (Abbildung 5). Die Kronenlänge der Kurit Sperre war circa 44% der Höhe.

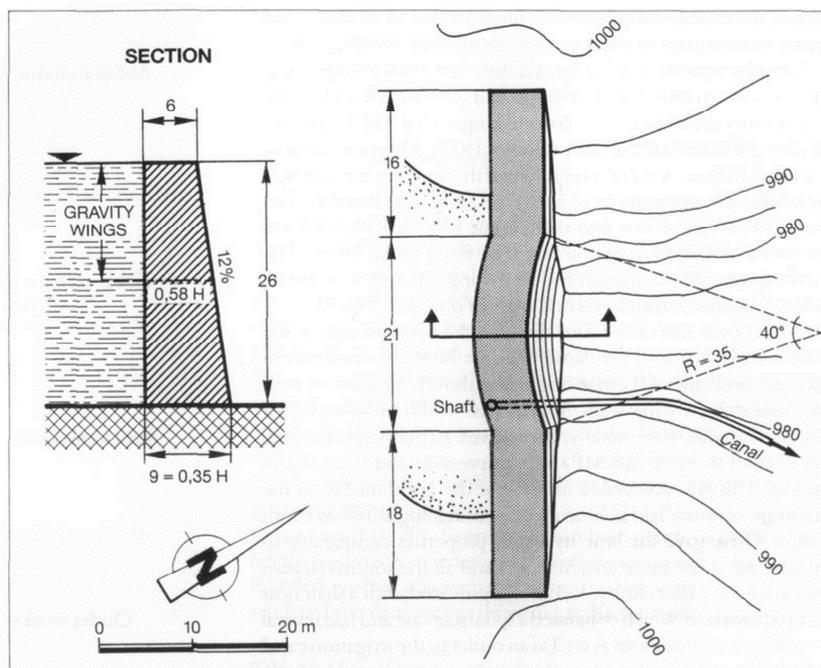


Abbildung 3: Kebar Talsperre, Schnitt und Grundriss, aus [schni1]



Abbildung 4: Kebar Talsperre, Foto Luftseite, aus [gobl1]



Abbildung 5: Kurit Talsperre, Foto Wasserseite, aus [schnitt1], Foto R. Carlin

## 2.4 Mittelalter

Der entscheidende Anstoß zur wiederbeginnenden technischen Entwicklung von Talsperren war die Nutzung der Wasserkraft im 11. und 12. Jahrhundert. Die Nutzung der aus der hydraulischen Fallhöhe umgewandelten Energie in Mühlen, Hämmer, Pressen und Sägen etc. brachte eine Weiterentwicklung der längst bekannten Baukunst [Reyno1].

Im Zuge der fortschreitenden Entwicklung entstand eine große Anzahl von Schüttdämmen und Gewichtsmauern im Großteil Europas für die vielfältigsten Zwecke der Nutzung von Wasser.

Die Fertigstellung der Almansa Talsperre in Südost Spanien setzte die Ära der in der römischen Zeit, und über den Orient wieder zurück nach Europa gebrachten Bautechnik fort (Abbildung 6). Die 17m hohe Talsperre war mit 31m Kronenbogenradius und einem Öffnungswinkel von  $100^\circ$  errichtet [Ferna1]. Die Sperre wurde 1586 nochmals erhöht.

Gemeinsam mit der Almansa Talsperre sind die Talsperren Tibi (1594) und Elche (1640, Abbildung 8) zu nennen, welche nachfolgend miteinander verglichen werden (Tabelle 1, Abbildung 7). Diese Bogentalsperren stellen den Höhepunkt dieser Talsperren Epoche dar [schnitt3].



Abbildung 6: Almansa Talsperre, Foto Luftseite, aus [schni1]

Name	Höhe [m]	Kronenbogenradius [m]	Öffnungswinkel [°]
Almansa Talsperre	17	31	100°
Tibi Talsperre	46	97	55°
Elche Talsperre	23	62	70°

Tabelle 1: Vergleich Almansa, Tibi und Elche Talsperre

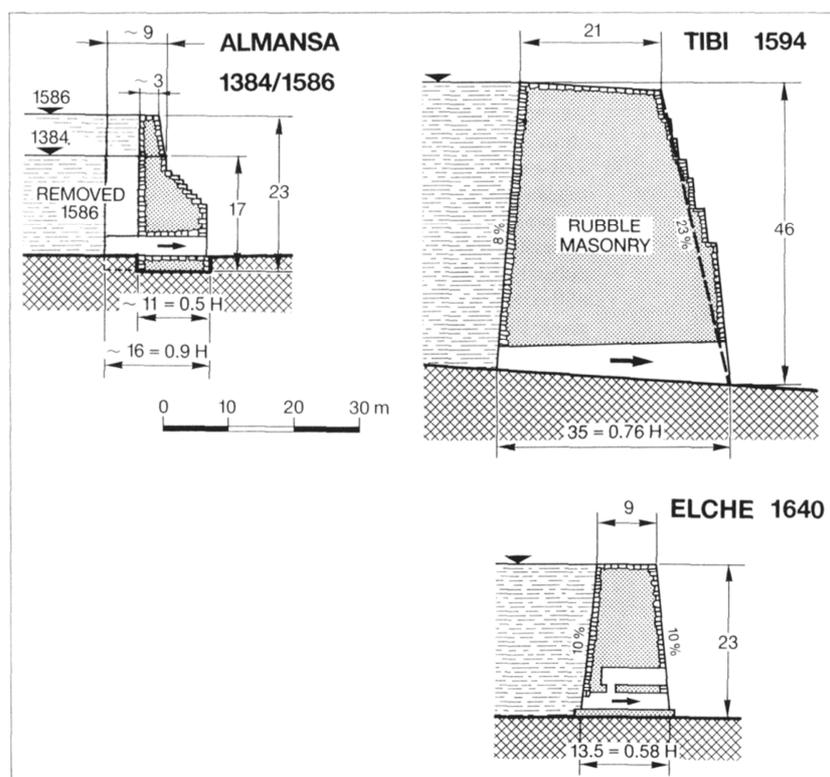


Abbildung 7: Vergleiche Alamansa, Tibi und Elche, aus [schn11]



Abbildung 8: Talsperre Elche, Ansicht Reservoir, aus [schni1]

Die 1611 begonnene Ponte Alto Sperre in Südtirol war auch eine teilweise zum Schutz der Stadt Trento vorgesehene Geschiebesperre. Die ursprünglich 5m hohe Bogensperre wurde mehrmals in Dicke und Höhe vergrößert (bis 1887, Abbildung 9) [noetz1].

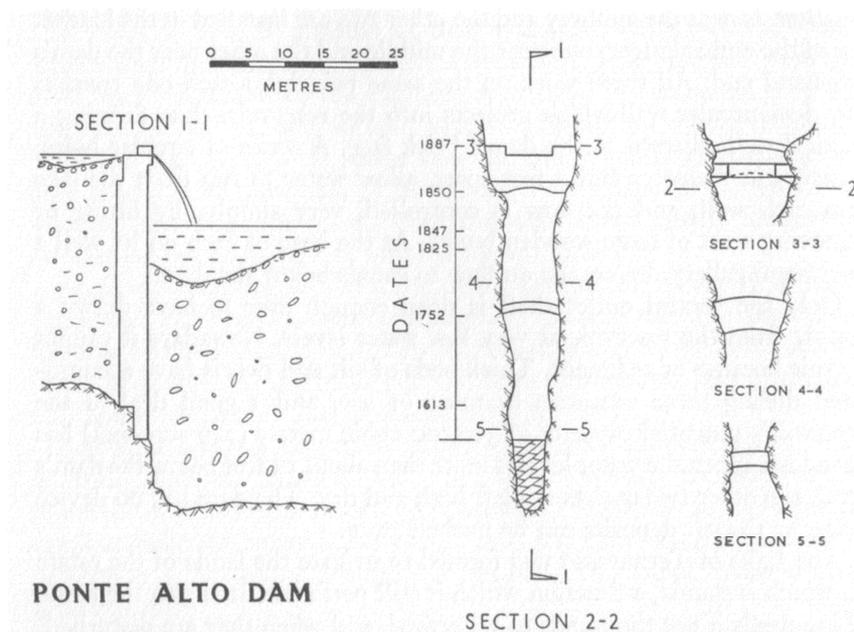


Abbildung 9: Ponte Alto Sperre, Schnitte und Grundrisse, aus [smit1]

Die Ponte Alto Sperre war die erste Bogensperre in Italien und bis 1613 die erste moderne Bogensperre in Europa [Smit1]. Es handelt sich um ein vergleichsweise schlankes Tragwerk, welches über mehrere Ausbaustufen erweitert wurde. An der Wasserseite wurde in späteren Jahren eine zweite kleinere Sperre errichtet, welche luftseitig von Ponte Alto ein großes Sedimentbecken erzeugte. Heute sind nur mehr die obersten 14m der Ponte Alto Sperre von der Luftseite aus zu sehen.

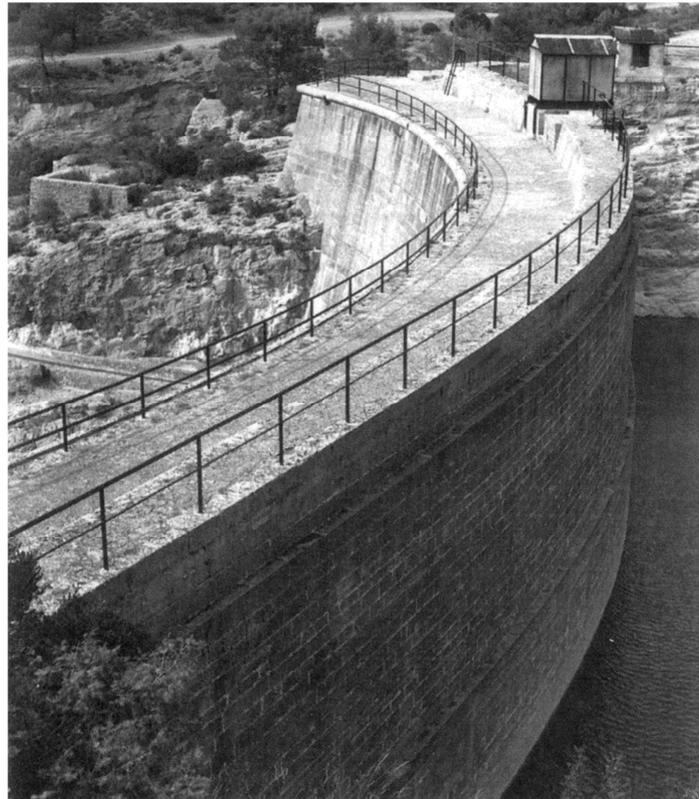
Das letzte Beispiel am Übergang zur Neuzeit bildet die Jones Fall Talsperre in Ost-Ontario in Kanada. Die Bogenmauer wies einen Öffnungswinkel von  $100^\circ$  auf, bei einer Höhe von 19m und einer Dicke von 44% der Höhe [Legg1].

## 2.5 Neuzeit

Als Beginn der neuzeitlichen Epoche kann die Zola Bogentalsperre nahe Aix-en-Provence in Südfrankreich angeführt werden. Das von Francois Zola geplante Sperrerbauwerk wurde 1854 fertig gestellt (Abbildung 10). Die nach seinem Planer benannte Zola Talsperre weist eine Höhe von 43m auf, der Öffnungswinkel beträgt rund 77°. [Rigau1]

Bemerkenswert war die Berechnung, welche auf unabhängigen Horizontalbögen beruhte. Jeder Bogen musste die Wasserlast je nach aktueller Tiefe aufnehmen. Die Bogenspannung wurde nach der Zylinderformel (Edme Mariotte 1620-1684 bzw. Louis Navier 1826) in Abhängigkeit vom Druck, Radius und Wandstärke bemessen.

Die Zola Talsperre stellt somit die erste wirkliche Gewölbemauer dar, welche auch den heutigen Ansprüchen an Entwurf und Lastabtragung genügt.



**Abbildung 10: Zola Talsperre, Foto Wasserseite, aus [schni1]**

Kurz nach Fertigstellung der Zola Talsperre wurden auch in Australien verschiedene Talsperren als Bogenmauern fertig gestellt. In den Jahren 1856 bis 1907 wurden sieben Bogentalsperren mit einer Höhe von mehr als 15m in Australien errichtet. Die Höhen reichten bis 36m, die Öffnungswinkel betragen 78-136°.

Als erster Vertreter der modernen Bogengewichtsmauern ist sicherlich der Sweetwater Dam südöstlich von San Diego in Kalifornien zu nennen. Mit drei verschiedenen Aufbaustufen erreichte die Talsperre 1888 die klassische Form, welche sich auch bis heute für ähnliche Bauwerke behauptet hat. Die Talsperre hatte eine Höhe von 30m, der Öffnungswinkel beträgt rund 95°. Die Wasser- und Luftseite sind leicht geneigt.

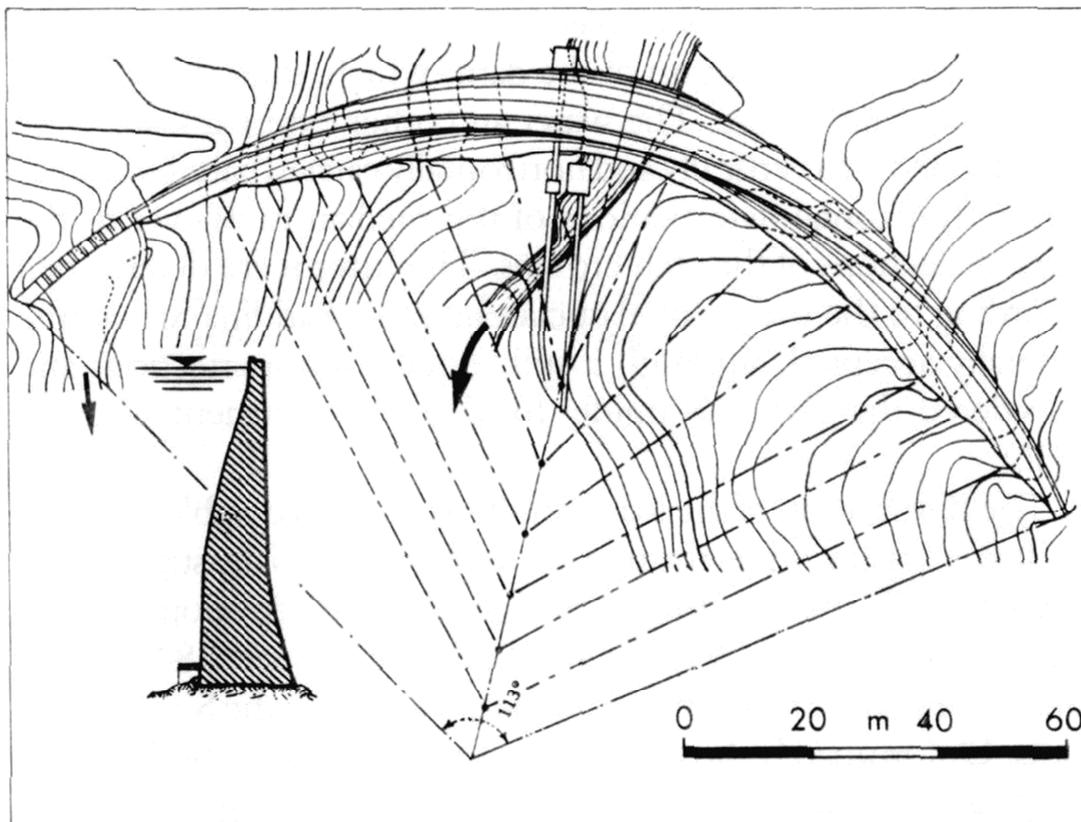
Die Sweetwater Talsperre stand Modell für Bauvorhaben wie der Pathfinder [billing1] und der Buffalo Bill Dam. Die beiden Bauwerke erreichten mit damaligen 65m und 99m außergewöhnliche Höhen. Die Volumina betragen 50.000m<sup>3</sup> bzw. 63.000m<sup>3</sup>.

Der Hauptunterschied zu den vorherigen Bogenstaumauern war, dass bei diesen beiden Mauern die Bögen nicht nur als isolierte Horizontalbögen wirkten, sondern auch durch einen Vertikalkragträger verbunden waren. [wisner1, bazant1].

Es kam bereits ein einschnittiger Radialausgleich der Verschiebungen der Mauermittelfläche zur Anwendung [visch1].

Die daraus entstehenden Rechenmethoden wurden weiter verfeinert und dienten für eine Reihe von Talsperrenentwürfen, bei welchen diese neuen Prinzipien der Verteilung in Horizontal- und Vertikalanteile angewendet wurden.

Als nennenswertesten Schritt in der Entwicklung dieser Epoche ist die erste Gewölbesperre mit variablen Radius zu nennen bzw. konstantem Öffnungswinkel (Gleichwinkelmauer), die Salmon Creek Talsperre (Abbildung 11). Diese ist im südöstlichen Alaska zu finden, und weist eine Höhe von 51m auf [jorge1]. Diese Talsperre ist als Vorlage für alle modernen Gewölbemauern zu sehen.



**Abbildung 11: Salmon Creek Talsperre, Grundriss und Schnitt, aus [creag1]**

Die im Vertikalschnitt gekrümmte Talsperre folgt den Prinzipien der Spannungsreduktion am wasserseitigen Fuß, sowie dem Ziel einer ausgeglichenen Spannungsverteilung.

Neben dem revolutionären Entwurf der Geometrie, wurden auch andere Aspekte des Talsperrenbaus entsprechend adaptiert. Es wurden die Grundzüge von der blockweisen Errichtungsweise angewendet, indem die Sperre durch zwei Fugen in drei Teile unterteilt wurde. Dies sollte die Kontraktionsmöglichkeit während der Abbindephase sicherstellen. In weiterer Folge wurden Blockfugeninjektionen und Verpressmethoden entwickelt, die ursprüngliche Blockbreite von rund 50-70m wurde in den Folgeprojekten auf ein Viertel reduziert.

Obwohl zu dieser Zeit der zylindrische Geometrietyp nie vollständig ersetzt wurde, galt der variable Radius Typ als besonders geeignet für hohe und große Talsperrenprojekte.

Dieser moderne Typ von Sperrenentwurf wurde mit der Fertigstellung der Montsalvens Talsperre 1920 durch Heinrich Gruner auch in Europa erstmalig angewendet [schnitt2]. Die Talsperre ist 43km südwestlich von Bern situiert, weist eine Höhe von 55m auf, und ist stark gekrümmt (Abbildung 12 und Abbildung 13). Die Horizontalbögen waren nicht ganz kreisförmig, sondern entsprachen der Stützlinie der Wasserlast. Um der Spannungsverteilung in den Flanken angepasst zu sein, wurden die Bögen zu den Flanken hin verstärkt ausgeführt (Kämpferverstärkung).

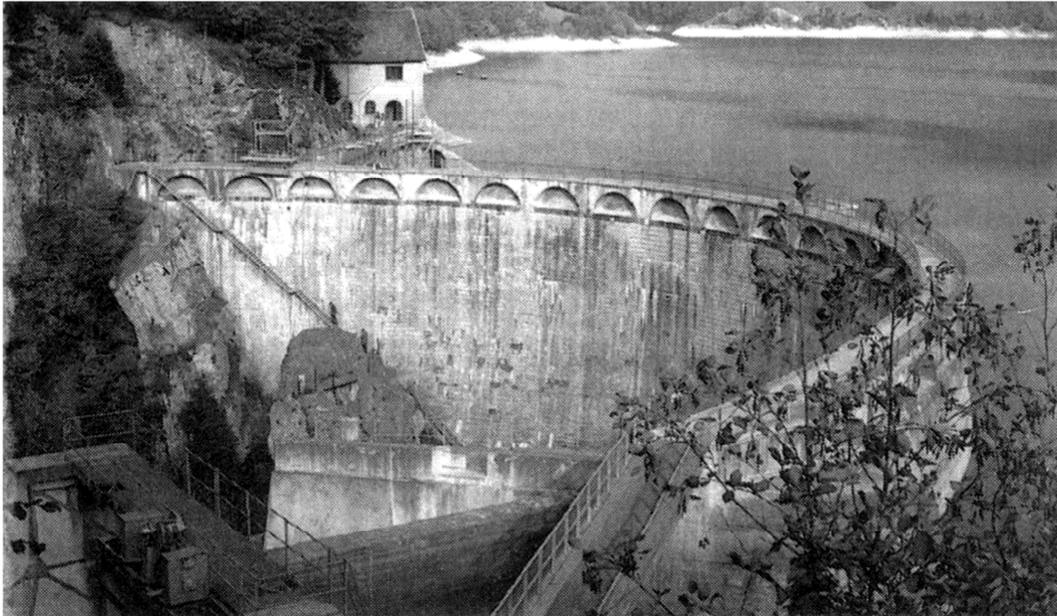


Abbildung 12: Talsperre Montsalvens, Foto Luftseite, aus [schnitt1]

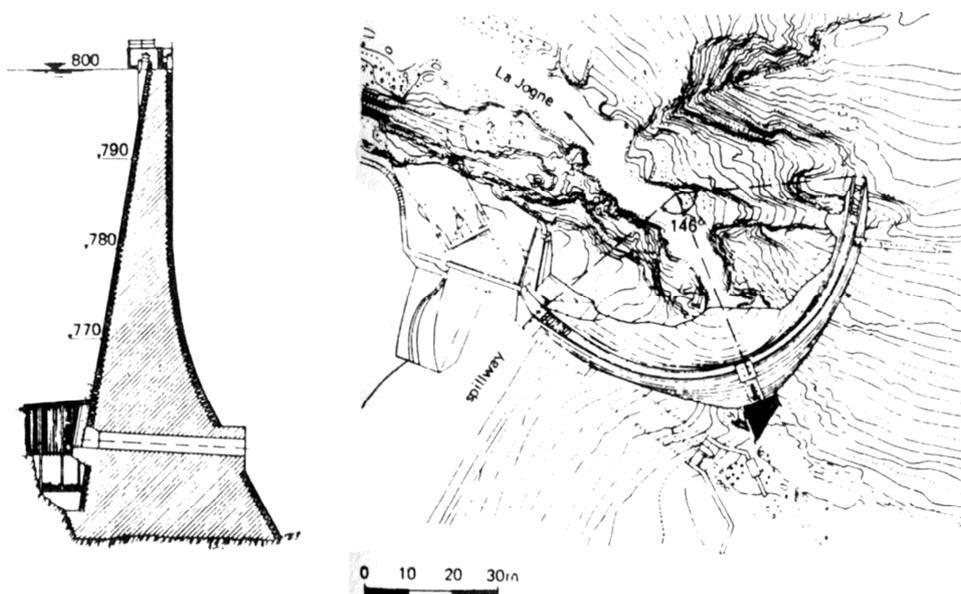


Abbildung 13: Talsperre Montsalvens, Grundriss und Schnitt, aus [mart1]

Die Innovationen auf dem Gebiet der Formgebung sind auch den rasch wachsenden Möglichkeiten der Analyseverfahren zuzuschreiben. Die Verfahren nach Ritter [ritt1] wurden durch entsprechende Entwicklungen am USBR zur „Trial Load Method“ weiterentwickelt, das auch heute noch als „Lastaufteilungsverfahren“ (LAV) Verwendung findet [usbr1].

Neben der Verknüpfung der Verschiebungen in den Schnittpunkten zwischen Horizontalbögen und Vertikalkragträgern, wurden auch die Rotationen mit berücksichtigt. Das Verfahren stellt jedoch nach wie vor nur eine Näherung an die Theorie der dicken Schale dar, unter welche die Gewölbesperren kontinuumsmechanisch fallen. Den Durchbruch in der Berechnung von Talsperren erfolgte mit der stetigen Weiterentwicklung der rechentechnischen Kapazitäten, welche Finite Elemente praktisch handhabbar machten.

Im Gegensatz zu den USA, wo nach der Errichtung des Hoover Dams die Zahl der neu errichteten Gewölbesperren rapide sank, erreichte dieser Geometrietyp in Europa eine Hochform. Speziell in Italien und der Schweiz wurden sehr hohe doppelt gekrümmte Gewölbemauern errichtet. Die Optimierung und Anpassung der Form fand in den Talsperren Gurzia (Italien, H=50m) und Osiglietta (H=77m, Abbildung 14) einen neuen Höhepunkt.

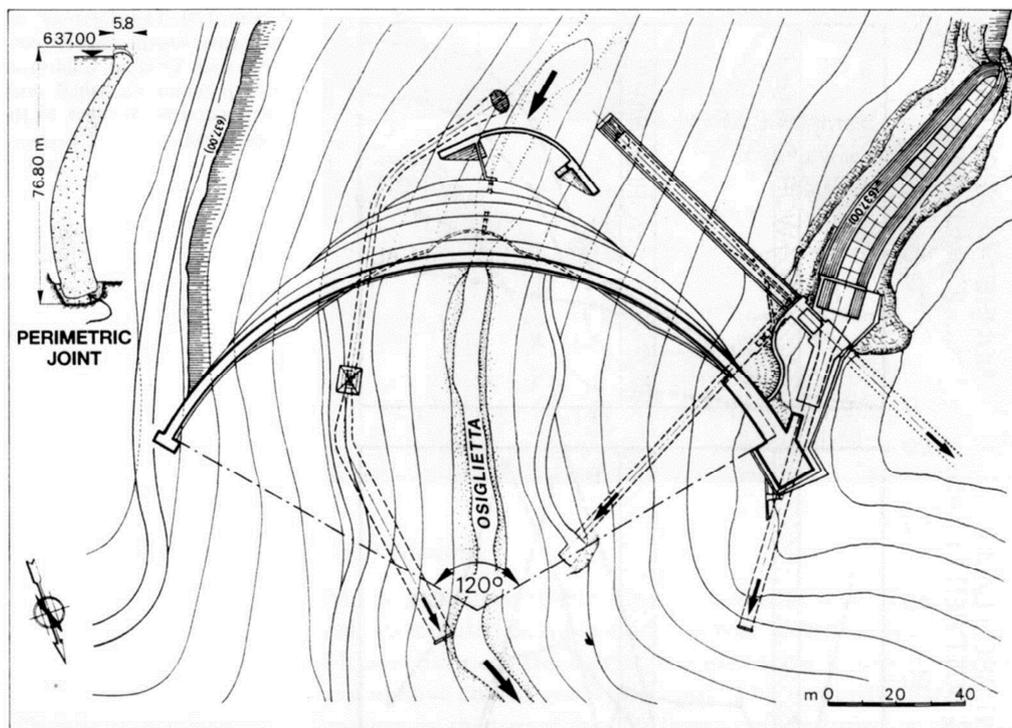


Abbildung 14: Talsperre Osiglietta, Grundriss und Schnitt, aus [schni1]

Außerordentlich schlanke Sperren sind beispielsweise mit den Gewölbesperren Tolla auf Korsika und Le Gage in Frankreich zu nennen (Abbildung 15).

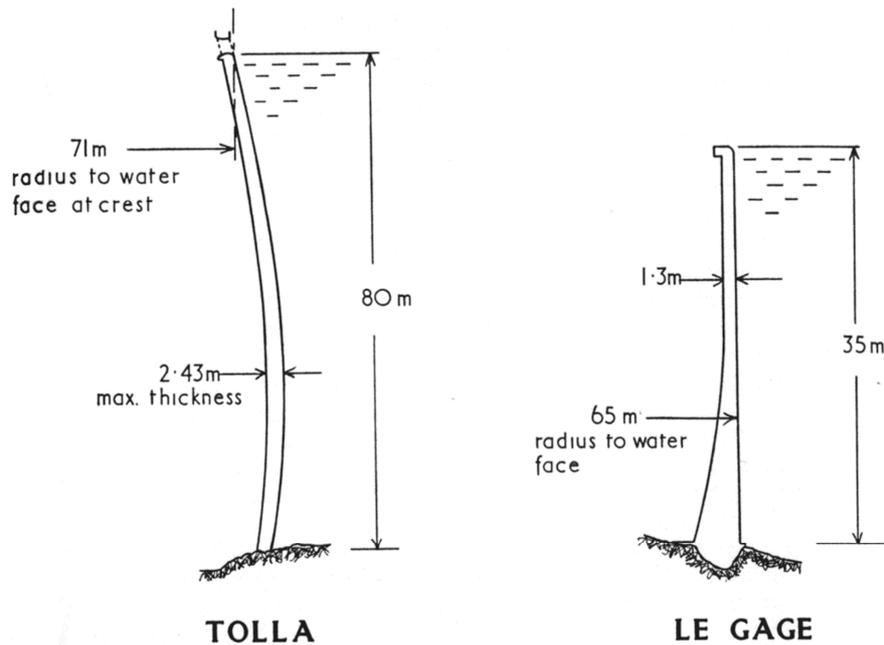


Abbildung 15: Talsperre Tolla, Talsperre Le Gage, Querschnitte, aus [smit1]

Nach dem Versagen der Malpasset Talsperre 1959 setzten sich konservativere Entwürfe für sehr hohe Gewölbemauern durch. Vor allem die Schweizer Talsperre Mauvoisin (damalige Höhe 237m, 80km südöstlich von Lausanne) setzte mit der Fertigstellung 1957 eine neue Richtung des Talsperrenentwurfes. Die 51m hohe Vieux Emosson Talsperre von 1955 öffnete mit der Verwendung von parabolischen Horizontalbögen eine neue Ära in der Formgebung [Gicot1].

In den 1960ern erlebte die Gewölbesperre auch in den USA eine Renaissance, die wichtigsten Projekte sind mit Flaming Gorge (153m, 1964, Utah) und Morrow Point (143m, 1968, Colorado) zu nennen. In den letzten Jahrzehnten ist die Anzahl der Neubauten von großen Gewölbemauern deutlich zurückgegangen. Am Beispiel des europäischen Kontinents waren um das Jahr 2000 nur mehr wenige große Gewölbemauern in Planung bzw. Bau (wie z.B. Ermenek/Türkei, Tsankov Kamak/Bulgarien).

## 2.6 Österreichische Talsperren

In Österreich wurden in den letzten 100 Jahren mehrere Großtalsperren errichtet. Bevorzugt durch die geografische Lage am Rande der Alpen fallen deutliche Anteile der Landesfläche auf steile Gebirgstäler, welche für die Errichtung von Gewölbesperren prädestiniert sind.

Die nennenswertesten großen Gewölbemauern, welche auch in einem späteren Kapitel hinsichtlich der wichtigsten Kenndaten näher dargestellt werden, sind Schlegeis, Zillergründl und Kölnbrein. Diese drei Talsperren sind ebenso im internationalen Vergleich große Bauwerke mit Höhen von 130-200m, Kronenlängen von 400-600m und Betonvolumina von 700.000 bis 1.6Mio Kubikmeter. Allen gemein ist die zentrale Lage um den österreichischen Alpenhauptkamm in Höhenlagen von 1300 bis 2000m über Adria. Der Eigentümer und Betreiber dieser Talsperren ist die österreichische Verbund Austrian Hydro Power AG (AHP), welche einen großen Anteil am österreichischen Energiemarkt hält. Eine Übersicht der großen österreichischen Talsperren ist nachfolgend dargestellt (Abbildung 16 und Abbildung 17).

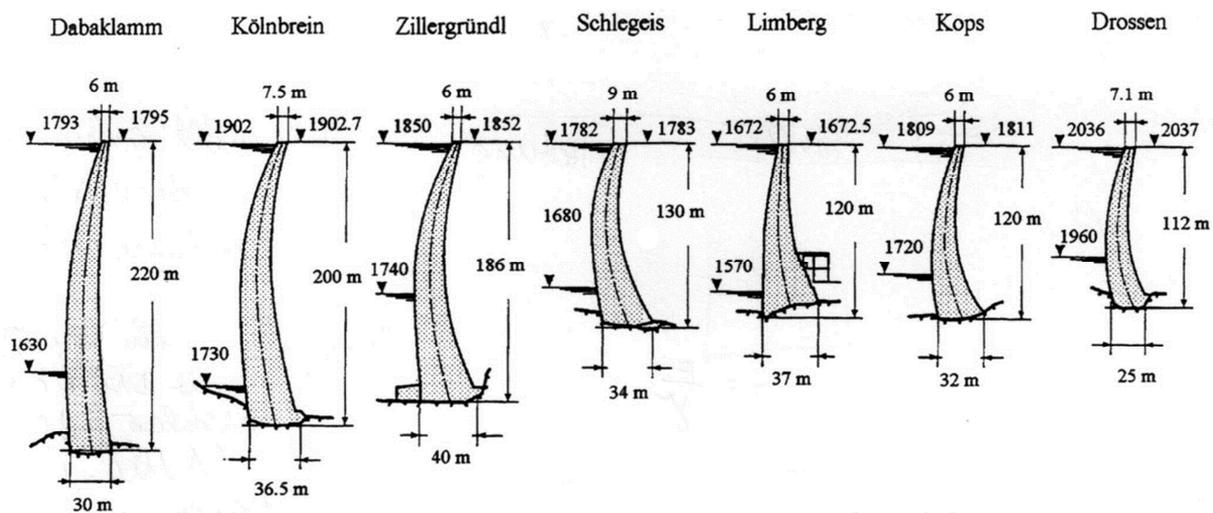


Abbildung 16: Bogenstaumauern in Österreich, Querschnitte, aus [drob1]

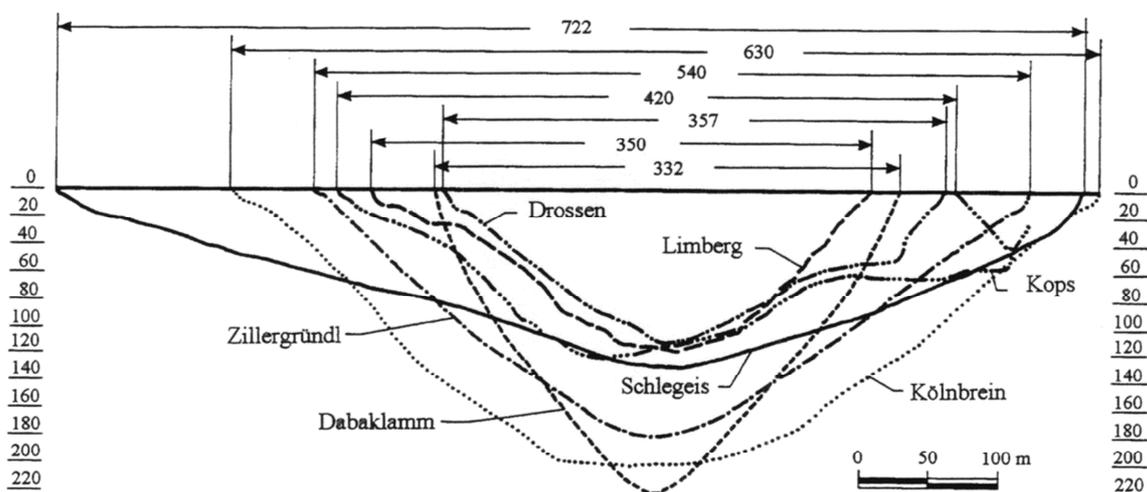


Abbildung 17: Bogenstaumauern in Österreich, Längenschnitte, aus [drob1]

### 3 Formgebung

Im Folgenden wird die Definition der Geometriefunktionen erläutert. Abgeleitet von grundlegenden geometrischen Formen wird die Talsperrengeometrie bestimmt. Prinzipiell kann eine komplexe geometrische Struktur aus einzelnen Grundformen zusammengesetzt werden. Ähnlich wird das in den folgenden Abschnitten verwendete Geometriemodell aufgebaut.

Die geometrische Form kann in mehrere strukturelle Grundelemente unterschieden werden, welche in Kombination oder Variation zueinander die endgültige Form beschreiben. In den nachfolgenden Kapiteln werden diese sowohl mathematisch als auch für die Anwendung im Talsperrenentwurf untersucht. Am Beispiel der Gewölbemauer wird gezeigt, wie in der Praxis, besonders in Hinblick auf die in Österreich ausgeführten großen Talsperren, die Form entwickelt wurde, und wie sich die einzelnen Bestandteile und Parameterverläufe zusammensetzen. Es wird die Durchführung eines Vorentwurfes demonstriert, und eine „Prototyp“-Talsperre für die Verwendung in den späteren Kapiteln erstellt.

#### 3.1 Geometrische Formen

Als Grundformen in der Talsperrenplanung kommen sowohl einfache geometrische Formen, wie die Gerade, zur Anwendung, als auch geometrische Formen höherer Ordnung, wie z.B. die Parabel oder die Ellipse. Es werden nun die für diese Arbeit zugrundeliegenden und verwendeten Grundformen näher dargestellt.

##### 3.1.1 Gerade

Die Grundgleichung der Geraden in Parallelkoordination ist definiert mit (Formel 1):

$$ax + by + c = 0 \quad (1)$$

**Formel 1: Parallelkoordination, Gerade**

Die vorher beschriebene Funktion lässt sich auch als Kurve erster Ordnung klassifizieren. Die Achsenabschnittsform kann wie folgt angegeben werden (Formel 2):

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1 \quad (2)$$

**Formel 2: Achsenabschnittsform, Gerade**

Die vorstehende Gleichung beschreibt eine Gerade, welche die x-Achse im Punkt P=(a,0) und die y-Achse im Punkt Q=(0,b) schneidet.

##### 3.1.2 Kurven zweiter Ordnung

Die nachfolgend angeführten Kurventypen Ellipse, Hyperbel, Parabel und Kreis sind im Unterschied zur Geraden als Kurven zweiter Ordnung zu klassifizieren. Allen beschriebenen Kurven zweiter Ordnung der Ebene ist gemein, dass deren Koordinaten folgender Gleichung genügen (Formel 3):

$$a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{01}x + 2a_{02}y + a_{00} = 0 \quad (3)$$

**Formel 3: Grundgleichung, Kurven zweiter Ordnung**

In Matrizenschreibweise kann vorgenannte Gleichung wie folgt umgeschrieben werden (Formel 4):

$$x^T Ax + 2a^T x + a_{00} = 0, \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad a = \begin{pmatrix} a_{01} \\ a_{02} \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (4)$$

**Formel 4: Matrizenschreibweise, Kurven zweiter Ordnung**

Unter Voraussetzung eines kartesischen Koordinatensystems lässt sich die Kurvenform detaillierter klassifizieren in folgende Unterscheidungen.

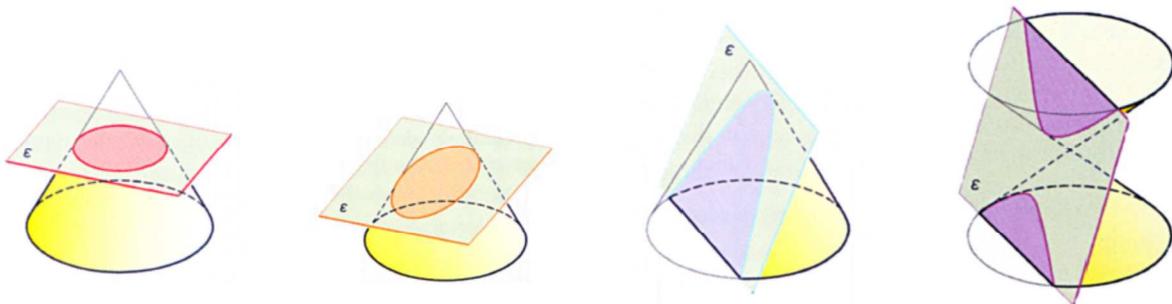
Mit der Spur von A,  $Sp(A) = a_{11} + a_{22}$ , sowie dem Rang und der Determinante von A,  $\det(A) = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$ , kann festgelegt werden [bron1] (Tabelle 2):

Rang A Rg A	Determinante A det A	Produkt det A · Sp A	Kurvenklassifizierung
2	>0 elliptisch	>0	Nullteilige Kurve Ellipse
	<0 hyperbolisch	>0, =0, <0	
1	=0		Parabel

**Tabelle 2: Klassifizierung, Kurven zweiter Ordnung**

Auf die weiteren möglichen Geometrien wurde in der vorhergehenden Tabelle nicht näher eingegangen, da sie für diese Arbeit von untergeordneter Bedeutung sind.

Oftmals werden die Kurven zweiter Ordnung der Ebene als Kegelschnitt bezeichnet. Diese sind als Schnitt einer Ebene mit einem geraden Kreiskegel darstellbar. Der Kreiskegel entsteht ideell durch Drehung eines gleichschenkeligen Dreiecks um die Spitze. Als mögliche Schnittebenen sind drei Varianten in Abhängigkeit des Ebenenwinkels möglich. Je nach Steilheit der Schnittebene, in Bezug auf die Neigung der Mantelfläche des Kreiskegels, entsteht die Schnittfigur einer Parabel, Hyperbel oder Ellipse. Schematisch ist die Schnittsituation in der folgenden Übersicht dargestellt (Abbildung 18). Durch fünf gegebene Punkte geht genau eine einzige bestimmte Kurve zweiter Ordnung hindurch. Sollten mindestens drei dieser Punkte auf einer Geraden liegen spricht man von einem zerfallenden Kegelschnitt.



**Abbildung 18: Schnittebenen Kreiskegel, Kegelschnitte, aus [erla1]**

Die Kegelschnitte sind seit langer Zeit bekannt und reichen auf den Griechen Manächmus zurück (rund 350 vor Christus). Ein Lehrbuch über die Kegelschnitte ist von Apollonius (250-200 vor Christus) erstellt worden, welcher auch die Klassifizierung „elleipsein“ = fehlen ( $\alpha < 0$ ), „paraballein“ = gleichsetzen ( $\alpha = 0$ ) und „hyperballein“ = übertreffen ( $\alpha > 0$ ) festgelegt hat.

### 3.1.2.1 Numerische Exzentrizität

Durch Verschiebung der Scheitel von Ellipse, Parabel und Hyperbel in einen Punkt, z.B. den Nullpunkt, ergibt sich eine gemeinsame Gleichung für alle drei Klassen, die sogenannte Scheitelgleichung [kühl1] (Formel 5). Diese Scheitelgleichung findet in einer Variation im nachfolgenden Geometrie-Konzept Anwendung.

$$y^2 = 2px + \alpha x^2, \quad \text{mit } \frac{b^2}{a} = p \quad (5)$$

**Formel 5: Scheitelgleichung, Kegelschnitte**

Für die nachfolgenden Festlegungen ist die Eigenschaft der Leitlinien wichtig. Alle Punkte, für die das Verhältnis der Abstände zu einem gegebenen Punkt F und zu einer gegebenen Geraden konstant gleich einer Konstante „e“ ist, beschreiben eine Kurve zweiter Ordnung mit der numerischen Exzentrizität „e“. Der Punkt F kann als Brennpunkt, die gegebene Gerade als Leitlinie bezeichnet werden. Unter Berücksichtigung der numerischen Exzentrizität lässt sich vorgenannte Gleichung wie folgt anpassen (Formel 6).

$$y^2 = 2px - (1 - e^2)x^2 \quad (6)$$

**Formel 6: Scheitelgleichung, numerische Exzentrizität, Kegelschnitte**

Für die Werte von „e“ lassen sich unterscheiden (Tabelle 3):

Numerische Exzentrizität	Kurventyp
$e < 1$	Ellipse
$e = 1$	Parabel
$e > 1$	Hyperbel

**Tabelle 3: Klassifizierung, numerische Exzentrizität, Kurven zweiter Ordnung**

Praktisch wird durch Variation der numerischen Exzentrizität „e“ ein fließender Übergang zwischen den jeweiligen Kegelschnitten ermöglicht (siehe Abbildung 19). Unstetigkeiten im Formübergang werden mittels der Scheitelgleichung und einer stetigen variablen numerischen Exzentrizität komplett vermieden, man spricht auch von der Metamorphose der Kegelschnitte (nach [kühl1]).

Die Methodik der Kurvendefinition mittels der numerischen Exzentrizität wird im nachfolgenden Geometrie-Konzept näher detailliert, und weiterführend in den späteren Kapiteln zum Geometriemodell einer Gewölbesperre verwendet.

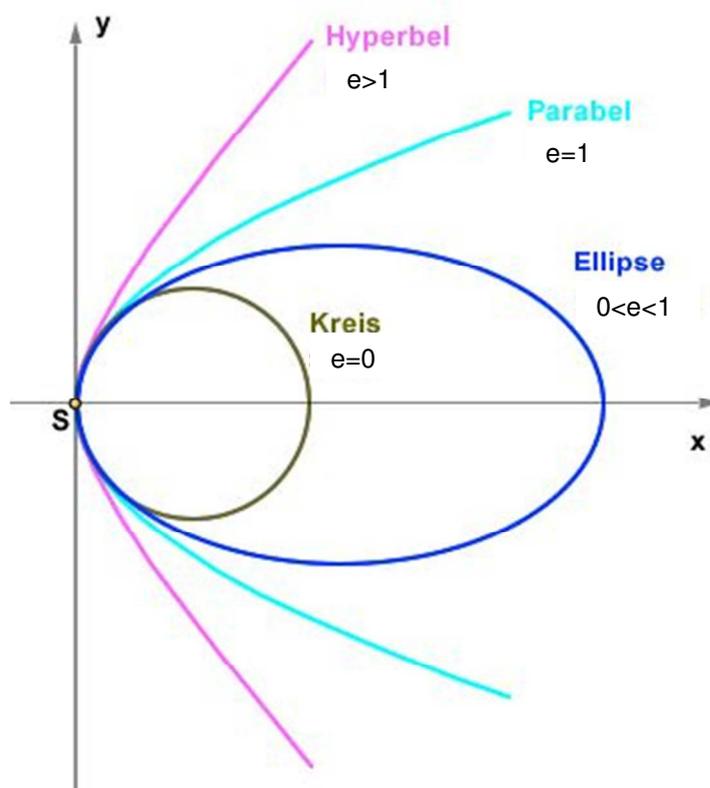


Abbildung 19: Übersicht numerische Exzentrizität, nach [grei1]

### 3.2 Geometrie-konzept

Die Form einer Gewölbemauer hängt von vielen Einflüssen ab. Auf der einen Seite stehen die physikalischen Gegebenheiten oder Randbedingungen, wie die Größe der Stauhöhe und die Talform, auf der anderen Seite spiegeln sich auch die verwendeten Modellierungsprinzipien und das Wissen und die Erfahrung des Ingenieurs in der Form wieder.

Es gibt keine Standardform für diese Art von Bauwerken, in der Regel stellt jede Gewölbesperre ein Unikat dar, welche die berücksichtigten Randbedingungen an einem bestimmten Ort unter genau definierten Umständen erfüllt.

In frühen Konzepten wurden die Formen der Gewölbemauern aus Einzelfiguren zusammengesetzt, anfänglich mittels einfacher Kreisbögen [rocha1]. Die Interaktion zwischen den einzelnen horizontalen Bogenhorizonten wurde vernachlässigt, die Wasserseite war einfach vertikal ausgebildet. Die Bemessung erfolgte nach der bekannten Zylinderformel (siehe Kapitel 2.5 Historie und Kapitel 3.3 Vorentwurf). Mit beginnender Berücksichtigung der Einspannung der Bögen in den Untergrund wurden Bögen mit veränderlicher Stärke angewendet, in weiterer Folge kam es zu Anpassungen der Radien in Abhängigkeit der Höhe, was schließlich zu doppelt gekrümmten Gewölbemauern führte. Details zu diesem Entwicklungsschritt wurden bereits im vorherigen Kapitel über die Historie genannt.

Der geschichtliche Übergang kann von der ursprünglichen Kreisform, welche lange in Zylindermauern Anwendung fand, über nach stütz-kurve-geformten Horizonten, hin zu höherwertigen Funktionskurven wie Ellipsen, Parabeln, Hyperbeln, und anderweitige funktionalanalytische Oberflächen (wie z.B. Bsplines [press1] oder logarithmische Spiralen [gol1]) angegeben werden.

Es kann primär unterschieden werden in „voll geschlossene analytische“ und „abschnittsweise definierte zusammengesetzte“ Geometriedefinitionen. Die voll geschlossenen analytischen Funktionen spiegeln in einer einzigen Funktionalgleichung die komplette Talsperrengeometrie bzw. –oberfläche wieder. In der abschnittsweise zusammengesetzten Definition werden lokale Anpassungen durch Aneinanderreihung bestimmter Funktionalgleichungen erreicht, meist unter der Forderung der Beibehaltung eines stetigen Verlaufes (=keine „Knicke“).

Die Anforderungen an das in dieser Arbeit verwendete Geometriemodell werden wie folgt festgelegt:

- Einfach handhabbar und einfach modifizierbar
- Horizontweise Definition der Formfunktion
- Klar beschriebene Formfunktion
- Einfache und aussagekräftige Formparameter
- Unsymmetrische Formen unter Beibehaltung der Krümmung (kein Knick)
- Möglichkeit der Korbbögen (=Aneinanderreihung von Bögen)
- Optionale Verlängerung der Bogenenden mittels Geraden
- Interpolation der Zwischenhorizonte für geglätteten Übergang zwischen den einzelnen Haupthorizonten nach wählbaren Interpolationsfunktionen
- Kämpferverstärkung und exzentrische Verschiebung dieser Verstärkung in Querschnittsrichtung

Für diese Arbeit wird auf der bereits in [prom1] und [wid3] verwendeten Geometriedefinition eine Modelldefinition über Kegelschnittstabellen aufgebaut. Dieses Geometriemodell wird in wesentlichen Punkten erweitert:

- Klassenbasiertes Geometriemodell mit vererbten Eigenschaften
- Neukonzipierung und Modifikationsroutinen für Sensitivitätsanalyse und Bewertungsmodell
- Modulares und erweiterbares Geometrie-konzept auf Horizontbasis mit erweiterten Anpassungsmöglichkeiten, sowohl hinsichtlich Geometrie als auch Berechnungsmöglichkeiten

Details zu den Kegelschnitten im Geometriemodell und der konkreten Umsetzung sind im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

### 3.2.1 Kegelschnitte

Basierend auf [wid2] wird folgende Geometriefunktion eines allgemeinen Kegelschnittes verwendet (Formel 7), welche eine Variation der bereits vorgestellten allgemeinen Scheitelgleichung der Kegelschnitte darstellt (siehe Formel 5 und Formel 6).

$$x^2(z) + (1 - e^2(z))(y(z) - y_s(z))^2 - 2R_s(z)(y(z) - y_s(z)) = 0 \quad (7)$$

**Formel 7: allgemeiner Kegelschnitt, Grundfunktion**

Mit:

- e numerische Exzentrizität, entsprechend den vorherigen Kapiteln
- R<sub>s</sub> Scheitelradius des Kegelschnittes
- y<sub>s</sub> Scheitelabrückung (in x=0)
- x, y Koordinaten des aktuellen Punktes
- z Höhe des aktuellen Sperrenhorizontes



### 3.2.2 Geometrieabbildung

Der für diese Arbeit weiterentwickelte Geometriekern weist als Grundbaustein den Kegelschnitt nach vorgenannter Definition auf. Durch die jeweiligen Parameterwerte  $x_s$ ,  $y_s$ ,  $R_s$ ,  $e^2$  und  $d_s$  werden die wichtigsten Abmessungen und die konkrete Form beschrieben. Dies ergibt den Prototyp eines „Sperrerbogens“.

Je Horizont lässt das Modell die Aneinanderreihung von mehreren Sperrerbögen zu. Durch die Abfolge der Bögen mit entsprechender Einschränkung der Ausdehnung in Hinblick auf die Dicke und den Rand entsteht ein „Sperrerbhorizont“.

Zur Anwendung kommt das Prinzip der Mittelflächendefinition, d.h. ausgehend von einer theoretischen „Mittelfläche“ wird im gleichen Maße zur Wasser- und Luftseite die Sperrerdicke addiert. Daraus entsteht die tatsächliche „Sperreroberfläche“ (Abbildung 21). Alternativ kann mittels Definition beider Oberflächen die Dicke im Anschluss daran ermittelt werden, was aber in dieser Arbeit nicht durchgeführt wird. Eine zweifache Oberflächendefinition wäre bei der Erstellung der Routinen zur Sensitivitätsanalyse ein erheblicher Mehraufwand im Vergleich zur Mittelflächendefinition gewesen.

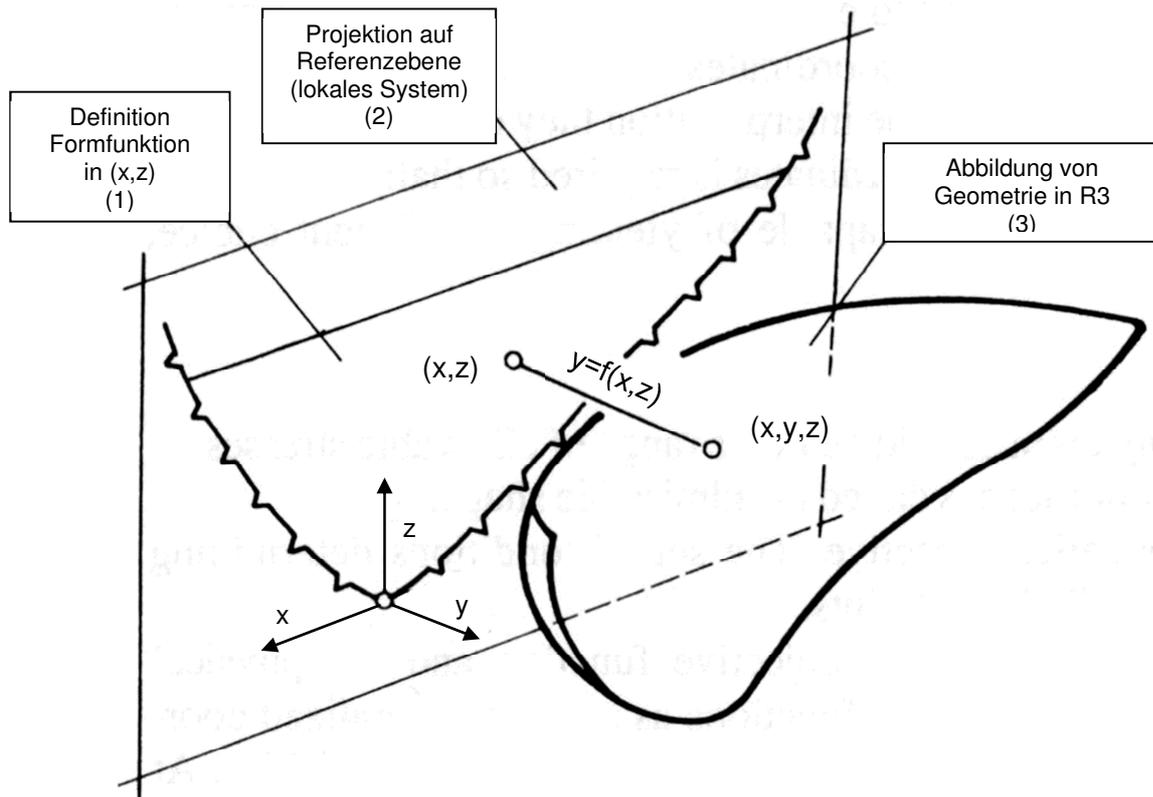
Der einfache Sperrerbhorizont wird mittels zusätzlicher Parameter zur Translation, Rotation, genaue Definition der Verdickung der Widerlager und entsprechende Interpolationseinstellungen vervollständigt.

