

Erdbauwerke für Hochgeschwindig- keitsstrecken mit Fester Fahrbahn

Konzept zur wirtschaftlichen und
qualitätsgesicherten Erstellung

Dissertation zur Erlangung des Grades Dr.-Ing.
an der Bergischen Universität Wuppertal

Dipl.-Ing. Michael Engler

Hennef, im Februar 2003

Bei der Herstellung von Erdbauwerken für Neubaustrecken mit Fester Fahrbahn wird durch die maßgeblichen Richtlinien die Verwendung bindiger Böden beschränkt. Auf Grundlage der Regeln der Technik sowie ergänzender Versuchsverfahren können wirtschaftliche Konstruktionen, die die Verwendung der vorgenannten Böden vorsehen, auf ihre Funktionssicherheit hin geprüft werden, so dass deren Verwertung als Schüttmaterialien verantwortet werden kann.

Die Anforderungen an den Unterbau einer Neubaustrecke mit Fester Fahrbahn erfordern im Bereich der freien Strecke über den üblichen Umfang hinaus umfangreiche Maßnahmen zur Qualitätssicherung. Diese Schritte sind vom Bauausführenden zur Sicherstellung der langfristigen Erfüllung aller Anforderungen an den Unterbau durchzuführen.

Die vorliegende Arbeit gibt Lösungsansätze für die wirtschaftlichen und qualitätssichernden Aufgaben.

Um eine möglichst große Effizienz zu erreichen, ist auf eine adäquate Projektstruktur und Vertragsform zu achten. Die Implementierung des Konzeptes in ein Qualitätsmanagementsystem nach der EN ISO 9001:2000 ist möglich.

Applicable guidelines restrict the use of binder soil in the production of earthworks for new firm tracks. On the basis of state-of-the-art technology as well as additional experimental procedures, it is possible to verify the reliable functionality of efficient constructions that include the use of the type of soil mentioned before so as to justify its use as fill material.

The requirements with respect to the foundation of a new firm-track line will necessitate extensive quality assurance measures for open-track sections exceeding standard practices. These steps will have to be followed by the construction company in order to ensure that all requirements with respect to the foundation will be met over the long term.

This dissertation provides possible solutions for the economic tasks as well as those linked to quality assurance.

In order to obtain a maximum degree of efficiency, the project will have to be structured appropriately, and a proper form of contract will have to be selected. This concept can be integrated into a quality management system in accordance with EN ISO 9001:2000.

1.	EINLEITUNG	1
1.1	Gegenstand der Arbeit	1
1.2	Literaturrecherche	2
1.3	Abgrenzung und Systematik der Arbeit	3
2.	ERDBAUTECHNISCHE FACHPLANUNG	5
2.1	Allgemeines	5
2.2	Anforderungen an die Erdbautechnik	5
2.2.1	Geltende Normen und Richtlinien	5
2.2.2	Technische Anforderungen an die Erdbautechnik	6
2.2.3	Sicherstellung der Langlebigkeit der Festen Fahrbahn	10
2.3	Das Baugrundmodell	11
2.3.1	Allgemeines	11
2.3.2	Beschreibung des Baugrundes	12
2.3.3	Beschreibung der anfallenden Erdmassen als Baustoffe	17
2.3.4	Beispiel eines Baugrundmodells	18
2.4	Erdbautechnische Fachplanung	20
2.4.1	Allgemeines	20
2.4.2	Bemessung der Erdbauwerke	27
2.4.3	Sicherung der zyklisch-dynamischen Stabilität	35
2.4.3.1	Allgemeines	35
2.4.3.2	Nachweisformen	40
2.4.4	Nachweis der Grenzflächenstabilität	46
2.4.5	Übergangsbereiche auf Ingenieurbauwerke	47
3.	MAßNAHMEN BEI DER PROJEKTUMSETZUNG	49
3.1	Umsetzung der Fachplanung in Arbeitsanweisungen	49
3.1.1	Arbeitsanweisung Prüfung des Baugrundmodells	50
3.1.2	Arbeitsanweisung Prüfung der Erdbaustoffe	51
3.1.2.1	Anforderungen an die Erdbaustoffe	52
3.1.2.2	Eignungsprüfung und Eigenüberwachung der Erdbaustoffe	52
3.1.3	Arbeitsanweisung Herstellung der Erdbauwerke	54

3.1.3.1	Herstellung der Zone 1	54
3.1.3.2	Herstellung der Zone 2 bis Zone 4	57
3.1.3.3	Herstellung der Zone 5	59
3.1.4	Arbeitsanweisung Prüfung der Qualität der Erdbauwerke	59
3.1.4.1	Prüfung der Zone 1	60
3.1.4.2	Prüfung der Zone 2 bis Zone 5	60
3.1.5	Erstellung von erdbautechnischen Längs- und Querschnitten	63
3.2	Bauablaufplanung	69
3.2.1	Zeitliche Bauablaufplanung	69
3.2.2	Räumliche Bauablaufplanung	74
3.2.3	Erstellung von Datenblättern zur zeitlichen und räumlichen Bauablaufplanung	76
3.3	Steuerung der qualitätsrelevanten Arbeitsabläufe	79
3.3.1	Verfahrensanweisung zur Prüfung des Baugrundmodells	79
3.3.2	Verfahrensanweisung zur Herstellung der Erdbauwerke	80
3.4	Verformungskontrolle des Fahrweges	83
3.4.1	Planung der Anordnung von Verformungsmesspunkten	83
3.4.2	Durchführung der Verformungsmessungen	86
3.4.3	Definition von zeitabhängigen Schwellenwertlinien	87
3.4.4	Ermittlung der Last-Verformungs-Diagramme	88
3.4.5	Prognose der Restverformungen	89
3.4.6	Freigabe des Erdkörpers zum Einbau der Festen Fahrbahn	92
4.	PROZESSABLAUF BEI DER UMSETZUNG DES KONZEPTE	94
5.	EINBINDUNG DES KONZEPTE IN EIN PROJEKTSPEZIFISCHES QUALITÄTSMANAGEMENT	98
6.	EINBINDUNG DES KONZEPTE IN EIN EFFIZIENTES PROJEKTMANAGEMENT	100
6.1	Einbindung des Konzeptes in eine adäquate Vertragsform	100
6.2	Einbindung des Konzeptes in einen adäquaten Organisationsaufbau	101

7.	ERDBAUTECHNIK AM BEISPIEL DER NEUBAUSTRECKE KÖLN–RHEIN/MAIN	105
7.1	Allgemeines zur Neubaustrecke	105
7.2	Erdbautechnik im Los B des Bauabschnittes Mitte der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main	106
7.3	Erdbautechnik im Los C des Bauabschnittes Mitte der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main	109
8.	NACHWEIS DER RICHTIGKEIT DES KONZEPTE	111
8.1	Allgemeines	111
8.2	Planung der Erdbautechnik	111
8.2.1	Das Baugrundmodell	111
8.2.1.1	Wirtschaftliche Gründungsmaßnahmen	111
8.2.1.2	Nutzung des wirtschaftlichen Potenzials der beim Erd- und Tunnelbau anfallenden Bodenmassen	115
8.2.2	Erdbautechnische Fachplanung auf Grundlage der anerkannten Regeln der Technik	117
8.2.3	Konstruktion zyklisch-dynamisch stabiler Erdbauwerke	117
8.2.3.1	Sicherstellung der zyklisch-dynamischen Stabilität	117
8.2.3.2	Nachweis der zyklisch-dynamischen Stabilität	119
8.3	Maßnahmen bei der Projektumsetzung	122
8.3.1	Erstellen von Arbeitsanweisungen	122
8.3.2	Erstellen von erdbautechnischen Längs- und Querschnitten	125
8.3.3	Zeitliche Bauablaufplanung	128
8.3.4	Räumliche Bauablaufplanung	128
8.3.5	Verformungskontrolle des Fahrweges	131
8.3.5.1	Definition von Schwellenwertlinien	131
8.3.5.2	Ermittlung der Last- und Verformungsdiagramme	132
9.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	137

BEZEICHNUNGEN

A) LATEINISCH

a_p	[m]	Aufstandsfläche der Radsatzlasten Lastbild UIC 71
AA	[-]	Arbeitsanweisung
AK	[-]	Arbeitskreis
b_{HGT}	[m]	Breite der hydraulisch gebundenen Tragschicht
BA	[-]	Baugrundaufschluss
BTS	[-]	Betontragschicht
c_N	[-]	Zyklischer Faktor
c_v	[-]	Konsolidierungsbeiwert
d	[-]	Dämpfungsfaktor
D	[-]	Dimension
D_{PR}	[-]	Verdichtungsgrad
DB AG	[-]	Deutsche Bahn AG
DGEG	[-]	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
DIN	[-]	Deutsches Institut für Normung
DS	[-]	Drucksache
E	[-]	Elastizitätsmodul
E_{dyn}	[N/mm ²]	Dynamischer Steifemodul
E_{stat}	[N/mm ²]	Statischer Steifemodul

E_{v2}	[N/mm ²]	Verformungsmodul der Zweitbelastung des Lastplattendruckversuches
EBG	[-]	Erdbautechnische Bodengruppe
EN	[-]	Europäische Norm
ENV	[-]	Europäische Vornorm
EQ	[-]	Erdbautechnisches Querprofil
f	[-]	Setzungsbeiwert
F	[Hz, 1/s]	Frequenz
FE	[-]	Finite Elemente
FGSV	[-]	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FDVK	[-]	Flächendeckende Verdichtungskontrolle
FF	[-]	Feste Fahrbahn
FSS	[-]	Frostschuttschicht
GM	[-]	Gründungsmaßnahmen
GOK	[-]	Geländeoberkante
GW	[m NN]	Grundwasserstand
h	[m]	Höhe eines Erddammes
HB	[-]	Homogenbereich
HFS	[-]	Hinterfüllschicht
HGT	[-]	Hydraulisch Gebundene Tragschicht

I_c	[-]	Konsistenzzahl
I_D	[-]	Bezogene Lagerungsdichte
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
k_{dyn}	[-]	Dynamischer Lasterhöhungsfaktor
$l_{\ddot{u}}$	[m]	Länge des Übergangsbereiches auf ein Brückenbauwerk in Bezug auf zulässige Verformungen
L	[m]	Störgrößenwellenlänge
n_a	[-]	Luftporenanteil
N	[-]	Anzahl der Zugübergänge
OCR	[-]	Überkonsolidierungsverhältnis
OK	[-]	Oberkante
P	[MN]	Radsatzlasten
PQM	[-]	Projektbezogenes Qualitätsmanagement
QM	[-]	Qualitätsmanagement
r_a	[m]	Muldenausrundungsradius
R^2	[-]	Bestimmtheitsgrad
s_1	[mm]	Plastische Verformung nach der ersten Zugüberfahrt
s_e	[mm]	Plastische Eigenverformungen des Erdkörpers
s_{el}	[mm]	Elastische Verformungen
s_r	[mm]	Plastische Restverformung

s_u	[mm]	Plastische Verformungen des Untergrundes
s_v	[mm]	Plastische Verformungen aus Verkehrslasten
S_r	[-]	Sättigungszahl
SO	[-]	Schienenoberkante
$SZ_{8/12}$	[-]	Widerstandsfähigkeit von Kies 8/12 gegen Schlag
t	[d]	Zeit
UK	[-]	Unterkante
v	[km/h]	Geschwindigkeit
v_e	[km/h]	Entwurfsgeschwindigkeit
$v_{eff,res}$	[mm/s]	Resultierende, effektive Schwinggeschwindigkeit
v_{krit}	[mm/s]	Kritische Schwinggeschwindigkeit
VA	[-]	Verfahrensanweisung
x,y,z	[m]	Bezeichnung der Variablen im kartesischen Koordinatensystem
ZDS	[-]	Zyklisch-dynamische Sicherungsschicht
zul.	[-]	zulässig

BEZEICHNUNGEN

B) GRIECHISCH

α	[-]	Abklingkoeffizient der Tiefe
α_L	[-]	Auflockerungsfaktor
Δ	[-]	Differenzbetrag
ε	[-]	Stauchung
κ	[-]	Abminderungsfaktor für Radsatzlasten
γ	[kN/m ³]	Wichte des feuchten Bodens
σ_1, σ_3	[N/mm ²]	Spannungsdeviatoren
σ_c	[N/mm ²]	Zyklische Spannung
σ_{stat}	[N/mm ²]	Spannung aus statischer Last
ψ_B	[-]	Verdrehung eines Brückenbauwerkes im Übergangsbereich zum Erdbauwerk
ψ_{e+u}	[-]	Verdrehung eines Erdbauwerkes im Übergangsbereich zum Brückenbauwerk infolge Eigensetzung und Untergrundverformung
ψ_u	[-]	Verdrehung eines Erdbauwerkes im Übergangsbereich zum Brückenbauwerk infolge Untergrundverformung

1. EINLEITUNG

1.1 Gegenstand der Arbeit

Die hohen Anforderungen an den Unterbau einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn erfordern im Bereich der freien Strecke umfangreiche Maßnahmen in Planung und Bauausführung. Ursächlich für die geforderte Güte sind Systembedingungen der Festen Fahrbahn und der dauerhafte Fahrkomfort bei Hochgeschwindigkeit. Mit der üblichen Vorgehensweise bei der Realisierung von Erdbaumaßnahmen kann nicht sichergestellt werden, dass die Anforderungen langfristig, also über den Zeitraum der vorgesehenen Nutzung, erfüllt werden. Neben den bekannten Maßnahmen bei der Planung und Ausführung eines qualitätsgesicherten Erdbaus sind weitere Schritte erforderlich.

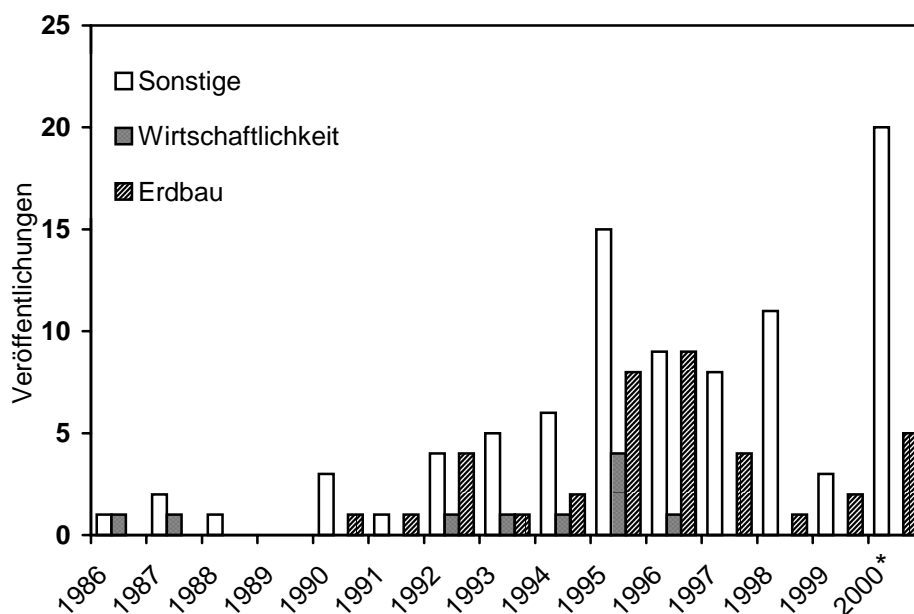
Die Regelwerke der Deutschen Bahn AG sind in Bezug auf die Konstruktion der Erdbauwerke für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn infolge der Festlegung auf bestimmte Boden- und Felsmassen sehr stringent. Hierdurch wird eine wirtschaftliche Verwendung der beim Erd- oder Tunnelbau anfallenden Boden- oder Felsmassen als Baustoff eingeschränkt. Durch eine bodenmechanische Betrachtung und Lösung der Bauaufgabe kann aber das wirtschaftliche Potenzial der gewonnenen Baustoffe besser genutzt werden.

Gegenstand dieser Arbeit ist ein Konzept zur Sicherstellung, dass die Anforderungen an die Erdbauwerke einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn bei gleichzeitiger Beachtung wirtschaftlicher Optimierungsmöglichkeiten durch die Planung und Bauausführung dauerhaft erfüllt werden. Das Konzept basiert auf positiven sowie negativen Erfahrungen bei der Planung und Aus-

führung des Erdbaus einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn.

1.2 Literaturrecherche

Es wurde eine allgemeine Literaturrecherche zum Thema „Feste Fahrbahn“ auf Grundlage der *LITERATUR-DATENBANK FÜR DAS BAUEN* [19] durchgeführt (vgl. Bild 1.1).



* manuelle Recherche der Veröffentlichungen für das Jahr 2000

Bild 1.1: Auswertung einer Literaturrecherche

Die Veröffentlichungen zum Erdbau für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn beschäftigen sich mit Anforderungen an die Erdbauwerke, die sich aus den Systembedingungen der Fester Fahrbahn und den Erfordernissen eines langfristigen Fahrkomforts ergeben (vgl. Abschnitt 2.2.2 „Technische Anforderungen an die Erdbautechnik“). Hierzu werden auch Konstruktionen für die Erdbauwerke vorgestellt. Diese Publikationen treffen

keine Aussage dahin gehend, wie durch die Planung und Bauausführung die Anforderungen dauerhaft erfüllt werden.

Die wirtschaftlichen Fragestellungen beziehen sich vorwiegend auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis des Oberbausystems Feste Fahrbahn. Dass die maßgeblichen Richtlinien für den Erdbau einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn vergleichsweise hohe Investitionskosten bedingen, wurde in den Veröffentlichungen nicht behandelt. Demzufolge finden sich keine Hinweise auf mögliche Einsparungspotenziale.

Die Literaturrecherche und deren Auswertung zeigt, dass kein Konzept vorliegt, wie Erdbauwerke für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn wirtschaftlich und qualitätsgesichert erstellt werden können.

1.3 Abgrenzung und Systematik der Arbeit

Der erste Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Fachplanung einer Erdbautechnik zur Sicherstellung der dauerhaften Erfüllung der Anforderungen an die Erdbauwerke. Der Begriff Erdbauwerk bezeichnet den geschütteten Erdkörper und die Gründung des Erdkörpers. Unter der Bezeichnung Erdbautechnik wird die technische Konstruktion eines Erdbauwerkes verstanden. Die Fachplanung meint die Planung der Erdbautechnik und die notwendigen Modell- oder Feldversuche zur Überprüfung der Wirksamkeit der Konstruktion der Erdbauwerke. Grundlage für die Fachplanung sind die anerkannten Regeln der Technik, die auf die Aufgabenstellung bezogen betrachtet werden. Neue bodenmechanische Lösungsansätze liefert diese Arbeit nicht.

Der zweite Teil beinhaltet die notwendigen Maßnahmen bei der Projektumsetzung, die für eine dauerhafte Erfüllung der Anforderungen an die Erdbauwerke notwendig sind.

2. ERDBAUTECHNISCHE FACHPLANUNG

2.1 Allgemeines

In den Ausführungen dieses Abschnittes wird gezeigt, wie eine Erdbautechnik-Fachplanung durchgeführt werden kann, die eine dauerhafte Erfüllung der Anforderungen an die Erdbauwerke einer Hochgeschwindigkeitstrecke mit Fester Fahrbahn sichert.

Die maßgeblichen Arbeitsschritte sind hierbei die Bestimmung der Eigenschaften des Baugrundes und der anfallenden Erdbaustoffe durch ein Baugrundmodell und die Fachplanung zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Erdbautechnik.

Zur Sicherung des für die Feste Fahrbahn einer Hochgeschwindigkeitsstrecke geforderten Qualitätsstandards sind Anforderungen an die Erdbauwerke festgelegt worden, die nachfolgend erläutert werden.

2.2 Anforderungen an die Erdbautechnik

2.2.1 Geltende Normen und Richtlinien

In Deutschland sind die für die Schotterbauweise gültige *RIL 836 [25]* und die hier aufgeführten sonstigen Bestimmungen, Normen, Richtlinien und Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen zu beachten.

Im vorliegenden Fall einer Hochgeschwindigkeitstrecke mit Fester Fahrbahn sind insbesondere die nachfolgend beschriebenen Systembedingungen der Festen Fahrbahn und das Komfort-Kriterium zu berücksichtigen. Die hieraus abgeleiteten Anforder-

rungen an die Erdbauwerke sind als Ergänzung zur *RIL 836 [25]* in dem *AKFF [1]* festgelegt oder auch nur als grundsätzliches Ziel beschrieben worden.

2.2.2 Technische Anforderungen an die Erdbautechnik

Die Nachstellung der Festen Fahrbahn in Lage und Höhe ist im Gegensatz zum Schotteroberbau nur durch Ausgleich in der Schienenbefestigung möglich und beträgt beispielsweise für das System Feste Fahrbahn Bauart Rheda in der Höhe + 26 mm / - 4 mm (vgl. *AKFF [1]*). Dieser Betrag wird im *AKFF [1]* auf Bauungenauigkeiten der Festen Fahrbahn, auf statische und auf zyklisch-dynamische Verformungen des Unterbaus aufgeteilt. Die jeweiligen Regulierungsoptionen sind nach dem *AKFF [1]* unabhängig von den tatsächlichen Verformungen vorzuhalten.

Die zulässige Verformung des Unterbaus der freien Strecke entspricht somit der maximalen Ausgleichsmöglichkeit in der Schienenbefestigung abzüglich der vorzuhaltenden Nachstellmöglichkeit für die Bautoleranz der Festen Fahrbahn und beträgt derzeit + 20 mm. Hierbei dürfen entsprechend dem *AKFF [1]* die statischen Verformungen maximal + 15 mm und die Verformungen aus zyklisch-dynamischer Einwirkung maximal + 5 mm betragen. Sofern sich ein gleichmäßiges Verformungsverhalten über eine Länge von 20 m einstellt, dürfen die statischen Verformungen des Unterbaus + 30 mm betragen (vgl. *AKFF [1]*).

Unter der Voraussetzung, dass das Komfort-Kriterium der Fahrdynamik nicht verletzt wird, dürfen großräumige, muldenförmige Verformungen auftreten. Dies gilt dann als erfüllt, wenn die Überlagerung der trassierten Radien und der Verformungen einen maxima-

len Muldenausrundungsradius von $r_a = 0,4 \cdot v_e^2$ ergibt. Bei einer Entwurfsgeschwindigkeit von $v_e = 300$ km/h ermittelt sich der zulässige Ausrundungsradius zu 36.000 m (vgl. AKFF [1]).

Die zulässigen Verformungen der Erdbauwerke dürfen die muldenförmige Verformung überlagern. Das zulässige Setzungsmaß in der Mulde beträgt in Bezug auf die Sollgradienten + 60 mm. Bei Überschreitung dieser Verformungswerte ist der Bau der Festen Fahrbahn unzulässig (vgl. AKFF [1]).

Bild 2.1 zeigt schematisch die zulässigen Verformungen nach dem AKFF [1].

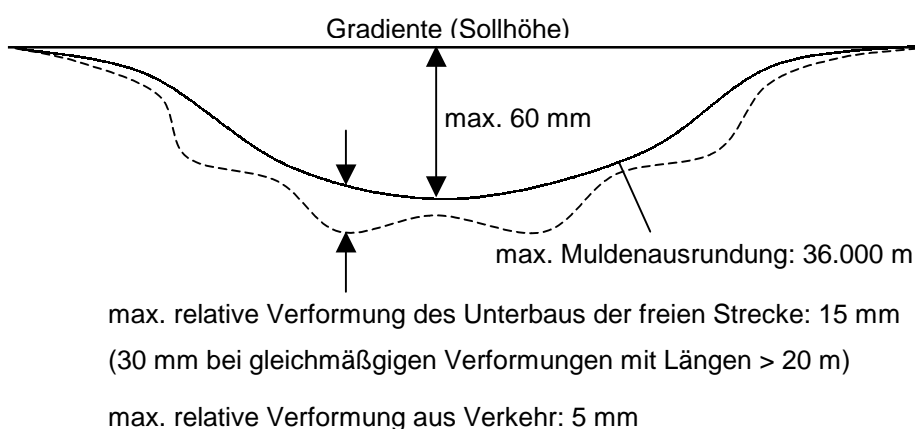
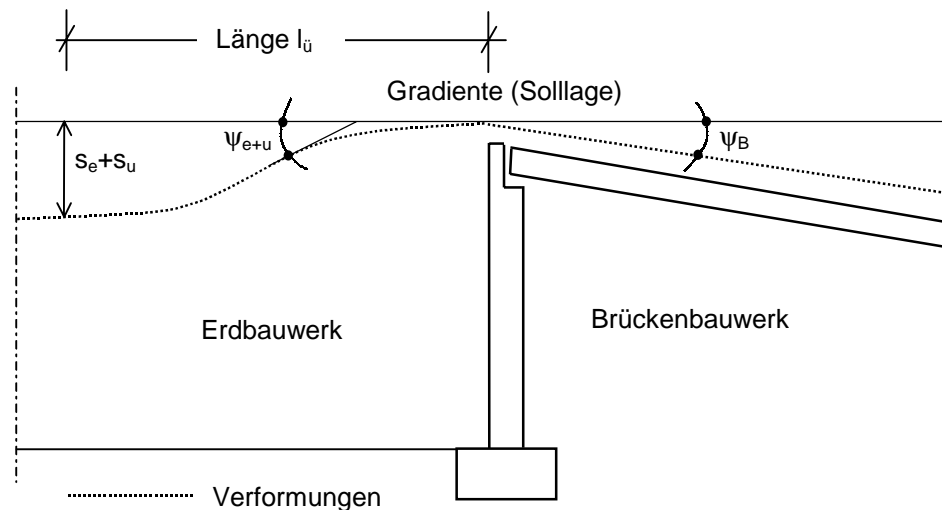


Bild 2.1 Zulässige Verformungen nach dem AKFF [1] (schematisch)

In Übergangsbereichen auf Brückenbauwerke brauchen nach dem derzeitigen Stand nicht die vorgenannten strengen Grenzwerte der freien Strecke eingehalten werden. Bild 2.2 zeigt die hier zulässigen Verformungsgrenzwerte.



Zulässige Verformungen im Übergangsbereich auf Brückenbauwerke:

- $s_e + s_u = 30 \text{ mm}$ für $l_{\ddot{u}} = 20 \text{ m}$
- $\tan \psi_B = 1 / 2.200$
- $\tan \psi_{e+u} = 1 / 500$ innerhalb von $l_{\ddot{u}} = 20 \text{ m}$

Erläuterung:

s_e Plastische Eigenverformungen des Erdkörpers

s_u Plastische Verformungen des Untergrundes

ψ_B Verdrehung eines Brückenbauwerkes im Übergangsbereich zum Erdbauwerk

ψ_{e+u} Verdrehung des Erdbauwerkes im Übergangsbereich zum Brückenbauwerk infolge Eigensetzung und Untergrundverformung

$l_{\ddot{u}}$ Länge des Übergangsbereiches auf ein Brückenbauwerk in Bezug auf zulässige Verformungen

Bild 2.2: Übergangsbereiche auf Brückenbauwerke (schematisch) nach AKFF [1]

An die Erdbauwerke wird die Anforderung gestellt, dass während der Nutzungsdauer keine unzulässigen Verformungen auf der freien Strecke einschließlich der Übergangsbereiche auf Brückenbauwerke auftreten.

Der Hochgeschwindigkeitszug erzeugt zyklisch-dynamische Einwirkungen auf den Ober- und Unterbau. Die Ursachen und Auswirkungen dieser Einwirkungen auf den Erdkörper sind in Bild 2.3 dargestellt.

Die Belastungszyklen sind unregelmäßig, da diese maßgeblich vom Betrieb bestimmt werden. Die dynamische Einwirkung wird durch die Fahrgeschwindigkeit, das Fahrzeuggewicht und dem Zustand des Gleises und der Fahrzeuge hervorgerufen.

Diese zyklisch-dynamische Einwirkung verursacht Erschütterungen und Spannungen im Erdkörper, die tiefenabhängig sind. In der Folge erfüllt der Fahrweg aufgrund der mit einer Zusammenrüttlung oder einem plastischen Fließen einhergehenden Verformung möglicherweise nicht mehr die geometrischen Anforderungen. Bei fortschreitender Änderung der Bodenstruktur kann wegen der Abnahme der Scherfestigkeit eine Gefährdung der Standsicherheit auftreten.

Die Anforderung an die Erdbauwerke ergibt sich aus den vorgenannten Zusammenhängen. Durch eine geeignete Erdbautechnik ist ein zyklisch-dynamisch stabiles Bauwerk zu schaffen.

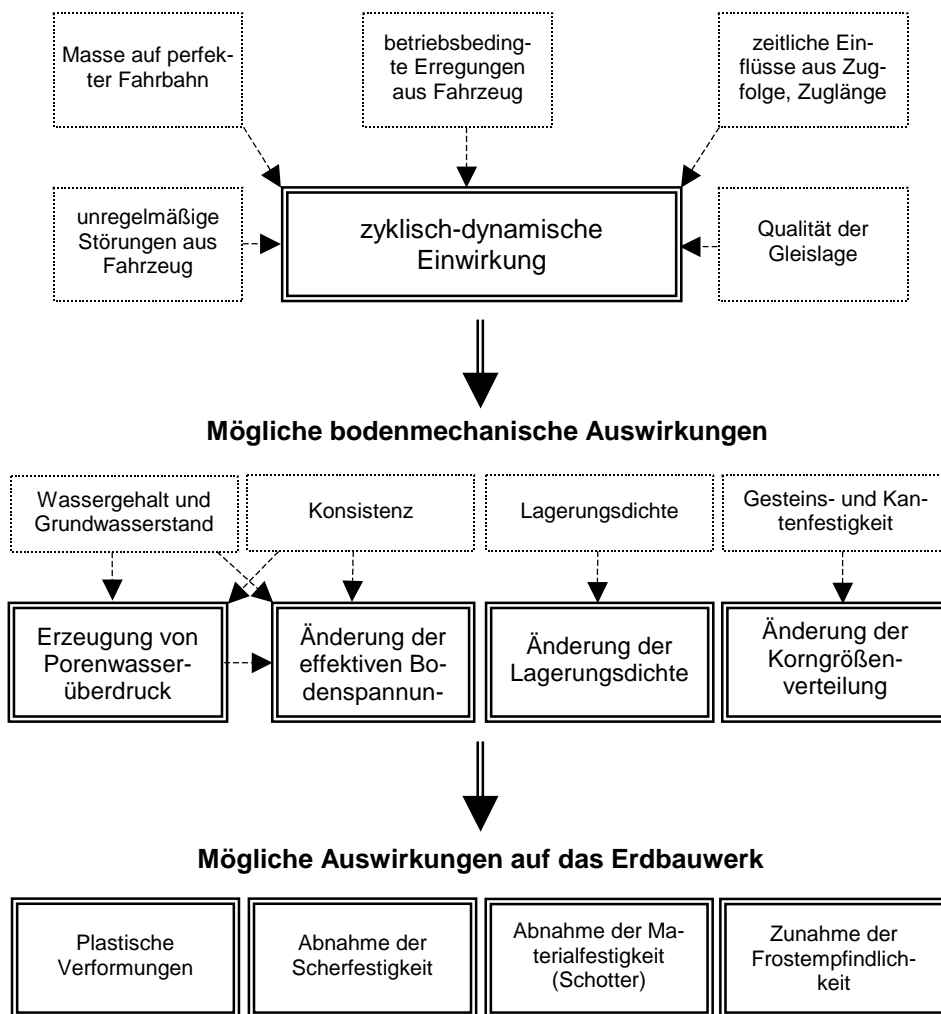


Bild 2.3: Ursache und Auswirkungen zyklisch-dynamischer Einwirkungen auf ein Erdbauwerk

2.2.3 Sicherstellung der Langlebigkeit der Festen Fahrbahn

Die Lebensdauer ist in der ENV 1991, Teil 1 als die angesetzte Zeit definiert, in der ein Bauwerk wie beabsichtigt genutzt werden kann. Bei ordnungsgemäßer Unterhaltung dürfen keine größeren Instandsetzungsarbeiten notwendig werden.

Bei der Betrachtung des Fahrweges darf keine Trennung zwischen Ober- und Unterbau vorgenommen werden. Vielmehr ist durch die Konstruktion und die Ausführung des Ober- und Unterbaus sicher zu stellen, dass die planmäßige Lebensdauer von 60 Jahren (*AKFF [1]*) erreicht wird.

Aus Erfahrungen von bestehenden schienengebundenen Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Schotteroberbau ist bekannt, dass dem Unterbau in diesem Zusammenhang eine wichtige Funktion zukommt. Insbesondere bestimmt die Qualität des Unterbaus die Häufigkeit von Instandsetzungsarbeiten des Oberbaus.

An die Erdbauwerke einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn wird die Anforderung gestellt, durch die Schaffung einer hohen Qualität die Langlebigkeit des Oberbaus nicht nachteilig zu beeinträchtigen.

2.3 Das Baugrundmodell

2.3.1 Allgemeines

Zur Erfassung der Eigenschaften des Baugrundes und der potenziellen Erdbaustoffe muss ein Baugrundmodell aufgebaut werden, das die Grundlage für die erdbautechnische Fachplanung darstellt. Unter Beachtung der Erkenntnisse aus dem Modell und den vorgenannten Anforderungen kann eine Erdbautechnik gewählt und rechnerisch oder versuchstechnisch auf ihre Funktionsweise hin überprüft werden.

Bei der Entwicklung des Modells sind zur Sicherstellung einer wirtschaftlichen Bauweise und der Erfüllung der Anforderungen an die Erdbauwerke folgende Aspekte zu beachten:

- Durch eine zutreffende Beschreibung des Baugrundes können sichere und wirtschaftliche Gründungsmaßnahmen geplant werden.
- Durch eine zutreffende Beschreibung der beim Erd- oder Tunnelbau anfallenden Baustoffe kann das wirtschaftliche Potenzial der Massen genutzt werden.

2.3.2 Beschreibung des Baugrundes

Das Baugrundmodell muss zur Planung sicherer und wirtschaftlicher Gründungen den Baugrund zutreffend beschreiben. Auf Grundlage des Modells können die Gründungsmaßnahmen rechnerisch auf ihre Funktionssicherheit geprüft werden. Durch die Kombination einer Groberkundung und einer Feinerkundung kann der Baugrund ausreichend genau beschrieben werden.

Die Groberkundung meint eine Recherche der Flächennutzung und ehemaliger Baugrunderkundungen sowie die Auswertung von Luftbildaufnahmen. Diese liefert erste Hinweise auf mögliche Problembereiche hinsichtlich der Tragfähigkeit und zur zyklisch-dynamischen Stabilität.

Die Feinerkundung setzt sich aus direkten punktförmigen und indirekten räumlichen Aufschlüssen zusammen. Boden- und felsmechanisch weitgehend gesicherte Erkenntnisse liefern nur direkte Aufschlüsse. Es sind daher Rasteruntersuchungen mit einer Verdichtung der Aufschlüsse in kritischen Bereichen notwendig. Sofern dies technisch möglich ist, erfolgt durch eine geophysikalische Messung eine indirekte räumliche Erkundung der Baugrundsichtung zwischen den Aufschlusspunkten. Für die direkten punktuellen Aufschlüsse ergibt sich folgendes Untersuchungsprogramm:

- Es werden Rasterbohrungen nach DIN 4021 mit einem Regelabstand von 50 m (*HILLIG [11], AKFF [1]*) bei einer Aufschlusstiefe nach DIN 4020 für Dammbauwerke von 0,8 bis 1,2 x Dammhöhe und für Einschnitte von 0,4 x Einschnittshöhe durchgeführt. Als Mindesttiefe ist bei Dammbauwerken nach DIN 4020 6 m unter Gründungssohle einzuhalten. Die erforderliche Mindesttiefe für Einschnitte ergibt sich aus der Notwendigkeit der Erfassung der zyklisch-dynamisch relevanten Bereiche und sollte demzufolge 3 m unter Schienenoberkante nicht unterschreiten.
- Sofern die Untersuchung kritische Bereiche aufgezeigt hat, sind neben der Untersuchung der Störstelle selbst Zusatzuntersuchungen zur Eingrenzung dieser Bereiche notwendig. Hierzu bieten sich Kleinbohrungen nach DIN 4021 und Sondierungen nach DIN 4094 an. Unter kritischen Bereichen werden solche Baugrundabschnitte verstanden, die möglicherweise aus Sicht der Anforderungen als problematisch einzustufen sind. Ganz allgemein handelt es sich um Böden mit hoher Zusammendrückbarkeit oder zyklisch-dynamisch instabile Böden. Eine Zuordnung einer Bodenschichtung in diese Kategorie ist der Tabelle 2.1 zu entnehmen. Hohe Grundwasserstände sind kritisch, da die Wassersättigung den Prozess des plastischen Fließens verstärken kann. Die in der Tabelle 2.1 aufgeführten Kenngrößen für die zyklisch-dynamische Stabilität stellen Erfahrungswerte dar, die in einem zwischenzeitlich zurück genommenen Entwurf zu einem Regelwerk der Deutschen Bahn AG enthalten sind (*MO 836.0401 [20]*).

Kenngröße	Bedeutung
Feinkörnige Böden	Zusammendrückbarkeit
Breiige oder weiche Konsistenz	zyklisch-dynamische Stabilität
Lockere oder mitteldichte Lagerung	zyklisch-dynamische Stabilität
GW-Stand bis 3,0 m unter SO	zyklisch-dynamische Stabilität

Tab. 2.1: Erfahrungswerte für kritische Bereiche bei der Baugrundbeschreibung

In Tabelle 2.2 ist der Mindestumfang der bodenmechanischen Untersuchungen zur Erfassung der bautechnischen Eigenschaften des Baugrundes zusammengestellt. Die bezogene Lagerungsdichte und die Konsistenz sind aufgrund empirischer Erkenntnisse als maßgebliche Größe im Zusammenhang mit der zyklisch-dynamischen Stabilität anzusehen (vgl. auch Tabelle 2.1). Der Steifemodul und der Konsolidierungsbeiwert aus dem Kompressionsversuch dienen der Abschätzung der Größe der Setzungen und des Zeitsetzungsverhaltens.

Nach derzeitigem Kenntnisstand wird davon ausgegangen, dass bei der Gründung des Fahrweges auf felsigem Untergrund keine zyklisch-dynamischen Stabilitätsprobleme zu erwarten sind. Die Untersuchungen nach Tabelle 2.3 beschränken sich somit auf die übliche Beschreibung der bautechnischen Eigenschaften von Fels. Die Witterungsbeständigkeit des anstehenden Felses ist von großer Bedeutung für die Verwendung des Materials als Dammbaustoff. Mögliche Verwitterungen führen zu unplanmäßigen plastischen Verformungen, die aus der Sicht der hohen Anforderungen an die Verformungen des Fahrweges kritisch sind, und erhöhen die Frostempfindlichkeit des Erdbauwerkes.

Zeile	Versuchsart	Prüfnorm	Kenngröße	Bedeutung
1	Korngrößenverteilung	DIN 18 123	Bodenklassifikation nach DIN 18 196	Grundsätzliche Beurteilung der Böden als Baugrund und Erdbaustoff
2	Plastizitätsgrenzen	DIN 18 122	Bodenklassifikation nach DIN 18 196	Grundsätzliche Beurteilung der Böden als Baugrund und Erdbaustoff
3	Dreiaxialer Druckversuch	DIN 18 137	Scherparameter	Grundlagen der statischen Standsicherheitsnachweise
4	Dichte, Korndichte, Grenzen der Lagerungsdichte	DIN 18 124 DIN 18 125 DIN 18 126	Bezogene Lagerungsdichte	Zyklisch-dynamische Stabilität von gewachsenen, grobkörnigen Böden
5	Wassergehalt	DIN 18 121	Konsistenz (in Verbindung mit den Plastizitätsgrenzen nach Zeile 2)	Zyklisch-dynamische Stabilität von gewachsenen, bindigen Böden
6	Kompressionsversuch	DIN 18 135 Entwurf Juni 1999	Steifemodul, Konsolidierungsbeiwert	Verformungsverhalten

Tab. 2.2: Mindestumfang der bodenmechanischen Untersuchungen

Zeile	Versuchsart	Norm	Kenngröße	Bedeutung
1	Beschreibung des Felses	DIN 4022	Art des Felses, Trennflächen	Grundsätzliche Beurteilung des Felses
2	Verwitterung	nach FGSV	Verwitterungsgrad	Grundsätzliche Beurteilung des Felses
3	Witterungsbeständigkeit	DIN 52 106	Zerfallszahl	Verwendbarkeit von Gesteinen als Dammbaustoff
4	Einaxialer oder dreiaxialer Druckversuch	nach DGEG Nr. 1, 2 des AK 19	Scherparameter (Dreiaxialversuch), Elastizitätsmodul	Felsmechanische Berechnung

Tab. 2.3: Mindestumfang der felsmechanischen Untersuchungen

2.3.3 Beschreibung der anfallenden Erdmassen als Baustoffe

Die anfallenden Erdmassen sind hinsichtlich ihrer Material-Kennwerte zu erfassen. Mit Hilfe der Kennwerte des Aushubbodens (z.B. Reibungswinkel, Kohäsion) kann im Zuge der Fachplanung die Funktionssicherheit der gewählten Erdbaukonstruktionen rechnerisch überprüft werden. Bei Tunnelausbruchmassen und / oder anderen durch den Lösevorgang relevant veränderte Böden sind die Material-Kennwerte der veränderten Massen zu ermitteln.

Die DIN 18 196 bestimmt Bodengruppen nach bautechnischen Eigenschaften. Diese verschiedenen Bodengruppen können für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn aus erdbautechnischer Sicht weiter zusammengefasst werden. Erdbautechnische Bodengruppen (EBG) sind demzufolge Bodenarten mit annähernd gleichem stofflichen Aufbau und ähnlichen Eigenschaften unter Berücksichtigung der Anforderungen an den Erdbau für eine Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn.

