

## Berekening opspaneffecten tegen bestaande constructies



## Berekening opspaneffecten tegen bestaande constructies

### Auteur(s)

Henri Havinga

## Berekening opspaneffecten tegen bestaande constructies

<b>Opdrachtgever</b>	RWS-GPO
<b>Contactpersoon</b>	Arjan Grashuis
<b>Referenties</b>	SITO programmasubsidie 2024 aanlegvraagstukken Geotechniek
<b>Trefwoorden</b>	Opspannen grond, grondkerende wanden, tunnels, RBK

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	29-10-2025
<b>Projectnummer</b>	11211504-012
<b>Document ID</b>	11211504-012-GEO-0002
<b>Pagina's</b>	33
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	Definitief

### Auteur(s)


# Samenvatting

Door wisselende horizontale verplaatsingen van constructies, veroorzaakt door factoren zoals fluctuerende temperaturen en waterstanden, kunnen de horizontale grondspanningen tegen de constructie in de loop der tijd toenemen (opspanning). Door Rijkswaterstaat wordt voor het ontwerpen van nieuwe kunstwerken de Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken [12] (ROK) gehanteerd waarin eisen zijn opgenomen waaraan het ontwerp en de uitvoering van een nieuw kunstwerk, zoals een brug, sluis of viaduct, moet voldoen. Deze eisen betreffen wijzigingen, aanvullingen en toelichtingen op de Eurocodes met Nationale Bijlagen voor de nieuwbouw van alle kunstwerken die in opdracht van Rijkswaterstaat worden gerealiseerd. In de ROK is een rekenregel opgenomen voor het berekenen van gronddrukken die door wisselende horizontale verplaatsingen tegen constructies ontstaan. Deze rekenregel is gebaseerd op een literatuurstudie van GeoDelft uit 2007 [11]. Deze regel is van toepassing op nieuwe constructies.

Bij bestaande constructies is vaak geen rekening gehouden met dit opspaneffect. Wanneer het opspaneffect wèl wordt meegenomen in de beoordeling van bestaande constructies, voldoet een aanzienlijk deel van deze constructies mogelijk niet aan de eisen.

In dit rapport wordt verslag gedaan van literatuuronderzoek dat is uitgevoerd door Deltares. In de studie is gezocht naar literatuur die is verschenen na de vorige studie van 2007. Hierin zijn 2 relevante artikelen gevonden. Deze nieuwe artikelen hebben niet tot nieuwe inzichten geleid. In het belang van de compleetheid zijn de relevante artikelen van vóór 2007 ook samengevat.

Daarmee is geconcludeerd dat de huidige rekenregel van de ROK gehanteerd kan worden. Door Arcadis zijn met de rekenregel uit de ROK berekeningen voor een bestaande grondkerende constructie uitgevoerd. Op basis van deze berekeningen is een aanbeveling gedaan voor de berekening van horizontale gronddrukken die ontstaan door wisselende belastingen tegen bestaande constructies.

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>2 Literatuurstudie</b>	<b>8</b>
2.1 Besonderheiten bei Entwurf und bemessung integralen Betonbrücken	8
2.2 Erddruckmessungen an der Kelleraussenwand eines mehrgeschossigen Massivbaus	10
2.3 Der Einfluss der Temperaturverformung auf den Erddruck hinter Bauwerkswänden	10
2.4 Auswertung einer zehnjährigen Messreihe an der Schleuse Eibach [5]	12
2.5 Schleuse Uelzen I – Hypoplastische Finite-Elemente-Analyse von zyklischen Vorgängen	12
2.6 Erddruck auf Schleusenkammerwände	14
2.7 Erwiderstandermittlung bei monotonen und wiederholten wandbewegungen in sand	16
2.8 Integral Bridges	16
2.9 Physical and numerical investigation of integral bridge abutment stiffness due to seasonal thermal loading [9]	20
2.9.1 Resultaten	20
2.9.2 Conclusie	21
2.10 Integral bridge abutments (R.J. Lock, 2002)	21
2.10.1 BA 42/96 standard – the design of integral bridges	21
2.10.2 TRL Report 146: Cyclic loading of sand behind integral bridge abutments	22
2.10.3 Integral bridges: a fundamental approach to the time-temperature loading problem	22
2.10.4 Conclusies van het gehele rapport	22
2.11 Conclusie literatuurstudie	22
<b>3 Berekeningsaanpak volgens de Richtlijn Ontwerpen Kunstwerken (ROK)</b>	<b>23</b>
<b>4 Berekeningen van Arcadis</b>	<b>24</b>
4.1 Inleiding	24
4.2 Berekening belasting tegen tunnelwand	24
4.2.1 Eerste berekening	24
4.2.2 Iteratieve berekening gronddruk	25
4.2.3 Belastingcombinaties	25
<b>5 Advies berekening gronddrukken tegen bestaande constructies</b>	<b>27</b>
5.1 Berekening volgens ROK	27
5.2 Berekeningsprocedure	28
5.2.1 Berekening van opspannen door temperatuur invloed in open tunnelbakken met het programma SCIA	28
5.2.2 Berekening van opspannen door wisselende waterstanden in sluizen met het programma SCIA	29

<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>30</b>
6.1	Conclusies	30
6.1.1	Aanbevelingen voor de tekst in de ROK/RBK	30

# 1 Inleiding

Door wisselende horizontale verplaatsingen van constructies, veroorzaakt door factoren zoals fluctuerende temperaturen en waterstanden, kunnen de horizontale grondspanningen in de loop der tijd toenemen (opspanning). Door Rijkswaterstaat wordt voor het ontwerpen van nieuwe kunstwerken de Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken [12] (ROK) gehanteerd waarin eisen zijn opgenomen waaraan het ontwerp en de uitvoering van een nieuw kunstwerk, zoals een brug, sluis of viaduct, moet voldoen. Deze eisen betreffen wijzigingen, aanvullingen en toelichtingen op de Eurocodes met Nationale Bijlagen voor de nieuwbouw van alle kunstwerken die in opdracht van Rijkswaterstaat worden gerealiseerd. In de ROK is een rekenregel opgenomen voor het berekenen van gronddrukken die door wisselende horizontale verplaatsingen tegen constructies ontstaan. Deze rekenregel is gebaseerd op een literatuurstudie van GeoDelft uit 2007[11]. Deze regel is van toepassing op nieuw te bouwen constructies.

Bij bestaande constructies is vaak geen rekening gehouden met dit opspaneffect. Wanneer het opspaneffect wel wordt meegenomen in de beoordeling van bestaande constructies, voldoet een aanzienlijk deel van deze constructies mogelijk niet aan de eisen.

Dit was ook het geval bij een andere beheerder van dit type objecten, de gemeente Den Haag. Zij zijn een verandering aan het doorvoeren aan de Utrechtse baan en moesten hiervoor het opspaneffect meenemen in de beoordeling. Doordat hier in het originele ontwerp geen rekening mee was gehouden voldoet de constructie niet meer aan de eisen. Dit opspaneffect is met name relevant bij wanden van sluiscolken, verdiept aangelegde wegen en toeritten van verdiepte constructies met kerende betonwanden.

In dit rapport wordt verslag gedaan van literatuuronderzoek dat is uitgevoerd door Deltares en van de berekeningen die door Arcadis [13] voor een bestaande constructie zijn gedaan. Het rapport eindigt met een aanbeveling voor de berekeningswijze van horizontale gronddrukken door wisselende belastingen tegen bestaande constructies.

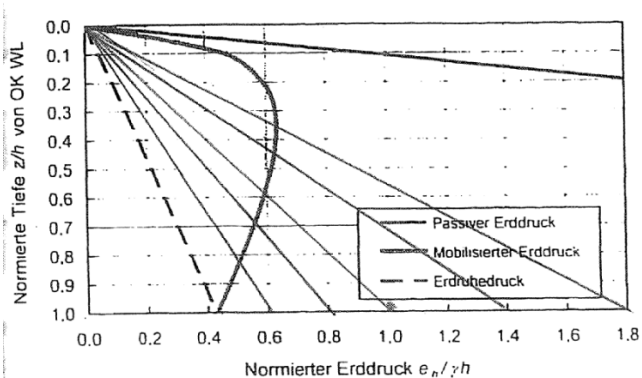
## 2 Literatuurstudie

In dit hoofdstuk wordt verslag gedaan van literatuuronderzoek dat is uitgevoerd door Deltares. In de studie is gezocht naar literatuur die is verschenen na de vorige studie van 2007 [11]. Hierin zijn 2 relevante artikelen gevonden. In het belang van de compleetheid zijn de relevante artikelen van voor 2007 ook samengevat.