Durch die tangentielle Aneinanderreihung von Bögen kann das in der Vergangenheit oftmals geläufige Modell der Korbbögen realisiert werden.

Durch die freie Wahl der Kämpferverstärkung, hinsichtlich der Dicke, der Verziehungslänge und der Dickenentwicklung, kann die genaue geometrische Definition gesteuert werden. Hinzu kommt die Möglichkeit diese Verstärkung am Auflager asymmetrisch über die Mittelfläche zu verteilen. Dadurch kann die Steifigkeit im Bereich der Sperrerauflager gezielt gesteuert werden.

Eine Sonderform der Geometriemodifikation stellt die Translation und/oder Rotation einzelner Sperrerbhorizonte dar. Bei Definition einer Abbildungsfunktion werden die entsprechenden Horizonte gedreht und/oder verschoben. Dadurch kann die Gewölbesperre bei Erfordernis horizontweise an die Talform fein angepasst werden.

Das Konzept der Abbildungsfunktion des definierten Geometriemodells kann wie in Abbildung 21 spezifiziert werden. Ausgangspunkt ist die Festlegung einer zweidimensionalen Formfunktion (1), welche hier die vorgestellte Kegelschnittsfunktion darstellt. Mittels der lokalen Bezugshöhe und der Talbreiten wird die eigentliche Talsperrengometrie festgelegt. Die Referenzebene (2) stellt die Arbeitsebene zur Geometriemodellierung dar. In der Regel wird die räumlich gekrümmte Geometrie und stellenweise auch eine vereinfachte Talform auf solch eine Ebene oder Zylinderabwicklung projiziert, welche gleichzeitig auch das lokale Sperrerkkoordinatensystem darstellt. Um die schlussendliche Abbildung des zweidimensionalen Konzepts in den dreidimensionalen Raum zu vollziehen, wird mittels spezifischer geometrischer Funktionen ein Übergang vom  $R_2$  in den  $R_3$  vollzogen. Diese Abbildungsfunktionen berücksichtigen neben der Einpassung in das jeweilige geodätische Koordinatensystem auch mögliche Translationen und Rotationen zur lokalen Anpassung an die Talform. Das nunmehr dreidimensionale Sperrerbmodell stellt die tatsächlich erstellte Sperrereingometrie im  $R_3$  Raum dar (3).



**Abbildung 21: Abbildung in R3 der Talsperre, Sperrengeometrie, aus [prisc1]**

Das Geometriemodell weist im Überblick folgende Haupteigenschaften auf:

- horizontweise Definition der Bogenform
- zusammengesetzte Bögen je Horizont (Korbbögen)
- symmetrische und unsymmetrische Geometrieformen
- Verlängerung der Geometrie (eigentliche Bögen oder Geraden)
- Interpolation Zwischenhorizonte
- Kämpferverstärkung (Funktion, Dicke, Seite/Verschiebung)
- Verdrehung und Verschiebung im globalen Koordinatensystem

### 3.2.3 Österreichische Talsperren

Beispielhaft werden nun die Talsperren Zillergründl, Kölnbrein und Schlegeis hinsichtlich der vorgenannten Geometrieparameter dargestellt. Begleitend wird zum ersten Beispiel der Sperre Zillergründl die Darstellung der Geometrieparameter näher erläutert und eine zusammenfassende Geometrieansicht eingeführt.

#### 3.2.3.1 Zillergründl

Die Formgebung der Sperre Zillergründl ist in Tabelle 4 mit der Einreichgeometrie dargestellt. Die Spalten der Tabelle entsprechen den Geometriefaktoren aus Kapitel 3.2.1.

Z	Ys	Rs	e <sup>2</sup>	Xs	Xk	Ds	Dk
0	40,000	240,000	1,00000	149,00	220,00	6,000	6,000
20	32,173	210,092	0,91188	133,00	203,79	11,151	13,353
40	26,651	186,320	0,82983	117,00	187,52	14,835	20,510
60	23,066	166,523	0,75551	101,00	171,15	17,507	27,309
80	21,186	149,602	0,69133	85,00	154,64	19,623	33,413
100	20,861	134,902	0,64090	69,00	137,85	21,635	38,192
120	22,000	122,000	0,61000	53,00	120,50	24,000	41,000
136	23,931	112,771	0,60591	40,20	105,66	26,451	41,897
152	26,760	104,389	0,63000	27,40	88,50	29,651	42,000
164	29,474	98,603	0,67706	17,80	71,53	32,682	41,756
176	32,704	93,212	0,76618	8,20	47,50	36,364	41,339
181	34,206	91,075	0,23306	4,20	22,40	38,113	40,670
186	35,800	89,000	0,20000	0,20	1,00	40,000	40,000

**Tabelle 4: Zillergründl, Einreichgeometrie**

Die Mauerhöhe beträgt 186m (unterster Wert der Spalte „z“, Kronenhöhe = 0, Tiefe unter Krone des letzten Horizontes = 186m). Die Scheitelabrückung „Ys“ beträgt 40m hin zur Luftseite auf Kronenhöhe, und reduziert sich auf rund 20m in rund halber Sperrhöhe (Spalte „Ys“, Höhe z=100). D.h. die Sperrachse im Querschnitt hängt an der Krone um rund 20m im Vergleich zu halber Mauerhöhe über. Der Bogenradius weist 240m an der Krone auf (Spalte „Rs“, Höhe z=0). Die Formgebung ist an der Krone eine Parabel (Spalte „e<sup>2</sup>“, Höhe z=0, e<sup>2</sup>=1), und ändert sich zur Talsohle hin zu einer fast kreisförmigen Ellipse (Spalte „e<sup>2</sup>“, Höhe Z=186m, e<sup>2</sup>=0.2).

Im unteren Drittel (z.B. Horizont 120m) ist eine deutliche Kämpferverstärkung von rund 24m auf rund 41m erkennbar (Spalte Scheitelstärke „Ds“ 24.0m, Spalte Kämpferstärke „Dk“ 41.0m, Differenz = Kämpferverstärkung). Das Maß der Kämpferverstärkung wird symmetrisch zur Wasser- und Luftseite aufgetragen (Mittelflächendefinition).

Nachfolgend sind die Parameter aus der Geometrietabelle zur Übersicht spaltenweise gruppiert aufgetragen. Ausgehend von der Scheitelabrückung Ys wird der Verlauf des

Mittelquerschnittes definiert (

### Scheitelabrückung - Ys

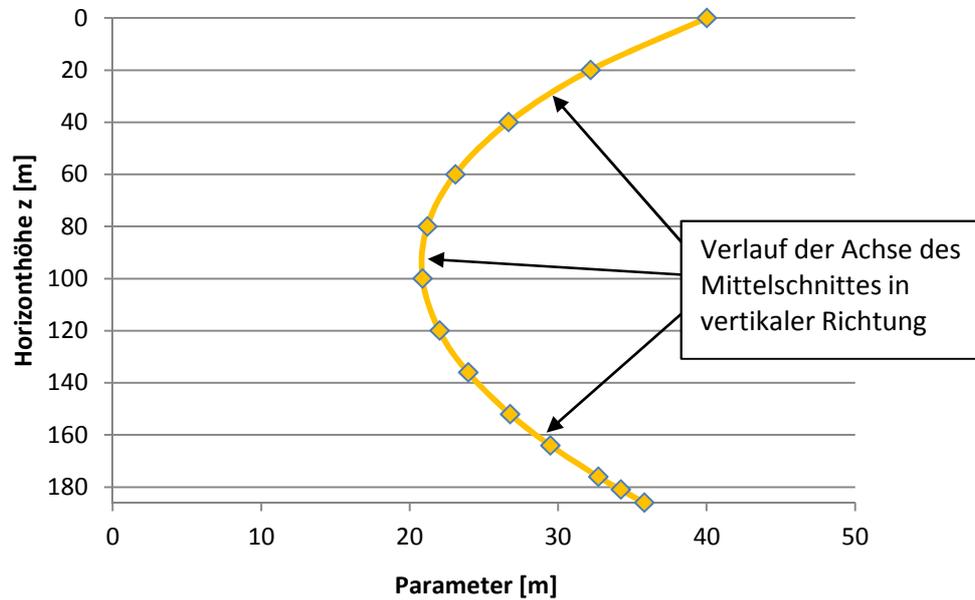


Abbildung 22), d.h. die Scheitelabrückung folgt dem Verlauf der Querschnittsachse im Mittelschnitt ( $x=0$ , oftmals Symmetrieachse).

### Scheitelabrückung - Ys

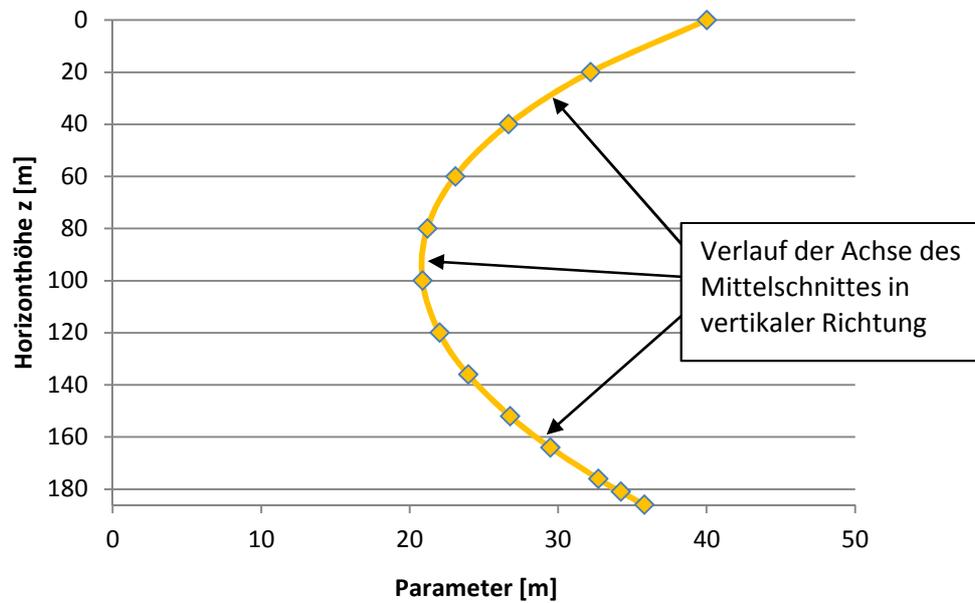


Abbildung 22: Parameter Scheitelabrückung Ys

Durch Ergänzung der Scheitelabrückung  $Y_s$  mit der Scheitelstärke  $D_s$  entsteht der eigentliche Mittelschnitt (

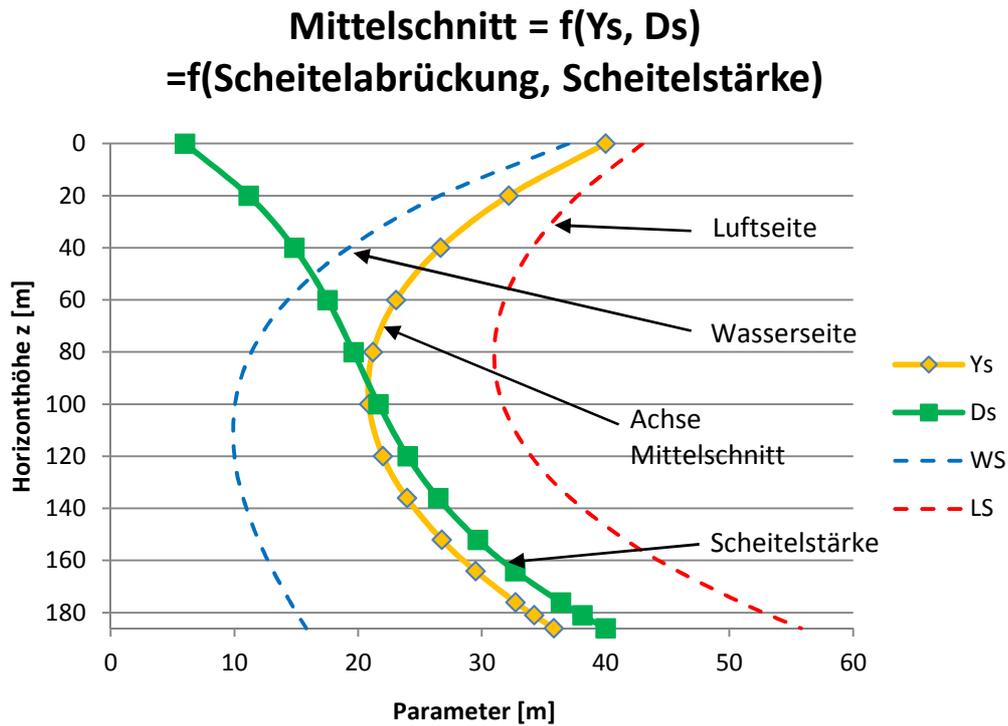
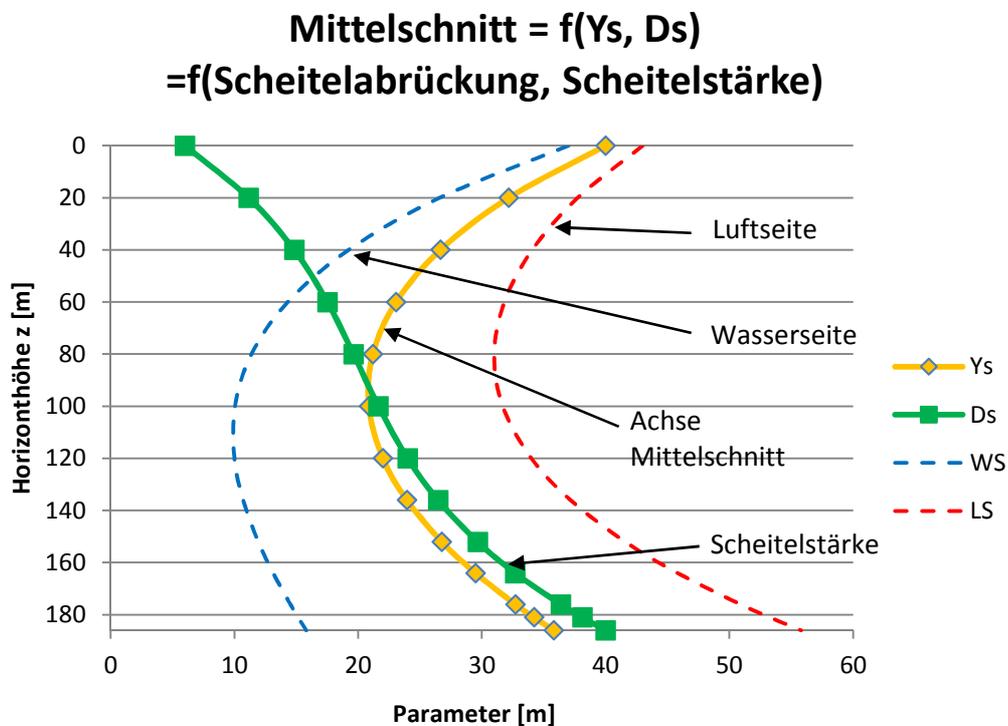


Abbildung 23). Durch Addition der halben Scheitelstärke  $D_s$  zu der Scheitelabrückung entsteht jeweils die Wasserseite „WS“ (blau) und die Luftseite „LS“ (rot).



**Abbildung 23: Mittelschnitt, aus Scheitelabrückung und Scheitelstärke**

Die Gegenüberstellung von der Scheitelstärke  $D_s$  zur Kämpferstärke  $D_k$  gibt den Verlauf der Kämpferverstärkung über die Höhe (Abbildung 24).

### Scheitelstärke $D_s$ , Kämpferstärke $D_k$

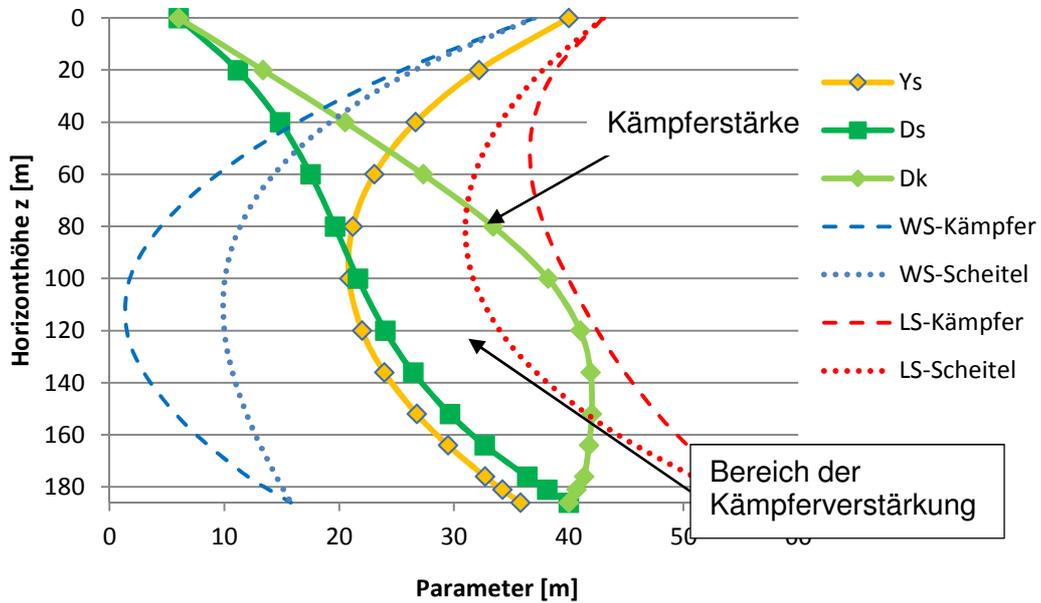


Abbildung 24: Scheitelstärke  $D_s$ , Kämpferstärke  $D_k$ , Kämpferverstärkung

Die Form der Sperre im Grundriss wird durch die Kombination der Parameter Bogenradius  $R_s$  (Abbildung 25) und numerische Exzentrizität  $e^2$  (Abbildung 26) beschrieben.

### Bogenradius - $R_s$

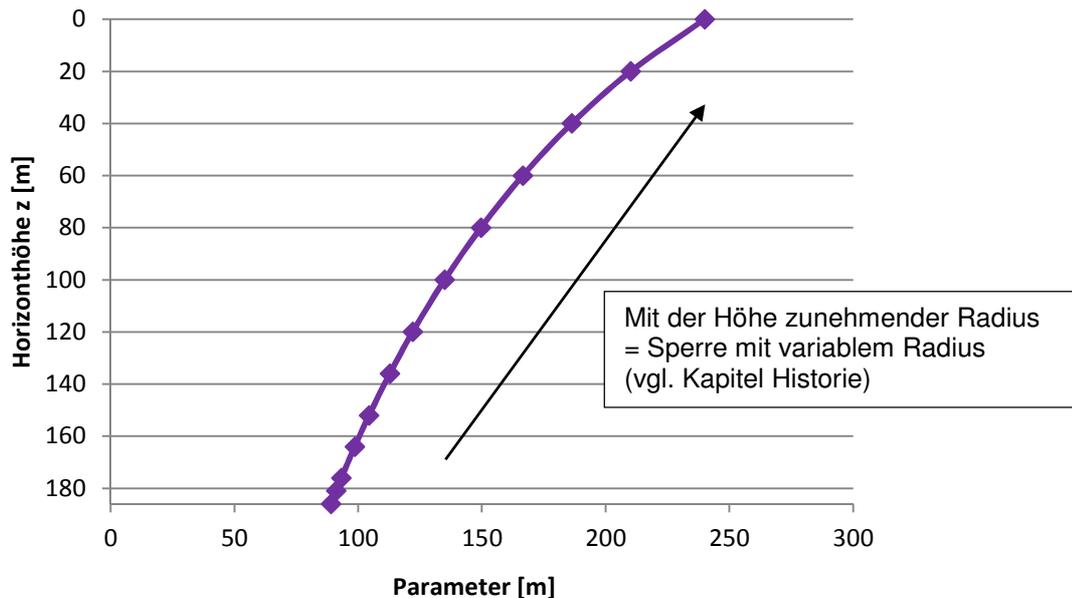


Abbildung 25: Bogenradius  $R_s$

## Numerische Exzentrizität - $e^2$

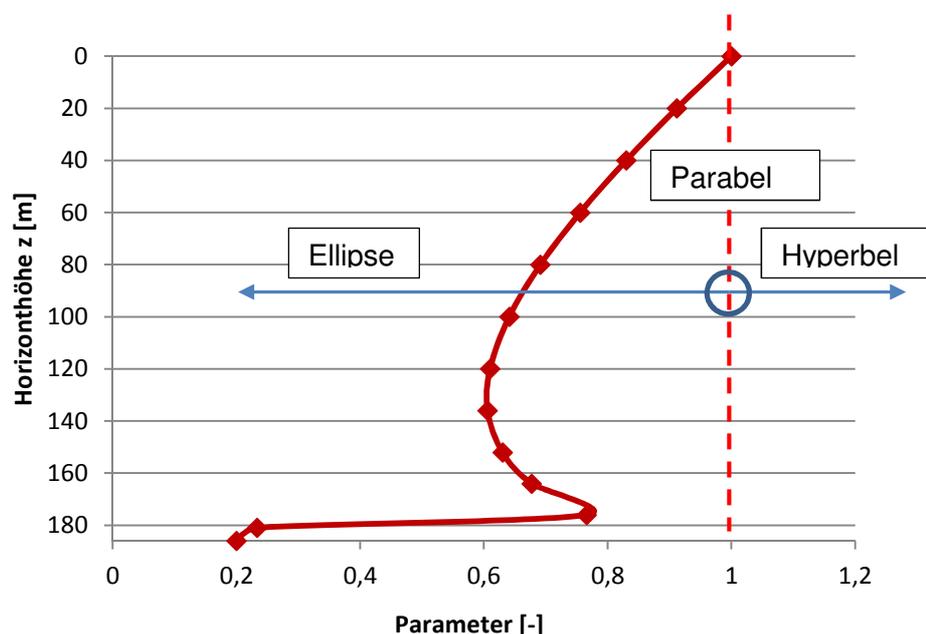


Abbildung 26: Numerische Exzentrizität  $e^2$

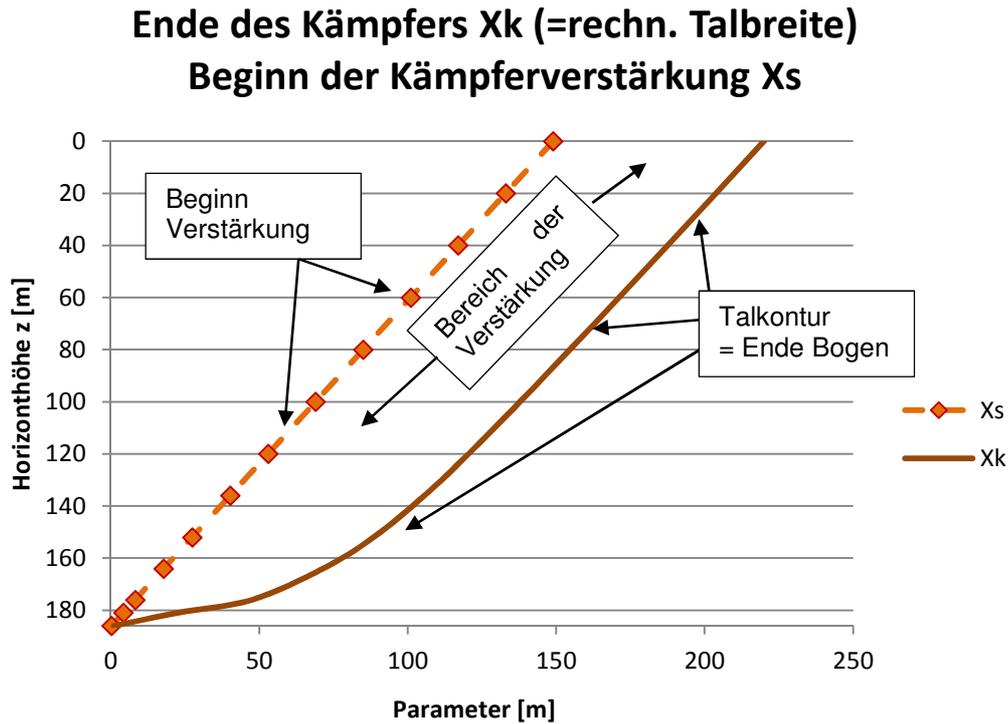
Der in Abbildung 26 oszillierende untere Bereich bei Horizont 180-186m ist in der Ausführungsgeometrie der Sperre begründet, und hat auf die Geometrie keine nennenswerten negativen Auswirkungen. Aus Gründen der Authentizität der Parameter wurde dieser Verlauf unverändert übernommen.

Die letzten beiden noch nicht erwähnten Parameter aus der Geometrietabelle beschreiben die Talbreite bzw. das rechnerische Ende der Kämpfer (Parameter  $X_k$ ) und den Beginn der Kämpferverstärkung bzw. das Ende des Scheitelbereiches (Parameter  $X_s$ ). In einem Diagramm dargestellt ergibt sich die projizierte Ansicht der Talsperre (Abbildung 27).

Die horizontalen Bögen der Sperre (Horizontalschnitte) sind in Abbildung 28 komplett symmetrisch dargestellt, etwaige bauseitige Anpassungen an den Felsaushub sind nicht berücksichtigt. Als Festlegung für die Darstellungen in dieser Arbeit werden folgende Farbkodierungen verwendet:

- Wasserseite = blau
- Luftseite = rot
- Gegebenenfalls Mittelfläche = gelb

In Abbildung 29 sind die Vertikalschnitte der Sperre Zillergründl dargestellt. Die Zuordnung der Schnittlage zum Grundriss erfolgt nach folgendem Prinzip: der Schnittpunkt der Schnittrichtung mit der Kronenbogen-Mittelachse dient zur Lageplatzierung der aus der Schnittebene in die Projektionsfläche gedrehten Schnittdarstellung. Der Mittelschnitt der Sperre weist wie aus der Parametertabelle ersichtlich (Tabelle 4, Spalten Scheitelabrückung „ $Y_s$ “ und Scheitelstärke „ $D_s$ “) ein schlankes Profil auf. Die Randblöcke in den äußeren Dritteln weisen immer noch deutliche Vertikalkrümmung auf, und begünstigen dadurch die Vorkompression durch das Eigengewicht. Die Randblöcke sind von guter Standfestigkeit im Sinne des wasserseitigen Überhanges.



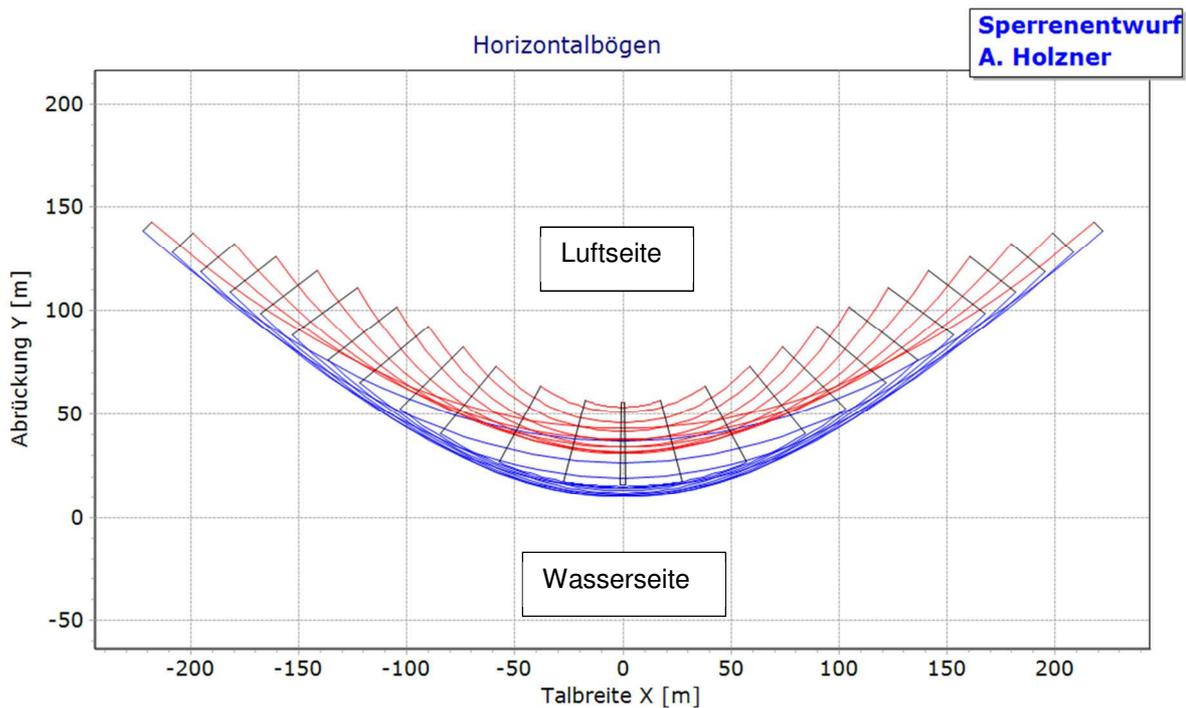
**Abbildung 27: Ende des Kämpfers Xk, Ende des Scheitelbereiches Xs = Beginn der Verstärkung**

In der Zusammenfassung der Entwurfswerte sind die einzelnen Parameterwerte der Kegelschnitte dargestellt (Abbildung 30). Diese Abbildung kombiniert die vorher dargestellten Abbildungen zu einer Übersichtsdarstellung. Zusätzlich sind die Vertikalspannungen für Eigengewicht im Mittelschnitt (blau) und die Bogenspannung nach Zylinderformel (pink, siehe Kapitel 3.3 Vorentwurf) dargestellt.

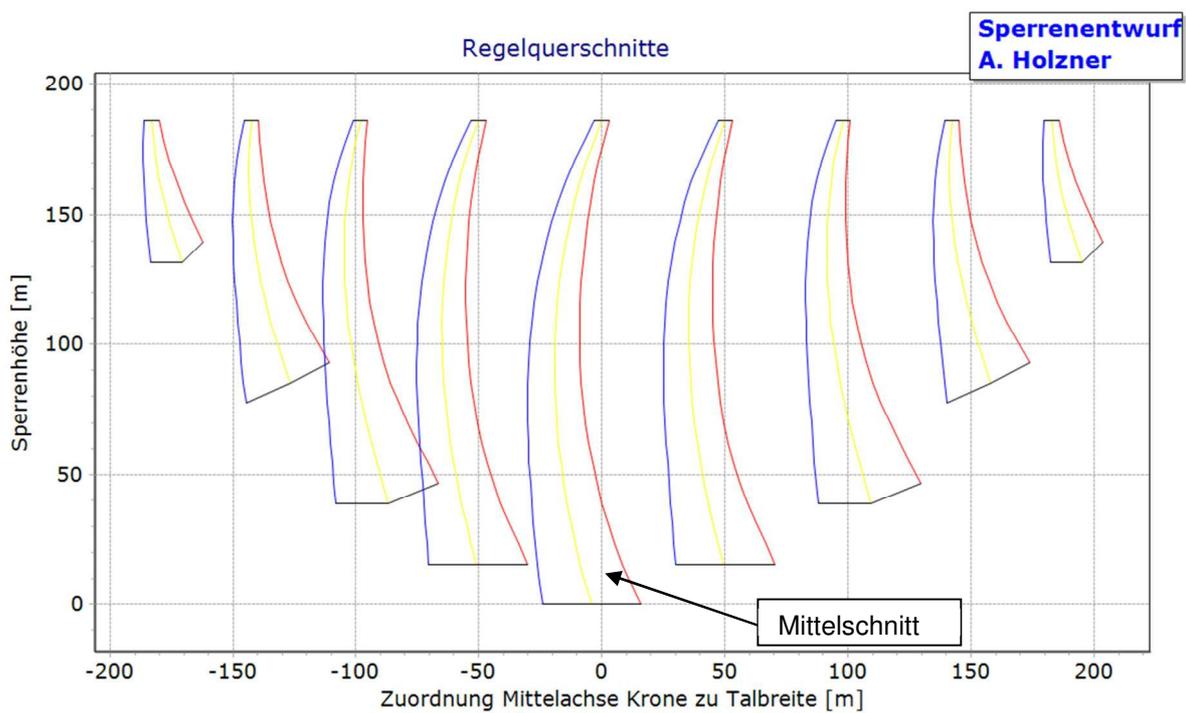
Deutlich ist im linken Bereich der Grafik die Verstärkung der Kämpfer im Vergleich zu den Mittelschnittstärken zu sehen. Das Maß der Länge der Kämpferverstärkung im Vergleich zur Talbreite ist über weite Teile der Sperrenhöhe als konstant anzusehen.

Die Bogenspannung (= Zylinderspannung in Horizontalrichtung, „entlang des Bogens“), ermittelt aus einer Näherungsberechnung, gibt einen Richtwert von rund  $7\text{N/mm}^2$  im mittleren Wandbereich.

Die Änderung der Bogenform über die Höhe ist als ausgewogen zu bezeichnen, die Ursache für den un stetigen unteren Bereich ist in der Interpolation der Verläufe und Wertanpassungen zu finden. Die Proportionen der Sperre können zusammenfassend als sehr ausgewogen bezeichnet werden, d.h. die Parameterverläufe zeigen keine Extremwerte und die angegebenen Näherungsberechnungen ergeben ein in der Talsperrenstatik übliches Spannungsniveau.



**Abbildung 28: Zillergründl, Grundriss, Bögen**



**Abbildung 29: Zillergründl, Regelquerschnitte**

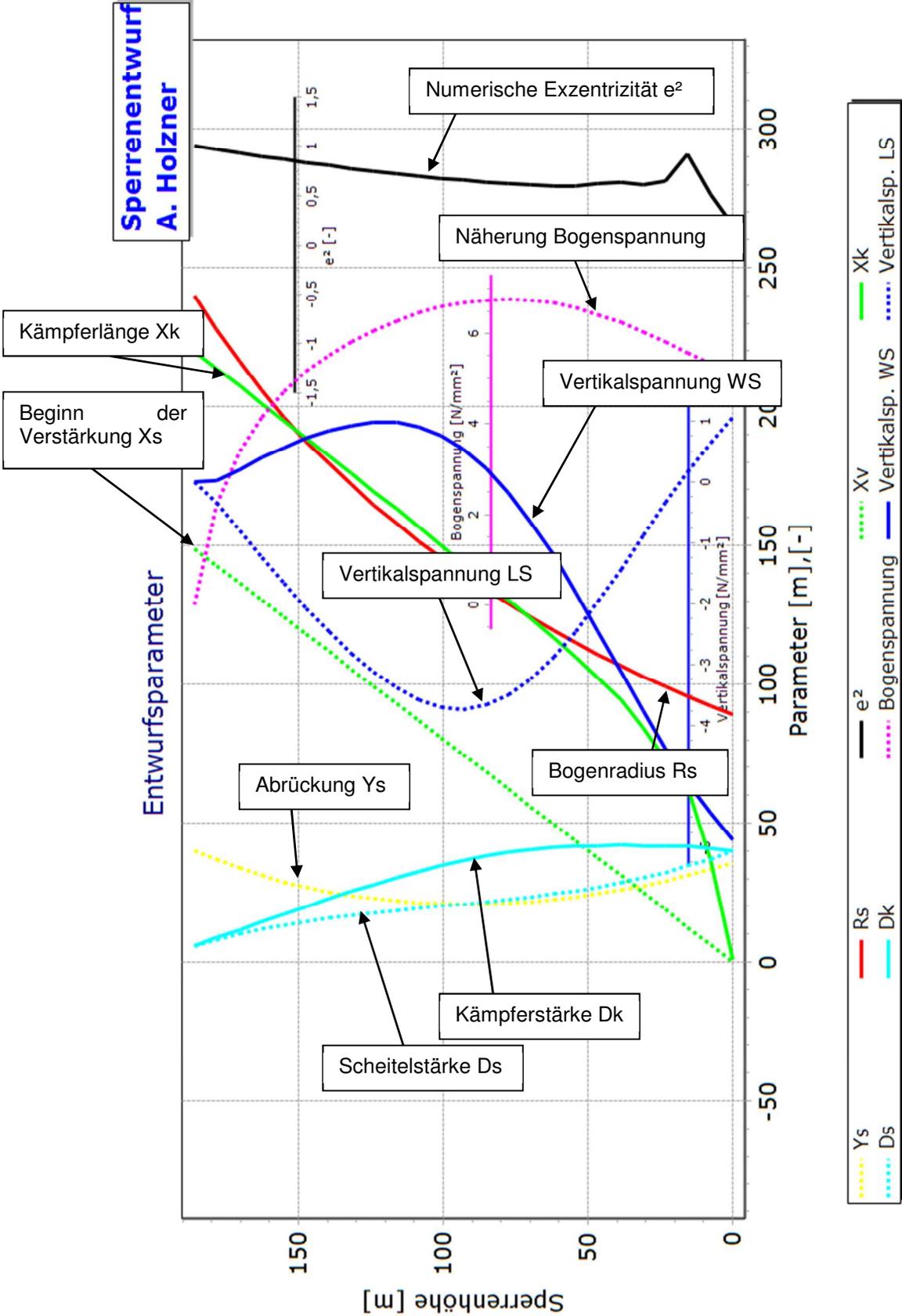


Abbildung 30: Zillergründl, Parameterübersicht

### 3.2.3.2 Kölnbrein

Nachfolgend ist die Parametertabelle der Sperre Kölnbrein dargestellt (Tabelle 5). Die Einreichgeometrie stellt eine Sperre mit einer Höhe von 200m dar (unterste Zeile der Spalte „Z“).

Der Bogenradius an der Krone beträgt rund 250m (Spalte „Rs“, erste Zeile z=-2.3m). Im Gegensatz zur vorher erläuterten Sperre Zillergründl ist der obere Kronenbogenbereich deutlich als Hyperbel definiert (Spalte „e<sup>2</sup>“, 1.75 > 1, Hyperbel). Erst rund 30m unter der Krone geht der Bogen in eine Parabel (Spalte „e<sup>2</sup>“, Zeile z=26.7m bis z=50.7m, e<sup>2</sup>=1.1 bis 0.68, Übergang Hyperbel-Parabel-Ellipse) über, welche stetig weiter in eine Ellipse übergeht. Im unteren Drittel wird zweimal die Kreisform passiert (Spalte „e<sup>2</sup>“, erster Übergang e<sup>2</sup>=0 bei ca. z=120m, zweiter Übergang e<sup>2</sup>=0 bei z=168m), im dazwischenliegenden Bereich weisen die Bögen die Form einer gedrungenen Ellipse auf (Spalte „e<sup>2</sup>“, Werte kleiner 0).

Im unteren Drittel (z=150m bis z=200m) ist wieder eine deutliche Kämpferverstärkung von rund 30m (Spalte Scheitelstärke „Ds“) auf rund 42m (Spalte Kämpferstärke „Dk“) sichtbar.

Z	Ys	Rs	e <sup>2</sup>	Xs	Xk	Ds	Dk
-2,3	31,125	251,086	1,75160	261,00	261,08	7,530	7,530
26,7	20,009	236,870	1,10499	219,75	234,87	13,120	14,370
50,7	14,892	224,119	0,67998	185,37	213,14	16,960	20,020
74,7	12,524	210,298	0,36215	150,99	191,36	20,180	25,550
104,7	12,558	191,261	0,07346	108,03	163,96	23,630	32,150
128,7	14,494	174,442	-0,09108	73,69	141,71	26,230	36,890
152,7	17,815	156,099	-0,09503	40,73	118,38	29,270	40,490
164,7	19,924	146,343	-0,00864	29,94	105,01	30,970	41,400
170,7	21,081	141,319	0,05888	24,83	96,96	31,850	41,490
182,7	23,585	130,983	0,25050	14,64	75,48	33,740	40,690
188,7	24,928	125,674	0,38067	9,56	62,20	34,790	39,750
197,7	27,050	117,537	0,62729	1,94	40,67	36,530	37,650

Tabelle 5: Kölnbrein, Einreichgeometrie

In der nachfolgenden Abbildung ist deutlich der hyperbolische Kronenbogen sichtbar (Abbildung 31). Die Übersicht der Vertikalschnitte zeigt einen sehr schlanken Mittelschnitt (Abbildung 32). Der Überhang im Mittelschnitt an der Krone ist deutlich ausgeprägt. Die Dickenentwicklung entlang der Höhe im Mittelschnitt folgt einem deutlich geringeren Anstieg als bei der Sperre Zillergründl.

Die Blöcke in den Drittelsbereichen sind noch deutlich gekrümmt, um die Wirkung des Eigengewichtes zu steigern. Die äußeren Randblöcke sind deutlich zur Wasserseite hin geneigt.

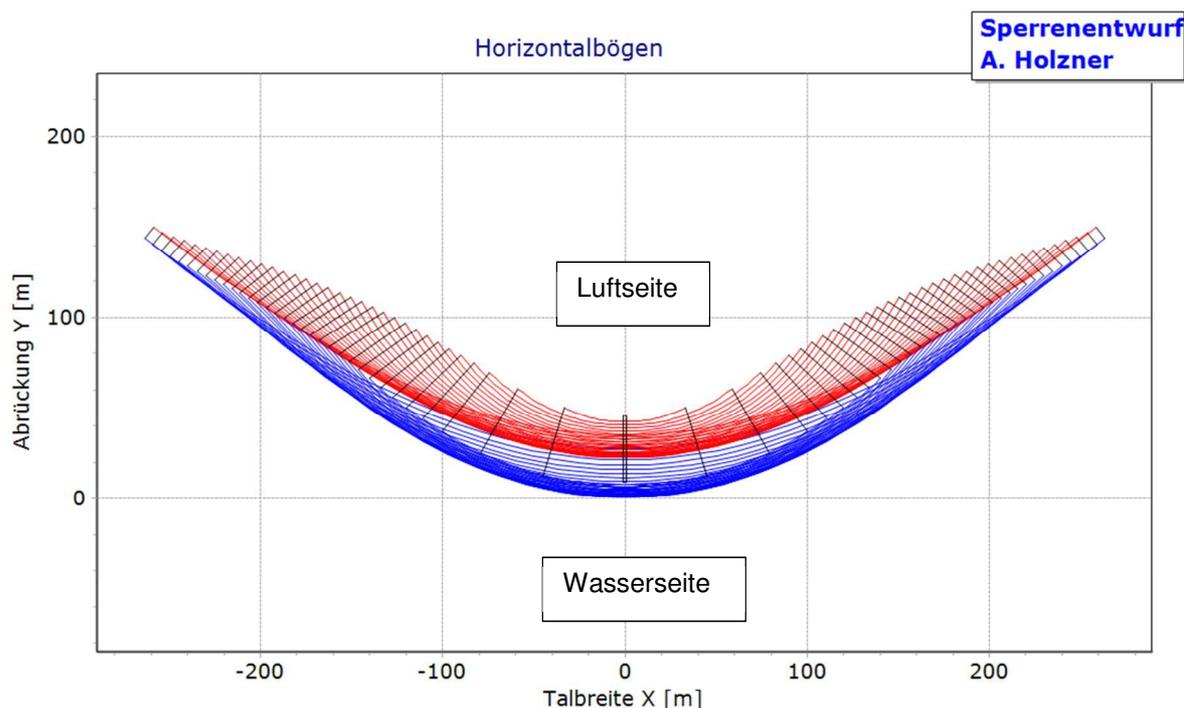


Abbildung 31: Kölnbrein, Grundriss, Bögen

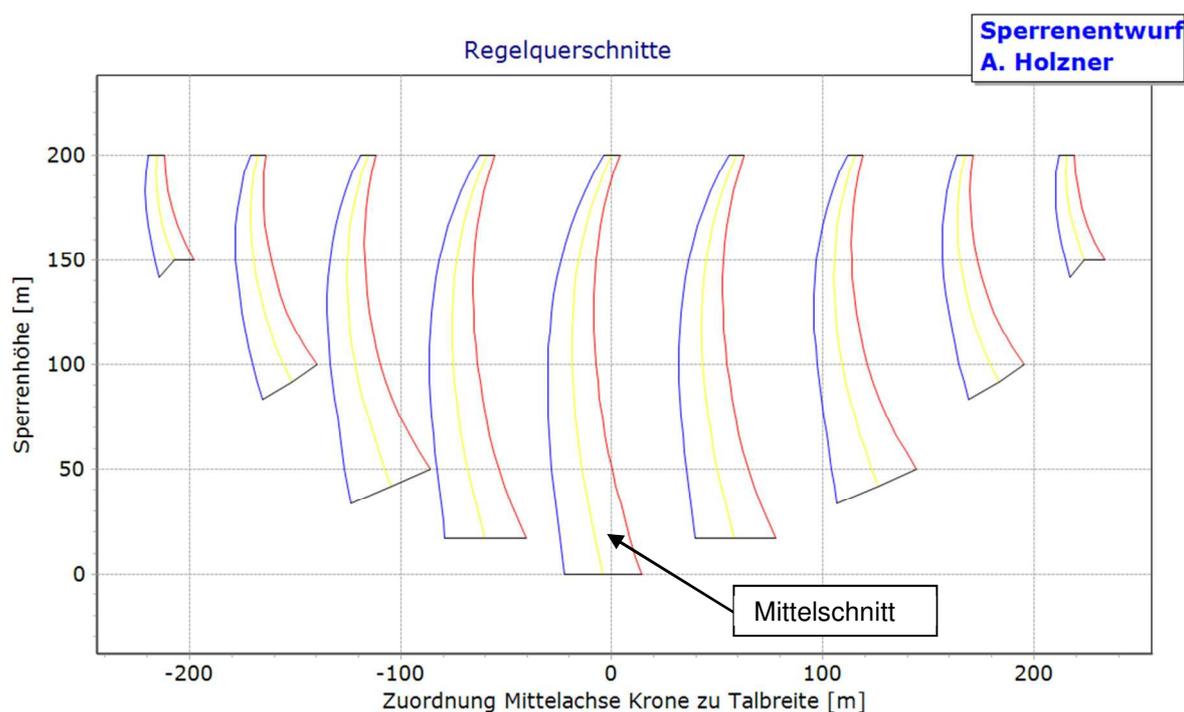
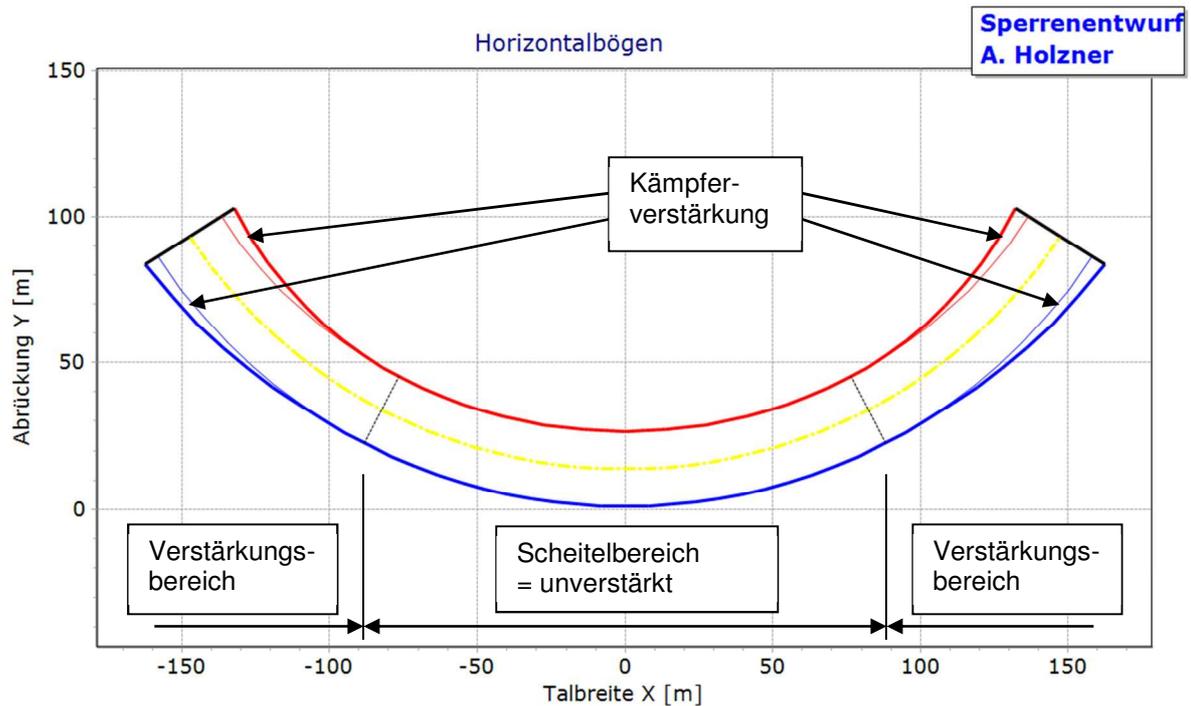


Abbildung 32: Kölnbrein, Schnitte

Auch die massive Kämpferverstärkung ist in den beiden Flankenbereichen ausgeprägt erkennbar. Einen typischen Sperrerbogen samt Darstellung der Verstärkungsbereiche zeigt Abbildung 33, der verstärkte Bereich ist in dicker Linienstärke dargestellt, der bis zu den Kämpfern gehende gedachte Scheitelbereich in dünner Linienstärke.



**Abbildung 33: typischer Bereich der Kämpferverstärkung, Horizont  $z=75\text{m}$**

Die Übersicht der Entwurfparameter (Abbildung 34) zeigt den stark wechselnden Bogentyp von Hyperbel, zu Parabel, über Ellipse und zweimalige Kreispassage im unteren Bereich. Im Gegensatz zur Sperre Zillergründl ist die Kämpferverstärkung nicht so extrem ausgeprägt. Auffällig ist die durch die Näherungsberechnung ermittelte Bogenspannung von rund  $9\text{--}10\text{N/mm}^2$  im mittleren Wandbereich.

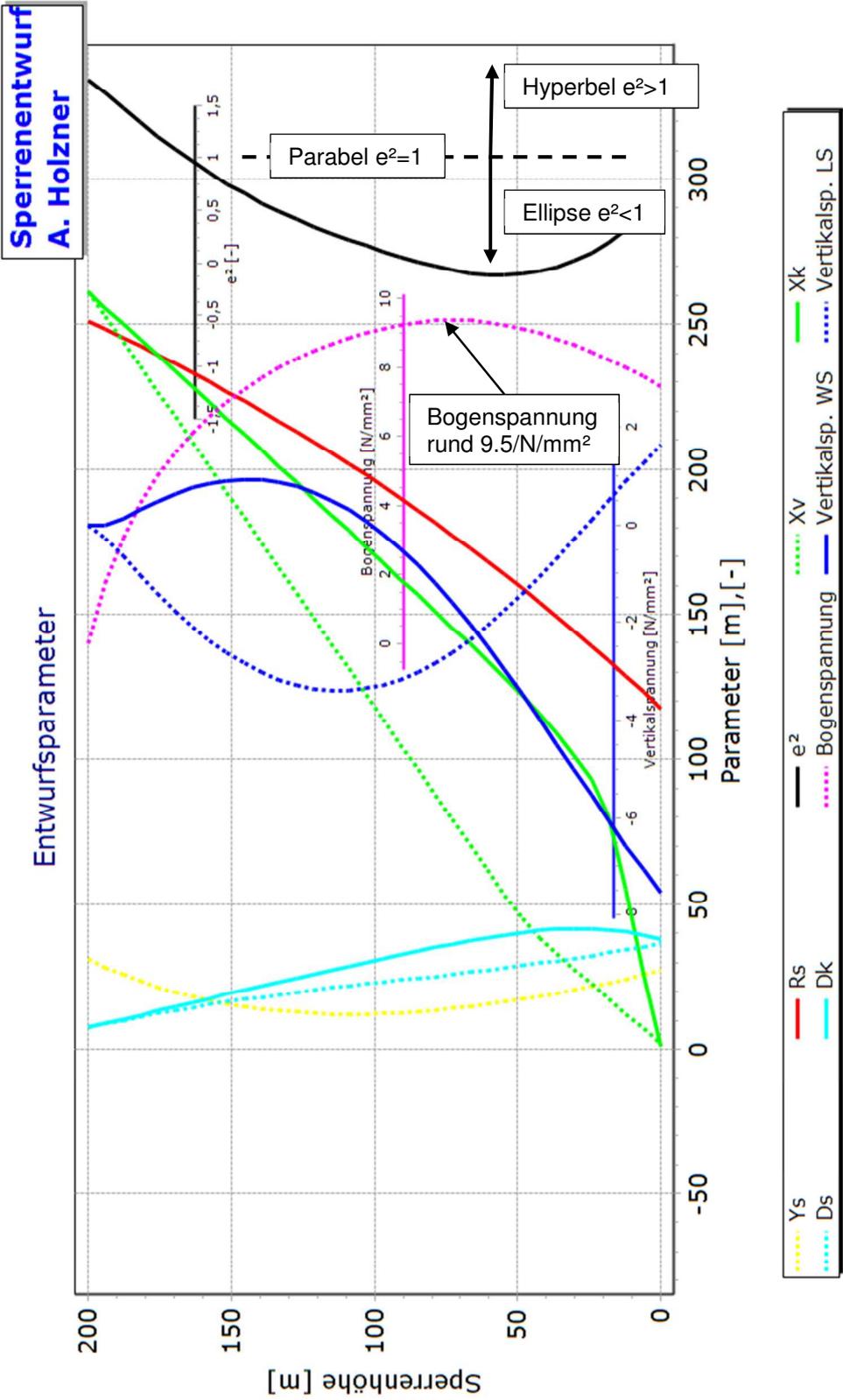


Abbildung 34: Kölnbrein, Parameterübersicht

### 3.2.3.3 Schlegeis

Die Einreichgeometrie der Sperre Schlegeis ist als unsymmetrischer Sperrtyp ausgeführt (Tabelle 6). Die Sperrhöhe beträgt hier rund 130m, der Bogenradius an der Krone ist mit rund 220m definiert. Um der weitgespannten und unsymmetrischen Talform zu genügen, wurde die Sperre links- und rechtsseitig mit unterschiedlichen Bogenformen ausgeführt. Die orografisch linke Hälfte hat an der Krone eine Parabel als Form, die orografisch rechte Seite weist eine elliptische Form auf. Beide Seiten nehmen im Rahmen des  $e^2$  nach unten hin in Richtung der Ellipse ab. Die Kämpferverstärkung ist deutlich ausgeprägt, fällt aber im Verhältnis zum breiten Tal und im Vergleich zur Sperre Zillergründl nicht übermäßig aus.