Folgende erdbautechnische Bodengruppen werden definiert:

- Baustoffe mit Frostschutzqualität (EBG 1)
Bodengruppen GW, GI, GE, SW, SI nach DIN 18 196
- Zyklisch-dynamisch stabile Baustoffe (EBG 2)
Bodengruppen SE, GU, GT, SU, ST nach DIN 18 196
- Baustoffe für Erddämme außerhalb der Einwirkung zyklisch-dynamischer Lasten (EBG 3)
Bodengruppen G \bar{U} , G \bar{T} , S \bar{U} , S \bar{T} , UL, UM, TL nach DIN 18 196

- Sonstige Böden (EBG 4)
Bodengruppen UA, TM, TA, OU, OT, OH, OK, HN, HZ, F, A
nach DIN 18 196

Diesen erdbautechnischen Bodengruppen werden zur Vereinfachung der erdbautechnischen Fachplanung charakteristische Material-Kennwerte zugeordnet. Hierauf wird im Abschnitt 2.4 „Erdbautechnische Fachplanung“ vertiefend eingegangen.

2.3.4 Beispiel eines Baugrundmodells

Bild 2.4 zeigt schematisch ein Beispiel eines Baugrundmodells. Als Ergebnis eines solchen Modells werden der Baugrund und die Erdbaustoffe im Grundriss und im Querschnitt dargestellt und alle Informationen eingetragen.

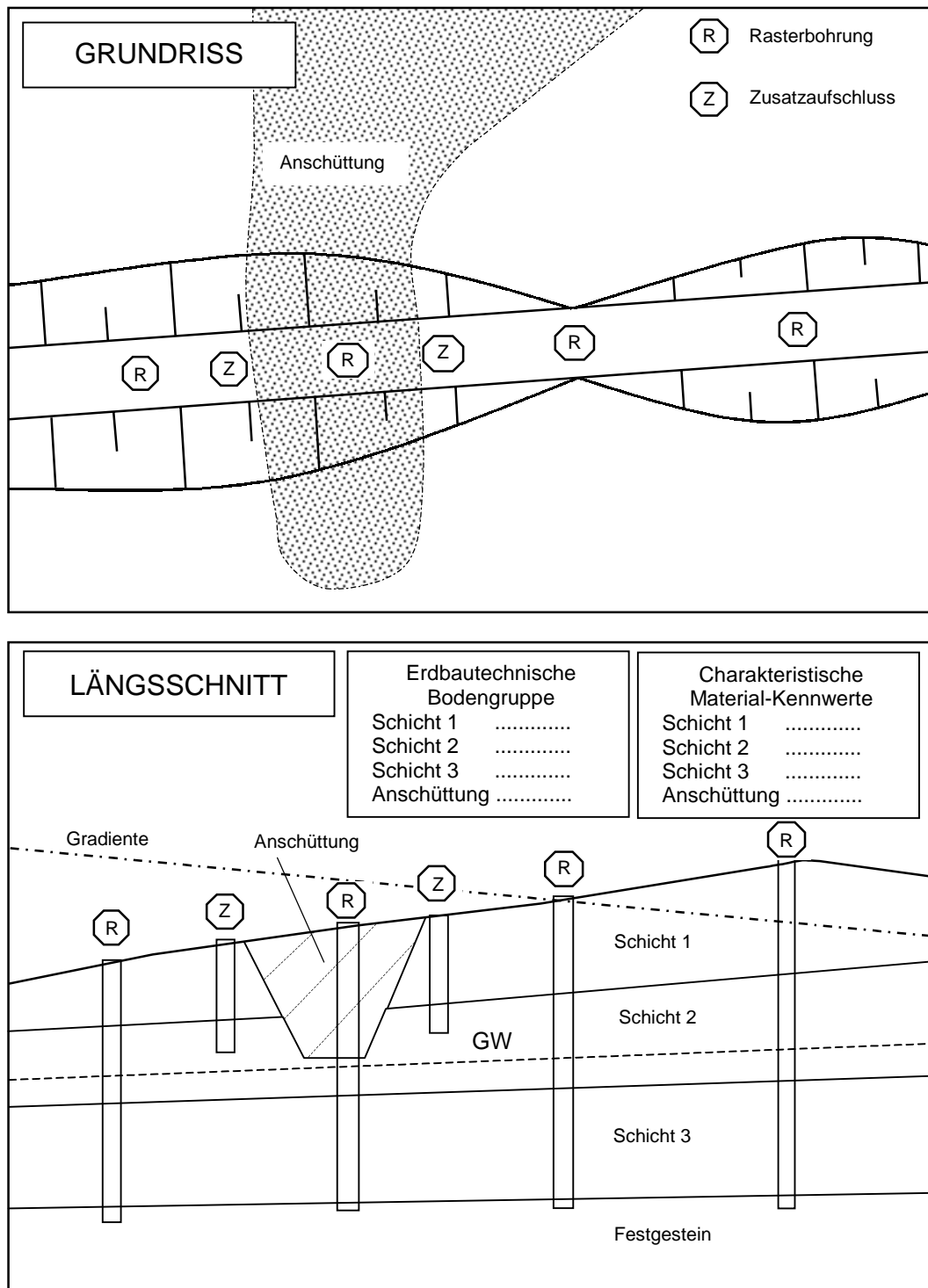


Bild 2.4: Das Baugrundmodell (schematisches Beispiel)

2.4 Erdbautechnische Fachplanung

2.4.1 Allgemeines

Durch die erdbautechnische Fachplanung wird die vorgesehene Erdbautechnik rechnerisch oder versuchstechnisch auf ihre Funktionsweise hin überprüft. Grundlage hierfür sind neben dem Baugrundmodell nach Bild 2.4 die anerkannten Regeln der Technik. Hierunter fallen sämtliche Vorschriften und Bestimmungen, die sich in der Theorie als richtig erwiesen und in der Praxis bewährt haben. Die Erdbautechnik für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn ist einer kontinuierlichen Weiterentwicklung unterworfen. Es obliegt dem jeweiligen Ingenieur, den aktuellen Stand der anerkannten Regeln der Technik in die Fachplanung zu integrieren.

In dem zwischenzeitlich zurück genommenen Entwurf zur Richtlinie *MO 836.0401 [20]* der Deutschen Bahn AG sind verschiedene Nachweise enthalten. Diese berücksichtigen den Kenntnisstand bis 1997 und wurden teilweise aufgrund von Analogieschlüssen formuliert oder beruhen auf Modellversuchen. Daher sind die Nachweise unter Berücksichtigung der hohen Anforderungen an den Unterbau der freien Strecke hinsichtlich der Aussagegenauigkeit kritisch zu bewerten. In den folgenden Ausführungen werden daher die anerkannten Regeln der Technik als Grundlage der erdbautechnischen Fachplanung herangezogen. Dort wo keine gesicherten Erfahrungen vorliegen, werden versuchstechnische Möglichkeiten zur Überprüfung der Funktionssicherheit der gewählten Konstruktion aufgezeigt.

In den Regelwerken der Deutschen Bahn AG und in der Vielzahl von Veröffentlichungen zum Erdbau für schienengebundene Fahr-

Fahrwege hat sich das Verständnis durchgesetzt, Erdkörper für solche Fahrwege als Ingenieurbauwerk zu verstehen. Dies beinhaltet die Schaffung eines fachgerechten und ingenieurtechnisch überwachten Bauwerkes. Unter fachgerecht ist hierbei ein geschichteter Erdkörper, dessen Aufbau sich an definierten Anforderungen orientiert, zu verstehen. Zur Erfüllung dieser Anforderungen sind, wie bereits erläutert, planerische, versuchstechnische sowie weitere konzeptionelle Maßnahmen während der Bauausführung notwendig. Die planerischen und versuchstechnischen Maßnahmen sind Bestandteil dieses Abschnittes, während auf die weiteren konzeptionellen Schritte im dritten Abschnitt dieser Arbeit eingegangen wird. Die ingenieurtechnische Überwachung meint die Kontrolle des Bauwerkes während der Nutzungsphase, die nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.

Bild 2.5 zeigt einen solchen geschichteten Erdkörper als erdbautechnischen Regelaufbau für das Oberbausystem Feste Fahrbahn der freien Strecke. Hierbei wurde entgegen den vorgenannten Regelwerken, insbesondere dem *AKFF [1]* und den Publikationen die einzelnen Schichten nicht als Bodengruppe nach DIN 18196 sondern entsprechend der wesentlichen Funktion bezeichnet.

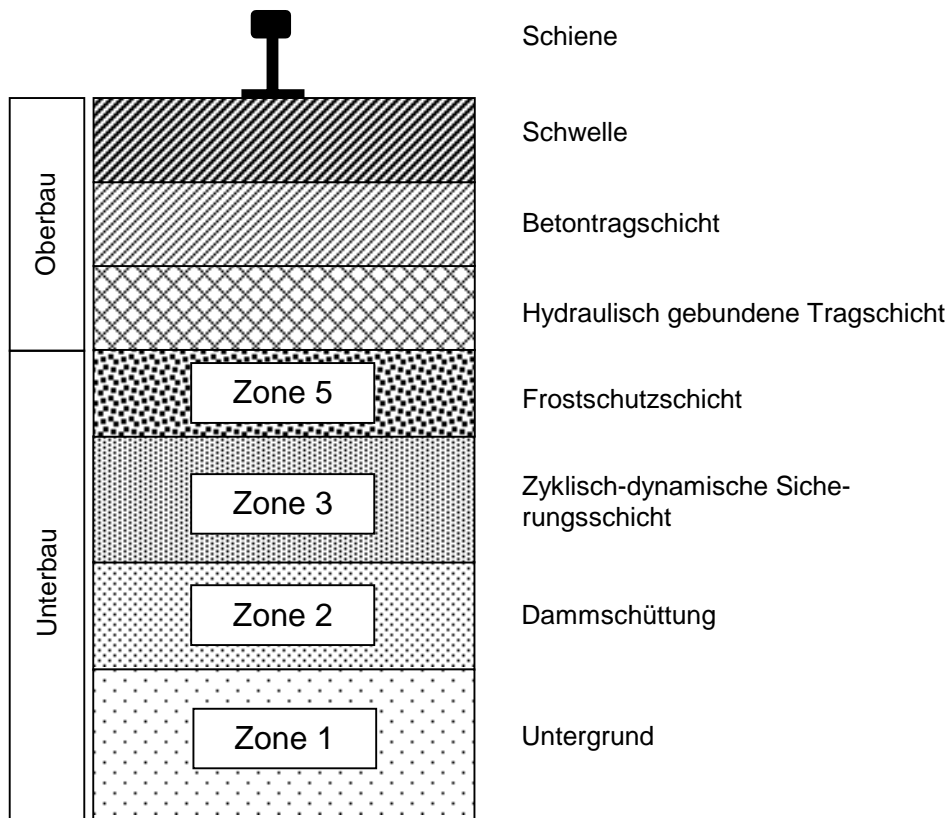


Bild 2.5: Erdbautechnischer Regelquerschnitt für die freie Strecke (schematisch)

Die Frostschutzschicht (Zone 5) besteht aus frostsicherem Material und hat wie die zyklisch-dynamische Sicherungsschicht (Zone 3) die Aufgabe der Sicherstellung einer zyklisch-dynamischen Stabilität und eines ausreichenden Widerstandes gegen Verformungen aus Verkehrsbelastung. Die Funktionstrennung zwischen diesen beiden Schichtungen besteht in der Aufgabe der Vermeidung von Frostschäden im Oberbau. Durch dieses zweistufige Tragsystem mit abnehmender dynamischer Steifigkeit wird die Lebensdauer des Oberbaus günstig beeinflusst. Die Höhe der zyk-

lisch-dynamischen Sicherungsschicht richtet sich nach der maßgeblichen Einwirkungstiefe der Verkehrslast.

Die Dammschüttung (Zone 2) wird aus verwitterungsbeständigem Material so hergestellt, dass keine unzulässigen Eigenverformungen auftreten. Die Höhe der Dammschüttung ist so vorzusehen, dass die geplante Sollhöhe der Oberkante Frostschutzschicht erreicht wird. Hierzu ist die Abmessung der zyklisch-dynamischen Sicherungsschicht und der Frostschutzschicht abzuziehen.

Unterhalb der Dammschüttung folgt der Untergrund (Zone 1), der eine sichere Gründung der Erdbauwerke gewährleisten muss. Hierzu gehören auch die entsprechenden Gründungsmaßnahmen.

Dem Unterbau der freien Strecke kommt die Aufgabe der Sicherstellung der äußeren Standsicherheit und der inneren Stabilität zu. Die Zonengrenzen sind so aufeinander abzustimmen, dass die Grenzflächenstabilität gewährleistet wird.

Für die Übergangsbereiche auf Brückenbauwerke ist eine gesonderte Betrachtung der Zonen erforderlich, da hier spezielle Aufgaben zu erfüllen sind. Bild 2.6 zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Zonenpaketes.

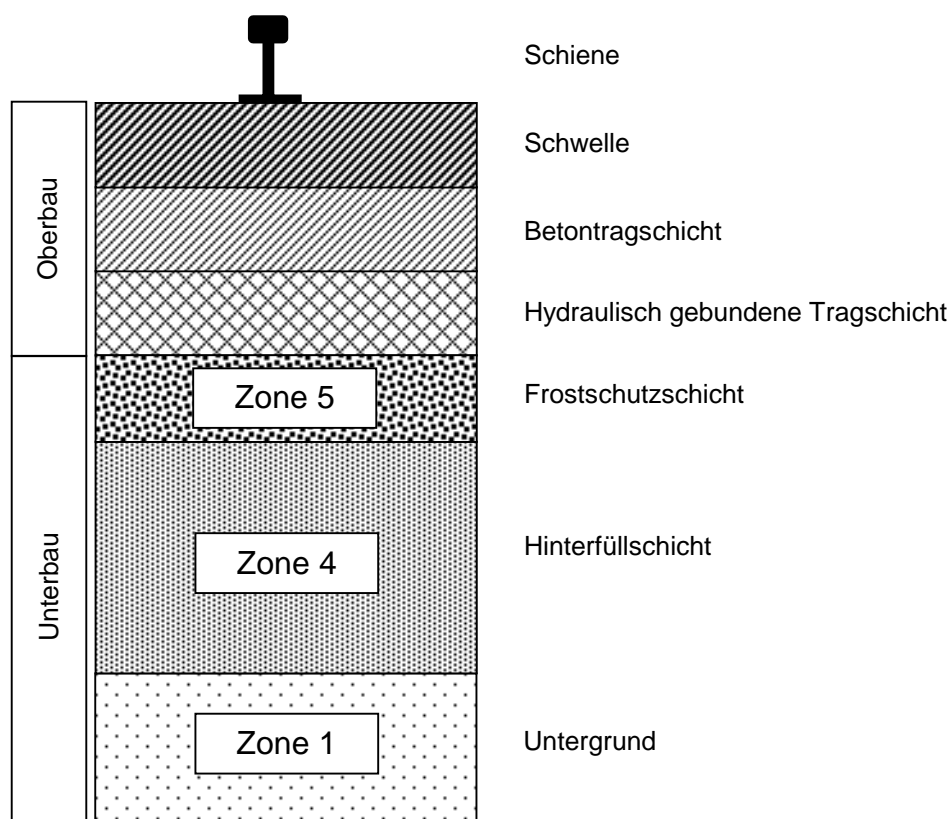


Bild 2.6: Erdbautechnischer Regelquerschnitt für Übergangsbereiche auf Brückenbauwerken entsprechend dem AKFF [1] (schematisch)

Dieser Querschnitt unterscheidet sich von dem vorgenannten darin, dass die zyklisch-dynamische Sicherungsschicht und die Dammschüttung durch eine Hinterfüllschicht (Zone 4) ersetzt wird.

Hintergrund ist die Schaffung einer Bodenzone zur Vermeidung einer fahrdynamisch unverträglichen Setzungsmulde, die aus der Setzungsdifferenz zwischen Erdkörper und Bauwerk entstehen kann. Des Weiteren ist aus Schadensfällen bei Oberbausystemen mit Schotter bekannt, dass ein Sprung der dynamischen Steifigkeit im Unterbau zu Schäden im Oberbau führen können.

Die Hinterfüllschicht muss somit die Aufgaben der zyklisch-dynamischen Sicherungsschicht übernehmen und zugleich eine in Richtung Brückenbauwerk möglichst kontinuierliche Zunahme der dynamischen Steifigkeit bei gleichzeitiger Verformungsarmut gewährleisten.

Die vorgenannten Zonenkonstruktionen nach Bild 2.5 und Bild 2.6 finden sich grundsätzlich auch im AKFF [1] wieder. Hier werden den einzelnen Zonen Bodengruppen nach DIN 18 196 zugewiesen.

Die Zuordnung einzelner Bodenklassen zu den erdbautechnischen Zonen stellt ein Regulator dar, das möglicherweise zu einer unwirtschaftlichen Lösung führt. Es sollte in diesem Zusammenhang dem wirtschaftlichen Grundsatz der Abstimmung der Erdbautechnik auf die anfallenden Erdbaustoffe Rechnung getragen werden.

Bild 2.7 bis 2.9 zeigt den Zonenaufbau nach dem AKFF [1] für Dammbauwerke, Einschnitte und den Übergangsbereich auf Brückenbauwerke.

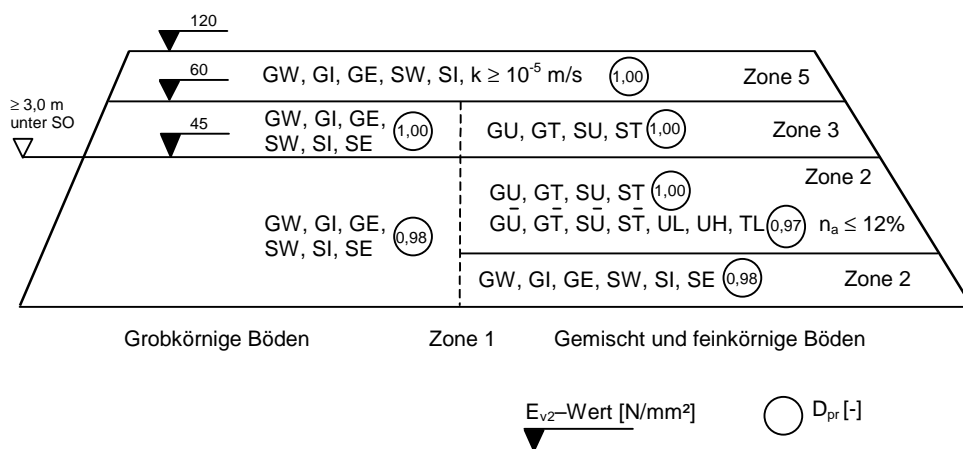


Bild 2.7: Anforderungen an die Erdbautechnik für Dammbauwerke nach AKFF [1] (schematisch)

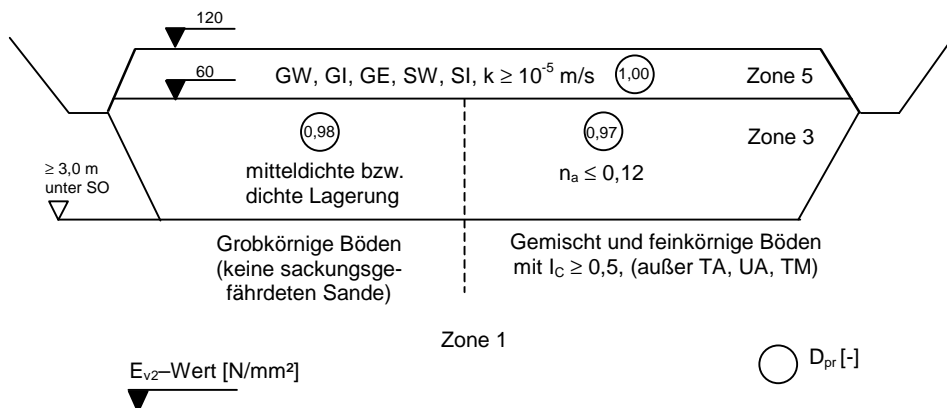


Bild 2.8: Anforderungen an die Erdbautechnik für Einschnitte nach AKFF [1] (schematisch)

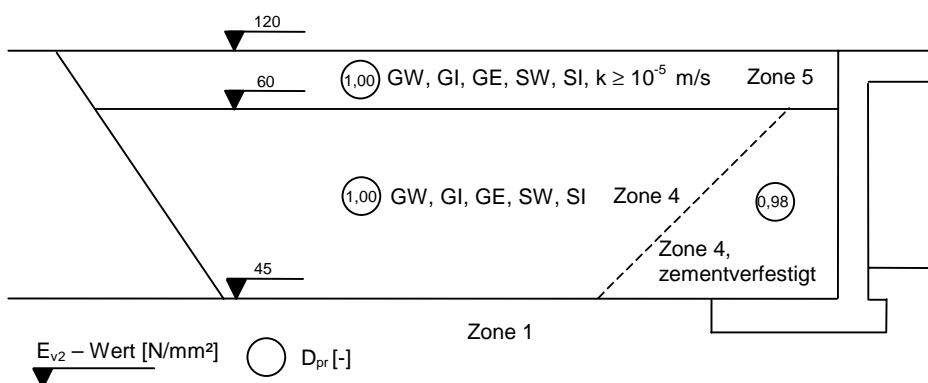


Bild 2.9: Anforderungen an die Erdbautechnik für Übergangsbereiche auf Brückenbauwerke nach AKFF [1], (schematisch)

Zur rechnerischen Prüfung der vorgesehenen Erdbautechnik ist eine überschlägliche Massenbilanz zwischen den anfallenden Bodenmassen, definiert als erdbautechnische Bodengruppen nach Abschnitt 2.3.3 und den benötigten Schüttmassen, bestimmt durch die Zonen nach den Bildern 2.5 und 2.6 erforderlich. Durch Zuordnung der erdbautechnischen Bodengruppen zu den Zonen ergeben sich die der Fachplanung zugrunde zu legenden charakteristischen Material-Kennwerte. Diese Kennwerte sind dem Baugrundgutachten zu entnehmen (vgl. Abschnitt 2.3.3 „Beschreibung der

anfallenden Erdmassen als Baustoffe“). Sofern die Massenbilanzierung Fehlmassen bei den benötigten Schüttgütern aufzeigt, sind die bodenmechanischen Kennwerte für die notwendigen Bodenconditionierungsmaßnahmen oder die Fremdmassen zu bestimmen. Im Zuge der Fachplanung sollte man dann solche Material-Kennwerte festlegen, die unabhängig von der Herkunft der Massen oder Bodenconditionierungsmaßnahmen gültig sind. Hierdurch können spätere Umplanungen vermieden werden. Auf diese Zusammenhänge wird im Abschnitt 3.2.2 „Planung der Massenlogistik“ und Abschnitt 4 „Prozessablauf bei der Umsetzung des Konzeptes“ näher eingegangen.

Die erdbautechnische Fachplanung kann wie folgt gegliedert werden:

- Bemessung der Erdbauwerke und Gründungen
- Sicherung der zyklisch-dynamischen Stabilität
- Nachweis der Grenzflächenstabilität
- Übergangsbereiche auf Ingenieurbauwerke

Da die Planung auf den anerkannten Regeln der Technik beruht, wird in den folgenden Ausführungen auf die Besonderheiten der Fachplanung des Erdbaus für eine Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn eingegangen.

2.4.2 Bemessung der Erdbauwerke

Die Bemessung besteht aus den nachstehend aufgeführten Bestandteilen:

- Standsicherheit im Bauzustand
- Standsicherheit im konsolidierten Zustand
- Standsicherheit unter Betrieb

- Verformungsnachweise

Die Aufgabe der Bemessung ist die rechnerische Prüfung des statischen Systemverhaltens und der Systemverformungen. Die hierzu verwendeten Bemessungsnachweise beruhen auf theoretischen Modellen, die einer ständigen Weiterentwicklung unterworfen sind. Auch wenn neuere Modelle nicht die erforderliche Genauigkeit liefern können, so beschreiben sie möglicherweise das tatsächliche Systemverhalten besser und sind daher im Sinne einer wirtschaftlichen Optimierung begrüßenswert.

Die **Stand sicherheitsnachweise** führen den Nachweis der Sicherheit gegen einen definierten Grenzzustand. Sofern erforderlich, sind statische Nachweise für Bauzustände zu erbringen. Dies ist in der Regel nicht notwendig, da Bauzustände im Erdbau in den meisten Fällen nicht den maßgeblichen Lastfall darstellen.

Folgende Versagensmöglichkeiten sind u.a. nach der *RIL 836 [25]* zu beachten:

- Grundbruch
- Geländebruch bzw. Böschungsbruch
- Spreizbruch
- Gleiten

Es sind die statischen Stand sicherheitsnachweise unter Berücksichtigung des Lastbildes UIC 71 nach der *DS 804 [4]* zu führen. Nach *GAFF [8]* darf das Lastbild UIC 71 auf 80 % reduziert werden. Hintergrund sind die leichteren Hochgeschwindigkeitszüge, bei denen alle Achsen angetrieben werden. Zugleich ist dieses Lastbild um 30 % zur Berücksichtigung der gesteigerten Boden-

spannungen infolge der dynamischen Belastung aus dem Hochgeschwindigkeitszug zu erhöhen (*HILLIG [12], MO 836.0401 [20]*). Dies führt nahezu wieder auf das Lastbild UIC 71.

Die erforderlichen Verformungsnachweise sind für die nachstehenden Ursachen zu führen:

- Verformungen des Untergrundes
- Verformungen des Erdkörpers
- Verformungen aus Verkehrsbelastungen

Hinsichtlich der **Verformungen des Untergrundes** gilt es zu beachten, dass Neubaustrecken erhebliche Längen (100 km und mehr) bei häufig stark wechselnden Eigenschaften des Untergrundes aufweisen können. Es sind sehr umfangreiche bodenmechanische Untersuchungen zur Ermittlung des Verformungsverhaltens des Bodens notwendig, die kosten- und vor allem zeitintensiv sind (z.B. Kompressionsversuch 7 bis 20 Tage, *VON SOOS [38]*).

Die Verformungsberechnungen erfolgen i.d.R. mit einem linearen Steifemodul aus Kompressionsversuchen. Hierdurch bedingen sich die nachstehend erläuterten Aspekte, die bei der Bewertung der Ergebnisse einer Verformungsberechnung beachtet werden müssen:

- Bei der Verwendung des vorgenannten Steifemoduls aus dem Kompressionsversuch wird vereinfacht davon ausgegangen, dass innerhalb eines gewissen Bereiches unter der Lastmitte schubspannungsfreie Verhältnisse vorliegen und in den bautechnisch relevanten Spannungsbereichen die Drucksetzungslinie durch eine Sehne ersetzt werden kann.

- Alle bodenmechanischen Parameter unterliegen einer natürlichen und versuchstechnisch bedingten Streuung. Der Steifemodul aus dem Kompressionsversuch weist beispielsweise einen Variationskoeffizienten von 25 % – 49 % (*VON SOOS [38]*) auf.

Die Genauigkeit der Verformungsberechnung hängt aber nicht nur von den bodenmechanischen Kennwerten, sondern auch von dem verwendeten Berechnungsmodell ab. Kalibrierungsberechnungen anhand von Messergebnissen sind nach *NEIDHARD UND AST [23]* aufgrund des erforderlichen Aufwandes nicht sinnvoll.

Aus obigen Randbedingungen folgt insbesondere unter Beachtung der zulässigen geometrischen Verformungen des Unterbaus der freien Strecke für die Auswertung der gewonnenen Berechnungswerte, dass diese nur als Abschätzung des tatsächlichen Verformungsverhaltens zu interpretieren sind. Die Konstruktion der Erdbauwerke erfolgt auf Grundlage der Abschätzung des Verformungsverhaltens, möglichst unter optionaler Berücksichtigung von Maßnahmen im Falle unerwarteter Verformungen. Da sich die Setzungen erst nach Lastaufbringung einstellen, ist dies eine sehr theoretische Überlegung, die aufgrund der geringen Umsetzbarkeit kaum realisiert werden kann. Grundsätzlich sind Maßnahmen zur Überhöhung der Bauwerke geeignet.

Aufgrund der strengen geometrischen Anforderungen ist die Durchführung von Verformungsmessungen zwingend erforderlich. Auf eine entsprechende, zielgerichtete Umsetzung wird später eingehend eingegangen.

Die **Eigenverformungen des Erdkörpers** können bei konstanter Steifeziffer nach *MO 836.0402 [21]* wie folgt abgeschätzt werden:

$$s_e = \frac{\gamma \cdot h^2}{2 \cdot E_{\text{stat}}}$$

Dabei sind:

γ → Wichte des feuchten Bodens

h → Höhe der Erdkörpers

E_{stat} → Statischer Steifemodul aus dem Kompressionsversuch

Die Eigenverformungen der Erdkörper sind gering und erfahrungsgemäß nach wenigen Monaten abgeklungen und werden daher bei der weiteren Betrachtung in der Regel nicht berücksichtigt.

Zur Fragestellung des Verhaltens von Böden unter zyklisch-dynamischer Belastung liegen verschiedene Publikationen vor. Hiernach werden die plastischen **Verformungen infolge von Verkehrsbelastungen** von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst.

In der Praxis hat sich das Verständnis durchgesetzt, dass bei Einhaltung der Anforderungen nach dem *AKFF [1]* (vgl. Bild 2.7 bis 2.9) die Setzungen aus Verkehrsbelastungen nicht den zulässigen Wert von 5 mm überschreiten werden. Dies wird somit als gesicherte Erkenntnis betrachtet. Für den planenden Ingenieur stellt sich die Frage der Abschätzung des Verformungsverhaltens unter Verkehrslast also nur dann, wenn von den Forderungen des *AKFF [1]* abgewichen wird.

Über das Langzeitverhalten von Böden unter zyklisch-dynamischer Einwirkung bei Hochgeschwindigkeitsverkehr in Verbindung mit dem Oberbausystem Feste Fahrbahn liegen keine gesicherten Erkenntnisse oder Erfahrungswerte vor. Der Nachweis für nicht wassergesättigte und wassergesättigte, nicht bindige Böden kann nach Bild 2.10 geführt werden. Diese Nachweisform basiert auf Modellversuchen der Technischen Universität Karlsruhe (vgl. *RÜCKER [27]*). Bis zum Vorliegen gesicherter Erkenntnisse hinsichtlich des Langzeitverformungsverhaltens muss gegebenenfalls auf diesen Ansatz zurückgegriffen werden.

In Bild 2.10 wurde der vorgenannte Nachweis unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen einer Hochgeschwindigkeisstrecke mit Fester Fahrbahn ausgewertet. Es wird ersichtlich, dass rechnerisch ein Steifemodul von $E_{\text{dyn}} = 90 \text{ MN/m}^2$ entsprechend $E_{\text{stat}} = 30 - 45 \text{ MN/m}^2$ (vgl. *FLOSS [7]*) ausreicht, um die geometrische Anforderung von maximal 5 mm Setzung aus Verkehrsbelastung zu gewährleisten.

Die Praxis zeigt, dass i.d.R. erdfeuchte, gewachsene sowie geschüttete und verdichtete Böden einen größeren statischen Steifemodul als $E_{\text{stat}} = 30 - 45 \text{ MN/m}^2$ aufweisen. Insoweit zeigt die in Bild 2.10 enthaltene Auswertung der Ergebnisse der o.g. Modellversuche, dass der zulässige Verformungsgrenzwert für zyklisch-dynamische Einwirkungen nach *AKFF [1]* für die Konstruktion der Erdbauwerke kaum Bedeutung hat.

- $s_v = s_1 \cdot (1 + c_N \cdot \ln N) \leq 5 \text{ mm}^1)$
 - $s_1 = \frac{\sigma_{\text{stat}} \cdot \kappa \cdot k_{\text{dyn}}}{E_{\text{dyn}}} \cdot b_{\text{HGT}} \cdot f$ → Verformung nach der ersten Zugüberfahrt
 - $(1 + c_N \cdot \ln N)$ → Kriechanteil infolge zyklischer Beanspruchung ²⁾
 - $\sigma_{\text{stat}} = 43,65 \text{ kN/m}^2$ → Radsatzlasten P bezogen auf eine Breite der HGT von 3,58 m ³⁾
 - $\kappa = 0,80$ → Abminderung für Radsatzlasten eines Hochgeschwindigkeitszuges ⁴⁾
 - $k_{\text{dyn}} = 1,30$ → Lasterhöhungsfaktor zur Berücksichtigung dynamischer Lasten ⁵⁾
 - E_{dyn} → Dynamischer Steifemodul
 - $b_{\text{HGT}} = 3,58$ → Breite der HGT
 - $f = 0,50$ → Setzungsbeiwert nach DIN 4017
 $a_P / b_{\text{HGT}} = 1,79$ mit $a_P = 6,40 \text{ m}$ ⁶⁾
 $z / b_{\text{HGT}} = 0,84$ mit $z = 3,00 \text{ m}$ ⁷⁾
 - $c_N \cong 0,0225 \sqrt{\kappa \cdot P} = 0,32$ → Zyklischer Faktor ⁸⁾
 - $N = 10^6$ → Anzahl der Zugübergänge ⁹⁾

$$\Rightarrow s_v = s_1 \cdot (1 + 0,32 \cdot \ln 10^6) \leq 5 \text{ mm}^1)$$

daraus folgt: $s_1 \approx 1 \text{ mm}$

- $E_{\text{dyn}} = \frac{\sigma_{\text{stat}} \cdot \kappa \cdot k_{\text{dyn}}}{s_1} \cdot b \cdot f = \frac{43,65 \cdot 0,80 \cdot 1,30}{1 \cdot 10^{-3}} \cdot 3,58 \cdot 0,50 \approx 90 \text{ MN/m}^2$
- Erläuterungen
 - 1) zulässiger Grenzwert gem. AKFF [1]
 - 2) vgl. MO 836.0402 [22]
 - 3) erforderliche Breite der HGT gem. Berechnungsverfahren EISENMANN UND MATTNER [6], Radsatzlast P gem. DS 804 [4]
 - 4) vgl. statischer Abminderungsfaktor gem. GAFF [8]
 - 5) vgl. HILLIG [11], MO 836.0401 [21]
 - 6) a_P gem. Lastannahmen der DS 804 [4] für das Lastbild UIC 71
 - 7) z entspricht der zyklisch-dynamisch relevanten Tiefe gem. AKFF [1]
 - 8) vgl. KEMPFERT UND VOGEL [17], MO 836.0402 [22]
 - 9) Größtwert für hochbelastete Strecken, vgl. MO 836.0401 [21]

Bild 2.10: Auswertung des plastischen Verformungsnachweis für Verkehrslasten bei nicht wassergesättigten und wassergesättigten, nicht bindigen Böden für Erdbauwerke von Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn

Das Stoffverhalten von bindigen, wassergesättigten Böden unter Verkehrslast ist weitaus diffiziler. In der folgenden Betrachtung soll das Verformungsverhalten solcher Böden unter Verkehrseinwirkung erläutert werden.

KEMPFERT UND HU [16] stellen fest, dass das mechanische Verhalten von bindigen, wassergesättigten Böden unter zyklischer Belastung abhängig von einer Vielzahl von Faktoren ist. Ein allgemein gültiges, abgesichertes Stoffgesetz liegt bisher nicht vor. Die Modellvorstellung von *KEMPFERT UND HU [16]* geht davon aus, dass unter zyklischer Belastung sich bei kontraktanten, wassergesättigten bindigen Böden zunächst ein Porenwasserüberdruck mit plastischen, undrained Scherverformungen aufbaut. Dies erfolgt bis zu einem Grenzwert, ab dem der Porenwasserüberdruck wieder abnimmt und sich drained plastische Verformungen einstellen. Dieses Stoffverhalten wird neben der Einwirkung maßgeblich durch die Durchlässigkeit und die Rekompensation bestimmt. Als weiterer Einfluss ist der Abstand zum Entwässerungsrand zu sehen. Die effektiven Spannungen sind nicht konstant über den Querschnitt, mit der Folge, dass es bei entsprechend hohen zyklischen Einwirkungen zu einem lokalen Scherbruch kommen kann. Dieser wird dann durch Lastumlagerung überbrückt, so dass ein Versagen des Gesamtsystems nicht zwangsweise eintreten muss.

Zur Erfassung dieses komplexen Stoffverhaltens kann ein Modell mit der FE-Methode aufgebaut werden (vgl. *KEMPFERT UND HU [16]*). Inwieweit ein solches Modell verlässliche Zahlenwerte liefert, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden. Hierzu sind umfangreiche Messreihen und Auswertungen erforderlich.

Die sichere Beurteilung des Langzeitverhaltens von wassergesättigten, bindigen Böden unter zyklisch-dynamischer Belastung ist zurzeit noch nicht möglich. Es liegt ohnehin nur ein Modell für kontraktante, bindige Böden vor. Bis zum Vorliegen gesicherter Erkenntnisse sollten wassergesättigte, bindige Böden nicht im Einflussbereich hoher Eisenbahnverkehrslasten belassen werden. Dieser Grundsatz ist auch im *AKFF [1]* verankert, der die Belastung solcher Böden mindestens bis in eine Tiefe von 3,0 m unter Schienenoberkante ausschließt.

Soll aus Erwägungen der Wirtschaftlichkeit dem Grundsatz nicht gefolgt werden, so kann das langzeitige Verformungsverhalten auch versuchstechnisch überprüft werden. Es wird in diesem Zusammenhang auf die Ausführungen des folgenden Abschnittes verwiesen. Hier werden versuchstechnische Möglichkeiten zur Überprüfung des Verformungsverhaltens aufgezeigt.

2.4.3 Sicherung der zyklisch-dynamischen Stabilität

2.4.3.1 Allgemeines

Neben planmäßigen Setzungen infolge von Verkehrslasten ist die Problematik von unkontrolliert ablaufenden und unverhältnismäßig großen Verformungen zu beachten.

In der Bodenmechanik ist die Wechselwirkung zwischen zyklisch-dynamischen Beanspruchungen und plastischen Verformungen dem Grunde nach bekannt. Zyklisch angeregte Wellen können die sogenannte Bodenverflüssigung durch Abbau der Scherfestigkeit des Bodens hervorrufen. Des Weiteren kann es infolge hoher zyklisch-dynamischer Einwirkungen zu einer Kantenertrümmerung von Gesteinen kommen (vgl. Bild 2.3).

In diesem Abschnitt wird also die Frage der zyklisch-dynamischen Stabilität erörtert und gezeigt, wie diese nachgewiesen werden kann. Insoweit bezieht sich hier die Betrachtung der zyklisch-dynamischen Einwirkungen auf das mögliche Stabilitätsversagen und nicht auf die Frage der Gebrauchstauglichkeit, die im vorigen Abschnitt im Zusammenhang mit den Verformungen aus Verkehrsbelastung behandelt wurde.

Die Frequenz des Belastungszyklus spielt nach *HAUSNER [10]* bei der Betrachtung zyklischer Prozesse im Erdkörper bei grobkörnigen Böden eine untergeordnete Rolle. Bei wassergesättigten, bindigen Böden ist hingegen eine Abhängigkeit von der Frequenz zu beobachten (vgl. *KATZENBACH UND ARSLAN [15]*).

NEIDHART [22] weist bei Feldversuchen mit dem Simulationsgerät *DYSTAFIT*® nach, dass die Erregerfrequenz nie die Eigenfrequenz des Bodens erreicht und somit keine Resonanz zu erwarten ist. Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken handelt es sich somit um hochabgestimmte Systeme, d.h. die Eigenfrequenz ist höher als die Erregerfrequenz.

Die Widerstandsfähigkeit eines Bodens gegen Erschütterungen ist im Wesentlichen abhängig von der Lagerungsdichte bzw. der Konsistenz des Bodens (vgl. hierzu auch *MO 836.0401[20]*, *REHFELD [24]*, *RUMP ET AL [26]*).

RUMP ET AL [26] unterscheidet bei Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Schotteroberbau zwei mögliche Versagenszustände:

- Der erste kritische Zustand meint eine Strukturänderung mit deutlichen Verformungen, die bei fortwährender Wirkung der

Schwinggeschwindigkeit gegen unendlich gehen. Bei gesättigten und schwer durchlässigen Böden entstehen hohe Porenwasserspannungen, die auf die Reibungskräfte reduzierend wirken.

- Unter dem zweiten kritischen Zustand wird die Zerstörung des Einzelkorns des Schotterbettes verstanden, die bei fortwährender Wirkung der Schwinggeschwindigkeit eine starke Änderung der Kornform mit Kornzertrümmerung bedingen kann.

Bei dem hier zugrunde liegenden Oberbausystem Feste Fahrbahn wird auf ein Schotterbett verzichtet. Aus empirischen Erkenntnissen bei Hochgeschwindigkeitsstrecken kann davon ausgegangen werden, dass das Grobkorn der Frostschutzschicht nicht brechen wird, zumal durch die hydraulisch gebundene Tragschicht der Feste Fahrbahn ein vergleichsweise niedrigeres Spannungsniveau als beim Schotterobau vorliegt. In der weiteren Betrachtung braucht auf die Fragestellung der Kornzertrümmerung bzw. der Kantenfestigkeit nicht weiter eingegangen zu werden.