### 2.1 Besonderheiten bei Entwurf und bemessung integralen Betonbrücken

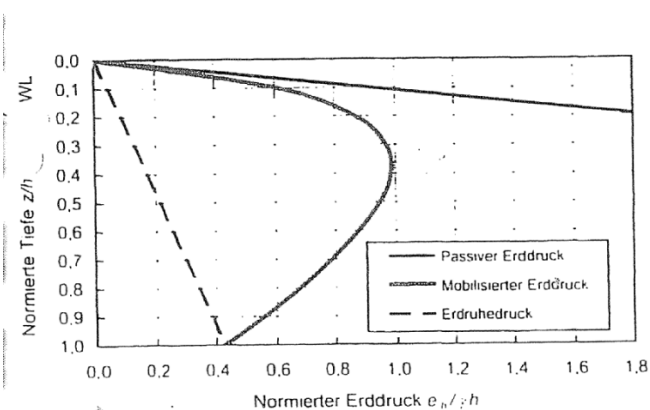
In dit artikel [2] wordt ingegaan op de belasting van de fundering van de landhoofden en de aanvulling achter de landhoofden als gevolg van cyclische temperatuurverplaatsingen.

Voor het ontwerp moet rekening worden gehouden met zowel een minimale als een maximale druk vanuit de grond. Door de heen en weer gaande beweging treedt verdichting op. Hierbij wordt verwezen naar metingen aan sluiswanden. Op basis van modelonderzoek zijn empirische rekenregels opgesteld. Er zijn 3 figuren opgesteld waarin het gronddrukverloop tegen de diepte wordt uitgezet, zie Figuur 2.1. De figuren gelden voor zeer vastgepakt zand bij verschillende kopverplaatsingen. Bij de kop van de wand ligt de gronddruk bij passief. Naar beneden toe neemt de gronddruk, vanaf circa de helft van de diepte van de wand, af, en bereikt de neutrale druk bij de teen van de wand.



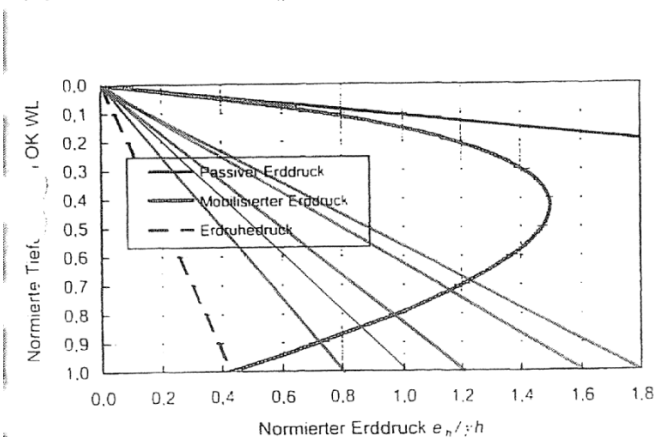
**Bild 7** Verteilung des normierten Erddrucks  $e_n/\gamma h = K_{ph,mob} \cdot z/h$  über die Wandhöhe für eine relative Kopfverschiebung von  $s_r/h = 0,001$ .

**Fig. 7** Stress ratio and pressure distribution  $e_n/\gamma h = K_{ph,mob} \cdot z/h$  for a relative thermal deck movement  $s_r/h = 0,001$



**Bild 8** Verteilung des normierten Erddrucks  $e_n/\gamma h = K_{ph,mob} \cdot z/h$  über die Wandhöhe für eine relative Kopfverschiebung von  $s_r/h = 0,002$ .

**Fig. 8** Stress ratio and pressure distribution  $e_n/\gamma h = K_{ph,mob} \cdot z/h$  for a relative thermal deck movement  $s_r/h = 0,002$



**Bild 9** Verteilung des normierten Erddrucks  $e_n/\gamma h = K_{ph,mob} \cdot z/h$  über die Wandhöhe für eine relative Kopfverschiebung von  $s_r/h = 0,004$ .

**Fig. 9** Stress ratio and pressure distribution  $e_n/\gamma h = K_{ph,mob} \cdot z/h$  for a relative thermal deck movement  $s_r/h = 0,004$

**Figuur 2.1:** Grondrukverloop voor 3 verschillende kopverplaatsingen.

## 2.2 Erddruckmessungen an der Kelleraussenwand eines mehrgeschossigen Massivbaus

Dit artikel doet verslag van metingen aan een kelderwand van de Technische Universiteit in Dresden [3].

Bij deze constructies werd in het verleden, volgens de DIN 4085 van 1987, met een actieve druk gerekend.

De constructie is van 1996 tot 1998 gebouwd. De ondergrond bestaat uit mergelgesteente. Aan de oppervlakte zijn slappere lagen, zoals klei aanwezig. Er is een circa 6 meter diepte bouwput aangelegd.

Op een wand van de bouwput zijn drukdozen (type Glötzl) aangebracht. Deze meten de gronddruk en de temperatuur. De werkruimte achter de wand (circa 0,8 m) is met zand aangevuld. Het zand is in laagjes verdicht.

De grootste drukwisselingen zijn op geringe diepte gemeten. In de metingen is een maximale gronddrukcoëfficiënt  $K = 0,7$  gevonden. De gronddrukcoëfficiënt is minder groot dan in Paragraaf 2.1. In Paragraaf 2.1 zijn op geringe diepte gronddrukcoëfficiënten berekend die richting een passieve gronddruk (3 a 5) gaan. Mogelijk komt dit doordat naast het verdichte zand klei aanwezig is.

## 2.3 Der Einfluss der Temperaturverformung auf den Erddruck hinter Bauwerkswänden

In dit artikel [4] wordt verslag gedaan van metingen aan sluizen, tunnels en bouwputten. De metingen worden nagerekend met de Eindige Elementen Methode.

Metingen in de USA, Rusland (USSR) en het Elbe-Seiten kanal en Europakanal in Duitsland tonen de belangrijke invloed van temperatureffecten op de vervorming van sluiscolkwanden. Tevens geven de metingen aan dat de gronddrukken veel hoger kunnen oplopen dan de neutrale gronddruk. Metingen aan de sluis Eibach geven aan dat de horizontale druk als gevolg van wandverplaatsingen door temperatureffecten met 10 à 50 kPa toeneemt (Figuur 2.2).

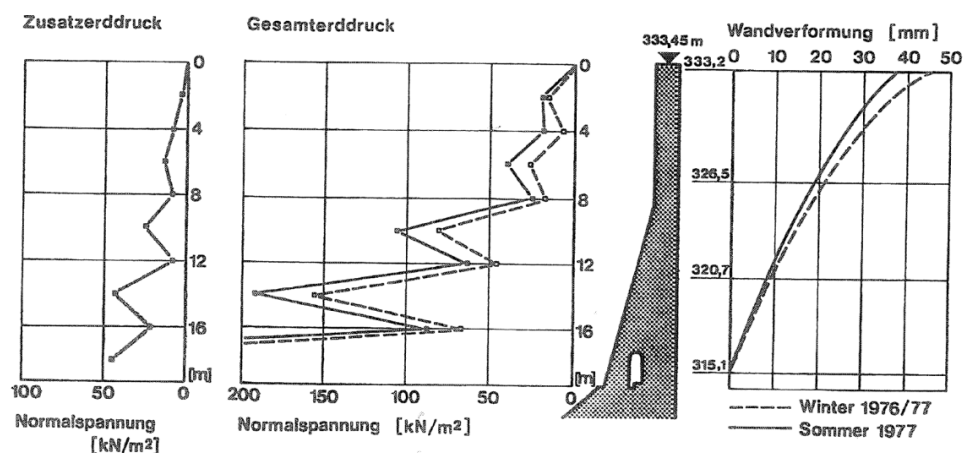
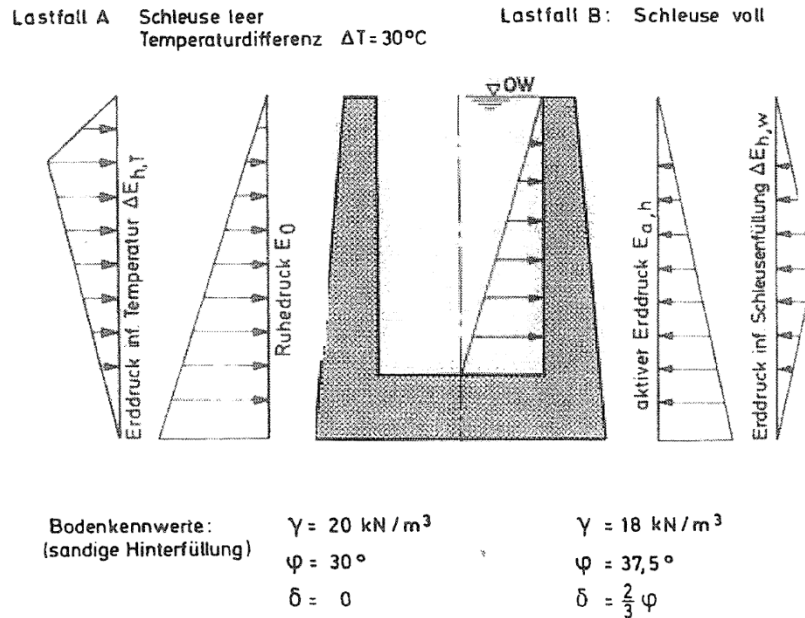


Bild 2. Zusatzerddruck infolge Temperaturverformung, Gesamterddruck Sommer - Winter, Wandverformung (Schleuse Eibach)

Figuur 2.2: Gronddrukverloop in zomer en winter bij de sluis in Eibach.