Z	Ys	Rs	$e^2$	Xs	Xk	Ds	Dk
0,0	20,000	222,510	1,08000	208,00	249,50	9,000	9,000
22,0	12,385	208,382	0,85452	190,69	229,09	13,456	16,825
40,0	9,161	196,133	0,68853	158,86	206,05	16,617	20,921
61,0	8,216	180,255	0,54402	100,02	171,46	19,334	24,199
82,0	9,954	161,024	0,46325	43,14	133,02	21,956	27,505
100,0	13,430	140,604	0,40464	15,28	92,45	25,122	30,446
112,0	16,737	125,109	0,36838	6,30	58,87	28,166	32,107
121,0	19,738	112,773	0,34365	2,54	30,19	30,971	33,108
130,0	23,190	100,000	0,32000	0,00	0,00	34,000	34,000
0,0	20,000	222,510	0,70000	252,00	312,50	9,000	9,000
22,0	12,385	208,382	0,69356	228,75	281,95	13,456	16,825
40,0	9,161	196,133	0,68754	188,60	252,07	16,617	20,921
61,0	8,216	180,255	0,67846	117,37	205,59	19,334	24,199
82,0	9,954	161,024	0,66137	51,46	146,80	21,956	27,505
100,0	13,430	140,604	0,60783	19,07	97,35	25,122	30,446
112,0	16,737	125,109	0,51174	8,22	61,39	28,166	32,107
121,0	19,738	112,773	0,41893	3,43	31,37	30,971	33,108
130,0	23,190	100,000	0,32000	0,00	0,00	34,000	34,000

**Tabelle 6: Schlegeis, Einreichgeometrie**

Die nachfolgende Darstellung der Bögen zeigt sehr deutlich die unsymmetrische Talform (Abbildung 35). Die orografisch rechte Sperrenseite ist sehr weit gespannt im Vergleich zur linken Sperrenseite. Die Bögen geben ein harmonisches Bild und zeigen eine sehr ausgewogene Talsperre.

Ähnlich stellt sich die Situation in den Vertikalschnitten dar (Abbildung 36). Die Krümmung im Mittelschnitt ist sehr deutlich, um die Wirkung des Eigengewichtes zu verstärken. Die Randblöcke in den Drittelpunkten weisen immer noch deutliche Vertikalkrümmung auf. Die weiter außen liegenden Blöcke zeigen einen leichten Überhang hin zur Wasserseite. Die Dicke an der Krone im Mittelschnitt ist im Verhältnis zur Höhe deutlich größer als bei den beiden vorher beschriebenen Talsperren.

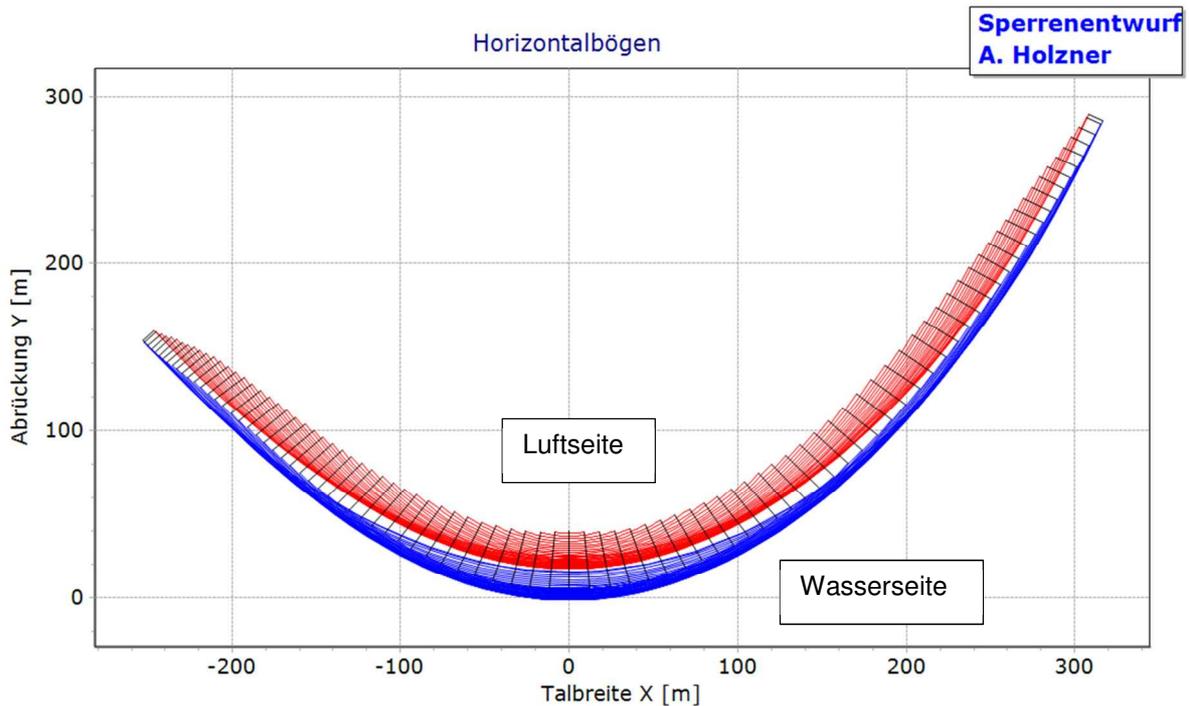


Abbildung 35: Schlegeis, Grundriss, Bögen

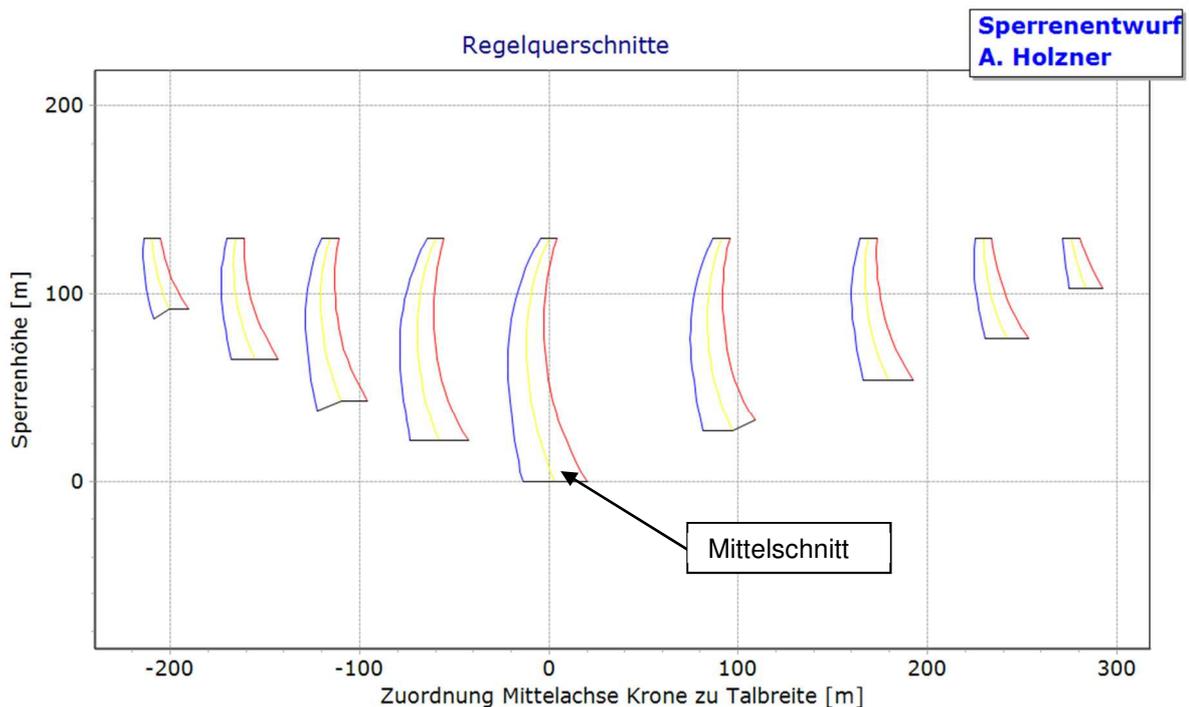


Abbildung 36: Schlegeis, Schnitte

In der Zusammenstellung der Entwurfsparameter ist eine Gewichtung der Kämpferverstärkung im unteren Drittel erkennbar (Abbildung 37). Im Vergleich zur Dicke des Mittelschnittes und den beiden vorher beschriebenen Talsperren fällt die Verstärkung geringer aus. Deutlich erkennbar sind auch die beiden sehr unterschiedlichen Flankenbreiten. Die näherungsweise Bogenspannung liegt rechnerisch bei rund  $6.5\text{N/mm}^2$ . Der Verlauf der Bögen ist unauffällig und ausgewogen.

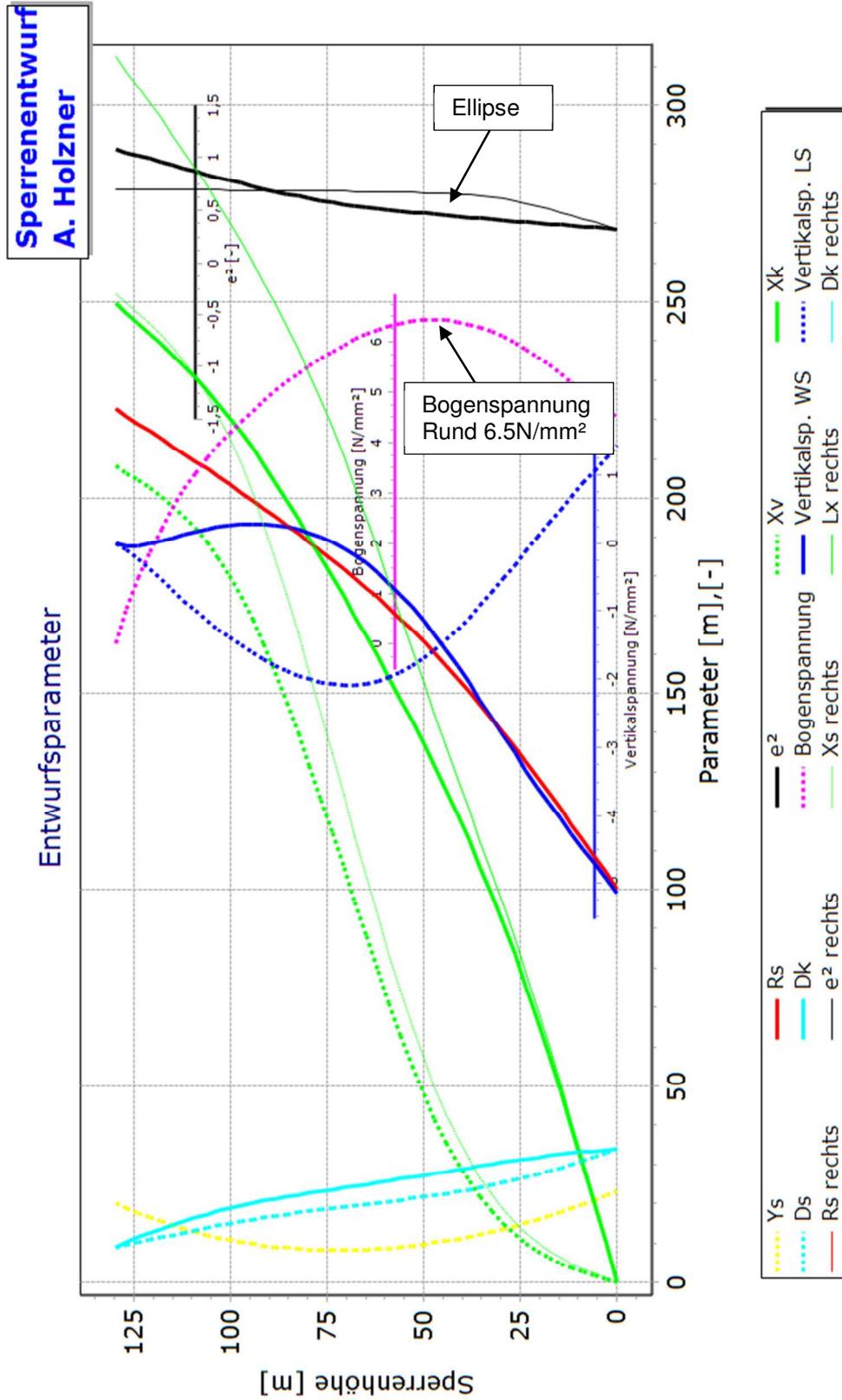


Abbildung 37: Schlegeis, Parameterübersicht

### 3.3 Vorentwurf

Im Gegensatz zu Gewichtsmauern, bei welchen die Lastabtragung aus Wasserlast mit entsprechender Auflast sichergestellt wird, tragen Gewölbesperren primär in einer anderen Weise. Bei Gewölbesperren ist die Form selber ausschlaggebend für eine möglichst kontinuierliche Weiterleitung der Wasserlast in den umgebenden Felsuntergrund. Der Felsuntergrund ist hier von zentraler Bedeutung, da die lokale Situation entsprechend der Geologie Abweichungen von einer (in statischen Sicht) optimalen Formgebung erzwingen kann.

Grundlegend trägt eine Gewölbemauer über eine möglichst gleichmäßige Druckspannungsverteilung im Gewölbe unter Vermeidung von Biegebeanspruchung, und somit hängt die Tragfähigkeit in erster Linie von der maximal zumutbaren bzw. möglichen Druckspannung des Betons ab. Durch entsprechende Formgebung der Sperre wird die Verteilung und Größe dieser Druckspannungen gesteuert. Das trifft sowohl für den Krümmungsradius im Grundriss zu, welcher über die Höhe entsprechend dem Wasserdruck angepasst sein soll. Andererseits ist auch in der vertikalen Krümmung der Sperre eine Anpassung des Eigengewichtszustandes an die zu erwartenden Spannungen aus Wasserlast vorzunehmen (=Überdrückung aus Eigengewicht).

Um einen ersten Ausgangswert für die Talsperrenplanungen zu erhalten, stehen sogenannte Vorentwurfsformeln zur Verfügung. Diese geben für charakterisierende Talformen einen aus empirischen oder analytischen Studien entwickelten Formquerschnitt der Talsperre zurück. Dieser Formquerschnitt ist als erster Anhaltspunkt für die spätere Weiterverarbeitung zu sehen. Die bekanntesten Vorentwurfswerte stammen wohl aus [usace1, usbr2], welche beginnend von zwei charakterisierenden Talbreiten und der Sperrenhöhe (Abbildung 38) die Radien und Querschnittswerte ermitteln (Abbildung 39).

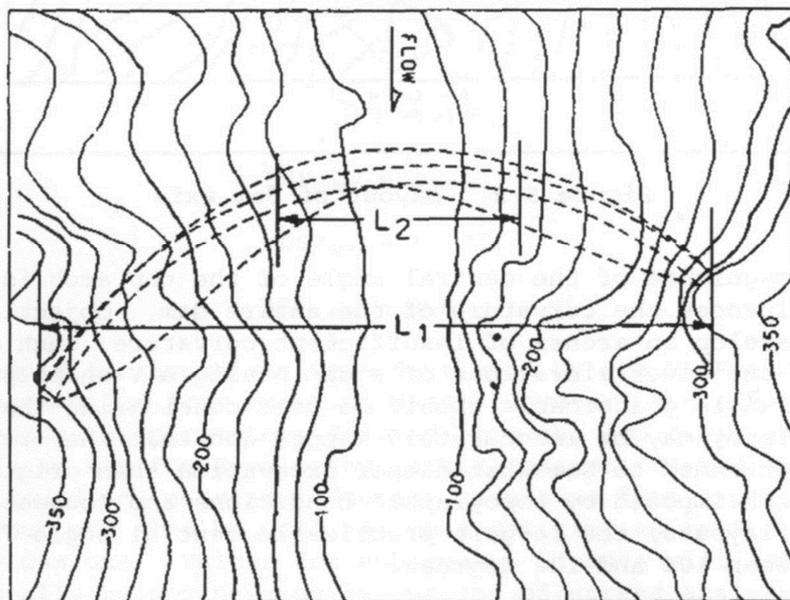


Abbildung 38: Charakteristische Werte, Talform, aus [usace1]

Mit:

- H Höhe der Talsperre
- $L_1$  Talbreite auf Kronenhöhe
- $L_2$  Talbreite auf  $0.15 H$

können wie folgt die grundlegenden Abmessungen ermittelt werden (Formel 9):

$$R_{\text{Achse,Krone}} = 0.6L_1 \quad (9)$$

Formel 9: Kronenbogenradius, nach [usace1]

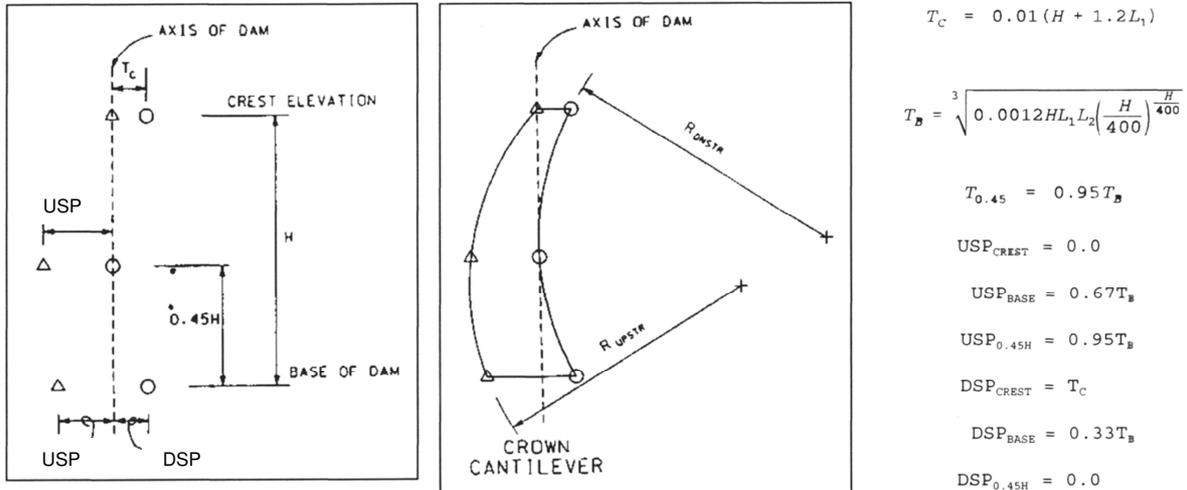


Abbildung 39: Querschnittswerte, Vorentwurf, aus [usace1]

Ebenso kann überschlägig aus den Talbreiten und der Sperrenhöhe ein erster Wert für das Volumen der Talsperre errechnet werden (Formel 10).

$$V = 0.000002H^2L_2 \frac{(H + 0.8L_2)}{L_1 - L_2} + 0.0004HL_1[H + L_1] \quad (10)$$

Formel 10: Abschätzung Volumen, nach [usace1]

Zur ersten Abschätzung der für die Dimensionierung wichtigen Bogenspannung in Horizontalrichtung (=Spannung im Horizontalbogen) empfiehlt sich die Verwendung der Ringformel nach Mariotte/Navier (siehe Kapitel 2.5 Historie).

$$\sigma_b = \frac{p \cdot R_w}{d} \quad (11)$$

Formel 11: Ringformel, nach [lins1]

Mit:

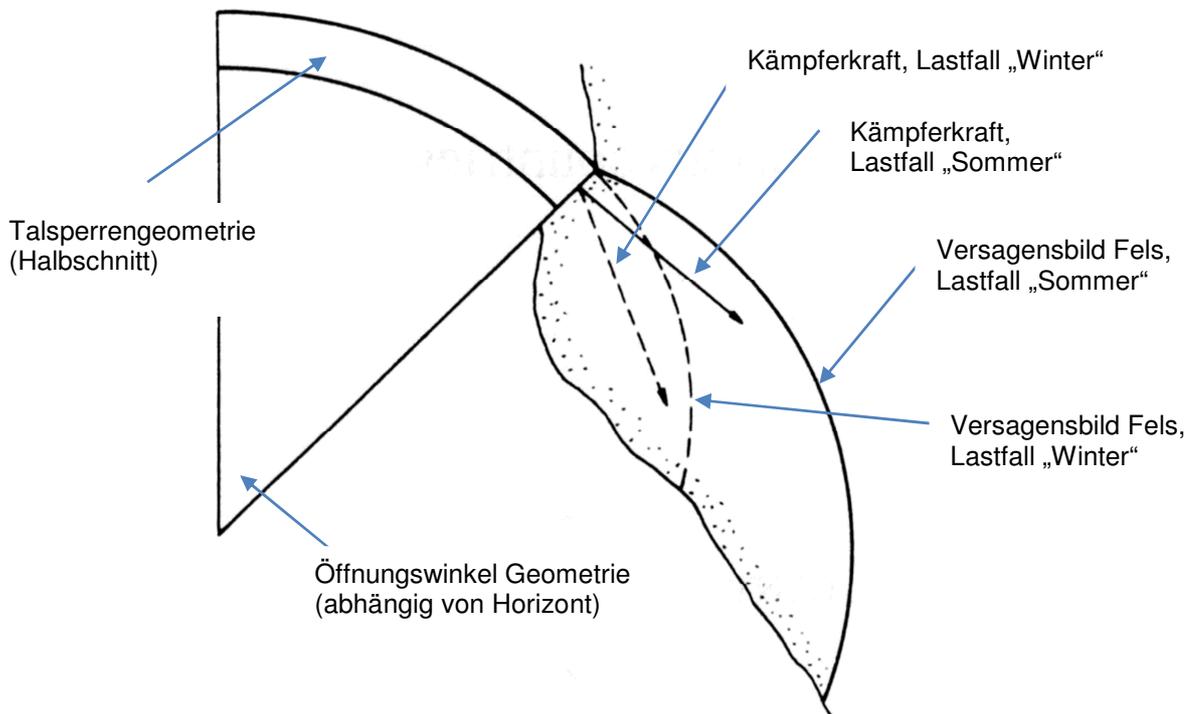
- $\sigma_b$  Bogenspannung (bzw. Spannung in einem kreisförmigen Ring)
- $p$  Wasserdruck
- $R_w$  Bogenradius an der Wasserseite
- $d$  Dicke des Bogens

Zum Öffnungswinkel der Bögen sind Werte von circa 120° bei Kreisbögen, bzw. 80-90° bei Mauern mit variablen Bögen üblich [mart1]. Als Einleitwinkel der Kämpferkräfte, in Bezug zur Bogenachse am Widerlager, kann rund 25-30° bei idealen Bodenverhältnissen angegeben werden, in modernen Entwürfen wird an der Krone ein Einleitwinkel von bis zu 45-50° erreicht. Augenmerk ist auf die räumliche Richtung der Kämpferkräfte zu richten, neben der Richtung im Grundriss ist auch die Lage im Längsschnitt von Bedeutung.

Die Größe der Krümmungsradien sollte mit der Talbreite abgestimmt sein. Etwaige Verlängerungen der Bögen können z.B. bei gedrunghenen elliptischen Formen zu Zwangspunkten in der Planung führen. Wenn aufgrund der starken Krümmung eine, wenn auch nur kleine, Verlängerung der Kontur zu einer tieferliegenden Aushubebene nicht möglich ist, kann der Umplanungsaufwand signifikant ausfallen [holz9].

Im in dieser Arbeit verwendeten Geometrie-Konzept ist neben dem Bogenradius im Scheitel ( $R_s$ ) die bereits erläuterte numerische Exzentrizität „e“ maßgebend, welche den Krümmungszuwachs des Bogens selbst beschreibt. Durch Anpassung der Krümmungszunahme durch „e“ kann einem möglichst homogenen Verformungsbild, und somit auch einer homogenen Spannungssituation, entsprochen werden.

Die Anpassung des Bogenradius resultiert unmittelbar in der Bogennormalspannung und dem Kämpferwinkel zur Lasteinleitung. Je nach Lastfall und jeweiliger Geometrie ergeben sich unterschiedliche Lasteinleitungsbilder in den Untergrund (Abbildung 40). Z.B. erfolgt bei den Temperaturlastfällen im Lastfall „Sommer“ eine mehr in Bogenrichtung geleitete Auflagerkraft als im Lastfall „Winter“. Diese Lasteinleitungswinkel beeinflussen direkt die Standsicherheitsnachweise der Talsperre (Gleiten, Grundbruch). Als erster Schritt empfiehlt sich für den Vorentwurf die Einleitungswinkel der Kämpferkräfte auf rund  $45^\circ$  zu bemessen. Gleichzeitig muss auf die Vertikalkrümmung der Randblöcke Rücksicht genommen werden, um nicht zu starke Überhänge und damit ein Stabilitätsproblem zu generieren.



**Abbildung 40: Stabilität Kämpfer, aus [iida1]**

Die Kämpferverstärkung kann im ersten Schritt auf circa 20-30% der Kronenstärke festgelegt werden, was in den vorgenannten Talsperrenplanungen zu guten Ergebnissen geführt hat. Durch die nun abgeschlossene Festlegung der wichtigsten Geometrie-Kennwerte kann mit der ersten Analyse und Veränderung der Form entsprechend den Randbedingungen begonnen werden.

### 3.4 Prototypsperre

Im Folgenden wird exemplarisch die Geometrie einer Prototyp Sperre entwickelt, welche als Anschauungsobjekt für Berechnungen in späteren Kapiteln dient.

Die Talbreite an der Krone wird mit 400m gewählt, die Sperrenhöhe soll 150m betragen. Ausgehend von den Vorentwurfsformeln aus den vorherigen Kapiteln [usbr2] wird eine Sperrenform entwickelt. Diesem Vorentwurf wird ein Entwurf aus einer Bauwerksdatenbank mit großen österreichischen Talsperren gegenübergestellt, welcher in Anlehnung an die in dieser Arbeit vorgestellten Entwürfe abgeleitet wurde. Das Modell hat zu Gründen der Anschauung eine etwas zu große Kämpferverstärkung. Eine Gegenüberstellung der beiden Entwürfe findet sich in den folgenden Abbildungen (Abbildung 42 bis Abbildung 47).

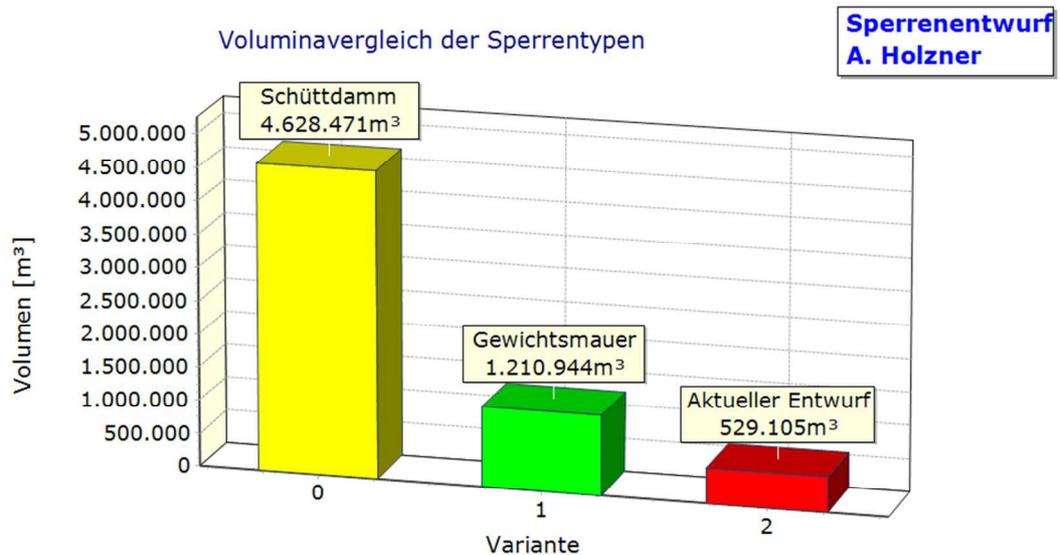
Deutlich sind hier die Abweichungen in der Form der beiden Entwürfe zu sehen. Auffällig ist der Formunterschied sowohl am Mittelschnitt (Krümmungszunahme über die Höhe, Dickenzuwachs über die Höhe, wasser- und luftseitige Krümmung über der Aufstandsfläche), als auch die Horizontalbögen (Kämpferverstärkung und Bogenform im Sinne von der numerischen Exzentrizität „ $e^2$ “). Ausgehend von einer Talform und zwei Vorentwurfsansätzen entstehen zwei grundsätzlich unterschiedliche Entwürfe in Hinblick auf die Formgebung.

Das Modell der Prototypsperre weist eine doppelt gekrümmte Geometrie auf. Der Bogenradius an der Krone liegt bei rund 220m. Die numerische Exzentrizität zeigt an der Krone eine deutliche Hyperbel, welche im oberen Drittel auf eine Parabel übergeht. Die unteren zwei Drittel der Horizonte sind als deutliche Ellipse erkennbar.

Die Kämpferverstärkung ist aus Anschauungsgründen überproportional stark entworfen, die Verstärkung wächst am Maximum von 20 auf 30m Mauerstärke.

Die Bogenspannungen erreichen einen Höchstwert von rund  $7.5\text{N/mm}^2$  in der oberen Mauerhälfte nach der Näherungsformel. Die ausgeprägte Krümmung im Vertikalschnitt erzeugt leichten Vertikalzug an der Wasserseite.

Ein Vergleich des Volumens der Prototyp-Talsperre zu anderen Talsperrenformen (unter Annahme derselben Sperrenstelle im Tal) ist in Abbildung 41 gegeben. Der aktuelle Gewölbesperrenentwurf (Variante 2) resultiert in rund  $530.000\text{m}^3$  Betonvolumen. Zum Vergleich hätte eine Gewichtsmauer (Variante 1) in demselben Tal ein Volumen von  $1.210.000\text{m}^3$ . Ein Schüttdamm (Variante 0) würde das Volumen auf  $4.630.000\text{m}^3$  erhöhen. Dies zeigt sehr deutlich die Schlankheit einer Gewölbesperre im Vergleich zu „massigen“ Sperrbauwerken.



**Abbildung 41: Vergleich der Volumina, Damm/Gewichtsmauer/Gewölbemauer, Prototyp**

Für die nachfolgenden Kapitel wird die Prototyp-Talsperre in dieser Geometriedefinition weiter verwendet. Als Grund dafür wird der bessere Entwurf in Hinblick auf Kämpferverstärkung, Aufstandsfläche und Geometriekrümmung genannt. Detaillierte Auszüge aus der FE Berechnung, wie z.B. Spannungssituationen und Kämpferkräfte, werden bei Erfordernis gesondert dargestellt.

In den nachfolgenden Abbildungen sind mit (+) günstigere und (-) eher ungünstigere Eigenschaften der Entwurfsergebnisse dargestellt und benannt. Es wird damit direkt eine rasche Gegenüberstellung des „Usbr“ Vorentwurfes und der in dieser Arbeit erstellten „Prototyp“-Talsperre ermöglicht.

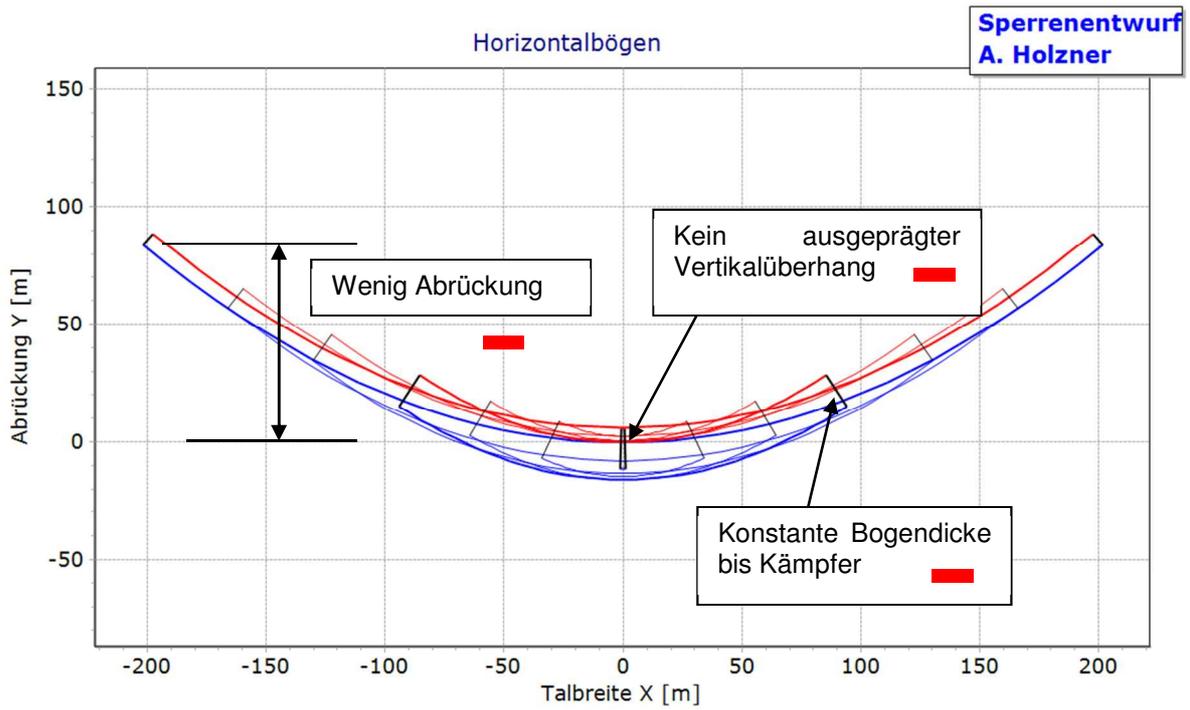


Abbildung 42: Vorentwurf nach USBR, Horizontalbögen, keine Verstärkung

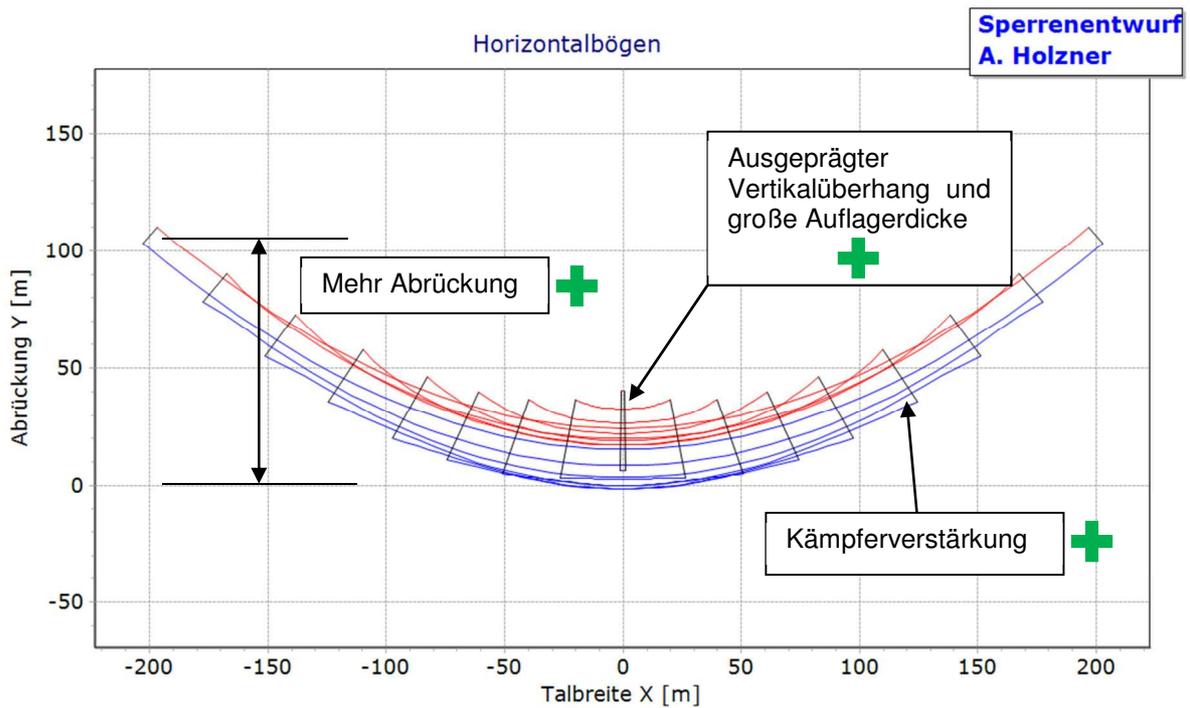


Abbildung 43: Vorentwurf dieser Arbeit, Horizontalbögen, mit Verstärkung, Prototyp

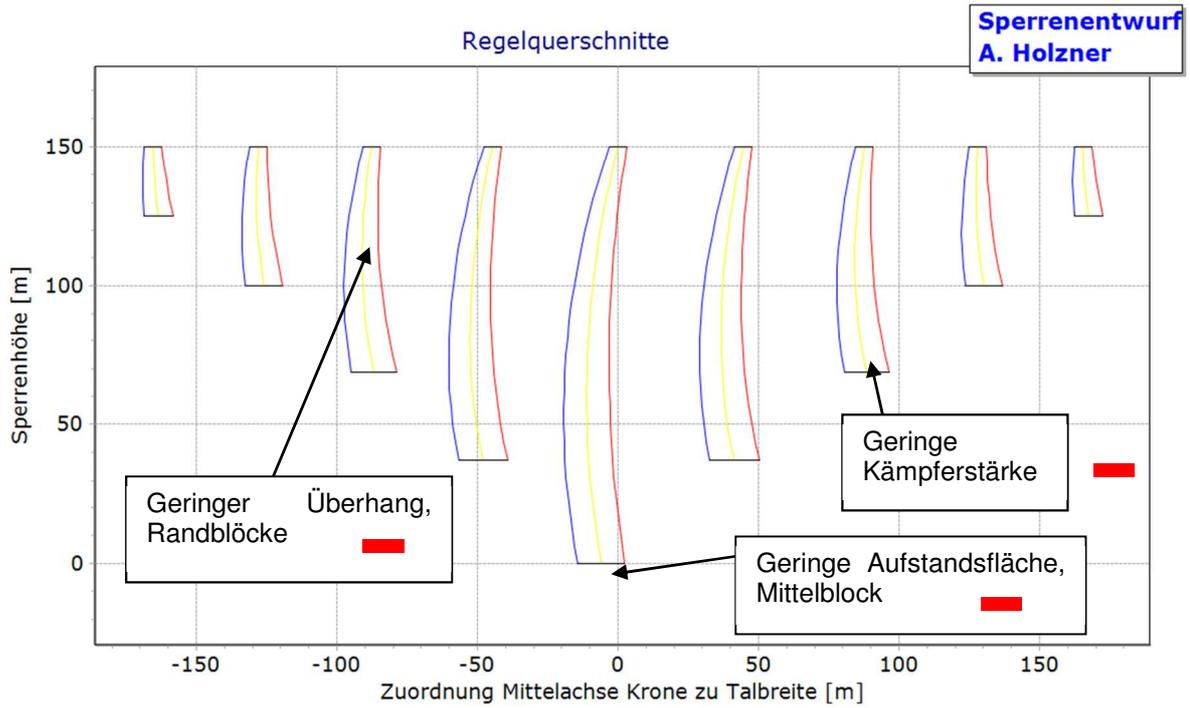


Abbildung 44: Vorentwurf nach Usbr, Regelquerschnitte

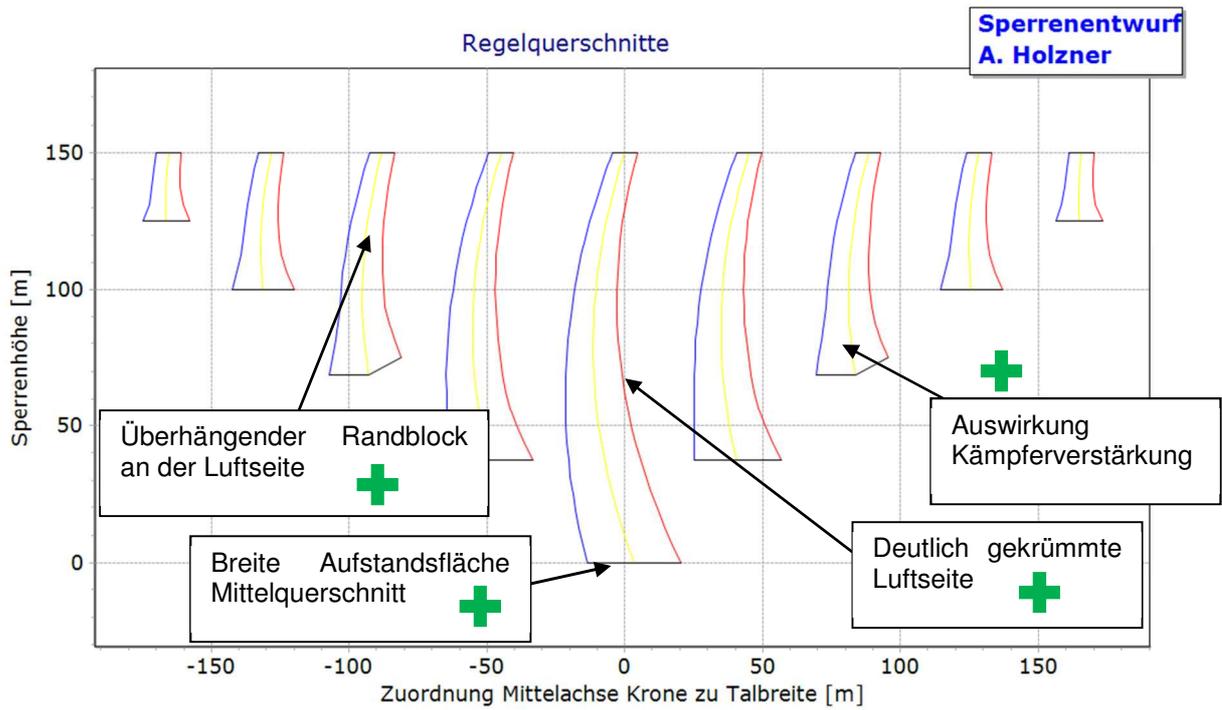


Abbildung 45: Vorentwurf dieser Arbeit, Regelquerschnitte, Prototyp

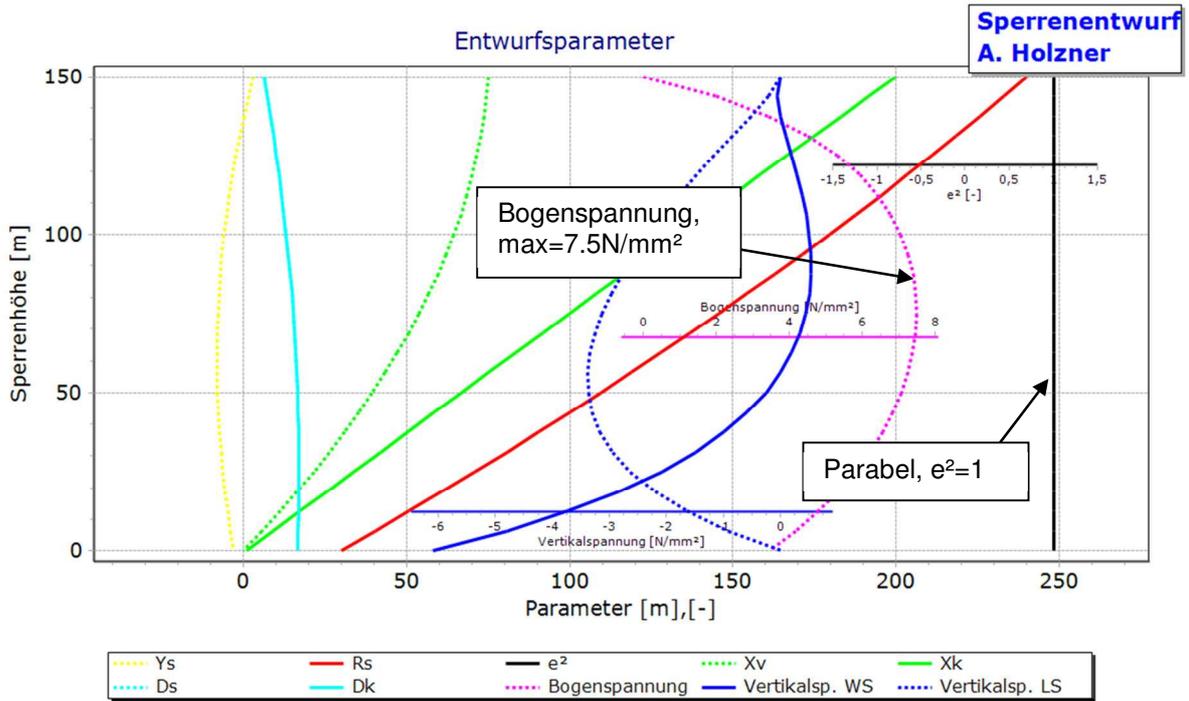


Abbildung 46: Entwurfswerte nach USBR

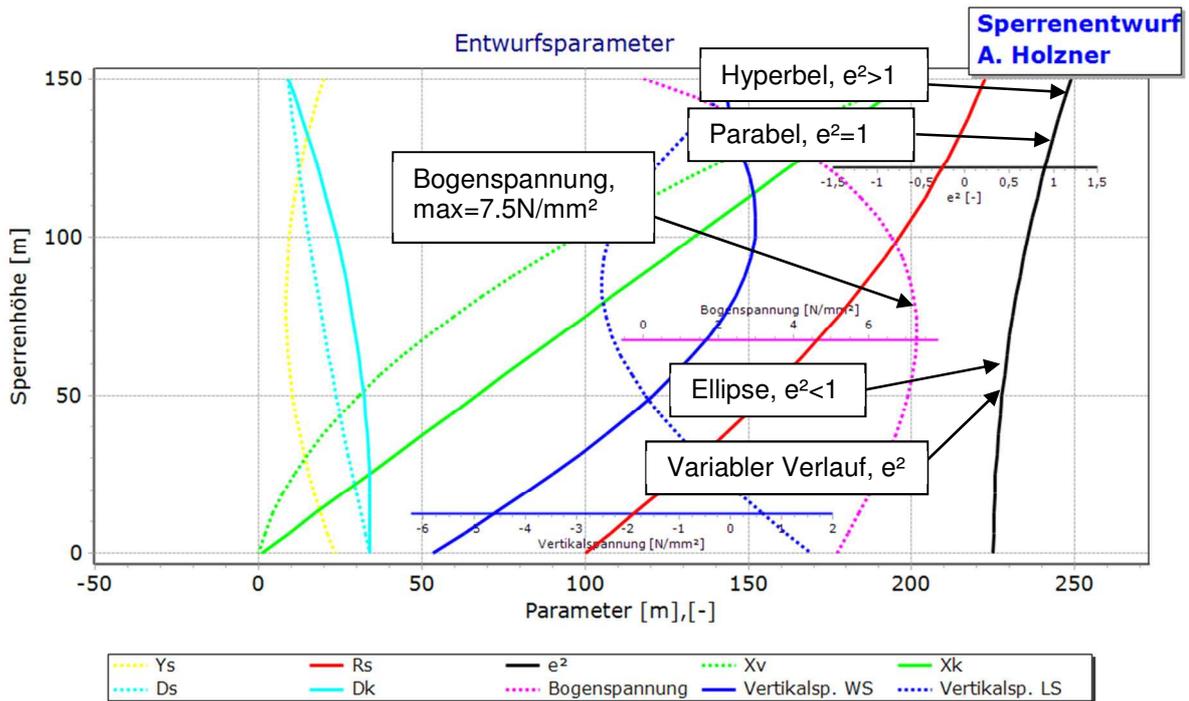


Abbildung 47: Entwurfswerte dieser Arbeit, Prototyp

Im Gegensatz zur deutlich unterschiedlichen Geometrie zeigen die Entwurfswerte der Bogenspannung nach Zylinderformel keinen deutlichen Unterschied im Mittelschnitt, was auf die ähnlichen Radien zurückzuführen ist.

#### 4 Grundlagen der Talsperrenstatik

Im Grunde können zusammenfassend folgende Parameter spezifiziert werden, welche den Spannungszustand in einer Gewölbemauer definieren:

- Form der Struktur (Geometrie)
- Materialeigenschaften
- Lagerbedingungen (Sperre, Fels)
- Belastungen

Als Zusammenfassung der Belastungen auf den Sperrenkörper kann eine Vielzahl von Lastfällen angegeben werden, ein exemplarische Zusammenstellung ist folgend angeführt: [resch1]

- Eigengewicht (freistehende Blöcke während des Baues)
- Wasserdruck (Wasserlast von Wasser- bzw. teilweise von Luftseite)
- Auftrieb (Kluftwasserdruck in Fugen)
- Erdbebenbelastung (Massenträgheit, sowohl Sperre als auch Reservoir)
- Zwang durch Abbindewärme, Schwinden, Schwellen, Kriechen
- Zwang durch Temperatur (Winter- und Sommertemperatur, Fugenschluss)
- Zwang durch Untergrundverformung (geologische Störzonen)
- Anlandungsdruck (Sedimentation)
- Eislast (Sonderlastfall)
- Wellenanprall (dynamische Anregung)
- dynamische Kräfte induziert durch Überströmungen oder Durchströmungen

Die tatsächlich für die Sperrenanalyse anzusetzenden Lastfälle richten sich nach den örtlichen Gegebenheiten, und stellen meist eine Auswahl aus der vorherigen Aufzählung dar.

Nachfolgend sind die Umsetzungen ausgewählter Lastfälle und Randbedingungen in der Sperrenanalyse näher erläutert, welche in dieser Arbeit zur Formfindung Anwendung finden.

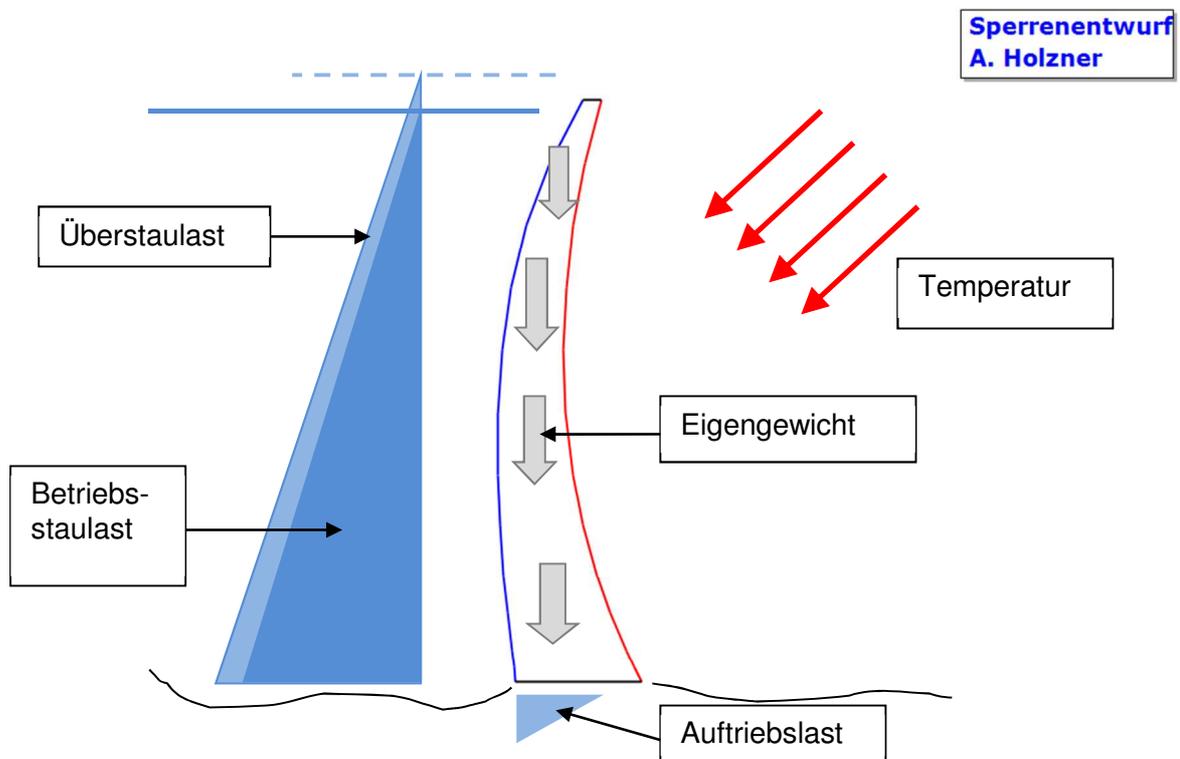


Abbildung 48: Typische Lastfälle in der Talsperrenberechnung, statisch

#### 4.1 Wasserdruck

Die Wasserlast wirkt in der Regel an der Wasserseite der Talsperre. In bestimmten Fällen ist auch von einem teilweisen Einstau der Luftseite auszugehen (z.B. bei Unterwasser Stauspiegel oder Tosbecken). Durch die Wasserlast wird ein talauswärts gerichteter Kraftvektor erzeugt. Durch die Krümmung der Gewölbemauer hat die normal auf die Oberfläche wirkende Wasserlast, neben dem talauswärts gerichteten Anteil, auch einen in Richtung der Vertikalen belastenden bzw. entlastenden Anteil. Je nach tatsächlicher Krümmung der Sperre tritt dieser Effekt, mit lokalen Maxima je nach Lage der betrachteten Blöcke, in unterschiedlicher Höhe auf [holz10].

Der Wasserdruck ermittelt sich in der Regel aus der hydrostatischen Druckhöhe des Stauspiegels. Um in der Analyse eine verstärkt realitätsnahe Untergrundverformung zu berücksichtigen, besteht die Möglichkeit, neben der Belastung auf den Sperrkörper selbst, auch den eingestauten Stauraumboden zu belasten. Primär werden dadurch die Öffnungsweiten der Fuge an der Aufstandsfläche erhöht. Eine etwaige Belastung in Klüften entlang der Sperrunterseite kann gegebenenfalls auch von Interesse sein.