Bei der Betrachtung zyklisch-dynamischer Prozesse wird analog zum konstruktiven Ingenieurbau als maßgebende Größe die Schwinggeschwindigkeit herangezogen. Diese Schwinggeschwindigkeit ist richtungsabhängig. Aus den Schwinggeschwindigkeitskomponenten in x-, y- und z- Richtung wird die resultierende Schwinggeschwindigkeit berechnet und schließlich die wirksame (effektive) Schwinggeschwindigkeit $v_{\text{eff, res}}$ für ein laufendes Zeitfenster von 0,125 Sekunden bestimmt. Dieser Schwingkennwert wird in der Literatur und in Normen als maßgebliche Größe zur Erfassung und Beschreibung von Bodenerschütterungen herangezogen (HAUSNER [10], RUMP ET AL [26], MO 836.0401 [20], MO 836.0402 [21]). Als charakteristischer Kennwert der in den

Erdkörper eingebrachten effektiven, resultierenden Schwinggeschwindigkeit wird bei der Festen Fahrbahn mit Hochgeschwindigkeitsverkehr in *MO 836.0401 [20]* ein Wert von $v_{\text{eff,res}} = 21 \text{ mm/s}$ angegeben.

Die Reduktion der effektiven, resultierenden Schwinggeschwindigkeit über die Tiefe z kann wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{v_{\text{eff,res}}(z)}{v_{\text{eff,res}}} = d$$

Dieser Zusammenhang ergibt sich aus der Vorstellung, dass die Änderung der Schwinggeschwindigkeit durch eine Dämpfung bestimmt wird. Die Dämpfung d berücksichtigt die Abschwächung der Schwinggeschwindigkeit über die Tiefe. Hierbei wird aus praktischen Erwägungen nicht zwischen der geometrischen Dämpfung durch räumliche Ausbreitung und der Dissipation (Materialdämpfung) unterschieden.

Die Dämpfung ermittelt sich allgemein zu:

$$d = e^{-\alpha \cdot z}$$

Der Abklingkoeffizient α muss aufgrund der Unregelmäßigkeit des Übertragungsmediums versuchstechnisch bestimmt werden.

NEIDHART [22] stellt bei mehreren Großversuchen mit dem Simulationsgerät *DYSTAFIT*® fest, dass dieser Abklingkoeffizient zwischen 0,2 und 0,3 liegt. Hinsichtlich der Versuchstechnik wird auf die Ausführungen von *TRISCHLER UND PARTNER [36]* sowie

NEIDHART [22] verwiesen. Weitere Versuche im Rahmen der Realisierung der ICE-Neubaustrecke Köln-Rhein/Main zeigten den in Bild 2.11 dargestellten Verlauf des Abbaus der effektiven, resultierenden Schwinggeschwindigkeit. Der Abklingkoeffizient beträgt hier 0,35 bis 0,40.

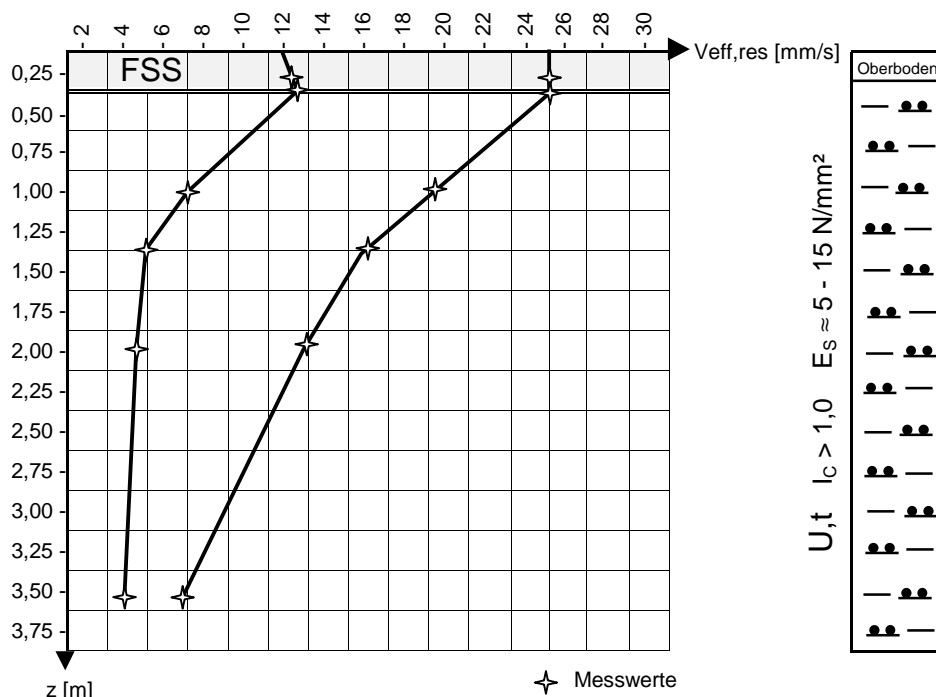


Bild 2.11: Abbau der Schwinggeschwindigkeit aus in-situ Versuchen unter Einhaltung der erdbautechnischen Anforderungen nach AKFF [1]

Die Sicherstellung des schadlosen Abbaus der Schwingungen durch eine unbehinderte geometrische Ausbreitung kann als elementarer erdbautechnischer Konstruktionsgrundsatz definiert werden. Dies impliziert einen gleichförmigen Schichtenaufbau mit abnehmender dynamischer Steifigkeit über die Tiefe und Vermeidung von Reflexionen durch Störstellen. Unter Berücksichtigung der charakteristischen Kenngröße für die effektive, resultierende Schwinggeschwindigkeit von 21 mm/s nach MO 836.0401 [20] und

Bild 2.11 ist ab einer Tiefe von 2,50 m unter Oberkante Frostschutzschicht eine effektive, resultierende Schwinggeschwindigkeit von 5 mm/s und weniger zu erwarten. In *MO 836.0401 [20]* wird aus empirischen Erkenntnissen abgeleitet, dass effektive, resultierende Schwinggeschwindigkeiten unter 5 mm/s keine Auswirkungen auf die Stabilität eines Erdbauwerkes haben. Bei der Konstruktion der Erdbauwerke brauchen daher ab dieser Tiefe keine technischen Maßnahmen zur Sicherung der zyklisch-dynamischen Stabilität ergriffen zu werden.

2.4.3.2 Nachweisformen

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand kann davon ausgegangen werden, dass bei Einhaltung des Qualitätsstandards nach dem *AKFF [1]* (vgl. Bild 2.7 bis 2.9) die zyklisch-dynamische Stabilität gewährleistet ist. Rechnerische Nachweise sind dann nicht notwendig. Die nachstehenden Nachweisformen kommen dann zum Einsatz, wenn von den Anforderungen des *AKFF [1]* abgewichen werden soll.

REHFELD [24] schlägt einen Nachweis der zyklisch-dynamischen Stabilität über die kritische Schwinggeschwindigkeit vor, der auch in der zwischenzeitlich zurückgezogenen *MO 836.0401 [20]* als Bemessungsgrundlage verankert wurde. Eine ausreichende Stabilität ist demnach gewährleistet, wenn die resultierende, effektive Schwinggeschwindigkeit $v_{\text{eff, res}}$ kleiner als eine materialabhängige kritische Schwinggeschwindigkeit v_{krit} ist. Die Nachweisform kann den vorgenannten Literaturstellen entnommen werden.

Nach *NEIDHART [22]* sind die Nachweismethoden recht grobe Abschätzungen und insbesondere für bindige Bodenarten wenig

abgesichert. Der direkte Nachweis der zyklisch-dynamischen Stabilität des Unterbaus erfolgt nach *NEIDHART [22]* am zweckmäßigsten in maßstabsgerechten Feldversuchen. Hierbei kann das Verhalten des Erdkörpers aber nur indirekt über Verformungsmessungen an der Oberfläche erfolgen.

Zur Überprüfung des Verhaltens eines Bodens unter zyklisch-dynamischer Belastung können auch zyklische Dreiaxialversuche durchgeführt werden. In *KEMPFERT UND HU [16]* wird eine Abschätzung der maßgeblichen Frequenz aus Eisenbahnverkehr für zyklische Dreiaxialversuche vorgestellt. Demnach ist die maßgebliche Störgrößenwelle in der Frostschutzschicht und der zyklisch-dynamischen Sicherungsschicht durch den Drehgestellabstand geprägt. Unterhalb dieser Sicherungsschicht „zeichnet“ sich nur noch der Wagenabstand durch.

Die relevante Frequenz ergibt sich aus der Beziehung

$$F = v / L,$$

wobei v die Fahrgeschwindigkeit und L die Störgrößenwellenlänge ist.

Bei einer Geschwindigkeit von 300 km/h errechnen sich die tiefenabhängigen Frequenzen entsprechend Tabelle 2.4.

Schicht	Geschwindigkeit v_e [km/h]	Störgrößenwellenlänge L [m]	Frequenz F [Hz, 1/s]
Zone 5	300	2,5 – 3,0	28 – 33
Zone 3,4	300	7,0 – 8,0	10 – 12
Zone 1,2	300	21,0 – 26,0	3 - 4

Tab. 2.4: Maßgebliche Frequenzen für zyklische Dreiaxialversuche in Abhängigkeit der Tiefe

Die statischen Spannungen sind im Dreiaxialgerät entsprechend den tatsächlichen Einwirkungen einzustellen. Die zyklische Last wird als σ_c Spannung axial mit der maßgeblichen Frequenz und in Höhe der in der entsprechenden Tiefe wirkenden Spannung bei 10^6 Lastwechseln aufgebracht. Die ungünstigsten Einwirkungen mit maximalen zyklischen Lasten sind aus Tabelle 2.5 ersichtlich.

Schicht	Schichtdicke [m]	σ_1 [kN/m ²]	σ_3 [kN/m ²]	$\sigma_c^{1)}$ [kN/m ²]
Zone 5	0,30	28,0	$\sigma_1 \cdot (1 - \sin \varphi)$	34,0
Zone 3,4	1,70	42,0	$\sigma_1 \cdot (1 - \sin \varphi)$	33,0
Zone 1,2	vernachlässigbar			

1) Als Verkehrslast wird $0,8 \cdot 43,65 = 34,92$ kN/m² angesetzt

Tab. 2.5: Maßgebliche Spannungen für zyklische Dreiaxialversuche in Abhängigkeit der Tiefe

Zyklisch-dynamisch instabile Böden zeigen beim zyklischen Dreiaxialversuch ein Verformungsverhalten, das der Linie C des Bildes 2.12 entspricht (vgl. Untersuchungen von *KATZENBACH UND ARSLAN* [15]). Durch die Auswertung der Lastwechsel-Stauchungslinie wird eine zyklisch-dynamische Instabilität bei N

Lastwechsel und gleichzeitig das hiermit verbundene Verformungspotential des Bodens ersichtlich.

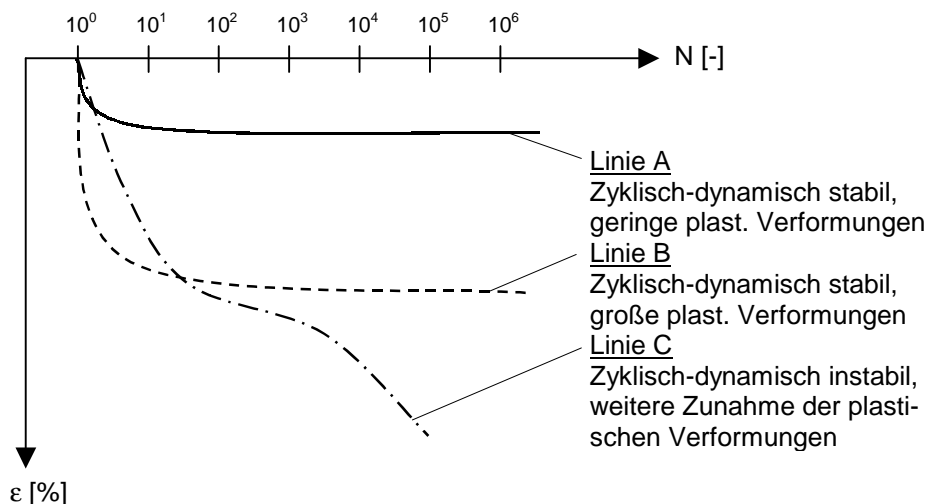


Bild 2.12: Darstellung typischer Lastwechsel-Stauchungslinien bei zyklischen Dreiaxialversuchen (schematisch)

Nach *KEMPFERT UND HU* [16] entsteht bei wassergesättigten bindigen Böden unter zyklischer Einwirkung zunächst ein Porenwasserüberdruck und es treten undrainede plastische Scherverformungen auf. Der Zeitpunkt, ab dem sich die drainede plastischen Verformungen einstellen, ist von der Länge des Entwässerungsweges, also dem Radius der Probe, abhängig. Dies hat zur Folge, dass sich bei wassergesättigten bindigen Böden aus der Zeitsetzungslinie nach Bild 2.12 kein Hinweis auf das tatsächliche Zeitsetzungsverhalten ableiten lässt.

Untersuchungen von *KEMPFERT UND HU* [16] zeigen, dass ein vermeintlich zyklisch-dynamisch-instabiles Material schon wegen unzulässiger plastischer Verformungen nicht eingesetzt werden kann (vgl. Linie B nach Bild 2.12). Die zyklisch-dynamische Stabili-

tät ist demzufolge nicht das zentrale Problem der Erbautechnik für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn.

Es wird zusammenfassend folgende Vorgehensweise zur Überprüfung der zyklisch-dynamischen Stabilität vorgeschlagen:

- Sofern die Anforderungen nach dem *AKFF [1]* eingehalten werden, kann von einer ausreichenden zyklisch-dynamischen Stabilität ausgegangen werden. Bei Böden, die dieses Kriterium nicht erfüllen, erfolgt eine ingenieurtechnische Einschätzung auf Grundlage des Baugrundmodells nach Abschnitt 2.3. Tabelle 2.6 gibt empirische Anhaltspunkte für Böden, die sich unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung kritisch verhalten können. Sofern die Beurteilung eine grundsätzliche Eignung ausweist, erfolgt der Nachweis mittels zyklischem Dreiaxialversuch oder besser im maßstabsgerechtem Feldversuch.

Ungleichförmigkeit	Gleichförmige, rollige Böden
Bezogene Lagerungsdichte	$I_D < 0,50$
Konsistenz	$I_C < 0,75$
Sättigungszahl	S_r gegen 1,0

Tab. 2.6: Empirische Anhaltspunkte für Böden, die sich unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung kritisch verhalten können (vgl. MO 836.0401 [20])

- Im Einzelfall ist abzuwägen, ob der Aufwand für den Nachweis der zyklisch-dynamischen Stabilität im Verhältnis zum wirtschaftlichen Vorteil der Verwendung des anstehenden Bodens steht. Aus diesem Gesichtspunkt heraus sind lokale Schwachstellen, wie beispielsweise im begrenzten Umfang auftretende aufgeweichte Böden grundsätzlich auszutauschen oder zu konditionieren. Hingegen könnten möglicherweise weitge-

streckte Einschnittsbereiche mit vermeintlich zyklisch-dynamisch instabilen Böden ohne aufwendige und kosten-trächtige Maßnahmen belassen werden. Ebenfalls ist so eine grundsätzliche Beurteilung von Dammschüttmassen in der zyklisch-dynamisch hoch beanspruchten Zone 3 möglich.

Zyklisch-dynamische Untersuchungen von *NEIDHART [22]* mit dem Simulationsgerät *DYSTAFIT*[®] an einem Erdkörper nach dem *AKFF [1]* zeigen, dass die Frostschutzschicht im Verhältnis zum sonstigen Unterbau zu sehr großen Verdrückungen unter zyklisch-dynamischer Belastung neigt. Diese Ergebnisse wurden bei weiteren Versuchen auf der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main bestätigt. Hier zeigte sich, dass bis zu 90% der Gesamtverformungen aus Betrieb innerhalb der Frostschutzschichten auftreten (vgl. *ARCA-DIS [2]*).

Hieraus leitet sich ab, dass bei der Herstellung der Frostschutzschicht durch eine hohe Verdichtungsenergie in Verbindung mit geeigneten Materialien und einem gleichmäßigen Einbau ein zyklisch-dynamisch stabiles Bodenpaket geschaffen werden muss.

Aus Sicht der zyklisch-dynamischen Widerstandsfähigkeit ist die Verwendung von gebrochenem Korn in der Frostschutzschicht günstig, da gerundetes Korn Strukturänderungen unter zyklisch-dynamischer Einwirkung begünstigt. Brechkorn hat aber den Nachteil, dass bei nicht ausreichender Kantenfestigkeit beim Transport, Einbau und Verdichtung Kornverfeinerungen auftreten können, die möglicherweise wiederum die Frostsicherheit einschränken (*GÖBEL ET AL [9]*). Ein Gemisch aus natürlichen Sanden und Kiesen mit Brechprodukten oder Recycling-Baustoffen bietet sich zur Lösung dieses Problems an. Zurzeit darf bei Bahn-

anlagen entsprechend der Richtlinie *TL 918 062 [30]* in einem Kies-Sand-Gemisch nur 30 % Brechkorn und in einem Brechkorn-Kies-Sand-Gemisch maximal 70 % gebrochenes Material verwendet werden.

2.4.4 Nachweis der Grenzflächenstabilität

Die Grenzflächeninstabilität ist eine Folge unzulässiger zyklisch-dynamischer Einwirkungen. Dieser Effekt tritt ein, wenn grobkörnige Materialien, wie zum Beispiel die Frostschutzschicht, in weiche feinkörnige Böden oder umgekehrt feine Materialien in die Poren der Frostschutzschicht eindringen.

Laborversuche von *KEMPFERT UND HU [16]* zeigen, dass die Grenzflächenstabilität im Übergangsbereich der Frostschutzschicht auf das Erdplanum bei $I_C \geq 0,75$ (Lehm) und $I_C \geq 0,50$ (Ton) gegeben ist. Dies ist unter Anwendung der Konstruktionsgrundsätze des *AKFF [1]* (vgl. Bild 2.7 bis 2.9) der Fall.

Sofern diese Werte nicht erreicht werden können, ist eine Konditionierung der Böden durch Bindemittelzugabe, ein Bodenaustausch oder die Verwendung von Geotextilien möglich. Eine diesbezügliche Entscheidung kann sich maßgeblich an monetären Kriterien orientieren.

Bei der Herstellung des Planums ist auf hohe Lagegenauigkeit von ± 3 mm und eine Mindestquerneigung von 2,5 % zu achten, da mögliche Wasseransammlungen auf dem Planum zu Aufweichungen führen können. Hierdurch ist dann die Grenzflächenstabilität möglicherweise nicht mehr gegeben. Der höchste Grundwasserstand beträgt nach *AKFF [1]* 1,50 m unter Schienenoberkante, so

dass das Planum nicht in der wassergesättigten Zone liegen darf. Dies ist zur Sicherstellung der Grenzflächenstabilität unbedingt einzuhalten.

2.4.5 Übergangsbereiche auf Ingenieurbauwerke

Wie bereits dargelegt, kommt der Homogenität der Konstruktion große Bedeutung zu. Für die Konstruktion bedeutet dies, dass unvermeidbare Sprünge in der dynamischen Steifigkeit durch eine kontinuierliche Anpassung auszugleichen sind.

Als besonders kritisch gelten bei allen Verkehrswegen Übergangsbereiche auf Brückenbauwerke. *HILLIG [11]* entwickelte aus vorgenannter Erkenntnis bereits 1994 ein Konzept zur Ausbildung des Hinterfüllbereiches, das Bestandteil des *AKFF [1]* wurde. Die im *AKFF [1]* enthaltene Regellösung der Übergangsbereiche (vgl. Bild 2.9) erfüllt die o.g. Forderung der Gleichmäßigkeit der Steifigkeitsänderung nur begrenzt. Durch die Steuerung der dynamischen Steifigkeit, beispielsweise durch Zugabe von Bindemittel kann der Forderung besser Rechnung getragen werden (vgl. Bild 2.13).

Übergangsbereiche auf Tunnel und Tröge befinden sich in der Regel in Einschnitten und werden daher im Unterbau nicht berücksichtigt. Eine kontinuierliche Anpassung der dynamischen Steifigkeit wird durch konstruktive Maßnahmen im Oberbau (z.B. Schleppplatten, Dübel) sichergestellt.

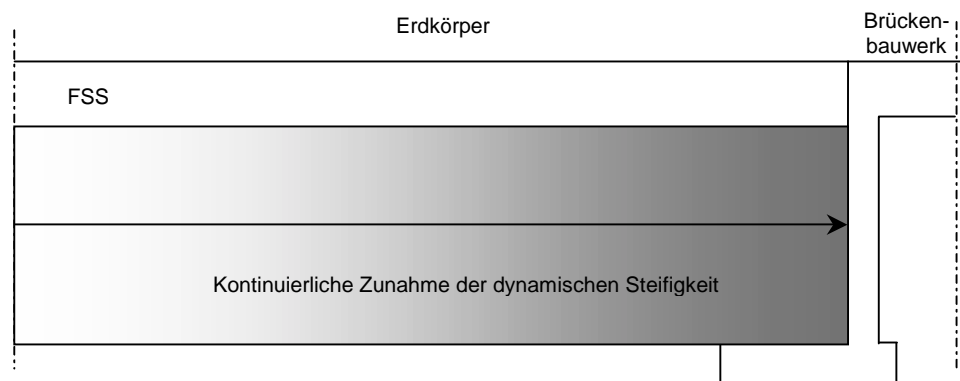


Bild 2.13: Darstellung des Konstruktionsprinzips für Übergangsbereiche auf Brückenbauwerke (schematisch)

3. MAßNAHMEN BEI DER PROJEKTUMSETZUNG

Im zweiten Teil der Arbeit werden diejenigen Maßnahmen bei der Projektumsetzung aufgezeigt, die für die langfristige Erfüllung der Anforderungen an die Erdbauwerke einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn notwendig sind. Die im Folgenden aufgeführten Maßnahmen sind in ihrer zeitlichen Abfolge bei der Projektumsetzung gestaffelt.

3.1 Umsetzung der Fachplanung in Arbeitsanweisungen

Die erdbautechnische Fachplanung von Neubaustrecken liefert umfangreiches Datenmaterial zur Erdbautechnik. Die Ergebnisse der Fachplanung sind so aufzuarbeiten, dass die gewählte Erdbautechnik bei der Bauausführung gesichert umgesetzt werden kann. Vom Fachplaner sind hierzu Arbeitsanweisungen zu entwickeln, die die Schnittstelle zwischen der Fachplanung und der Bauausführung darstellen.

Die notwendigen Angaben in den Arbeitsanweisungen beziehen sich nicht nur auf die Güteüberwachung der zum Einsatz kommenden Erdbaustoffe und die Überprüfung des Funktionsverhaltens der gefertigten Erdbauwerke (vgl. *FLOSS [7]*, *ZTVE-STB 94 [39]*), sondern auch auf technische Ausführungsvorgaben zur Durchführung des Erdbaus. Der Baugrund ist des Weiteren vor Bauausführung mit den Vorgaben des Baugrundmodells auf eine ausreichende Übereinstimmung zu überprüfen.

Folgende Arbeitsanweisungen (AA) sind für den Erdbau einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn aufzustellen:

- AA Prüfung des Baugrundmodells
- AA Prüfung der Erdbaustoffe
- AA Herstellung der Erdbauwerke
- AA Prüfung der Qualität der Erdbauwerke

Arbeitsanweisungen können aufgrund der spezifischen Randbedingungen der jeweiligen Bauaufgabe nicht verallgemeinert werden. Die folgenden Ausführungen beschreiben daher nur die wesentlichen Aspekte bei der Erarbeitung von Arbeitsanweisungen. Im Einzelfall sind dann auf dieser Grundlage die Arbeitsanweisungen entsprechend den tatsächlichen Gegebenheiten aufzustellen.

3.1.1 Arbeitsanweisung Prüfung des Baugrundmodells

Das Baugrundmodell und die daraus abgeleitete Erdbautechnik basieren auf direkten, punktuellen Aufschlüssen. Zwischen diesen muss der Baugrund und die zu entnehmenden Bodenmassen hinsichtlich der Qualität und Quantität entsprechend den räumlichen, indirekten Aufschlüssen abgeschätzt werden.

Auf den Dammaufstandsflächen und den Einschnittssohlen ist das Baugrundmodell vollflächig zu überprüfen. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Abschätzungen aus dem Baugrundmodell ausreichend zutreffend sind und somit die aus dem Modell entwickelte Erdbautechnik den Ansprüchen genügt.

Eine Überprüfung der Dammaufstandsflächen und der Einschnittssohlen erfolgt zunächst durch visuelle Prüfung. Mit Hilfe der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle nach *TP BF-StB Teil E2 [35]* können darüber hinaus auch optisch nicht sichtbare Schwachstellen lokalisiert und bodenmechanisch kon-

trolliert werden. Hierbei wird durch die Messeinrichtung an der Verdichtungswalze eine vollflächige Überprüfung des Baugrundes bis in eine Tiefe von etwa 50 cm möglich. Lokale, oberflächlich nicht sichtbare und durch die Messung nicht erfassbare Schwachstellen entziehen sich hierbei allerdings der Erkennung, so dass ein unvermeidbares Restrisiko bei der Beschreibung des Baugrundmodells verbleibt.

Unter Schwachstellen werden Böden mit einer bezogenen Lagerungsdichte $I_D < 0,50$ oder einer Konsistenz $I_C < 0,75$ verstanden (vgl. Tabelle 2.6). Beim Antreffen von vermeintlichen Schwachstellen werden zur räumlichen Eingrenzung Sondierungen nach DIN 4094 durchgeführt. Durch zusätzliche Sondierungen in der unmittelbaren Nähe zu direkten Baugrunduntersuchungen ist eine Kalibrierung der Sondierungen möglich. Im Übrigen wird hinsichtlich der Korrelation zwischen den Sondierergebnissen und der Lagerungsdichte bzw. Konsistenz auf die einschlägige Literatur verwiesen (*FLOSS [7]* und andere).

3.1.2 Arbeitsanweisung Prüfung der Erdbaustoffe

Durch die Umsetzung dieser Arbeitsanweisung wird sichergestellt, dass die Material-Kennwerte der Erdbaustoffe denen in der erdbautechnischen Fachplanung zugrunde gelegten Material-Kennwerte entsprechen. Da sich die Herstellung eines Erdbauwerkes i.d.R. über einen längeren Zeitraum erstreckt, sind die Material-Kennwerte fortlaufend abzugleichen. Gegenstand dieser Anweisungen sind demzufolge neben den Anforderungen an das Material alle Eignungsprüfungen sowie die Eigenüberwachung.

3.1.2.1 Anforderungen an die Erdbaustoffe

Die Anforderungen ergeben sich für die Zone 1 bis Zone 4 aus der erdbautechnischen Fachplanung. Hierzu sind die verschiedenen Bodengruppen nach der DIN 18 196 und ggf. die Bindemittelart und -menge anzugeben (vgl. auch Bild 2.6 bis 2.8 nach *AKFF [1]*). Für Schüttmaterialien der Frostschutzschicht (Zone 5) sind die Material-Kennwerte aus der *TL 918 062 [30]* einzuhalten.

3.1.2.2 Eignungsprüfung und Eigenüberwachung der Erdbaustoffe

Die Eignungsprüfung der Erdbaustoffe für die Zone 1 bis Zone 4 umfasst die nachstehend aufgeführten bodenmechanischen Untersuchungen:

1. Korngrößenverteilung nach DIN 18 123
2. Plastizitätsgrenzen nach DIN 18 122
3. Konsistenz und Wassergehalt nach DIN 18 121
4. Organische Bestandteile nach DIN 18 128 oder *TP BF-StB Teil B 10.1 [32]*
5. Proctordichte nach DIN 18 127 in Verbindung mit dem optimalen Wassergehalt und Festlegung des Wassergehaltes beim Einbau unter Beachtung des zulässigen Luftporenanteils $n_a \leq 12\%$ bei gemischt- oder feinkörnigen Böden
6. Witterungsbeständigkeitsversuch der Gesteine bei grob- und gemischtkörnigen Materialien nach DIN 52 106
7. Gehalt an organischen Bestandteilen durch Ermittlung des Glühverlustes nach DIN 18 128 oder nach *TP BF-StB Teil B 10.1 [32]*
8. Bei Bodenverbesserung oder -verfestigung:
 - Proctordichte nach DIN 18 127 in Verbindung mit dem optimalen Wassergehalt für das Boden-Bindemittel-Gemisch

(mindestens 3 verschiedene Bindemittelmengen) entsprechend der *TP BF-StB Teil B 11.1 [33]* und der *TP BF-StB Teil B 11.5 [34]*

- Im Falle der Verfestigung: Einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18 136 für das Boden-Bindemittel-Gemisch (mindestens 3 verschiedene Bindemittelmengen) entsprechend der *TP BF-StB Teil B 11.1 [33]* und der *TP BF-StB Teil B 11.5 [34]*
- Im Falle der Verfestigung: Frostprüfung für das Boden-Bindemittel-Gemisch (mindestens 3 verschiedene Bindemittelmengen) entsprechend der *TP BF-StB Teil B 11.1 [33]*, sofern erforderlich

Im Zuge der Eigenüberwachung werden bei augenscheinlichen Änderungen der zum Einbau vorgesehenen Erdbaustoffe für die Zone 1 bis Zone 3 die offensichtlich abweichenden Parameter versuchstechnisch überprüft.

Sofern Bodenverbesserungen oder -verfestigungen vorgesehen sind, ist entsprechend der *ZTVE-STB 94 [39]* je 3000 m² der Boden hinsichtlich seiner Korngrößenverteilung nach DIN 18 196 und der organischen Bestandteile nach DIN 18 128 oder nach *TP BF-StB Teil B 10.1 [32]* im Rahmen der Eigenüberwachungsprüfung zu untersuchen.

Bei qualifizierten Schüttmaterialien für Übergangsbereiche auf Ingenieurbauwerke (Zone 4) ist im Rahmen der Eigenüberwachung je 1000 t Boden die Korngrößenverteilung entsprechend DIN 18 123 nachzuweisen. Die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Kontrolle ergibt sich aus den hohen Anforderungen an die Materialgüte.

Hinsichtlich der Eignungsprüfung und der Eigenüberwachung für Erdbaustoffe der Frostschuttschicht (Zone 5) gelten die Regelungen der *TL 918 062 [30]*.

Grundsätzlich sind bei allen zum Einbau vorgesehenen Böden die Wassergehalte entsprechend den Vorgaben der Eignungsprüfung im Zusammenhang mit der Prüfung des Verdichtungsgrades D_{PR} (vgl. Abschnitt 3.1.4.2 „Prüfung der Zone 2 bis Zone 5“) zu prüfen. Der Umfang dieser Nachweise entspricht denen für den Verdichtungsgrad.

3.1.3 Arbeitsanweisung Herstellung der Erdbauwerke

Durch eine Umsetzung dieser Arbeitsanweisung wird sichergestellt, dass die Bauausführung adäquat den Anforderungen an das fertige Erdbauwerk erfolgt. Hierzu ist der Herstellungsprozess umfangreich zu beschreiben. Sofern erforderlich, sind Maßnahmen zur Eignungsprüfung des Bauverfahrens anzugeben. Hierbei wird überprüft, ob das in der Arbeitsanweisung vorgesehene Bauverfahren geeignet ist, die Anforderungen an das Erdbauwerk zu erfüllen.

3.1.3.1 Herstellung der Zone 1

Die Umsetzung der Arbeitsanweisung für die Herstellung der Zone 1 erfolgt im Anschluss an die Durchführung der Arbeitsanweisung Prüfung des Baugrundmodells.

Diese Arbeitsanweisung bezieht sich auf die vorgesehenen Gründungsmaßnahmen. Alle diesbezüglichen Schritte werden auch im hier betrachteten Fall einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn nach dem Stand der Technik ausgeführt. Es wird

in diesem Zusammenhang auf die maßgeblichen Normen, Richtlinien und die anerkannten Regeln der Baukunst verwiesen.

Da die Arbeitsanweisung zur Herstellung der Zone 1 inhaltlich den anerkannten Regeln der Technik folgt, sollen an dieser Stelle die Gründungsmaßnahmen nach der *RIL 836 [25]* nur hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Funktionsweise und Bedeutung für den hier betrachteten Fall einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn erläutert werden. Eine vertiefende Betrachtung ist an dieser Stelle aufgrund der Abhängigkeit von der stets spezifischen Gründungssituation nicht sinnvoll.

Das **Einwalzen scherfester Materialien** dient der Stabilisierung weicher Bodenschichten für den Baubetrieb. Aufgrund der konstruktiven Ausrichtung dieser Maßnahmen werden keine weitergehenden Anforderungen an Material und Qualität gestellt.

Ein **vollständiger oder teilweiser Bodenaustausch** der anstehenden, nicht ausreichend tragfähigen Böden ist vom Grundsatz her identisch mit dem Einbau von Bodenmaterialien. Ziel ist es, die Tragfähigkeit zu erhöhen und die Zusammendrückbarkeit des Untergrundes zu verringern. Die Bodenverdrängung stellt eine besondere Art des Bodenaustausches dar. Hier werden die unbrauchbaren Massen durch Verdrängen mit brauchbaren Materialien, wie beispielsweise Sanden ersetzt. Die Verdrängung kann auch mit Sprengung des anstehenden Bodens einhergehen.

Ziel der oberflächennahen **Verfestigung** von Böden mit Kalk, Zement und Kalk-Zement-Gemischen ist ebenfalls die Erhöhung der Tragfähigkeit und die Reduzierung von Verformungen. Diese Bau-

technik stellt möglicherweise eine monetär günstige Alternative zu einem Bodenaustausch dar.

Der **Einbau von lastverteilenden oder zugfesten Einlagen** wird bei nicht ausreichend tragfähigem und setzungsempfindlichem Baugrund eingesetzt und ist aus wirtschaftlichen Erwägungen insbesondere in Kombination mit einem Bodenaustausch oder einer Verfestigung sinnvoll. Hierbei kann die Höhe des Bodenaustausches oder der Verfestigung reduziert werden.

Die **Tiefenrüttelung** bewirkt eine Erhöhung der Tragfähigkeit und verringert die Verformbarkeit des Bodens. Vorteile dieser Verfahren sind die große Tiefenwirkung durch entsprechend tiefe Rüttelsäulen. Demzufolge ist diese Maßnahme für hohe Dammbauwerke und setzungsempfindliche Böden mit langen Konsolidierungszeiten prädestiniert. Die Tiefenrüttelung ist eine im Bahnbau gängige Bauweise, die im hier betrachteten Fall einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn bereits eingesetzt wurde (vgl. *SONDERMANN [29]*).

Durch die **Herstellung von Vertikaldräns** kann nur die Konsolidierung beschleunigt werden. Diese Maßnahme ist dort sinnvoll einsetzbar, wo lange Konsolidierungszeiträume anderenfalls den Einbau einer Fester Fahrbahn verhindern würden. Der Einbau von Vertikaldräns gehört daher insbesondere bei nicht ausreichenden Bauzeiten und ungünstigem Baugrund zum Standard für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn.

Bei der **dynamischen Intensivverdichtung** für rollige Böden wird der Boden mittels hoher dynamischer Spannungen in eine höhere Lagerungsdichte überführt. Dieses Verfahren reduziert die Zu-

sammendrückbarkeit des Bodens und vergleichmäßig das Tragverhalten über die Fläche. Dieses Verfahren wurde bei einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn (Neubaustrecke Köln-Rhein/Main) bereits durchgeführt (*KRUDEWIG [18]*).

3.1.3.2 Herstellung der Zone 2 bis Zone 4

Die Umsetzung dieser Arbeitsanweisungen erfolgt vom Bauablauf her nach der Durchführung der Arbeitsanweisung Herstellung der Zone 1.

Das Verdichtungsverfahren und die Schütthöhe der Einbaulagen bestimmen sich aus dem Gerät, dem Material, der Anzahl der Verdichtungsübergänge und der Arbeitsgeschwindigkeit. Daher ist für jede Bodenart die Durchführung einer Probeverdichtung (Eignungsprüfung des Bauverfahrens) unter Beachtung der Ergebnisse der Eignungsprüfungen aus der Arbeitsanweisung Prüfung der Erdbaustoffe erforderlich. Hierbei erfolgt auch die Kalibrierung für die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle entsprechend der *TP BF-StB Teil E 2 [35]*.

Die Herstellung der Schüttungen erfolgt nach dem folgenden Prozessablauf (Bild 3.1). Arbeitsanweisungen werden für die betrachteten Zonen hiernach entwickelt, so dass die konkreten Arbeitsschritte zu formulieren sind.

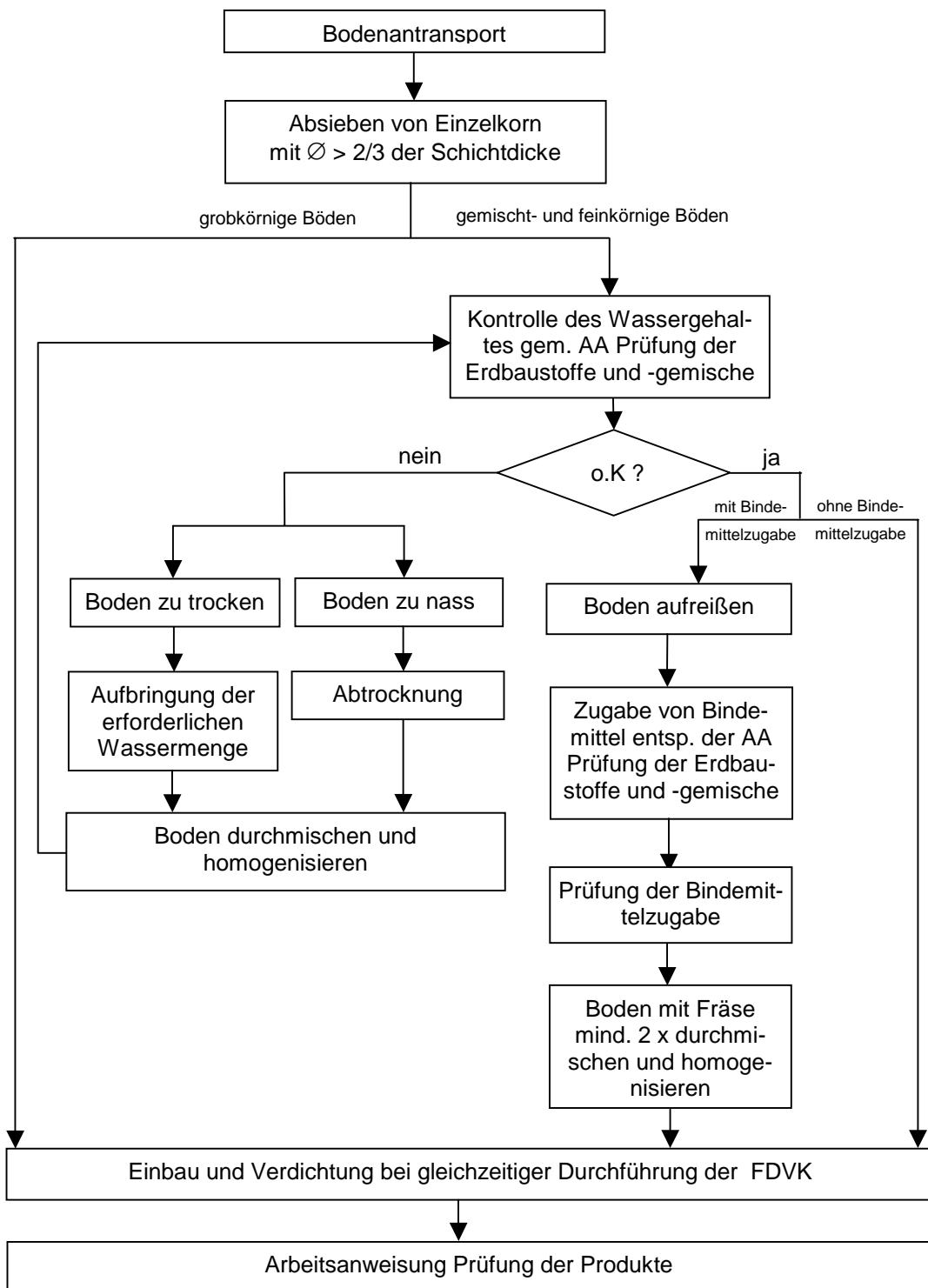


Bild 3.1 Schematische Darstellung der Arbeitsabläufe (Prozessablauf) für die Arbeitsanweisung Herstellung der Zone 2 bis 4

3.1.3.3 Herstellung der Zone 5

Die Arbeitsanweisung bezieht sich auf die Frostschutzschicht. Die Schütthöhe der Einbaulagen bestimmt sich im Wesentlichen aus dem Verdichtungsgerät, dem zur Verwendung vorgesehenen Material, der Anzahl der Verdichtungsübergänge und der Arbeitsgeschwindigkeit. Daher ist vor Durchführung des Produktionsprozesses eine Probeverdichtung (Eignungsprüfung des Bauverfahrens) unter Beachtung der Ergebnisse der Eignungsprüfungen aus der Arbeitsanweisung Prüfung der Erdbaustoffe erforderlich. Die Kalibrierung für die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle entsprechend der *TP BF-StB Teil E 2 [35]* erfolgt zeitgleich.

Die Frostschutzschicht ist grundsätzlich bei der Produktion mit einem Fertiger herzustellen, um so eine maximal mögliche Gleichmäßigkeit der Schicht zu gewährleisten. Das Baustoffgemisch ist so zu behandeln, dass beim Verladen, Entladen und Einbau keine Entmischungen auftreten. Durch diese Maßnahmen wird ein gleichmäßiges Trag- und Verformungsverhalten erreicht. Das Baustoffgemisch ist in mehreren Arbeitsgängen bei einem für den Einbau günstigen Wassergehalt bei gleichzeitiger flächendeckender Verdichtungskontrolle zu verdichten.

3.1.4 Arbeitsanweisung Prüfung der Qualität der Erdbauwerke

Die Umsetzung dieser Arbeitsanweisung stellt sicher, dass die Anforderungen an die Erdbauwerke erreicht wurden. Sie erfolgt zeitlich nach der Durchführung der Arbeitsanweisung Herstellung der Erdbauwerke.