Metingen aan 3 sluizen zijn met de Eindige Elementen Methode nagerekend. Omdat de toename van de gronddruk afhankelijk is van de geometrie en de stijfheidsverhouding tussen constructie en grond wordt er geen kwantitatieve aanbeveling gedaan.

Wel wordt een kwalitatief verloop van de toename van de gronddruk door temperatuur en het vullen van de sluis gegeven (Figuur 2.3).



Figuur 2.3: kwalitatief verloop gronddruk als gevolg van temperatuur en vullen van de sluis.

Metingen naast constructies (Figuur 2.4 en 2.5) geven aan dat de gronddrukcoëfficiënt in zomer en winter ligt tussen circa  $K=0,25$  en  $0,65$ . Simulaties met de EEM geven aan de bovenkant van de wand een druk die iets boven de neutrale druk ligt.

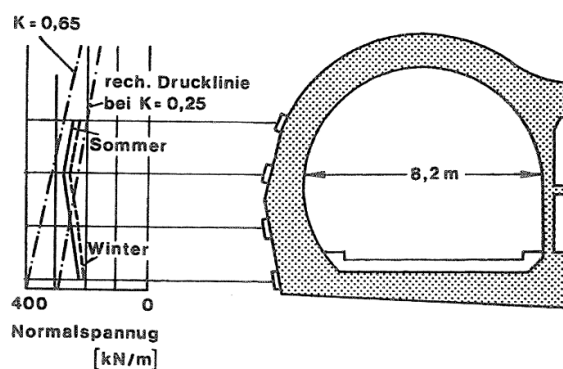


Bild 6. Gemessene Druckverteilung an einem Block der geschlossenen Tunnelrampe (Vogel u.a. (1966))

Figuur 2.4: Gemeten drukken naast een gesloten tunnel.

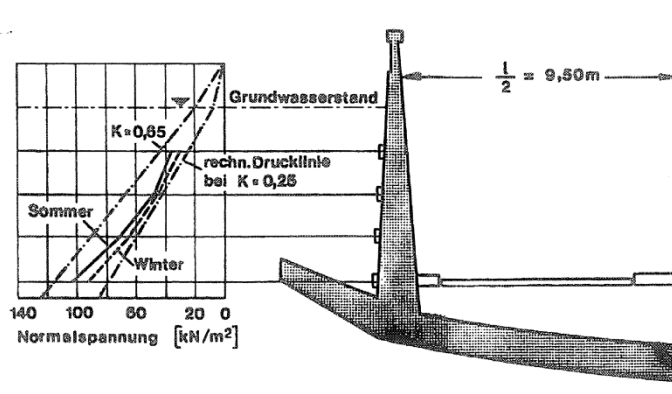


Bild 7. Erddruckmessungen an der Außenwand der offenen Rampe (Vogel u. a. (1966))

Figuur 2.5: Gemeten drukken naast een open constructie.

De metingen aan bouwputten betreffen de invloed van de temperatuur op de krachten in stempels.

## 2.4 Auswertung einer zehnjährigen Messreihe an der Schleuse Eibach [5]

Bij de 30 meter hoge sluis in Eibach bij Neurenberg is in 1975 begonnen met een omvangrijk meetprogramma om de toename van de gronddrukken te onderzoeken. Op 9 niveaus aan de sluiscolkwand zijn drukmeters aangebracht. Ook de vervorming van de wand en de grondverplaatsingen in de aanvulling zijn gemeten.

Vooral in het eerste jaar van de metingen is de druk wezenlijk toegenomen. Daarna niet meer. Het beton van de wand kruipt. Daardoor neemt de uitbuiging van de wand toe. Het effect van temperatuurwisseling en het schutten van de sluis is gemeten. Opmerkelijk is dat ook de richting en grootte van de wandwrijvingshoek is gemeten. Deze blijkt te veranderen bij het schutten van de sluis.

De volgende conclusies zijn getrokken:

- De gronddruk wisselt in het seizoen vanwege de temperatuurwisselingen.
- Bij het vullen van de sluis neemt de gronddruk toe.
- De cyclische belasting van de sluiswand door het schutten leidt tot een cyclische gronddruk, cyclische wandwrijvingskracht en cyclische wandbewegingen.
- De gronddruk is vooral in het eerste jaar toegenomen. Dit wordt verklaard door het bouwverloop en de zettingen van de aanvulling.
- De gronddruk neemt iets af als gevolg van de kruip van het beton.

Het artikel doet geen aanbevelingen voor de in rekening te brengen gronddrukken.

## 2.5 Schleuse Uelzen I – Hypoplastische Finite-Elemente-Analyse von zyklischen Vorgängen

De Sluis Uelzen I [6] is in 1976 in bedrijf genomen. Het is een flexibele constructie (een plaat met ribben). De amplitude van de belasting is hoog. Vanwege schade aan de betonconstructie zijn in 1992 uitgebreide metingen gestart.

De situatie is gesimuleerd met 3-dimensionale EEM berekeningen. Er is gewerkt met een hypoplastisch grondmodel met intergranulair gedrag. De wand heeft een dikte van 0,75 m en de ribben zijn 1,5 m dik.

De ondergrond bestaat uit zand en mergel. Er is met zand aangevuld.

Gestart is met berekeningen met een hypoplastisch model zonder intergranulair gedrag. Met dit model is de "dynamische" rek niet te beschrijven. Daarom is intergranulaire vervorming toegevoegd (zie Figuur 2.6).

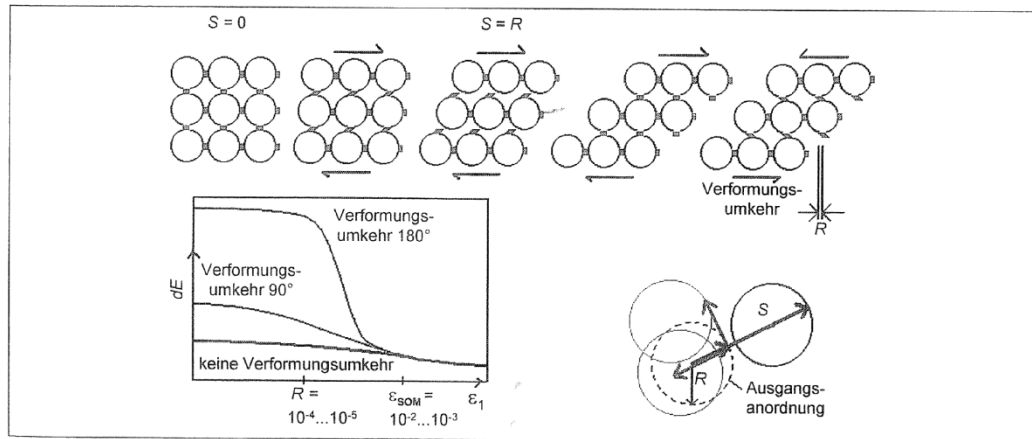


Bild 5. Wirkungsweise der intergranularen Dehnung im eindimensionalen Fall (nach [6])  
 Fig. 5. Mode of operation of the intergranular strain – 1D shearing (according to [6])