#### 4.2 Lagerungsbedingungen

Die Lagerungsbedingungen an der Aufstandsfläche einer Talsperre können je nach Modellierungstyp in verschiedenen Varianten definiert werden:

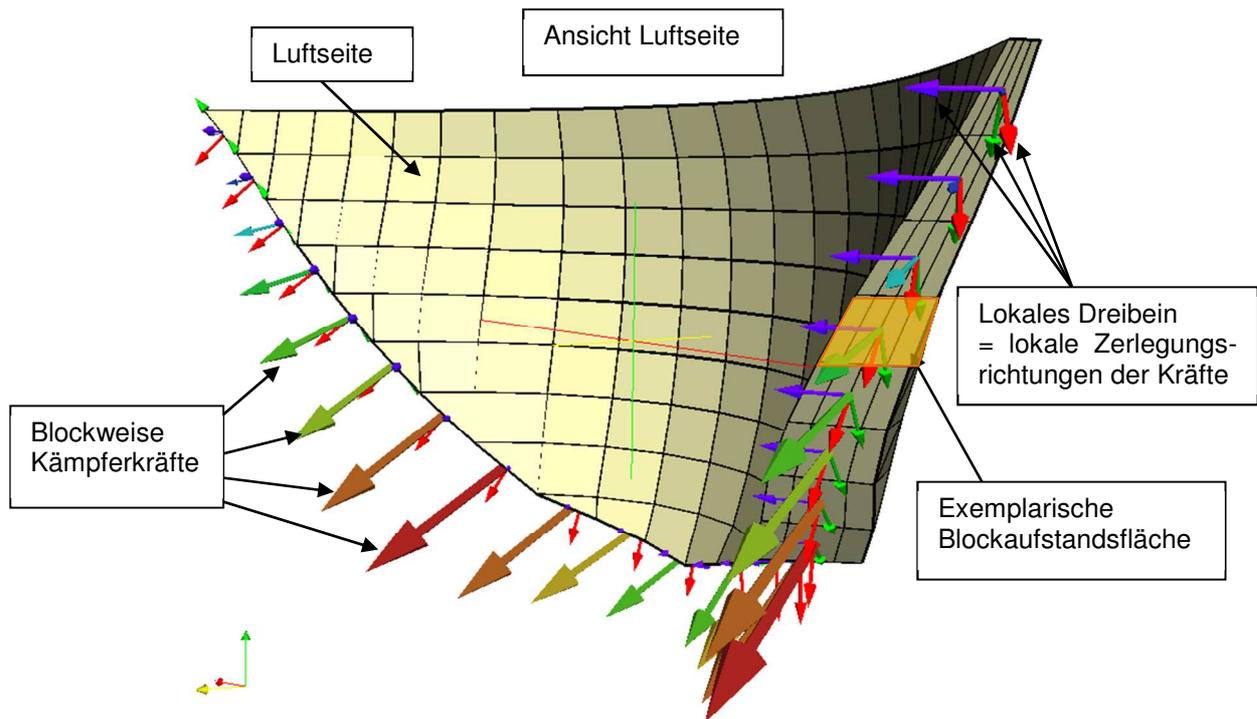
- Volle Einspannung, volle Übertragung von Druck und Zug in den Untergrund
- Teileinspannung, nur Übertragung in Verhältnis der Steifigkeiten der Einspannung, Berücksichtigung von möglichen Zugspannungen bis zu einer definierten Höhe

In dieser Arbeit wird im Zuge der Talsperrenanalyse entweder fix mit dem Boden verbunden (hohe Lösungsgeschwindigkeit durch einfaches Gleichungssystem), oder per simulierten Kontakt mit Reibung frei verformbar auf dem Untergrund gelagert, gerechnet. Durch die freie Lagerung wird die Zugübertragung ausgeschlossen. Weiters sind Gleitungen in der Kontaktfuge zwischen Sperre und Untergrund möglich.

Von großer Bedeutung für die Ergebnisse bei der Analyse von Gewölbesperren ist die Berücksichtigung des Untergrundes als elastischen Körper. Durch die Verhältnisse der Steifigkeiten zwischen Sperre und Untergrund wird deutlich die Beanspruchung in der Sperre beeinflusst [stuc1][tölk1]. Ein weicherer Felsuntergrund muss nicht zwingend schlechter sein, da von einer leichteren Verdrehungsmöglichkeit und der damit einhergehenden Spitzenspannungsverminderung im Aufstandsflächenbereich ausgegangen werden kann [mart1].

#### 4.3 Kämpferkräfte

Durch das Integral der Kontaktgrößen entlang der Bezugsfläche in der Aufstandsfläche bzw. Basisfuge, kann unter Abstimmung mit der jeweiligen Blockaufstandsfläche eine resultierende Blockaufstandskraft errechnet werden. Dieser Kraftvektor liegt im Raum und spiegelt quasi die aufsummierte Auflagerreaktion des gesamten Blockes wieder. Durch Vektorzerlegung auf die maßgebende Bezugsfläche, kann mit den Einzelvektoren ein Standsicherheitsnachweis geführt werden (Abbildung 49).



**Abbildung 49: Blockweise Aufstandsfläche, Blockaufstandskräfte, lokale Dreibeine**

Aus der Summe aller Einzelblockkräfte kann die resultierende Sperrenaufstandskraft ermittelt werden. Diese hat für die lokale Standsicherheitsbetrachtung meist eher geringe Bedeutung, kann aber für großräumige Betrachtungen der geologischen Standsicherheit von Interesse sein.

#### 4.4 Fugen und Reibung

Um die Kraftwirkung in Fugen darstellen zu können, bedarf es der Normalspannungs- und der Schubspannungskomponenten in diesen Flächen. Beide Komponenten liefern vektoriell aufsummiert über die Bezugsfläche eine resultierende Normal- und eine resultierende Schubkraft. Durch Gegenüberstellung der beiden Komponenten kann ein lokaler Gleitnachweis bzw. die Ausnutzung der Tragfähigkeit in dieser Fläche bestimmt werden. Etwaige Öffnungen in der Fläche bewirken eine Umverteilung dieser Kontaktschnittgrößen. Sofern die resultierende auftretende Spannung über dem maximal möglich aufnehmbaren Spannungszustand liegt, kommt es zu lokalen Gleitungen bzw. Fugenöffnungen [holz11].

##### 4.4.1 Sperrenaufstandsfuge, Basisfuge

Die Betonierfuge zwischen Talsperre und Untergrund stellt eine künstliche Fuge dar. Durch die Berücksichtigung dieser Kontaktfuge zwischen Sperrrenbauwerk und Untergrund wird ein hochgradig nichtlineares Systemverhalten berücksichtigt. Je nach Berücksichtigung im Modell werden durch die Fuge Zugspannungen reduziert, weiters sind Gleitungen (=Verschiebungen) in der Fugenfläche zwischen den benachbarten Fugenufern möglich.

Das Maß der Öffnung der Fuge normal zu den Fugenflächen kann am Beispiel der Basisfuge als „auf die Zehen stellen“ des Sperrrenbauwerkes angesehen werden. Durch die wasserseitige Öffnung der Fuge kommt es zu einer Lastumverteilung in der Aufstandsfläche. Sowohl der luftseitige Sperrrenfuß wird in der Regel stärker beansprucht, als auch Umverteilungen in den Bauwerkskörper und Abtragung in benachbarte Bereiche sind möglich.

Die Öffnungsweiten der Basisfuge bzw. Blockfugen werden durch die Wirkung von etwaigen Auftriebs- oder Kluftwasserdrücken verstärkt, ebenso wird in weiterer Folge die Wirkung der Lastumverteilung auf benachbarte Blöcke verstärkt.

In der Abbildung 50 und Abbildung 51 sind exemplarische Ansichten zur Wirkungsweise einer modellierten Aufstandsfläche einer Gewölbesperre dargestellt. Es sind daraus die Öffnungsweiten der Basisfuge, ermittelt aus einer nichtlinearen Berechnung unter Zugausschluss in der Basisfuge, ersichtlich. Die Aufstandsfläche ermittelt sich aus der Verschneidung von allen Horizontalbögen mit dem Gelände. In der Abbildung 51 ist die Öffnungsweite der Basisfuge dargestellt, die Farbkodierung ist wie folgt gelegt: „blau“ = geschlossen, je weiter nach „rot“ desto mehr geöffnet (bis hin zum Maximum von  $0.0053\text{m} = 5.3\text{mm}$ ). Durch diese Öffnungen kommt es zu einer Umverteilung von Spannungen am wasserseitigen Fuß hin zu Öffnungen in der Kontaktfuge, die Talsperre zeigt somit deutlich das Verhalten des „Auf-die-Zehenspitzen-stellens“, das Gewölbe wird dadurch besser aktiviert.

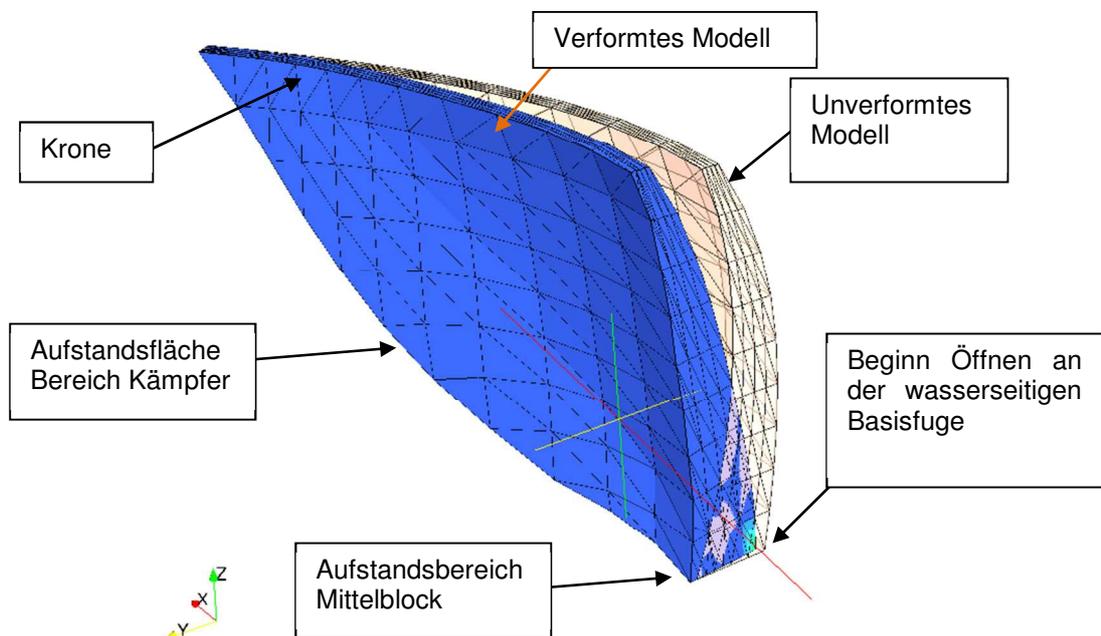
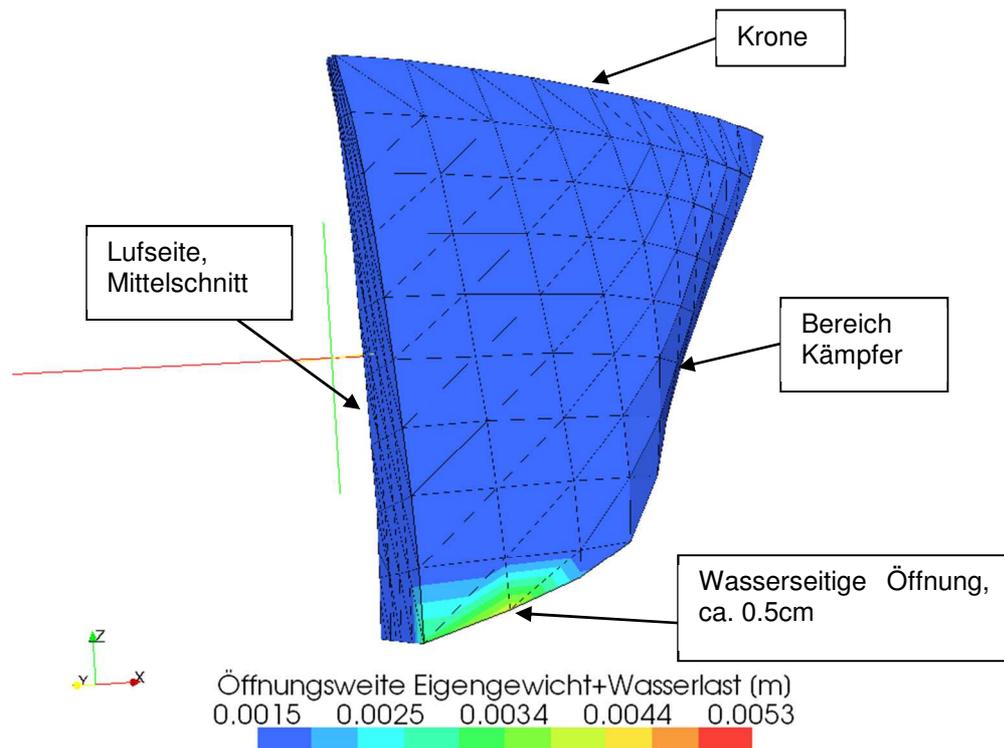


Abbildung 50: Überlagerung, Eigengewicht+Wasserlast, verformt+unverformt



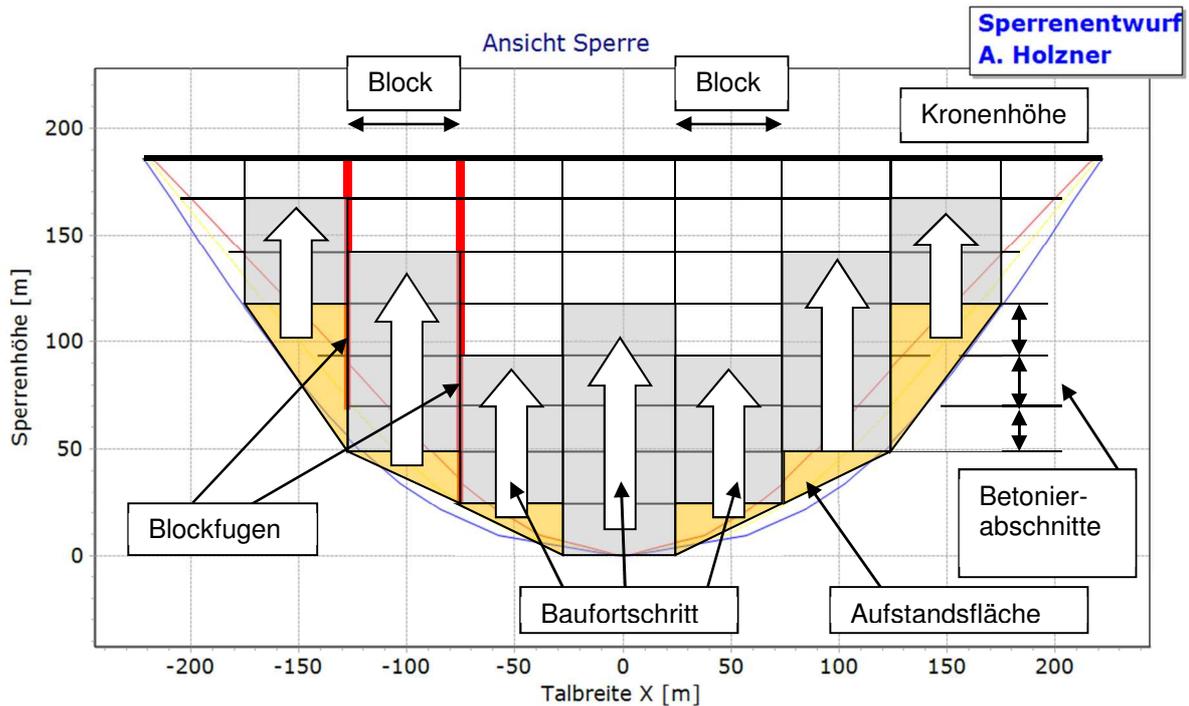
**Abbildung 51: Kontaktschnittgrößen, Öffnungen, exemplarisch, Zugausschluss**

In der Fuge kann etwaige Kohäsion mit berücksichtigt werden, um die auf den Fels anbetonierte Talsperre zu simulieren bzw. um etwaige makroskopische Haftbedingungen mit zu modellieren.

#### 4.4.2 Blockfugen

Die weiteren für die Formgebung von Gewölbemauern bestimmenden Flächenarten sind die Blockfugen. Durch den Bau der Talsperre in einzelnen vertikalen Blöcken entstehen bis zur Krone frei stehende Kragträger, welche spätestens nach Erreichen der Zielhöhe durch sogenannte Blockfugeninjektionen miteinander verbunden werden (Abbildung 52). Die blockweise Bauweise ist notwendig, um Temperaturspannung durch Abbinden des Betons und damit einhergehende Rissentwicklungen in Grenzen zu halten. Durch die Injektionen soll ein monolithischer Körper gebildet werden. Die Größe der Blöcke und der Verlauf der Blockfugen sind für die Einprägung des Eigengewichtszustandes sehr wichtig [seraf2].

An die abschnittsweise Bauweise mit Blöcken werden mehrfache Forderungen hinsichtlich der Lastableitung gestellt. Zum einen soll jeder Block sein volles Eigengewicht an die unterste Aufstandsfläche weiterleiten, zum anderen darf nicht vorzeitig das Blockeigengewicht auf benachbarte Blöcke übergeleitet werden. Diese Fugen stellen auch im injizierten Zustand unter hoher dynamischer Belastung weiterhin eine Möglichkeit zum Öffnen bei Bogenzug dar, d.h. es kann davon ausgegangen werden, dass die Blockfuge öffnet um Zugspannungen abzubauen bevor der umliegende Blockkörper in Mitleidenschaft gezogen wird. Ähnliches Verhalten ist bei starker Vertikalzugbeanspruchung während eines Erdbebens gegeben, wo von einer Öffnung der horizontalen Arbeitsfugen zur Zugreduktion im Vertikalkragarm ausgegangen werden kann.



**Abbildung 52: Stark vereinfachtes Schema einer blockweisen Errichtung einer Talsperre**

Neben der Reibung welche in der Fuge wirkt, kann durch künstliche Verzahnungen in der Blockfugenfläche eine etwaige Verschiebung in Radialrichtung, während des Zustandes der vertikal geöffneten Blockfugen vermindert werden. Durch die Anordnung von Schubkästen in der Blockfugenfläche oder die starke Verwendelung der Blockfugen über die vertikale Höhe kann ein ähnlicher Effekt erreicht werden.

#### 4.5 Auftrieb

Die Strömungsverhältnisse zwischen Stauraum, Sperre und umgebenden Untergrund beeinflussen maßgebend die Gleichgewichts- und Spannungszustände einer Talsperre. Durch die Durchlässigkeit des Untergrundes wird in der Sperrenaufstandsfläche ein entsprechender Sohlwasserdruck aufgebaut. Dieser ist in Höhe und Verlauf abhängig von den getroffenen Dichtungsmaßnahmen, wie z.B. einem Dichtschirm (Erhöhung der Fließstrecke) und einer Drainage (punktuelle Reduktion der Druckhöhe).

Da spätestens mit dem Öffnen der Basisfuge, in der Regel durch den Wegfall druckmindernder Vorkehrungen, ein erhöhter hydrostatischer Druck in derselben wirkt, stellt die Auftriebsbelastung einen maßgebenden Anteil an der Standsicherheit des Bauwerkes dar [kiel1][Lieck1]. Durch den nach unten und oben gerichteten hydrostatischen Druck wird zum einen das für den Gleitsicherheitsnachweis resultierende Gewicht reduziert, zum anderen wird durch das Auseinanderpressen der beiden Fugenflächen die Fugenöffnung verstärkt. Die Verstärkung der Öffnung tritt sowohl in Hinblick auf die Öffnungsweite, als auch in Hinblick auf die Öffnungstiefe, d.h. wie weit der ideelle Riss eingedrungen ist, auf.

Die Größe und die Verteilung der Auftriebsbeanspruchung ist in der Praxis oftmals ungleichmäßig und unstetig [resch1]. Für den Ansatz in einer Berechnung wird in der Regel mit entsprechenden Vereinheitlichungen und Linearisierungen gearbeitet. Primär erhöht der Dichtschirm entlang der Sperrenaufstandsfläche die zur Durchströmung von der Wasser- zur Luftseite notwendige Fließstrecke. Das Druckgefälle wirkt nun entlang der Länge von der gerissenen Fuge zum Dichtschirm, zweimal entlang der Dichtschirmtiefe und von der

Dichtschirmebene zur Luftseite. Vorausgesetzt ist natürlich Dichtigkeit und Wirksamkeit des Dichtschirms, sowie Funktionsfähigkeit einer etwaigen Drainage.

#### 4.6 Blockfugeninjektion

Die Injektion der Blockfugen erfolgt in der Regel nach Fertigstellung des Sperrkörpers, d.h. wenn alle Blöcke die Zielhöhe (=Kronenhöhe) erreicht haben. Dadurch wird sichergestellt, dass das maximal mögliche Aufstandsgewicht auf der Basisfuge erreicht wird, bevor die Blöcke maßgeblich miteinander mechanisch verbunden werden. Eine teilweise Verpressung entsprechend dem Baufortschritt an bestimmten Höhenmarken ist stellenweise möglich, sofern während des Baues bereits mit Teilstauspiegeln bewirtschaftet werden soll und die Standsicherheit entsprechend berücksichtigt wurde.

Die Blockfugen sind in der Regel wasser- und luftseitig durch ein Fugenband abgedichtet. Durch die Injektion wird der Zwischenraum dauerhaft und kraftschlüssig gefüllt. Das Injektionsgut wird über Injektionsbatterien und daran angeschlossene Injektionsleitungen eingebracht, die Verteilung in der Fuge erfolgt meist mit Manschetten bzw. Stumpventilen.

Nach Füllung der Fuge wird der Druck auf bestimmter Höhe gehalten um mögliche Hohlräume auszupressen bzw. entsprechend klein zu halten. Ein Übermaß an Injektionsdruck kann sowohl zu lokalen Abplatzungen im Bereich von schlecht bewehrten Fugenbandanschlüssen führen, oder aber auch die Bogenwirkung, und folglich die Kragträgerwirkung, negativ beeinflussen. Wenn die im Grundriss als Bogen dargestellte Gewölbesperre mit einem Lastfall "Fugendruck" beaufschlagt wird, entspricht das einer äquivalenten Druckvorspannung. Abgesehen von der ungleichen Einleitung entlang des homogenen Bogens, stützt sich der ideale Bogen entlang der Vertikalträger ab. Die so zur Wasserseite erzeugte Bewegung ruft eine Vorbelastung der Vertikalträger, an der Wasserseite Druck und an der Luftseite Zug, hervor. Dadurch kann es zu einer Überschreitung der normal zu den luftseitigen Arbeitsfugen zulässigen Zugspannung kommen, und somit zu einer ungewollten Fugenöffnung an der Luftseite.

#### 4.7 Grundsätzliche Sicherheitsüberlegungen

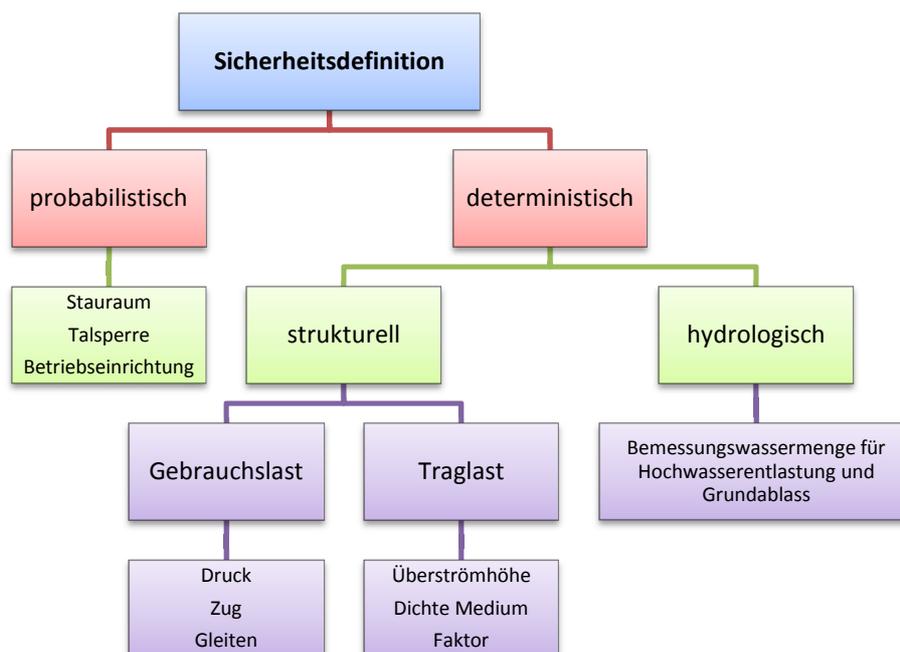
Für das gesamte Bauprojekt wird die Sicherheitsbetrachtung in drei Unterteilungen bewertet:

- Sicherheit des Sperrbauwerks (sowohl in der Sperre als auch die Weiterleitung in den Untergrund)
- Sicherheit des Stauraumes (und der Flanken)
- Sicherheit der Betriebseinrichtungen für den Betrieb der Talsperre

Weiters gilt es Unterscheidungen hinsichtlich einer deterministischen und einer probabilistischen Herangehensweise anzuführen (Abbildung 53).

Für probabilistische Verfahren werden aus Erfahrungen der Vergangenheit bestimmte Auftretenswahrscheinlichkeiten für die Zukunft berechnet, meist unter der Voraussetzung gleichbleibender Verhältnisse. Mit Hilfe einer statistischen Betrachtung werden Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt bestimmter Ereignisse ermittelt, welche aber nicht näher mit ob und wann festgelegt werden können (wie z.B. die Wahrscheinlichkeit für ein hundertjähriges Hochwasser  $HQ_{100}$ ).

Im Gegensatz dazu werden bei den deterministischen Verfahren durch eine Festlegung von Sicherheitswerten und Materialausnutzungsgraden Grenzen für die Anwendung geschaffen (wie z.B. aus Versuchen ermittelte Bruchsicherheiten und maximal zulässige Druck- und Zugspannungen). Neuere Verfahren leiten diese Werte ebenfalls durch statistische Betrachtung ab.



**Abbildung 53: Definition Sicherheiten, nach [wid1]**

An eine Talsperre lassen sich zwei Hauptzielsetzungen stellen. Zum einen besteht die Hauptanforderung an Standsicherheit zur sicheren Ableitung der Lasten in den umgrenzenden Untergrund. Zum anderen besteht die Anforderung der Dichtigkeit um die zurückgehaltenen Wassermengen entsprechend zwischen zu speichern und dem Zweck der Verwendung der Stauhaltung zu entsprechen. In dieser Arbeit wird auf die strukturelle Standsicherheit im Sinne der Spannungssituation und Lastabtragung eingegangen.

Auch kann mithilfe der ideellen Erhöhung der Wasserlast eine Bewertung der Standsicherheit einer Gewölbemauer erreicht werden (Abbildung 54). Zum einen steht eine Erhöhung der Dichte des Wassers zur Verfügung (d.h. das resultierende Wasserdruckdreieck wird "breiter"), zum anderen kann fiktiv die Stauhöhe solange erhöht werden, bis die Standsicherheit erschöpft ist [rocha1] [prom1]. Die Sicherheit wird entsprechend mit einer Erhöhung des Bezugswasserdruckes (Dichte) oder durch Erhöhung des Stauspiegels ermittelt. Beide Betrachtungsweisen stellen verschiedene Philosophien dar, welche durch jeweilige lokale Normen und Richtlinien bzw. Planungsvorgaben geregelt sind.

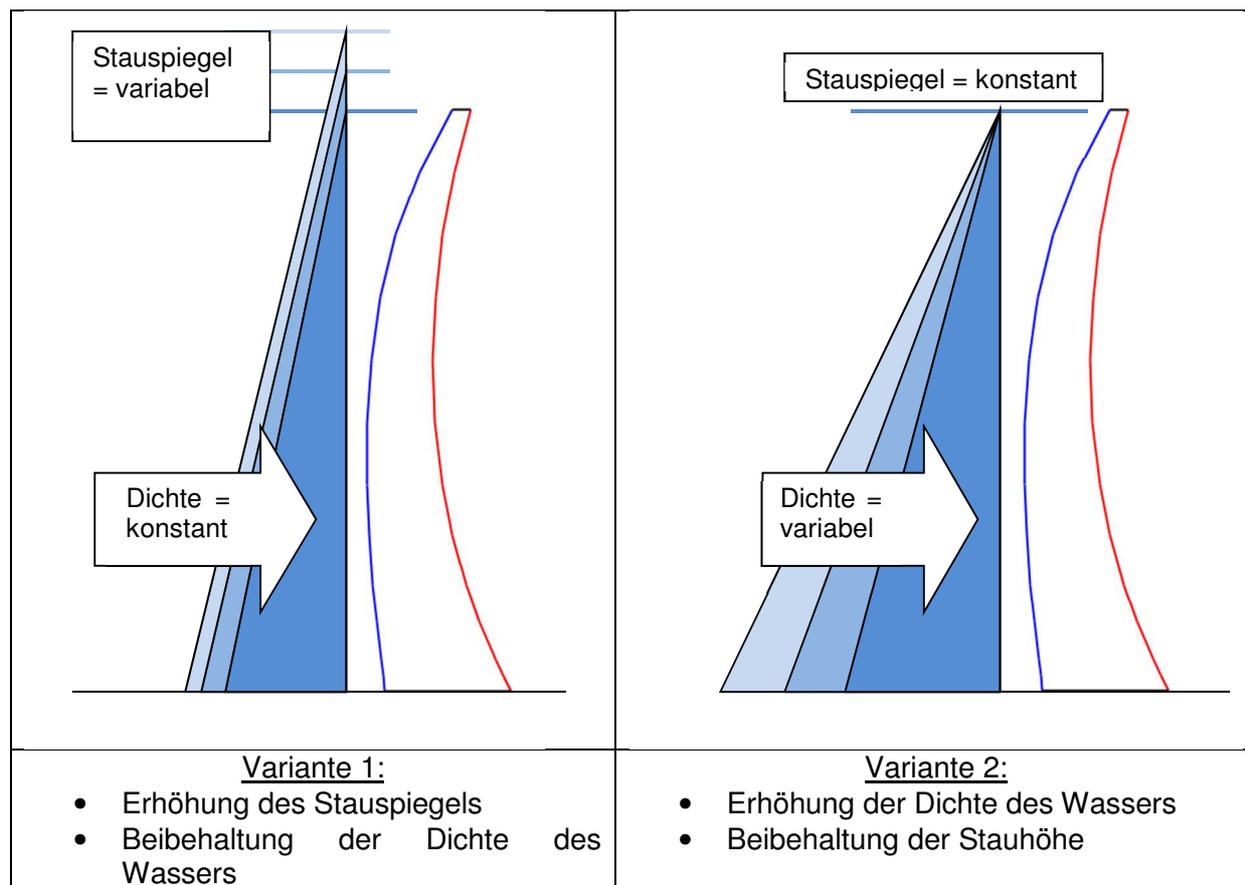
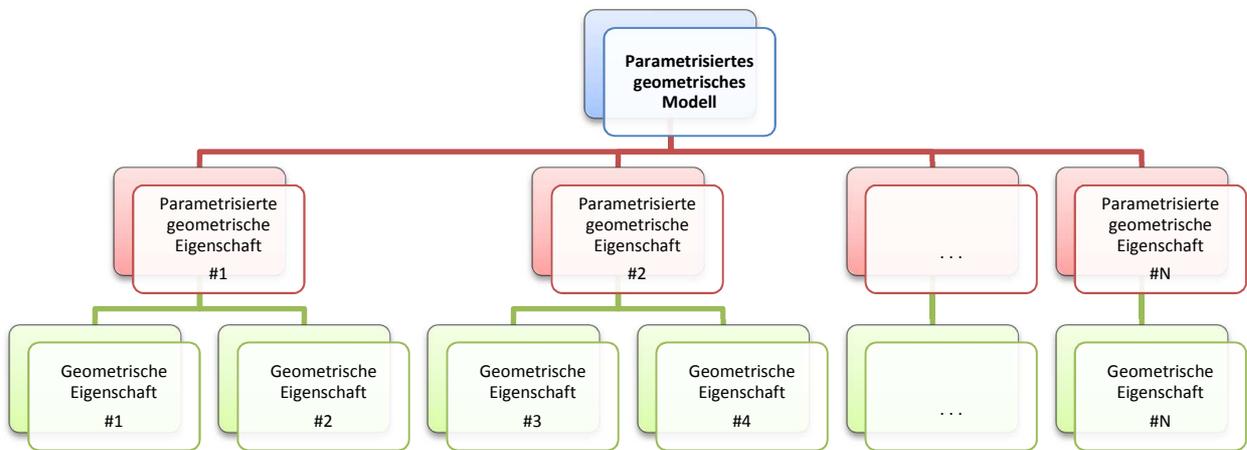


Abbildung 54: Standsicherheit, Betrachtungsarten Wasserlast, nach [rocha1]

## 5 Integrales Talsperrenmodell

Die in den vorherigen Kapiteln ermittelten Erkenntnisse werden nun nachfolgend in ein gemeinsames Konzept mit aufgenommen. Ziel ist ein einheitliches Modell, welches allen Anforderungen hinsichtlich des Vorentwurfes, der Geometrieerfassung, sowie der Untergrund- und Stauraummodellierung genügt. Weiters sollen sowohl der Anschluss an einschlägige Berechnungssysteme (wie z.B. Abaqus oder Ansys), als auch die einfachen Post-Processing Möglichkeiten grundlegende Bestandteile dieses Modells sein.

Ausgangspunkt für die nachfolgenden Überlegungen ist ein vollständig parametrisiertes Geometrie- und Talsperren-Modell. Um Variationen bzw. Analysen hinsichtlich der Formgebung durchführen zu können, wird ein kombiniertes Modell aus Einzelparametern erstellt. Das Grundkonzept dieses Modells ist in Abbildung 55 dargestellt.



**Abbildung 55: Geometrieparametrisierung, Hierarchie, aus [choi1]**

Durch die Kombination der Einzelmodelle, und Berücksichtigung aller wesentlichen Kennwerte als frei veränderliche Parameter, wird ein nahezu beliebig parametrisierbares Talsperrenmodell erstellt. Die Anwendung des hierarchischen Modells aus Abbildung 55 wird folgend auf die Problemstellung der Gewölbesperren angewendet, eine exemplarische Umsetzung der ersten Schritte basierend auf der vorgestellten Parameterliste für die Sperrengemetrie findet sich in Abbildung 56.

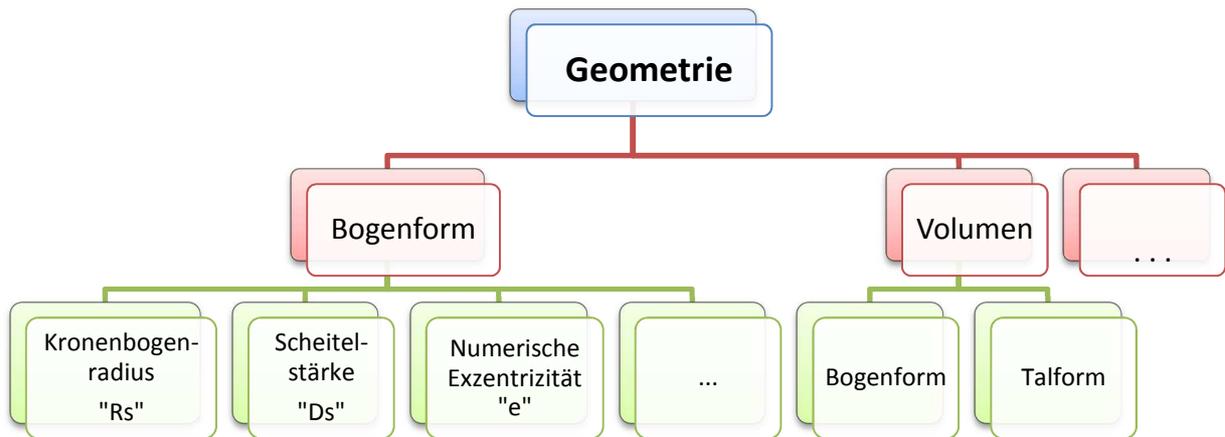


Abbildung 56: Geometrieparametrisierung, exemplarisch Gewölbemauer

### 5.1 Konzept und Aufbau

Die wesentliche Anforderung an ein Gesamtmodell für Gewölbesperren ist, dass die Geometrie an zentraler Stelle für alle anderen Modelle bereitgehalten wird. D.h., die Geometriedefinition muss (nur) einmal an zentraler Stelle erfolgen, und wird ohne Änderungen an die anderen Modelle übergeben. Sofern Änderungen an der Geometrie notwendig sind, wie z.B. bei Anpassungen an die Talform, kann dies im jeweiligen Modell erfolgen oder sich dem Ausgangsmodell zur Geometriedefinition bedienen.

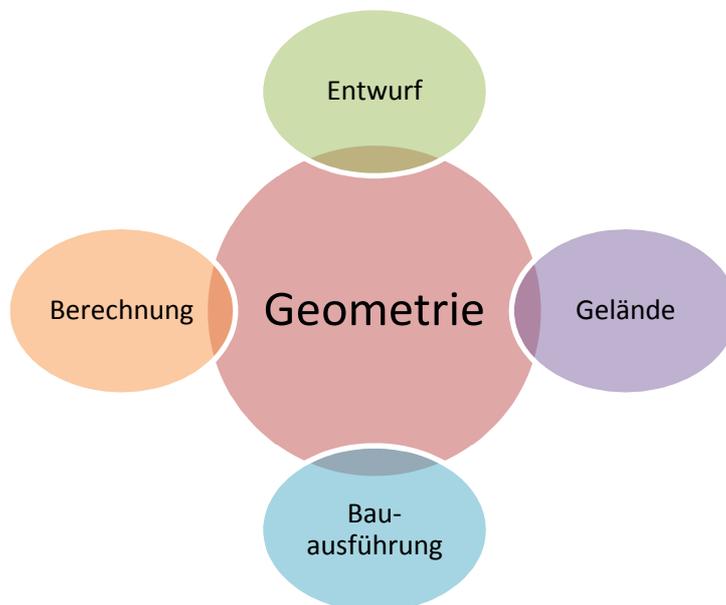


Abbildung 57: Geometriemodell, zentrale Bedeutung und Anbindung

Das Gesamtmodell dieser Arbeit („LX-DAM“) setzt sich aus einer Kombination von Einzelmodellen zusammen. Die einzelnen Modelle sind per Schnittstellen gekoppelt und können bei Bedarf erweitert werden. Die Gliederung der Einzelmodelle ist in Abbildung 58 dargestellt, es wurden rein schematisch die berücksichtigten Anforderungen dargestellt.

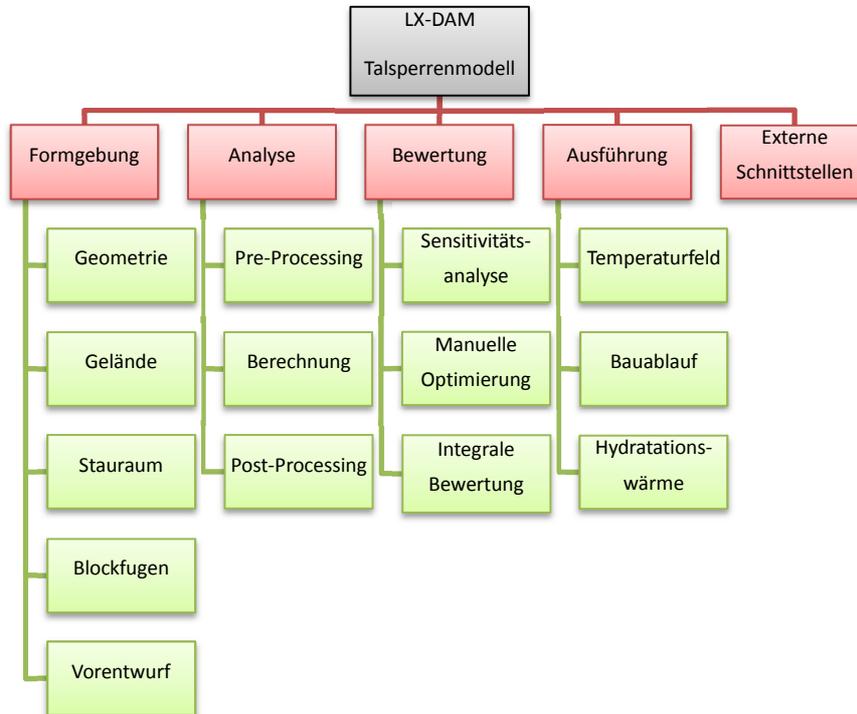


Abbildung 58: Kernmodelle "LX-DAM", Überblick Talsperrenkonzept

## 5.2 Formgebung

Die Formgebung beschreibt die Details der Formdefinitionen des Modells. Sie besteht aus mehreren Teilen, welche in Kombination miteinander eine komplette Parametrisierung der Geometrie ermöglichen. Beginnend von dem eigentlichen Geometriekern für die Talsperre werden zusätzliche Modelle zum Sperrenkörper hinzu kombiniert, um schlussendlich das komplette Analysemodell bereitzustellen.

### 5.2.1 Geometrie

Basierend auf der im vorherigen Kapitel erläuterten Geometriedefinition, welche aus Kegelschnitten und Zusatzparametern besteht, wird die eigentliche Talsperrengeometrie beschrieben. Die Kegelschnitte kennzeichnen für jeden Horizont die genaue Definition des Horizontalbogens. Der Vertikalschnitt entsteht sinngemäß aus den Parametern und den zugehörigen Interpolationsfunktionen (vgl. [press1]). Hier wird noch keine Unterteilung im Sinne von Blockfugen oder hinsichtlich einer Verschneidung mit dem Untergrund getroffen.

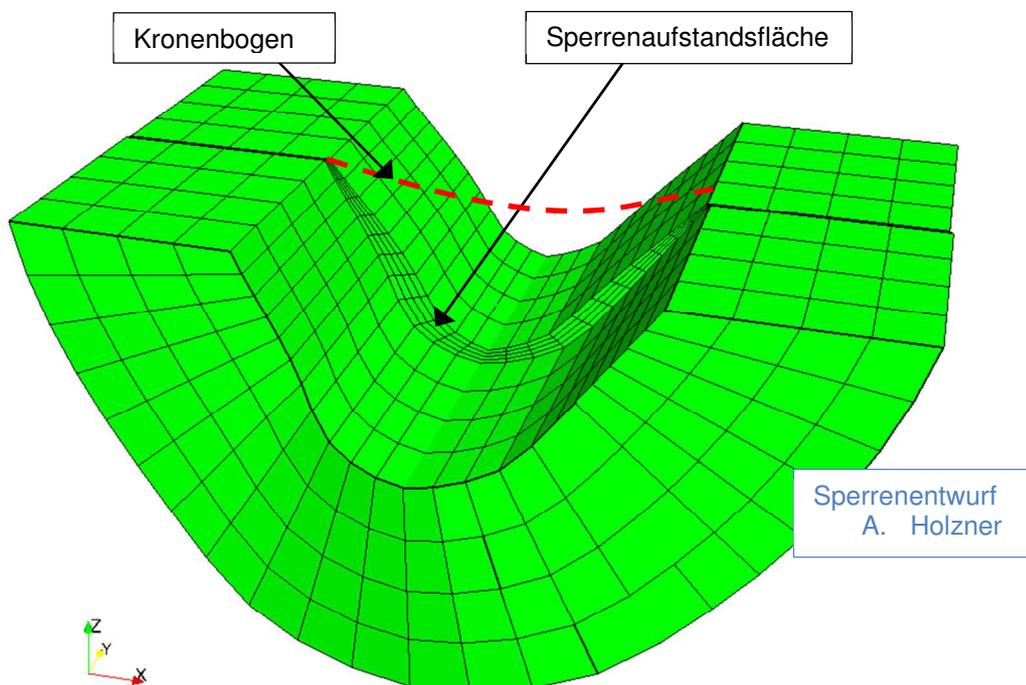
Die Grundparameter der Gewölbesperrengeometrie können übersichtlich aufgeschlüsselt und schematisch dargestellt werden (bereits in Kapitel 3.2.3 vorgestellt). Die Interpolationsfunktionen über die Höhe ermöglichen vielfältige Anpassungsmöglichkeiten hinsichtlich des Funktionsverlaufes und der Glättung. Das hieraus abgeleitete Geometriemodell stellt den Ausgangspunkt für die Berechnung und die Parametervariation sowie Optimierungsläufe dar.

### 5.2.2 Geländemodell

Um den begleitenden Aufwand während Parametervariationen und Geometrieadjustierungen gering zu halten, erfolgt die Definition des Geländes in der Regel ebenso parametrisiert. Es kann entweder über absolute Abmessungen außerhalb des Sperrkörpers, oder über tatsächlich erfasste dreidimensionale Schichtenlinien das Untergrundmodell erstellt werden.

Die jeweilige Sperrkontur wird über Berücksichtigung einer entsprechenden Einbindelänge automatisiert mit dem Untergrund verschritten. In Abhängigkeit der Höhe und Talseite können verschiedene Einbindetiefen berücksichtigt werden, um den Anforderungen aus der Geologie zu entsprechen (Abbildung 59).

Es besteht weiters die Möglichkeit die Einbindung des Gewölbes gegen die Wasser- oder Luftseite zu verschwenken, um entweder das Bezugssystem für den Nachweis der Gleitsicherheit entsprechend zu beeinflussen, oder bereits ausgeführte Bauwerke realitätsnah zu berücksichtigen.



**Abbildung 59: Untergrundkörper, Definition, exemplarisch, Prototyp**

Die Modellierung des Bodens an den Seitenflächen und der Unterseite erfolgt nach einem eigens entwickelten numerischen Algorithmus. Entsprechende Anpassungen zur Feinjustage, wie der Flankenneigung des Geländes oberhalb der Krone, sind möglich. Gemeinsam mit den Möglichkeiten der automatischen Verschneidung der Sperrenaufstandsfläche ergibt sich ein leistungsfähiges Modellsystem zur Handhabung der topografischen Situation. Durch die Festlegung von räumlichen Ebenen kann der daraus entstehende Zwischenraum als geologische Störschicht spezifiziert werden.

### 5.2.3 Stauraum

Um in entsprechenden dynamischen Berechnungen auch die Interaktion des Stauraumes mit berücksichtigen zu können bestehen zwei Möglichkeiten.

Zum einen kann das Reservoir mittels addierten Massen nach Westergaard simuliert werden [west1], die Berechnung der Punktmassen und die Verknüpfung mit den jeweiligen wasserseitigen Knoten erfolgt automatisch programmgesteuert.

Zum anderen besteht die Möglichkeit den Stauraum diskret unter Berücksichtigung der tatsächlichen Form zu modellieren. Die tatsächliche räumliche Diskretisierung ermöglicht FSI-Berechnungen (sogenannte Fluid-Structure Interaktionen), ebenso wird eine Berücksichtigung von Wellenausbreitungen im Stauraum ermöglicht.

### 5.2.4 Blockfugen

Zusätzlich zur Definition des Sperrkörpers finden sich Angaben zur genauen Definition der Blockfugen. Diese haben in erster Linie Auswirkungen für die Auswertung der blockweisen Standsicherheitswerte in einem späteren Kapitel. Im weiteren Zuge können entlang der Blockfugendefinitionen reale Modelfugen eingeführt werden, welche entweder die Eigengewichtsberechnung an freistehenden Blöcken und das anschließende Wiedereinlesen in ein monolithisches Modell zulassen, oder aber für weitere Berechnungen wie Bauablauf und Hydratationswärmeentwicklung verwendet werden.

Die Blockfugendefinition ist auf mehrfache Arten im Modell integriert worden. Als Beispiele seien oberflächennormal (Abbildung 60) und eben (Abbildung 61) genannt. Es wird dadurch eine Beeinflussung des Winkels zur Übertragung der Druckspannungen im Bogen und ein günstigerer Schnittwinkel mit der Aufstandsfläche ermöglicht.

Mit der entsprechenden Definition können (spiral- oder schraubenartig) gewendelte Blockfugen berücksichtigt werden. Die bestehenden Blockfugentypen sind anhand in der Vergangenheit gebräuchlicher Typen entwickelt, weitere Typen können bei Bedarf hinzugefügt werden.

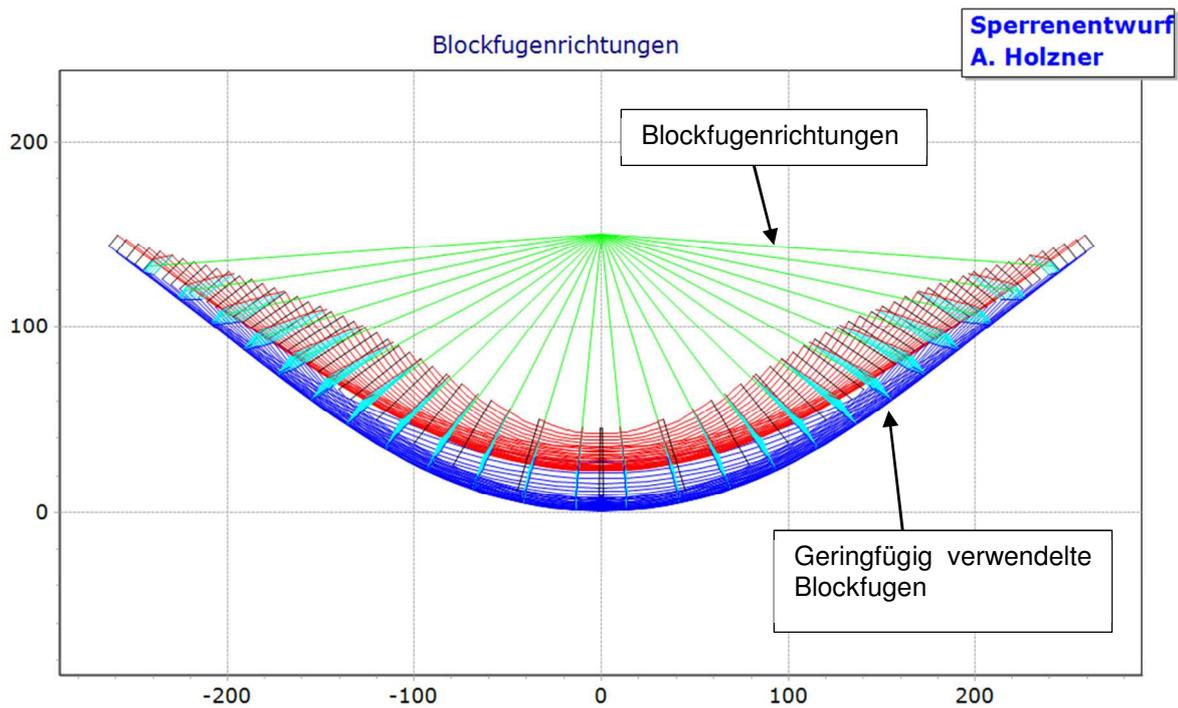


Abbildung 60: Blockfugendefinition, Variante oberflächennormal

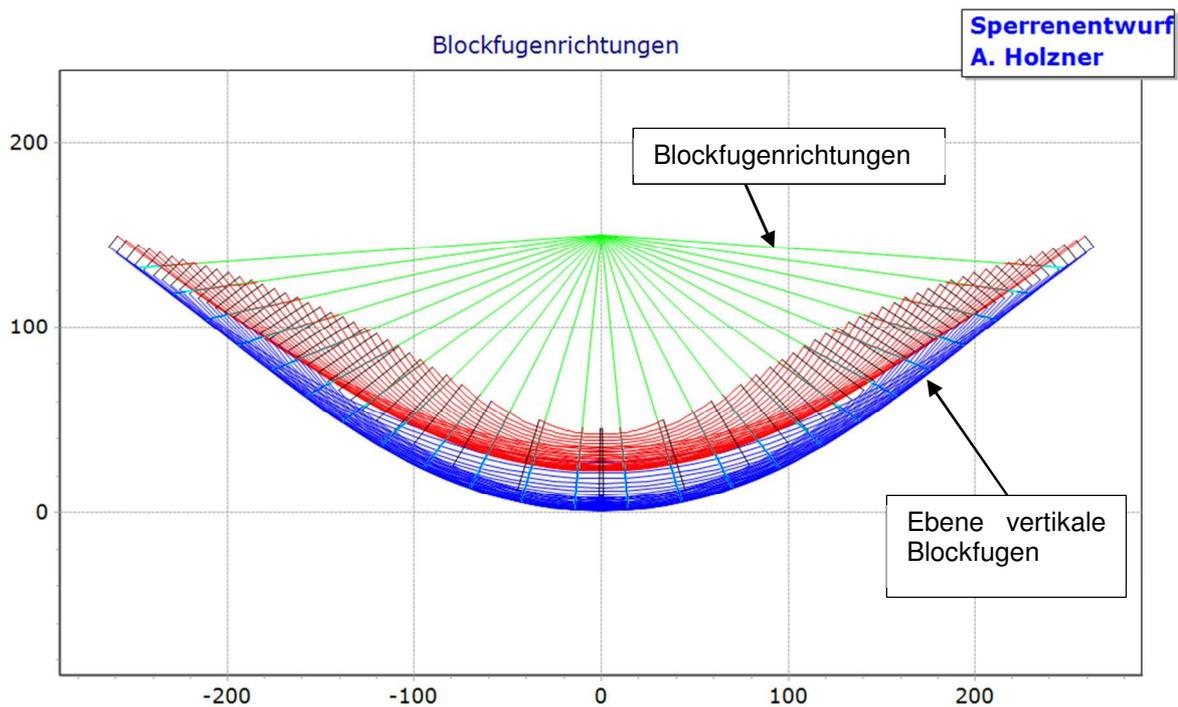


Abbildung 61: Blockfugendefinition, Variante ebener Schnitt

### 5.2.5 Vorentwurf

Neben den einschlägigen Vorentwurfsformeln nach [usace1, urbs2] unterstützt das Geometriemodell auch eigene Vorentwurfskriterien, welche sich im Moment primär aus den in Österreich gebauten großen Talsperren ableiten. Es liegt sozusagen eine Bauwerksdatenbank zugrunde, aus welcher sich skaliert (z.B. im Verhältnis der Höhe) oder in Übernahme von Absolutwerten (z.B. eine bestehende Sperre in ein anderes Tal) neue Entwürfe generieren lassen. Berücksichtigt sind für diese Datenbank alle großen österreichischen Talsperren, wie z.B.: Zillergründl, Schlegeis, Kölnbrein, Möll und Ranna.

Die Interpolation der einzelnen Typen und die Abbildung der Vorentwurfswerte auf neue Talformen bzw. Größen sind von zentraler Bedeutung im Entwurf. Hauptaugenmerk im Entwurfsmodell ist auf einfache und durchgängige Änderungsmöglichkeiten gelegt.