3.1.4.1 Prüfung der Zone 1

Wie oben erwähnt, entsprechen die Maßnahmen zur Herstellung der Zone 1 den Regeln der Technik. Demzufolge ist diese Arbeitsanweisung nach den Richtlinien, Normen, Herstellerangaben etc. aufzustellen. Eine weiter gehende Betrachtung erfolgt daher an dieser Stelle nicht.

3.1.4.2 Prüfung der Zone 2 bis Zone 5

Die Eigenüberwachung der Bodenverdichtung erfolgt mit Hilfe der flächendeckenden Verdichtungskontrolle. Darüber hinaus sind nach dem *AKFF [1]* grundsätzlich Verdichtungsprüfungen entsprechend der Methode M3 nach der *ZTVE-STB 94 [39]* durchzuführen.

Sofern keine verlässliche Korrelation des dynamischen Messwertes zu den herkömmlichen Prüfungen erkennbar ist, werden im *AKFF [1]* die Verdichtungsprüfungen der *ZTVE-STB 94 [39]* mit doppeltem Prüfaufwand gefordert. Die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle kann dann zur Schwachstellenanalyse und somit zur Schaffung eines gleichförmigen Fahrweges eingesetzt werden.

Folgende Prüfungen sind neben der flächendeckenden Verdichtungskontrolle durchzuführen:

- Eine direkte Ermittlung des Verdichtungsgrades D_{PR} und des Luftporenanteils n_a je 1.500 m² Fläche (Zone 2, 3, 5).
- In Übergangsbereichen auf Brückenbauwerke (Zone 4) sind für Hinterfüllungen und Bodenaustauschmaßnahmen glei-

chermaßen je 150 m³ eingebautem Boden eine Prüfung des Verdichtungsgrades D_{PR} durchzuführen.

- Auf der Oberkante der Zonen 2, 3, 5 ist zur Überprüfung der Tragfähigkeit (E_{V2} -Wert) je 1 Lastplattendruckversuch nach DIN 18 134 je 1.500 m² Fläche und bei Hinterfüllungen der Brückenbauwerke (Zone 4) auf der Oberkante 3 Lastplattendruckversuche nach DIN 18 134 durchzuführen.
- Zur Überprüfung der Gleichförmigkeit der Schüttungen ist in den Zonen 2, 3 je 4 m Schütthöhe die Durchführung einer Sondierung nach DIN 4094 je 500 m² bei einer Sondiertiefe von $\geq 4,0$ m notwendig. Im Übergangsbereich auf Brückenbauwerke (Zone 4) erfolgen 3 Sondierungen nach DIN 4094 in gleicher Tiefe.
- Die profilgerechte Lage des Erdplanums (OK Zone 3, 4) auf ± 3 cm genau wird über ein Aufmaß der Querprofile mit einem Abstand von 40 m geprüft. Hierzu sind alle Ebenen der Oberkante des Erdplanums durch zwei außen liegende Aufmaßpunkte zu erfassen.
- Die profilgerechte Lage des Planums (OK Zone 5) von ± 2 cm wird über ein Aufmaß der Querprofile mit einem Abstand von 20 m geprüft. Hierzu sind alle Ebenen der Oberkante der Frostschutzschicht zu erfassen.
- Der Grenzwert der Unebenheit des Planums von ± 3 cm innerhalb von 4 m ist stichprobenartig zu prüfen.

Die vorgenannten Maßnahmen zur Eigenüberwachung der Zone 2 bis Zone 5 sind zur Veranschaulichung in Bild 3.2 dargestellt.

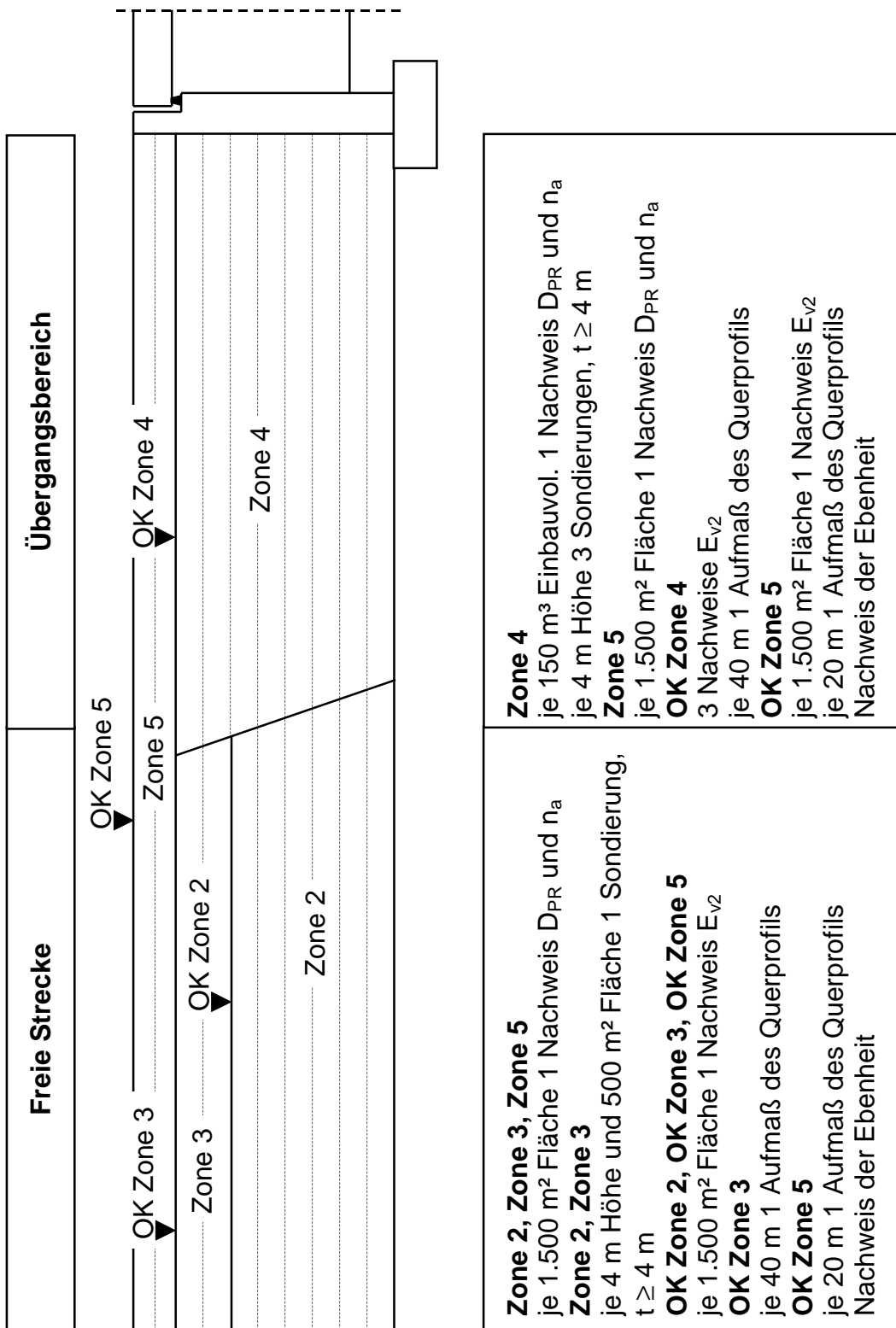


Bild 3.2: Eigenüberwachung der Zone 2 bis Zone 5

3.1.5 Erstellung von erdbautechnischen Längs- und Querschnitten

Die Erfahrung bei der Projektumsetzung der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main zeigt, dass etwa 1.500 Arbeitsanweisungen je 100 Baukilometer aufzustellen sind. Diese umfangreichen Daten müssen so zusammengestellt werden, dass alle Informationen für das Baustellenpersonal verfügbar sind. Hierzu wird folgende Lösung vorgeschlagen:

- In erdbautechnischen Längsschnitten (vgl. Bild 3.3) werden Homogenbereiche mit gleichen erdbautechnischen Maßnahmen bestimmt. Diese zeigen, welche Erdbautechnik in dem durch Stationsangaben definierten Homogenbereich vorgesehen ist.
- Zur Darstellung der Erdbautechnik selber werden dann für die Homogenbereiche erdbautechnische Querschnitte für die freie Strecke (vgl. Bild 3.4 bis 3.6) und erdbautechnische Längsschnitte für die Übergangsbereiche auf Brückenbauwerke (vgl. Bild 3.7) entwickelt.

Die erdbautechnischen Querschnitte und Längsschnitte für Übergangsbereiche auf Brückenbauwerke dienen als alleinige Informationsträger für die Bauausführung und müssen demzufolge alle Arbeitsanweisungen beinhalten.

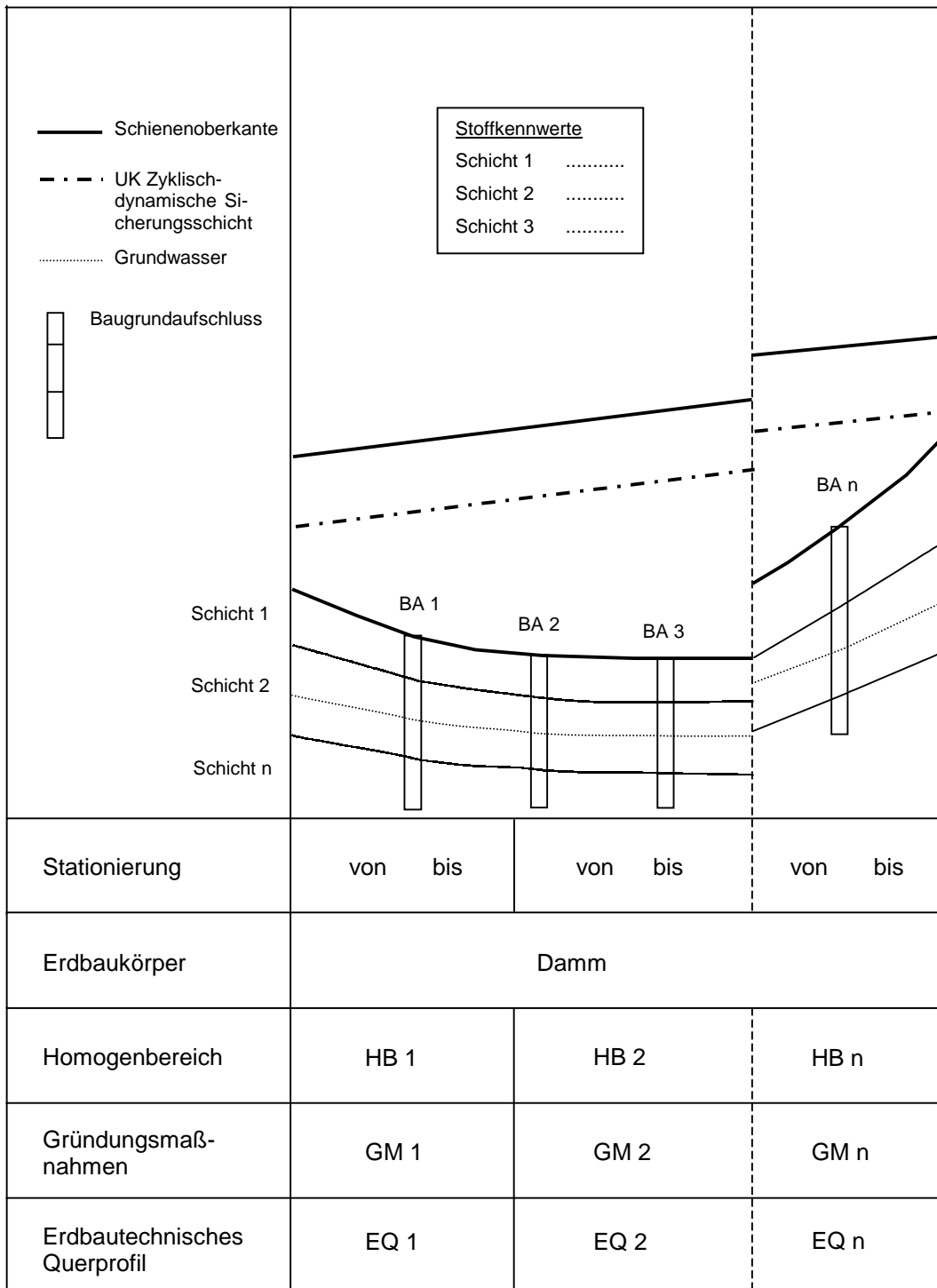


Bild 3.3: Erdbautechnischer Längsschnitt (schematisches Beispiel)

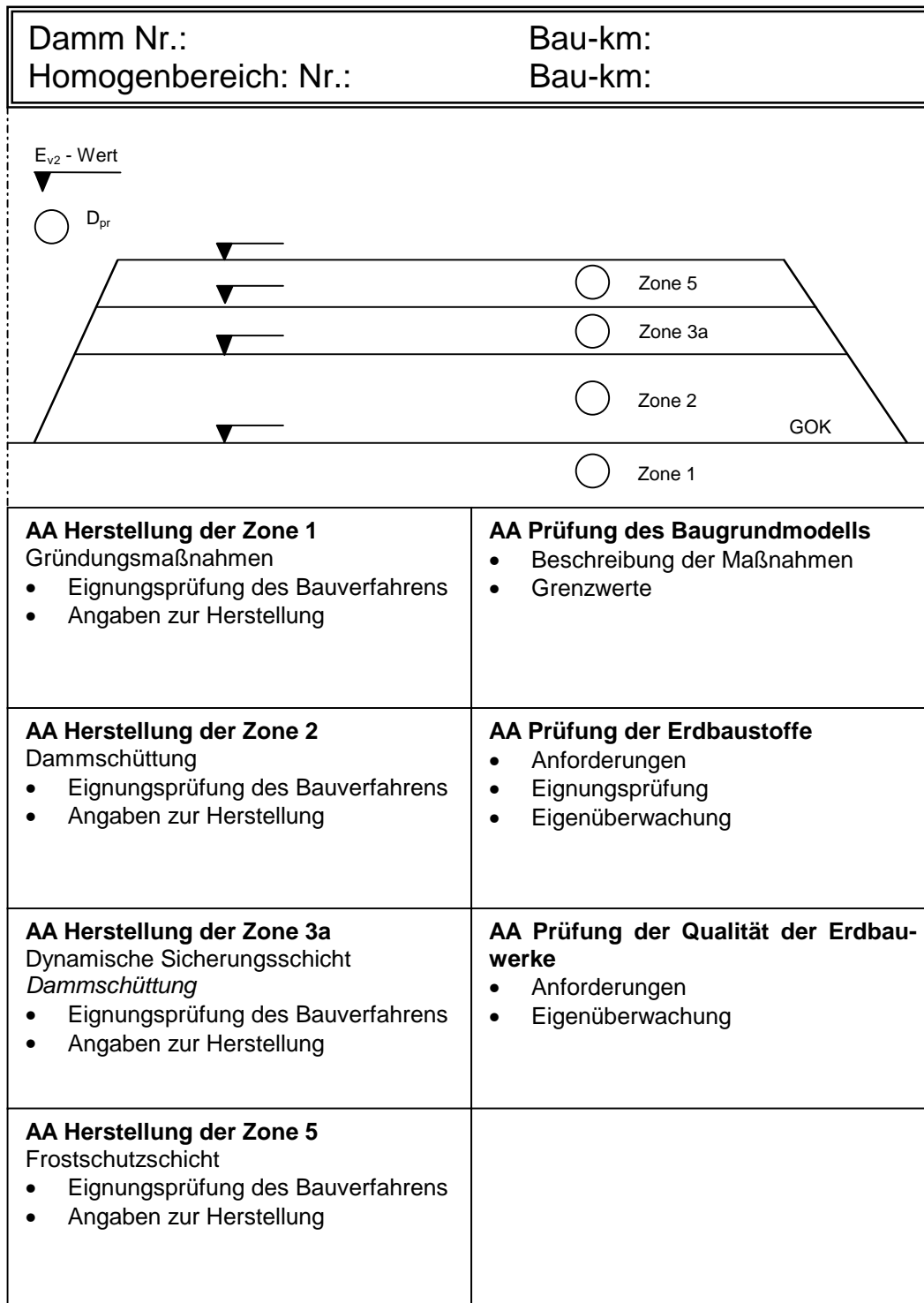


Bild 3.4: Erdbautechnischer Querschnitt für einen Damm mit einer Höhe > 2,50 m (schematisch)

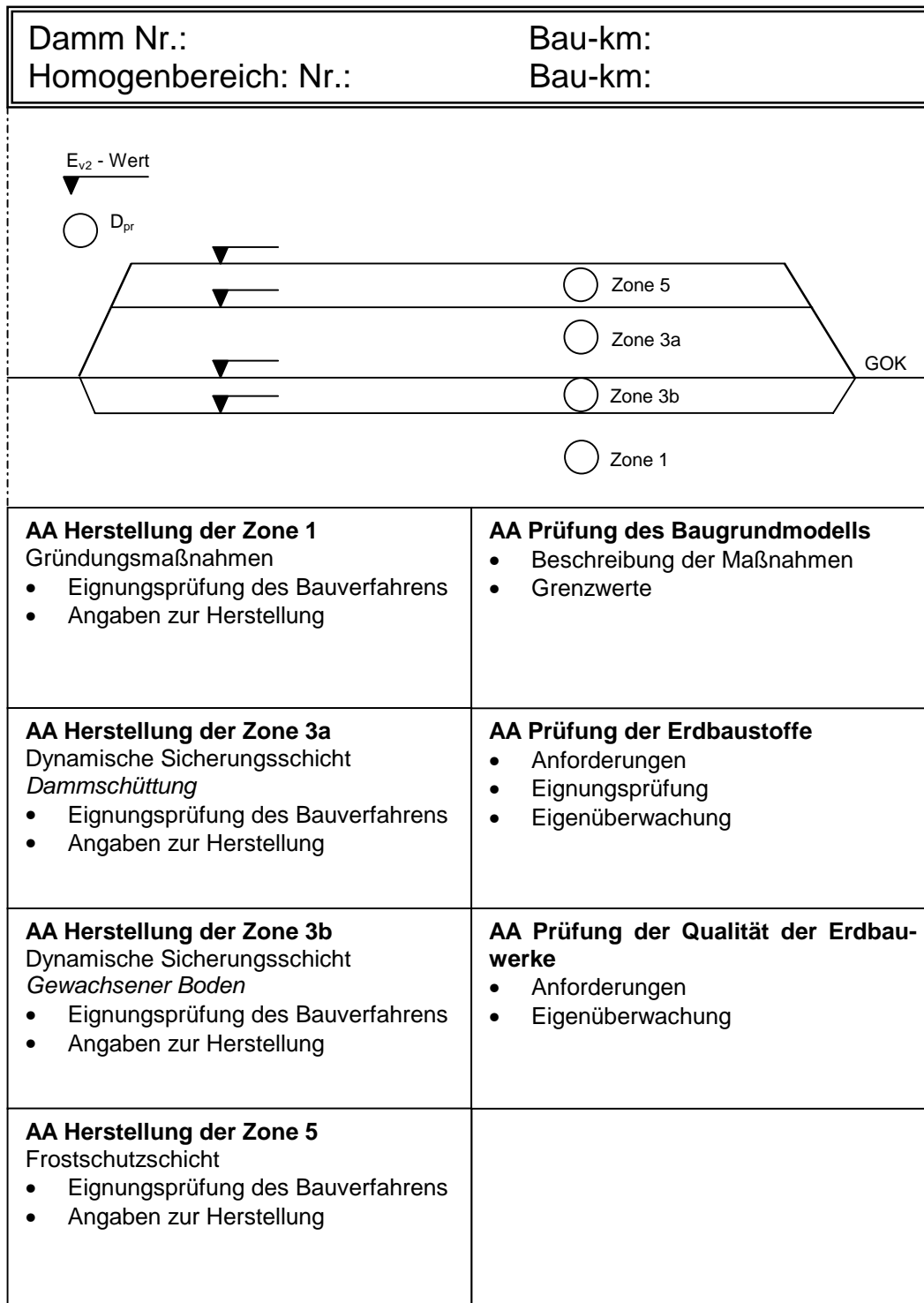


Bild 3.5: Erdbautechnischer Querschnitt für einen Damm mit einer Höhe < 2,50 m (schematisch)

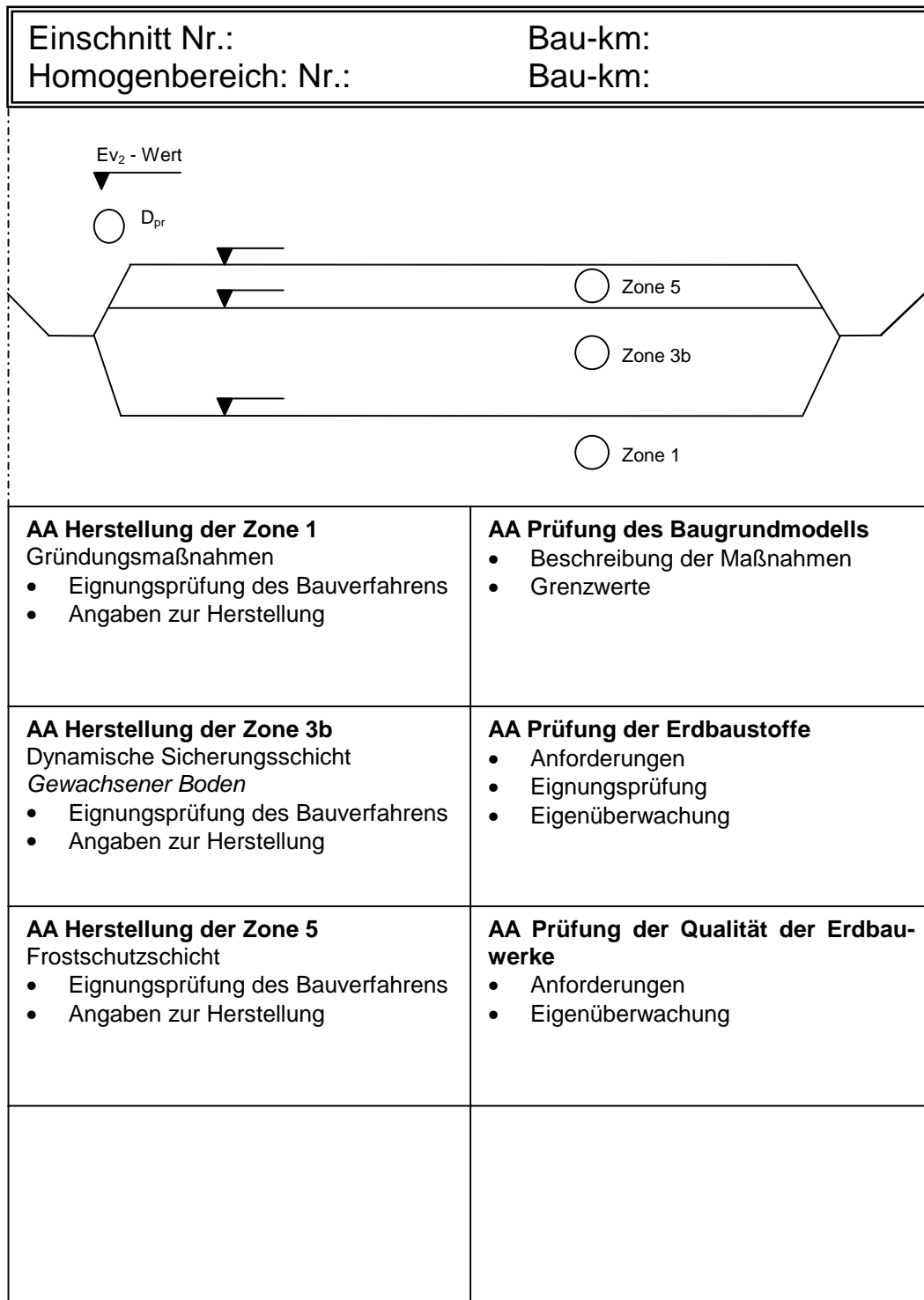


Bild 3.6: Erdbautechnischer Querschnitt für einen Einschnitt (schematisch)

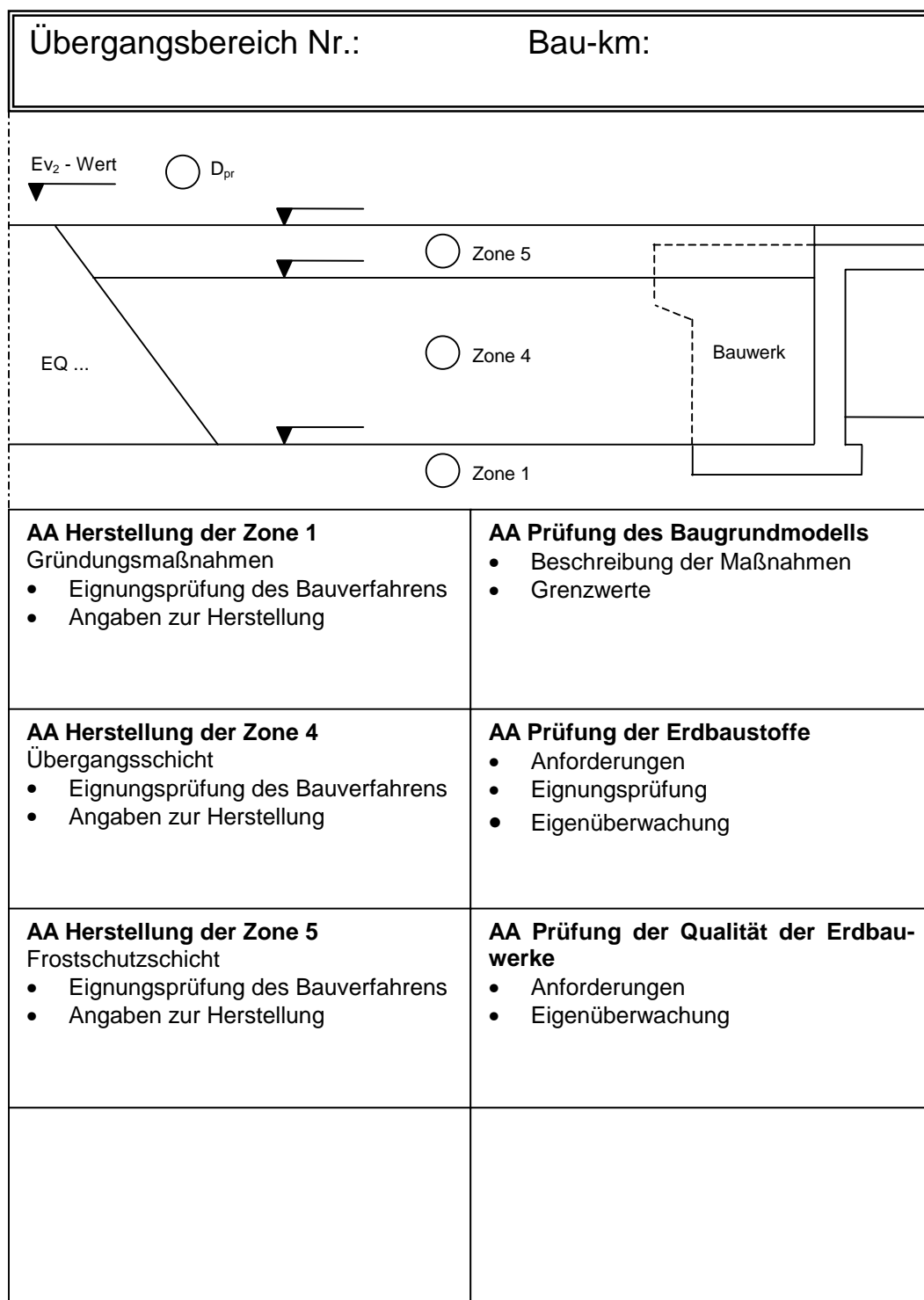


Bild 3.7: Erdbautechnischer Längsschnitt für einen Übergangsbereich auf ein Brückenbauwerk (schematisch)

3.2 Bauablaufplanung

Die notwendigen Maßnahmen im Zuge der Bauablaufplanung zur Realisierung eines qualitätsgesicherten Erdbaus für eine Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn sind Gegenstand der folgenden Ausführungen.

3.2.1 Zeitliche Bauablaufplanung

Im Abschnitt 2.2.2 „Technische Anforderungen an die Erdbau-technik“ wurde erläutert, dass die zulässigen Verformungen des Unterbaus der freien Strecke aus den Systembedingungen der Festen Fahrbahn und dem Komfort-Kriterium bei Hochgeschwindigkeit resultieren.

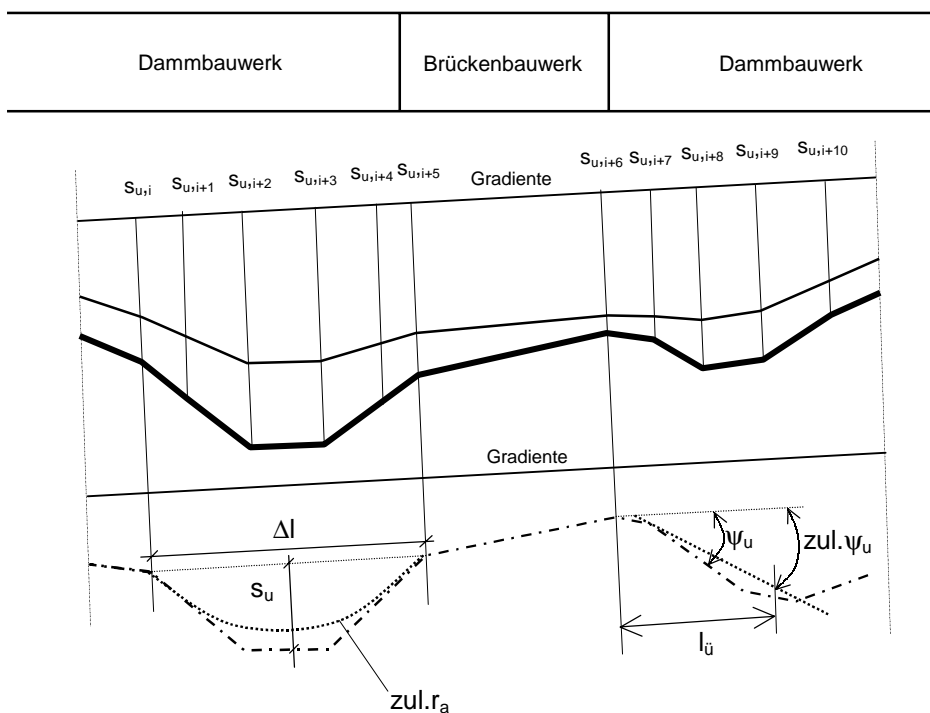
Bedingt durch die Herstellung der Erdbauwerke und der hydraulisch gebundenen Tragschicht auf die jeweilige geodätische Sollhöhe werden die bis dahin aufgetretenen Verformungen bautechnisch ausgeglichen. Die Verformungen bis zu diesem Zeitpunkt sind für die Feste Fahrbahn nicht relevant. Die zulässigen Verformungen des Unterbaus der freien Strecke sind daher auf Restverformungen zu beziehen, die sich ab dem Zeitpunkt des Einbaus der Festen Fahrbahn bis zum Ende der Lebensdauer der Festen Fahrbahn einstellen. Inwieweit die Restverformungen für das Oberbausystem Feste Fahrbahn und das Komfort-Kriterium verträglich sind, muss vor Bauausführung überprüft werden. Sofern die Überprüfung unzulässige Restverformungen aufzeigt, ist der Bauablauf zur Reduzierung der Restverformungen auf das zulässige Maß zeitlich so zu steuern, dass ausreichend Zeit zur Konsolidierung zur Verfügung steht. Die Erfahrung bei der Projektumsetzung der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main zeigt, dass die gesamte

zeitliche Bauablaufplanung sich an den notwendigen Konsolidierungszeiträumen orientiert.

Zur Überprüfung der Restverformungen ist das Zeitsetzungsverhalten zu ermitteln. Es wurde erläutert, dass die Eigenverformungen des Erdkörpers vernachlässigt werden können (vgl. Abschnitt 2.4.2 „Bemessung der Erdbauwerke“). Ebenfalls wurde dargelegt, dass bei Einhaltung der Anforderungen des *AKFF [1]* die plastischen Verformungen aus Verkehr nicht relevant sind (vgl. Abschnitt 2.4.2 „Bemessung der Erdbauwerke“). Bei der rechnerischen Überprüfung des Zeitsetzungsverhaltens kann man sich somit auf die Betrachtung der Restverformungen des Untergrundes beschränken. Sofern in den folgenden Ausführungen, Abbildungen oder Abschnitten Verformungen angesprochen werden, sind grundsätzlich die des Untergrundes gemeint.

Zur Überprüfung des Zeitsetzungsverhaltens werden die berechneten Restverformungswerte in einer „rechnerischen Biegelinie“ (vgl. Bild 3.8) dargestellt. Durch den Vergleich mit den zulässigen Verformungen nach Bild 2.1 und 2.2 werden Bereiche mit unverträglichen Deformationen erkennbar. Wie bereits erläutert, sind alle bis zum Zeitpunkt des Einbaus der Festen Fahrbahn eingetretenen Verformungen ausgeglichen. Somit wird die rechnerische Restverformung auf die Gradienten bezogen.

Auf der linken Seite des Bildes 3.8 ist die geometrische Überprüfung der freien Strecke dargestellt. In der rechten Seite wird die geometrische Prüfung der Übergangsbereiche auf Brückenbauwerke schematisch gezeigt.



$zul.r_a, zul.\psi_u$ innerhalb l_u nach AKFF [1] (vgl. auch Bild 2.1, 2.2)

$$r_a = \frac{\Delta l^2}{4 \cdot s_u} \text{ nach VOGEL UND GRÜBL [37]}$$

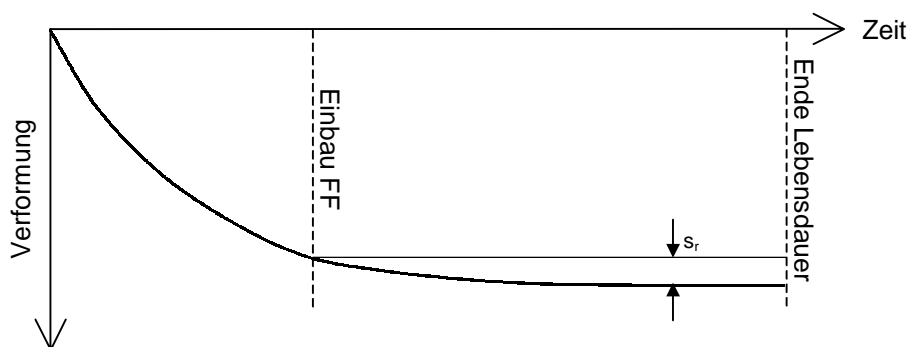
Erläuterung:

- r_a Muldenausrundungsradius
- s_u Plastische Verformungen des Untergrundes
- ψ_u Verdrehung des Erdbauwerkes im Übergangsbereich zum Brückenbauwerk infolge Untergrundverformung
- l_u Länge des Übergangsbereiches auf ein Brückenbauwerk nach AKFF [1]
- Δl Längendifferenz zwischen zwei betrachteten Punkten

- Rechnerische Gesamtverformungen
- Rechnerische Verformung zum Zeitpunkt des Einbaus der FF
- - - - - Rechnerische Restverformung („Rechnerische Biegelinie“)

Bild 3.8: Rechnerische Überprüfung des Zeitsetzungsverhaltens zur Erkennung von Bereichen mit unzulässigen Verformungen (schematisches Beispiel)

Für die Ermittlung der Restverformungen zur zeitlichen Steuerung des Bauablaufes ist das Zeitsetzungsverhalten des Untergrundes zutreffend abzuschätzen. Bild 3.9 zeigt schematisch die Verformungen über die Zeit unter Beachtung der Zeitpunkte Einbau der Festen Fahrbahn und Ende der Lebensdauer.



Erläuterung:

s_r Rechnerische Restverformung

Bild 3.9: Prinzipskizze der zeitlichen Entwicklung der Verformungen

Grundlage der Abschätzung des Zeitsetzungsverhaltens ist die Konsolidierungstheorie. Hierzu müssen der Durchlässigkeitsbeiwert und die Steifigkeit des Untergrundes bekannt sein. Genauere Ergebnisse sind aus der Auswertung der Kompressionsversuche zu erwarten, die den Konsolidierungsbeiwert c_v liefern. Auf die hinlänglich bekannten Ungenauigkeiten dieser Berechnungen in Theorie und Praxis sei an dieser Stelle nur hingewiesen.

Bild 3.10 zeigt an einem schematischen Beispiel, wie der der Überprüfung des Zeitsetzungsverhaltens nach Bild 3.8 zugrunde gelegte Konsolidierungszeitraum bis zum Einbau der Festen

Fahrbahn in die zeitliche Bauablaufplanung integriert werden kann. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Konsolidierungszeiträume so ausreichend sind, dass keine unzulässigen Verformungen in der freien Strecke auftreten.

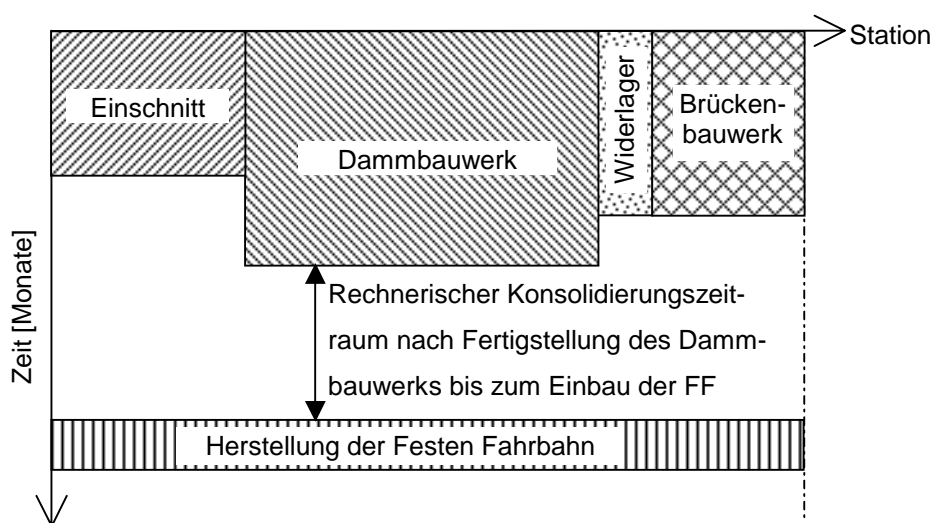


Bild 3.10: Zeitliche Bauablaufplanung (schematisches Beispiel)

Bei der Abschätzung der Verformungen zu einem definierten Zeitpunkt, wie z.B. der Baubeginn der Festen Fahrbahn, ist zu beachten, dass der durch die Schüttung der Erdbauwerke bedingte zeitabhängige Spannungszustand einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Konsolidierung ausübt. Auf der sicheren Seite liegend kann der Beginn der Konsolidierung nach Fertigstellung der Schüttung angesetzt werden. Sollen genauere Betrachtungen, beispielsweise aufgrund eines sehr kurzzeitigen Konsolidierungsverhaltens bei geringen Bauzeiten angestellt werden, so ist die geplante zeitliche Spannungsänderung zu berücksichtigen.

3.2.2 Räumliche Bauablaufplanung

Ziel der räumlichen Bauablaufplanung ist die Zuordnung der Aushub- oder Tunnelausbruchmassen zu den Einbaumassen unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Erdbaustoffe, die in den jeweiligen Arbeitsanweisungen festgelegt sind.

Zur Durchführung dieser Aufgabe sind alle Aushub- oder Tunnelausbruchmassen und Einbaumassen nach Art, Menge und Ort zu klassifizieren. Auf dieser Datengrundlage erfolgt die Planung der räumlichen Bauablaufplanung. Die Aushub- oder Tunnelausbruchmassen müssen hierbei als aufgelockerte Massen den Erdbauwerken zugeordnet werden (vgl. Bild 3.11).

Die Zuordnung der Aushubmassen zu den Einbaumassen muss derart erfolgen, dass die in den Arbeitsanweisungen Prüfung der Erdbaustoffe festgelegten Anforderungen an die Erdbaustoffe eingehalten werden.