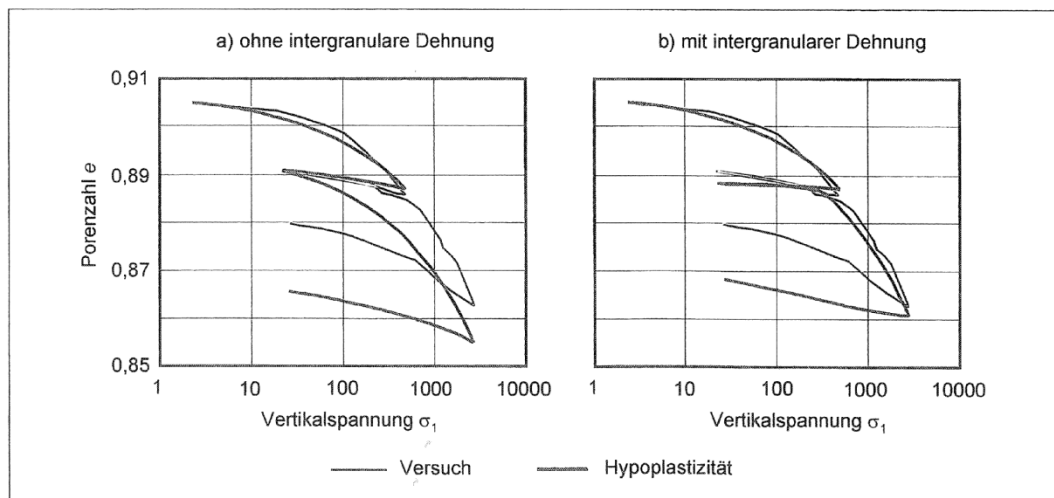


Bild 7. Ergebnis des Ödometersversuchs und der hypoplastischen Nachrechnung (nach [7])  
 Fig. 7. Results of an edometer test and hypoplastic back-calculation (according to [7])

Figuur 2.6: Voorstelling en resultaten modellering van het intergranulaire gedrag.

Met dit model is het stijve gedrag bij ontlasten/herbelasten en dan weer het slappere gedrag als de oorspronkelijke spanning wordt bereikt, te beschrijven.

De berekeningen zijn uitgevoerd met het softwarepakket ABAQUS. De gemeten zettingen zijn goed te simuleren (Figuur 2.7).

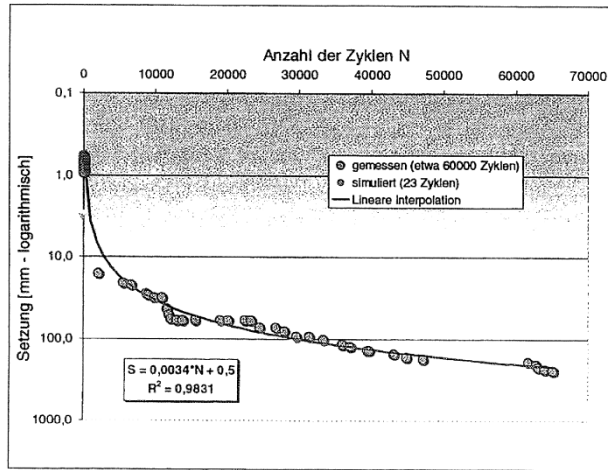


Bild 15. Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Setzungen der Schleusenplattform  
 Fig. 15. Measured vs. computed settlements

Figuur 2.7: Vergelijking tussen gemeten en berekende zettingen.

Het model wordt gebruikt voor het ontwerp van een nieuwe sluis naast de bestaande sluis.

## 2.6 Erddruk auf Schleusenkamerwände

Het rapport [7] geeft de stand van de techniek in 1978 aan.

Voor de scheepslift in Luneberg zijn 2 belasting gevallen beschouwd:

- Belasting geval met neutrale gronddruk.
- Belasting geval met 2,5\* neutrale gronddruk en alle ongunstig werkende belastingen zoals temperatuur en verkeer.

Genoemd worden ervaringen in USA, Rusland (USSR) en Duitsland. Bij de Wolgograder Sluis werden drukken tot 3 maal de neutrale druk gemeten. De sluis in Eibach en een modelwand in Neurenberg worden genoemd.

De metingen aan de modelwand geven aan dat de gronddrukcoëfficiënt afhankelijk is van de kopverplaatsing van de wand en de pakking van het zand (Figuur 2.8).

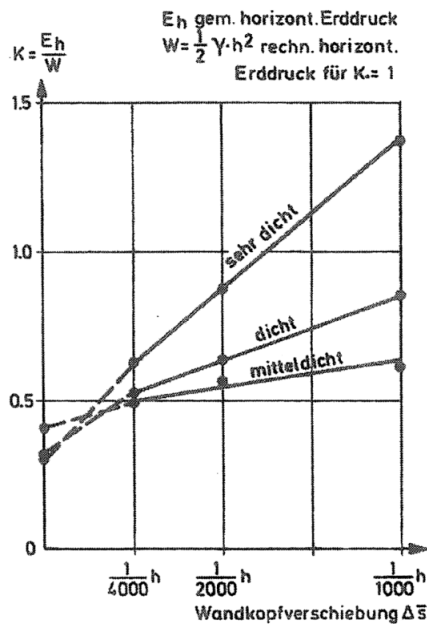
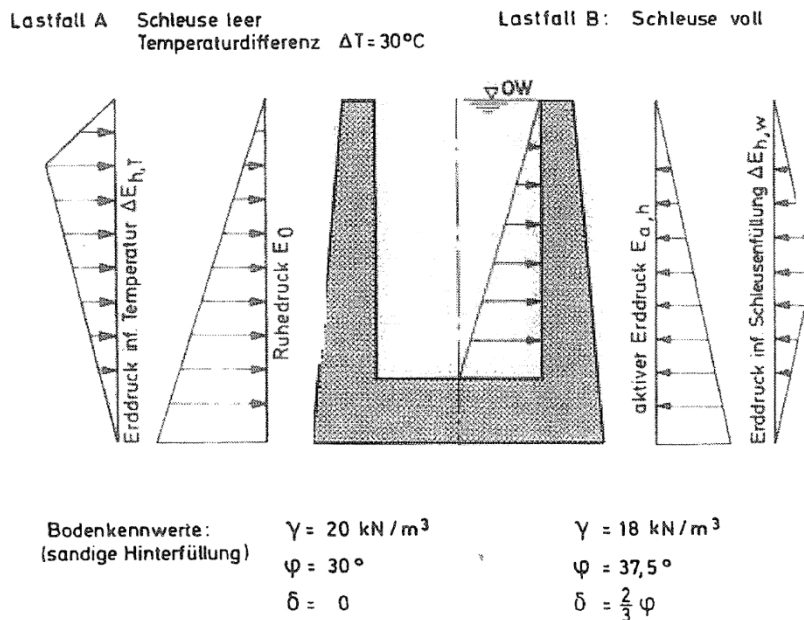


Bild 13: Erddruckbeiwert  $K$  in Abhängigkeit von der Verschiebung der Wand gegen den Boden nach 3 Lastwechseln

Figur 2.8: Relatie tussen grondrukcoëfficiënt, kopverplaatsing en dichtheid van het zand.

Er zijn numerieke simulaties van de sluis in Eibach uitgevoerd. Hieruit blijkt dat de aanvulhoogte en temperatuurbelasting bepalend zijn voor de grondruk. Uiteindelijk wordt aanbevolen om voor het ontwerp twee belasting gevallen aan te houden (zie Figuur 2.9):

- Een lege sluis met temperatuur belasting.
- Een volle sluis met extra grondruk ten gevolge van de sluisvulling.



Figur 2.9: Aanbeveling in rekening te brengen belasting gevallen voor sluisen volgens rapport [8].

## 2.7 Erwiderstandermittlung bei monotonen und wiederholten wandbewegungen in sand

In dit boek [8] wordt op basis van laboratoriumonderzoek, in situ metingen en modelproeven een analyse gegeven van de gedeeltelijk gemobiliseerde passieve druk achter enkele sluiswanden als functie van de wandverplaatsing. Een belangrijk aspect is de invloed van herhaalde belastingen.

De vergelijkbaarheid van schuifmobilisatie in testen op grondmonsters en gronddruk achter wanden kon worden aangetoond voor zowel de actieve als passieve toestand.

De laboratoriumtesten toonden contractie en verdichting onder herhaalde belasting.

De metingen aan de sluisen van Eibach en Iffezheim worden beschreven.

In Stuttgart zijn modelproeven uitgevoerd op een 4 meter hoge en 9 meter lange wand, die cyclisch tegen de zandaanvulling in beweegt. Ter validatie van de resultaten zijn in het laboratorium proeven uitgevoerd op een 0,5 meter hoge wand.

Een functie die de mobilisatie van de gronddruk beschrijft is vooral gebaseerd op de resultaten van deze modelproeven.

De formule luidt:

$$K_h = K_0 + (K_{ph} - K_0) * (v(z)/z) / (a + v(z)/z)$$

Hierin is  $v(z)$  = de verplaatsing (afhankelijk van diepte  $z$ ) bij passieve wandbeweging.