Grundanforderung an eine Parametervariation und die Bewertung ist die Möglichkeit der Vergleichsdarstellung von mindestens zwei unterschiedlichen Geometrien, unter Aufrechterhaltung der Entwurfsmöglichkeiten im Sinne von Geometrie, Berechnung und Auswertung. In Abbildung 62 ist exemplarisch die Gegenüberstellung einer Parametervariation für die Horizontalbögen dargestellt. Ausgehend von der ursprünglichen Geometrie (mittlere Talsperre) wird der Bogenradius sowohl nach einem größeren Wert und einem kleineren Wert variiert. Die geänderten Geometrien sind jeweils ober- bzw. unterhalb der ursprünglichen Geometrie dargestellt.

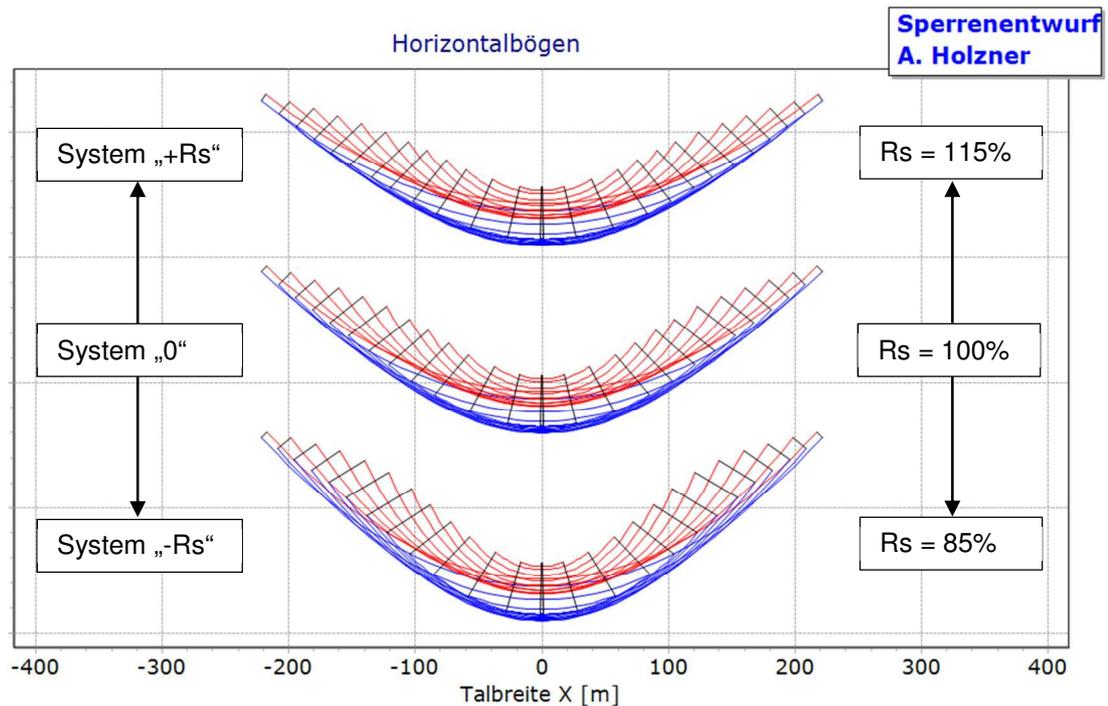


Abbildung 62: Vorentwurfsmodul, Systemvergleiche, Variation Bogenradius  $R_s$  +/- 15%

### 5.3 Numerische Analyse

Im Überbegriff der numerischen Analyse verbirgt sich die Überführung von der reinen Geometrie hin zu mechanischen Ergebnisgrößen (Abbildung 63). Basierend auf der Geometrie und den getroffenen Festlegungen, für z.B. Untergrund und Reservoir, werden die Daten entsprechend weiterverarbeitet und dem jeweiligen Solver entsprechend angepasst.

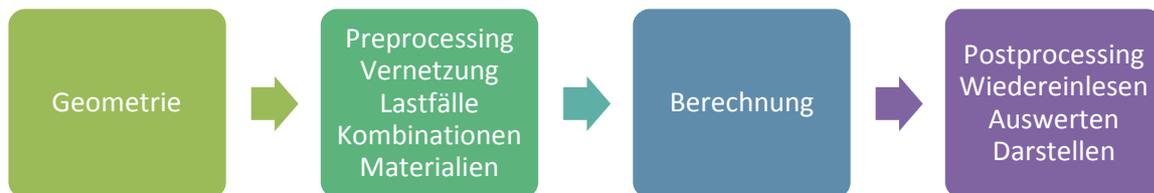


Abbildung 63: Flussdiagramm, numerische Analyse, LX-DAM

#### 5.3.1 Pre-Processing

Im Pre-Processing Modell sind hauptsächlich Routinen zur Vernetzung der Geometrie und zur Erstellung der Finite Elemente Eingabedateien spezifiziert. Je nach Erfordernis werden Sperrenkörper, Untergrund und Wassermasse hinsichtlich der gewünschten Genauigkeit geometrisch-parametrisiert errechnet und in ein dem verwendeten FE Programm kompatibles Dateiformat erstellt. Das Pre-Processing Modell lässt sich einfach an die meisten der aktuellen Programmsysteme anbinden.

Sowohl blockfugenweise Vernetzung als auch die genaue Definition der Fugenmöglichkeiten, wie z.B. getrennte Basisfuge entlang der Sperrenaufstandsfläche, finden Anwendung in diesem Modell. Die Fugenmodellierung entlang der Aufstandsfläche kann sowohl über doppelte Knoten und Kontaktfuge, als auch über Multi-Point Constraints oder Kontaktelemente durchgeführt werden.

Prinzipiell richten sich die verwendbaren Möglichkeiten nach den Möglichkeiten des zu verwendenden FE Programmsystem, und werden selbstständig daran angepasst.

Neben den Eingabewerten für das Berechnungsnetz werden im Analysemodell auch die verschiedenen Belastungsarten generiert. Sofern notwendig können die Eigenlasten und Wasserlasten separat ermittelt werden, die heutigen Solver stellen jedoch normalerweise diese Funktion als Standard zur Verfügung.

#### 5.3.2 Berechnung

Über das Berechnungsmodell werden die Finite Elemente Rechenkerne von der Talsperrensoftware aus gestartet und überwacht. Je nach verwendetem FE Programmsystem bestehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Laufzeitüberwachung. In dieser Arbeit werden keine neuen numerischen oder analytischen Berechnungsverfahren entwickelt. Es können je nach Anforderung kommerzielle Solver angebunden werden, wie z.B. Abaqus oder Ansys. Die Anforderungen an die verwendete Software richten sich nach den gewünschten Analysetypen, und können wie in Tabelle 7 zusammengefasst werden.

Anforderung	Eigenschaft	Umsetzung
Vorentwurf	Schnelle Berechnung	Linearer Verschiebungsansatz in Kombination mit grober Netzteilung Quadratischer Verschiebungsansatz in Kombination mit feinerer Netzteilung
Detailentwurf	Offene Basisfuge	Kontaktelemente an der Sperrenaufstandsfläche
	Beton- und Felsmodell	Nichtlineares Materialmodell Orthotopische bzw. inhomogene Materialkennwerte
	Temperatur	Temperaturbeanspruchung, thermische Kennzahlen
Spezialnachweise	Blockfugen	Kontaktelemente zwischen den vertikalen Blöcken
	Stauraum	Addierte Massen nach Westergaard (Punktmassen) oder diskrete Stauraummodellierung aus akustischen Elementen

**Tabelle 7: Anforderungen an externen Berechnungskern („Solver“)**

Sehr deutlich ist der Funktionsumfang vom Solver auf die benötigte Rechenzeit zur Lösung zu bemerken. FE Software mit umfangreicher Prüfung der Eingabewerte auf Plausibilität und Netzanalysen sind bei kleinen Modellen deutlich langsamer in der Gesamtbearbeitung eines kompletten Rechenvorganges als speziell auf Optimierungsaufgaben entwickelte Rechenkerne. Diese legen die Arbeitsdateien hauptsächlich im Speicher ab und arbeiten meist ohne die aufwändige Erstellung von festplattenbasierten Zwischendateien [bathe1][zien1].

Die Erstellung der Eingabedateien ist ASCII-basiert gelöst und stellt für stichprobenartige Kontrollen eine gute Lesbarkeit dar. Das Auslesen der Berechnungsergebnisse erfolgt direkt aus den Ausgabedateien der Solver. Primär wird über Batch-Prozesse und entsprechende Multitasking-Lösungen ein effizienter Berechnungsfortschritt ermöglicht. Sofern vom Solver zur Verfügung gestellt, kann der Zugriff auch direkt über Bibliotheks-Schnittstellen erfolgen.

### 5.3.3 Post-Processing

Das Post-Processing Modell hat die Aufgabe bereits während dem Berechnungsvorgang die ersten Ergebnisdaten vorab auszulesen und zusammengefasst darzustellen. Sollte sich während eines umfangreichen Berechnungslaufes ein nachteiliges Lösungsverhalten ergeben, kann so unmittelbar die Berechnung vorzeitig beendet werden um Ressourcen einzusparen. Ähnlich dem Pre-Processing Modell lässt sich aus das Post-Processing Modell leicht an die meisten aktuellen Berechnungsprogramme anbinden.

Die endgültigen Ergebnisdateien werden nach Berechnungsende automatisch komplett ausgelesen und intern weiterverarbeitet. Die interne Verarbeitung besteht aus der Berechnung und Transformation der Ergebnisspannungen und Verformungen. Begleitend von der Vorbereitung von Contour- und Vektorplots, können umfangreiche Diagramme und blockweise Auswertungen der Kräfte und Spannungen durchgeführt werden. In Abbildung 64 sind exemplarisch am Mittelschnitt die Hauptspannungen dargestellt. Sowohl die Richtung als auch die Größe der Hauptspannungsvektoren ist ablesbar (blau=Druck, rot=Zug), z.B. am luftseitigen Fuß mit einer maximalen Druckspannung von  $-6,76\text{N/mm}^2$ .

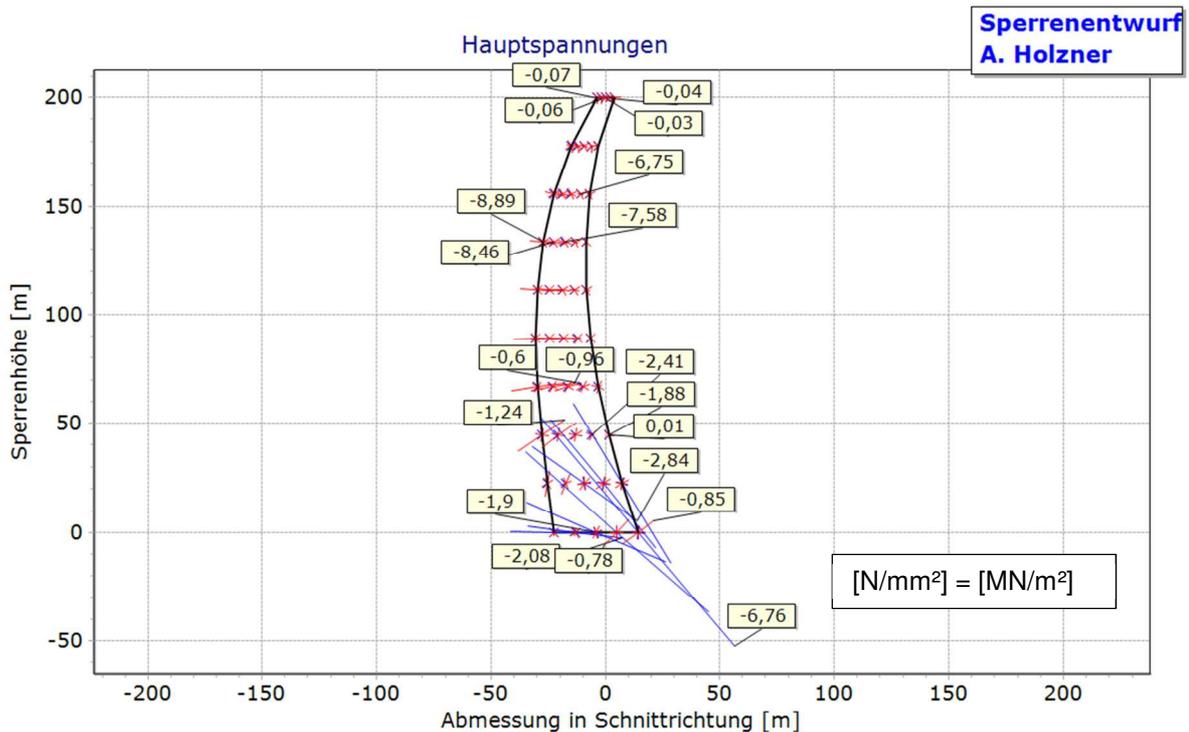


Abbildung 64: Vektorplot, Hauptspannungen, Einheit [N/mm<sup>2</sup>]

Ein weiterer Kernpunkt, welcher besonders in der Bewertung Anwendung findet, ist die Berechnung von zusammenfassenden Kennzahlen zur Ergebnisbewertung. Durch den Vergleich dieser Kennzahlen von unterschiedlichen Berechnungsmodellen können Aussagen in Hinblick auf das Optimierungsergebnis getroffen werden. Das Prinzip dieser Zielerfüllungen wird in einem späteren Kapitel ausführlich erläutert.

#### 5.4 Bewertung

Das Bewertungsmodell steht stellvertretend für umfangreiche automatische Eingriffe in die gesamte Basis der Geometriedaten. Durch die Anwendung dieses Modells werden alle vorhergehenden Modelle, bzw. alle Modelle die in der Hierarchie unter dieser Ebene liegen, mit gesteuert (Abbildung 65). D.h. das Bewertungsmodell hat Kontrolle über die Geometrieparameter (wie z.B. Bogenradius „Rs“ oder Scheiteldicke „Ds“) und kann diese nach Belieben halb- oder vollautomatisch in vorgegebenen Grenzen verändern. Ebenso wird auf das Berechnungsmodell und das Postprocessing-Modell zugegriffen und die Ergebnisse dieser als Auswertung dargestellt.

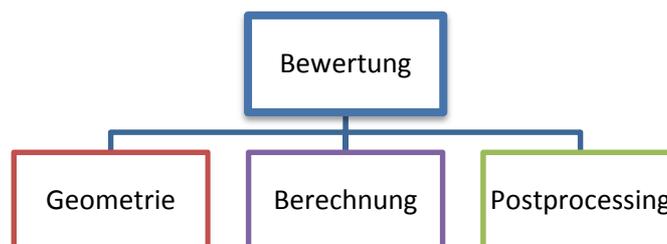


Abbildung 65: Bewertungsmodell, gekoppelte Bereiche

Für die manuelle Optimierung, d.h. der Geometrieangepassung unter Aufsicht und Mitentscheidung des entwerfenden Ingenieurs, nach z.B. einer Gittermethode, stehen entsprechende Vereinfachungen in Form von Variationen nach eindimensionalen Parameterabhängigkeiten zur Verfügung. Dabei wird immer nur ein Parameter verändert (z.B. die Scheitelstärke „Ds“) um den Überblick über die daraus resultierenden Änderungen zu ermöglichen.

## 5.5 Ausführung

Das Modell der Ausführung koppelt im Detail zwei Einzelmodelle. Zum einen liegt die eigentliche Bauablaufsberechnung zugrunde, welche sich mit den Kabelkranauslastungen und dem Mischerarbeitsvermögen beschäftigt. Um wichtige Aspekte der Betontechnologie mit einzubinden, wird dieses Ablaufmodell an das Modul der Hydrationswärmeentwicklung mit angeschlossen. Diese Verbindung ermöglicht die blockweise Betrachtung von der Wärmeentwicklung während der Betonaushärtung in Zugehörigkeit zum Bauablauf. Die Wirkung von Pausen vor dem nächsten Lageneinbau, sowie die Notwendigkeit einer Kühlung, kann entsprechend ermittelt werden.

Das Modul des Bauablaufes hat nicht unmittelbar Einfluss auf das Geometriemodul, bedient sich aber zur Berechnung der Bauzeiten und der Wärmeentwicklungen der bereitgestellten Geometriefunktionen.

Kernpunkte bzw. maßgebende Parameter der Bauablauffunktion sind mit der Anzahl der vorseilenden Arbeitsschichtlagen, Faktoren zur Festlegung der Temperaturentwicklung im Frischbeton, Details zur Betonkühlung, Anzahl der Kabelkranspiele pro Zeiteinheit, Betonwerkleistungsfähigkeit und Mischwassertemperatur anzuführen.

## 5.6 Externe Schnittstellen

Das Gesamtmodell berücksichtigt die Anbindung an Fremdmodule mit Hilfe der externen Schnittstellen. Als bedeutendste sind der Import von bestehenden Kegelschnitt Geometriedateien, der Import von Vermessungspunktkoordinaten für das Geländemodell, sowie der DXF Export der Sperrengeometrie an CAD-Produkte (z.B. Autocad) zu nennen.

Hinsichtlich der Ergebnisse aus den FE Berechnungsprogrammen bestehen Exportmöglichkeiten der aufbereiteten Ergebnisse als Pdf und der Vektor-, Spannungs-, Verformungsdarstellung als Vtk-Datei (Quelle: [www.vtk.org](http://www.vtk.org)).

## 5.7 Zusammenfassung

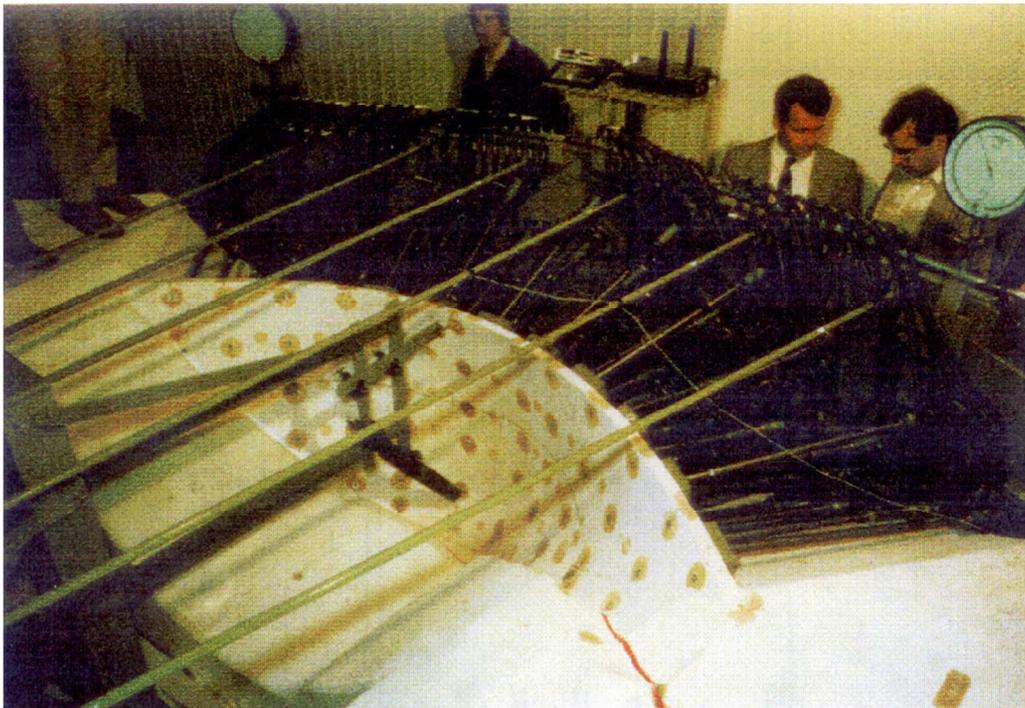
Es wurden in diesem Kapitel die für eine Parametrisierung einer Gewölbesperre notwendigen Grundlagen erfasst. Ausgehend von diesem nun vollständig beschriebenen Geometrie- und Berechnungsmodell können im Folgenden Anpassungen an die geometrische Form getroffen werden, und die Auswirkungen auf zu spezifizierende Ergebnisgrößen betrachtet werden.

## 6 Parameteridentifikation

Die in den vorherigen Kapiteln ermittelten Grundlagen werden nun verwendet um eine ideale Gewölbemauer mit mittleren Abmessungen und Querschnittswerten einer Parameteridentifikation zu unterziehen. Ausgehend von einem angenommenen V-Tal mit rund 400m Kronenlänge und 150m Sperrenhöhe wird ein integrales Sperrenmodell erstellt (siehe Kapitel 3.4, Vorentwurf, „Prototyp“-Talsperre). Die Hauptwerte (=Geometrieparameter wie z.B. Bogenradius  $R_s$ ) der zugrunde liegenden Geometriedefinition werden um bestimmte definierte Bereiche in beide Richtungen der Werteskala variiert.

Die Modifikation der Parameter über die Höhe kann in mehreren Varianten erfolgen, wobei die Änderungen sowohl gleichgerichtet in dieselbe Vorzeichenrichtung (bloße Addition oder Subtraktion), als auch gegensinnig als Verschwenkung durchgeführt werden können (Multiplikation bzw. Verzerrung). Für diese Arbeit wird nur die bloße Addition bzw. Subtraktion verwendet.

Die Analyse des Modells kann entweder mithilfe von mechanischen Bauteiltests oder durch numerische Berechnungen durchgeführt werden. Die Erstellung von mechanischen Prototypen ist in Hinblick auf Kosten und Aufwand oftmals als ineffizient zu bezeichnen, und hat im Bereich der Optimierung von Gewölbesperren keinerlei periodische Anwendung. Im Gegensatz zu Prototypen im Automobilbereich ist auch eine maßstäbliche Abbildung einer Talsperre für einen Laborversuch für den Formfindungs- oder Optimierungsprozess aufgrund der erwähnten Nachteile ungeeignet. Als Beispiel eines Modellversuches sei die Talsperre Zillergründl erwähnt, für welche bei der Tauernkraftwerke AG in Kaprun ein Maßstabsversuch 1:200 durchgeführt wurde. Die Darstellung des Sperrenmodells und die zugehörigen Belastungsgestänge für die Wasserlast sind in Abbildung 66 dargestellt.



**Abbildung 66: Sperre Zillergründl, Sperrenmodell und Belastungsgestänge, aus [prom1]**

## 6.1 Grundlagen der Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse wird verwendet, um zu bestimmen wie sensibel ein Modell oder eine Funktion auf die Veränderung der Basisgrößen reagiert. Basisgrößen können Eingangswerte der Funktion bzw. des Modells selber oder aber auch geschätzte Werte sein. Derartige Analysen stellen den Zusammenhang zwischen meist simplen Eingangsparametern und dem Ergebnis meist hochkomplexer nichtlinearer Finite Elemente Berechnungen dar.

- Von „sensitiv“ wird gesprochen, wenn eine kleine Änderung der Eingangswerte eine große Veränderung in den Ausgangswerten verursacht.
- Von „robust“ wird gesprochen, wenn eine kleine Änderung der Eingangswerte eine kleine Änderung in den Ausgangswerten verursacht.

Sensitive Modelle können in der Schrittweite bei Optimierungsverfahren ein schlechtes Konvergenzverhalten aufweisen. Eine Identifizierung der Sensitivitäten und eine Anpassung der Schrittweite an den jeweiligen Parameter ist somit Voraussetzung um ein robustes Optimierungsmodell für Talsperren zu erhalten.

Basierend auf den Ergebnissen einer Parametervariation (oder auch Sensitivitätsanalyse bzw. Entwurfparameteranalyse) können quantifizierbare Aussagen oder Entscheidungen über die weitere Richtung des Entwurfes oder der möglichen Änderungen zur Entwurfsverbesserung erhalten werden.

### 6.1.1 Prinzipielles Schema

Der Grundablauf einer strukturellen Bewertung kann wie in Abbildung 67 dargestellt werden [choi1]. Ausgehend von einer strukturellen Berechnung wird eine Sensitivitätsanalyse der Entwurfparameter durchgeführt. Diese bildet die Grundlage für die visuelle Darstellung der Sensitivitäten, für eine „was wäre wenn“ Betrachtung, für den durchzuführenden Kompromiss und abschließend für die Entscheidung bzw. Notwendigkeit weiterer Anpassungen.

Die ersten drei Faktoren des dargestellten Aufbaus einer Sensitivitätsanalyse können der interaktiven Entwurfsphase zugeordnet werden („Sensitivitäten“, „Was-wäre-wenn“, „Kompromiss“). Die Entscheidung ob der Entwurf optimal oder nicht optimal ist, führt zu einer geänderten Geometrie und startet die Schleife erneut, beginnend mit der strukturellen Berechnung des geänderten Entwurfes. Je nach Modell trifft der Ingenieur, basierend auf einem oder mehreren Faktoren, die Entscheidung zum Neuentwurf.

Die Wahl der Entwurfparameter ist in den vorhergehenden Kapiteln näher erläutert worden. Die in den einzelnen Abschnitten angegebenen Eingangsgrößen stellen die Modellparameter dar, welche durch entsprechende Methoden variiert werden können (wie z.B. Teile der Tabelle der Kegelschnitte zur Geometriedefinition). Um die Komplexität der Geometriedefinition überschaubar zu halten, wird mit einer in Hinblick auf die Horizonte reduzierten Kegelschnittparametertabelle gerechnet. Nähere Details dazu werden in den jeweiligen Abschnitten erläutert.

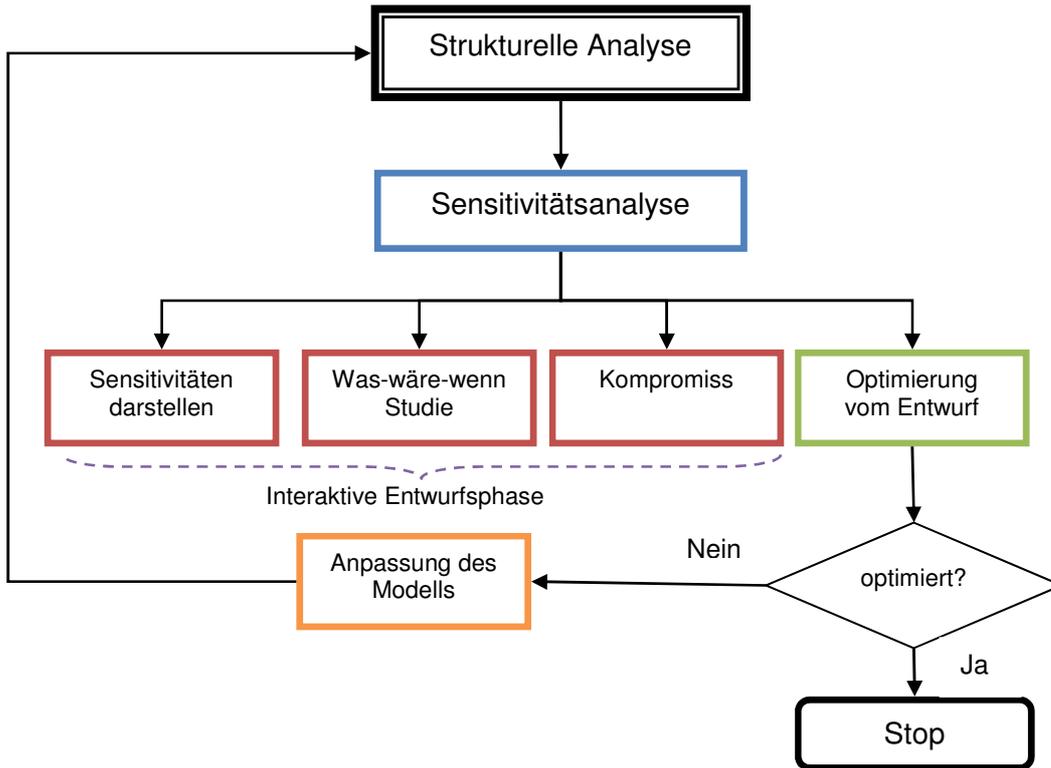


Abbildung 67: Abfolge der Bewertung und Optimierung, nach [choi1]

Neben den Geometrieparametern existiert noch eine Reihe weiterer für die Findung der optimalen Lösung maßgebender Parameter. Diese sind jedoch meist durch physikalische, projektbezogene und berechnungstechnische Festlegungen von der Variation ausgenommen. Es handelt sich dabei z.B. um Stoffkonstanten (wie Elastizitätsmodul, Querdehnzahl, Dichte), Diskretisierungswerte (Netzgrößen, Elementabmessungen, Verschiebungsansätze) oder Modellansätze (Volumen- oder Schalenelemente, Felsuntergrund als FEM oder BEM). Entsprechende Einflüsse auf das Berechnungsverfahren sind mit dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Programmsystem untersucht worden, die Ergebnisse werden aufgrund der Abweichung von der Zielsetzung hier nicht inkludiert.

### 6.1.2 Berechnungsmethodik

Für die Berechnung der Sensitivitätswerte kommt ein einfaches Näherungsverfahren zur Anwendung, welches sich Finiter Differenzen bedient. Je nach Festlegung steht entweder eine Berechnung mit Vorwärtsdifferenzen (Formel 12) oder mit Zentraldifferenzen (Formel 13) zur Verfügung [choi1].

$$\frac{d\Psi}{du} \approx \frac{\Psi(u + \Delta u) - \Psi(u)}{\Delta u} \quad (12)$$

Formel 12: Finite Differenzen Methode, Vorwärtsdifferenzen

$$\frac{d\Psi}{du} \approx \frac{\Psi(u + \Delta u) - \Psi(u - \Delta u)}{2\Delta u} \quad (13)$$

Formel 13: Finite Differenzen Methode, Zentraldifferenzen

Von darüber hinaus verfügbaren diskreten und Kontinuums Methoden wird, aufgrund des analytischen Aufwandes in der Handhabung und notwendigen Veränderung basierend auf den Steifigkeitsmatrizen, in dieser Arbeit abgesehen. Die Nachteile des hier verwendeten Näherungsverfahrens (Anzahl der Rechendurchläufe und Schrittweitenproblem) werden durch effiziente rechentechnische Handhabung und überlegte Schrittweitemauswahl (Abbildung 68) weitgehend kompensiert. Die Einfachheit der erzielten Ergebnisse und die Anlehnung an ein gitterorientiertes Optimierungsmodell bevorzugen diese Lösung für die konkrete Fragestellung dieser Arbeit.

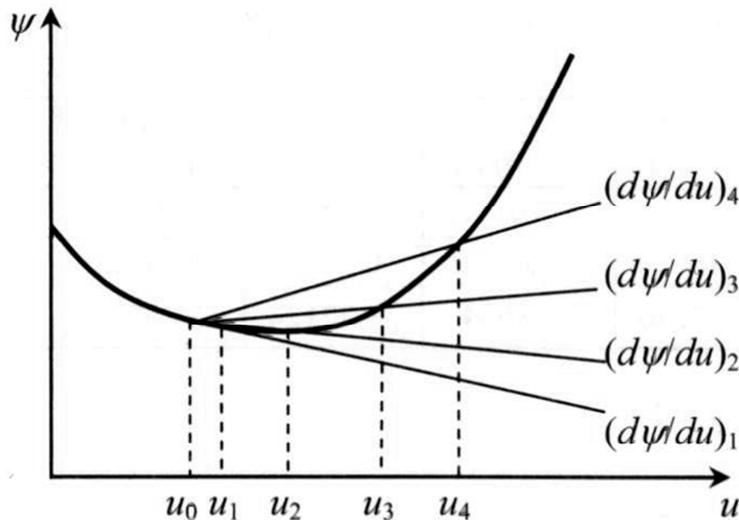


Abbildung 68: Vorwärtsdifferenzen, Einfluss der Schrittweite, [choi1]

## 6.2 Modell zur Parameterstudie

Das verwendete Talsperrenmodell entspricht der in Kapitel 3.4 erstellten „Prototyp“-Sperrre. Es besteht aus dem Sperrrenkörper und dem Felsuntergrund.

### 6.2.1 Berechnungsnetz

Das Berechnungsnetz ist ein dreidimensionales Finite Elemente Netz, welches direkt anhand des vorgenannten Gesamtmodells generiert wird (Abbildung 69). Die Elemente sind Brick und Wedge Elemente, welche in der automatischen Vernetzung implementiert sind.

Das Netz weist circa 2.000 Knoten und 1.300 Elemente auf, die Anzahl der Freiheitsgrade liegt bei ca. 5.500. Um die Rechenzeit für die Sensitivitätsanalyse gering zu halten, wird bewusst ein verhältnismäßig kleines Modell definiert.

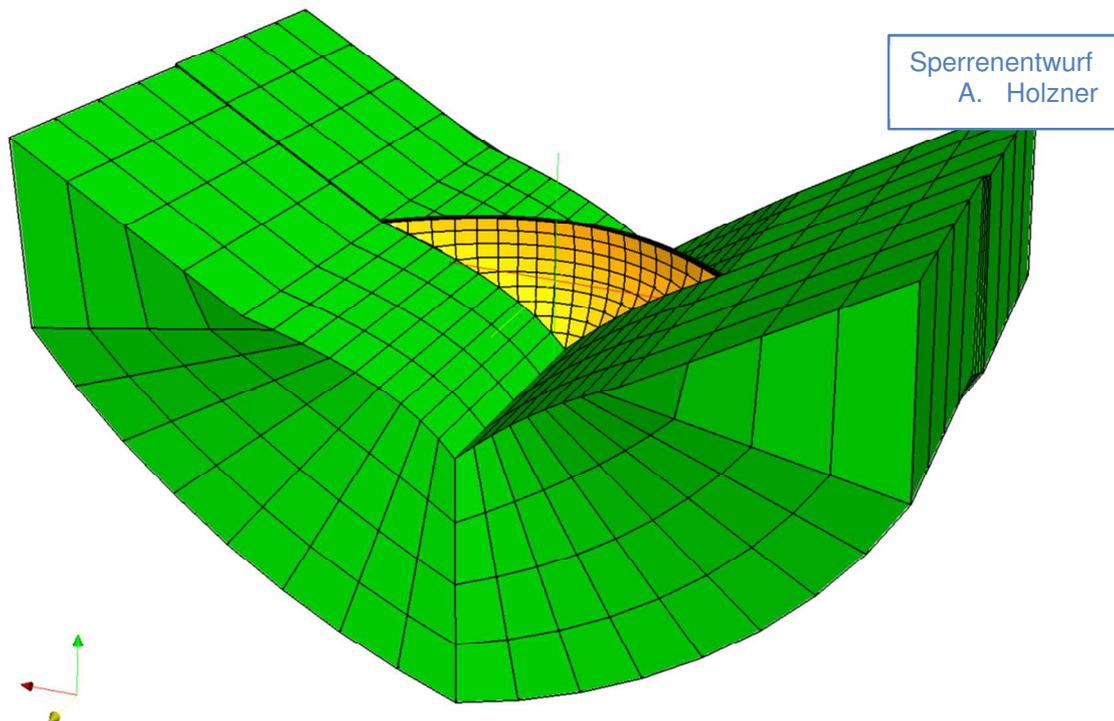


Abbildung 69: Berechnungsmodell, Netz, Prototyp-Talsperre

### 6.2.2 Materialkennwerte

Die Materialien für die Berechnung werden linear elastisch definiert. Die Materialwerte für den Sperrkörper und den Untergrund werden wie in der Tabelle 8 dargestellt verwendet.

	Sperre	Fels
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	20.000	20.000
Querdehnzahl [-]	0,2	0,2
Dichte [t/m <sup>3</sup> ]	2,4	2,0

Tabelle 8: Materialkennwerte, Talsperre, Prototyp

### 6.2.3 Belastungen

Die Parameteridentifikation wird an einer Lastfallkombination mit folgenden Lastfällen durchgeführt:

- Eigengewicht, orthotrop (entspricht freistehenden Blöcken)
- Eigengewicht, isotrop (wiedereinlesen in unverformtes Modell = Einprägen)
- Wasserlast, Vollstau (=Stauhöhe bis Krone)

Die Summe dieser Einzellastfälle, welche durch die Abfolge in der nichtlinearen Berechnung entsteht, bildet den Bezugslastfall für die Parameteridentifikation.

### 6.3 Modellstatik und Parametervariationen

Durch eine Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen der einzelnen Geometrieparameter auf die jeweiligen Ergebnisgrößen ermittelt.

Es werden verschiedene Parametermodifikationen mittels Addition und Multiplikation, sowohl positiv als auch negativ, und mit verschiedenen Verläufen entlang der Höhe berechnet. D.h. mit jeder Modifikation entsteht eine neue Talsperrengeometrie.

Jedes dieser neu entstandenen Modelle wird mit folgenden Schritten weiterverarbeitet:

- Vernetzung
- Erstellung der Solver Eingabedateien
- Durchführung der FE Berechnung
- Einlesen der Ergebnisse
- Auswertung der Spannungen, Dehnung, Verformungen, Sicherheiten, Gleitungen, etc
- Ermittlung der aktuellen Bewertungen für das momentane Modell

Exemplarische Ergebnisauswertungen der Bogenspannungen am Mittelschnitt (Abbildung 70), der Vertikalspannungen am Mittelschnitt (Abbildung 71), und der Radialverformungen an den Bögen (Abbildung 72) sind folgend dargestellt

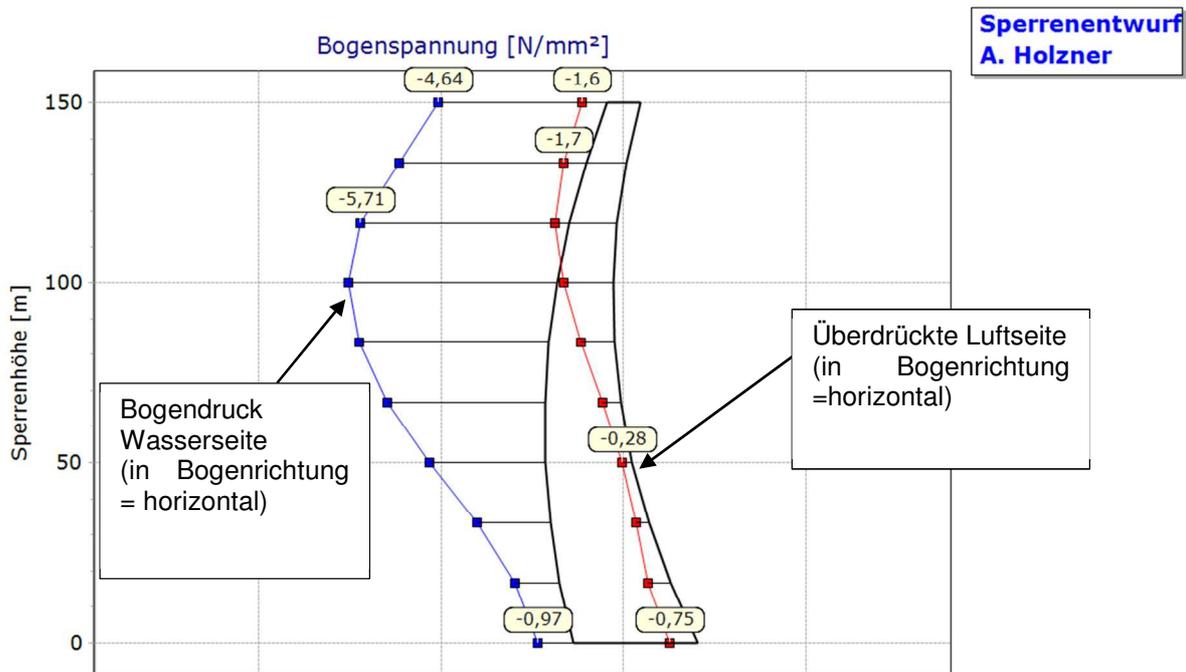


Abbildung 70: Spannungsbild, Bogenspannungen, Vollstau, Prototyp

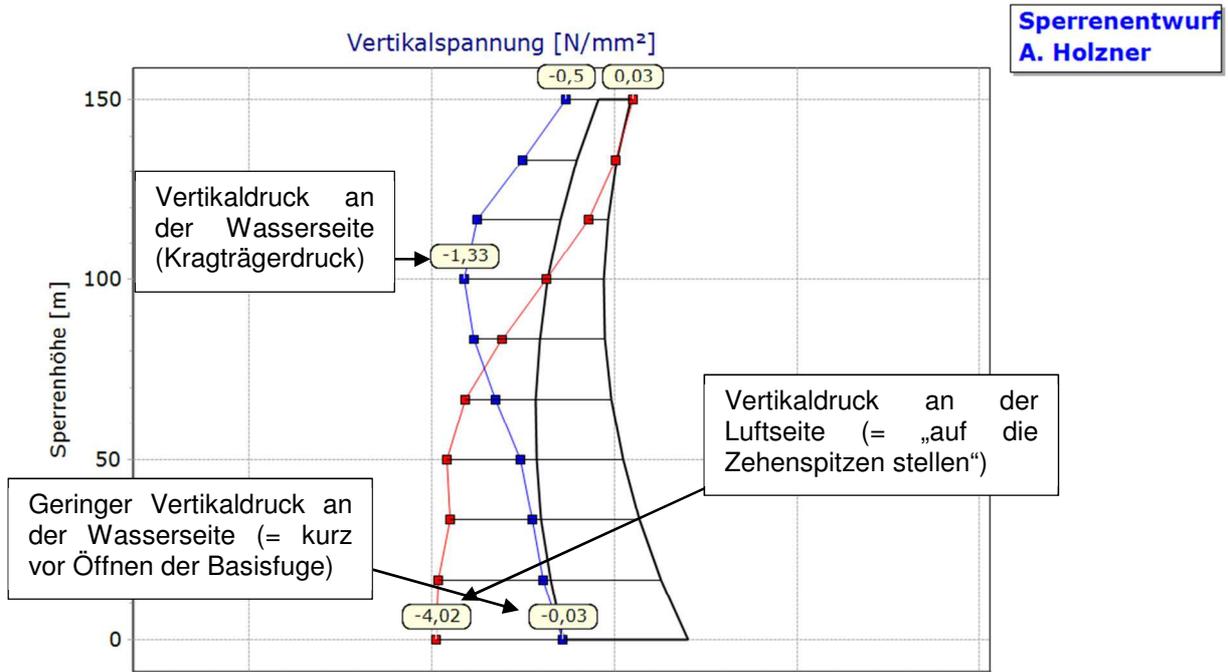


Abbildung 71: Spannungsbild, Vertikalspannungen, Vollstau, Prototyp

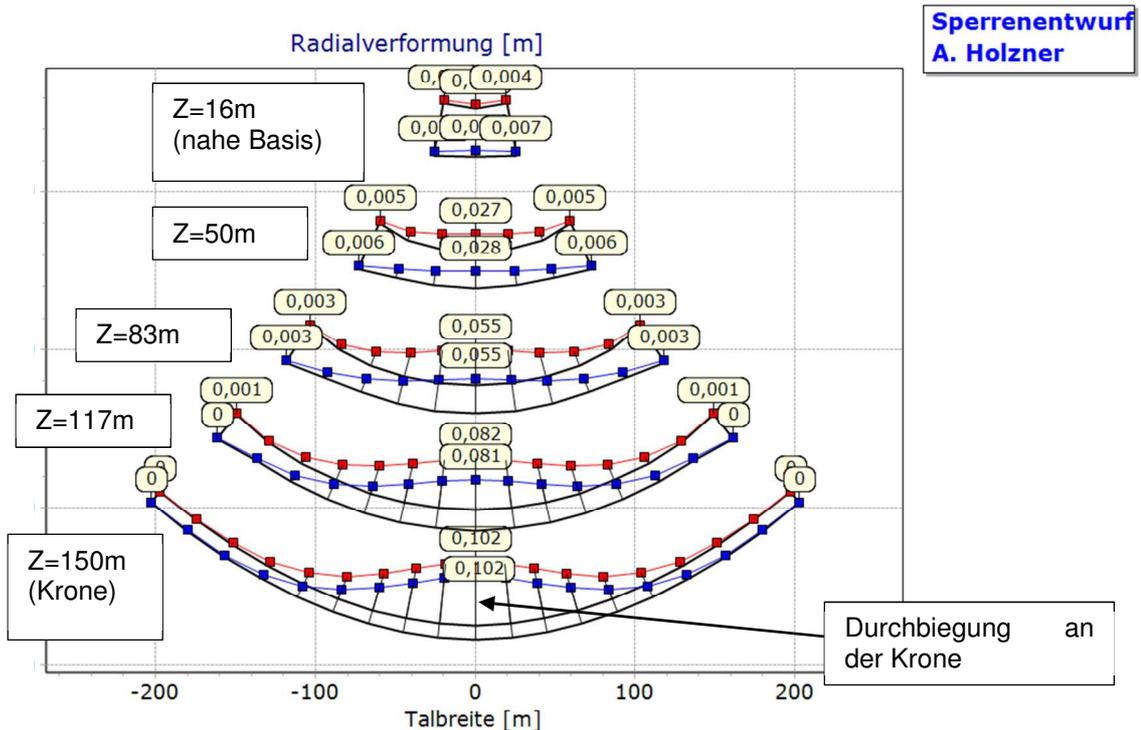


Abbildung 72: Verformungsbild, Radialverformung, Prototyp

Die initiale Schrittweite der Parameteridentifikation wird mit 7% des Ausgangswertes festgelegt, d.h. der jeweilige Parameterwert (wie z.B. der Bogenradius  $R_s$ ) wird um +/- 7% variiert. Für jede Variation wird eine Berechnung und eine anschließende Auswertung durchgeführt. In bereits durchgeführten Optimierungsversuchen wird mit einer ähnlichen Schrittweite ein brauchbares Ergebnis gefunden [Louch1].

#### 6.4 Darstellung der Sensitivitäten

Durch den Vergleich der Auswirkungen der Änderung mit den ursprünglichen Ergebniswerten wird eine Darstellung der Sensitivitäten erstellt. Diese Tabelle ist ein charakteristisches Bild einer bestimmten Talsperre. Ein Vergleich der Ergebniswerte von unterschiedlichen Talsperren lässt Rückschlüsse auf die Robustheit und Empfindlichkeit der Talsperrengeometrie zu.

Nachfolgend sind exemplarisch die Sensitivitäten für eine Änderung des Bogenradius  $R_s$  um  $\pm 7\%$  dargestellt. Es werden sowohl die Änderungen "relativ" zu den Parameteränderungen (Abbildung 73), als auch die "Absolut"-änderungen in den Ergebniswerten (Abbildung 74) dargestellt. Die Darstellung erfolgt in lagemäßigen Kontrollbereichen, welche in einem späteren Kapitel näher erläutert werden.

- Bei den "relativen" Ergebnislisten sind die Ergebniswerte aus der FE Berechnung durch die %-Größe der Parametervariation normiert worden
- Bei den "absoluten" Sensitivitäten sind die tatsächlichen Ergebniswerte aus der FE Berechnung aufgelistet.

Zur Übersichtlichkeit sind in den Abbildungen jeweils nur die Vorwärtsdifferenzen dargestellt, d.h. die Änderung der Werte vom Bezug ( $R_s=100\%$ ) zu einer  $+\Delta$  Änderung (in diesem Fall  $R_s=107\%$  zu  $R_s=100\%$ ). Durch eine optionale Betrachtung der Rückwärts- ( $R_s=93\%$  zu  $R_s=100\%$ ) und Zentraldifferenzen ( $R_s=107\%$  zu  $R_s=93\%$ ) können Rückschlüsse auf die Symmetrie bzw. Linearität der Parameteränderungen erhalten werden.

Die Berechnung der relativen Sensitivitäten erfolgt nach den Festlegungen aus Kapitel 6.1.2, Formel 12 und Abbildung 68. Die in Abbildung 73 angegebenen Sensitivitäten errechnen sich zu  $\Delta$ Spannung in Bezug zu  $\Delta$ Parameteränderung in Prozent, d.h.  $\Delta$ Spannung/ $\Delta$ Parameter in [%]. Diese Werte geben einen wichtigen Schritt in der Ermittlung der Systemsensitivität wieder, sind aber direkt noch nicht verwertbar. Es werden jeweils, aufgeteilt für jede der sechs Bewertungszonen bzw. Kontrollbereiche, die Sensitivitäten dargestellt.

Eine ähnliche Darstellung lässt sich mit absoluten Änderungen tätigen (Abbildung 74). Hier werden aber absolute Ergebnisgrößen (d.h. z.B. Spannungen), und die Änderungen dieser Ergebnisgrößen bei 7% Parameteränderung angegeben. Die dargestellten Sensitivitäten sind z.B.  $\Delta$ Spannungsänderung zu 7% Parametervariation. Diese Werte sind für spätere Betrachtungen direkt verwertbar.

Die beiden Abbildungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Parameteränderung  $R_s$  von 7% (von 100% auf 107%) bewirkt eine Änderung in den Bogenspannungen im oberen Kontrollbereich Mitte, mit:
- Maximalwert der Bogenspannung steigt um 1.963%, Minimalwert sinkt um -1,836% Spannung je 1% Parameteränderung
- Maximalwert der Bogenspannung steigt von  $-0.383 \text{ N/mm}^2$  auf  $-0,246 \text{ N/mm}^2$ , d.h. für eine Differenz von  $0.137 \text{ N/mm}^2$  für +7% Parameteränderung
- Minimalwert der Bogenspannung sinkt von  $-5.446 \text{ N/mm}^2$  auf  $-5.574 \text{ N/mm}^2$ , d.h. für eine Differenz von  $-0.129 \text{ N/mm}^2$  für +7% Parameteränderung

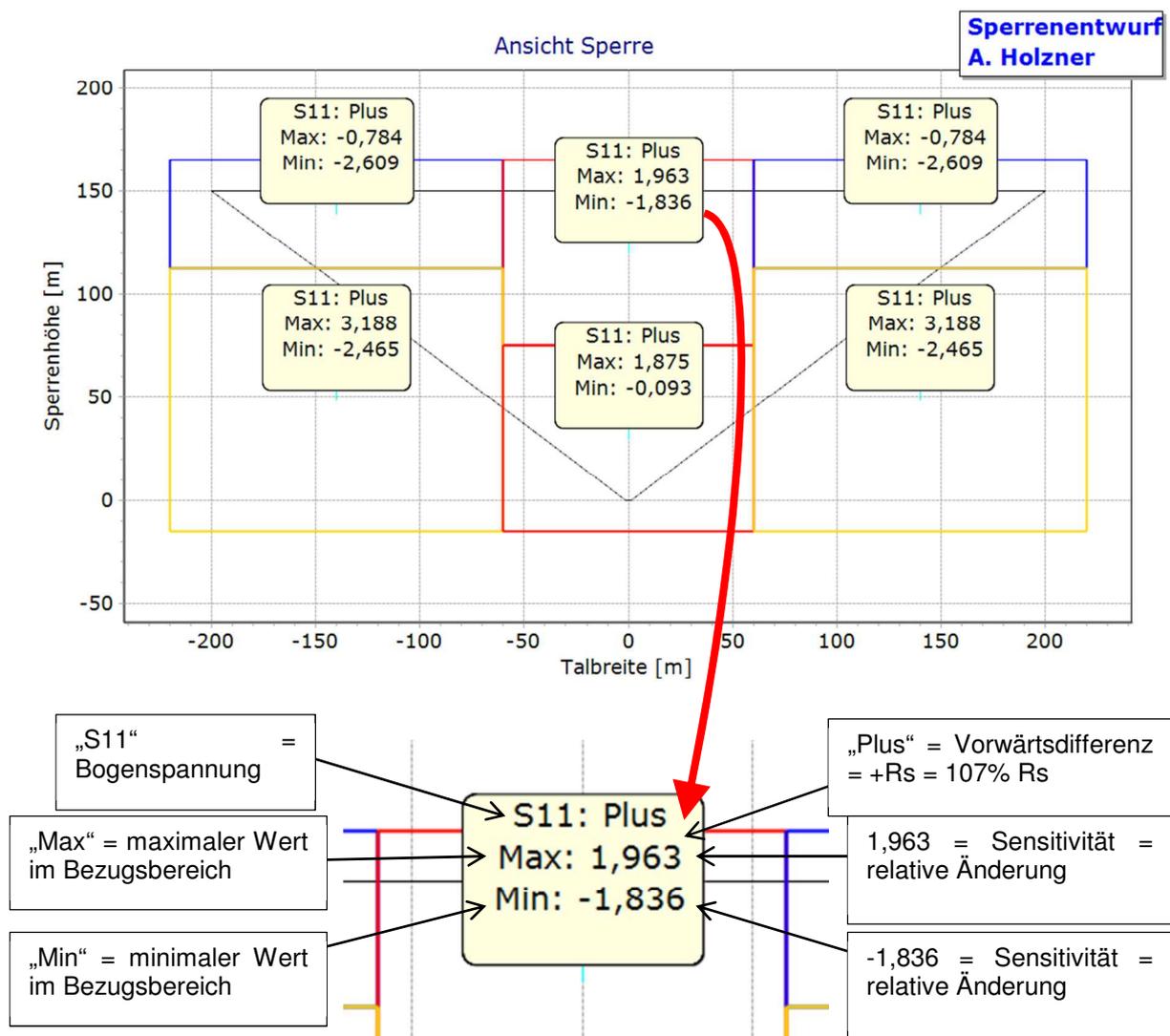


Abbildung 73: Sensitivität, Prototyp, Bogenspannung, "relativ",  $R_s$  +/-7%

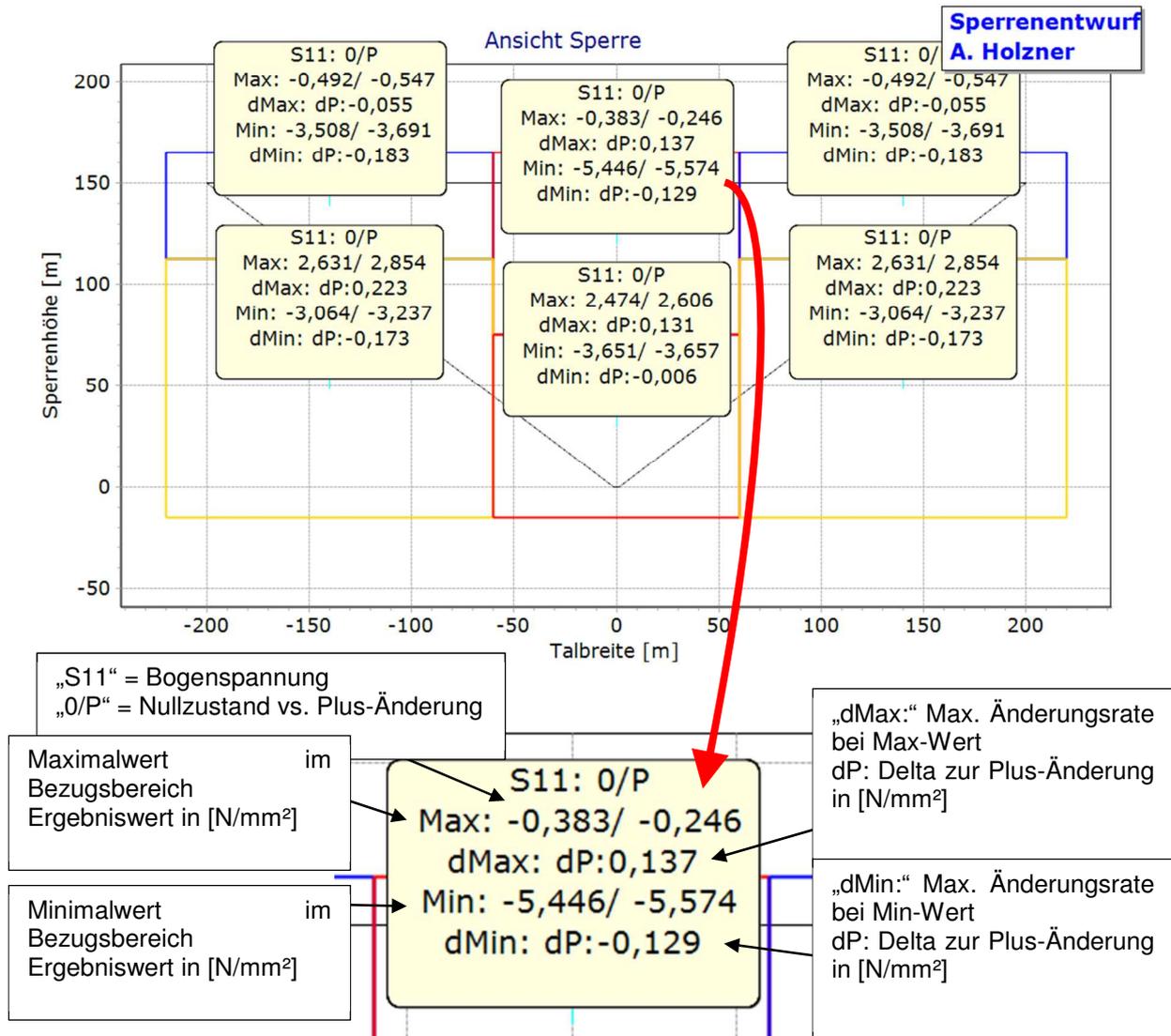


Abbildung 74: Sensitivität, Prototyp, Bogenspannung, "absolut",  $R_s$  +/- 7%

## 6.5 Schlussfolgerung

Die in diesem Kapitel ermittelten Sensitivitäten stellen charakterisierende Eigenschaften des jeweiligen Talsperrenentwurfes dar. Ausgehend von einer Änderung im Parameter um einen bestimmten Betrag, kann die Auswirkung auf die Ergebnisgrößen (wie etwa Spannungen und Verformungen) dargestellt werden.