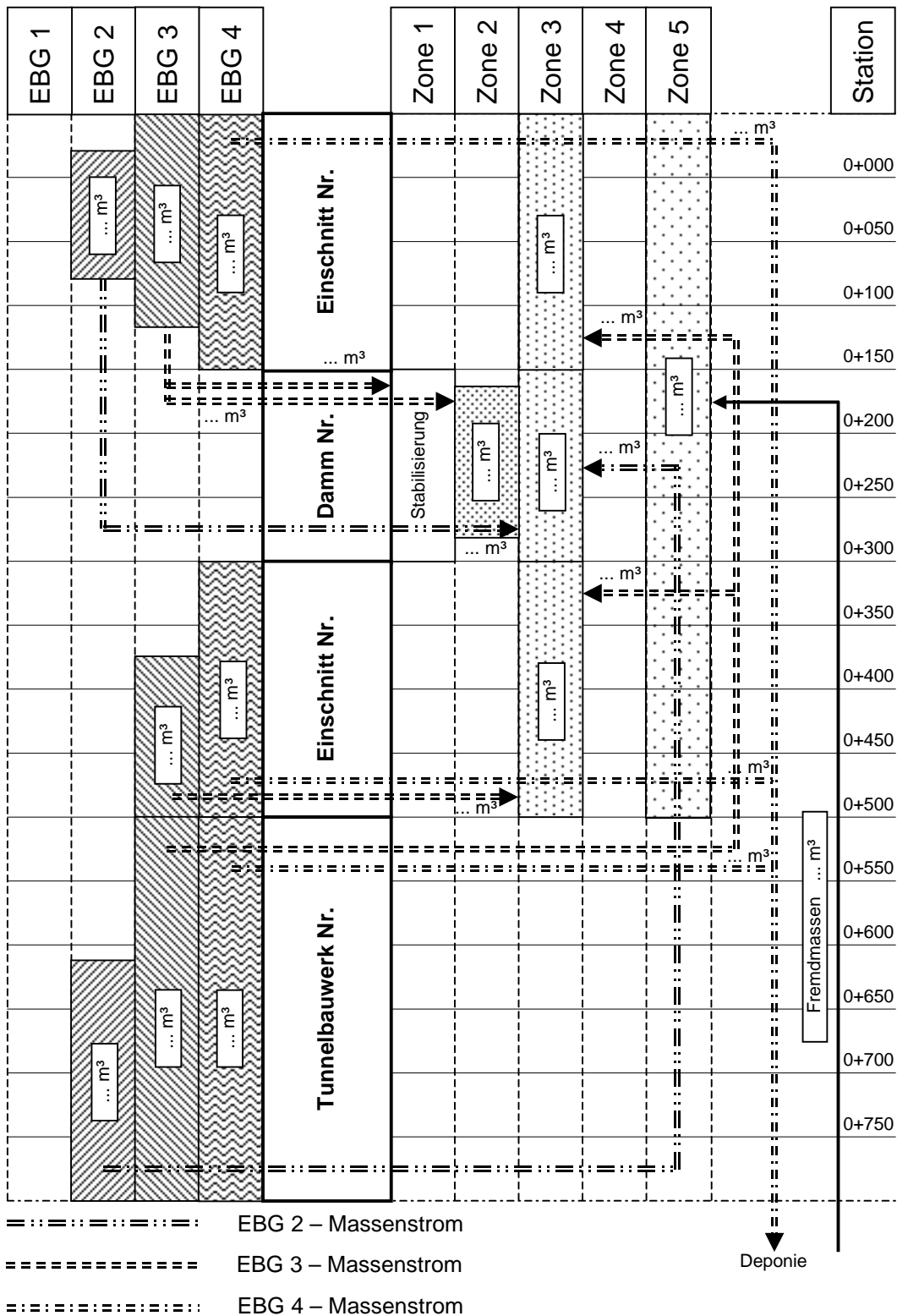


Bild 3.11: Räumliche Bauablaufplanung (schematisches Beispiel)

Zur Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit ist stets die Verhältnismäßigkeit der Transportwege zu überprüfen (vgl. Bild 3.12). Lange Transportwege sind in das Verhältnis zu Bodenconditionierungsmaßnahmen oder Fremdmassenzukauf zu setzen, woraus sich die wirtschaftlichere Vorgehensweise ableiten lässt.

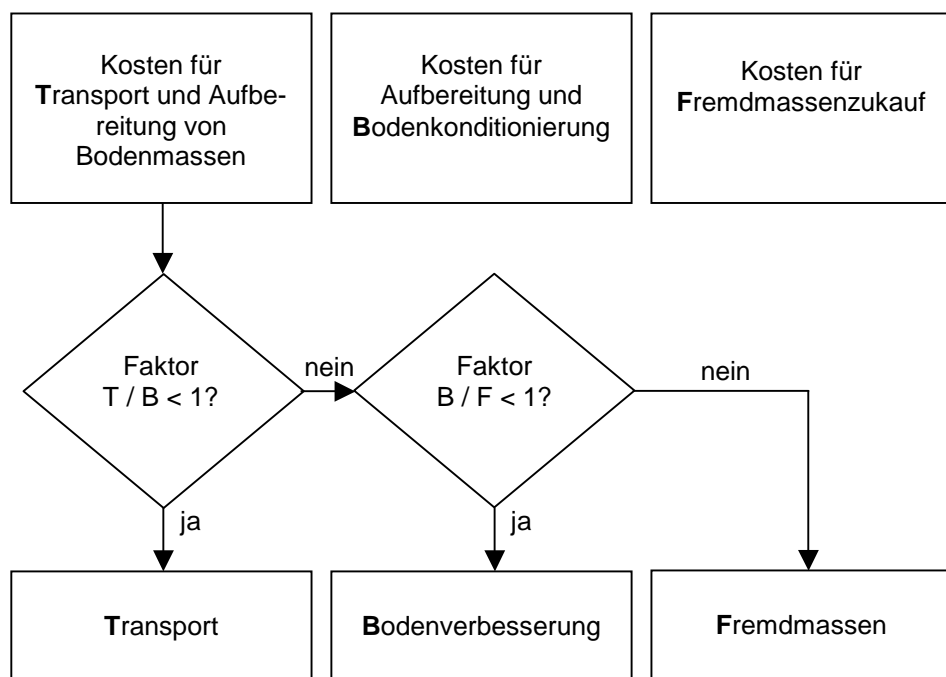


Bild 3.12: Verfahrensanweisung zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit langer Transportwege

3.2.3 Erstellung von Datenblättern zur zeitlichen und räumlichen Bauablaufplanung

Aus den vorgenannten Ausführungen wird ersichtlich, dass die Bauablaufplanung eine zeitlich-räumliche Aufgabe darstellt. Dies führt unweigerlich zu einer sehr komplexen ingenieurtechnischen Aufgabe, für die ein Kontrollinstrumentarium zur Überprüfung der

räumlichen und zeitlichen Bauablaufplanung sinnvoll ist. Hierzu wird das in Bild 3.13 dargestellte Datenblatt vorgeschlagen, das alle relevanten Informationen beinhaltet. Durch einfache Gegenrechnungen können die qualitativen und quantitativen sowie zeitlichen Massenströme auf der Entnahme- und Einbauseite auf ihre Schlüssigkeit überprüft werden. Die Wirtschaftlichkeitsfaktoren T/B und B/F nach Bild 3.12 werden ebenfalls dokumentiert.

<p>Massenquelle Nr.</p> <p>Art</p> <p>Kubatur m³</p> <p>Zeitraum von bis</p>	<p>Schüttmassen:</p> <p>➤ Zone 1 m³</p> <p>➤ Zone 2 m³</p> <p>➤ Zone 3a/3b m³</p> <p>➤ Zone 4 m³</p>
--	---

<p>Massenstrom Nr.</p> <p>Zone</p> <p>Faktor T / B B / F</p> <p>Massenstrom von nach</p> <p>Kubatur m³</p> <p>Zeitraum von bis</p>
--

<p>Massenstrom Nr.</p> <p>Zone</p> <p>Faktor T / B B / F</p> <p>Massenstrom von nach</p> <p>Kubatur m³</p> <p>Zeitraum von bis</p>
--

<p>Massenstrom Nr.</p> <p>Zone</p> <p>Faktor T / B B / F</p> <p>Massenstrom von nach</p> <p>Kubatur m³</p> <p>Zeitraum von bis</p>
--

<p>Massenstrom Nr.</p> <p>Massenstrom von nach</p> <p>Kubatur m³</p> <p>Zeitraum von bis</p>

<p>Damm Nr. Homogenbereich Nr.</p> <p>Zone 1 m³ / Zone 2 m³ / Zone 3a/3b m³</p> <p>Zeitraum der Schüttung von bis</p> <p>Herkunft der Massen:</p>			
Massenstrom Nr.	Kubatur	Zone	Zeitraum
Fremdmassen			

<p>Einschnitt Nr. Homogenbereich Nr.</p> <p>Zone 1 m³ / Zone 3b m³</p> <p>Zeitraum der Schüttung von bis</p> <p>Herkunft der Massen:</p>			
Massenstrom Nr.	Kubatur	Zone	Zeitraum
Fremdmassen			

<p>Übergangsbereich Nr.</p> <p>Zone 1 m³ / Zone 4 m³</p> <p>Zeitraum der Schüttung von bis</p> <p>Herkunft der Massen:</p>			
Massenstrom Nr.	Kubatur	Zone	Zeitraum
Fremdmassen			

<p>Ablagerungsfläche Nr.</p> <p>Kubatur m³</p> <p>Zeitraum der Schüttung von bis</p> <p>Herkunft der Massen:</p>		
Massenstrom Nr.	Kubatur	Zeitraum

Bild 3.13: Datenblatt zur zeitlichen und räumlichen Bauablaufplanung

3.3 Steuerung der qualitätsrelevanten Arbeitsabläufe

Der Qualitätssicherung wird durch die Planung und Anwendung der Arbeitsanweisungen, die die Materialien, die Art und Weise der baulichen Umsetzung, die Qualitätsanforderungen und die Prüfungsmaßnahmen nach Art und Zahl festlegen, alleine nicht genüge getan. Die Arbeitsanweisungen beinhalten keine Angaben, wie im Falle einer relevanten Abweichung des Baugrundes vom Modell oder nicht erreichten Qualität der Erdbauwerke zu verfahren ist. Ebenfalls ist die zeitliche Einbindung der Arbeitsanweisungen in den Baubetrieb nicht geklärt. Daher sind Regularien für die Umsetzung der Arbeitsanweisungen notwendig. Diese Steuerung der qualitätsrelevanten Arbeitsabläufe erfolgt durch Verfahrensanweisungen. Die für den Erdbau benötigten Verfahrensanweisungen sind die allgemein gültigen Verfahrensanweisungen Prüfung des Baugrundmodells und Herstellung der Zone 1 bis Zone 5 entsprechend den Bildern 3.14 und 3.15.

Der Bauausführende ist als Ersteller der Erdbauwerke für die Umsetzung der Verfahrensanweisungen verantwortlich. Durch Mitwirkung des Objektüberwachers bei der Durchführung der Eigenüberwachung können Kontrollprüfungen im Sinne der *ZTVE-STB 94 [39]* entfallen. Durch die Beteiligung des Objektüberwachers bei der Dokumentation wird der Forderung der *ZTVE-STB 94 [39]* genüge getan, dem Auftraggeber auf Verlangen die Ergebnisse der Eigenüberwachung vorzulegen.

3.3.1 Verfahrensanweisung zur Prüfung des Baugrundmodells

Bild 3.14 zeigt das Flussdiagramm zur Prüfung des Baugrundmodells. Wesentliches Element ist hierbei die Umsetzung der Arbeitsanweisung Prüfung des Baugrundmodells. Sollten Abwei-

chungen von dem in der Fachplanung zugrunde gelegten Baugrundmodell auftreten, so sind gegebenenfalls zusätzliche Feld- und Laborversuche nach Tabelle 2.2 und 2.3 erforderlich. Hiernach erfolgt dann die Überarbeitung der Ausführungsplanung und die Freigabe zur Herstellung der Gründung.

3.3.2 Verfahrensanweisung zur Herstellung der Erdbauwerke

In Bild 3.15 ist das Flussdiagramm für die Herstellung der Erdbauwerke dargestellt. Zunächst erfolgt, wie im Erdbau allgemein üblich, eine Eignungsprüfung und eine Eigenüberwachung der zur Verwendung vorgesehenen Baustoffe entsprechend der Arbeitsanweisung. Sollte sich hierbei herausstellen, dass das Material nicht der geforderten Qualität entspricht, ergibt sich die Möglichkeit der Modifikation der Ausführungsplanung oder der Wahl eines alternativen Baustoffes. Hiernach erfolgt die Durchführung der Arbeitsanweisungen zur Herstellung der im Bau befindlichen Zone und zur Überprüfung der Qualität. Sofern die geforderte Qualität nachgewiesen werden konnte, erfolgt die Freigabe der eingebauten Lage. Anderenfalls sind Nachbesserungsarbeiten in den relevanten Bereichen erforderlich. Die Leistung gilt als abgeschlossen, wenn das Bauwerk in allen Lagen qualitätsgerecht fertiggestellt ist.

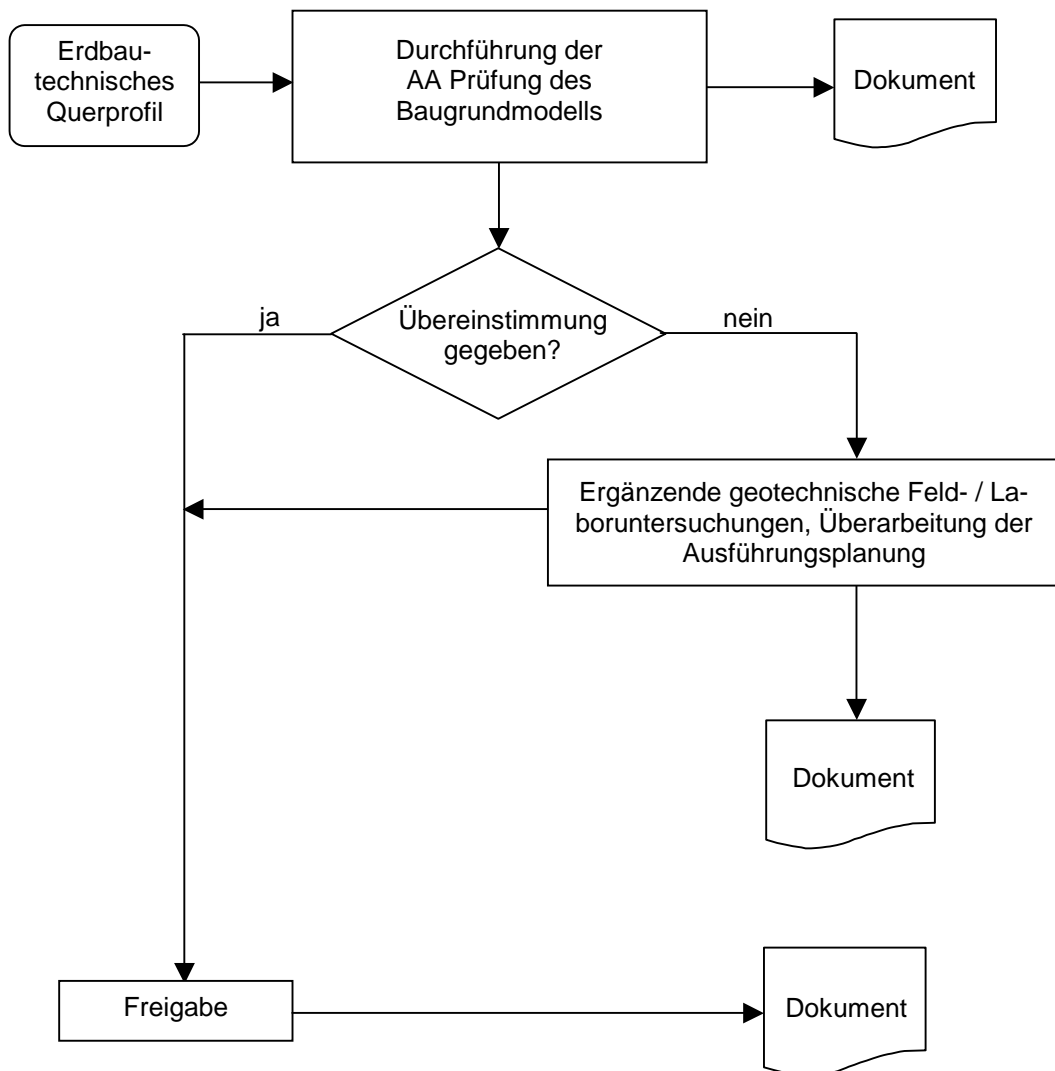


Bild 3.14: Verfahrensanweisung zur Prüfung des Baugrundmodells

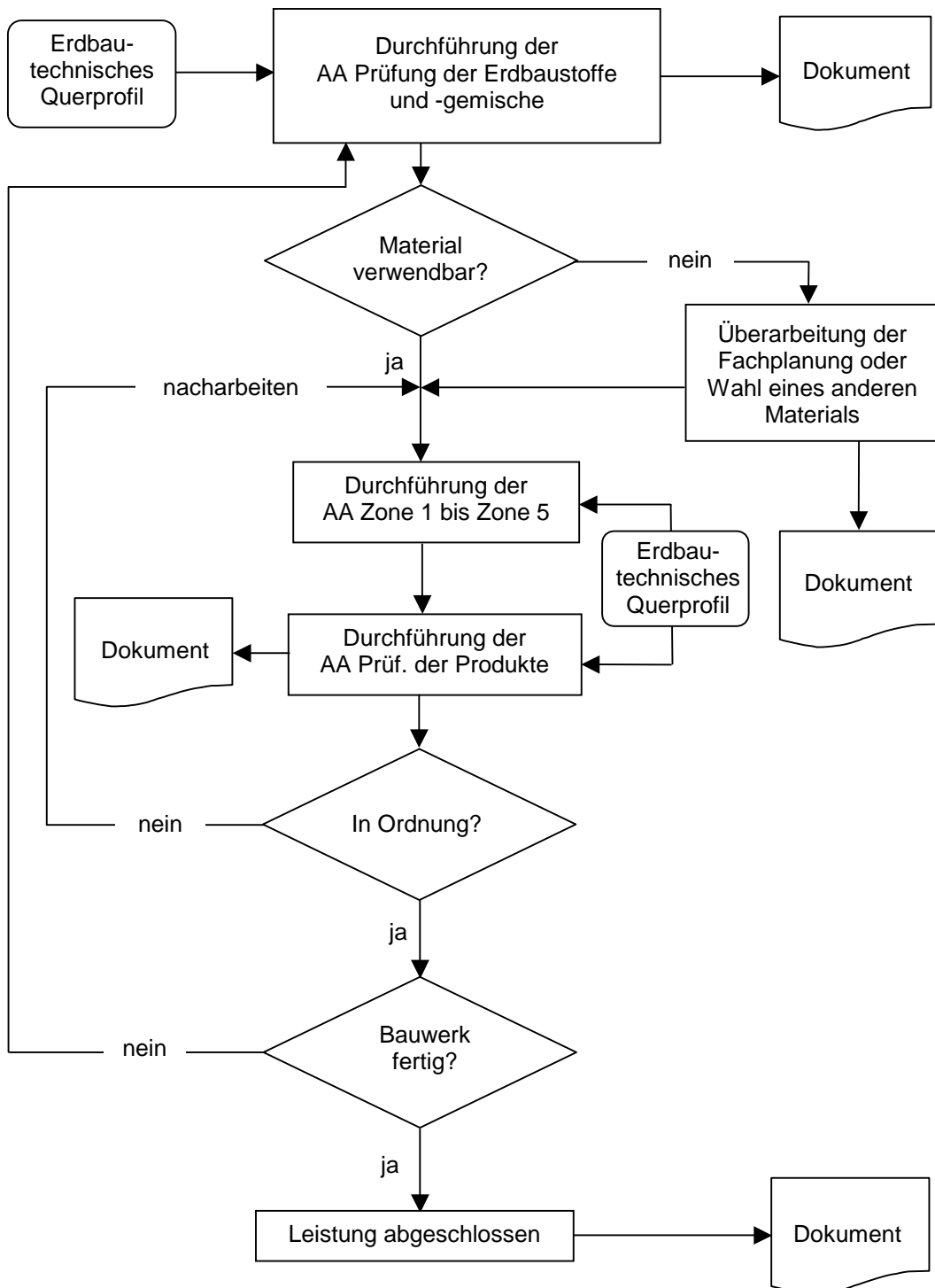


Bild 3.15: Verfahrensanweisung zur Herstellung von Erdkörpern und deren Gründungen

3.4 Verformungskontrolle des Fahrweges

Auf die Bedeutung einer zutreffenden Verformungsermittlung wurde eingehend eingegangen. Auf der planerischen Seite sind alle möglichen Schritte zu unternehmen, um zutreffende Verformungsprognosen zu erhalten. Wie im Rahmen der erdbautechnischen Fachplanung erläutert, stellen die Verformungsberechnungen aber immer Abschätzungen dar.

Durch Beobachtung werden die Verformungen messtechnisch erfassbar und somit auswertbar. Nur hierdurch wird sichergestellt, dass die Restverformungen, die sich nach Einbau der Festen Fahrbahn einstellen, für den Oberbau verträglich sind. Darüber hinaus kann im Fall nicht prognostizierter und somit unerwarteter Verformungen eine Strategie zum Ausgleich der möglicherweise unzulässigen Verformungen entwickelt und umgesetzt werden. Zur Erreichung dieser Zielsetzung sind die nachfolgend aufgeführten Maßnahmen notwendig.

3.4.1 Planung der Anordnung von Verformungsmesspunkten

Zur Durchführung der Verformungskontrolle ist die Anordnung der Messpunkte festzulegen. Prinzipiell erfolgen Messungen an den Stellen, die aus den Erkenntnissen der rechnerischen Verformungsermittlung oder wegen der Gründungsmaßnahmen als kritisch einzustufen sind. Setzungsmessungen sollten daher durchgeführt werden, wenn

- der zeitliche Verlauf der Setzungen mit den erfassbaren Konsolidierungsfaktoren nicht genügend genau prognostiziert werden kann,

- die rechnerischen Restverformungen des fertigen Erdkörpers mehr als 6 cm betragen,
- die Dammhöhe größer als 10 m ist,
- zur Baugrundverbesserung Geokunststoffe verwendet oder
- relevante Hebungen in Einschnitten erwartet werden.

Da möglicherweise lokale und tief liegende Schwachstellen im Zuge der Baugrunduntersuchungen und der Prüfung des Baugrundmodells nicht ersichtlich wurden, sind zusätzlich je Dammbauwerk mindestens ein und alle 100 m eine weitere Messung vorzusehen. Im Bereich der Übergangsbereiche auf Brückenbauwerke sind ebenfalls Messstellen anzuordnen, deren Platzierungen nach Maßgabe der prognostizierten Verformungsmulde bestimmt werden.

Bild 3.16 zeigt an einem schematischen Beispiel, wie die Festlegung der Verformungsmesspunkte erfolgt.

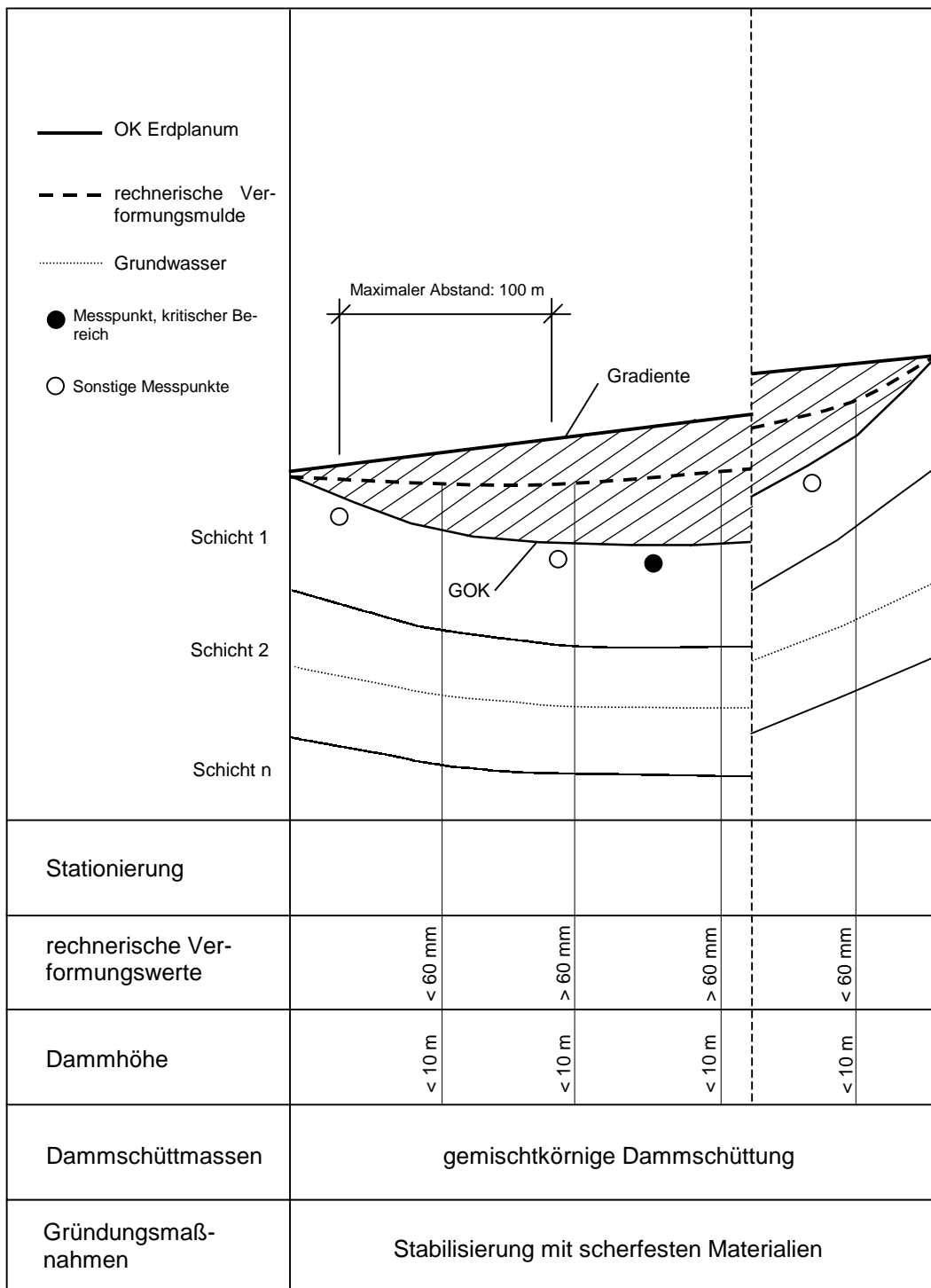


Bild 3.16: Festlegung von Verformungsmesspunkten (schematisches Beispiel)

3.4.2 Durchführung der Verformungsmessungen

Zur Durchführung von Setzungsmessungen bei Erdbauwerken für Verkehrsanlagen können während der Erstellung Stangenpegel oder Differenzdruckmesser eingesetzt werden. Nach Herstellung der Erdkörper sind Setzungspegel auf der Oberfläche verwendbar.

Stangenpegel haben den erheblichen Nachteil, dass sie den Erdbaubetrieb stören, in ihrer Höhe entsprechend dem Schüttvorgang angepasst werden müssen und im Bereich des Pegels kein maschineller Erdbau möglich ist. Erfahrungsgemäß ist hiermit eine Beeinträchtigung der Qualität des Erdbaus verbunden. Eine Verwendung von Stangenpegeln wird daher nicht empfohlen.

Der Differenzdruckmesser hat keine negativen Auswirkungen auf den Baubetrieb. Dieser misst den Flüssigkeitsdruck in einer Setzungsmesszelle, die im gewachsenen Boden mittig unter dem Erdbauwerk angeordnet wird. Zusammendrückungen des Untergrundes führen zu einer Änderung des hydrostatischen Druckes, der im Differenzdrucknehmer gemessen wird. Über die Potenzialänderung wird die Verformung errechnet. Aus praktischen Erfahrungen liegt die Systemgenauigkeit bei etwa ± 1 cm.

Nach Fertigstellung des Erdkörpers und Erreichen der Systemgenauigkeit der Differenzdruckmesser können weitere Verformungen durch Setzungspegel auf der Oberfläche des Erdkörpers gemessen werden. Die Pegel bestehen aus ausreichend verschiebesicheren Stahlstangen, die terrestrisch in einem definierten Zeitintervall aufgemessen werden. Diese zeigen den zeitlichen Verformungsverlauf des Erdkörpers und des Untergrundes an.

3.4.3 Definition von zeitabhängigen Schwellenwertlinien

Für die jeweiligen Messpunkte werden Schwellenwerte festgelegt, deren Überschreitung dem Bauausführenden einen Hinweis darauf geben, wo sich Verformungsbeträge größer als in der erdbautechnischen Fachplanung rechnerisch ermittelt einstellen können. Die Festlegung der Schwellenwerte darf hierbei nicht nur in Bezug auf die prognostizierten Verformungen gesehen werden, vielmehr ist auch der Zeitsetzungsverlauf zu beachten. Aus dieser Überlegung heraus lässt sich aus ingenieurtechnischen Gesichtspunkten eine zeitabhängige Schwellenwertlinie ermitteln (vgl. Bild 3.17). Diese Schwellenwertlinie muss die zulässigen geometrischen Anforderungen beachten und eine ausreichende Sicherheitsreserve aufweisen.

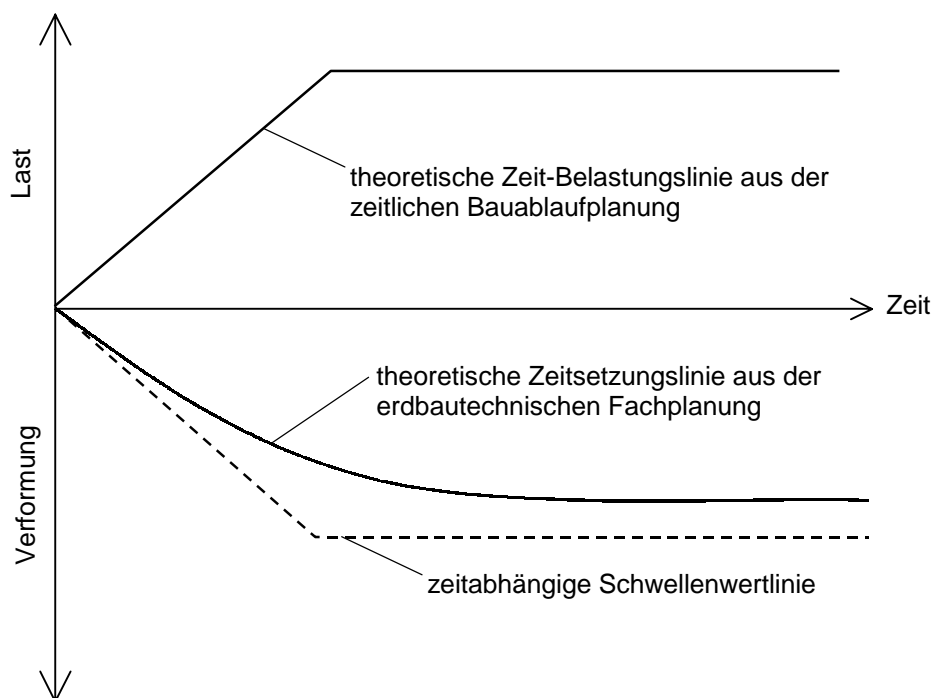


Bild 3.17: Ermittlung der Schwellenwertlinie (schematisch)

Sollte der Schwellenwert an einem Messpunkt überschritten werden, so sind geeignete Korrekturmaßnahmen festzulegen und durchzuführen. Diese sehr theoretische Feststellung lässt sich praktisch kaum umsetzen, da zu diesem Zeitpunkt eine Beschleunigung der Konsolidierung nur noch durch Überhöhung der Erdbauwerke zur Erhöhung des Spannungszustandes möglich ist. Dies zeigt nochmals sehr eindringlich die Bedeutung des zutreffenden Baugrundmodells, einer genauen Verformungsberechnung und der rechnerischen Überprüfung des Zeitsetzungsverhaltens. Zumindest aber werden Problembereiche mit vermeintlich unzulässigen Verformungen frühzeitig im Vorfeld sichtbar und eine beschleunigte Lastaufbringung kann erfolgen.

3.4.4 Ermittlung der Last-Verformungs-Diagramme

Die mittels Differenzdruckmesser und Setzungspegel zu überprüfenden Verformungen werden in einem regelmäßigen Zeitintervall gemessen und für jeden Messquerschnitt in Last-Verformungs-Diagrammen eingetragen (vgl. Bild 3.18).

Der Zeitpunkt, ab dem die Messungen der Pegel aufgrund möglicher Messungenauigkeiten keine weiteren Informationen über das Zeitsetzungsverhalten des Erdkörpers liefern, ist im Wesentlichen von der Messtechnik, der baulichen Sicherung sowie der Temperaturempfindlichkeit der Pegel abhängig. Unter Berücksichtigung der erdbautechnischen Anforderungen, die eine Verformung des Unterbaus aus statischen Einwirkungen von + 1,5 cm zulässt, ist eine Messgenauigkeit von $\pm 0,1$ cm anzustreben.

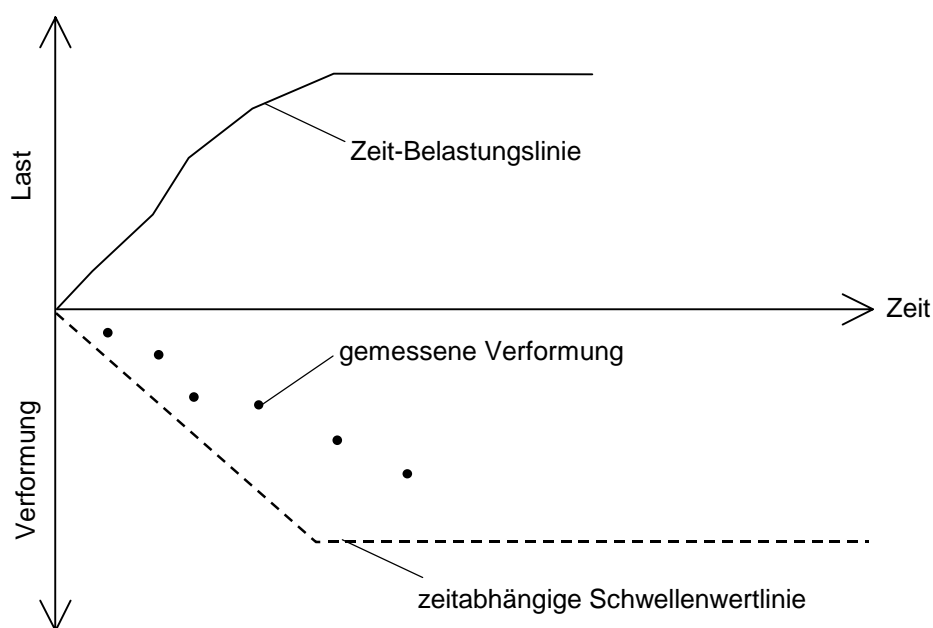


Bild 3.18: Darstellung von Spannung und Verformung im Querschnitt (schematisch)

3.4.5 Prognose der Restverformungen

Die Gesamtverformungsprognose ist notwendig, um die zu erwartenden Restverformungen aus der Differenz der prognostizierten Gesamtverformungen zu den Verformungen zum Zeitpunkt des Einbaus der Festen Fahrbahn zu ermitteln. *SCHULTZE UND HORN [28]* stellt eine zeichnerische Variante der Prognose der Gesamtverformungen vor. Tabellenkalkulationsprogramme bieten darüber hinaus die Möglichkeit verschiedene Regressionslinien zu berechnen. *DÖRR ET AL [3]* verwenden hierbei zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufes der Setzungen eine Funktion mit einem Polynom dritten Grades. Unabhängig von der Vorgehensweise kann die Setzung für den gesuchten Zeitpunkt, nämlich dem Erreichen der Lebensdauer der Festen Fahrbahn, berechnet werden.

Bild 3.19 zeigt die Verfahrensanweisung zur Prognose der Restverformungen.

Um verlässliche Aussagen insbesondere hinsichtlich der Prognose der Restsetzungsmulde in Längsrichtung (vgl. Bild 3.20) zu bekommen, schlagen *DÖRR ET AL [3]* folgende Regelabstände für Messungen vor, die die Messpunkte nach Abschnitt 3.4.1 entsprechend verdichten:

- In Einschnitten und Geländegleichlagen ca. 100 m
- In Dammbereichen ca. 50 m
- In setzungsgefährdeten Abschnitten Verdichtung auf 25 m
- In Hinterfüllbereichen Verdichtung auf 5 bis 10 m

Es versteht sich, dass zur Verdichtung der Messabstände nur noch Setzungspegel auf der Oberkante der Frostschuttschicht (Zone 5) in Frage kommen. Die Verfahrensanweisung nach Bild 3.19 beginnt erst bei der Stufe der Einrichtung der Setzungspegel.

Nach *DÖRR ET AL [3]* können Querverkantungen bei Dammaufstandsflächen mit einer Neigung größer als 1:5 durch zusätzliche Pegel an der Dammschulter erfasst werden.

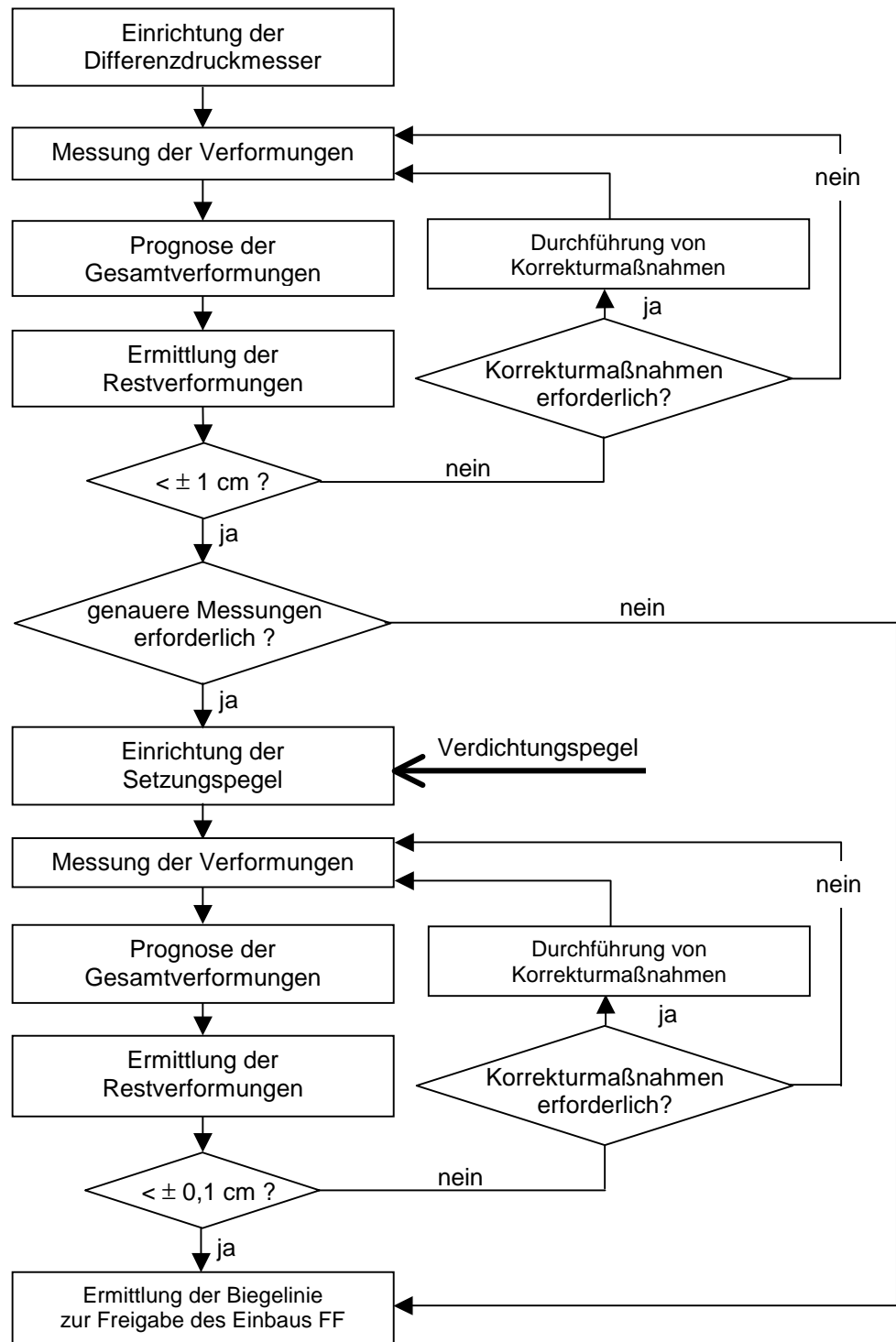


Bild 3.19: Verfahrensanweisung zur Prognose der Restverformungen

3.4.6 Freigabe des Erdkörpers zum Einbau der Festen Fahrbahn

Bild 3.20 zeigt beispielhaft, wie nach Abschluss aller Messungen durch eine Restverformungslinie der Nachweis der Erfüllung der Anforderungen an die Erdbauwerke geliefert werden kann. Zur Erläuterung sei darauf hingewiesen, dass vor dem Einbau der Festen Fahrbahn die Oberkante der Frostschuttschicht auf die genaue Höhe entsprechend der Gradienten gebracht und / oder die hydraulisch gebundene Tragschicht des Oberbaus entsprechend verdickt ausgeführt wird, so dass alle bis dahin eingetretenen Verformungen für die Verträglichkeit der Festen Fahrbahn irrelevant sind. (vgl. hierzu analoge Betrachtung in Abschnitt 3.2.1 „Zeitliche Bauablaufplanung“). Die im Bild 3.20 dargestellte zulässige Muldenausrundung und die zulässige maximale Verformung in der Mulde beziehen sich auf die Restverformungslinie, die sich aus der Differenz der Gesamtverformungslinie zu der Verformungslinie zum Zeitpunkt des Einbaus der Festen Fahrbahn ergibt. Diese Restverformungslinie kann aufgrund der vorgenannten bautechnischen Vorgehensweise parallel zur Gradienten angetragen werden.

Sofern in definierten Bereichen der Strecke entsprechend dem hier gezeigten Nachweis der Einbau der Festen Fahrbahn zulässig ist, erfolgt die Freigabe zur Herstellung des Oberbausystems. Die Phase der Ausführung des Erdbaus ist damit abgeschlossen.