De factor  $a$  is een dimensie loze parameter die de stijfheid van het materiaal beschrijft. In de modelproeven zijn voor los zand de waarde 0,11 en voor in laagjes verdicht zand de waarde 0,03 gevonden. Voor wisselende verplaatsingen in actieve richting wordt een vergelijkbare uitdrukking afgeleid:

$$K_{ah,mob}(z) = K_0 - (K_0 - K_{ah}) * (v(z)/z) / (b + v(z)/z)$$

Voor de factor  $b$  wordt in [8] genomen:  $b=a/10$ .

## 2.8 Integral Bridges

In het rapport Integral Bridges [1] wordt verslag gedaan van numeriek en experimenteel onderzoek naar temperatureffecten bij bruggen die uit één stuk zijn gemaakt.

Het doel van het onderzoek is het theoretische begrip van cyclisch gedrag van grond achter een stijve constructie.

Het onderzoek is gericht op de invloed van de beweging van het brugdek op de gronddruk tegen de wand onder het landhoofd en gronddeformaties achter het landhoofd. De interactie van grond en constructie en het gedrag van korrelige grond onder cyclische belasting staat centraal.

Uit metingen aan 4 bruggen blijkt dat de gronddruk in de winter nabij actief ligt. De cyclische belasting vanuit het brugdek is afhankelijk van het materiaal van het brugdek, de locatie en de lengte van het brugdek. De verplaatsing van één zijde van een brugdek (Lengte 42 tot 60 m) varieert tussen 13 en 20 mm in een seizoen.

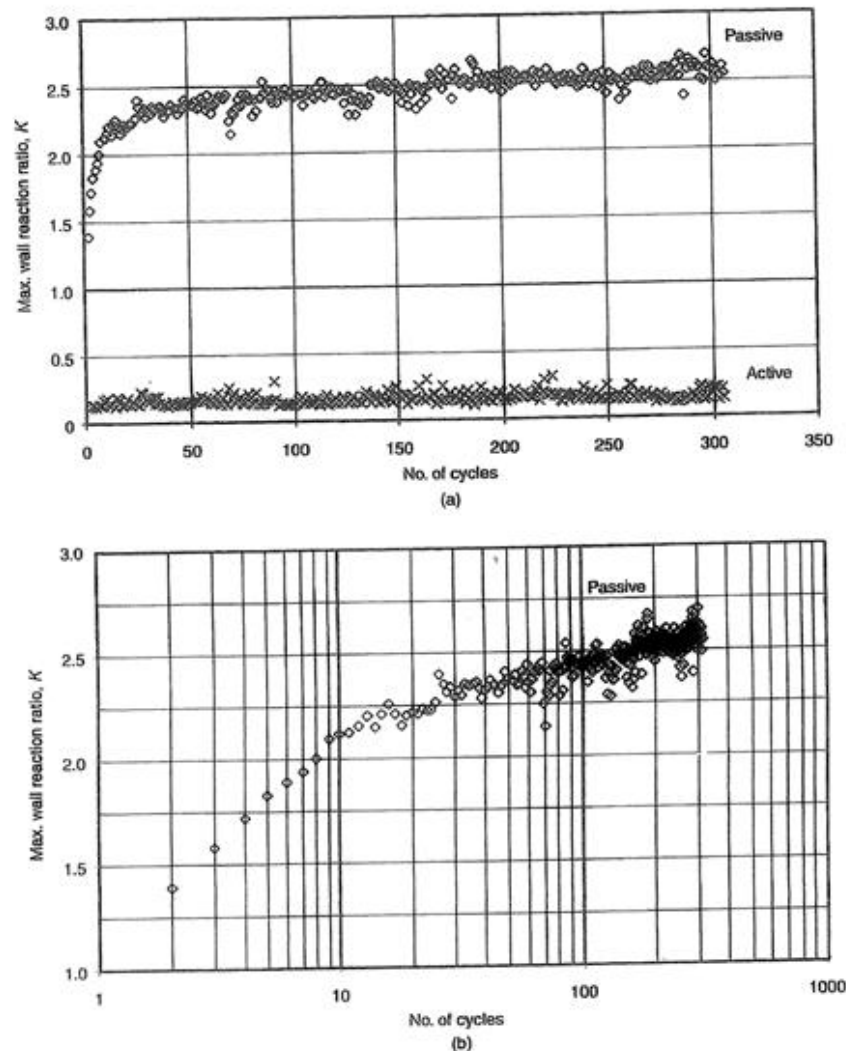
Het gedrag van gedraineerd korrelig materiaal bij cyclisch belasten kan door 3 fenomenen worden gekarakteriseerd:

- Verdichting of dilatatie (volumeverandering).
- De opbouw van spanningsspaden tussen de korrels.
- Een vormverandering door het optreden van schuifrekenen en verplaatsing van korrels.

De interactie tussen de 3 fenomenen en de mogelijke dominantie van een fenomeen hangt af van de specifieke belasting in een situatie.

In het onderzoek zijn modelproeven uitgevoerd waarbij zand in een bak wisselend belast is. Een wand van de bak scharniert aan de onderzijde en wordt aan een rotatie onderworpen. Als belastingvorm is onderscheid gemaakt in een cyclische belasting om het seizoen effect te simuleren en een dubbel cyclische belasting om zowel het seizoen effect als het dag effect te simuleren.

Cyclische proeven met een opgelegde rotatie van 0.125% (1,25 mrad) geven aan dat na 300 cycli de gronddrukcoëfficiënt bij beweging richting passief is opgelopen tot ongeveer 2.5. De gronddrukcoëfficiënt bij beweging richting actief bedraagt ongeveer 0.2, zie Figuur 2.10.



Figuur 2.10 Variaties in de gronddruk coëfficiënt tegen de wand  $K$  en het aantal wand rotatie cycli: (a) maximum waarden voor actief en passief (lineaire plot); (b) maximum waarde passief (logaritmische plot).

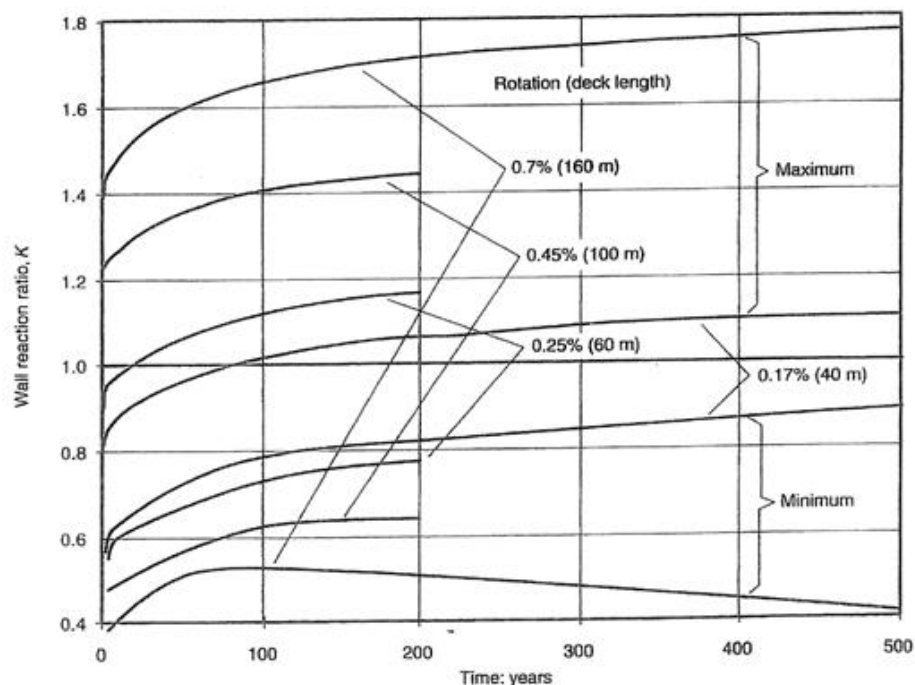
Proeven met een opgelegde rotatie van 0.25% geven gronddrukcoëfficiënten bij beweging richting passief aan van meer dan 6. Ter vergelijking: Bij Maasbracht is de opgelegde rotatie circa  $10 \text{ mm}/15 \text{ m} = 0.06\%$ .

Bij de dubbel cyclische belasting loopt de gronddrukcoëfficiënt op tot vergelijkbare of iets hogere waarden dan bij de cyclische belasting. De dichtheid van de grond nabij de wand neemt toe en de verplaatsingen van de grond achter de wand zijn groter.

Numerieke simulaties zijn uitgevoerd met het softwareprogramma Qsand. Het grondgedrag bij ontlasten en her belasten wordt gekenmerkt door een stijver gedrag (strain hardening) in combinatie met grotere rekken (softening).