Es kann somit eindeutig bestimmt werden, welcher Parameter der Geometrie (z.B. Bogenradius oder Dicke der Kämpferverstärkung) welchen Einfluss auf welche Ergebnisgröße hat, und in welchem Bereich der Struktur diese Änderung hauptsächlich auftritt.

Um die Parameteränderungen hinsichtlich der Auswirkung auf das Tragwerk zu ordnen, bedarf es nun eines geeigneten Bewertungsmodells. Ein Beispiel eines solchen Bewertungsmodells wird im nächsten Kapitel entwickelt und an die Sensitivitätsanalysen angehängt.

## 7 Bewertung

In Ergänzung zu den bereits erstellten Teilmodellen im integralen Sperrenmodell wird dem Talsperrensystem ein Modell zur Bewertung hinzugefügt. Dieses Modell soll eine multidimensionale Bewertung und eine Richtungsvorgabe zur Anpassung des Sperrenentwurfes anhand von klar definierten Ergebnisgrößen ermöglichen. Es soll kein klassisches mathematisches Verfahren zur automatisierten Optimierung erstellt werden, sondern ein Werkzeug zur Klassifizierung des aktuellen Entwurfes bzw. der vorgenommenen Anpassung.

### 7.1 Grundlagen der Optimierung

Als Optimierung kann grundsätzlich die Erreichung von Zielen in einem definierten Toleranzbereich, unter möglicherweise mehrfacher Anpassung des vorherigen Entwurfes verstanden werden. Beginnend von einer ursprünglichen Form wird meist in einem iterativen Prozess die Struktur solange verändert bis bestimmte oder alle Ziele erreicht sind, und ein für die Aufgabe „optimales“ Ergebnis vorliegt [vgl. Alt1 bzw. Harz1]. Durch die Einführung bzw. die Auswahl von relevanten Ergebniswerten kann ein Modell in bestimmten Klassen und Gesichtspunkten bewertet werden. Diese „Leistungswerte“ werden meist in den Bereichen Masse, Volumen, Verformung, Spannung, Eigenfrequenzen, Sicherheiten und Kosten bestimmt [choi1].

Generell sollte die zu verwendende Optimierungsmethode dem zu untersuchenden Problem entsprechend gewählt werden. In der Regel müssen spezielle Anforderungen an die Methode gestellt werden, welche nicht jede Form der Optimierung für jedes Problem zulassen. Einen perfekten Optimierungsalgorithmus für ein beliebiges Problem kann nicht angegeben werden. Vielmehr muss entsprechend der Überlegungen die bestmögliche Lösung gefunden werden.

Primär wird zwischen lokalen und globalen Lösungen entschieden. Ausschlaggebend für die Wahl des Verfahrens bei einem komplexen strukturmechanischen Problem ist meist der fehlende Zusammenhang zwischen lokalen Lösungen. Dadurch wird eine globale Methode mit der Berücksichtigung möglicherweise aller vorgegebenen lokalen Lösungen vorgegeben.

Weiters ist die Anzahl der zu verfolgenden Dimensionen für die Wahl des Algorithmus entscheidend. Am Beispiel der Optimierung einer Gewölbemauer ist in der Regel ein multidimensionaler Algorithmus zur Lösungsfindung erforderlich.

In der Optimierung spricht man von einem guten bzw. besten Punkt, wenn der Funktionswert in diesem Punkt klein bzw. das Minimum ist.

### 7.2 Optimierungsverfahren

Im Folgenden werden kurz grundlegende Randbedingungen für Optimierungsverfahren besprochen. Es wird nur auf direkte Verfahren Bezug genommen, welche mit dem aus der Funktion erhaltenen Funktionswert bzw. der betrachteten Testpunkte arbeiten. Im Gegensatz zu analytischen Funktionslösungen wird mit der Funktion selbst nicht gearbeitet.

Am Beispiel eines Verfahrens zur direkten Suche kann der Verfahrensablauf wie folgt angegeben werden:

- Ermittlung von Funktionswerten, sequentiell
- Ermittlung einer Menge von besten bisher ermittelter Funktionswerte
- Strategie, um anhand der bisherigen Ergebnisse die nächsten Funktionswerte zu verbessern

Eine grobe Einteilung dieser Art von Suchverfahren kann gegeben werden in [lewis1]:

- Gittersuchverfahren (pattern search methods): Festlegung eines zu betrachtenden Punktes. Ermittlung der Funktionswerte am festgelegten Gitter um den Punkt herum. Vergleich der Ergebnisse und Verschiebung des gesamten Gitters hin zum Optimum
- Adaptive Richtungssuche (adaptive search direction set): Ermittlung einer optimalen Suchrichtung anhand der vergangenen Funktionswertberechnungen (z.B. Powell)
- Simplex Suche (simplex search method): Suche wird von geometrischer Figur geleitet, wie z.B. Simplex [spend1] und Downhill Simplex Methode

Ein Teil des Gittersuchverfahrens wurde bereits in dieser Arbeit zur Bestimmung der Parametervariation bzw. Sensitivitätsanalyse verwendet. Der erwähnte Simplex Algorithmus ist aber kein globales Verfahren. Je nach Größe des Simplex können lokale Minima überwunden werden, bei entsprechenden Vorkenntnissen über den Funktionsverlauf kann er auch als globales Verfahren eingesetzt werden.

Aus pragmatischer Sicht kann auch die Erreichung eines lokalen Minimums als erstrebenswert angesehen werden, auch in Kenntnis, dass vielleicht noch eine bessere Lösung vorhanden ist.

Im Zusammenhang zwischen dem Gittersuchverfahren und der Simplexsuche ist die Wahl der Startschrittweite von Bedeutung, um nicht zu Beginn schon in lokalen Tälern festzustecken bzw. schwache Konvergenz zu erreichen. Um nicht in lokalen Minima den besten Funktionswert zu finden, muss teilweise für eine begrenzte Anzahl an Funktionsschritten auch eine Verschlechterung in Kauf genommen werden.

Ein anderer möglicher Lösungsansatz ist das Gittersuchverfahren dahingehend zu erweitern, dass mehrere Gitter in zufällig bestimmten Startwerten bestimmt werden. Diese Unterteilung in sogenannte Cluster kann Vorteile in der Geschwindigkeit der Zielfindung haben, kann aber in der unüberlegten Anwendung hohe Berechnungskosten aufwerfen [eckes1].

Die Hauptpunkte zu einem generellen Optimierungsmodell können aufgegliedert werden in:

- Bestimmung der lokalen und globalen Extremwerte des Modells
- Bewertung der Extremwerte in Bezug auf definierte Nebenbedingungen
- Veränderung der Ausgangsfunktion (d.h. die Form der Talsperre)
- Neuberechnung der lokalen und globalen Extremwerte des Modells

### 7.3 Optimierungsmodell Gewölbemauer

Das erzielbare Optimum, d.h. das Maß der Zielerreichung, ist am Beispiel der Gewölbemauer ein komplexes multidimensionales Ergebnis. Beginnend von einer optimalen Spannungssituation für die Materialien, einer optimalen globalen und lokalen Standsicherheit, bis hin zu einer optimalen wirtschaftlichen Baukörperabmessung und Materialbedarf, kann das zu erzielende Optimum weit streuen.

Es wurden bereits mehrere Ansätze zur Findung einer optimalen Form entwickelt [Liu1][Zhu1][Fial1][Seraf1]. In dieser Arbeit wird bewusst von einer automatischen Black-Box Lösung abgerückt, und hin zu einer bewussten Einbindung des Planers gearbeitet. Es soll vorrangig kein vollautomatisches System entwickelt werden, sondern ein Werkzeug zur Unterstützung, welches den Ingenieur auf dem Weg vom Vorentwurf, hin zu einer durchdachten Sperrkonzeption begleitet, und jederzeit Anpassungen in den wichtigsten Aspekten erlaubt.

Bei komplexen strukturmechanischen Aufgabenstellungen handelt es sich meist um ein nichtlineares Optimierungsmodell mit Nebenbedingungen. Infolge der Nichtlinearitäten sind solche Probleme i.d.R. schwieriger zu lösen als lineare Modelle [eckes1]. Die

Nichtlinearitäten beim System der Gewölbemauer bestehen zum einen im Material bzw. in den öffnenden Kontaktflächen. Zum anderen folgt das im Folgenden entwickelte Bewertungsmodell einer Reihe von nichtlinearen Funktionsverläufen.

Ein nichtlineares Problem besitzt in der Regel eine Reihe von lokalen Optima, von denen meist nur eines, das globale Optimum, von Bedeutung ist. Hinzu kommt, dass es durch entsprechende Bewertung des Optimums nach Zielsetzungen zu einer Verschiebung kommen kann, woraus mehrere optimale Lösungen unter verschiedenen Betrachtungspunkten entstehen.

Grundlegend kann zur Optimierung von Gewölbemauern oftmals angegeben werden (Tabelle 9):

Volumen $\Rightarrow$ Minimum
Nebenbedingungen normiert zu den Maximalwerten $\leq 1$

**Tabelle 9: Haupt- und Nebenbedingungen, Optimierung**

Die Hauptbedingung ist in der Regel das Betonvolumen, und in direkter Ableitung daraus die Kosten.

Die Nebenbedingungen können vielfältigster Natur sein, wie z.B. Spannungen, Verformungen, Kämpferkraftgrößen, Vertikalüberhänge im Mittelschnitt, Kämpferverstärkungen, absolute Werte der Mindest- und Höchstdicken, etc.

Zu hinterfragen gilt es hier aber die zweckmäßige Einbindung des Ingenieurs in eine „Black Box“ Lösung. Es kann als Ingenieur und Planer nicht vorteilhaft sein, einerseits ein Optimum in Hinblick auf geringes Volumen zu erhalten, andererseits mit grenzwertigen Spannungen und unvorteilhafter Lasteinleitung in den Kämpferbereich konfrontiert zu sein. In dieser Arbeit wird hier eindeutig auch eine Lösung mit einem höheren Volumen, aber dafür eine ausgewogenere und robustere Sperre, einer Minimum-Volumen-Lösung vorgezogen. Die Beweggründe und Entscheidungsvorgänge zu dieser Betrachtung werden in den nachfolgenden Kapiteln zusammengesetzt, die Abbildung dieser Zielsetzung erfolgt mittels einer gleichmäßigen Gewichtung der einzelnen Bewertungsfaktoren.

Um den Darstellungsaufwand in dieser Arbeit überschaubar zu halten, werden die zu berücksichtigenden Lastfälle beschränkt auf:

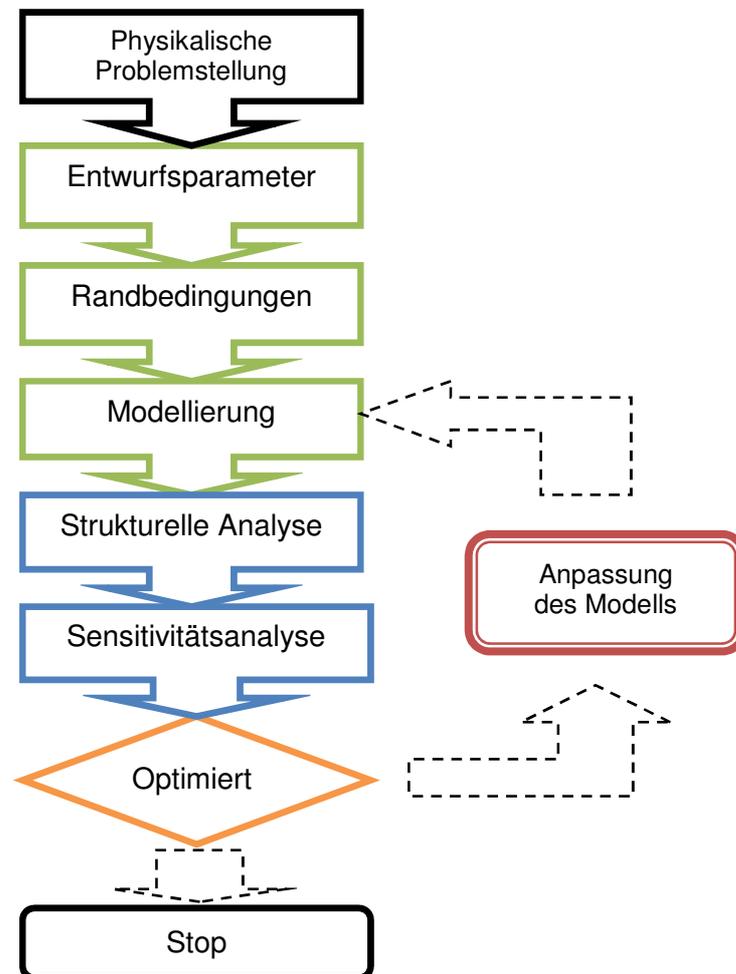
- Eigengewicht mit Wasserlast Vollstau

Sukzessive können weitere Lastfallkombinationen in die Betrachtung mit eingezogen werden, wie z.B. Sommertemperaturfeld, Wintertemperaturfeld, Auftriebslasten je Stauspiegel, Eislasten, Verlandung [wuxi1]. Es wird aber schnell klar, dass im Grunde jede Lastfallkombination eine eigene optimale Formgebung verlangt. Eine optimale Form für alle Lastfälle kann nur in einer Art Hüllkurve bzw. Mittelwert der Einzelformen festgelegt werden.

In dieser Arbeit wird kein neues mathematisches Modell zur Optimierung entwickelt. Ein automatisiertes Verfahren kann zwar innerhalb der vorgegebenen Randbedingungen eine optimale Lösung liefern, diese muss aber nicht unbedingt mit den Vorstellungen des planenden Ingenieurs übereinstimmen (wie z.B. eine an die maximale Druckspannung ausgenutzte Struktur, welche aber in der Gesamtkonzeption nicht den subjektiven Wünschen folgt, wie z.B. ausreichende Reserven bei Lastumlagerungen durch Nichtlinearitäten in der Basisfuge der Gewölbesperre).

Es wird in Abbildung 75 der Zusammenhang zwischen Geometrie, Änderungen an dieser und den Auswirkungen dargestellt. In Abänderung zu [choi1] wurde die Modellanpassung

adaptiert und die Reihenfolge des Entwurfsprozesses an die Gegebenheiten der Gewölbesperren angepasst. Eine Automatisierung dieser Feedback-Schleife nach genau definierten theoretischen Festlegungen kann z.B. durch ein Optimierungsverfahren (wie der beschriebenen Simplex-Downhill-Suche) realisiert werden. Dabei wird ohne akute Mitwirkung des Ingenieurs, nach genau vorab definierten Spezifikationen, das System angepasst. Als einfaches Beispiel wird die automatische Vergrößerung der Querschnittsdicke genannt, solange die maximalen Spannungen überschritten sind.



**Abbildung 75: Struktureller Entwurfsprozess**

Hauptansatzpunkt in dieser Abfolge (Abbildung 75) im strukturellen Entwurfsprozess ist die Anpassung des Modells, und die damit verbundenen Überlegungen. Die Auswahl der Gesichtspunkte nach denen die Modellanpassung erfolgt, und die Bündelung auf maßgebende Bezugsparameter sind von großer Bedeutung. Die Anpassung des Modells hat nach definierten Zielen zu erfolgen (wie z.B. die Ausnutzung der Spannungen), die Zielerreichung bzw. die Bewertung der Zielerreichung hat ebenso nach spezifizierten Methoden zu erfolgen (wie z.B. Bewertungsfunktionen zur Zielerreichung). Erst dadurch kann nach einer erfolgten Analyse konkret die Grundlage für eine Modellanpassung bereitgestellt werden, d.h. die genauen Details der Modellanpassungen beschrieben werden. Die damit verbundenen Fragestellungen und eine mögliche Lösungsvariante werden in den folgenden Kapiteln erarbeitet.

#### 7.4 Konkurrierende Zielsetzungen

In der Festlegung der Zielwerte (und eventueller Gewichtungen dieser) treten eine Reihe von sich widersprechenden Zielsetzungen auf. Beispielhaft seien konkurrierende Ziele als Behauptungen aufgezählt:

- ein minimales Volumen resultiert in einem maximal ausgenutzten Spannungsniveau, Reserven in der Spannung können durch ein erhöhtes Volumen geschaffen werden (z.B. Kosten vs. Sicherheit)
- ein auf die Wasserlast optimiertes Modell muss nicht unbedingt auch ein Optimum für eine andere Beanspruchung darstellen (z.B. Wasserlast vs. Eislast oder Verlandungslast)
- Ein auf ein bestimmtes Temperaturfeld optimiertes Modell muss nicht unbedingt auch für ein anderes Temperaturfeld optimal geeignet sein (z.B. Sommer- vs. Wintertemperaturfeld)
- Ergebnisgrößen der statischen Beanspruchungen sind anders verteilt und von anderem Stellenwert als durch dynamische Beanspruchungen verursachte (z.B. Statik vs. Dynamik)

Die Konkurrenz in den Zielen ist im Detail entsprechend zu gewichten und zu bewerten. Teils wird durch Vorschriften eine Grenze in den einzuhaltenden Bandbreiten gegeben, teils wird durch den Ingenieur die Klassifizierung der Talsperre hinsichtlich Schlankheit und Charakter vorgegeben.

#### 7.5 Rechentechnische Umsetzung der Bewertung

Um eine baupraktische Aussage zur Zielerreichung zu definieren, wird folgendes Konzept verwendet: grundlegend kann für alle möglichen Bereiche der hier durchgeführten Geometrieadjustierungen eine Bewertung als einfache Zahl ermittelt werden. Es wird eine Skala von 0 bis 10 festgelegt. 0 steht für keine Erfüllung bzw. ungenügend, der Wert 10 gibt volle Erfüllung bzw. erwünschten Status an.

Die Änderung der Werte von einer Analyse zur nächsten gibt eine Differenz zwischen diesen beiden Ergebniswerten. Die Bewertung kann eine Fließkommazahl sein, die Differenz der Bewertungen kann wiederum eine Fließkommazahl sein. Je nach gewünschter Genauigkeit der Betrachtung können somit Änderungen in der Bewertung im Prozentbereich dargestellt werden.

Diese Änderung kann entweder positiv oder negativ ausfallen, insofern kann je nach betrachteter Rubrik z.B. die Spannung im neuen Entwurf günstiger werden, aber die Verformungen auf der anderen Seite ungünstiger. Auch kann eine Zunahme der Standsicherheit in den Randblöcken, aber eine Abnahme der Standsicherheit weg von den Mittelblöcken beispielhaft auftreten.

Ziel ist es, durch die anfangs durchgeführte Parametersensitivität einen vorteilhaften Zusammenhang zwischen Formgebung, Standsicherheit und Volumen zu erreichen.

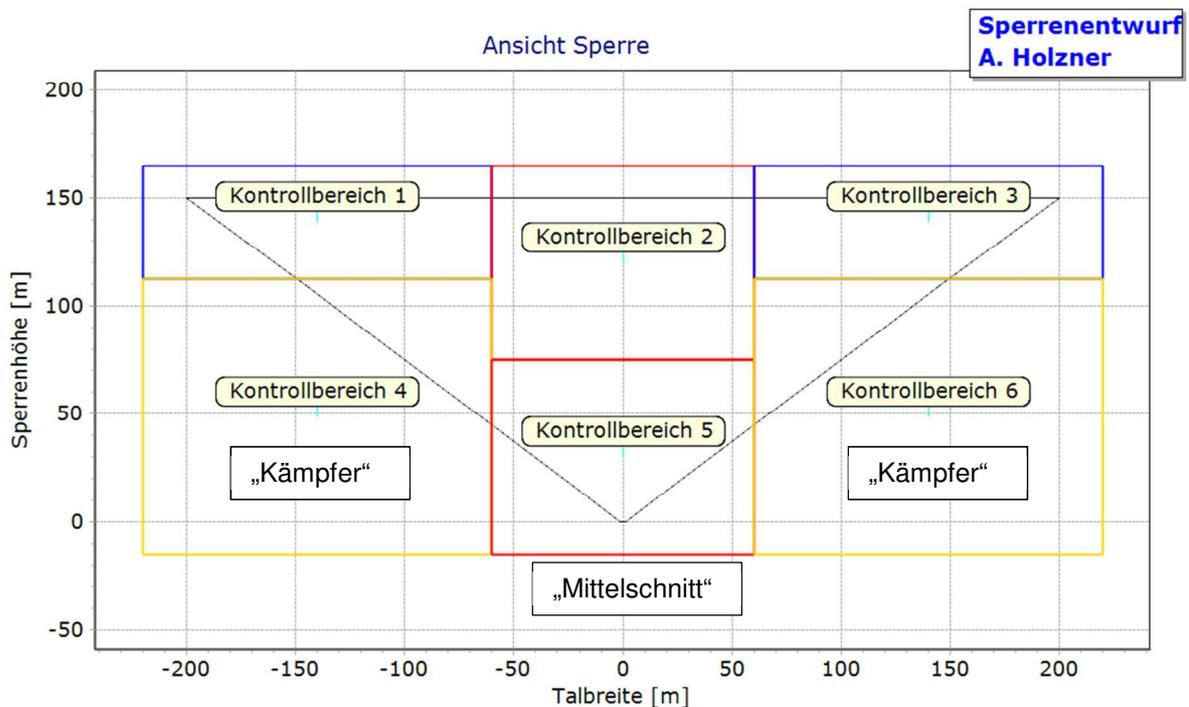
Alle einzeln zu bewertenden Bereiche werden mittels einer klassifizierenden Zahl erfasst. Aus den einzelnen Teilbereichen wird mittels optionaler Gewichtung eine Gesamtbewertung ermittelt. Durch die Einzel- und Gesamtbewertungen können die einzelnen Varianten in der Optimierungsabfolge miteinander verglichen werden. Die weiteren Berechnungen, bzw. die Ausrichtungen dieser, werden ebenfalls über diese Werte gesteuert. Es handelt sich dabei um ein sehr primitives Modell zur Optimierungssteuerung, welches aber trotz der Einfachheit umfassend anpassbar und steuerbar ist. Das entwickelte Bewertungsmodell kann je nach Situation und Projekt an die Randbedingungen angepasst werden, und bietet somit eine maßgeschneiderte Lösung anhand von eindeutig nachvollziehbaren Zusammenhängen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die korrekte Abbildung der nichtlinearen Spannungssituation im Bereich der Basisfuge (=Sperrenaufstandsfläche). Zum einen soll ein schneller Solver zur raschen Berechnung des jeweiligen Modells verwendet werden, zum anderen stehen die momentanen Rechenzeiten von aufwändigen nichtlinearen Berechnungen im Gegensatz zum vorgenannten Ziel. Die Berücksichtigung der Öffnung der Basisfuge, entweder durch Modellierung einer diskreten Fuge bzw. durch entsprechende Abminderung oder Umverteilung der Spannungen ist wesentlich für das Optimierungsergebnis [ouyan1][zien1].

## 7.6 Kontrollbereiche

Ein grundlegender Aspekt ist die Fixierung der räumlichen Lage der Bezugspunkte in der Talsperre. Durch Änderungen in der Geometrie können sich Extrema verschieben, d.h. der Bezug auf einen fixen Punkt oder einen fixen Horizontal- oder Vertikalschnitt kann sich in Hinblick auf eine Bewertung negativ auswirken. Die Festhaltung an immer dem gleichen Punkt zur Ergebnisauswertung birgt die Gefahr, Ergebnisse der Systemänderungen nicht korrekt abzubilden (wenn z.B. ein Extrema lokal woanders entsteht). Ähnlich [prisc1] empfiehlt es sich über die Sperre hinweg Kontrollbereiche festzulegen, und die lokalen Extrema in diesen Bereichen zu bestimmen und miteinander zu vergleichen. Durch sinnvolle Wahl der Bereichsgrenzen kann daraus ein praktikables Auswertemodell entwickelt werden.

Die Kontrollbereiche sehen bei dem für diese Arbeit entwickelten Bewertungsmodell wie folgt aus (Abbildung 76). Statt z.B. Ergebnissen von 20.000 Elementknoten zu bewerten, wird je Kontrollbereich das jeweilige Maxima/Minima bestimmt (Spannungen, Verformungen, Sicherheiten, etc.), und damit die Bewertung vollzogen. Die oftmals unzähligen FE-Ergebniswerte werden somit auf Extrema der 6 Ergebnisbereiche reduziert.



**Abbildung 76: Bewertungen, Anordnung der Kontrollbereiche, Ansicht Sperre**

Der Bereich um den Mittelschnitt bildet zwei wesentliche Kontrollbereiche (Bereich 2 und 5), welche meist die maximalen Werte für die maßgebenden Ergebnisgrößen beinhalten. Diese Bereiche sind eng gehalten, um die maximalen Werte in Bogenmitte (Scheitel) zu ermitteln. Die weiteren Bereiche sind links und rechts der mittleren Kontrollbereiche angeordnet

(Bereiche 1 und 4, sowie 3 und 6). In diesen liegen die Randblöcke, welche unabhängig der Mittelblöcke betrachtet werden.

Für eine genauere Betrachtung der Situation an der Aufstandsfläche der Sperre, wird der untere Bereich des Mittelblocks zusätzlich hinsichtlich Gleitsicherheiten und Aufstandskräften bewertet (Kontrollbereich 5). Auch die unteren Kontrollbereiche der randnahen Blöcke (Bereiche 4 und 6) werden entsprechend dem Bereich um den Mittelschnitt (Bereich 5) zusätzlich bewertet, um den wichtigen Bereich der Kämpfauflager eigens abzubilden. Eine Betrachtung der Lasteinleitung in den Felsuntergrund erfolgt im gesonderten blockweisen Standsicherheitsnachweis, eine Betrachtung der maximalen Drücke in der Aufstandsfläche kann eigens durchgeführt werden. Die Kontrollbereiche sind für die Spannungen (Bogen, Vertikal, Haupt) und die Verformungen (Radial) anwendbar. Für Standsicherheit, Gleitflächen und Volumen kommen eigene Betrachtungen zur Anwendung.

## 7.7 Bewertungsfunktionen

Um die Erreichung der Ziele miteinander vergleichen zu können, müssen diese entsprechend auf einer gemeinsamen Grundlage bewertet werden. Als Bewertungsparameter für die Zielerreichung können vielfältige Unterscheidungen getroffen werden. Wie bereits in einem vorherigen Kapitel erwähnt können sowohl Eingangsgrößen, Ergebnisgrößen oder auch Schätzungen als Grundlage dienen.

Beispielhaft können verglichen werden:

- Maximale und Minimale Spannungen an bestimmten Punkten oder in bestimmten Bereichen
- Maximale Verformungen entlang von Horizonten oder in bestimmten Bereichen
- Aufsummierte Druckspannungen in definierten Bezugsflächen als Kräfte

Das Bewertungsschema kann je nach Randbedingungen des Projektes differenzierend festgelegt werden, und stellt keine einzige absolute Lösung dar. Die Details in den Bewertungsgrößen sind im Folgenden erläutert.

### 7.7.1 Spannungen

Die Kriterien für die Einhaltung der Spannungen werden für diese Arbeit mit absoluten Werten festgelegt (Formel 14). Die auftretenden Spannungen sollen unter den vorgegebenen Werten liegen, eine Überschreitung ist zulässig, wird aber nachteilig bewertet (siehe nachfolgende Abbildung 77).

$$\sigma_{Druck} \leq \sigma_{Druck,zul.} \quad (14.1)$$

$$\sigma_{Zug} \leq \sigma_{Zug,zul.} \quad (14.2)$$

#### Formel 14: Zulässige Spannungen

Auch kann alternativ ein relativer Ausnutzungsgrad der Spannungswerte berechnet werden mit (Formel 15):

$$F_{Druck} = \frac{\sigma_{Druck}}{\sigma_{Druck,zul.}} \leq 1 \quad (15.1)$$

$$F_{Zug} = \frac{\sigma_{Zug}}{\sigma_{Zug,zul.}} \leq 1 \quad (15.2)$$

#### Formel 15: Zulässige Ausnutzungsgrade

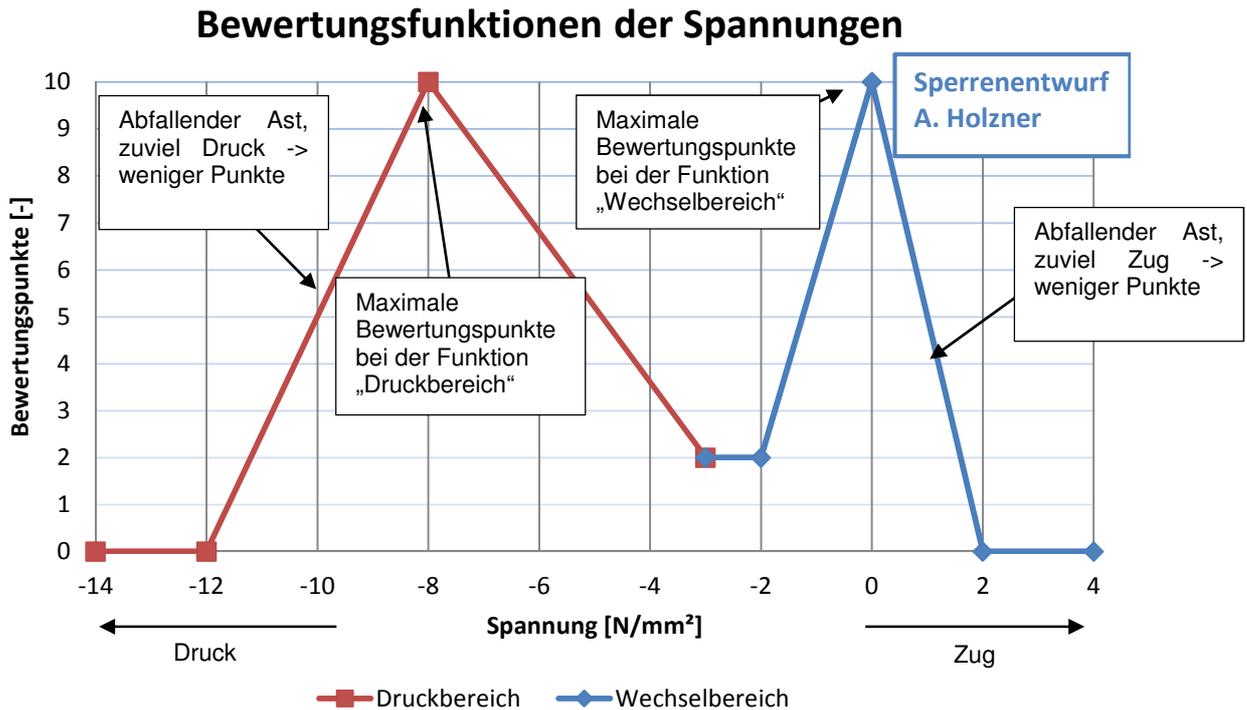
Durch die Normierung treten aber Überschreitungen kleiner Werte um mittlere Beträge überproportional stark in den Vordergrund (z.B. max. Zug von 0.5N/mm<sup>2</sup>, Überschreitung um 0.1N/mm<sup>2</sup> entspricht +20%, im Vergleich zu max. Druck von 10N/mm<sup>2</sup> mit 0.1N/mm<sup>2</sup>

Überschreitung entsprechend +1%). Relative Werte für Spannungen werden in dieser Arbeit daher nicht verwendet.

Die Verteilung der Bewertungspunkte erfolgt nach dem Schema aus Abbildung 77. Für Druck und Zug wird unterschiedlich bewertet. Die Unterteilung der Bewertungsfunktion lässt sich erklären mit:

- Funktion des „Druckbereich“ (verwendet für Ergebniswerte im oberen Druckbereich): Maximale Punkteanzahl (10) bei einer Druckspannung von  $8\text{N/mm}^2$  (=Zielwert). Überschreitungen sind bis  $12\text{N/mm}^2$  möglich, die Bewertungsfunktion nimmt bei Überschreitungen schnell auf 0 Punkte ab (=zu hohe Ausnutzung). Unterschreitungen des Zielwertes der Druckspannung werden ebenfalls nachteilig bewertet (= zu konservative Auslegung). Bei Unterschreitung einer maximalen Druckspannung von  $3\text{N/mm}^2$  werden nur mehr 2 Bewertungspunkte vergeben. Zwischen dem Maximalwert, dem Zielwert und dem Minimalwert verläuft die Bewertungsfunktion linear, bei Überschreitungen außerhalb der vorgegebenen Grenzen ist die Funktion konstant definiert.
- Funktion des „Wechselbereich“ (verwendet für Ergebniswerte mit Zugspannung, geringer Druckspannung bzw. nahe an diesem Wechselbereich): ähnlich der Funktion des „Druckbereich“ wird wieder ein Zielwert definiert. Die maximalen Bewertungspunkte gibt es bei einer maximalen Spannung von  $0\text{N/mm}^2$ , d.h. genau am Wechselbereich von Druck- zu Zugspannung („gerade kein Zug tritt auf“). Bei Überschreitungen dieser Spannung (hin zu mehr Zug) fällt die Punkteanzahl rasch auf 0, bei einer Zugspannung von  $2\text{N/mm}^2$  (Maximalwert). Der Minimalwert der „Bewertungsfunktion der Zugspannungen“ ist mit 2 Punkten bei einer Druckspannung von  $2\text{N/mm}^2$  spezifiziert. Dazwischen verläuft die Funktion linear, außerhalb der vorgegebenen Grenzen ist die Funktion konstant.

Die Wahl der Funktionswerte (Maximal-, Ziel-, und Minimalwert) wurde an in der Vergangenheit durchgeführten Talsperrenstatiken orientiert ([holz1] bis [holz11]). Die maximalen Druckspannungen am Zielwert und die maximalen Zugspannungen am Zielwert entsprechen den für die Talsperrenplanung üblichen Bereichen. Diese Werte gelten für im Talsperrenbau verwendeten Normalbeton, welcher als Massenbeton verarbeitet wird. Je nach Projektrandbedingung kann die Wahl der Zielwerte unterschiedlich festgelegt werden. Die Werte stellen Anhaltswerte für die Demonstration der Funktionalität von der Bewertungsfunktion dar.



**Abbildung 77: Bewertungsschema, Spannungen**

## 7.7.2 Verformungen

Die Bewertung der Radialverformungen wird als relativer Vergleich geführt (Abbildung 78). Die maximalen Radialverformungen im Kontrollbereich 2 (Mitte bzw. Mittelschnitt) werden den maximalen Radialverformungen des Kontrollbereiches 1 bzw. 3 (Rand) gegenübergestellt. Daraus wird ein Maß für die ausgewogene Zunahme der Verformungen hin zur Mitte berechnet. Unausgewogene Geometrien zeichnen sich entweder durch eine stark erhöhte Mittendurchbiegung im Vergleich zu den Randblöcken aus, oder aber die Randblöcke weisen nahezu gleiche oder erhöhte Verformung als die Mittelblöcke auf. Der relative Vergleich der beiden Verformungswerte gibt zusammenfassend eine Einschätzung dieses Verhaltens wieder.

Die maximale Anzahl an Bewertungspunkten (10) wird für einen Verhältnissfaktor von  $U_{\text{Mitte}}/U_{\text{Rand}}$  von 1.25 vergeben, d.h. der Mittelschnitt verformt sich 1.25fach mehr in Radialrichtung (ins Tal) als das Maximum der Randschnitte. Die minimalen Bewertungspunkte (0) werden bei einem Verhältnis von  $U_{\text{Mitte}}/U_{\text{Rand}}$  von 2.0 (=2.0fache Mittenverformung zu Randverformung) bzw. 0.8 (=0.8fache Mittenverformung zu Randverformung) erreicht. Bei  $U_{\text{Mitte}}/U_{\text{Rand}}$  ist der Mittelbereich des Gewölbes als zu weich anzusehen, bei  $U_{\text{Mitte}}/U_{\text{Rand}}$  sind die Randbereiche des Gewölbes (z.B. 1/3 Bereiche) als zu weich anzusehen.

Die Werte wurden als Erfahrungswerte aus durchgeführten Talsperrenstatiken festgelegt ([holz1] bis [holz9]). Ungünstige Verformungscharakteristika sollen auch ungünstiger in die Bewertung mit einfließen. Eine exemplarische Verteilung von Kronenbogenverformungen in Abhängigkeit von verschiedenen Gewölbesteifigkeiten ist in Abbildung 79 dargestellt.

### Bewertungsfunktion der Radialverformungen

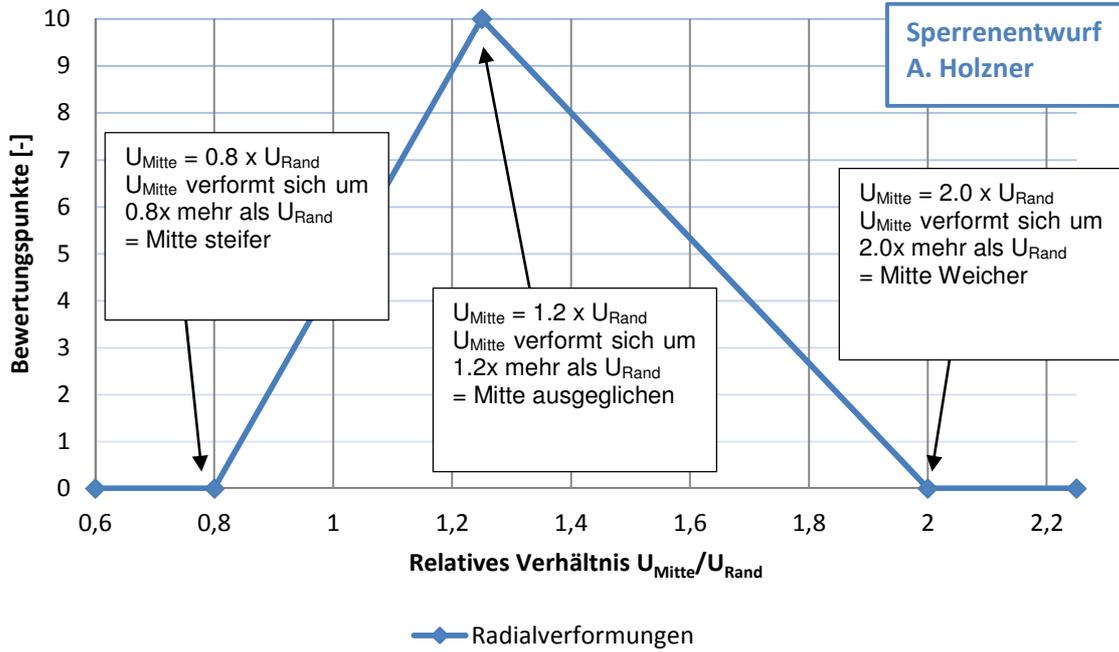


Abbildung 78: Bewertungsschema, Radialverformungen

### Radialverformungen Kronenbogen [m] in Abhängigkeit von Steifigkeitsvariationen

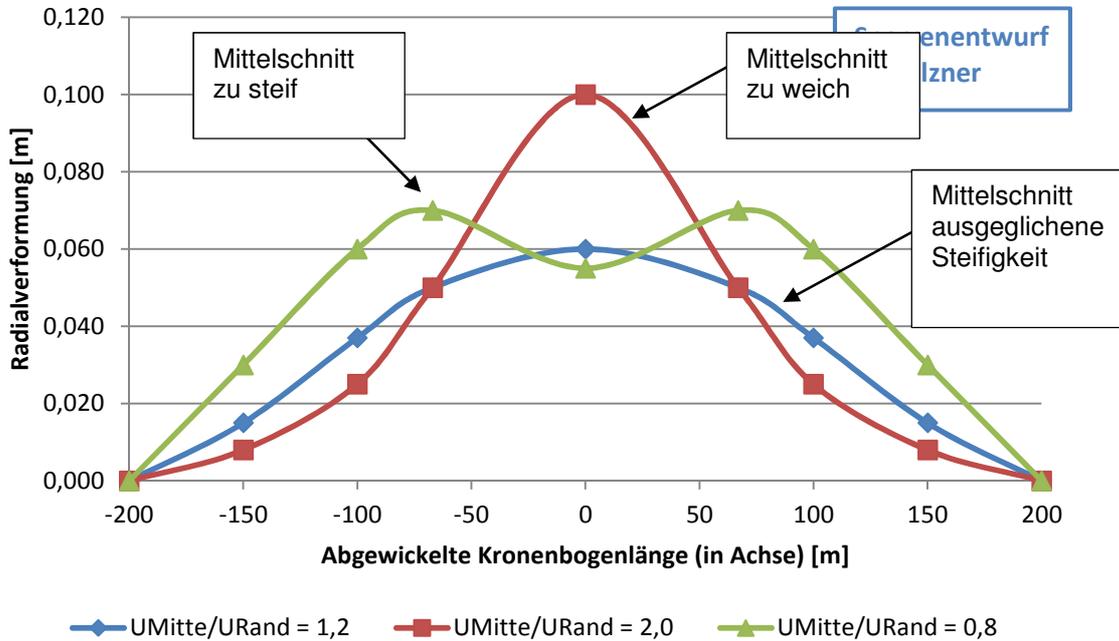


Abbildung 79: Radialverformungen in Abhängigkeit der Bogensteifigkeiten

### 7.7.3 Standsicherheit

Die Standsicherheit wird durch den Begriff der Gleitsicherheit bewertet. Stabilitätsversagen durch Kippen ist durch die räumliche Tragwirkung der Gewölbesperren i.d.R. ausgeschlossen. Für die Bestimmung der Gleitsicherheit werden die blockweisen Normalkräfte und Schubkräfte einander gegenüber gestellt. Die Normal- und Schubkräfte werden aus den Spannungen und den zugehörigen Flächen durch Summenbildung ermittelt. Es wird ein Standard Gleitsicherheitsnachweis geführt (Formel 16), die Zuordnung erfolgt entweder auf die Aufstandsflächen von Blöcken oder auf fiktive regelmäßige Unterteilungen entlang der Sperrenaufstandsfläche.

$$Sicherheit = \frac{\mu * Normalkraft}{Schubkraft} \quad (16)$$

**Formel 16: Gleitsicherheit**

Als Reibungswinkel  $\mu$  wird  $45^\circ$  bzw.  $\mu = \tan(45^\circ) = 1.0$  verwendet, d.h. Normalkraft und Schubkraft können direkt miteinander in Verhältnis gesetzt werden.

Um eine Überbewertung der Randblöcke zu reduzieren, werden die nur Sicherheiten der mittleren Blöcke berücksichtigt (Abbildung 80). Dies begünstigt die Wertung der höchsten Mittelblöcke und die für die Lastabtragung des Gewölbes wichtigen Blöcke im Kämpferbereich.

Es wird in der Berechnung der Bewertungen unterschieden in die beiden folgenden Sicherheitsbetrachtungen (Lage gemäß Abbildung 80, Bewertungsfunktion gemäß Abbildung 81):

- Gleitsicherheit minimal: Minimaler Wert der Sicherheiten im Bereich von 25% bis 75% der Sperrenbreite. Der Zielwert der Bewertungsfunktion (10) liegt bei einer minimalen Gleitsicherheit von 1.5. Bei höheren Gleitsicherheiten bleibt die Bewertungsfunktion konstant. Bei geringeren Gleitsicherheiten sind 2 weitere Punkte zu unterscheiden. Zum einen wird bei einer Gleitsicherheit von 1.8 die Bewertungspunkteanzahl von 8 erreicht. Darunter reduzieren sich die Bewertungspunkte bis zum Minimum von 0 Punkte, bei einer Gleitsicherheit von 1.0. Darunter werden konstant 0 Punkte vergeben.
- Gleitsicherheit mittlere: Mittlerer Wert der Sicherheiten im Bereich von 25% bis 75% der Sperrenbreite. Ähnlich der minimalen Gleitsicherheit stellt sich die Bewertungssituation bei den mittleren Gleitsicherheiten dar. Das Maximum der Bewertungspunkte (10) wird hier erst bei einer mittleren Gleitsicherheit von 2.5 erreicht. Für höhere Gleitsicherheiten bleibt die Funktion konstant. Für mittlere Gleitsicherheiten von 1.5 werden 8 Bewertungspunkte vergeben. Danach fällt die Bewertungsfunktion auf 0 Punkte, bei einer mittleren Gleitsicherheit von 0. Für kleinere mittlere Gleitsicherheiten bleibt die Funktion konstant auf 0.

Es sollte hier auf jeden Fall auch eine Unterscheidung zwischen Neubau und Bestandsuntersuchung getroffen werden. Es kann für den Neubau ein optionales Abbruchkriterium der Bewertungsfunktion für z.B: eine Gleitsicherheit von 1.5 eingeführt werden (rot strichlierte Linie in Abbildung 81). Bei Unterschreiten dieser Entwurfsvorgabe scheidet der aktuelle Entwurf aus bzw. wird entsprechend nicht gewertet.

Für Bestandsuntersuchungen empfiehlt sich der Verzicht auf etwaiges Abbruchkriterium, da die Bestandssicherheiten von bestehenden Entwürfen unter den heutigen Entwurfsvorgaben liegen können. Ähnliche Abbruchkriterien sind natürlich bedarfsweise auch für die anderen Bewertungsfunktionen möglich.

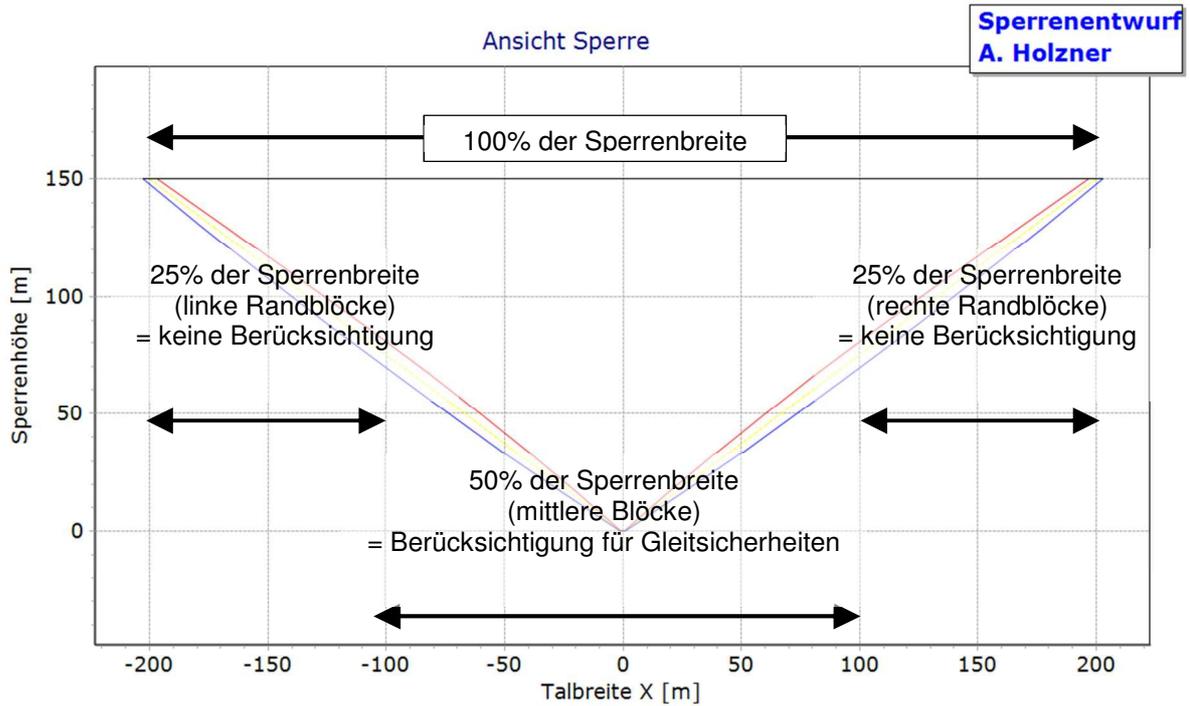


Abbildung 80: Zuordnung der Betrachtungsbereiche für die Gleitsicherheiten

### Bewertungsfunktion der Sicherheiten Minimal/Mittlere

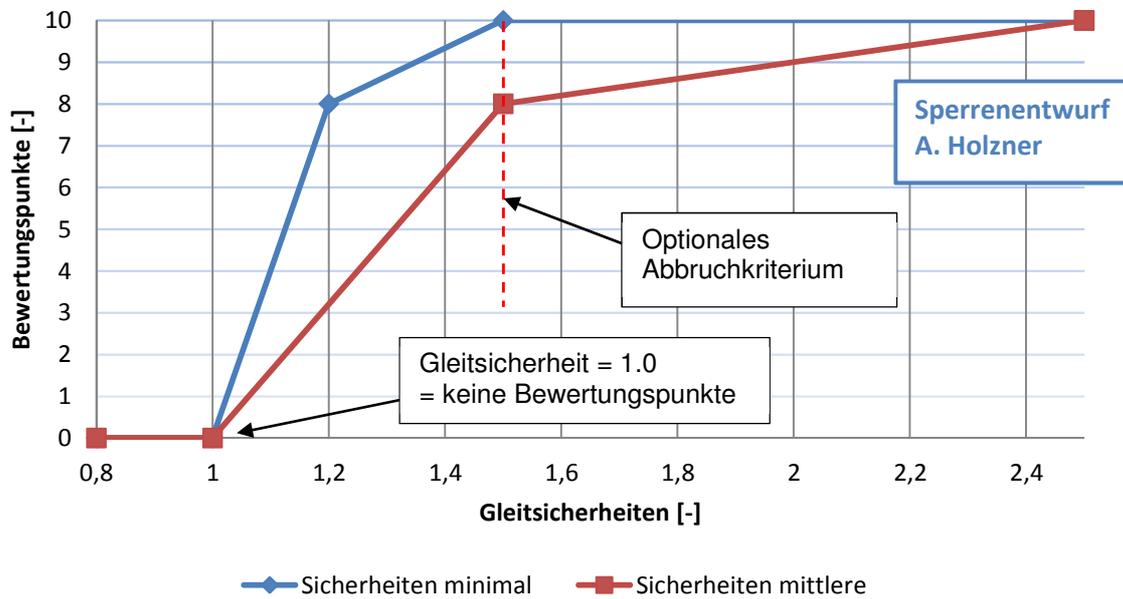


Abbildung 81: Bewertungsschema, Gleitsicherheiten

#### 7.7.4 Volumen

Das Volumen einer Gewölbesperre steht in unmittelbarem Zusammenhang mit den Baukosten. Da es sich bei Talsperrenbauwerken um Bauteile mit hohem Materialaufwand handelt, kommt diesem Faktor neben den Spannungen nennenswerte Bedeutung zu.

Die zu dem Volumen zugehörigen Baukosten lassen sich unterteilen in:

- Kosten für den Sperrkörper (Schalung+Beton)
- Kosten für den Felsaushub

Die Gesamtkosten stellen eine Linearkombination der beiden Kennwerte dar [zhubo1], welche mit der Abhängigkeit der Oberfläche noch erweitert werden können (Formel 17):

$$K_{ges} = P_A * V_A + P_B * V_B + P_S * V_S \quad (17)$$

**Formel 17: Gesamtkosten, Zusammensetzung**

Mit:

$K_{ges}$	Gesamtkosten	[Euro]
$P_A$	Einheitspreis Aushub	[Euro/m <sup>3</sup> ]
$V_A$	Volumen Aushub	[m <sup>3</sup> ]
$P_B$	Einheitspreis Beton	[Euro/m <sup>3</sup> ]
$V_B$	Volumen Beton	[m <sup>3</sup> ]
$P_S$	Einheitspreis Schalung	[Euro/m <sup>2</sup> ]
$V_S$	Fläche Schalung	[m <sup>2</sup> ]

Dieser Ansatz ist eine überschlägige Näherung als erster Ansatz. Projekt- und baubezogene Kosten, wie z.B. Planung und Baustelleneinrichtung, werden hier nicht berücksichtigt. Oftmals stellt auch der erhöhte Schalungsaufwand, durch nicht direkt wieder einsetzbare Schalungselemente, einen zusätzlichen Kostentreiber für doppelt gekrümmte Gewölbesperren [mart1].

Um für alle Entwürfe, und auch bei wechselnden Nullsystemen (d.h. unterschiedliche Ausgangsgeometrien mit denen verglichen wird), immer den gleichen Vergleichsmaßstab zu gewährleisten, wird das Vergleichsvolumen fix auf den Wert aus dem Vorentwurf nach [usbr2] bezogen. Dieser Wert ist als erste Näherung zwar kein optimaler Volumenwert, zeigt aber einen konstanten Verhältniswert im Bereich der möglichen Volumina (d.h. der ermittelte Vorentwurfswert ist unabhängig von der Geometrieform, und nur abhängig von Talbreite und Talform, sowie der Sperrhöhe). Die Bewertungsfunktion des Vergleichsvolumens ist in Abbildung 82 dargestellt.