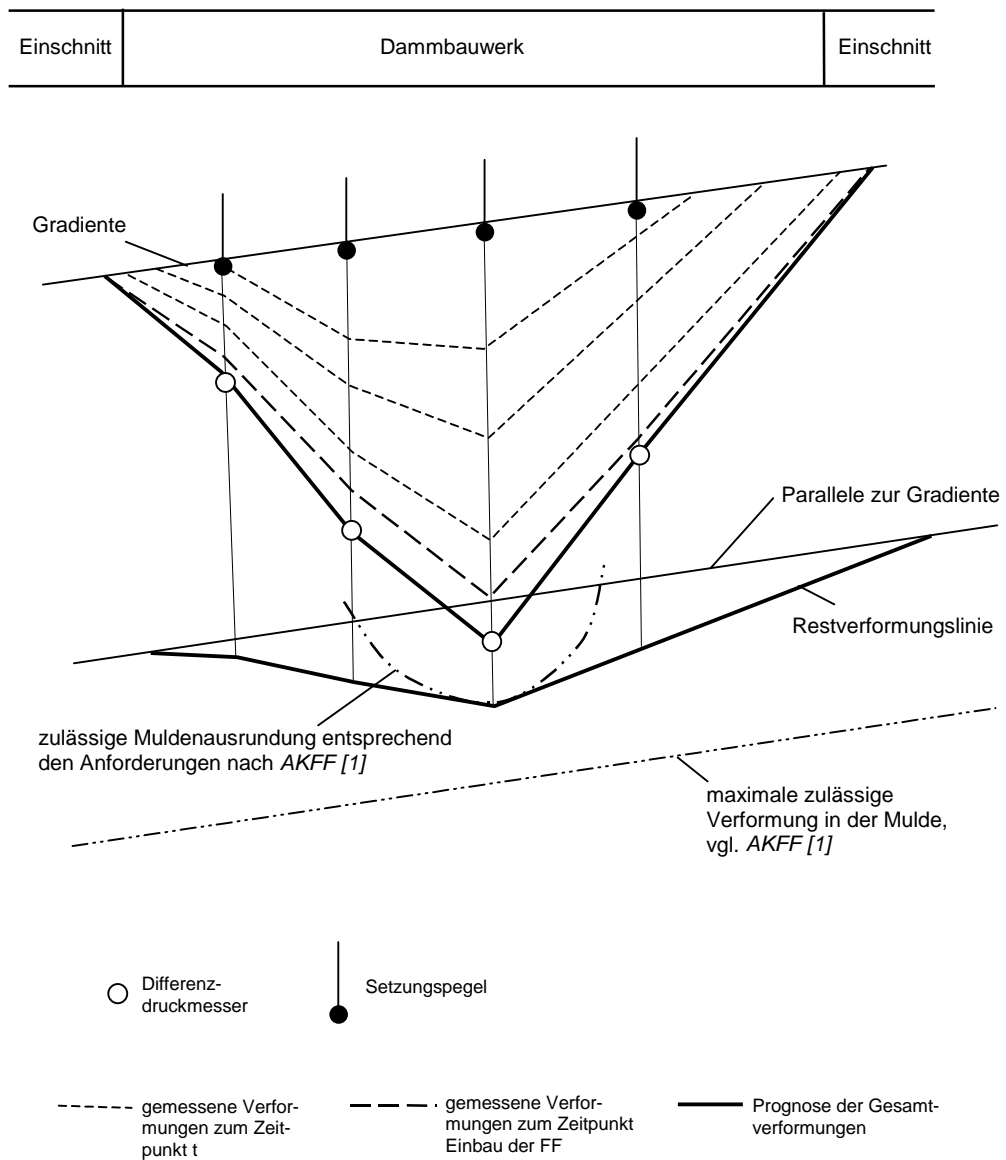


Bild 3.20: Restverformungslinie des Unterbaus der freien Strecke (schematisches Beispiel)

4. PROZESSABLAUF BEI DER UMSETZUNG DES KONZEPTEES

Die Arbeit ist in zwei systematische Teile gegliedert. In der Realität ist eine derart klare Trennung nicht erkennbar, vielmehr gibt es Rückwirkungen zwischen der Projektumsetzung und der Erdbautechnik. In Bild 4.1 ist der Prozessablauf, der die wesentlichen Arbeitsschritte des Konzeptes und die zugehörigen Wechselwirkungen beinhaltet, dargestellt.

Die Baugrunduntersuchung und das zugehörige Baugrundmodell dienen als Grundlage der erdbautechnischen Fachplanung, in deren Ergebnis die Erdbautechnik steht. Die Schnittstelle zwischen der Erdbautechnik und der Projektumsetzung sind die Arbeitsanweisungen, die wie die vorgenannten Arbeitsprozesse Baugrunduntersuchung, Baugrundmodell und Fachplanung verantwortlich vom Fachplaner durchzuführen bzw. aufzustellen sind.

Durch die Bauablaufplanung des Bauausführenden können sich Grundlagen der Fachplanung ändern, so dass eine Anpassung der Planung und der Arbeitsanweisungen notwendig wird (vgl. Abschnitt 3.2 „Bauablaufplanung“).

Sofern bei der Durchführung der Arbeitsanweisung zur Prüfung des Baugrundmodells vom Bauausführenden relevante Abweichungen vom Modell festgestellt werden, sind weitere Baugrunduntersuchungen erforderlich (vgl. Bild 3.14). Der Prozessablauf wiederholt sich für den relevanten Streckenabschnitt von der Baugrunduntersuchung bis zur Durchführung der Arbeitsanweisungen, so dass zusätzlich die vorgenannte Rückkoppelung zwischen der Bauablaufplanung und der Fachplanung vonnöten sein kann.

Die Durchführung der Arbeitsanweisung zur Prüfung der Erdbaustoffe, die im Verantwortungsbereich des Bauausführenden liegt, kann zu einer notwendigen Änderung der Fach- oder Bauablaufplanung führen (vgl. Bild 3.15). Eine Änderung der Fachplanung bedingt analog zu obigem eine Modifizierung der Arbeitsanweisungen. Durch eine Umstellung der Bauablaufplanung sind nach vorgenanntem Zusammenhang möglicherweise die Fachplanung und die Arbeitsanweisungen erneut anzupassen.

Zeigt sich bei der vom Bauausführenden verantwortlich durchzuführenden Kontrolle der Verformungen des Fahrweges eine Überschreitung der Schwellenwerte, ist nur eine Anpassung des Bauablaufes zielführend (vgl. Abschnitt 3.4.3 „Definition von zeitabhängigen Schwellenwertlinien“). Der Prozess wird somit auf die Stufe der Bauablaufplanung rückgeführt, wo er sich dann weiter nach den zuvor dargestellten Abläufen entwickelt. Ausgenommen ist eine Durchführung der Arbeitsanweisung zur Prüfung des Baugrundmodells mit der damit verbundenen möglichen Rückführung auf die Stufe der Baugrunduntersuchung, da die Prüfung bereits abgeschlossen ist und sich der Baugrund durch den laufenden Bauprozess einer weiteren Feststellung entzieht.

In dem Flussdiagramm sind externe Eingriffe in den Bauablauf, beispielsweise durch Behinderungen oder Änderungsanordnungen des Auftraggebers, gesondert dargestellt. Diese in der Bau Praxis ständig vorkommenden Ereignisse greifen in den Prozess an der markierten Stelle der Bauablaufplanung ein, mit der Folge, dass der Ablauf nach obigem Muster erneut beginnt.

Der Prozessablauf, der mit der Freigabe des gesamten Fahrweges abschließt, zeigt eine fortwährende Zusammenarbeit zwi-

schen Fachplaner und Bauausführendem. Auch die externen Eingriffe in den Baubetrieb machen eine permanente Abstimmung und Anpassung zwischen Planung und Projektumsetzung notwendig.

Der hier vorgestellte Prozessablauf verdeutlicht zwei wesentliche Managementgrundsätze bei der Abwicklung des Erdbaus für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn. Der Fachplaner gehört zum Stammpersonal einer Organisation, die mit der Abwicklung einer solchen Baumaßnahme betraut wurde. Zugleich ist die Fachplanung und die Projektumsetzung in der Schnittstelle durch eine qualifizierte Person zu koordinieren und zu steuern. Beides wird in den folgenden Ausführungen zur Einbindung des Konzeptes in ein effizientes Projektmanagement vertieft.

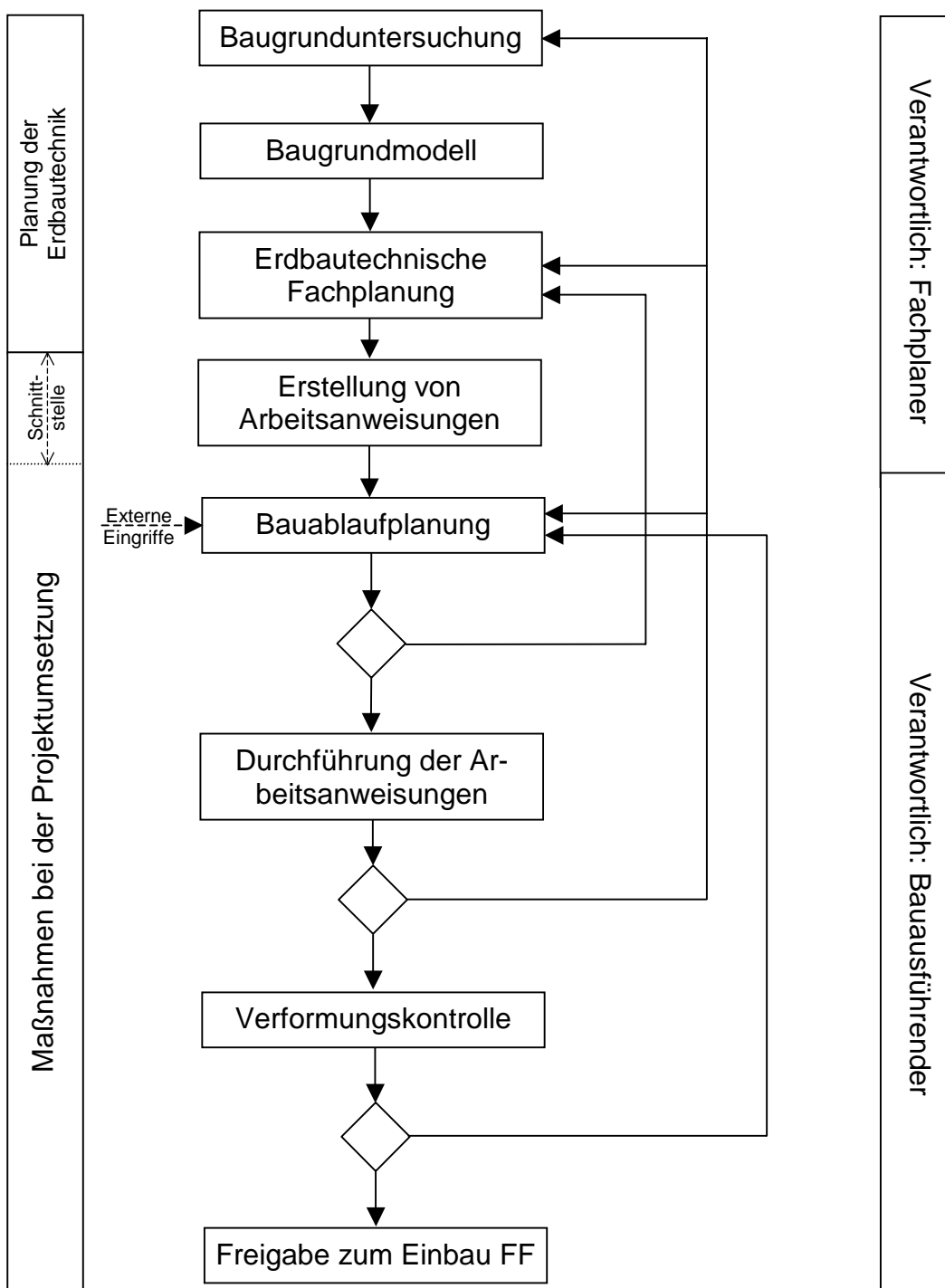


Bild 4.1: Prozessablauf bei der Umsetzung des Konzeptes

5. EINBINDUNG DES KONZEPTES IN EIN PROJEKTSPEZIFISCHES QUALITÄTSMANAGEMENT

In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, wie das Konzept in ein Qualitätsmanagement-System nach der EN ISO 9001:2000 integriert werden kann.

Die Herstellung von Erdbauwerken unterscheidet sich von den meisten qualitätsgesteuerten Produktionsprozessen durch die Tatsache, dass die Erdbauwerke Unikate darstellen. Daneben werden infolge des Umfanges von Neubaustrecken spezielle Organisationsformen (Arbeitsgemeinschaften, Projektgruppen) für die Projektrealisierung gewählt. In der Konsequenz bedeutet dies, dass entweder für die Projektrealisierung ein eigenständiges QM-System eingeführt oder bestehende Systeme für die Projektrealisierung angepasst werden. Da die Einführung eines eigenen QM-Systems bis hin zur Zertifizierung aufgrund des langen Zeitraumes in der Regel ausscheidet, ist die Implementierung eines projektbezogenen Qualitätsmanagements in zertifizierte QM-Systeme der Bauausführenden zielführend. Dieses projektbezogene Qualitätsmanagement wird hier zur Abgrenzung zu zertifizierten QM-Systemen als projektbezogenes Qualitätsmanagementsystem (PQM-System) bezeichnet. Da dieser PQM-Plan eine Anpassung eines oder mehrerer zertifizierter QM-Systeme beinhaltet, kann auf eine Zertifizierung verzichtet werden.

Das hier vorgestellte Konzept kann in ein solches PQM-System integriert werden. Hierbei bezieht sich die Einbindung in die Wertschöpfungskette, also der Produktrealisierung. Bild 5.1 zeigt das entsprechend modifizierte Modell eines prozessorientierten Qualitätsmanagementsystems nach der EN ISO 9001:2000.

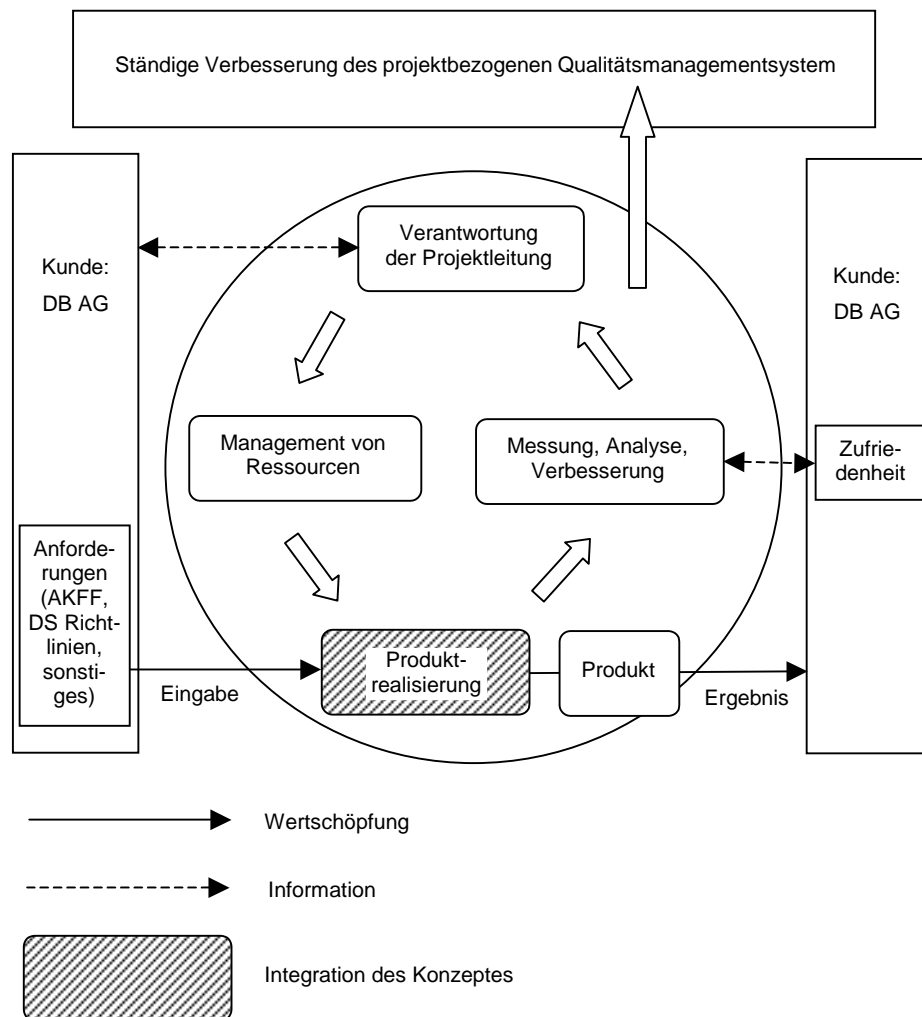


Bild 5.1: Modell eines prozessorientierten PQM-System

6. EINBINDUNG DES KONZEPTES IN EIN EFFIZIENTES PROJEKTMANAGEMENT

Wie der Prozessablauf bei der Umsetzung des Konzeptes zeigt, ist eine enge Zusammenarbeit während der gesamten Projektrealisierungsphase zwischen dem Fachplaner und dem Bauausführenden zwingend erforderlich. Hieraus leitet sich ab, dass die Planung und Bauausführung vertraglich und organisatorisch durch entsprechende Vertrags- und Organisationsformen zusammenzufassen sind.

6.1 Einbindung des Konzeptes in eine adäquate Vertragsform

Der klassische Bauvertrag ist der Einheitspreisvertrag mit auftraggeberseitiger Leistungsbeschreibung, bei dem die Objekt- und Tragwerksplanung nach DIN 1356-1 (im Folgenden kurz als Planung bezeichnet) beim Auftraggeber verbleibt. Der Auftragnehmer übernimmt hierbei ausschließlich die eigentlichen Bauleistungen. Nicht anders verhält es sich bei dem sehr häufig verwandten Detail-Pauschalvertrag mit auftraggeberseitiger Leistungsbeschreibung, bei dem im Gegensatz zum Einheitspreisvertrag eine unveränderte Vergütung vereinbart wird, also das Massenrisiko auf den Auftragnehmer übertragen wird. Die Bauwirklichkeit zeigt, dass die mit beiden Vertragsformen verbundene Trennung zwischen Planung und Bauausführung den im Konzept verankerten Prozessablauf weitgehend behindert.

Von einer Übertragung der Planungsleistungen auf den Auftragnehmer bei vorgenannten Vertragsformen ist abzusehen, da der Auftraggeber ansonsten die Kostenkontrolle über das Gewerk verliert. Der mit der Planung beauftragte Auftragnehmer kann über

die von ihm zu erbringende Planungsleistung die Bauleistungen und somit das wirtschaftliche Ergebnis steuern.

Eine mögliche Übertragung der Planung und Bauausführung in eine Hand wird durch einen Global-Pauschalvertrag mit auftragnehmerseitiger Planung ermöglicht. Bei dieser speziellen Form eines Pauschalvertrages übernimmt der Auftragnehmer die vertragliche Verpflichtung, das Bausoll durch eine von ihm durchzuführende Ausführungsplanung selber zu bestimmen (KAPPELLMANN [14]). Im Unterschied zu vorgenannten Vertragsformen kommt der Vertrag auf Grundlage einer funktionalen Leistungsbeschreibung zustande. Hierdurch gehören im Zweifel alle Leistungen zur Soll-Leistung, deren Notwendigkeit der Auftragnehmer bei Abgabe des bindenden Angebotes auf Grund der Pläne, der Leistungsbeschreibung und der ihm bekannten örtlichen Verhältnisse hätte erkennen können (Bundesgerichtshof, Beschluss vom 30. Juni 1994, VII ZR 133/93). Der Auftragnehmer hat also ein elementares Interesse daran, durch die Planung die Herstellkosten so gering wie möglich zu halten. In der Konsequenz entsteht im Gegensatz zu den vorgenannten Vertragsformen bei Übertragung der Planungsleistungen für den Auftraggeber eine hohe Kostenkontrolle. Unbeachtet der vielfältigen vertragsrechtlichen Probleme, die nicht Gegenstand dieser Betrachtung sein können, ist diese Vertragsform daher der Idealtyp für den im Konzept angedachten Prozessablauf zwischen Planung und Bauausführung.

6.2 Einbindung des Konzeptes in einen adäquaten Organisationsaufbau

Der Organisationsaufbau bestimmt maßgeblich, wie reibungslos die Arbeitsabläufe und Schnittstellen zwischen den Beteiligten in-

nerhalb einer Organisation funktionieren. Die im Konzept fixierte Verknüpfung zwischen Planung und Bauausführung muss sich also auch in dem Organisationsaufbau abbilden. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass die Planungsbeiträge der anderen Gewerke in die erdbautechnische Fachplanung integriert werden können.

Der in Bild 6.1 systematisch dargestellte Organisationsaufbau erfüllt beide Forderungen. Hierbei gibt es eine übergeordnete Organisation, die die jeweiligen Fachorganisationen koordiniert. Zur Verdeutlichung kann das klassische Beispiel einer Arbeitsgemeinschaft herangezogen werden. Dabei ist die Arbeitsgemeinschaft die übergeordnete Organisation (auch „Dach-Arge“ genannt), die im Wesentlichen die Projektgruppen der an der Arbeitsgemeinschaft beteiligten Firmen, die die Fachorganisationen darstellen, steuert.

Das Konzept muss in der Fachorganisation Erdbau eingegliedert werden. Hintergrund ist der in der Regel hohe Spezialisierungsgrad der Erdbaufachbetriebe, die einen qualitativ hohen Beitrag zum reibungslosen Ablauf des Prozesses zur Umsetzung des Konzeptes liefern können.

Von der Fachorganisation Erdbau ist der Prozessablauf zu steuern. Hierfür ist die Benennung eines technischen Koordinators für die Erdbautechnik, der die Fachplanung, die Arbeitsvorbereitung und die Bauleitung koordiniert, sinnvoll. Hierdurch werden die wesentlichen Arbeitsschritte des Konzeptes Entwicklung eines Baugrundmodells, Erdbautechnische Fachplanung, Erarbeitung und Umsetzung von Arbeitsanweisungen, Bauablaufplanung und Kontrolle der Verformungen des Fahrweges in ihrem prozessualen Geschehen gelenkt und die am Prozess Beteiligten, bestehend

aus Fachplaner und Bauausführendem (Arbeitsvorbereiter, Bauleiter) koordiniert. Dieses schlanke System ist Grundlage einer effektiven Prozessabwicklung (vgl. auch Abschnitt 4 „Prozessablauf bei der Umsetzung des Konzeptes“).

Die Koordination der gesamten Technik wird von der übergeordneten Organisation übernommen, so dass die Abstimmung auf der Ebene der technischen Koordinatoren abläuft. Betrachtet man dieses System vertiefend, so zeigt sich, dass auf kürzestem Wege eine umfassende, alle Aspekte berücksichtigende Plan- und Technikabstimmung ermöglicht wird.

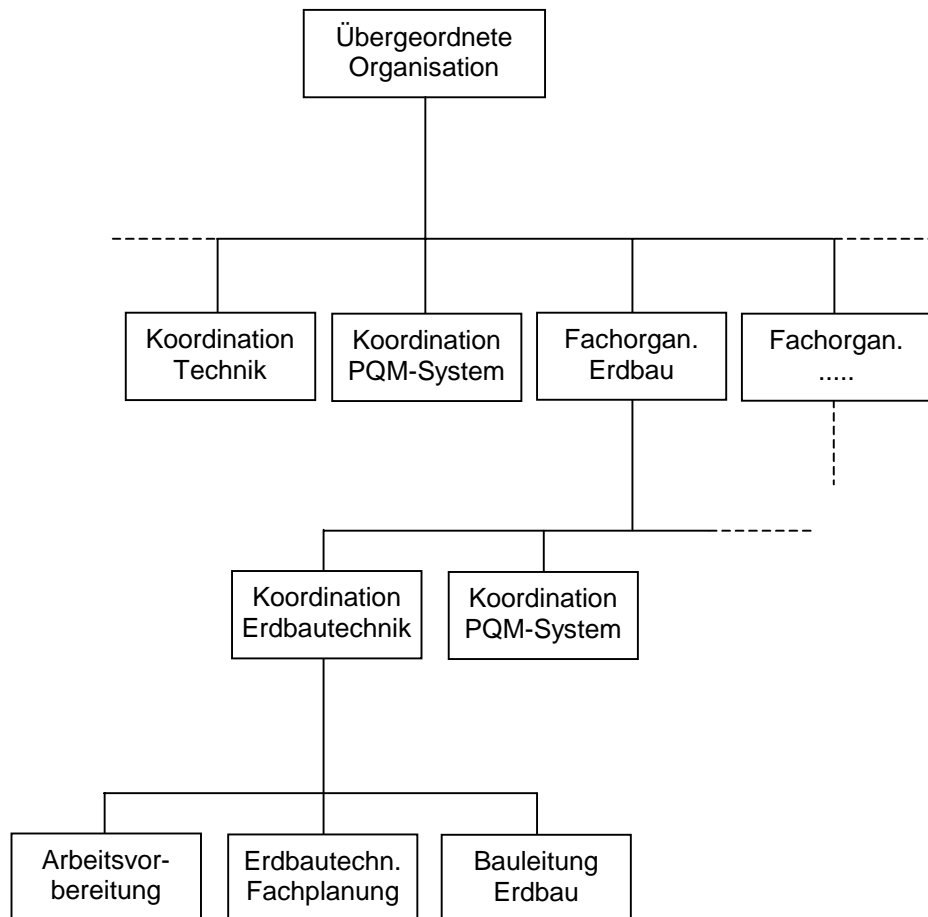


Bild 6.1: Idealtypischer Organisationsaufbau zur Einbindung des Konzeptes

7. ERDBAUTECHNIK AM BEISPIEL DER NEUBAUSTRECKE KÖLN-RHEIN/MAIN

Die Bauleistungen der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main wurden auf Basis von Global-Pauschalverträgen an drei Arbeitsgemeinschaften vergeben. Diese Vertragsform eröffnete den Auftragnehmern die Möglichkeit der Optimierung der Erdbautechnik und führte zu unterschiedlichen Ansätzen zur Erstellung von Erdbauwerken für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn.

In zwei Losen der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main entwickelten die mit dem Erdbau beauftragten Firmen erdbautechnische Konstruktionen, die nicht den Regularien des *AKFF [1]* entsprachen. Diese im Folgenden vorgestellten, beispielhaften Erdbautechniken sollen den mit der Projektrealisierung beauftragten Erdbaufachfirmen Anreiz sein, wirtschaftliche und technische Alternativen zu den stringenten Konstruktionsvorgaben des *AKFF [1]* zu schaffen.

7.1 Allgemeines zur Neubaustrecke

Die Neubaustrecke Köln-Rhein/Main ist die erste, rein für den Personenverkehr konzipierte Bahnstrecke Deutschlands. Komplette mit Fester Fahrbahn ausgerüstet, verbindet sie die beiden Wirtschaftszentren Rhein/Ruhr und Rhein/Main über ein Schnellverkehrsnetz. Mit der für das Jahr 2002 vorgesehenen Fertigstellung der insgesamt 204 km langen und für Tempo 330 km/h ausgelegten Strecke wird die Fahrzeit von Köln nach Frankfurt halbiert werden.

Haltepunkte der Hochgeschwindigkeitsstrecke werden der Frankfurter Hauptbahnhof, der Flughafen Frankfurt, Limburg Süd, Montabaur, Bonn/Siegburg, der Flughafen Köln-Bonn und der Kölner

Hauptbahnhof sein. Wiesbaden und Mainz werden durch eine Verbindung, die nördlich des Autobahnkreuzes Wiesbaden von der Strecke abzweigt, in das Netz integriert. Die neue Strecke verläuft in enger Bündelung mit der Bundesautobahn A3 durch den Taunus, Westerwald und das Siebengebirge, und damit durch die Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen.

Die Baumaßnahmen der Neubaustrecke sind in drei Bereiche aufgeteilt. Der nördliche Abschnitt zwischen Köln-Hauptbahnhof und Bad Honnef sowie der südliche Abschnitt von der Mainquerung bis zum Frankfurter Flughafen beinhalten die Einbindung der Strecke in das vorhandene Netz. Der mittlere Bauabschnitt von Bad Honnef bis zur Mainquerung, dem eigentlichen Neubaustreckenbereich mit einer Länge von 135 km, wurde in drei bautechnische Lose A, B und C unterteilt. Das Los A erstreckt sich von Bad Honnef bis Dierdorf, das Los B von Dierdorf bis Oberbrechen bei Bad Camberg und das Los C verläuft von Oberbrechen bis zur Mainquerung.

7.2 Erdbautechnik im Los B des Bauabschnittes Mitte der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main

Die erdbautechnische Lösung im Los B basierte auf der Überlegung, durch Zugabe von Zement oder Kalk die anfallenden feinkörnigen Böden einer Wiederverwertung zuzuführen und die Qualität der Erdbauwerke so zu steuern, dass ein gleichmäßig homogener Fahrweg geschaffen wird. Dieser Ansatz wird von *DÜRR-WANG ET AL [5]* Stabilisierung genannt, da je nach Bodenart mit unterschiedlichen Bindemitteln und Bindemittelmengen die Erreichbarkeit der erforderlichen bodenmechanischen Kennwerte gesteuert wird. Hierbei erfolgte keine Verbesserung von ungeeig-

neten Böden oder eine Erhöhung der Widerstandsfähigkeit, sondern es wurden die für den Erdbau grundsätzlich verwendbaren Bodenmaterialien auf definierte Eigenschaften eingestellt. Bild 7.1 zeigt die Konstruktion der Dammbauwerke im Los B.

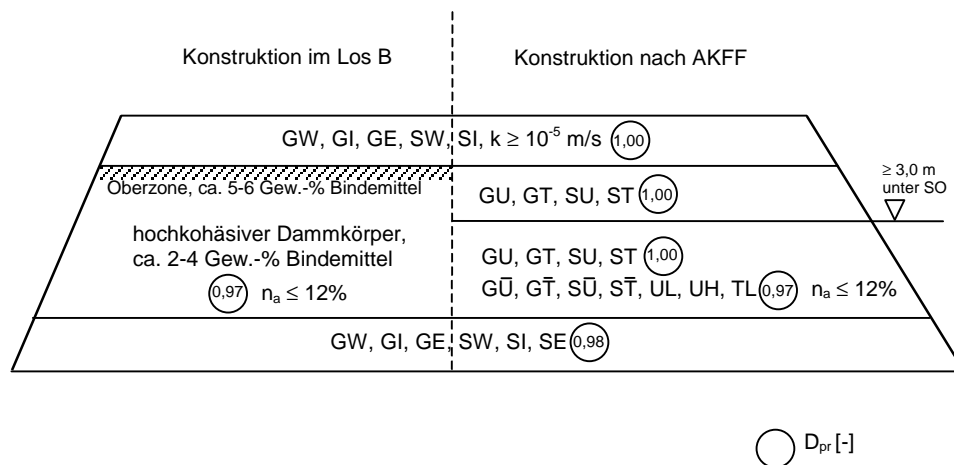


Bild 7.1: Konstruktion der Dammbauwerke im Bauabschnitt Mitte, Los B der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main, nach DÜRRWANG ET AL [5]

Das von DÜRRWANG ET AL [5] vorgestellte Konzept zielte darauf ab, die Eigensetzungen der Dammbauwerke quasi zu Null zu reduzieren. Die Stabilisierung sollte im Weiteren eine Erhöhung der zyklisch-dynamischen Stabilität bewirken. Hinzu kamen weitere Vorteile, die sich aus der Homogenisierung der Schüttgüter durch den Fräsvorgang und der Immobilisierung der Tonminerale, die der Erhöhung der Langzeitstabilität der Erdbauwerke dienen, ergaben.

Das Verfahren der Bodenstabilisierung zeigte seine größte Wirkung bei der Steuerung der Steifigkeit im Übergangsbereich auf Brückenbauwerke. Hier wurde die Bindemittelzugabe so gestaffelt,

dass die Steifigkeit in Richtung des Ingenieurbauwerks zunimmt (vgl. Bild 7.2).

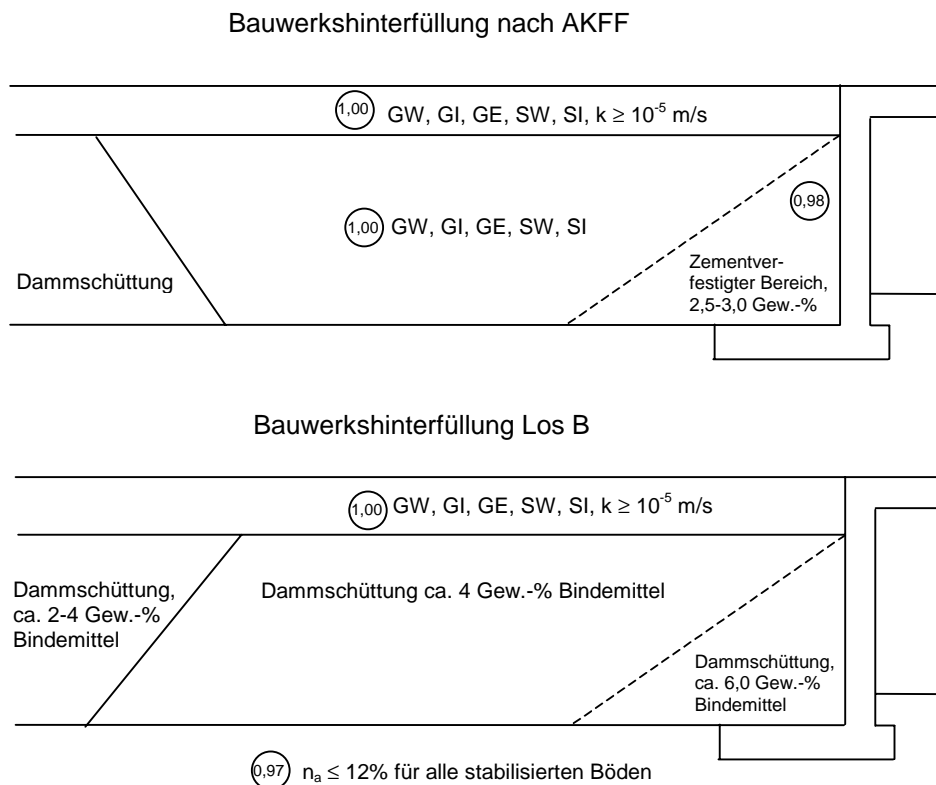


Bild 7.2: Konstruktion der Bauwerkshinterfüllung im Bauabschnitt Mitte, Los B der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main, nach DÜRRWANG ET AL [5]

Im Weiteren wurden in Einschnittsbereichen „hochkohäsive Tragplatten“ (DÜRRWANG ET AL [5]) hergestellt. Hierzu wurden ein bis zwei Fräslagen des gewachsenen, bindigen Bodens mit etwa 5 – 6 Gew.-% Bindemittel stabilisiert (vgl. Bild 7.3). Zusätzlich wurde unterhalb der Tragplatte mindestens eine steife Konsistenz der fein- und gemischtkörnigen, gewachsenen Böden sichergestellt. Da die verfestigte Schicht auch in Dammbauwerken vorgesehen war (vgl. Bild 7.1), wurde eine durchgehend homogene Auflagerung für die Feste Fahrbahn geschaffen. Diese Konstruktion

erhöht die Qualität des Unterbaus insbesondere in Übergangsbereichen von Einschnitten auf Dammbauwerke, die erfahrungsgemäß kritische Bereiche darstellt.

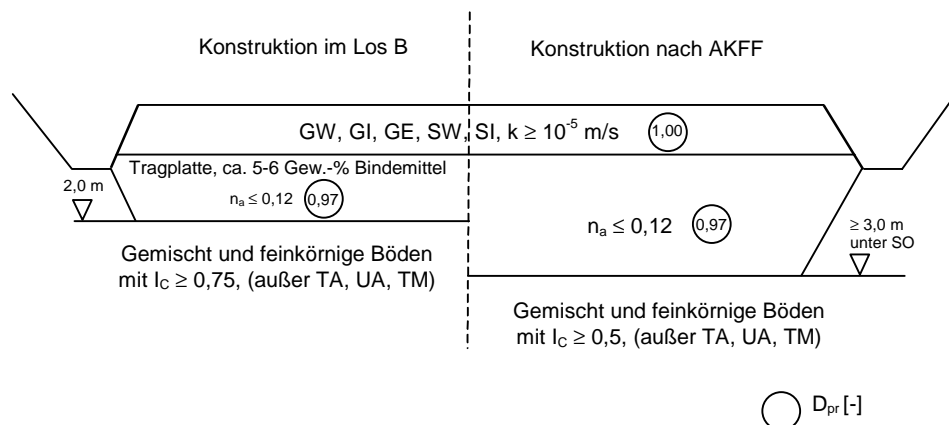


Bild 7.3: Konstruktion der Einschnitte im Bauabschnitt Mitte, Los B der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main, nach DÜRRWANG ET AL [5]

7.3 Erdbautechnik im Los C des Bauabschnittes Mitte der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main

Die Erdbautechnik im Los C der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main hatte als Kerngedanken, gemischtkörnige Tunnelausbruchmassen durch Brechen oder Zerkleinern beim Einbau als Dammschüttmassen zu verwenden, wobei diese auch in der zyklisch-dynamischen Sicherungsschicht eingesetzt wurde. Dieser Ton- und Sandstein entspricht im eingebauten Zustand einem stark schluffigen Kies nach DIN 18 196 und ist damit nach dem AKFF [1] bis 3,0 m unter Schienenoberkante nicht zulässig. Daher wurden die oberen beiden Einbaulagen mit Bindemittel verfestigt, wobei in der oberen Lage etwa 5 % und in der unteren Lage etwa

3 % eines Bindemittelgemisches aus Zement und Kalk einge-
mischt wurden (vgl. Bild 7.4).

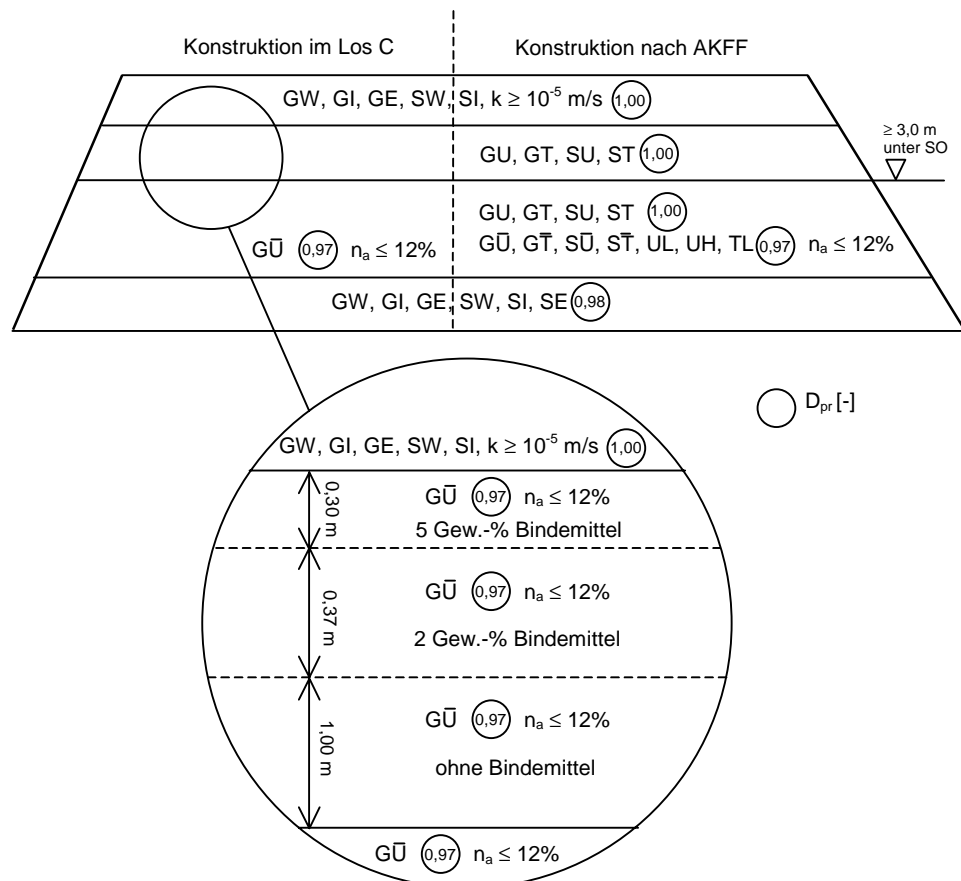


Bild 7.4: Konstruktion der Erdbauwerke im Bauabschnitt Mitte, Los C der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main (nach ICG [13])

8. NACHWEIS DER RICHTIGKEIT DES KONZEPTE

8.1 Allgemeines

Zur dauerhaften Erfüllung der Anforderungen an die Erdbauwerke einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn hat sich bei der Realisierung der im vorigen Abschnitt vorgestellten Neubaustrecke Köln-Rhein/Main eine bestimmte Vorgehensweise bewährt. Auch wenn die gesammelten Erfahrungen aus der spezifischen Projektsituation resultieren, so besitzen sie dennoch allgemeinen Charakter. Das Konzept beruht auf diesen in der Praxis gemachten Erfahrungen, woraus sich die Richtigkeit des Konzeptes ableiten lässt.

Alle dem Konzept zugrunde liegenden Erfahrungen werden entsprechend der systematischen Abfolge der Arbeit betrachtet und mit Beispielen belegt.

8.2 Planung der Erdbautechnik

8.2.1 Das Baugrundmodell

Das Konzept basiert auf der Erkenntnis, dass durch eine exakte Modellierung des Baugrundes sichere und wirtschaftliche Gründungsmaßnahmen geplant werden können und das wirtschaftliche Potenzial der beim Erd- und Tunnelbau anfallenden Baustoffe genutzt werden kann.