Qsand is gebaseerd op een model, waarin de grond gesimuleerd is door 2 in serie geschakelde elementen; een Maxwell element en een Kelvin element. Het Maxwell element bestaat uit een serie van een veer en een demper. Het Kelvin element uit een parallelle schakeling van veer en demper. Met dit model kan weliswaar het grondgedrag bij ontlasten en her belasten gesimuleerd worden, maar een goede fysische basis voor model, laat staan parameterkeuze ontbreekt.

Numerieke simulaties met een cyclische belasting met een rotatie van 0.25% leiden tot een gronddruk coëfficiënt bij beweging richting actief van 0.8 en bij beweging richting passief van 1.2. Uit Figuur 2.11 blijkt dat het lang duurt voor deze waarden bereikt worden.



Figuur 2.11: Variaties in de maximum en minimum muur reactie ratios  $K$  per tijd voor enkel cyclische simulaties (met een initial void ratio of 0.56).

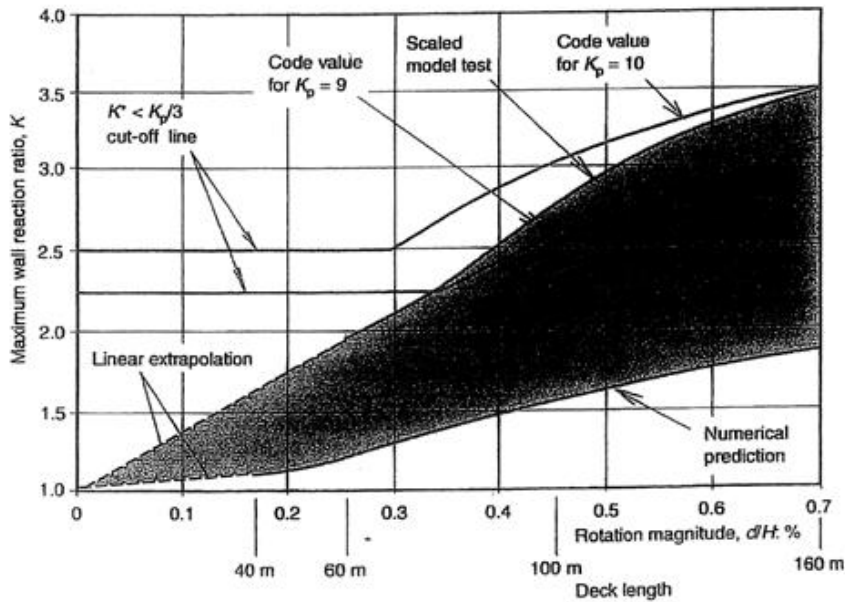
Simulaties met een dubbel cyclische belasting geven aan dat de eindsituatie sneller bereikt wordt. De gronddrukcoëfficiënt bij beweging richting passief is iets lager.

Simulaties met stijver zand leiden tot een hogere gronddrukcoëfficiënt bij beweging richting passief. In het rapport wordt op basis van de proeven en numerieke simulaties geconcludeerd:

- Door de temperatuur belasting gaat de gronddrukcoëfficiënt bij beweging richting passief snel naar een waarde van circa 1. De maximale waarde wordt na vele jaren bereikt.
- De proeven geven een erg conservatieve bovengrens voor de gronddrukcoëfficiënt bij beweging richting passief. Dit komt omdat grond bij de kleine spanningen in het model stijf reageert.

- De numerieke simulaties geven een ondergrens voor de grondrukcoëfficiënt bij beweging richting passief. Dit komt doordat het model de rekken onderschat en er geen glijvlakken bij grote rotaties ontstaan.

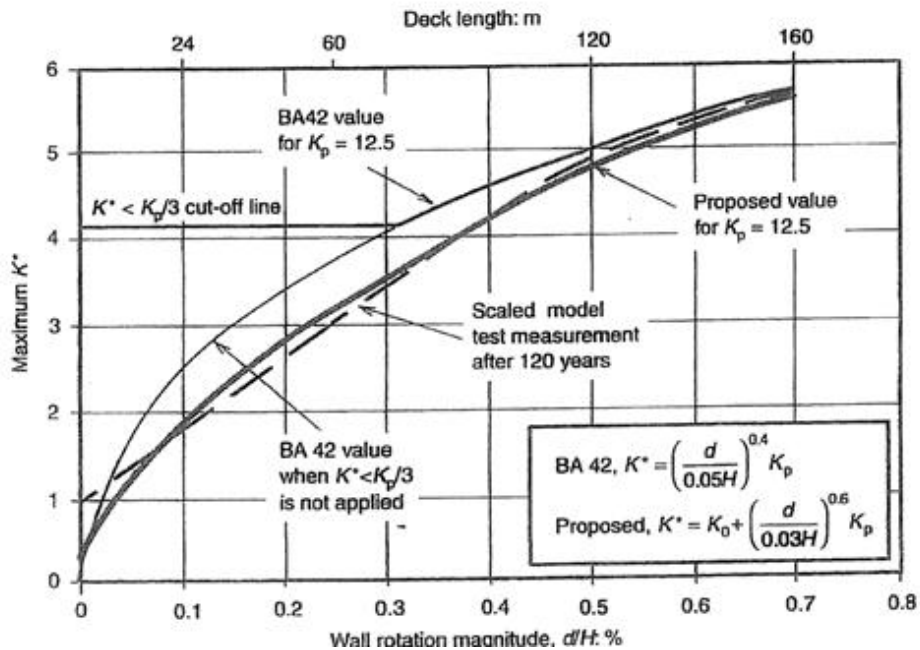
De resultaten van de proeven zijn terug geschaald naar het goede spanningsniveau. In Figuur 2.12 zijn de resultaten samengevat.



Figuur 2.11: Comparison of upper bound values for the wall reaction ratio  $K$  obtained from experiments and the BA 42 code recommendations for design.

Voor de in rekening te brengen grondruk wordt de volgende formule aanbevolen:

$$K^* = K_0 + (d/0.03H)^{0.6} \cdot K_p$$



Figuur 2.12: Comparison of the proposed upper limit for  $K^*$  with the current BA 42 Code.

## 2.9 Physical and numerical investigation of integral bridge abutment stiffness due to seasonal thermal loading [9]

Integraalbruggen (Integral Bridge Abutments) worden wereldwijd steeds populairder door (i) lagere onderhoudskosten in vergelijking met traditionele bruggen met uitzettingsvoegen, (ii) betere seismische prestaties, en (iii) eenvoudige en snelle constructie. De grootschalige toepassing wordt echter beperkt door verschillende factoren, waarvan de belangrijkste onzekerheid ligt in de interactie tussen het achterliggende grondpakket, het (integraal) landhoofd en het brugdek onder verschillende belasting scenario's tijdens de gebruiksduur, zoals seizoensgebonden thermische belasting, verkeersbelasting en seismische belasting.

Seizoensgebonden thermische belasting bij integraalbruggen verwijst naar de cyclische belasting door krimp (daling van de temperatuur in de winter) en uitzetting (stijging van de temperatuur in de zomer) van het brugdek. Op de lange termijn leiden dagelijkse en seizoensgebonden uitzettings- en krimpcycli van het brugdek tot een opbouw van laterale gronddruk achter de landhoofden. Uit veldmetingen van Integral Bridge Abutments die in gebruik zijn, blijkt dat de laterale druk achter het landhoofd toeneemt wanneer de thermische belasting zorgt voor voldoende verplaatsing van het landhoofd.

Het drukprofiel wordt beïnvloed door verschillende factoren, zoals de stijfheid en sterkte van het achterliggende grondpakket, het verdichtingsniveau, randvoorwaarden, de amplitude van de thermische belasting en de verbinding tussen palen en landhoofd indien palen aanwezig zijn. Het is onduidelijk of de laterale druk achter het landhoofd zich blijft opbouwen met een bepaalde snelheid voordat deze uiteindelijk stabiliseert.

Naast een goede verdichting, speelt de kwaliteit van de aangevulde grond ook een cruciale rol voor het gedrag van de grond-constructie-interactie onder meerdere cycli van thermische belasting. Verschillen in de parameters van de grond beïnvloeden de ontwikkeling van de gronddruk.

De laterale gronddruk varieert met de verplaatsing van het landhoofd, en de doorbuiging van het landhoofd wordt voornamelijk beïnvloed door zijn buigstijfheid. Het gedrag van de grond-constructie-interactie door thermische uitzetting van Integral Bridge Abutments moet worden begrepen en geanalyseerd met specifieke aandacht voor de relatieve stijfheid van het landhoofd en het achterliggende grondpakket.