Für die Erreichung eines Verhältnisses der Volumina  $V_{Aktuell}/V_{Vorentwurf}$  von 1.0 werden 5 Bewertungspunkte vergeben, d.h. das Volumen des aktuellen Entwurfes entspricht dem Volumen des Vorentwurfes. Durch Verlagerung dieses Verhältnisses von  $V_{Aktuell}/V_{Vorentwurf}$  auf 0.7, d.h. der aktuelle Entwurf hat 70% des Volumens vom (konstanten) Vorentwurfsvolumens, wird die maximale Bewertungspunkteanzahl (10) erreicht. Für kleinere Volumina bleibt die Bewertungsfunktion auf konstanten 10 Punkten. Für Verhältnisse der Volumina  $V_{Aktuell}/V_{Vorentwurf}$  bis 1.3, d.h. der aktuelle Entwurf hat das 1.3fache Volumen des Vorentwurfes, nehmen die Bewertungspunkte bis 2 Punkte ab. Danach bleibt die Bewertungsfunktion konstant auf der minimalen Punkteanzahl von 2 Punkten.

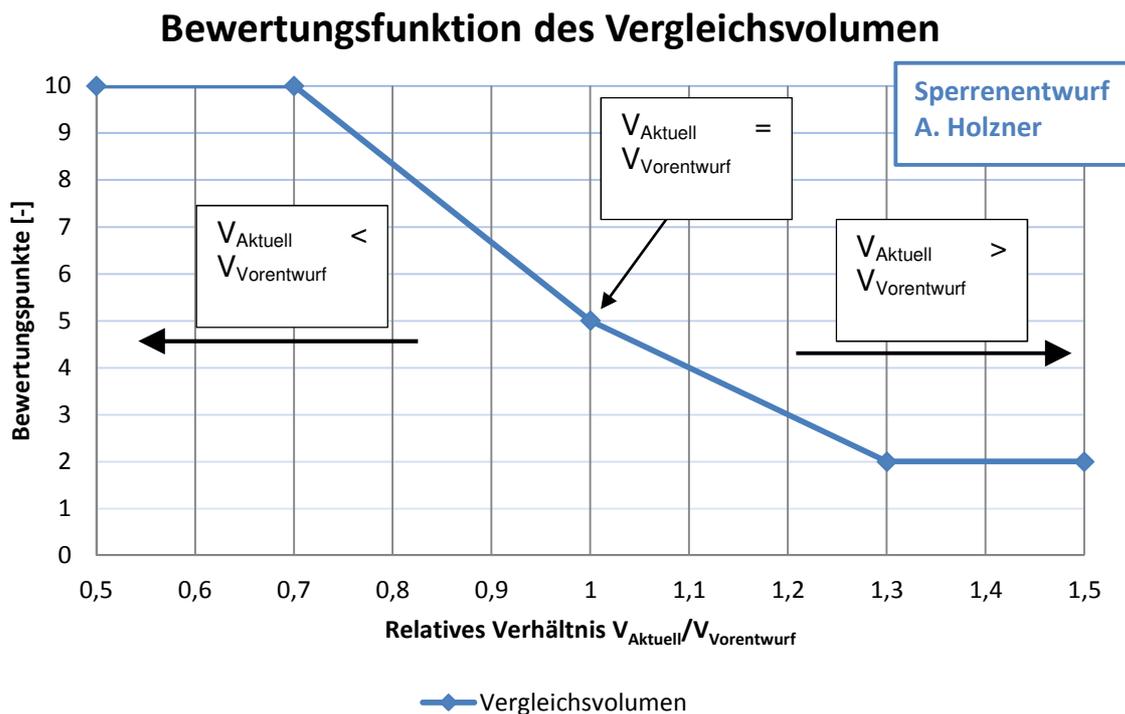


Abbildung 82: Bewertungsschema, Vergleichsvolumen

## 7.8 Auswahl der Bewertungsparameter

Durch Auswahl von Ergebnisgrößen, wie z.B. Spannungen und Verformungen, in Bezug auf die räumliche Lage in der Struktur (z.B. Krone, Aufstandsfläche), lässt sich eine charakterisierende Auswahl an Ergebnis- bzw. Entwurfsgrößen zusammenstellen. Es werden dem Bewertungsmodell folgende 8 Bewertungsgrößen zugrunde gelegt:

- Bogenspannungen, maximaler Zug, Kontrollbereich 2 (kurz: „KB“, Abbildung 76), in Folge in den Diagrammen benannt mit „BogSZug“
- Bogenspannungen, maximaler Druck, KB 2, „BogSDruck“
- Vertikalspannungen, maximaler Zug, KB 2, „VertSZug“
- Vertikalspannungen, maximaler Druck, KB 5 (Fuß), „VertSDruck“
- Radialverformung, Gleichmäßigkeit, KB2 zu KB1/3, „RadVMax“
- Gleitsicherheiten, minimale, Auswahl von KB4/5/6, „SichMin“
- Gleitsicherheiten, mittlere, Auswahl von KB4/5/6, „SichMid“
- Volumen, Vergleich mit Vorentwurfsformel (=Näherung), „Vol“

Diese acht gewählten Bewertungsparameter ergeben kombiniert ein umfassend beschreibendes Zustandsbild der Talsperre (=Bewertungsportfolio). Die Zusammenstellung dieser Auswahl entstand aus Erfahrungen von in der Vergangenheit durchgeführten Talsperrenstatiken ([holz1] bis [holz9]). Die gewählten Ergebnisgrößen (Abbildung 83), in Kombination mit den Bewertungsfunktionen und der räumlichen Lage der Bezugsbereiche, stellen ein konkretes Bewertungsschema für eine Talsperre dar.

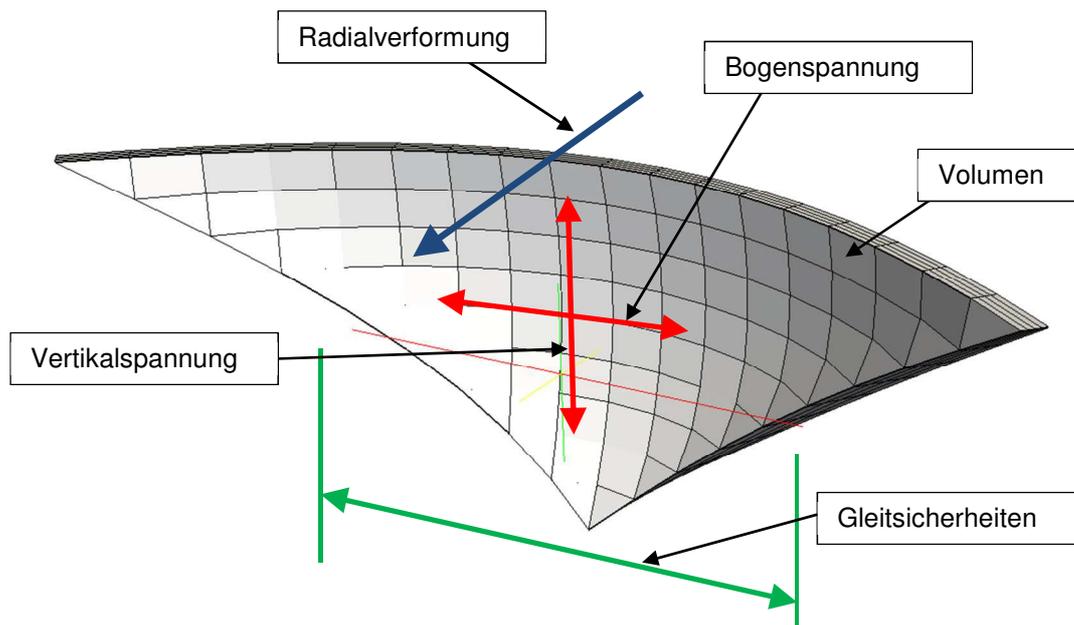
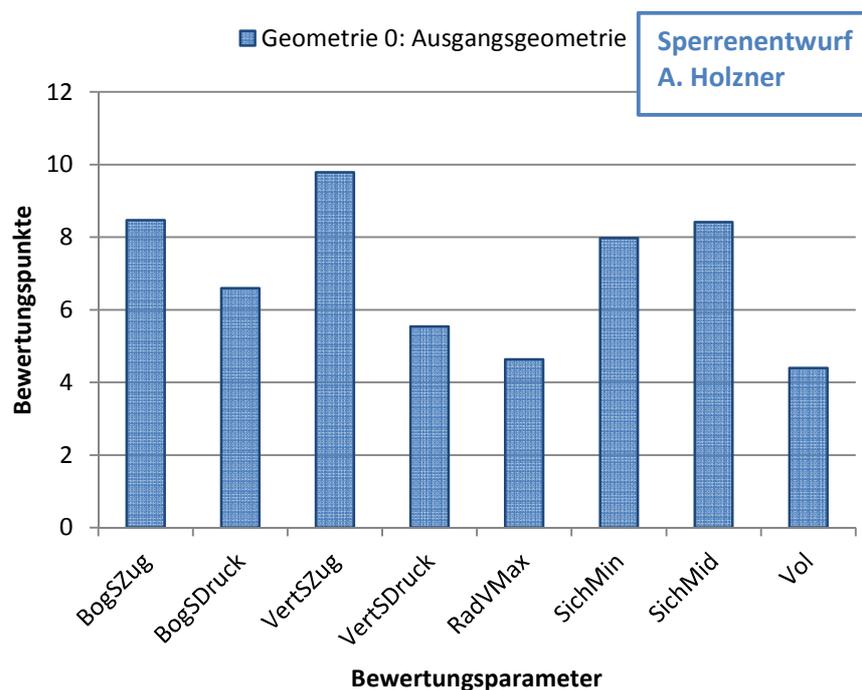


Abbildung 83: Ergebnisgrößen, Übersichtsdarstellung

## 7.9 Visualisierung der Bewertungen

Durch Darstellung der einzelnen Bewertungsgrößen und der zugehörigen Bewertungspunkte in einem Balkendiagramm erhält man einen ersten Überblick über die Bewertungssituation des Gewölbesperrenentwurfes (Abbildung 84).

## Übersicht Einzelbewertungen



**Abbildung 84: Übersicht der Bewertungsgrößen, exemplarisch, Prototyp**

Die einzelnen Bewertungsparameter können auch gesammelt in einem Polardiagramm dargestellt werden. Das sich so ergebende Bild ergibt eine umfassende Zusammenfassung über die charakterisierende Spannungs-, Sicherheits-, Verformungs- und Volumensituation einer Talsperre (Abbildung 85).

Entlang der Strahlen, radial vom Zentrum der Grafik ausgehend, werden die einzelnen Bewertungsparameter dargestellt (z.B. Spannungen, Verformung, Volumen) und die jeweiligen Bewertungspunkte eingetragen. Die so entstehenden einzelnen Punkte auf den Unterachsen werden miteinander verbunden, daraus entsteht eine geschlossene Fläche, das sogenannte Bewertungsbild. Die Anzahl der jeweiligen erreichten Bewertungspunkte wird durch die Entfernung der Flächeneckpunkte vom Zentrum gekennzeichnet. Je weiter die Eckpunkte vom Zentrum entfernt liegen, desto mehr Bewertungspunkte wurden für den jeweiligen Bewertungsparameter erreicht.

Aus den einzelnen Bewertungsdimensionen und Bewertungsgrößen lässt sich durch Summenbildung eine Gesamtbewertung bilden. Diese Gesamtbewertung wird für spätere Betrachtungen und bei Vergleichen zwischen Geometrievariationen verwendet. Eine grafische Darstellung der Aufteilung der Einzelparameter findet sich in Abbildung 86.

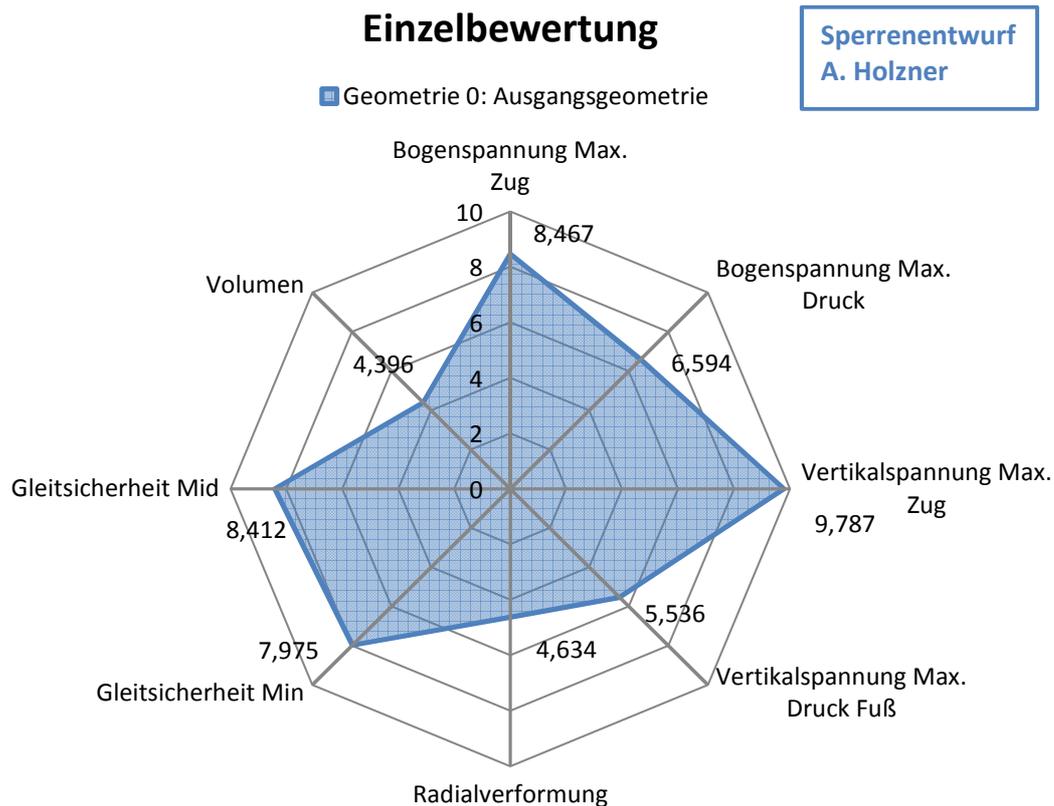


Abbildung 85: Resultat der Bewertung, exemplarisches Ergebnis, Prototypalsperre

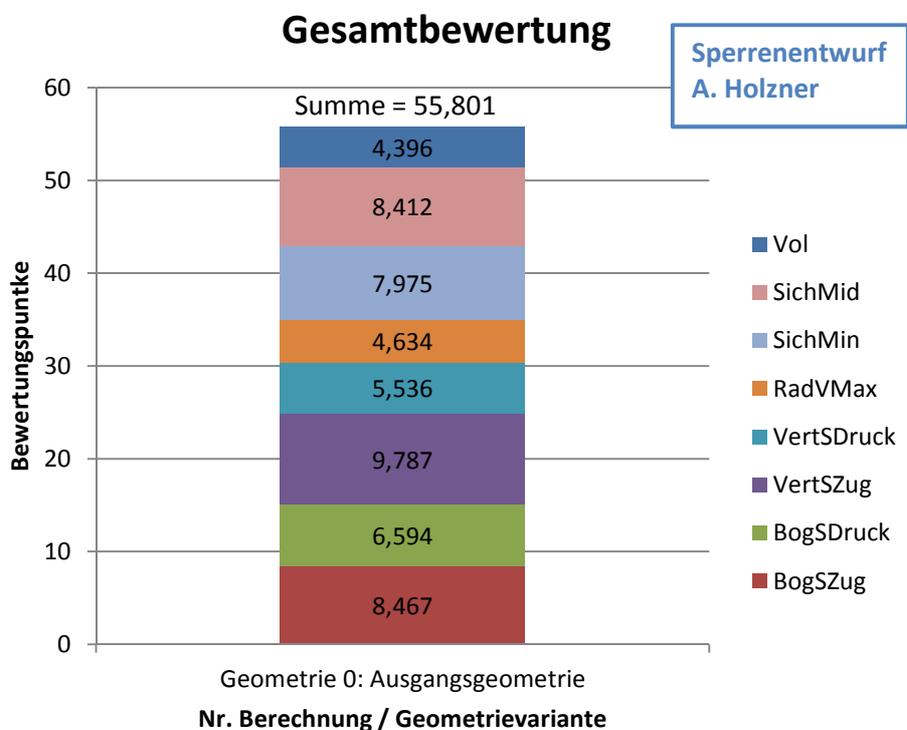


Abbildung 86: Gesamtbewertung, exemplarisches Ergebnis, Prototypalsperre

Durch zusammenführen mehrerer Bewertungen von unterschiedlichen Entwürfen können einfach und zielführend die jeweiligen Bewertungen miteinander verglichen werden. Mit der Zusatzinformation welches Ergebnis durch welche Änderung an dem jeweiligen Parameter entstanden ist, können Ergebnisse der Geometrieänderungen praktikabel dargestellt und beurteilt werden.

Nachfolgend ist eine Variation des Bogenradius  $R_s$  für +7% und -7% Parametervariation an der Prototyp-Talsperre berechnet worden, und die Bewertungen einander gegenübergestellt. Berechnet wurden für diese Variation drei Finite Elemente Varianten:

- Ausgangsgeometrie (0-Zustand), Berechnung Nr. 0
- +7% Bogenradius Variation, Berechnung Nr. 1
- -7% Bogenradius Variation, Berechnung Nr. 2

### Vergleich Einzelbewertungen

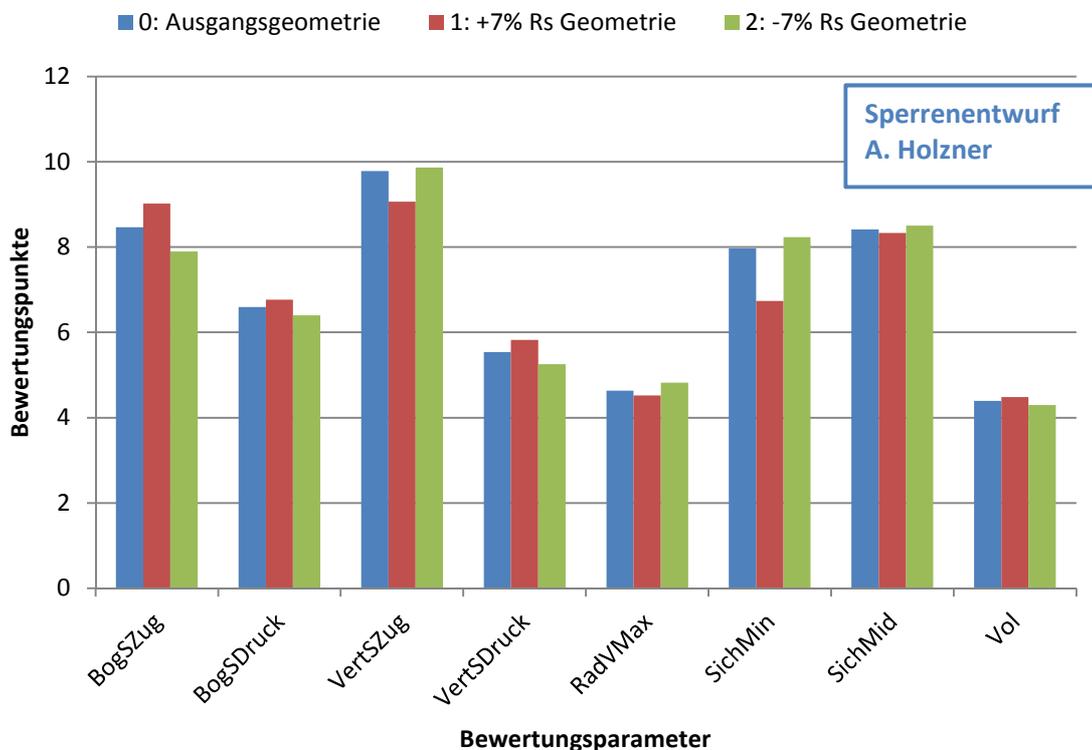
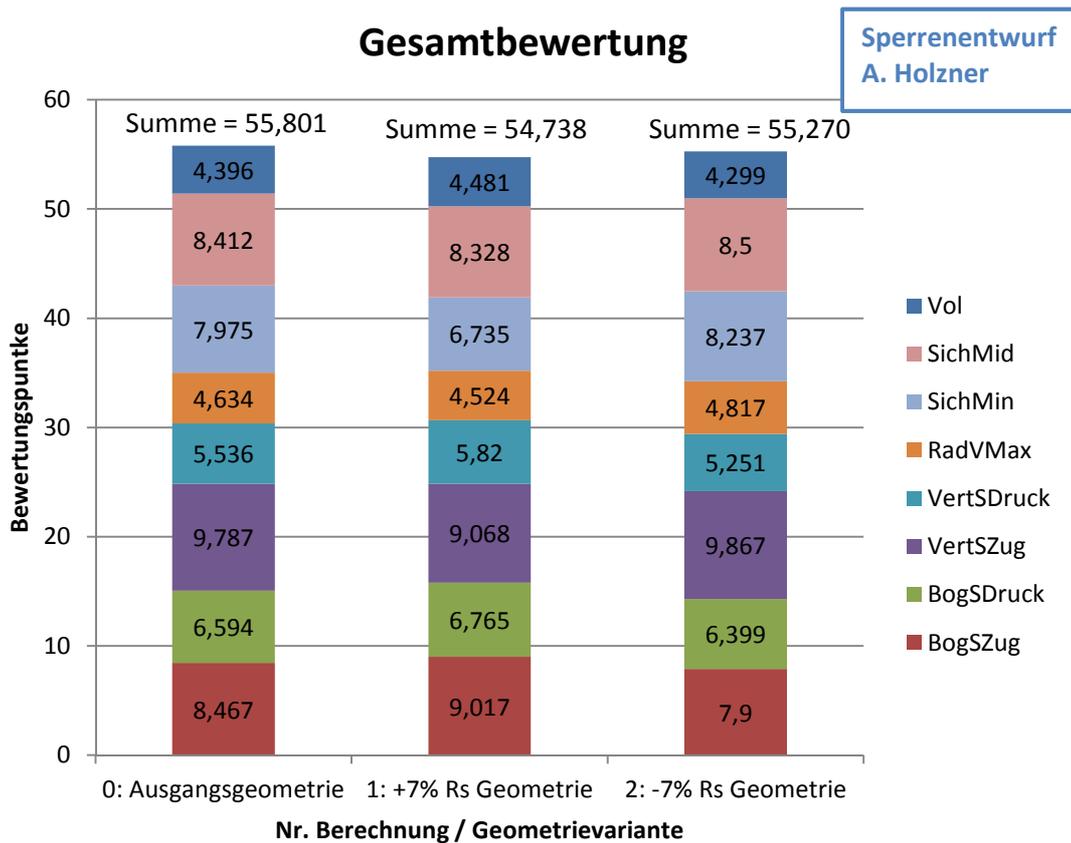


Abbildung 87: Vergleich Einzelbewertungen, Variation Bogenradius um 7%

Eine Übersicht der Gesamtbewertungen lässt sich durch Summation der Einzelbewertungen erzielen (Abbildung 88).



**Abbildung 88: Gesamtbewertung, Vergleich der Geometrievariationen, Prototypsperre**

Der Vergleich der Gesamtbewertungen zeigt nur einen kleinen Unterschied in den untersuchten Geometrievarianten. Als Erklärung kann hierfür die geringe Sensitivität der durchgeführten Variation des Bogenradius  $R_s$  der untersuchten Form genannt werden. Es sind aber stellenweise deutliche Unterschiede in den Einzelbewertungen zu erkennen (z.B. 9.0 Bogenspannung Zug bei Geometrie 1 vs. 7.9 bei Geometrie 2).

Die drei untersuchten Geometrievarianten können anhand der Gesamtbewertung als ähnlich gut klassifiziert werden. Eine weitere Reihung bzw. Priorisierung kann anhand von der Bewertung von Unterfaktoren gebildet werden (wie z.B. minimales Volumen für geringe Kosten, siehe vorherige Kapitel).

### 7.10 Resümee

In diesem Kapitel wurde der rechentechnische Übergang von Ergebnisgrößen (wie Spannungen und Verformungen) hin zu einer diskreten Bewertung (Punkte, Note) erstellt. Durch eine Bewertung in mehreren Dimensionen kann eine komplexe Struktur wie eine Gewölbesperre multidimensional beurteilt werden.

Die Konzentration der einzelnen Bewertungsparameter in einem Polardiagramm ergibt ein charakterisierendes Zustandsbild der Gewölbesperre. Durch Aufsummieren der einzelnen Bewertungsparameter kann eine Gesamtbewertung ermittelt werden, eine Anzahl von Punkten zur direkten Zustandsbeschreibung.

Die Gesamtbewertungen einzelner Geometrievariation können mit dem Nullzustand (=Ausgangsgeometrie) verglichen werden, und die Auswirkungen der Variationen im Detail bewertet werden.

Die Prinzipien dieses Kapitels werden im Folgenden an einer bereits gebauten Talsperre angewendet.

## 8 Anwendungsbeispiel Kölnbreinsperre

Im Folgenden wird konkret anhand der ausgeführten Talsperre Kölnbrein eine Parameteridentifikation durchgeführt. Es wird vom ursprünglichen Sperrmodell vor Aufbringung des Stützgewölbes ausgegangen, d.h. das Sperrengewölbe wird voll wirksam entlang der Basisfuge gelagert und durch keine zusätzlichen luftseitigen Stützkörper entlastet. Anschließend an die Parametervariation und Sensitivitätsanalyse wird eine Bewertung der einzelnen Geometrievariationen durchgeführt. Aus den Bewertungsergebnissen wird ermittelt, ob eine andere Variante zur ausgeführten Geometrie sinnvoll gewesen wäre.

### 8.1 Bauwerksgeschichte

Die Kölnbreinsperre ist mit 200m Sperrhöhe die größte österreichische Gewölbemauer. Die Kronenlänge beträgt rund 600m, das Betonvolumen beträgt rund 1.6Mio m<sup>3</sup>. Die Sperre wurde von der Österreichischen Draukraftwerke AG in Auftrag gegeben, die Planung wurde durch die Tauernkraftwerke AG durchgeführt. Die Bauzeit reichte von 1974 bis 1977.

Der erste Vollstau sollte 1978 erreicht werden, wobei 12m unter dem geplanten Stauziel erhebliche Mengen an Sickerwasser durch die Drainagebohrungen austraten [lomb1, obernh1]. Nach Durchführung zusätzlicher Injektionsmaßnahmen wurde im Jahr 1979 erneut der Vollstau geplant, bei welchem aber die Sickerwassermengen wieder zu hoch und die Auftriebsdrücke abermals zu ungünstig waren.

Untersuchungen am wasserseitigen Fuß der Sperre zeigten Rissverläufe, welche das Wasser ungehindert außerhalb der Dichtschirmebene passieren ließen. Es wurde mit Harzinjektionen und temporären Vereisungen versucht das Problem zu beheben, beide Methoden zeigten keine zufriedenstellende Wirkung.

Als zusätzlicher Lösungsansatz wurde die Dichtebene vom eigentlichen Sperrkörper hin in einen zusätzlichen Vorboden an der Wasserseite verlagert. Dieser Vorboden ist eine massive Betonplatte, welche wasserseitig unmittelbar vor der eigentlichen Talsperre situiert ist, und in welche ein neuer Dichtschirm einbindet. Die Anordnung dieses Vorbodens sollte die Bewegungen an der Sperrenaufstandsfläche, durch Auftrieb und Öffnen von Rissen und Fugen, vom eigentlichen Dichtschirm trennen. Der am wasserseitigen Fuß vorgelagerte Vorboden wurde mittels eigener Dichtfuge mit dem ursprünglichen Sperrkörper verbunden. Durch diese Konstruktionsweise wurde der Auftrieb erfolgreich verringert, die Sickerwassermengen blieben dennoch durch die Entstehung von weiteren Rissen im Sperrkörper auf einem hohen Niveau [obernh1].

Als betriebliche Maßnahme zur Begrenzung der Sickerwassermengen und zur Gewährleistung der Standsicherheit wurde das Stauziel einstweilen auf 1880m begrenzt.

Nach erfolglosen Versuchen sowohl die Sickerwassermengen und Sohlwasserdrücke zu reduzieren, als auch einen wirksamen wasserseitigen Vorboden zu errichten (1978 bis 1986, [lomb1]), wurde an der Luftseite ein massives Stützgewölbe errichtet (1988-1994). Dieser Stützkörper erreicht circa 1/3 der Mauerhöhe (Abbildung 89). Die Hauptsperre stützt sich nun über rund 600 Zwischenlagern auf den Stützkörper ab, somit wird die ursprüngliche Sperre im unteren Drittel entsprechend entlastet. Für das Stützgewölbe waren rund 470.000m<sup>3</sup> Beton erforderlich, die Abstützkraft auf den Stützkörper beträgt rund 1.2 Mio. Tonnen (rund 22% der gesamten Wasserlast von ca. 54.000 MN) [ödk1]. Nach Abschluss aller Sanierungsarbeiten wurde planmäßig im Jahr 1993 der Vollstau erreicht, somit rund 17 Jahre nach Fertigstellung der Bauarbeiten am ursprünglichen Sperrkörper.

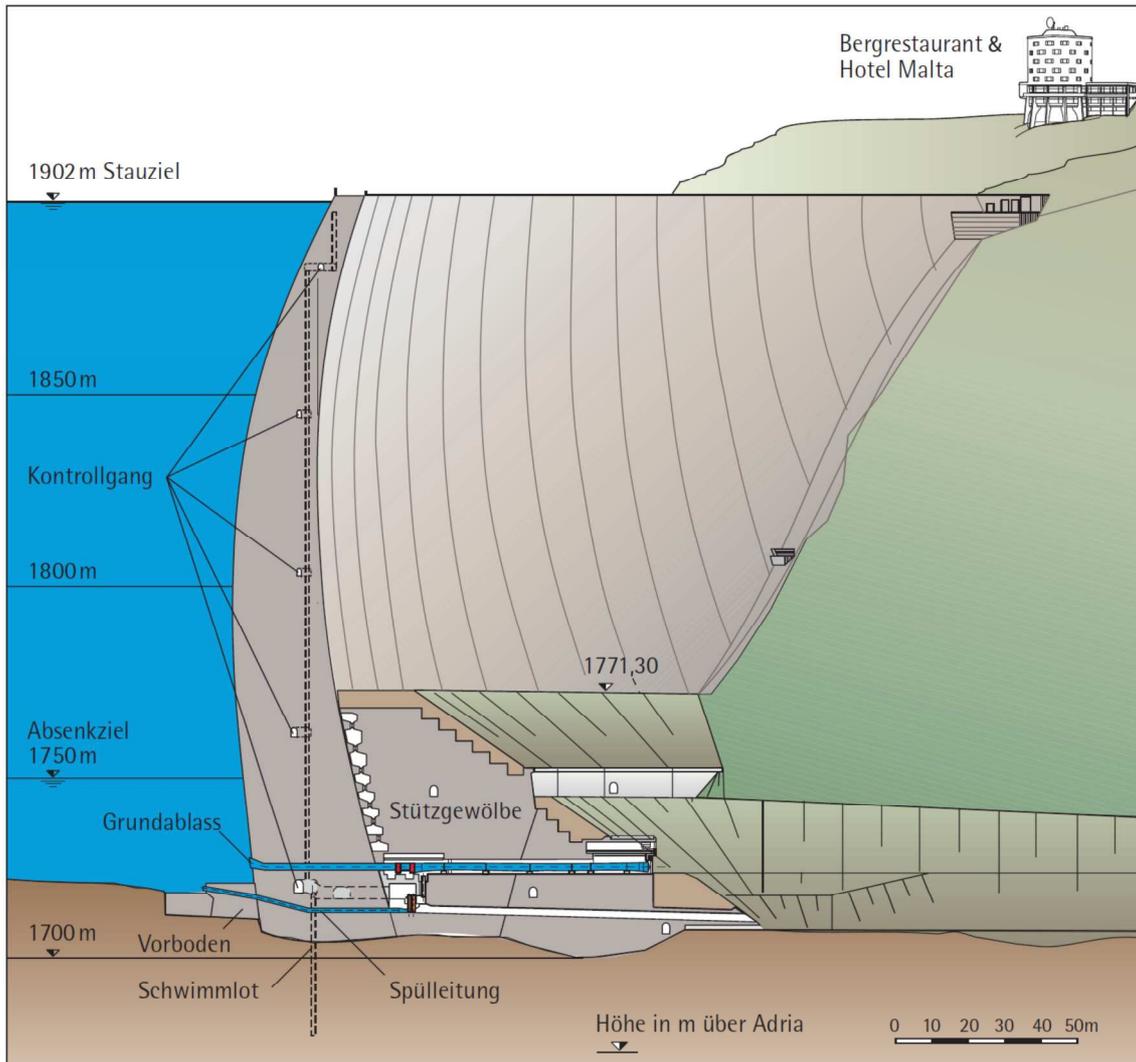
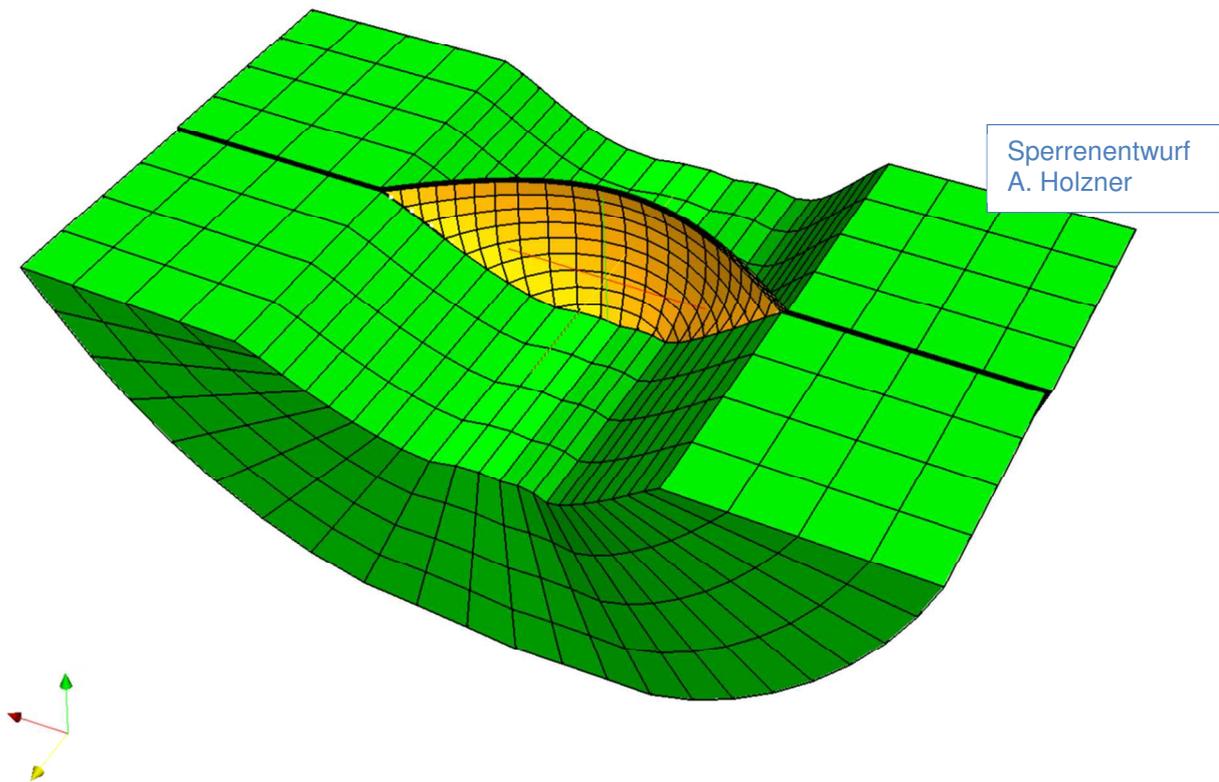


Abbildung 89: Kölnbrein, Mittelschnitt samt Stützgewölbe, aus [verb1]

Die jeweiligen Bogenformen und die Interpretation der Geometrie wurden bereits in Kapitel 3.2.3.2 durchgeführt.

## 8.2 Modell, Netz, Berechnung

Analog der in Kapitel 3.4 präsentierten Prototypalsperre werden auch hier die folgenden Schritte durchgeführt. Ausgehend von der Geometrietabelle wird ein Modell gebildet. Durch entsprechende Netzgeneratoren wird in Abhängigkeit der jeweiligen Geometrie ein dreidimensionales Finite Elemente Berechnungsnetz erstellt. Ein exemplarisches Netz ist in Abbildung 90 dargestellt.



**Abbildung 90: Berechnungsnetz, Bewertung, Kölnbrein**

Die in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigten Lastfälle setzen sich aus dem Eigengewicht und der Wasserlast unter Vollstau zusammen. Das Verhältnis der E-Moduli  $E_{\text{Sperrre}}/E_{\text{Fels}}$  beträgt  $23.000\text{N/mm}^2$  zu  $25.000\text{N/mm}^2$ . Die Querdehnzahlen sind mit 0.2 für die Sperre und respektive 0.18 für den Fels gewählt. Die Dichte vom Beton für die Eigengewichtsberechnung wurde mit  $2400\text{kg/m}^3$  gewählt.

Nachfolgend sind exemplarisch die Vertikal- und Bogenspannungen am Mittelschnitt unter Eigengewicht mit Vollast dargestellt (Abbildung 91 und Abbildung 92).

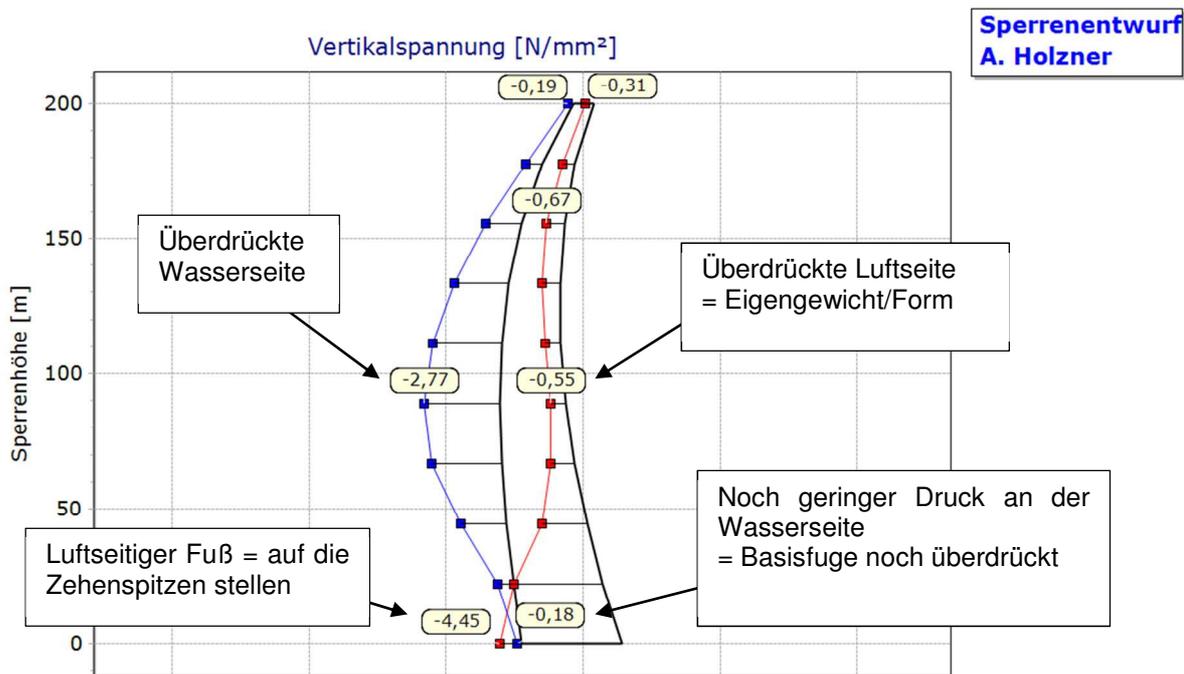


Abbildung 91: Vertikalspannung, Mittelschnitt, Kölnbrein

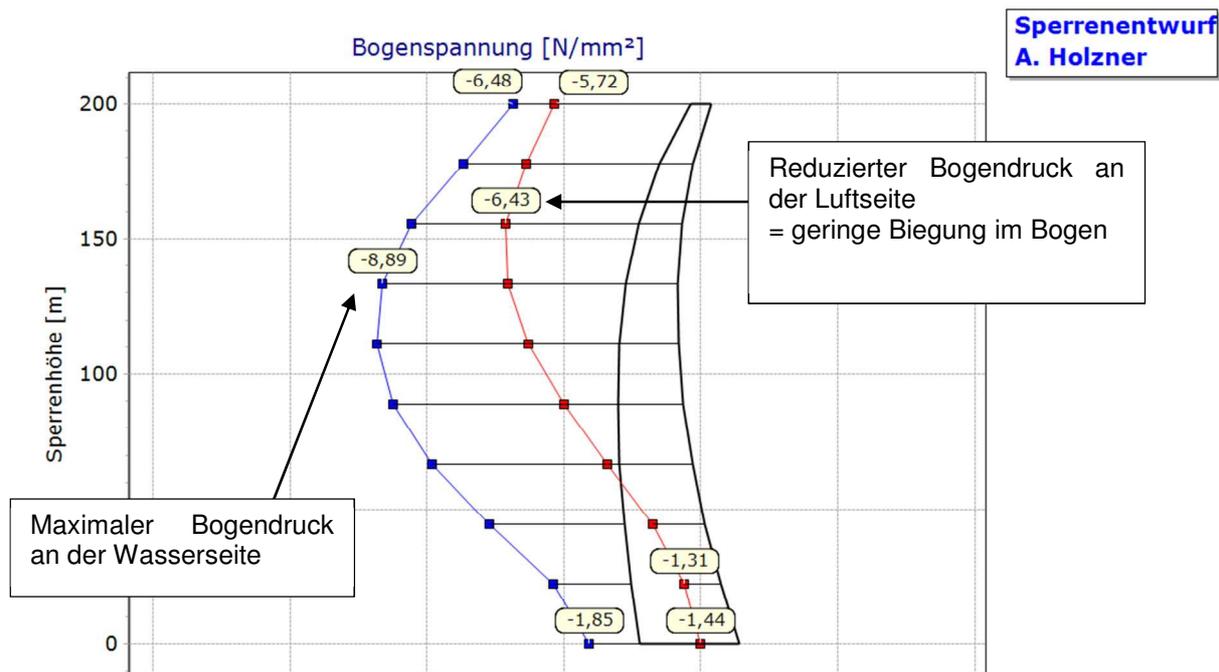


Abbildung 92: Bogenspannung, Mittelschnitt, Kölnbrein

### 8.3 Bewertung der Ausgangsgeometrie

Die Bewertungen der Ausgangsgeometrie sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 93 zeigt das integrale Bewertungsbild, Abbildung 94 zeigt die aufgliederten Bewertungen der Einzelparameter in Balkenform, Abbildung 95 gibt die Gesamtbewertung wieder.

Die Bogenspannungen im Druckbereich liegen im oberen Bereich des Bewertungsschemas (7.8 Punkte von 10 möglichen Punkten). Auch die Vertikalspannungen mit 9.2 Punkte für Zug und 5.1 Punkte für Druck liegen im sehr guten bzw. guten Bereich. Die Gleichverteilung der Radialverformung ist mit 9.4 Punkten nahe am als Optimum definierten Bereich von 10 Punkten. Allein die Bogenspannung für den Zug liegt bei 2.0 Punkte, was hier nicht als schlecht zu bezeichnen ist, sondern den Zug-Bogenspannungen in dem spezifizierten Bewertungsmodell eine konservative Bemessung zugesteht.

Die Mindestgleitsicherheiten fallen mit 4.1 Punkte in das untere Drittel. Die mittleren Gleitsicherheiten über die Hälfte aller Zentralpunkte liegen durchwegs im sehr guten Bereich, und wurden entsprechend dem zugrunde gelegten Bewertungsschema mit 8.9 Punkten bewertet.

Die Volumenbewertung mit 5.6 Punkten ist für sich alleine nicht aussagekräftig. Es kann damit alleine weder ein fülliger noch ein schlanker Entwurf spezifiziert werden, weil der Vergleichsbezug zu einem zweiten Entwurf und der daraus resultierenden relativen Änderung fehlt (wie bereits bei den Spezifikationen zum Bewertungsmodell beschrieben).

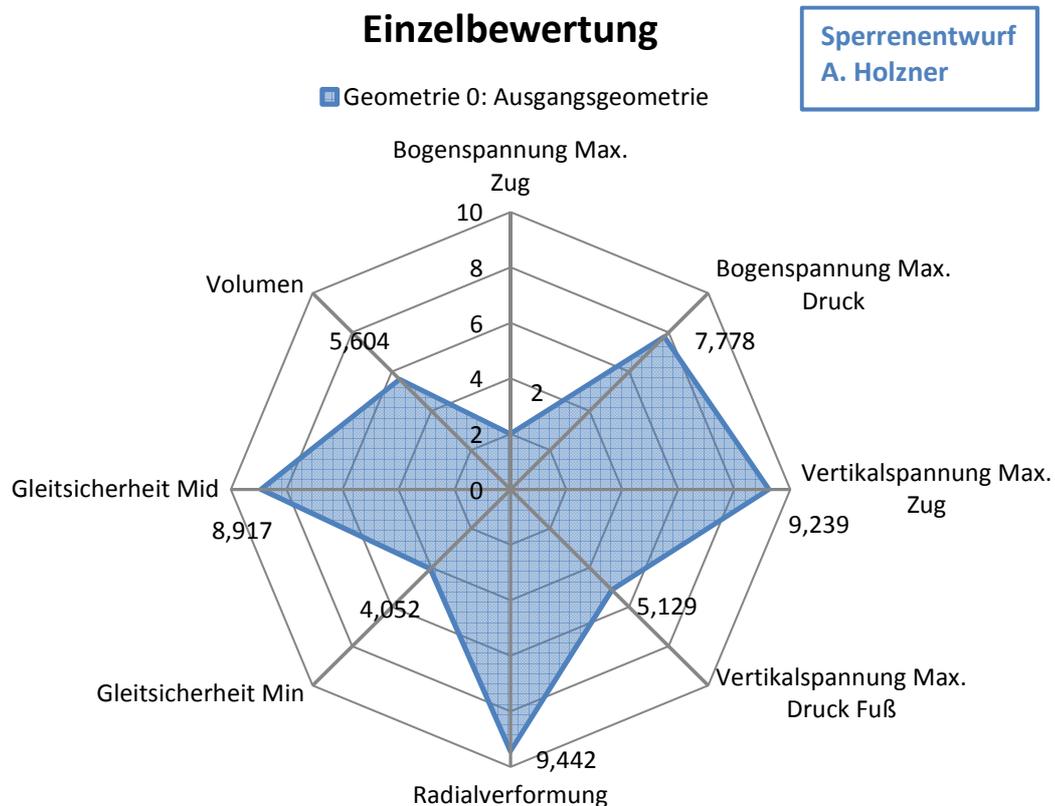


Abbildung 93: Bewertung, Kölnbrein, Ausgangsgeometrie

## Übersicht Einzelbewertungen

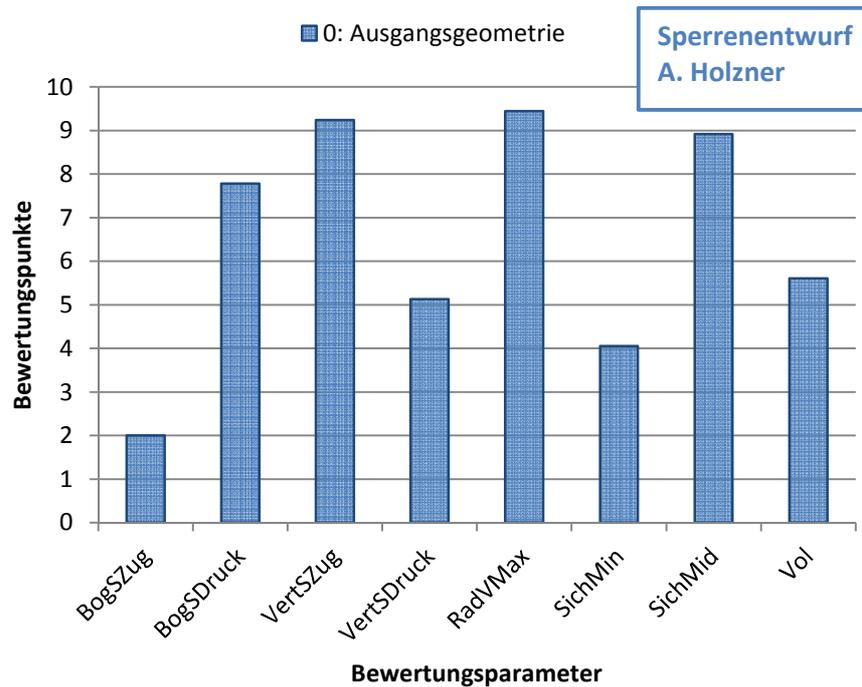


Abbildung 94: Einzelbewertung, Kölnbrein, Ausgangsgeometrie

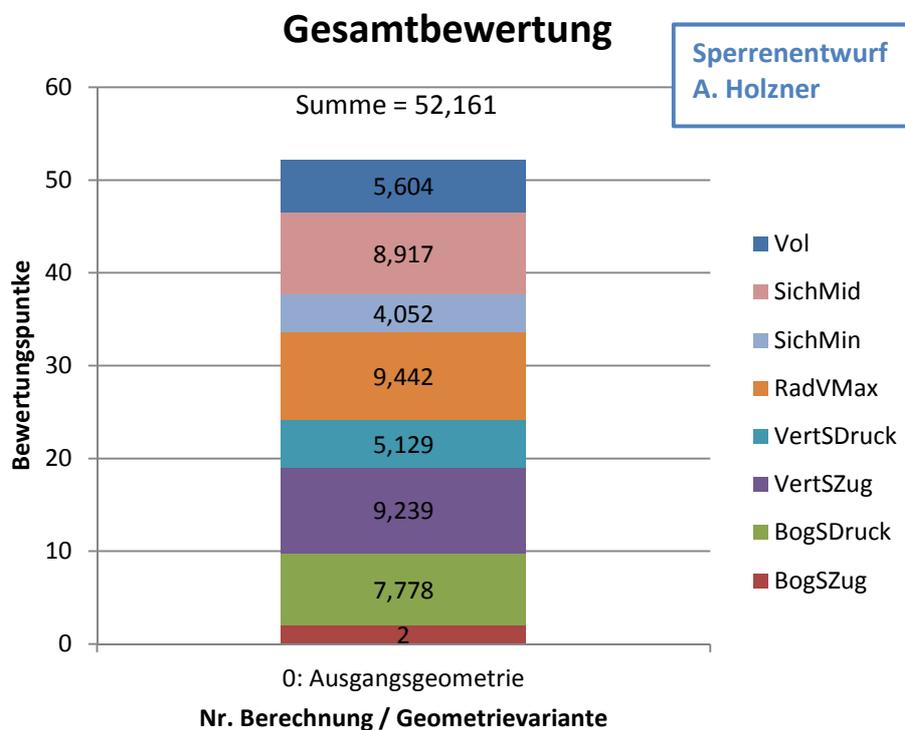


Abbildung 95: Gesamtbewertung, Kölnbrein, Ausgangsgeometrie

### 8.4 Parameteridentifikation

Ausgehend von der ursprünglichen Geometrie wird eine umfangreiche Parameteridentifikation hinsichtlich der Geometrieparameter durchgeführt. Eine exemplarische Abbildung der Variation des Bogenradius  $R_s$  um +/- 7%, und die Auswirkung dieser Variation auf die Bogenspannungen im Mittelschnitt, findet sich in Abbildung 96.

Die Auswertungen folgen den Festlegungen aus Kapitel 6.4, es werden jeweils die Änderungen in Bezug zur Ausgangsgeometrie dargestellt. Am Beispiel des oberen mittleren Kontrollbereiches ergeben sich folgende Werte:

- Eine Parametervariation von +7% des Bogenradius  $R_s$ :
- erhöht die maximale Bogen-Druckspannung von -8.889 auf -9.567N/mm<sup>2</sup>
- und entspricht somit einer Differenz von -0.678N/mm<sup>2</sup>
- hat nur geringen Einfluss auf die minimale Bogen-Druckspannung (von -5.037 auf -5.097N/mm<sup>2</sup>), mit einer Differenz von -0.061

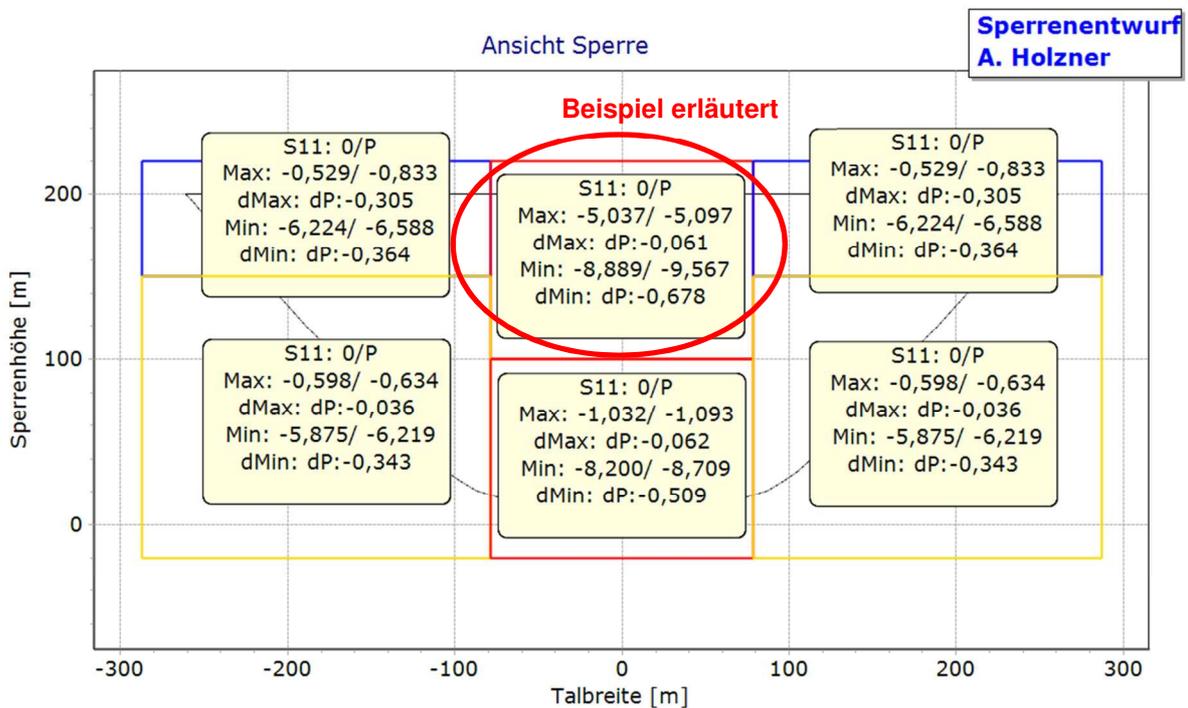


Abbildung 96: Sensitivität, Bogenspannung, Variation Bogenradius  $R_s$ , +/- 7%

### 8.5 Geometrievariationen

Bei einer Bewertungsstudie über mehrere Geometrieparameter (wie z.B. Bogenradius, Scheitelstärke, Kämpferstärke, etc.) entsteht eine große Menge an Ergebnisgrößen. Für jede dieser Varianten in der Formgebung entstehen durch die Festlegung auf 8 Bewertungsparameter entsprechend auch jeweils 8 Bewertungsergebnisse. Je nach Wahl der zu berücksichtigenden, und somit zu variierenden Geometrieparameter, entstehen in Summe ein Vielfaches dieser 8 Bewertungsgrößen.