8.2.1.1 Wirtschaftliche Gründungsmaßnahmen

Die zutreffende Beschreibung des Baugrundes ist Grundlage einer wirtschaftlichen Gründung der Erdbauwerke. Bei Vertragsabschluss der Lose A, B und C der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main

wurde zwischen der Deutschen Bahn AG und den Auftragnehmern ein bauseits angefertigtes Baugrundgutachten als Vertragsbestandteil vereinbart. Die in diesem Gutachten enthaltenen Kennwerte waren zur Berücksichtigung lokaler Schwankungen mit Bandbreiten versehen. Legt man der Setzungsberechnung die ungünstigen Werte zu Grunde, so zeigt sich die in Bild 8.1 dargestellte beispielhafte Zeitsetzungslinie. Die berechneten Gesamtsetzungen von 15,5 cm werden nie erreicht, vielmehr beträgt die voraussichtliche Gesamtsetzung 4,0 cm. Die Folgen dieser Vorgehensweise wirkten sich insbesondere in der Streckenachse aus. Bild 8.2 zeigt in diesem Zusammenhang die rechnerische und die tatsächliche Verformungsmulde. Es wird ersichtlich, dass im betrachteten Fall die Festlegung von Gründungsmaßnahmen auf unrealistischen Kennwerten und einer ab 20,0 m Tiefe unzutreffend vereinfachten Modellierung beruht. Die tatsächlichen Verformungen wichen von den berechneten Werten nicht nur in den absoluten Verformungswerten ab, der qualitative Verlauf der Setzungsmulde wurde ebenfalls unzutreffend prognostiziert.

Dass ein solches Baugrundmodell keine Grundlage einer wirtschaftlichen Gründung darstellt und hieraus vermeidbare Kosten entstehen können, bedarf keiner weiteren Erläuterung.

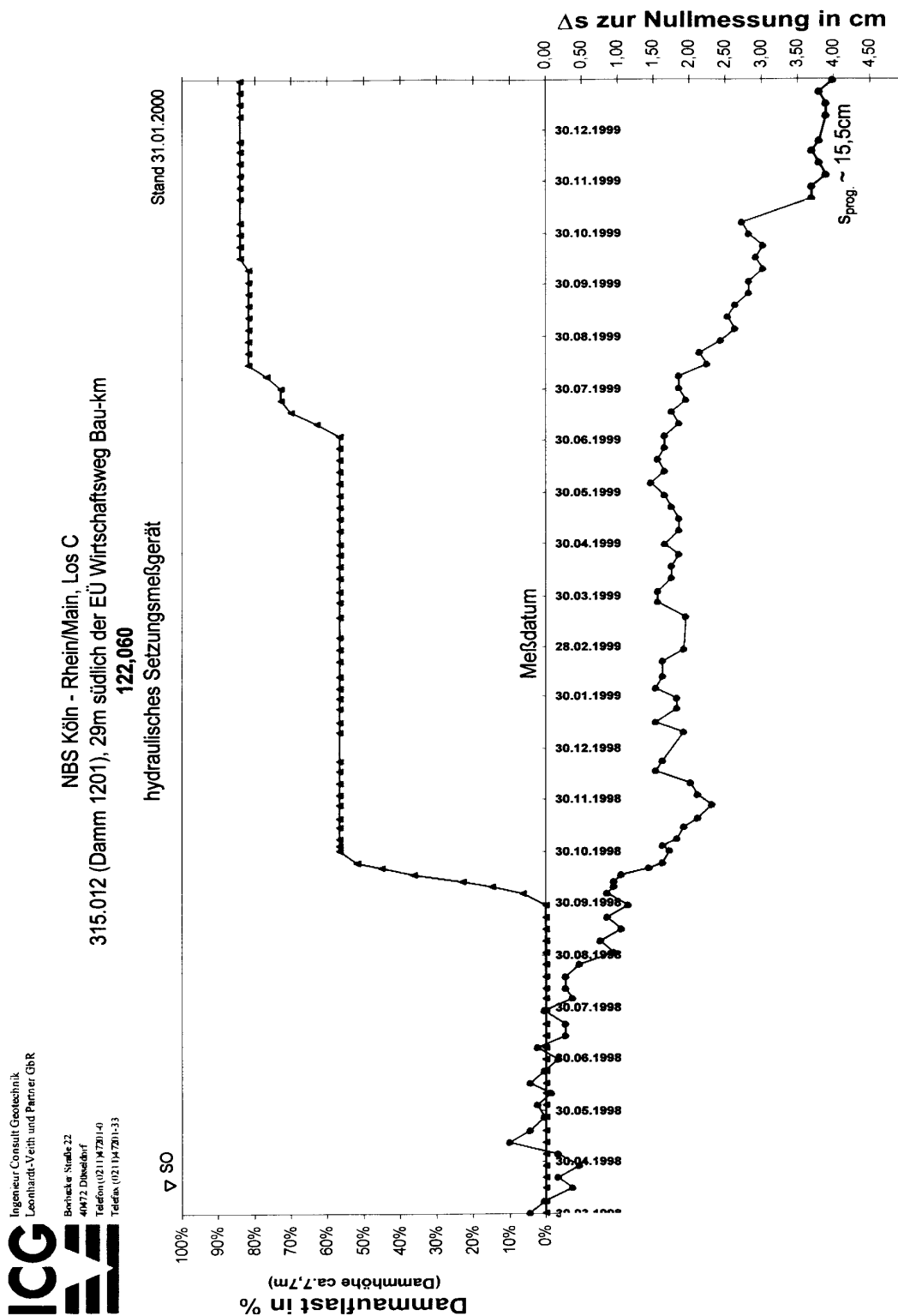


Bild 8.1 Zeitsetzungslinie eines Dammquerschnittes der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main

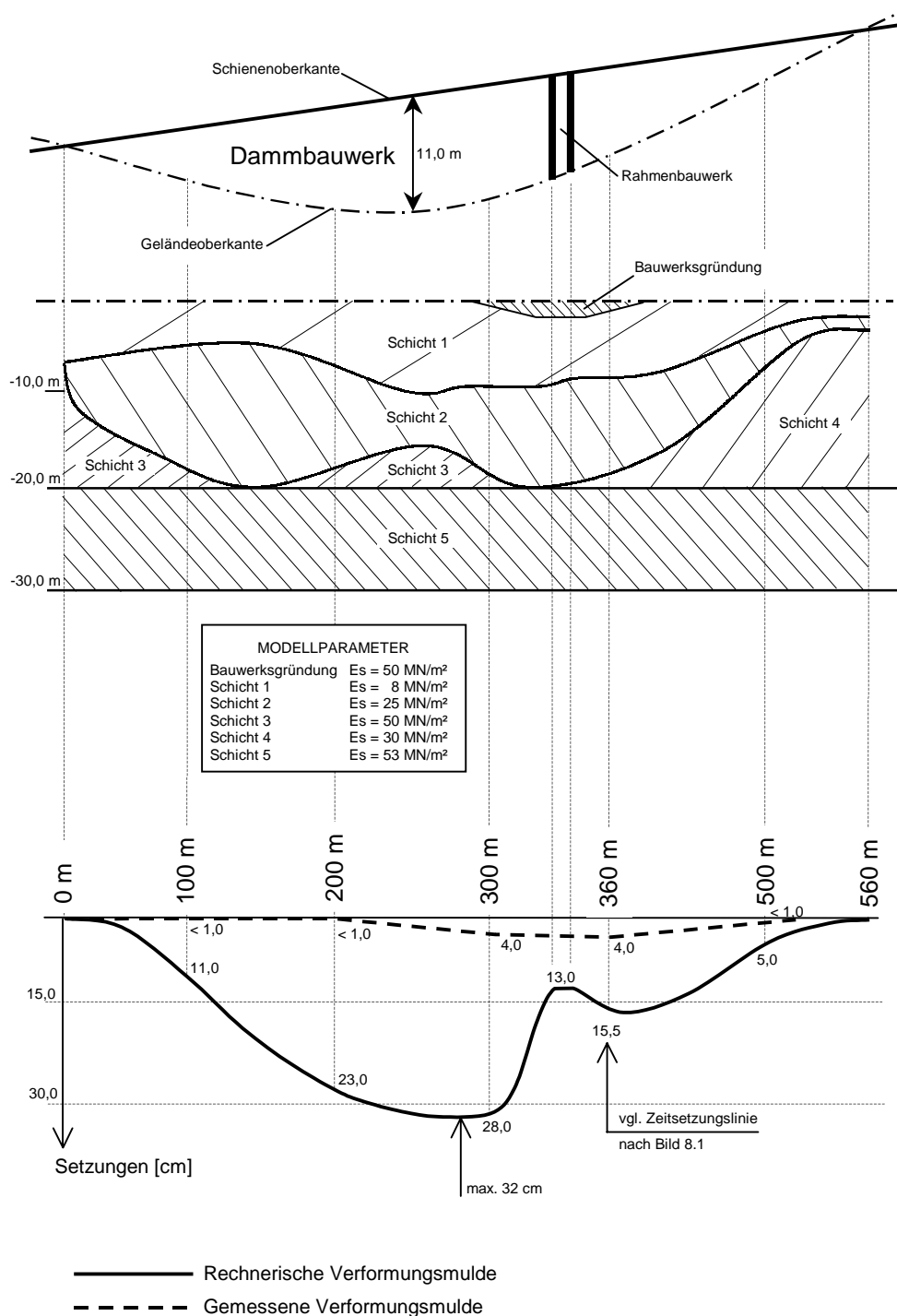


Bild 8.2 Verformungsmulde eines Dammbauwerkes der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main

8.2.1.2 Nutzung des wirtschaftlichen Potenzials der beim Erd- und Tunnelbau anfallenden Bodenmassen

Durch eine kalkulatorische Kostenbetrachtung kann aufgezeigt werden, wie durch die Nutzung der beim Erd- und Tunnelbau gewonnenen Baustoffe die Herstellkosten der Erdbauwerke gesenkt werden können. Als Beispiel wird die im Los C der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main realisierte Erdbautechnik nach Abschnitt 7 herangezogen. In der nachfolgenden Aufstellung ist die kalkulatorische Einsparung der Erdbautechnik des Loses C gegenüber der Bauweise nach dem *AKFF* [1] dargestellt.

Aushubmassen	4,1 Mio. m ³
Tunnelausbruchmassen	<u>1,6 Mio. m³</u>
Anfallende Gesamtmassen	5,7 Mio. m ³
Einbau in Dammbauwerke	2,0 Mio. m ³
Einbau in Deponien	<u>3,7 Mio. m³</u>
	5,7 Mio. m ³
Einbau in Zone 3 der Dammbauwerke	0,7 Mio. m ³
Einbau in Zone 2 der Dammbauwerke	<u>1,3 Mio. m³</u>
	2,0 Mio. m ³
Kalkulatorische Kosten für Bodenaustausch	12,3 Mio. €
Kalkulatorische Kosten für Bodenverbesserung	3,0 Mio. €
Kalkulatorische Einsparung	9,3 Mio. €

Erläuterungen:

- Die Aushub- und Tunnelausbruchmassen sowie die Einbaumassen in Dammbauwerke und Deponien wurden von *KRUD-EWIG* [18] veröffentlicht.
- Ausgehend von einer durchschnittlichen Dammhöhe von 5 m und einer Mächtigkeit der zyklisch-dynamischen Sicherungsschicht von 1,67 m liegen 33 % der Dammmassen (entsprechend 0,7 Mio. m³) im zyklisch-dynamisch relevanten Bereich

(Zone 3), so dass hier nur Böden mit einem Feinkornanteil von maximal 15 % zulässig sind (vgl. hierzu *AKFF [1]*, Bild 2.6).

- Bei der Realisierung des Loses C der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main fielen fast ausschließlich gemischt- und feinkörnige Böden an, deren Feinkornanteil oberhalb von 15 % lag. Bei der Umsetzung der Vorgaben des *AKFF [1]* (vgl. Bild 2.6) müssen die notwendigen Einbaumassen in der Zone 3 durch Fremdmassenzukauf beschafft werden. Die Kosten für die Lieferung der nichtbindigen Böden betragen frei Bau etwa 15 €/m³. Hieraus ermitteln sich die kalkulatorischen Kosten für die Massenbeschaffung zu:

$$\rightarrow 0,7 \text{ Mio. m}^3 \times 15 \text{ €/m}^3 = 10,5 \text{ Mio. €}$$

Darüber hinaus muss beim Kostenvergleich berücksichtigt werden, dass die zusätzlichen Massen eingebaut werden müssen. Hierfür ermitteln sich die Kosten kalkulatorisch zu:

$$\rightarrow 0,7 \text{ Mio. m}^3 \times 2,5 \text{ €/m}^3 = 1,8 \text{ Mio. €}$$

- Nach Bild 7.4 wurden bei der Erdbautechnik des Loses C zwei Lagen der zyklisch-dynamischen Sicherungsschicht (entsprechend 0,67 m) mit Bindemittel verbessert. Dies entspricht 40 % der Massen der Zone 3 bzw. 0,3 Mio. m³. Die Kosten für die Verbesserung betragen etwa 10 €/m³. Bezogen auf die zu verbessernden Massen ergibt sich folgende Kalkulation:

$$\rightarrow 0,3 \text{ Mio. m}^3 \times 10 \text{ €/m}^3 = 3,0 \text{ Mio. €}$$

Im vorliegenden Fall des Loses C der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main konnte durch die Nutzung der anfallenden Erdbaustoffe das Ergebnis kalkulatorisch um etwa 9,3 Mio. € erhöht werden.

8.2.2 Erdbautechnische Fachplanung auf Grundlage der anerkannten Regeln der Technik

Nach dem hier vorgestellten Konzept erfolgt die Fachplanung auf der Grundlage der anerkannten Regeln der Technik. Infolge der Gefahr des Systemversagens durch Fehleinschätzung der Restverformungen ist im vorliegenden Konzept die Durchführung von Setzungsmessungen vorgesehen.

Im Zuge der Projektrealisierung der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main wurde diese Vorgehensweise konsequent umgesetzt. In diesem Zusammenhang wird auf die jeweiligen Fachplanungen und Messprogramme der ausführenden Arbeitsgemeinschaften verwiesen. *DÖRR ET AL [3]* gehen in einer Veröffentlichung ausführlich auf die Bedeutung und die Umsetzung der Setzungsmessungen im Los B der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main ein. Im *AKFF [1]* ist die Durchführung der Setzungsmessungen sogar vorgeschrieben. Hier heißt es: „Die FF darf erst eingebaut werden, wenn aus den Setzungsmessungen nachgewiesen ist, dass die noch zu erwartenden Restsetzungen planerische Werte nicht überschreiten.“ Die Durchführung der Setzungsmessungen hat sich bei der Realisierung der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main somit nicht nur bewährt, sie hat auch den Status der anerkannten Regeln der Technik.

8.2.3 Konstruktion zyklisch-dynamisch stabiler Erdbauwerke

8.2.3.1 Sicherstellung der zyklisch-dynamischen Stabilität

Zur Sicherstellung der zyklisch-dynamischen Stabilität ist nach dem hier vorgestellten Konzept bei der Konstruktion der Erdbauwerke auf eine kontinuierliche Abnahme der Steifigkeiten zu ach-

ten. Dies bedeutet die Schaffung eines gleichförmigen Schichten-
aufbaus mit abnehmender dynamischer Steifigkeit über die Tiefe
zur Vermeidung von Reflexionen.

ARCADIS [2] hat durch Versuche mit dem System DYSTAFIT[®] die
Richtigkeit dieses Ansatzes belegt. Untersuchungen in Über-
gangsbereichen auf Ingenieurbauwerke haben gezeigt, dass dort
wo die Frostschutzschicht auf einer Schicht mit einer etwa hun-
dertfach höheren Steifigkeit aufgebaut wurde, im Vergleich zur
konventionellen Bauweise nach dem *AKFF [1]* eine mehr als dop-
pelt so hohe und darüber hinaus unzulässige plastische Verfor-
mung auftrat. Bild 8.3 zeigt die unterschiedlichen Konstruktionen.

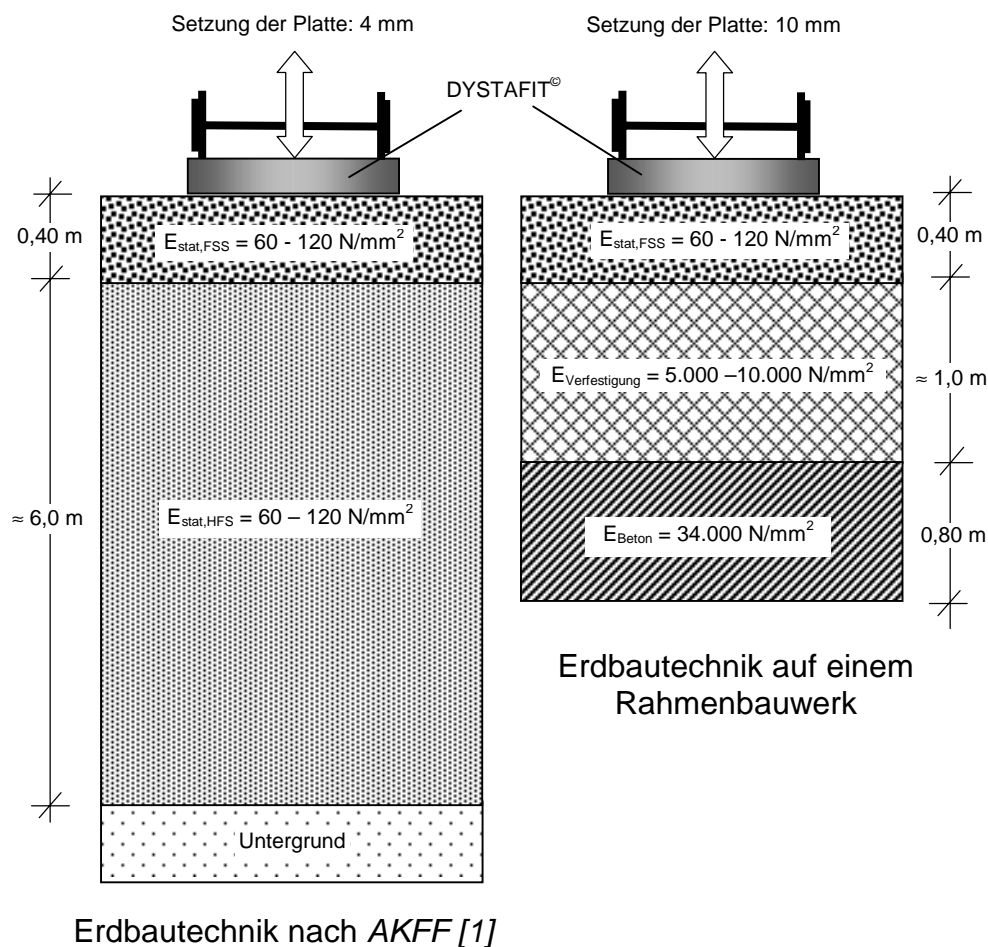


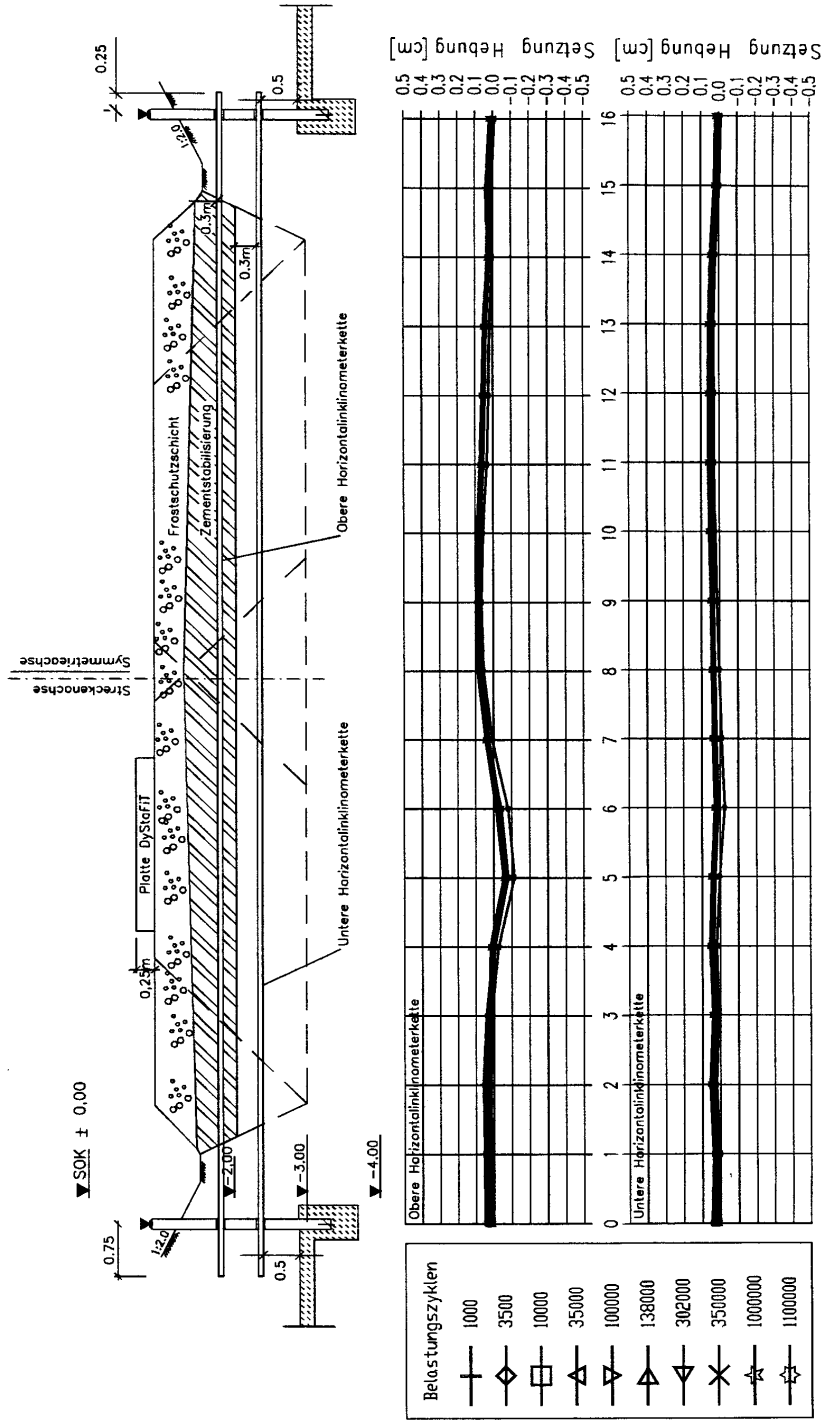
Bild 8.3 Verformungsmessungen bei zyklisch-dynamischer Beanspruchung, System DYSTAFIT®

8.2.3.2 Nachweis der zyklisch-dynamischen Stabilität

Der im Konzept enthaltene Ansatz, dass bei Abweichungen von den Konstruktionsregeln des AKFF [1] (vgl. Bild 2.7 bis 2.9) der Nachweis der zyklisch-dynamischen Stabilität durch Versuche zu erfolgen hat, wurde im Los B der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main umgesetzt.

Im Kapitel 7 dieser Arbeit wurde die Erdbautechnik des Loses B der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main vorgestellt. Der Nachweis, dass die „Tragplatte“ nach Bild 7.3 bei zyklisch-dynamischer Einwirkung stabil bleibt, erfolgte durch das System DYSTAFIT[®]. In der Veröffentlichung von *DÜRRWANG ET AL [5]* wird auf diesen Nachweis eingehend eingegangen. Bild 8.4 zeigt die Ergebnisse.

NBS Köln - Rhein / Main: Messquerschnitt MQ 116+700



ARCADIS TRISCHLER & PARTNER

E:\USER\NBS\BCT\816FOLIE-12.CDR - GR - 09/08

Bild 8.4 Nachweis der zyklisch-dynamischen Stabilität durch das System DYSTAFIT®

8.3 Maßnahmen bei der Projektumsetzung

8.3.1 Erstellen von Arbeitsanweisungen

Im Konzept ist für die Qualitätssicherung die Entwicklung von Arbeitsanweisungen vorgesehen, damit die Erdbautechnik gesichert umgesetzt werden kann. Die Einführung von Arbeitsanweisungen zur Sicherstellung der Qualität ist nicht neu. Die für das Qualitätsmanagement verbindliche EN ISO 9001:2000 fordert genau diese Vorgehensweise. Da die Norm hinlänglich bekannt ist, wird an dieser Stelle hierauf nicht weiter eingegangen.

Ein Beispiel von der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main zeigt verschiedene Arbeitsanweisungen zur Gründung eines Dammbauwerkes.

Arbeitsanweisung zur Prüfung des Baugrundmodells:

Fachgutachterliche Abnahme des Planums der UK Bodenaustausch, flächendeckende Prüfung der Sohle des tiefsten Aushubniveaus mit Hilfe der FDVK (Schwachstellenanalyse), Überprüfung der Konsistenz der anstehenden Böden im Bereich vermuteter Schwachstellen, Nachweis $I_C \geq 0,5$. Im Bereich erweiterter Bodenaustausch Nachweis $D_{PR} \geq 1,0$ bei nichtbindigen Böden, $D_{PR} \geq 0,98$ bei gemischtkörnigen Böden, $D_{PR} \geq 0,97$ bei bindigen Böden.

Arbeitsanweisung zur Prüfung der Erdbaustoffe und -gemische:

Prüfung der Eignung des Bodenaustauschmaterials bezüglich des Kornaufbaus.

Arbeitsanweisung zur Herstellung der Zone 1:

Austausch der quartären Lockergesteinsschichten bis ≤ 3 m unter SO bzw. OK dicht gelagerter Kies.

Einbau von kornabgestuftem, volumenbeständigen Felsschutt, Körnung: GW, GE, GI, GU, GU, GT, GT*.*

Lagenweiser Einbau und Verdichtung des Felsschuttes mit dynamischem Verdichtungsgerät.

Arbeitsanweisung zur Prüfung der Produkte:

Nachweis des Verdichtungsgrades $D_{PR} \geq 1,0$ innerhalb der Zone 1 sowie eines Verformungsmoduls von $E_{V2} \geq 60$ MN/m². Nachweis eines Verhältniswertes $E_{V2}/E_{V1} \leq 2,3$ sofern durch die Kalibrierung nicht die Zulässigkeit eines höheren Verhältniswertes nachgewiesen wird.

Prüfung der eingebauten Lagen der Bodenaustauschschicht mit Hilfe der FDVK, zusätzliche Durchführung von Einzelversuchen zum Nachweis des Verdichtungsgrades und des Verformungsmoduls.

Mindestaufwand der zus. Untersuchungen je Einbaulage:

1 Dichteprüfung pro 1.500 m², Mindestgesamtaufwand 2 Stück pro Lage

Dieses Beispiel zeigt, wie technisch aufwendige Prozesse in einfacher und klarer Form beschrieben werden können. Durch die Anwendung dieser Arbeitsanweisungen wird eine fehlerhafte Gründung des Dammbauwerkes vermieden.

Arbeitsanweisungen können auch in Form von Flussdiagrammen erstellt werden. Bild 8.5 zeigt hierzu den Ablauf eines Produktionsprozesses „Bodenverbesserung“.

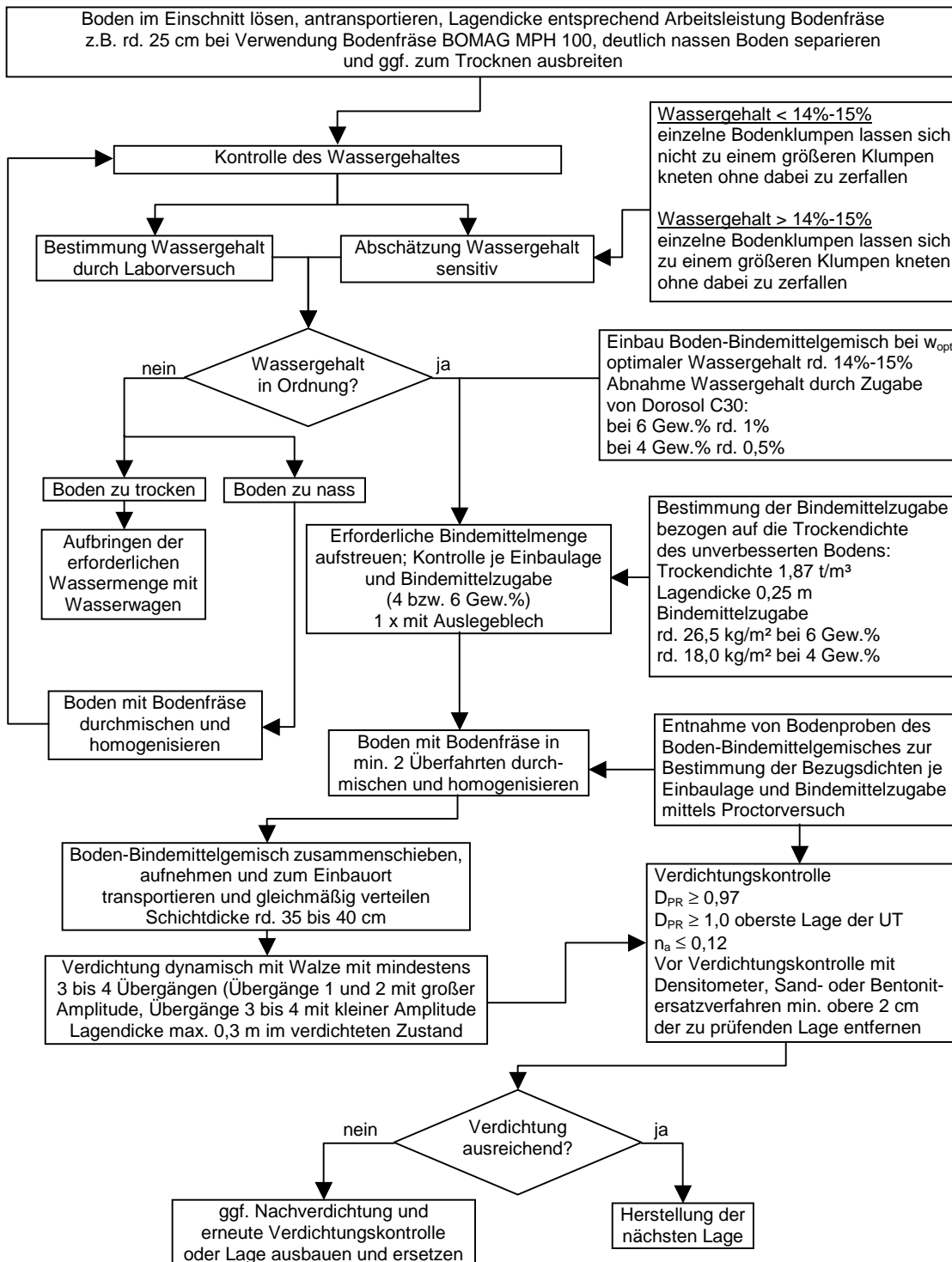


Bild 8.5: Arbeitsanweisung „Bodenverbesserung“, Beispiel der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main

8.3.2 Erstellen von erdbautechnischen Längs- und Querschnitten

Im Konzept ist die Einführung von erdbautechnischen Längs- und Querschnitten, die alle Arbeitsanweisungen beinhalten, vorgesehen. Die Forderung, dass alle Angaben, welche die Merkmale eines Produkts beschreiben, verfügbar sein müssen, ist Bestandteil der Anforderungen an ein Qualitätsmanagementsystem nach der EN ISO 9001:2000. Auch an dieser Stelle wird hierauf nicht weiter eingegangen.

Die im Los C der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main erstmalig entwickelten erdbautechnischen Längs- und Querschnitte entsprechen den im Konzept vorgestellten Darstellungen (vgl. Bild 3.3 bis 3.7). Für die rund 35 km Erdbau wurden so etwa 25 erdbautechnische Längsschnitte, 100 erdbautechnische Querschnitte für Dämme und Einschnitte und 30 erdbautechnische Längsschnitte für Übergangsbereiche auf Ingenieurbauwerke erarbeitet.

Bild 8.6 zeigt beispielhaft einen erdbautechnischen Längsschnitt des Loses C der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main. Für das als Einschnitt 1 bezeichnete Erdbauwerk weist der Längsschnitt drei Homogenbereiche aus. In Bild 8.7 ist für den Homogenbereich 2 des Bauwerkes der zugehörige erdbautechnische Querschnitt dargestellt. Die im vorigen Abschnitt gezeigten beispielhaften Arbeitsanweisungen finden sich in Bild 8.7 wieder.

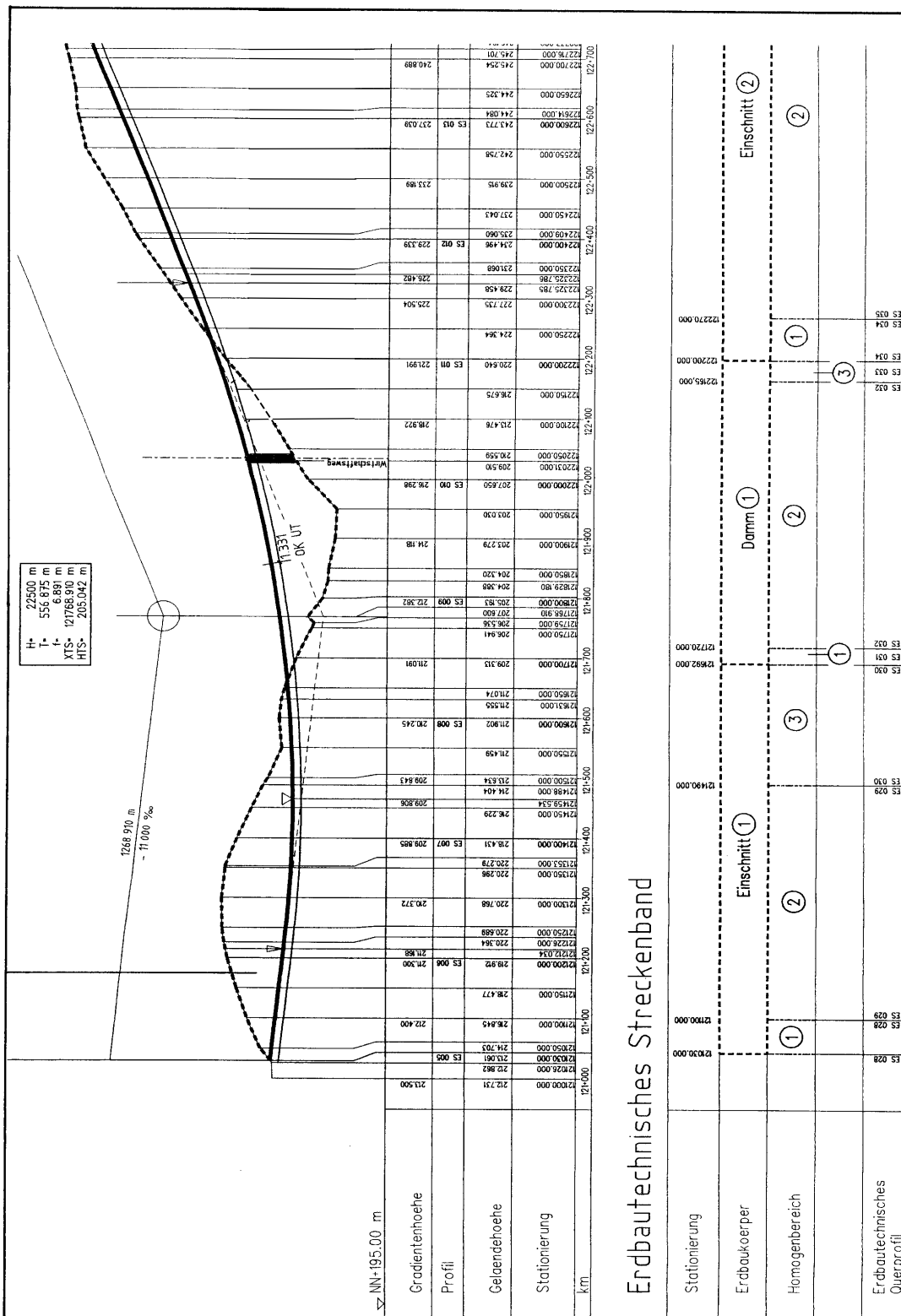


Bild 8.6: Erdbautechnischer Längsschnitt, Beispiel der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main

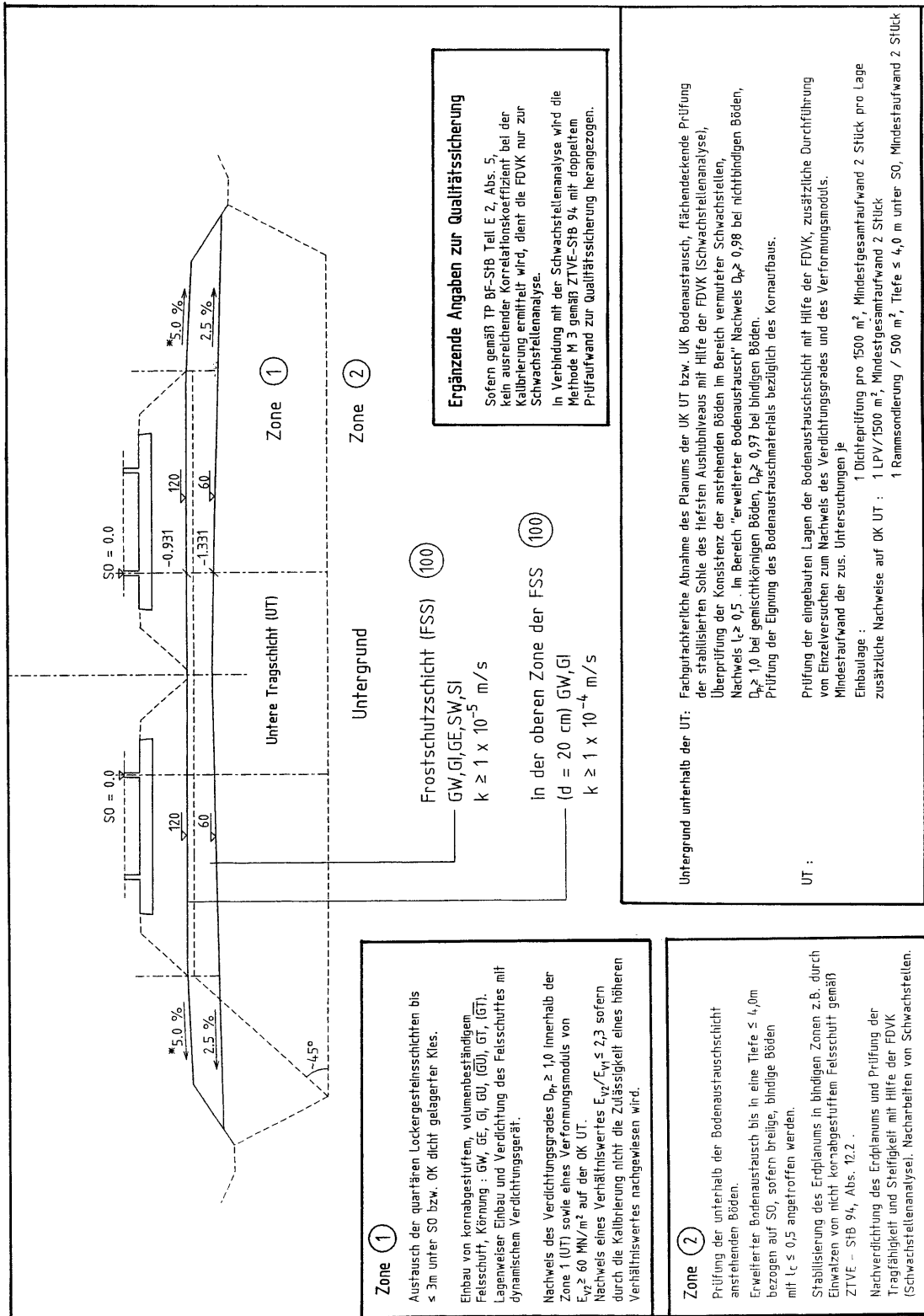


Bild 8.7: Erdbautechnischer Querschnitt, Beispiel der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main

8.3.3 Zeitliche Bauablaufplanung

Im Konzept ist vorgesehen, dass im Zuge der zeitlichen Bauablaufplanung das Zeitsetzungsverhalten der Erdbauwerke bereits vor der Bauausführung zu prüfen ist. Dieser Grundsatz besaß bei den ausführenden Firmen der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main oberste Priorität. Dies lässt sich an den wirtschaftlichen Folgen eines Systemversagens festmachen. Hierbei stand die Frage im Vordergrund, ob infolge nicht ausreichender Konsolidierungszeiträume sich der frühest mögliche Einbauzeitpunkt der Festen Fahrbahn zeitlich verschiebt. Die Folge ist dann möglicherweise ein Überschreiten des Fertigstellungstermins. In einem Werkvertrag war als Pönale 0,3 % der Auftragssumme pro Werktag, entsprechend etwa 200.000 € festgeschrieben. Als maximale Vertragsstrafe wurde 10 % der Auftragssumme, entsprechend 65 Mio. € vereinbart. Hiervon ist nach gängiger Rechtsprechung weitergehender Schaden, beispielsweise durch Betriebsausfall, übernommen.

Zur Vermeidung dieser Auswirkungen erfolgte eine rechnerische Abschätzung der Restverformungen schon in der Phase der Fachplanung. Grundlage für die Festlegung der Konsolidierungszeiträume war die Bauzeitenplanung. Kritische Bereiche zeigten sich schon vor Bauausführung, so dass der Bauablauf entsprechend koordiniert wurde. In diesem Zusammenhang wird auf die Fachplanung der jeweiligen Arbeitsgemeinschaften verwiesen.

8.3.4 Räumliche Bauablaufplanung

Das Konzept sieht vor, dass die Bauablaufplanung neben den zeitlichen auch räumliche Aspekte berücksichtigen muss, damit zu jedem Zeitpunkt die Massen in der erforderlichen Quantität und

Qualität zur Verfügung stehen. Hierbei ist das Kostenverhältnis der Transportwege, der Bodenverbesserung und des Fremdmassenzukaufs zu beachten.