In het laboratorium is een klein, fysiek model gebouwd om het opvullende grondpakket van een integraalbrug te repliceren onder versnelde seizoensgebonden uitzetting en krimp van een brugdek. De testopstelling was ontworpen om het effect van verplaatsingen van het landhoofd door seizoensgebonden uitzetting en krimp van het brugdek te simuleren. Er werden twee verschillende belasting protocollen toegepast: één met toenemende verplaatsingen per cyclus (I) en één met constante verplaatsing per cyclus (C).

### 2.9.1 Resultaten

De laterale druk in de passieve toestand neemt snel toe met een toenemend aantal cycli, terwijl deze in de actieve toestand slechts licht toeneemt. Deze trends weerspiegelen een toename van de wrijvingshoek van de grond, veroorzaakt door een grotere dichtheid bij een toenemend aantal cycli. Met een toenemend aantal cycli, neemt zowel de gronddruk als de laterale gronddruk geleidelijk toe. De relatie tussen het aantal cycli (testduur) en de laterale gronddruk had een afnemende groeisnelheid en was dus niet-lineair. Bij stijvere wanden neemt deze groeisnelheid sneller af.

Om het gedrag van Integral Bridge Abutments's onder seizoensgebonden thermische belasting te onderzoeken, werd het experiment ook numeriek gemodelleerd.

Bij de vergelijking van de laterale gronddruk in de passieve staat van de opvullende grond langs de wand van de testopstelling tussen de experimentele en numerieke modellen, bleek de maximale waarde in de numerieke modellen aanzienlijk hoger te zijn dan die in de experimentele testen, vooral bij stijvere wanden. Bovendien toonde de vergelijking met analytische en empirische formules aanzienlijke verschillen, waarbij de experimentele gronddruk hoger was dan de waarden uit de empirische en analytische modellen.

## 2.9.2 Conclusie

Dit artikel onderzoekt het effect van verschillende stijfheden van de landhoofden van integraalbruggen op de aangebrachte grond en de druk tussen het landhoofd en de grond, door middel van een kleinschalige 1g-experimentele opstelling. De flexibiliteit van het landhoofd bleek enige invloed te hebben op de gemeten gronddrukken, waarbij de maximale waarde meer dan 25% verschilt tussen een flexibeler landhoofd en een stijver landhoofd. De ontwikkeling van gronddrukken bij een flexibele configuratie werd beter voorspeld door een numeriek model dan bij stijve wanden.

De auteurs concluderen dat de experimentele, analytische en numerieke resultaten in deze studie aangeven dat er nog steeds een aanzienlijke mate van onzekerheid en de daaruit voortvloeiende voorzichtigheid is ingebed in de momenteel gebruikte ontwerptools en beoordelingsmethoden. Bovendien houden de vereenvoudigde modellen die momenteel worden toegepast, geen rekening met veranderingen gedurende de levenscyclus van de infrastructuur. Schaalproblemen en randverschijnselen in deze kleinschalige experimentele opstelling beperken de toepassing ervan voor oplossingen bij het ontwerp en de beoordeling van gronddrukken.

Grootschaligere fysieke modellen van integraalbruglandhoofden zijn nodig om nauwkeurigere en minder conservatieve ontwerpen en beoordelingen van integraalbruggen mogelijk te maken.

## 2.10 Integral bridge abutments (R.J. Lock, 2002)

**De volgende samenvattingen zijn uit het verslag van R.J. Lock, in dat verslag wordt ook een literatuurstudie gedaan dus het zijn allemaal losse samenvattingen van artikelen die hij heeft samengevat, waarvan alleen relevante stukken zijn gekozen.**

Het rapport [10] presenteert verzamelde informatie over de gronddrukken en zettingen die zich ontwikkelen achter model- en op ware schaal gebouwde landhoofden van integraalbruggen. Het doel is om het ontwerp van integraalbruggen te vergemakkelijken, waarvoor de huidige Britse richtlijnen te conservatief zijn. Het rapport concludeert dat de ontwerplengtes van integraalbruggen stapsgewijs moeten worden vergroot.

Het rapport bevat een literatuurstudie, afkomstig van de Bridges Engineering Division van de Highways Agency. De eerste bron is het TRL Report 146: Cyclic loading of sand behind integral bridge abutments, dit rapport vormt de basis voor de aanbevelingen in hun standaarden. De tweede is *Integral Bridges: A fundamental approach to the time-temperature loading problem*. Hierin worden de bevindingen, gericht op het onderzoeken van de problemen rond zettingen en de opbouw van laterale gronddrukken, gepresenteerd.

### 2.10.1 BA 42/96 standard – the design of integral bridges

De British Highway Agency berekent gronddrukken aan de hand van de volgende formule:

$$K^* = \left(\frac{d}{0.5H}\right)^{0.4} * K_p$$

$K_p$  = Passieve laterale gronddruk coëfficiënt.

H = Kerende hoogte.

$d =$  Thermische verplaatsing van de top van het landhoofd, gebaseerd op wandwrijving  $\delta = \varphi'/2$ .

De richtlijn stelt ook dat  $K^*$  groter moet zijn dan de 'rust'-gronddruk  $K_0$ , waarbij:

$$K_0 = 1 - \sin(\varphi')$$

$\varphi'$  = effectieve schuifweerstandshoek.

Passieve laterale gronddruk treedt op wanneer een keerwand richting de grond beweegt, waardoor deze wordt samengedrukt en de schuifsterkte van de grond wordt gemobiliseerd. Het wordt als volgt berekend:

$$K_p = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$$

### 2.10.2 TRL Report 146: Cyclic loading of sand behind integral bridge abutments

Een centrifuge experiment wordt beschreven. Dit experiment is uitgevoerd om de gronddruk te meten, en daarmee indirect de gronddruk coëfficiënt te bepalen. Het rapport concludeert dat de totale laterale gronddrukken toenemen met het aantal cyclische verplaatsingen.

### 2.10.3 Integral bridges: a fundamental approach to the time-temperature loading problem

Het probleem van landhoofden met grove korrelige materiaal als opvulling werd opnieuw bekeken. Er werden testen gedaan om de bewegingen van de bruggen met een overspanning van 60, 120, en 160 meter te simuleren over een temperatuurbereik van 50°C. Er werd naar de resultaten gekeken in combinatie met de numerieke simulaties, om aanbevelingen te doen die direct verband houden met de huidige norm BA 42/96.

De conclusies waren als volgt:

- $K$  verandert snel tijdens het begin van de temperatuurcycli. Vervolgens neemt  $K$  toe met een geleidelijk afnemende snelheid totdat een stationaire waarde is bereikt.
- De gecombineerde respons van dagelijkse en seizoensgebonden fluctuaties is zeer vergelijkbaar met die van alleen seizoensgebonden fluctuaties.

De volgende vergelijking wordt aanbevolen met de kanttekening dat deze is gebaseerd op beperkte experimentele gegevens:

$$K^* = \left(\frac{d}{0.03H}\right)^{0.6} * K_p$$

### 2.10.4 Conclusies van het gehele rapport

Uit vele studies is gebleken dat de prestaties van integraal bruggen beter zijn dan verwacht. Daarom wordt voorgesteld om de lengte van de bruggen stapsgewijs te vergroten terwijl de prestaties worden geobserveerd.

## 2.11 Conclusie literatuurstudie

In de studie is gezocht naar literatuur die is verschenen na de vorige studie van 2007. Hierin is één relevant artikel [9] gevonden. Dit artikel heeft niet tot nieuwe inzichten geleid.

Daarmee is geconcludeerd dat de huidige rekenregel van de ROK gehanteerd kan worden.

### 3 Berekeningsaanpak volgens de Richtlijn Ontwerpen Kunstwerken (ROK)

In de literatuurstudie van 2007 [11] is aanbevolen om de gronddrukken tegen sluisen te berekenen volgens de methode zoals beschreven in Paragraaf 2.7. Deze methode is in de ROK [12] opgenomen. De gronddruk hierbij is afhankelijk van de horizontale verplaatsing van de wand, die een functie is van de diepte. Deze verplaatsing is genormeerd op de diepte. Hieronder de letterlijke teksten uit de ROK. In artikel ROK-0670 zijn bovendien aanvullende belastingfactoren genoemd die gebruikt dienen te worden voor het ontwerp van nieuwe kunstwerken.