Für die Kölnbreinsperre werden nun Variationen hinsichtlich 6 Geometrieparameter durchgeführt. Die variierte Parameterliste stellt sich wie folgt dar:

- Bogenradius  $R_s$
- Numerische Exzentrizität  $e^2$
- Scheitelstärke  $D_s$
- Kämpferstärke  $D_k$
- Beginn der Kämpferverstärkung  $X_v$
- Abrückung im Mittelschnitt  $Y_s$

Jede Variation wird mit +7% und -7% Wertevariation gerechnet. Es entstehen daraus  $2 * 6 = 12$  Variationen. Für jede Variation wird passend die neue Geometrie erstellt, das Berechnungsnetz generiert, die Finite Elemente Berechnung durchgeführt, die Ergebnisdaten eingelesen, und die Situation der Sperre entsprechend den festgelegten Bewertungsmodellen ermittelt. Die Ausgangsgeometrie der Sperre ist als zusätzliche „Null“-Variante ebenfalls zu berechnen und zu bewerten. In Summe sind für diese Erstanalyse  $12+1=13$  Geometrien und somit Berechnungen durchzuführen.

Die Ergebnisse dieser 13 durchgeführten Berechnungen (für eine 6 Parameter Variation) sind in Abbildung 97 dargestellt. An der x-Achse sind die 8 Bewertungsergebnisse aufgetragen (wie z.B. maximale Spannungen, Gleitsicherheiten, Radialverformungen). An der y-Achse sind zugehörig die erreichten Bewertungspunkte aufgetragen. Um die Übersicht zu behalten, sind die Ergebnisse der einzelnen Geometrievariationen gebündelt dargestellt, d.h. z.B. unter dem ersten Bewertungsparameter sind die Ergebnisse aller 13 Berechnungen nebeneinander verglichen. Die Anzahl der gebündelten Säulen entspricht der Anzahl der Bewertungsparameter (=8 in diesem Modell), die Anzahl der Säulen je Parameter entspricht der Anzahl der jeweils durchgeführten Berechnungen (=13 für diese Betrachtung).

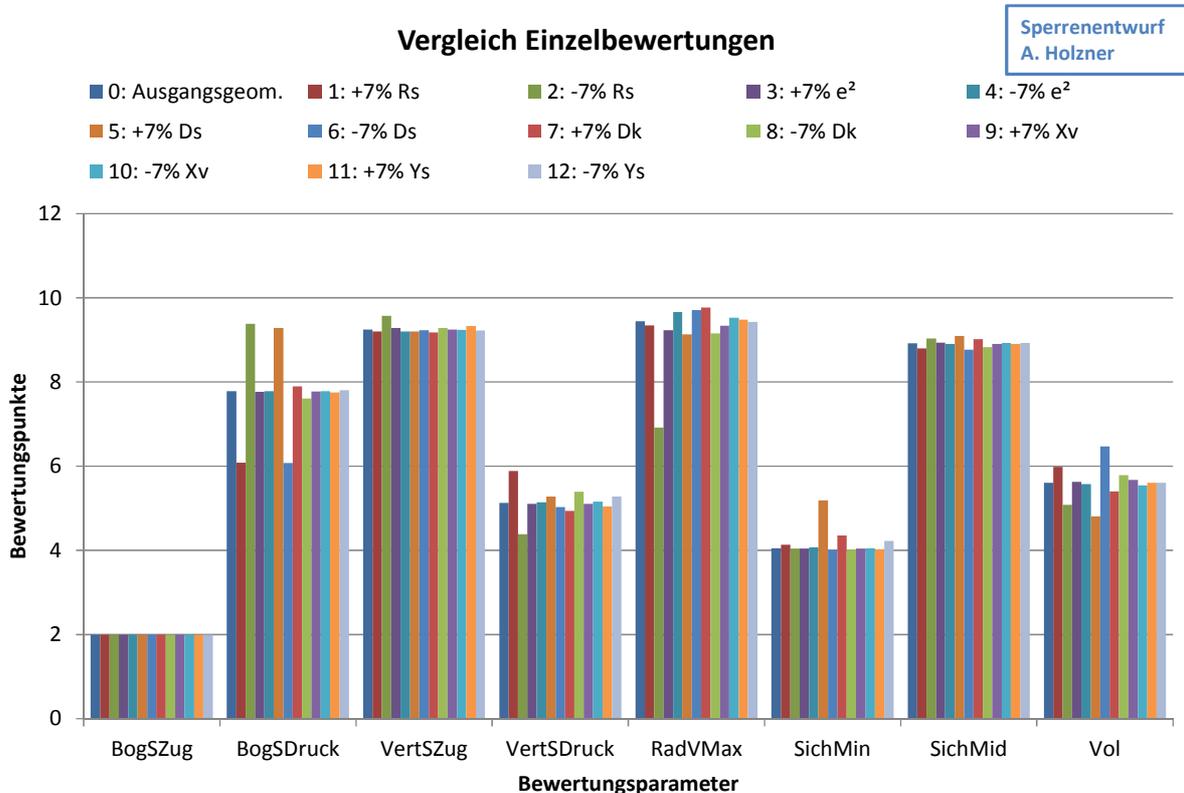


Abbildung 97: Gegenüberstellung der Bewertungen

Um die Menge der erhaltenen Ergebnisse zu reduzieren, werden Umordnungen in der Darstellung durchgeführt. Statt die Einzelbewertungen zu gruppieren, werden die einzelnen Variationen gruppiert. D.h. es werden die Bewertungsergebnisse aller 13 Berechnungen gesammelt nach Geometrievariation aufsummiert. Durch diese Summenbildung einer jeden Geometrievariation kann die Gesamtbewertung für jede Variante ermittelt werden (=Summe aller Einzelbewertungen, Abbildung 98). Auf der x-Achse (horizontal) werden die durchgeführten 13 Berechnungen aufgetragen, auf der y-Achse (vertikal) werden die Bewertungsergebnisse der 8 Bewertungsparameter kumuliert dargestellt. Die Summe aller Bewertungspunkte ergibt somit eine Gesamtbewertung der Talsperre in Form einer einzigen Zahl.

An der linken Seite ist die Ausgangsgeometrie aufgetragen, nach rechts sind jeweils paarweise „Parameter plus Änderung“, sowie „Parameter minus Änderung“ dargestellt (=1 Ausgangsgeometrie + 6 Variations-„Paare“ = 13 Geometrien/Berechnungen)

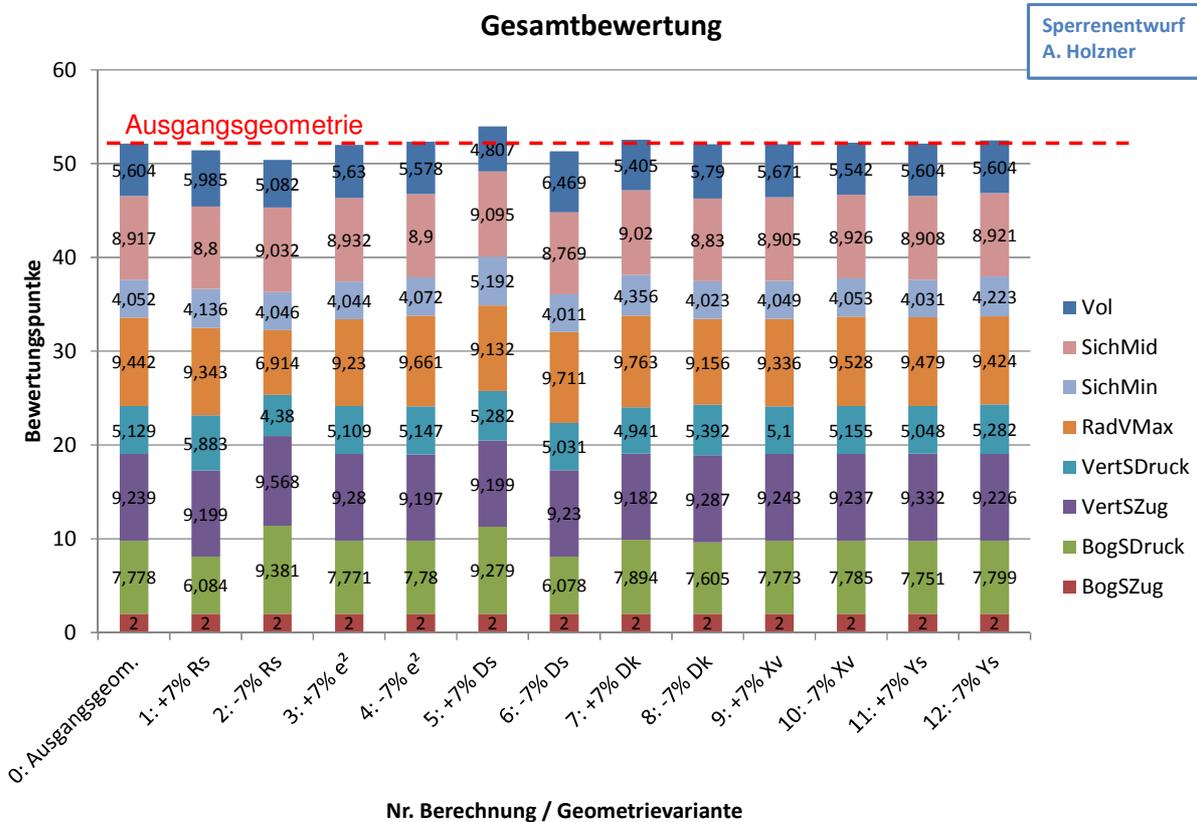


Abbildung 98: Gesamtbewertung, Ergebnis der Parametervariationen

Es ist in der Darstellung erkennbar, dass in der Gesamtbewertung (=Summe über alle Einzelbewertungen) keine allzu großen Unterschiede auftreten. Dennoch ist in den Einzelbewertungen oftmals ein deutlicher Unterschied zwischen den einzelnen Varianten erkennbar (z.B. Zunahme der Gleitsicherheiten, Zunahme der Vertikalspannungen, etc., siehe Abbildung 97).

### 8.6 Schlussfolgerung

Durch Begrenzung der dargestellten Minimalwerte (auf hier gewählte 50 Bewertungspunkte) wird der Unterschied in der Gesamtbewertung besser ersichtlich (Abbildung 99). Es wird hier nur mehr der oberste Bereich des Diagrammes dargestellt, an der Zusammenstellung wird hierfür nichts geändert. Der linke Balken im Diagramm markiert wieder den Ausgangszustand, die daran folgenden Balken stellen wieder paarweise die Bewertungsergebnisse der Geometrieänderungen dar.

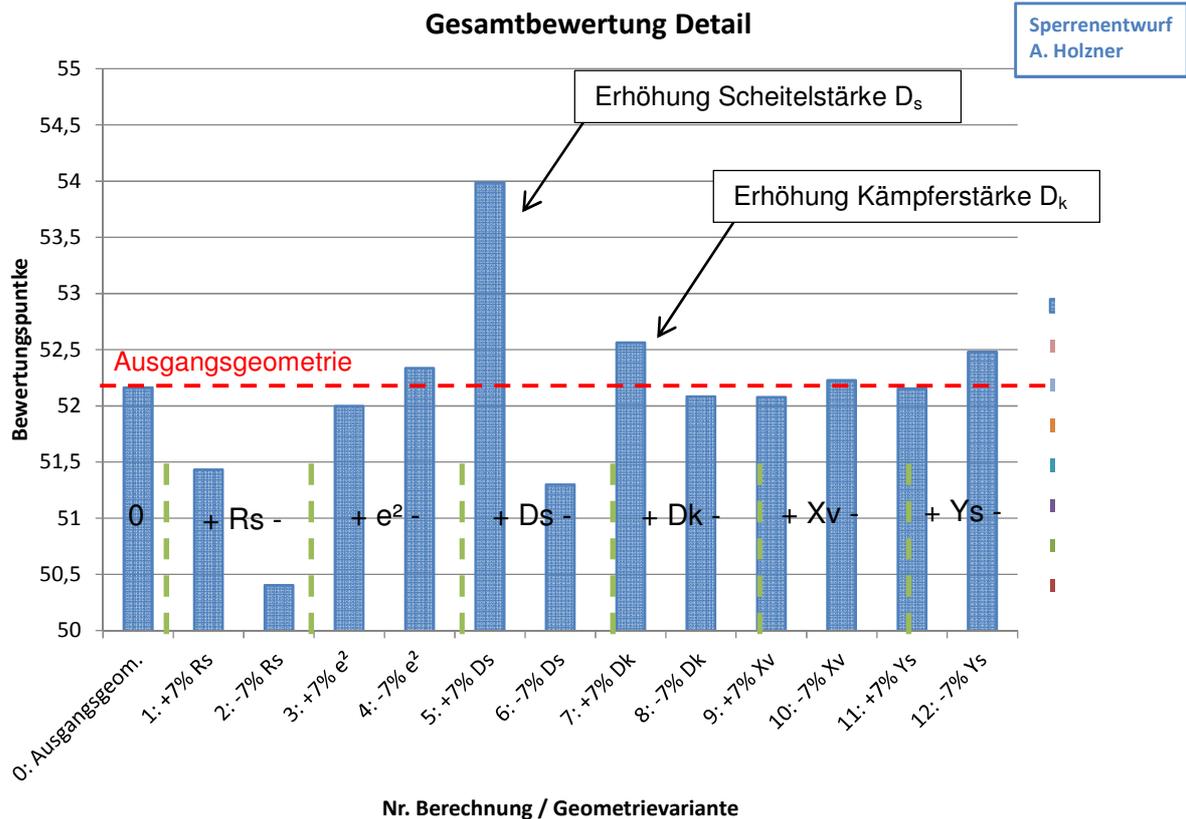


Abbildung 99: Gesamtbewertungen, Ergebnis der Parametervariationen, Details

Am linken Rand ist die ursprüngliche Geometrie dargestellt (Position 0). Die Änderung in den Radien sind die beiden nächsten Balken nach rechts (Position 1 und Position 2). Eine Änderung der Radien, sowohl in positive als auch negative Werterichtung, würde eine Verschlechterung der Gesamtbewertung hervorrufen. D.h. eine Änderung wäre unvorteilhaft im Sinne des Bewertungsmodells.

Weiters ergibt eine Erhöhung der Kämpferstärke auch eine Erhöhung der Gesamtbewertung, wobei eine Reduktion dieser die Gesamtbewertung eher gering ändert. Eine Erhöhung der Länge der Kämpferverstärkung wirkt sich ebenso positiv auf die Gesamtbewertung aus. Die Variation von der Vertikalabrückung im Mittelschnitt sei der Vollständigkeit halber angeführt, Änderung an dieser bedürfen aber umfangreicher geometrischer Kontrollen in den Schnitten und für den Eigengewichtszustand.

Die größten Änderungen sind bei zwei Parametern zu erkennen. Eine Erhöhung der Scheitelstärke liefert den größten Zuwachs bei der Gesamtbewertung (Position 5 in der Abbildung). Im Gegensatz dazu ergibt eine Reduktion des Radius die signifikanteste Abnahme der Gesamtbewertung (Position 3 in der Abbildung).

Basierend auf dem Bewertungsmodell können folgende Aussagen getroffen werden:

- der Bogenradius ist optimal gewählt
- die Scheitelstärke kann dicker gewählt werden
- die Kämpferstärke kann ebenso geringfügig dicker gewählt werden
- eine Erhöhung der Länge der Kämpferverstärkung wirkt leicht erhöhend auf die Gesamtbewertung

Es ist zu beachten, dass sämtliche Aussagen nur für das verwendete Bewertungsmodell gelten. Sofern die einzelnen Bewertungsschemata entsprechend für das jeweilige Bauwerk und die zu beachtenden Projektanbedingungen angepasst werden, kann sich die Gesamtbewertung analog verschieben. Es soll hier demonstriert werden, wie ein exemplarisches Bewertungsmodell für Gewölbesperren angewendet werden kann. Ebenso wurde bisher auf Variationen der Gewichtungen im Bewertungsmodell verzichtet, um z.B. das Volumen oder die Sicherheiten überproportional zu berücksichtigen. Die Gewichtungen der einzelnen Bewertungsparameter sind für diese Arbeit mit 1.0 festgelegt.

### 8.7 Geometrieanpassung

Die Ursprungsgeometrie wurde daraufhin in folgenden Punkten angepasst:

- Erhöhung der Scheitelstärke, hauptsächlich im Fußbereich (+10%)
- Erhöhung der Kämpferverstärkung (+7%)
- Verlängerung der Länge der Kämpferverstärkung (-10% in Mitte)

Es ergeben sich daraus folgende Geometriedaten (Abbildung 100).

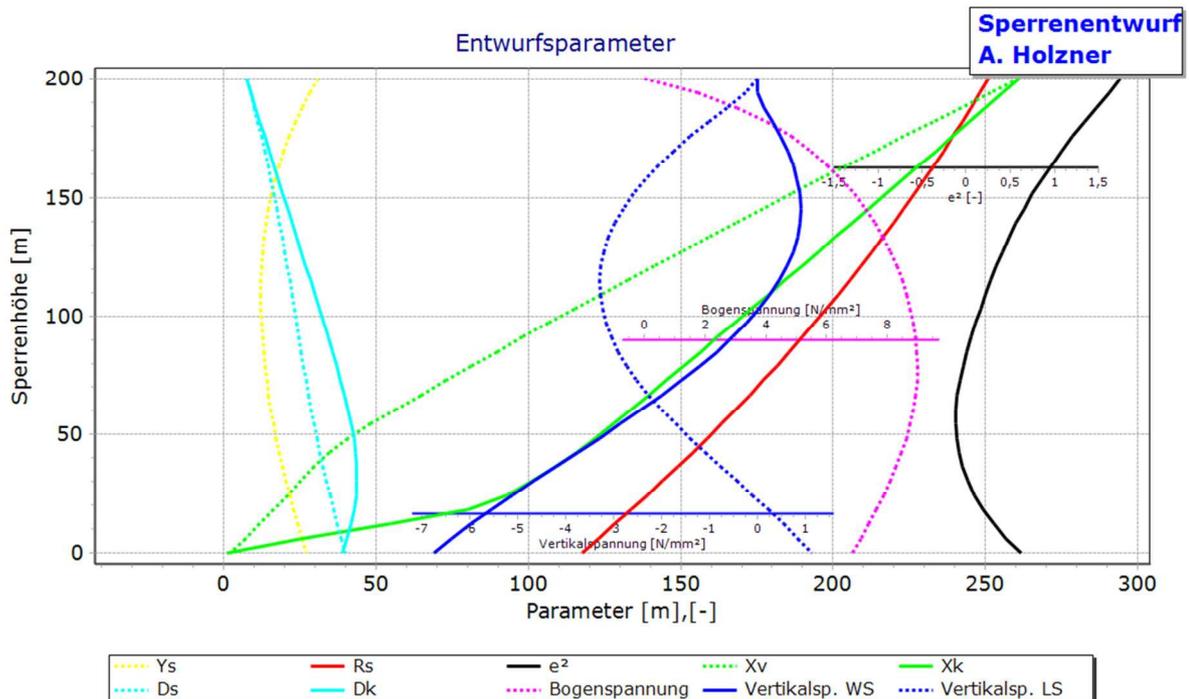
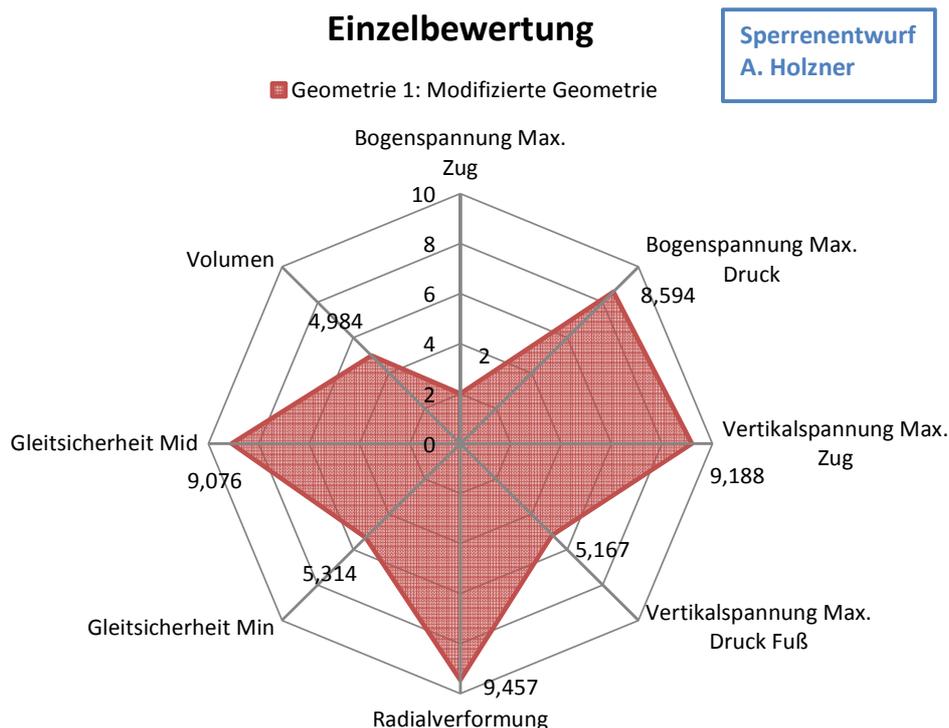


Abbildung 100: Geometriedaten, Kölnbrein modifiziert

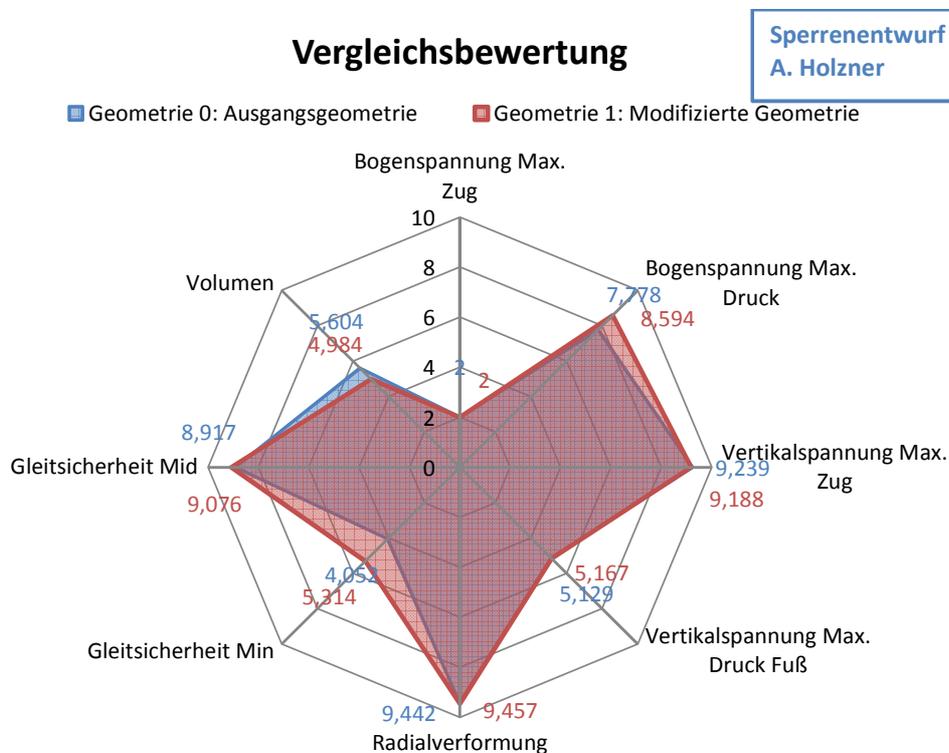
Das Sperrenvolumen liegt bei ca. 1.630.000m<sup>3</sup>, der ursprüngliche Entwurf liegt bei ca. 1.569.000m<sup>3</sup>, also eine Steigerung von ca. rund 3.9%.

Die Bewertung für die geänderte Geometrie stellt sich wie folgt dar (Abbildung 101).



**Abbildung 101: Bewertung, Kölnbrein modifiziert**

Die beiden Einzelbewertungen im Vergleich von "Kölnbrein original" zu "Kölnbrein modifiziert" stellen sich wie folgt dar (Abbildung 102).



**Abbildung 102: Vergleichsbewertung, Ausgangsgeometrie Vs. modifizierte Geometrie**

Mittels der durchgeführten Geometriemodifikationen werden folgende Änderungen in den Bewertungen erreicht:

- Bogenspannungen, Druck: Verbesserung der Bewertung von 7.8 auf 8.6 Punkte
- Restliche Bewertungen der Spannungen: nahezu gleichbleibend
- Radialverformungen: nahezu gleichbleibend
- Minimale Gleitsicherheiten: Steigerung der Bewertung von 4.1 auf 5.3 Punkte
- Mittlere Gleitsicherheiten: geringe Verbesserung von 8.9 auf 9.1 Punkte
- Volumen: geringfügige Abnahme von 5.6 auf 5.0 Punkte.
- Gesamtbewertung: Steigerung von 52.2 auf 53.8 Bewertungspunkte

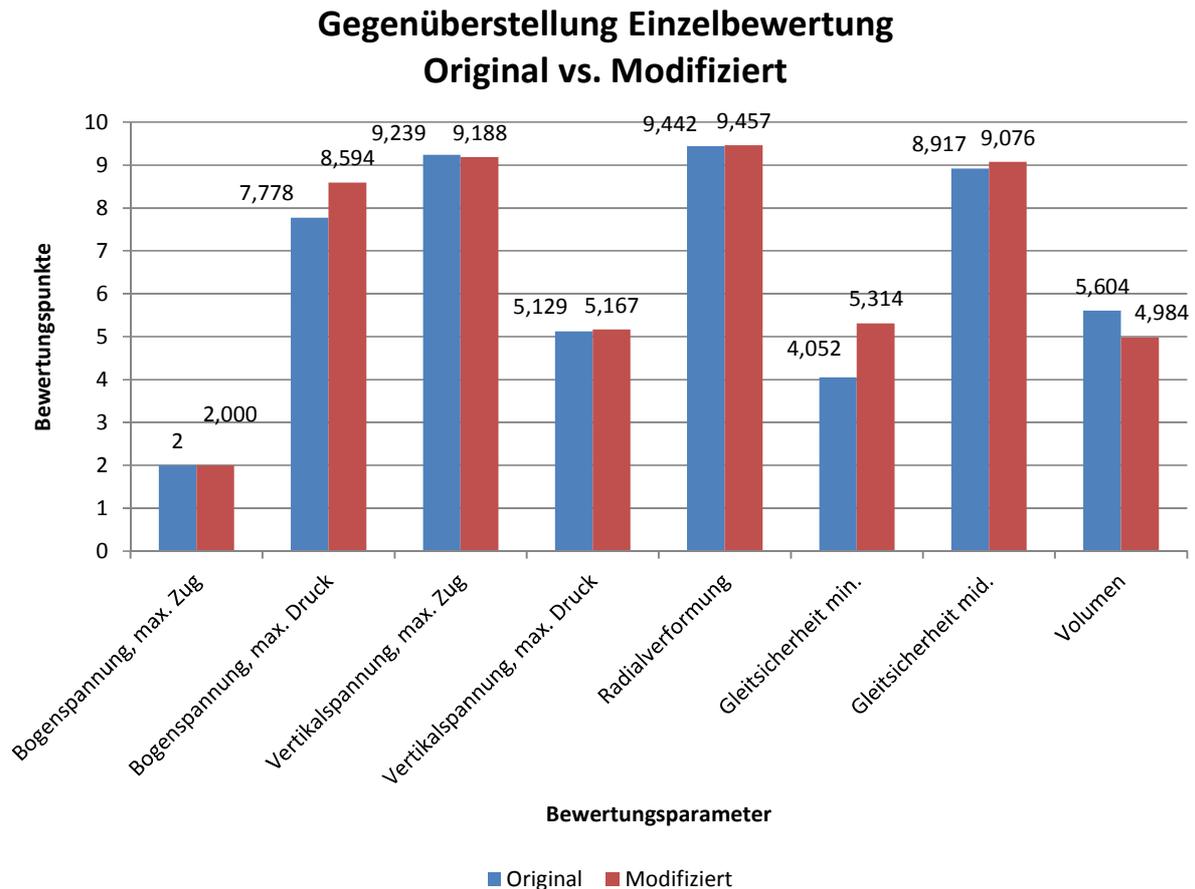


Abbildung 103: Vergleich der Gesamtbewertungen, Kölnbrein orig. zu modif.

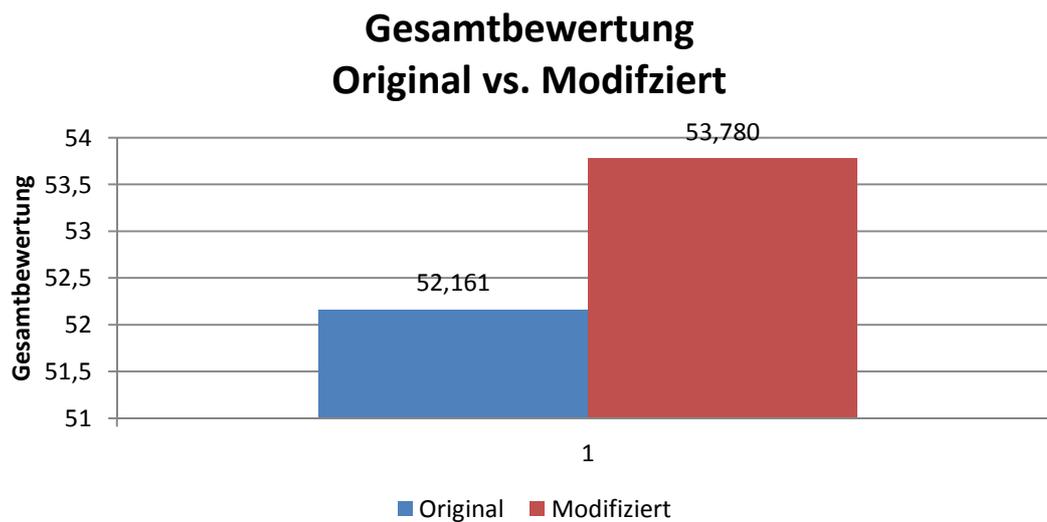


Abbildung 104: Gesamtbewertung, Kölnbrein orig. zu modifiziert

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit stellt einen Ansatz zur Bewertung von Geometrieentwürfen von Gewölbemauern dar. Der Entwurf von Talsperren ist seit dem Altertum eine Herausforderung für den Planer bzw. Ingenieur. Die antiken Sperrenformen waren meist geprägt von einfachen Kreisbögen. Erst Mitte des 19. Jahrhundert wurde die erste Bogensperre mit unabhängigen Bögen bemessen, um der Wirkung des Wasserdruckes effektiver standzuhalten. Von diesem Zeitpunkt an begann die Moderne der Gewölbesperrenplanung, welche Mitte des 20. Jahrhunderts ihren Höhepunkt fand. Statt den einfachen Kreisbögen kamen höherwertige Geometrieformen, wie etwa Parabel, Ellipse und Hyperbel, zur Anwendung.

Der Entwurf einer doppelt gekrümmten Gewölbemauer ist unter Verwendung von gebräuchlichen Hilfsmitteln durch eine große Arbeitsintensivität geprägt. Änderungen an Geometrie und Berechnungsmodell sind meist nicht bzw. nur unter hohem Ressourcenaufwand möglich. Jede Gewölbesperre stellt ein Unikat dar, für welches meist händisch die Unterlagen und Geometriespezifikationen ermittelt werden.

Im Zuge dieser Arbeit wird nach Darstellung der maßgebenden Lastfälle für die Sperrenberechnung, die zur Verwendung kommende Geometrie festgelegt. Durch Beschränkung der Geometrieformen auf Kurven 2. Ordnung, sogenannte Kegelschnitte, wird über die Sonderform der Scheitelgleichung ein kompaktes und praktikables Geometriemodell erzeugt. Der Vorteil dieser Definition liegt im fließenden Übergang zwischen Hyperbel, Parabel und Ellipse. Die Parameter zur Spezifikation bleiben dennoch direkt ersichtlich und stellen keine fiktiven Größen wie bei einem Polynom dar. Unter anderem sind der Krümmungsradius, die Mauerstärken und das Profil des Vertikalschnittes direkt aus der Parametertabelle als reale Werte ablesbar. Diese Festlegung schafft ein leicht verständliches und hoch anpassbares Geometriemodell.

Aus der reinen Bogendefinition wird im Anschluss ein komplettes Geometriemodell für eine Gewölbesperre erzeugt. Aus Aneinanderreihung von Einzelhorizonten, mit den entsprechenden Interpolationsfunktionen, wird ein komplettes Sperrenmodell erzeugt. Ergänzt mit Festlegungen für den Felsuntergrund repräsentiert dieses Sperrenmodell den Ausgangspunkt für Analysen und Berechnungen. Durch die somit voll parametrisierte Gewölbesperre werden Geometrieanpassungen und effiziente Variantenstudien gewährleistet.

Um eine automatische Berechnung unter minimalen Zeitaufwand bereitzustellen, wird das Sperrenmodell noch um weitere Modelle zu einem integralen Talsperrenmodell erweitert. Die wichtigsten Modelle können beschrieben werden mit: Finite Elemente Anschluss samt Post-Processing, sowie ein Bewertungs- und Optimierungsmodell. Das Finite Elemente Modell ermöglicht eine automatische Vernetzung anhand von parametrisierten Vorgaben. Das in der Vergangenheit sehr zeitaufwändige händische Aufbereiten des Modells entfällt somit gänzlich. Durch Ein- und Ausgaberroutinen zur Solver-Steuerung wird die Berechnung direkt in das Talsperrenmodell integriert. Eine effektive Ergebnisdarstellung anhand von vertikalen und horizontalen Schnitten, sowie Ansichtsdarstellungen ermöglichen eine übersichtliche Betrachtung. Ergänzt durch Kämpferkraftauswertungen und Hauptspannungsvektoren entsteht ein umfassendes Modell zur Analyse von Gewölbesperren.

Das Bewertungs- und Optimierungsmodell ist direkt mit der Geometrie- und Berechnungsschnittstelle gekoppelt. D.h. die spezifizierten Änderungen führen auf vordefiniertem Ablauf zu den aktualisierten Ergebnisgrößen, sämtliche für die Änderung notwendige Schritte an Geometrie und Berechnung erfolgen automatisiert. Zur Vollständigkeit wird das Talsperrensystem noch durch Modelle für Bauablauf und Hydrationswärmeentwicklung ergänzt, welche aber in dieser Arbeit nicht behandelt werden.

Das nun voll parametrisierte Talsperrenmodell ermöglicht die Anfertigung von Parametervariationen und Sensitivitätsanalysen. Ausgehend von einem Grundsystem werden die einzelnen Talsperrenparameter variiert. Jede Variation erzeugt eine neue Talsperrenform, welche der Berechnung und Auswertung unterzogen wird. Für jede Variation kann eine absolute Änderung in den Ergebnisgrößen berechnet werden, z.B. der maximale Unterschied in den Bogenspannungen. Auch eine relative Betrachtung in Prozent vom Ausgangswert ist möglich und führt somit zu den sogenannten Sensitivitäten.

Um die Ergebnisgrößen überschaubar zu halten, wird die Darstellung auf sechs räumliche Kontrollbereiche in der Talsperre beschränkt. Die Kontrollbereiche bleiben über die Variationen hinweg gleich definiert, der Vergleich der Ergebnisse erfolgt von Kontrollbereich zu Kontrollbereich. Dadurch wird der Aufwand zur Auswertung und Interpretation gering gehalten.

Um das Ergebnis aus einer Parametervariation mit dem Ursprungszustand zu vergleichen, wird ein eigenes Bewertungsmodell entwickelt. Dieses Modell stellt für verschiedene Ergebnisgrößen jeweils eine Bewertungsgröße bereit, im Detail handelt es sich um eine Zielerfüllung von genau definierten Randbedingungen. Je nach Erfüllung dieser Randbedingung wird die Ergebnisgröße mit einer Zahl bewertet. Durch Bewertung von Bogenspannungen, Vertikalspannungen, Gleitsicherheiten, Verformungen und Volumina wird ein zusammenfassendes Zustandsbild der Talsperre generiert.

Dieses Bewertungsbild repräsentiert eine Übersicht der vorherrschenden Situation in der Struktur, auf Basis des vorab definierten Bewertungsschemas. Durch Addition der einzelnen Bewertungsergebnisse kann eine Gesamtbewertung ermittelt werden. Auf eine unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Bewertungsschematas wird in dieser Arbeit verzichtet.

Anhand des Beispiels der Gewölbesperre Kölnbrein im Maltatal, Österreich, wird das erstellte Bewertungsmodell angewendet. Ausgehend von einer statischen Berechnung mit den Lastfällen Eigengewicht und Vollstau wird die statische Situation für diesen Regellastfall ermittelt. Mittels Parametervariation werden die Sensitivitäten errechnet und exemplarisch dargestellt. Durch Bewertung der so ermittelten Geometrievariationen wird jede Geometrietransformation auf eine einheitliche Weise dargestellt. Die Gegenüberstellung der einzelnen Varianten zeigt die Auswirkungen der Parameteränderungen auf die Gesamtbewertung. Durch Interpretation der günstigen und ungünstigen relativen Bewertungsänderungen kann eine Aussage für die Wirksamkeit etwaiger Geometrieänderungen getroffen werden.

Durch die Wahl von drei ausgewählten Parameteränderungen aus den durchgeführten Bewertungen wird das ursprüngliche Talsperrenmodell modifiziert und abermals berechnet. Das originale Geometriemodell wird dem modifizierten Geometriemodell gegenübergestellt und die Änderungen verdeutlicht.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Möglichkeit der Zustands- bzw. Entwurfsbewertung ermöglicht eine effiziente Arbeitsmethodik zur Geometrieangepassung von Gewölbesperren. Vielschichtige Ergebnisse, wie z.B. Gleitsicherheiten, werden in normierte Bewertungsnoten umgewandelt. Durch Wahl der passenden Bewertungsschemata, entsprechend den Projektrandbedingungen, kann die einheitliche Abbildung rasch erfolgen. Mittels Bereitstellung eines kombinierten Berechnungs- und Auswertemodells fällt die zeitaufwändige Arbeit der Berechnungsvorbereitung nahezu komplett weg.

Für zukünftige Talsperrenentwürfe ist eine Anwendung des in dieser Arbeit erstellten Talsperrenmodells vorteilhaft. Sowohl die Geometrie, als auch Berechnung, Auswertung und Bewertungsmodell sind direkt in dasselbe Talsperrenmodell integriert. Die Gesamtbewertung einer Gewölbemauer, unter Anwendung des entwickelten integrierten und voll parametrisierten Talsperrenmodells, schafft deutlichen Mehrwert im Vergleich zu der klassischen Talsperrenanalyse.

## 10 Literatur

- [alt1] Alt., W., "Nichtlineare Optimierung", vieweg Verlag, Braunschweig, 2002
- [bathe1] Bathe K.-J., "Finite-Elemente-Methoden", Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2002
- [bazant1] Bazant, Z., „Entwicklung der Berechnung von Bogenstaumauern“, 2. Kongr. Int. Ver. Brücken- und Hochbau, Berlin, Vorbericht, S. 1107-1140, 1936
- [benoit1] Benoit, F., „Le barrage et l’aqueduc romains de Saint-Remy de Provence“, Rev. etudes anciennes, S. 332-340, 1935
- [billing1] D. P., Billington, D. C., Jackson, "Big Dams of the New Deal Era", Norman, 2006
- [bonn1] Bonnin, J., „Les hydrauliciens etrusques, des precurseurs? La houille blanche, Seiten 641-649, 1973
- [bron1] Bronstein, Semendjajew, „Taschenbuch der Mathematik“, Teubner, Stuttgart/Leipzig, 1991
- [brun1] U. Brunner, „Die Erforschung der antiken Oase von Marib mit Hilfe geomorphologischer Untersuchungsmethoden“, Archäologische Berichte aus dem Yemen, Band II, Zabern, Mainz, 1983
- [choi1] Choi, Kyung K., Kim, Nam-Ho, „Structural Sensitivity Analysis and Optimization“, 1+2, Mechanical Engineering Series, Springer, 2005
- [creag1] Creager, W.P., Justin, J.D., Hinds, J., "Engineering for Dams", Wiley & Sons, New York, 1945
- [drob1] Drobir, H., Studienblätter zur Vorlesung "Talsperren", Technische Universität Wien, 1998
- [eckes1] Eckes, T., Rossbach, H., "Clusteranalysen", Verlag Kohlhammer, 1980
- [erdb1] BMLF, Österr. Staubeckenkommission, "Erdbebenberechnung von Talsperren", Band 2, Erdbebenkennwerte, Wien, 1996
- [erla1] Erlacher, E., "Kegelschnitte", Workshop zur VO Einführung in das mathematische Arbeiten, Uni Wien, 2007
- [ferna1] Fernandez, O., J.A., Balboa, Mateo, Hergueta, Martinez Vazquez de Parga:, 1984, „Catalogo de noventa presas y azudes espanoles anteriores a 1900“, Urbanisma, Madrid
- [fial1] Fialho, J.F.L., "Leading principles for the design of arch dams – a new method of tracing and dimensioning", LNEC, Lisabon, 1955
- [garc1] Garcia-Diego, J.A., „Don Pedro Bernardo Villareal de Berriz y sus presas de contrafuertes“, Rev. obras publicas, S. 233-238.

- [gicot1] Gicot, H., "Conceptions et techniques de quelques barrages-voutes suisses", Wasser- und Energiewirtschaft, S. 194-205, 1961
- [gobl1] Goblot, H., "Kebar en Iran, sans doute le plus ancien des barrages . voutes", Art en manufactures, no. 154, S. 43-49, 1965
- [gobl2] Goblot, H., „Du nouveau sur les barrages iraniens de l’époque mongole“, Art et manufactures, no. 239, S. 14-20, 1973
- [gol1] Golze, A.R., "Handbook of dam engineering", van Nostrand Reinhold Comp., New York, 1977
- [grei1] Greier-Greiner, „Die Kegelschnitte“, www.parallax.at, 2006
- [grewe1] Grewe, K., „Planung und Trassierung römischer Wasserleitungen“, Chmielorz, Wiebaden, 1985
- [harz1] Harzheim, L., "Strukturoptimierung, Grundlagen und Anwendung", Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2008
- [hehm1] Hehmeyer, I., „Der Bewässerungslandbau auf der antiken Oase von Marib“, Archäologische Berichte aus dem Yemen, Band V, Zabern, Mainz, 1991
- [herz1] Herzog, M., „Elementare Talsperrenstatik“, Werner, Düsseldorf, 1998
- [hohb1] Hohberg, J.-M., "A Joint Element for the Nonlinear Dynamic Analysis of Arch Dams, 1992
- [holz1] Holzner A., "Sperre Schlegeis, Erdbebenberechnung", interner Bericht, Verbundplan, Salzburg, 2000
- [holz2] Holzner A., "Sperre Ranna, Standsicherheitsuntersuchung", interner Bericht, Verbundplan, Salzburg, 2000
- [holz3] Holzner A., "Möllsperre, Standsicherheitsberechnung", interner Bericht, Verbundplan, Salzburg, 2000
- [holz4] Holzner A., "Sperre Margaritze, Standsicherheitsberechnung Statik und Dynamik", interner Bericht, Verbundplan, Salzburg, 2001
- [holz5] Holzner A., "Sperre Limberg, Standsicherheitsberechnung", interner Bericht, Verbundplan, Salzburg, 2003
- [holz6] Holzner A., "Sperre Kölnbrein, Erdbebenberechnung Tiefstau", interner Bericht, Verbundplan, Salzburg, 2003
- [holz7] Holzner A., "Sperre Kölnbrein, Erdbebenstandsicherheitsberechnung", interner Bericht, Verbundplan, Salzburg, 2000
- [holz8] Holzner A., "Sperre Forstsee, Erdbebenstandsicherheitsberechnung", interner Bericht, Verbundplan, Salzburg, 2001
- [holz9] Holzner A., "Ermenek Dam, Dam - structural analysis", interner Bericht, Verbundplan, Salzburg, 2003

- [holz10] Holzner A., "Erdbebenuntersuchung von Gewölbemauern"; Abaqus User Meeting, Salzburg, 2001
- [holz11] Holzner A., Perner F., "Implementation of Joints in Finite Element Analysis of Dams", NAFEMS Seminar Modelling of Assemblies and Joints for FE Analysis, Wiesbaden, 2002
- [iida1] Iiada, R., Shibata, I., "Design of arch dams with small central angle in Japan", International Workshop on Arch Dams, Coimbra 1987, Balkema, 1990
- [jarre1] Jarre, Stoer, "Optimierung", Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 2003
- [jorge1] Jorgensen, L.R., „The Constant-Angle Arch Dam“, Eng. News, part II, S. 155-157, 1912
- [kiel1] Kiel, J. „Zur Berechnung von Wasserdruckmauern, insbesondere von Talsperren“, Centralblatt der Bauverwaltung 9, S. 397-398, 1889
- [korte1] Korte B., Vygen J., "Kombinatorische Optimierung", Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2008
- [kühl1] Kühlein, T., „Analytische Geometrie der Ebene II“, Band 27, Mentor Verlag, 1965
- [lamp1] Lamprecht, H-O, „Opus Caementitium“, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1984
- [legg1] Legget, R.F., „The Jones Falls Dam on the Rideau Canal, Ontario/Canada“, Trans. Newcomen Soc. S.205-218, 1957
- [lewis1] Lewis, R.M., Torczon, V., Trosset, M., "Direct Search Methods: Then and now", Journal of Computational and Applied Mechanics, 124(1-2):191-207, 2000
- [lieck1] Lieckfeldt, H., "Die Standfestigkeit von Staumauern mit offenen Lagerfugen", Centralblatt der Bauverwaltung 18, S.105-111, 1898
- [lins1] Linsbauer, H., „Ausgewählte Kapitel des Talsperrenbaus“, Vorlesungsunterlagen, TU Wien, 2010
- [liu1] Liu Fei, „Optimum Design of Double Curved Arch Dams with Three Centres“, Journal of Hydraulic Engineering, No.1, 1991
- [lomb1] Lombardi, G., "Kölnbrein dam: an unusual solution for an unusual problem", Water Power & Dam Construction, 1991
- [louch1] Lou Changqing, Sun Yangbiao, "Optimum Design for many types of arch dam", Proceedings of the International Symposium on Arch Dams, Hohai University, Nanjing, 1992
- [mart1] Martin, J., "The search of shapes for arch dams", International Workshop on Arch Dams, Coimbra 1987, Balkema, 1990
- [noetz1] Noetzli, F.A., „Pontalto and Madruzzo Arch Dams“, Western Constr. News and Highway Builder, S. 451-452, 1932
- [obernh1] Obernhuber, P., "Remedial Works for the Kölnbrein Dam: Design and Analysis", ICOLD, Wien, 1991

- [ödk1] Österr. Draukraftwerke AG, "Projekt zur Sanierung der Kölnbreinsperre", Broschüre, Klagenfurt, 1989
- [ouyan1] Ou Yang Minggui, „An investigation of new optimum model for double curvature arch dams – mixed multistage method“, Proceedings of the International Symposium on Arch Dams, Hohai University, Nanjing, 1992
- [press1] Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B., "Numerical Recipes in Fortran 77", Cambridge University Press, 1996
- [prisc1] Priscu, R., Suprovici, P., "Shapes obtained by optimization procedures", International Workshop on Arch Dams, Coimbra 1987, Balkema, 1990
- [prom1] R. Promper, „Der Entwurf von Gewölbestaumauern an Hand eines Parametermodells mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode“, Dissertation, TU Wien, 1992
- [quint2] Quintela, A. de Carvalho, Cardoso, J.L., Mascarenhas, J.M., "Aproveitamentos hidraulicos romanos a sul do Tejo", Lisboa, 1986
- [quint1] Quintela, A. de Carvalho, Cardoso, J.L., Mascarenhas, J.M.: Barragend antigas em Potrugal a sul do Tejo, Fund. San Benito de Alcantara, Alcantara, 1988
- [rocha1] Rocha, M., "Statement of the physical problem of the arch dam", Theory of Arch dams, Symposium Sothampton, Pergamon Press, 1964
- [resch1] Rescher, O.J., "Talsperrenstatik – Berechnung und Bemessung von Gewichtsstaumauern", Berlin, Springer, 1965
- [reyno1] Reynolds, T.S., "Stronger than a Hundred Man", J. Hopkins Univ. Press, Baltimore, 1983
- [rigau1] Rigaud, J., "L'ingenieur Francois Zola, sa famille, sa vie et son oeuvre", Academie, Aix-en-Provence, 1957
- [ritt1] Ritter, H., "Die Berechnung von bogenförmigen Staumauern", J. Lang, Karlsruhe, 1913
- [schni1] N. J. Schnitter, „A history of dams, the useful pyramids“, A. A. Balkema, 1994
- [schni2] Schnitter, N., "Die Geschichte des Wasserbaues in der Schweiz", Olynthus Verlagsanstalt, Vaduz/FL, 1992
- [schni3] Schnitter, N., Übersetzung aus dem Spanischen, "Historische Talsperren und Wehre in Spanien", orig. Autoren: M. Diaz, M. Pinilla, D. Fernandez, O. Hernandez, aus "Historische Talsperren, Band 2", Wittwer, 1991
- [schuy1] Schuyler, J.D., "The Construction of the Sweetwater Dam", Trans. American Soc. Civil Eng., S. 201-232, 1888
- [seraf1] Serafim, J.L., „New shapes for arch dams“, Civ. Engineering, Volume 36, New York, 1966

- [seraf2] Serafim, J.L., "Stresses in arch dams due to their mass", Theory of Arch dams, Symposium Sothampton, Pergamon Press, 1964
- [spendl1] Spendley, W., Hext, G.R, Himsworth, F.R., "Sequential application of simplex designs in optimisation and evolutionary operation", Technometrics, 4:441-461, 1962
- [smit1] Smith, N., „A History of Dams“, Peter Davies, London, 1971
- [stuc1] Stucky, A., "Quelques problemes relatifs aux fondations des grands barrages-reservoirs – Barrages de Mauvoisin et de la Grande Dixence", Bulletin technique de la Suisse romande 80, S. 317-325 und 329-336, 1954
- [tölk1] Tölke, F., "Talsperren", Berlin, Springer, 1938
- [trem1] Tremmel, E., "Zur elementaren Berechnung von den Gewölbemauerlamellen veränderlicher Dicke", Festschrift Oberstufe des Tauernkraftwerkes Glockner Kaprun, Tauernkraftwerke, 1955
- [usbr1] USBR, „Trial Load Method of Analyzing Arch Dams“, US Bureau of Reclamation, Denver, 1938
- [usbr2] USBR, "Design of Arch Dams", Design Manual for Concrete Arch Dams, U.S: Department of Interior, Denver, 1977
- [usace1] U.S. Army Corps of Engineers, "Arch Dam Design", Honolulu, 1994
- [verb1] Verbund – AHP, "Die Speicherkraftwerke der AHP in Kärnten", Wien, 2007
- [visch1] Visher, H., Wagoner, L., "On strains in curved masonry dams", Trans. Tech. Society of the Pacific Coast 6, S. 75-115, 1905
- [wangy1] Wang Yutai, Wu Zhengyi, "Arch Dam Optimization Design under Strength Fuzziness and Fuzzy Safety Measure", Proceedings of the International Symposium on Arch Dams, Hohai University, Nanjing, 1992
- [west1] Westergaard, H.M., "Water pressures on dams during earthquakes", American Society of Civil Engineers, Transactions, Vol. 98, 1933
- [wid1] Widmann, R., „Die Talsperren Österreichs“, Heft 33, Gewölbemauern, Österreichisches Nationalkomitee für Talsperren, 1999
- [wid2] Widmann, R., "Zur Berechnung und wirtschaftlichen Formgebung von Bogengewichtsmauern", Österreichische Ingenieurzeitschrift, 4. JG, Heft 8, S. 274-280, 1961
- [wid3] Widmann, R., "Der Parabelbogen im Talsperrenbau", Dissertation an der Techn. Hochschule Wien, 1959
- [wilk1] J. Wilkinson, „The Pool of Siloam“, Levant, Seite 116-125, 1978
- [wisner1] Wisner, G.Y., Wheeler, E.T., "Investigation of Stresses in High Masonry Dams of Short Spans", Eng. News, part II, S. 141-144, 1905

- [wuxi1] Wu Xi, Sun Zhouming, Li Yujie, "The shape optimization of double curvature arch dam of Laxiwa hydroelectric power station on the yellow river", Proceedings of the International Symposium on Arch Dams, Hohai University, Nanjing, 1992
- [ziegler1] Ziegler F., "Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper", Springer Verlag, Wien/NewYork, 1998
- [zienk1] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., "The Finite Elemente Method", Butterworth&Heinemann, Oxford, 2000
- [zhu1] Zhu Baifang, "Some Problems in the Optimum Design of Double-Curved Arch Dam", Computational Structural Mechanics and Applications, No.3, 1984
- [zhubo1] Zhu Bofang, Rao Bin, Jia Jinsheng, Li Yisheng, "Shape optimization of arch dams for static and dynamic loads", Proceedings of the International Symposium on Arch Dams, Hohai University, Nanjing, 1992