Dieser Ansatz basiert auf Erfahrungen bei der Projektrealisierung der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main im Los C. Bild 8.8 zeigt ein vergleichbares fiktives Beispiel einer räumlichen Bauablaufplanung. Die aus der Massenermittlung bestimmten festen Massen des Aushubs und des Tunnelausbruchs wurden den jeweiligen Einbauorten zugewiesen, so dass die erforderlichen Mengen sichergestellt wurden. Die in Bild 3.11 dargestellte Trennung nach erdbautechnischen Bodengruppen und Zonen erfolgte hier nicht, da die anfallenden Baustoffe keine Frostschutzqualität aufwiesen und hinsichtlich der Massenverteilung keine Trennung zwischen der Zone 2 und 3 vorgenommen werden musste (vgl. Bild 7.4). Daher beschränkte sich die Massenverteilungsplanung auf die Massenströme EBG 2,3 zur Zone 1,2,3 einerseits und EBG 4 zu Ablagerungen außerhalb der Erdbauwerke der Neubaustrecke andererseits. Die zugehörigen Pläne wiesen eine Länge von etwa 10 m auf.

Die Überprüfung der Wirtschaftlichkeit durch Ermittlung der in Bild 3.12 dargestellten Kostenverhältnisse erfolgte durch den Faktor T/B. Der Fremdmassenzukauf schied aufgrund der enormen Transportwege grundsätzlich aus.

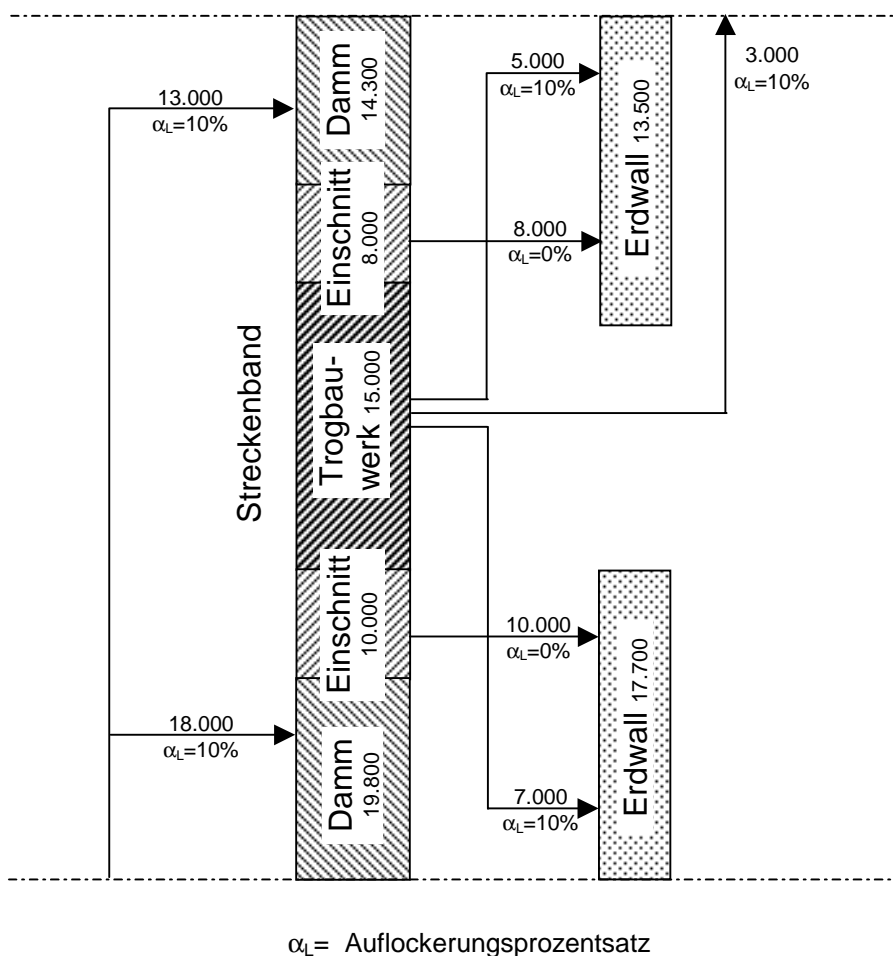


Bild 8.8 Fiktives Beispiel einer räumlichen Bauablaufplanung der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main

Die räumliche Bauablaufplanung berücksichtigte die Zusammenhänge mit der zeitlichen Bauablaufplanung nur unzureichend. Eine in der Praxis aufgetretene Folge lässt sich an dem fiktiven Beispiel des Bildes 8.8 aufzeigen. Die 15.000 m³ Aushubmassen des Trogbauwerkes sollen hier in ihrer Qualität den Anforderungen des AKFF [1] für Dammbauwerke entsprechen (vgl. Bild 2.7). Diese Massen werden entsprechend der Planung in die Erdwälle eingebaut. Steht bei der Schüttung der Dammbauwerke (31.000 m³) die vorgesehene Massenquelle nicht mehr voll zur Verfügung, so

müssen möglicherweise die in den Erdwällen profilgerecht eingebauten Massen des Trogbauwerks erneut aufgenommen und in die Dämme eingebaut werden. Die Erdwälle selber sind dann mit anderen Massen herzustellen. Der zusätzliche Aufwand besteht bei diesem Beispiel im erneuten Lösen, Laden, Transportieren und Einbauen von 12.000 m³ Boden. Die Herstellkosten würden sich kalkulatorisch um etwa $12.000 \times 5 \text{ €} = 60.000 \text{ €}$ erhöhen.

8.3.5 Verformungskontrolle des Fahrweges

8.3.5.1 Definition von Schwellenwertlinien

Der Ansatz, dass durch die Definition von Schwellenwertlinien die zeitliche Entwicklung der Verformungen mit den Verformungsprognosen permanent abgeglichen werden kann, um so Problembereiche frühzeitig erkennen zu können, hat den gleichen Hintergrund wie der Ansatz der zeitlichen Bauablaufplanung (vgl. Abschnitt 8.3.3). Zur Vermeidung eines Systemversagens ist nicht nur die rechnerische Prüfung der Konsolidierung notwendig. Der ständige Abgleich des prognostizierten mit dem tatsächlichen Konsolidierungsverhalten ist die logische Folgemaßnahme.

Da auf die Notwendigkeit der zeitlichen Bauablaufplanung ausführlich eingegangen wurde, braucht aufgrund des gleichen Hintergrundes der Ansatz zur Definition von Schwellenwertlinien nicht weiter erläutert zu werden. Bei der Realisierung der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main wurden Schwellenwertlinien nicht eingeführt. Dass aber die rechnerisch zugrunde gelegten Konsolidierungszeiträume ausreichend waren, hat seine Ursache in einer etwa 1-jährigen Bauzeitverlängerung und den günstigeren Baugrundverhältnissen (vgl. Abschnitt 8.2.1.1). Unter Beachtung des im Konzept enthaltenen Ansatzes, dass durch zutreffende

Baugrundmodelle die Gründungsmaßnahmen optimiert werden können, ist die Vernachlässigung der Schwellenwertlinien aufgrund der Unwägbarkeiten des Baugrundes, der Streuungen in den bodenmechanischen Kennwerten und der erforderlichen Annahmen in den Berechnungsmodellen unvermeidbar.

8.3.5.2 Ermittlung der Last- und Verformungsdiagramme

Durch die Ermittlung der Last- und Verformungsdiagramme (vgl. Bild 3.18) und der daraus abgeleiteten Prognose der Restverformungen wird nachgewiesen, dass die Anforderungen an den Unterbau der freien Strecke erfüllt werden. Dies komplettiert die Ansätze der zeitlichen Bauablaufplanung (Abschnitt 8.3.3) und der Definition von Schwellenwertlinien (Abschnitt 8.3.5.1). Bild 8.9 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

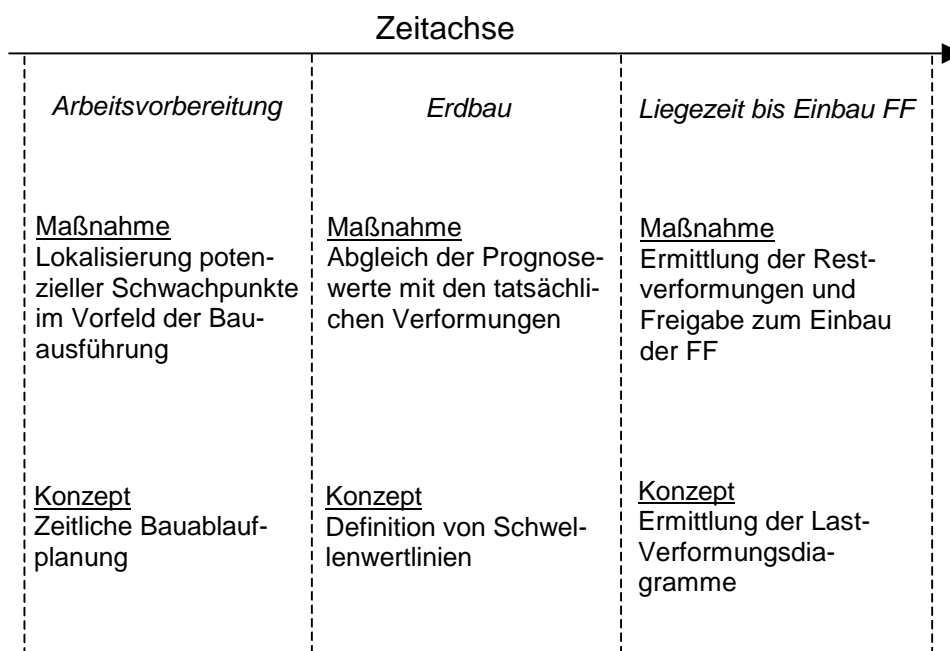


Bild 8.9 Konzeptansätze zur Vermeidung des Systemversagens

Die Ermittlung der Last- und Verformungsdiagramme vervollständigt die Maßnahmen zur Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit der Erdbautechnik. Auf die Notwendigkeit der Vermeidung des Versagens der Konstruktion wurde bereits eingegangen. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Erfolgshaftung nach § 631 Absatz 2 des Bürgerlichen Gesetzbuches verwiesen. Entsprechend dieser gesetzlichen Regelung schuldet der Bauausführende den Erfolg seiner Werkleistung. Das Erstellen der Last- und Verformungsdiagramme und die Ermittlung der Restverformungen stellt den Nachweis der erfolgreichen Bauleistung des Ausführenden dar. Insoweit sichert sich der Unternehmer die Erfüllung seiner vertraglichen Verpflichtung ab.

Die Umsetzung erfolgte in allen Losen der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main. Bild 8.10 zeigt beispielhaft wie im Los C der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main auf Grundlage der Setzungsmessungen eine Prognose der Restsetzungen erfolgte. Im hier betrachteten Fall betrug die Setzung zum avisierten Zeitpunkt des Einbaus der Festen Fahrbahn 4,0 cm (vgl. Bild 8.1). Die Prognose der Restsetzungen bis zum Ende der Lebensdauer der Festen Fahrbahn (60 Jahre) erfolgte nach dem in *SCHULTZE UND HORN [28]* enthaltenen Ansatz. In dem Querschnitt bei km 122,060 ermittelt sich die Restsetzung zu 0 cm, so dass zunächst von einem nahezu verformungsfreien Fahrweg ausgegangen werden kann. Der Bestimmtheitsgrad von $R^2 = 0,8388$ schränkt das Vertrauen in diese Aussage allerdings ein. Dennoch kann nach ingenieurtechnischer Auswertung der Zeitsetzungslinie nach Bild 8.1 und der Prognose der Restverformungen nach Bild 8.10 festgehalten werden, dass hier keine fahrdynamisch bedenklichen Reaktionen zu erwarten sind. Voraussichtlich ist eine Nachstellung des Gleises nicht notwendig.

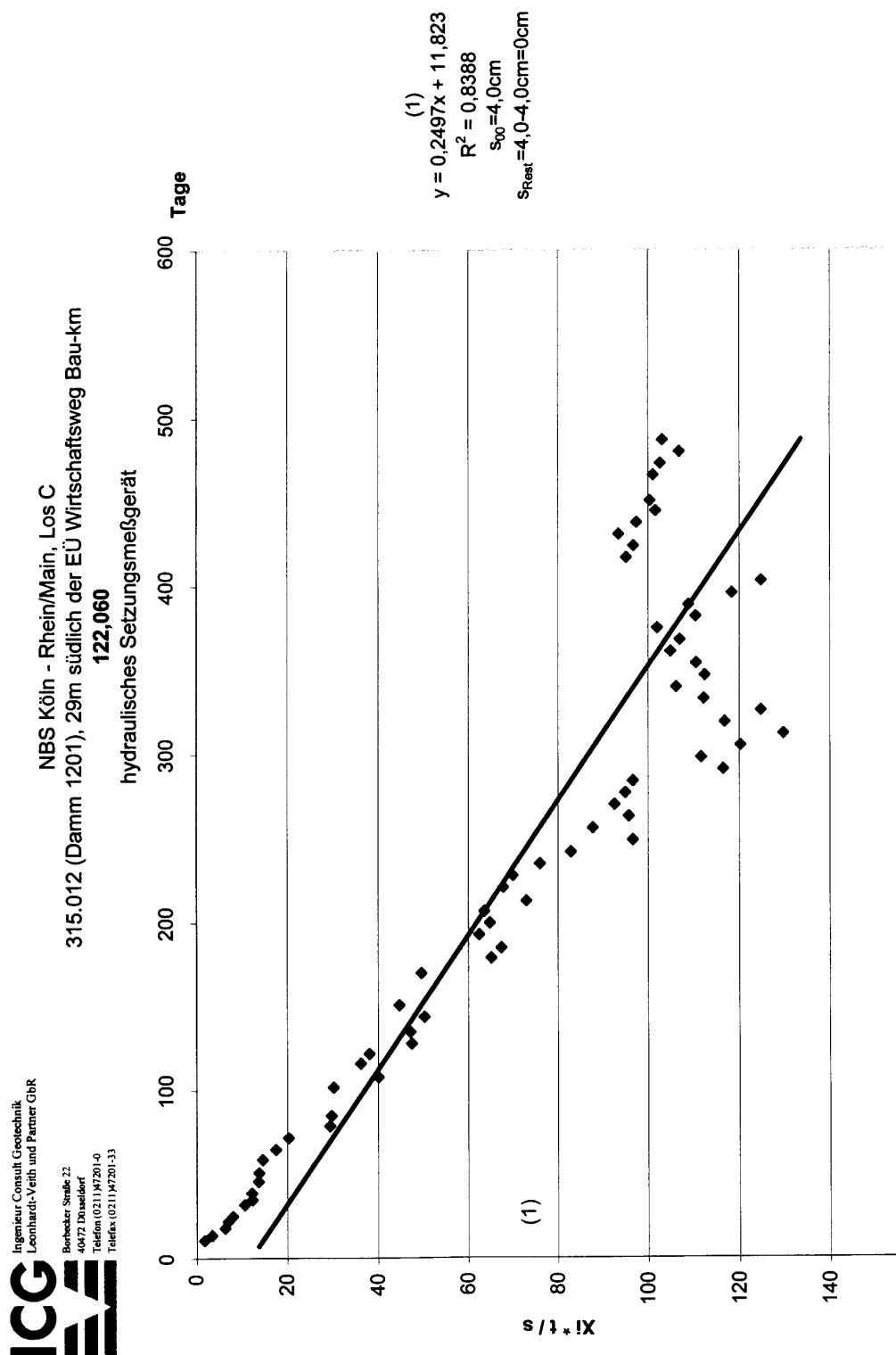


Bild 8.10: Prognose der Restverformung, Beispiel der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main

DÖRR ET AL [3] zeigen in ihrer Veröffentlichung die Umsetzung im Los B. Hierbei wurden auf Grundlage der Verformungsmessungen mittels einer Spline-Funktion dritten Grades nach jeder Messung die Restverformungen prognostiziert. Die in einer Datenbank abgelegten Prognosewerte wurden für die Darstellung der Längsentwicklung der Setzungsprognosen (vgl. Bild 8.11) herangezogen.

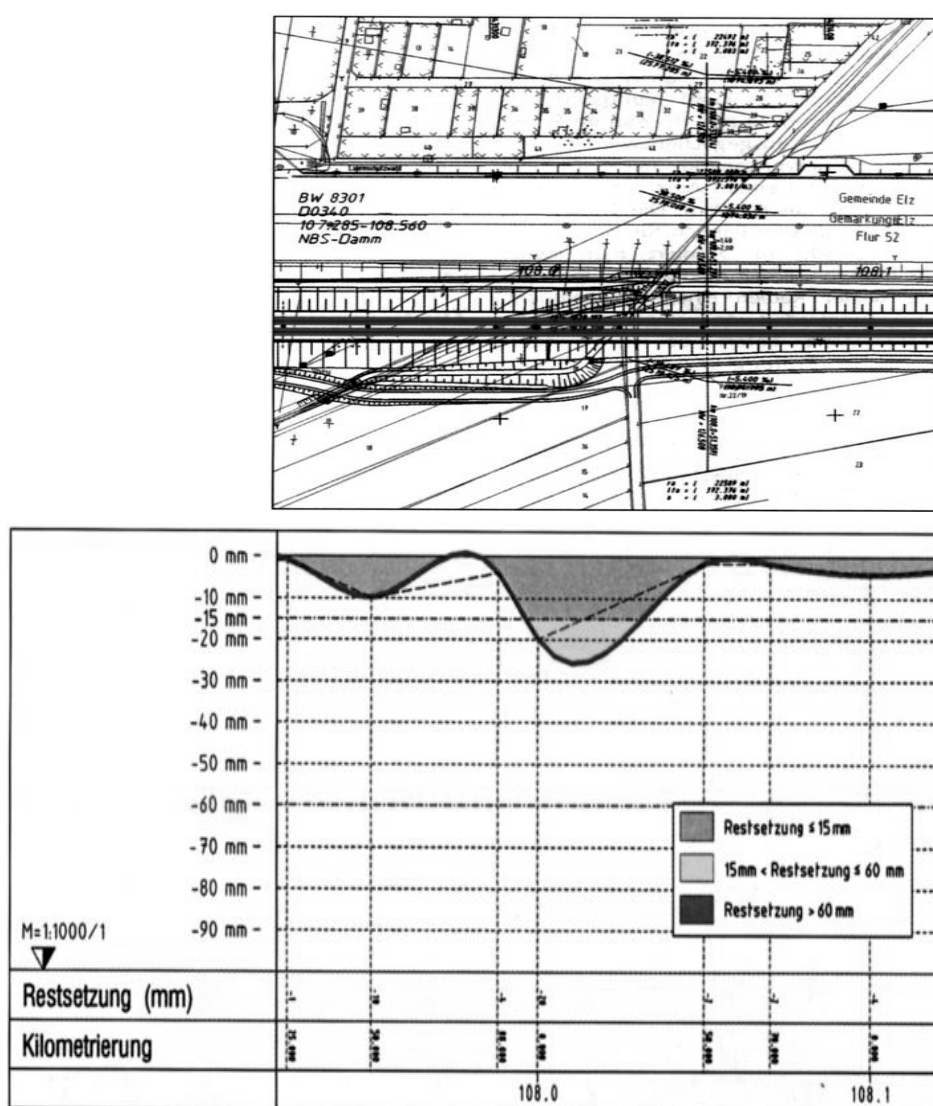


Bild 8.11 Darstellung der Restsetzungen nach 60 Jahren in Übersichtsplänen, nach DÖRR ET AL [3]

Addiert man die Krümmung mit der trassierten Ausrundung durch Überlagerung beider Radien, ergibt sich die in Bild 8.12 dargestellte Krümmung aus Setzung und Trassierung. Alle Krümmungen mit Werten kleiner als 36.000 m überschreiten den zulässigen Grenzwert nach dem AKFF [1]. Aufgrund topographischer Bedingungen wurde bei der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main entgegen dem Regelwerk des AKFF [1] in bestimmten Teilbereichen ein minimaler Ausrundungsradius von 22.500 m trassiert. Leider schweigt sich die Veröffentlichung von DÖRR ET AL [3] über die eingeleiteten Maßnahmen zum Ausgleich der unzulässigen Krümmungen aus.

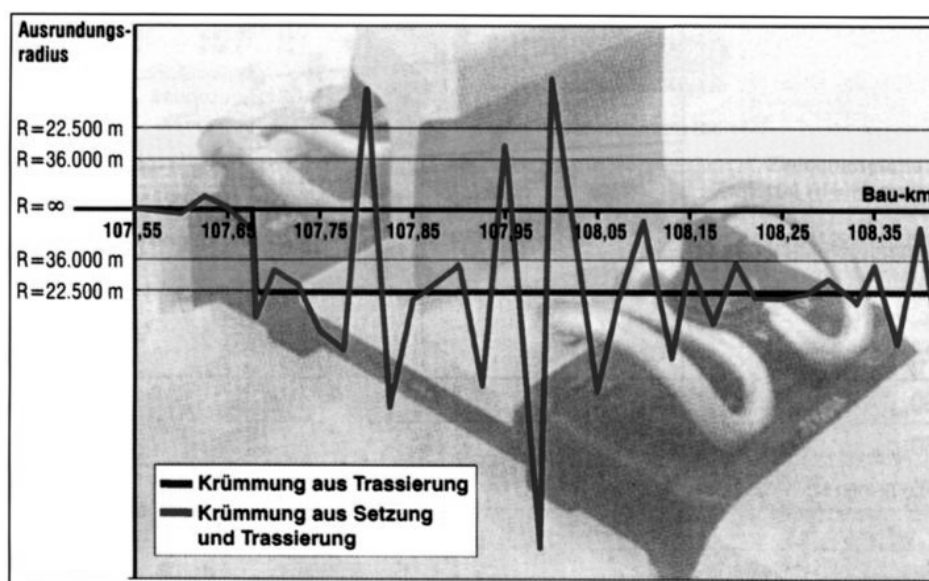


Bild 8.12 Änderung der Trassierungsparameter infolge Restsetzung, Beispiel nach DÖRR ET AL [3]

9. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Zuge der Planung der Erdbautechnik für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn können durch eine bodenmechanische Betrachtung der Bauaufgabe wirtschaftliche Aspekte bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Eine bodenmechanische Lösung der Bauaufgabe beruht auf dem Grundsatz, die bei der Bauausführung anfallenden Erdbaustoffe wieder zu verwerten, um kostenträchtige Bodenersatzmaßnahmen zu vermeiden. Genau an diesem Punkt werden durch die maßgebliche Richtlinie der Deutschen Bahn AG die Möglichkeiten einer wirtschaftlichen Bauweise eingeschränkt. Da bei der Konstruktion der Erdkörper nur bestimmte Bodengruppen nach der DIN 18 196 zulässig sind, können fein- und gemischtkörnige Böden nur begrenzt wieder verwendet werden.

Bei der Herstellung einer Neubaustrecke fallen Aushub- und Tunnelausbruchmassen an, die nach obigem Grundsatz der Nutzung der Erdbaustoffe als Schüttgüter einzusetzen sind. Dazu ist eine möglichst genaue Kenntnis der Baustoffqualität der anfallenden Erdstoffe notwendig. Diese Grundlagen einer erdbautechnischen Fachplanung werden durch Baugrunduntersuchungen und ein daraus entwickeltes Baugrundmodell geschaffen. Daneben liefert ein möglichst genaues Modell das Fundament einer Verformungsberechnung, deren Genauigkeit aufgrund der Anforderungen an den Unterbau einer Festen Fahrbahn besondere Bedeutung zukommt.

Wesentliches Ziel der erdbautechnischen Fachplanung ist eine sichere Konstruktion, die die Verwertung möglichst aller anfallenden Materialien vorsieht. Die anerkannten Regeln der Technik dienen

dem Fachplaner dazu, die Wirksamkeit der Erdbautechnik zu überprüfen. Alle rechnerischen Nachweise sind mit Ungenauigkeiten, die sich aus den zugrunde liegenden Modellen und den Streuungen der bodenmechanischen Parameter ergeben, behaftet. Diese systematischen Ungenauigkeiten liegen oberhalb der zulässigen geometrischen Verformungen des Fahrweges, so dass die Setzungsberechnungen lediglich eine Einschätzung der Wirksamkeit der Konstruktion liefern können. Daher ist die Durchführung von Setzungsmessungen zwingend.

Hochgeschwindigkeitszüge erzeugen hohe zyklisch-dynamische Spannungen im Erdbauwerk. Die resultierende Schwinggeschwindigkeit ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand bei einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn etwa vier mal so hoch wie bei der Bauweise mit Schotteroberbau. Da keine langfristigen Erkenntnisse von in Betrieb befindlichen Strecken vorliegen, können die Folgen dieser Belastungen nur abgeschätzt werden. Alle bis heute bekannten Modelle und Berechnungsansätze zur Erfassung dieser Spannungen und der daraus resultierenden langfristigen Verformungen sind nicht geeignet, eine gesicherte Abschätzung der Wirksamkeit der gewählten Konstruktion vornehmen zu können. Da gerade im Hinblick auf die möglichen Auswirkungen einer zyklisch-dynamischen Instabilität eine Vernachlässigung dieser Problematik nicht zu verantworten ist, besteht die Möglichkeit einer Verbindung von Empirie und Versuchstechnik. Sofern also von den anerkannten Regeln der Technik, die sich insbesondere in den Normen und Richtlinien widerspiegeln nicht abgewichen wird, kann von einer ausreichenden zyklisch-dynamischen Stabilität ausgegangen werden. Da nach der maßgeblichen Norm der Deutschen Bahn AG in dieser Bodenzone keine bindigen Böden eingesetzt werden dürfen, können umfangreiche Bodenaus-

tauschmaßnahmen und Fremdmassenzulieferungen notwendig werden. Sollen also aus wirtschaftlichen Gründen bindige Böden in diesem Bereich eingesetzt werden, kann die Wirksamkeit der Erdbautechnik durch in-situ Feldversuche oder zyklische Dreiaxialversuche überprüft werden.

Die Qualitätssicherung bei der Herstellung von Erdbauwerken erfordert nicht nur die üblichen Maßnahmen, wie sie in der *ZTVE-STB 94 [39]* geregelt sind. Bei der Projektumsetzung sind weitere Schritte notwendig, um einen langfristigen Fahrkomfort bei Hochgeschwindigkeit sicher zu stellen und den Systembedingungen der Festen Fahrbahn zu genügen.

Grundlage eines qualitätsgesicherten Erdbaus ist die Verfügbarkeit aller für die Bauausführung notwendigen Angaben auf der Baustelle. Vom Fachplaner sind hierzu aus der erdbautechnischen Fachplanung für jeden Prozessschritt Arbeitsanweisungen zu entwickeln. Diese Arbeitsanweisungen werden in schematischen Querschnitten aufgetragen, woraus sich in Längsschnitten Bereiche mit gleicher Konstruktion ergeben.

Die Herstellung der Erdbauwerke beinhaltet komplexe, aufeinander aufbauende Prozesse, die einer ständigen Qualitätsprüfung zu unterwerfen sind. Die Einführung einer Prozessstruktur ist für die Sicherstellung einer qualitativ hochwertigen Bauausführung unumgänglich. Dies erfolgt über Verfahrensanweisungen, die die Systematik der Abwicklung der verschiedenen Arbeitsanweisungen regeln.

Qualitätssicherung in der Projektrealisierungsphase bedeutet auch, dass die Baustoffe den der Fachplanung zugrunde gelegten

Anforderungen genügen müssen. In Arbeitsanweisungen wird festgelegt, welche Qualitätskriterien einzuhalten und welche Prüfungen durchzuführen sind. Da die anfallenden Bodenmaterialien nicht zuletzt aufgrund der Länge der Neubaustrecken große Qualitätsunterschiede aufweisen, muss durch eine räumliche Bauablaufplanung die Logistik der Baustoffe so organisiert werden, dass die Qualitätsparameter erfüllt werden.

Der gesamte Bauablauf orientiert sich an dem Zeitpunkt des Einbaus der Festen Fahrbahn. Ab diesem Zeitpunkt sind aufgrund der geringen Regulierungsmöglichkeiten des Oberbausystems Feste Fahrbahn nur noch minimale Verformungen des Unterbaus der freien Strecke zulässig. Vor Durchführung des Erdbaus ist sicher zu stellen, dass die Konsolidierungszeiträume bis zum Einbau der Festen Fahrbahn ausreichen. Hierzu sind die Konsolidierung und die resultierenden Verformungen des Fahrweges nach Einbau der Festen Fahrbahn abzuschätzen und hinsichtlich der zulässigen geometrischen Verformungen abzugleichen.

Der bedeutendste Schritt bei der Qualitätssicherung während der Projektumsetzung ist die Kontrolle der Verformungen des Fahrweges während und nach dem Schüttvorgang der Dammbauwerke. Am Ende dieser Überwachung steht die Freigabe des Unterbaus der freien Strecke zur Herstellung der Festen Fahrbahn. Hiernach sind keinerlei Nachbesserungsmöglichkeiten mehr gegeben.

Während des Schüttnbetriebes ist durch den Bauausführenden die Verformungsentwicklung zu beobachten. Da die Gründungsmaßnahmen und der gesamte zeitliche Bauablauf aus dem erwarteten Konsolidierungsverhalten resultieren, ist fortwährend die Übereinstimmung des prognostizierten mit dem tatsächlichen Zeitset-

zungsverhalten zu prüfen. Dazu werden für die jeweiligen Verformungsmessstellen zeitabhängige Grenzwerte definiert, ab deren Überschreitung von einer nicht zutreffenden zeitabhängigen Verformungsprognose auszugehen ist. Diese Bereiche sind dann einer genaueren Betrachtung zu unterwerfen.

Nach Abschluss des Schüttvorganges erfolgt eine Prognose der sich noch einstellenden, weiteren Verformungen der Erdbauwerke. Diese Prognose beruht auf den Verformungsmessungen, so dass sehr verlässliche Prognosewerte ermittelt werden können. Sofern die erwarteten Verformungen nach Einbau der Festen Fahrbahn für das Oberbausystem und den Fahrkomfort unbedenklich sind, erfolgt die Freigabe zum Einbau des Oberbaus. Ein Systemversagen des Unterbaus der freien Strecke kann so ausgeschlossen werden.

Die vorgenannten Maßnahmen zur Qualitätssicherung lassen sich in ein Qualitätsmanagementsystem nach der EN ISO 9001:2000 integrieren. Hier werden Anforderungen an den Produktionsprozess gestellt, die das vorgestellte Konzept zur Erstellung der Erdbauwerke erfüllt. Da alle Bauwerke einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit Fester Fahrbahn einzigartig sind und die Organisationsformen, die die Baumaßnahmen abwickeln, sich ebenfalls bei jeder Baumaßnahme unterscheiden, muss ein baustellenbezogenes Qualitätsmanagement auf der Grundlage zertifizierter Systeme eingeführt werden. Die Verbindung dieses Konzeptes mit einem spezifischen Qualitätsmanagement ist problemlos möglich.

Die umfangreichen Maßnahmen zur Qualitätssicherung während der Projektumsetzung und die regelmäßig auftretenden externen Eingriffe in den Bauprozess erfordern einen fortwährende Anpas-

sung der erdbautechnischen Fachplanung. Dieser gleichzeitig zur Herstellung ablaufende, iterative Abstimmungsprozess macht es notwendig, dass Planung und Bauausführung in einer Hand verbleiben. Grundlage hierfür kann nur ein (komplexer) Global-Pauschalvertrag mit auftragnehmerseitiger Planung sein, da ausschließlich dieses Vertragsmodell Leistungen aus einer Hand und eine wirtschaftliche Fachplanung ermöglicht.

Die Organisationsform der bauausführenden Firmen beeinflusst ebenfalls eine effiziente Abstimmung zwischen Planung und Bauausführung. Die Durchführung dieser Leistungen ist stets bei den Fachfirmen anzusiedeln. Übergeordnete Organisationen, wie beispielsweise „Dach-Argen“, übernehmen nur die reine Koordinierung der Unterorganisationen. Zur Sicherstellung eines effizienten Qualitätsmanagements bestimmt die mit dem Erdbau beauftragte Unterorganisation einen technischen Koordinator, dem die Planung, Arbeitsvorbereitung und Bauausführung unterstellt ist.

Die Zukunft der Neubaustrecken mit Fester Fahrbahn hängt zur Zeit ganz wesentlich von den finanziellen Möglichkeiten des Bundes ab. Da dieser Spielraum immer begrenzter wird, sollte auf andere Finanzierungsmöglichkeiten zurückgegriffen werden. Es gibt eine Vielzahl erfolgreicher Verkehrswegeprojekte auf Basis privater Finanzierungsmodelle. Finanzstarke Bauunternehmen oder Zusammenschlüsse finanzkräftiger Kapitalgeber können der Zukunft des Hochgeschwindigkeitsverkehrs neue Impulse geben. Insbesondere wird sich eine Weiterentwicklung der Erdbautechnik für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Fester Fahrbahn in wirtschaftlicher Hinsicht ergeben. Privat organisiertes, effizientes Projektmanagement auf der Grundlage dieses Konzeptes wird zu einer deutlichen Reduzierung der Bauzeit und der Baukosten füh-

ren. Dass die Bauwirtschaft ein solches Projektmanagement leisten kann, zeigt sich nicht zuletzt an der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AKFF Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn, 3. Auflage, Deutsche Bahn AG, 1995, Richtlinie der Deutschen Bahn AG
- [2] Arcadis Neubaustrecke Köln-Rhein/Main, BA Mitte Los C Erdbau, EÜ Petersberg PFA 31.6 Bau km 129+065, Überprüfung unterschiedlicher Konzepte zur Widerlagerhinterfüllung – Lastsetzungsverhalten der Hinterfüllbereiche unter dynamischer Belastung – Versuchsergebnisse, unveröffentlicht
- [3] Dörr, P., Christgau, E.-M. Setzungsbedingte Verformungen des Fahrweges an Hochgeschwindigkeitsstrecken nach Einbau der Festen Fahrbahn, EI. Der Eisenbahningenieur 52(2001) Nr.2, S.24-28, Zeitschriftenaufsatz
- [4] DS 804 Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke, 1983, Richtlinie der Deutschen Bundesbahn
- [5] Dürrwang, R., Schulz, G., Neidhart, T. Erdbauwerk für Hochleistungsstrecken – Neues Konzept, EI. Der Eisenbahningenieur 48(1999) Nr.8, Sonderdruck Tetzlaff Verlag GmbH
- [6] Eisenmann, J., Mattner, L. Konstruktion und Bemessung von Festen Fahrbahnen, Edition ETR. Eisenbahntechnische Rundschau, Feste Fahrbahn, Hestra Verlag, S.18-23, 1997
- [7] Floss, R. ZTVE – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau, Kirschbaum Verlag Bonn, Fassung 1997
- [8] GAFF Grundsätze für die Anwendung der Festen Fahrbahn Bauart RHEDA auf der NBS Köln-Rhein/Main, DB Netz, Deutsche Bahn Gruppe, Zentrale-NEF, Frankfurt, 1999 (unveröffentlicht)
- [9] Göbel, C., Lieberenz, K. Kießling, J. Korngemische für Tragschichten, Erläuterungen zu den Technischen Lieferbedingungen – DB AG TL 918 0602, Ausgabe Februar 1997, EI. Der Eisenbahningenieur 48(1997) Nr.9, S.30-33, Zeitschriftenaufsatz
- [10] Hausner, H. Dynamische Stabilität nichtbindiger Lockergesteine bei stationärer Anregung durch Maschinenfundamente, Dissertation Technische Universität Dresden, 1971

- [11] Hillig, J. Erdbautechnische Anforderungen an eine schotterlose Fahrbahn, EI. Der Eisenbahningenieur 45(1994) Nr.5, S.324-334, Zeitschriftenaufsatz
- [12] Hillig, J. Geotechnische Anforderungen an den Eisenbahnunterbau – Hochgeschwindigkeit erfordert die Bemessung neuer und die Ertüchtigung vorhandener Erdbauwerke nach dynamischen Gesichtspunkten, EI. Der Eisenbahningenieur 47(1996) Nr.3, S.24-32, Zeitschriftenaufsatz
- [13] ICG NBS Köln-Rhein/Main, Los C, erdbautechnische Beratung, Ausbildung der „unteren Tragschicht“, ICG Leonhardt-Veith und Partner GbR, 1998 (unveröffentlicht)
- [14] Kapellmann, K., Langen, W. Einführung in die VOB/B, Basiswissen für die Praxis, 9. Auflage 2000, Werner Verlag
- [15] Katzenbach, R., Arslan, U. Geotechnische Aspekte bei der Grundlagenforschung zum Langzeitverhalten von Fahrwerk, Gleis und Untergrund, Vorträge zum 3. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, 1996, S.97-113, Mitteilungen des Institutes und Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Hochschule Darmstadt
- [16] Kempfert, H.-G., Hu, Y. Unterbau und Untergrundbeanspruchung infolge Eisenbahnverkehrslasten sowie Langzeitverhalten von gering tragfähigen Böden, 2. Zwischenbericht zum DFG Schwerpunktprogramm, Systemdynamik und Langzeitverhalten von Fahrwerk, Gleis und Untergrund, 1999, Universität GH Kassel – Fachgebiet Geotechnik
- [17] Kempfert, H.-G., Vogel, W. Erdbauwerke für Feste Fahrbahnen – Darstellung des Entwicklungsstandes, EA Projekt 357/88 Weiterentwicklung von schotterlosen Fahrbahnen auf Erd- und Kunstbauwerken, Teilprojekt Erdbau, BZA München, Schlussbericht 1992
- [18] Krudewig, N. Die Neubaustrecke Köln-Rhein/Main, Tiefbau Nr.6, 1998, S.390-394, Zeitschriftenaufsatz
- [19] Literatur-Datenbank für das Bauen Version 2, Fraunhofer IRB Verlag, Fraunhofer-Informationszentrum, Raum und Bau IRB, Stand Mai 1999
- [20] MO 836.0401 Erdbauwerke – Lastannahmen, Deutsche Bahn AG, 1997, Richtlinie (Vorabzug, zurückgezogen)
- [21] MO 836.0402 Erdbauwerke – Erdbauwerke bemessen, Deutsche Bahn AG, 1997, Richtlinie (Vorabzug, zurückgezogen)

- [22] Neidhart, T. Überprüfung der dynamischen Untergrundstabilität und Optimierung von Bodenverbesserungsmaßnahmen – Vorträge der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.
- [23] Neidhart, T., Ast, W. Erkenntnisse aus Verformungsmessungen an Erdbauwerken und Folgerungen für den Bau der Festeren Fahrbahn, Vorträge zum 3. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, 1996, S.97-113, Mitteilungen des Institutes und Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Hochschule Darmstadt
- [24] Rehfeld, E. Untergrundbeschaffenheit – Anforderungen für den Einsatz Festerer Fahrbahnen, EI. Der Eisenbahningenieur 46(1995) Nr.4, S.258-164, Zeitschriftenaufsatz
- [25] Ril 836 Erdbauwerke planen, bauen und instand halten, 1999, Richtlinie der Deutschen Bundesbahn
- [26] Rump, R., Ehling, B., Rehfeld, E. Wirkungen von Verkehrserschütterungen auf Erdbauwerke und ungebundene Tragschichten im Oberbau, ETR. Eisenbahntechnische Rundschau 45(1996) Nr.7/8, S.485-491, Zeitschriftenaufsatz
- [27] Rücker, W. Kurzzeitdynamik und Setzungsverhalten der Festeren Fahrbahn, Tagungsband zum Symposium 4./5. November 1999 der TU Berlin zum Thema „Feste Fahrbahn, Mechanische Modellierung - Betriebserfahrung und Akustik“
- [28] Schultze, E., Horn, A. Berechnungen von Zeitsetzungen, Grundbau-Taschenbuch, 5. Auflage, Teil 1, Verlag Ernst und Sohn, 1995
- [29] Sondermann, W. Rüttelstopfverdichtung zur Baugrundverbesserung für die Feste Fahrbahn im Schnellbahnbau, Vorträge zum 3. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, 1996, S.148-164, Mitteilungen des Institutes und Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Hochschule Darmstadt
- [30] TL 918 062 Technische Lieferbedingungen - Korngemische für Trag- und Schutzschichten zur Herstellung von Eisenbahnfahrwegen, Bahn-Norm der Deutschen Bahn AG, 2000
- [31] TL Min-StB 2000 Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau, 2000

- [32] TP BF-StB Teil B 10.1 Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil B 10.1, Bestimmung der organischen Bestandteile im Boden, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“, 1998
- [33] TP BF-StB Teil B 11.1 Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil B 11.1, Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigung mit Zement, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“, 1986
- [34] TP BF-StB Teil B 11.5 Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil B 11.5, Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“, 1991
- [35] TP BF-StB Teil E 2 Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil E 2, Flächendeckende dynamische Prüfung der Verdichtung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“, 1994
- [36] Trischler und Partner DYSTAFIT – Maßstabsgerechter Feldversuch zur Überprüfung der dynamischen Untergrundstabilität, Informationsschrift, ohne Jahreszahl
- [37] Vogel, W., Grübl, W. Erdbauwerke von Neubaustrecken für Feste Fahrbahnen – Grundsätze und Hinweise zur Ausführung, ETR. Eisenbahntechnische Rundschau 42(1993) Nr.9, S.603-610, Zeitschriftenaufsatz
- [38] von Soos, P. Eigenschaften von Boden und Fels; Ihre Ermittlung im Labor, Grundbau-Taschenbuch, 5. Auflage, Teil 1, S.47-86, Verlag Ernst und Sohn, 1995
- [39] ZTVE-StB 94 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Bundesministerium für Verkehr – Abteilung Straßenbau, Verkehrsblatt–Dokument-Nr. B6711, Verkehrsblatt-Verlag