ROK-0669	9.5.4 (2) (b)-NEN 9997-1	Kunstwerk
Eistekst	<p>Als gevolg van fluctuerende temperaturen en eventuele waterstanden moet bij vrij uitkragende wanden het oplopen van de <b>gronddruk</b> tot hogere waarden in de loop der tijd als volgt in rekening worden gebracht:</p> <p>Voor de passieve gemobiliseerde druk geldt:  <math display="block">K_{h,mob} = K_0 + (K_{ph}-K_0) \cdot (v/z) / (a + v/z)</math></p> <p>waarin:  <math>K_{h,mob}</math> = horizontale <b>gronddruk</b>coëfficiënt als gevolg van het opspaneffect;  <math>K_0</math> = neutrale <b>gronddruk</b>coëfficiënt;  <math>K_{ph}</math> = passieve horizontale <b>gronddruk</b>coëfficiënt;  <math>v</math> = verplaatsing van de wand, in passieve richting op diepte <math>z</math>, als gevolg van fluctuerende temperatuureffecten en waterstanden;  <math>z</math> = diepte gemeten vanaf de bovenzijde van de wand;  <math>a</math> = parameter die afhankelijk is van de pakking van het zand;</p> <p>Voor vervolg zie onderliggende eis.</p>	
Onderl. eis	ROK-0670	
Toelichting	Voorgaande formule is ontleend aan "Sluiskolkwanden in Maasbracht en Born, Advies horizontale druk tegen sluiscolkwanden, mei 2007, GeoDelft"	

ROK-0670	9.5.4 (2) (b)-NEN 9997-1	Kunstwerk
Eistekst	<p>De parameter <math>a</math> varieert tussen 0,01 voor vastgepakt zand en 0,1 voor los gepakt zand. Voor in lagen verdicht zand kan <math>a = 0,03</math> worden aangehouden. Als de <b>gronddruk</b> ongunstig werkt, moet voor de belastingfactor voor gevolgklasse 2 een waarde van 1,5 worden aangehouden; voor gevolgklasse 3 is dit 1,65.</p> <p>Voor de partiële <b>gronddruk</b>coëfficiënt moet, als de druk gunstig werkt, een waarde van 1,0 worden aangehouden.</p> <p>Voor de grootte van de momentaanfactoren voor de combinatie van de belastingen als gevolg van het opspaneffect en alle variabele belastingen geldt <math>\psi = 1</math>.</p>	
Bovenl. eis	ROK-0669	

De ROK geeft aan dat voor de passieve gemobiliseerde druk geldt:

$$K_h (mob) = K_0 + (K_{ph}-K_0) \cdot (v(z)/z) / (a + v(z)/z)$$

Hierin is:  $K_h (mob)$  = horizontale gronddrukcoëfficiënt als gevolg van het opspaneffect.

Hierbij moet worden bedacht dat een deel van de gronddrukcoëfficiënt  $K_h (mob)$  veroorzaakt is door de permanente belasting. Dit betreft de waarde  $K_0$ . Het opspannen veroorzaakt de toename van de gronddrukcoëfficiënt.:  $+ (K_{ph}-K_0) \cdot (v(z)/z) / (a + v(z)/z)$ .

# 4 Berekeningen van Arcadis

## 4.1 Inleiding

Door Arcadis is een studie gedaan naar de toename van de gronddruk als gevolg van temperatuurwisselingen tegen een verticale wand van een tunnel [13].

Hiervoor is als case de open tunnelbak van de Utrechtse baan in Den Haag gebruikt.

Voor de berekening van de gronddrukken tegen de wand is de aanpak uit de ROK, zoals vermeld in Hoofdstuk 3 gebruikt.

In de berekening volgens de ROK is de horizontale verplaatsing van de wand een belangrijke parameter. In het geval van de open tunnelbak is er direct na de bouw al een horizontale druk op de wand. Deze wordt veroorzaakt door de dan al optredende horizontale gronddrukken. Daarna zal door temperatuurwisselingen de horizontale verplaatsing van en druk op de wand wijzigen.

Het doel van de Arcadis studie is het opstellen van een rekenmethodiek voor de berekening van gronddrukken in dergelijke belasting situaties. De berekeningen van Arcadis zijn uitgevoerd met het computerprogramma SCIA.

## 4.2 Berekening belasting tegen tunnelwand

### 4.2.1 Eerste berekening

In de eerste berekening wordt de gronddruk tegen de wand vastgesteld die optreedt in de situatie na bouw. Deze druk neemt toe bij een hoge temperatuur.

1. De verticale grondspanning achter de wand is berekend uit het verticale soortelijke gewicht van de droge grond boven de grondwaterstand en verzadigde soortelijke gewicht van de grond onder de grondwaterstand.
2. De verticale korrelspanning is de verticale grondspanning min de grondwaterdruk.
3. De horizontale korrelspanning achter de wand is de verticale korrelspanning maal de neutrale gronddruk coëfficiënt.
4. De horizontale gronddruk achter de wand is de horizontale korrelspanning plus de grondwaterdruk.
5. Voor de temperatuurbelasting is onderscheid gemaakt tussen jaarlijkse en dagelijkse temperatuurwisselingen. Deze leiden tot een opwarming van de vloer en wanden in de zomer. In de winter koelen de wanden en vloer af. Hierbij ontstaan tevens temperatuurgradiënten over de wanden en vloer omdat de temperatuur aan de binnenzijde van de tunnel meer effect heeft dan aan de grondzijde.
6. De optredende temperatuurgradiënten leiden tot uitzetting van beton aan de binnenzijde in de zomersituatie en tot krimp in de wintersituatie. Dit veroorzaakt kromming van zowel de wanden als de vloer. De wanden worden in de zomer tegen de grond in gedrukt. De vloer van de tunnel verlengd.
7. De verplaatsing van de wand als gevolg van de temperatuur wordt berekend. Met de formules uit de ROK kan de gronddruk worden berekend. Deze is meer dan de neutrale gronddruk want de wand beweegt in de zomer tegen de grond in.
8. De gronddruk veroorzaakt door het opspaneffect is de onder punt 7 berekend gronddruk min de neutrale gronddruk.

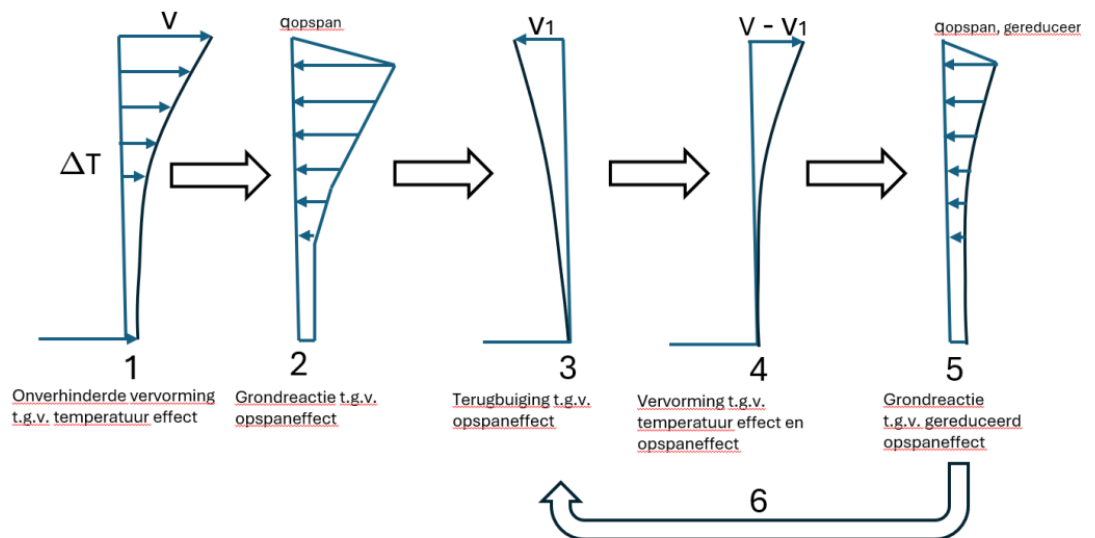
In deze eerste berekening van Arcadis is nog geen rekening gehouden met het feit dat de verhoogde druk door het opspaneffect leidt tot een verplaatsing van de wand van de grond af, waardoor de gronddruk minder wordt.

De eerste berekening levert dus een bovengrens van de gronddruk tegen de wand op. De exacte waarde van de gronddruk kan worden bepaald door iteraties uit te voeren. De procedure is beschreven in Paragraaf 4.2.2.

#### 4.2.2 Iteratieve berekening gronddruk

1. Stap 1: bereken de vervorming van de constructie ten gevolge van het temperatuur effect waarbij de vloer kan verlengen en de wand door temperatuurgradiënten kromt richting de grond.
2. Stap 2: bereken de verhoogde gronddruk van het opspaneffect ten gevolge van de in stap 1 bepaalde vervorming in de richting van de grond.
3. Stap 3: bereken de terug buiging van de wand ten gevolge van de in stap 2 bepaalde verhoogde gronddruk.
4. Stap 4: bereken de netto vervorming in de richting van de grond ten gevolge van het temperatuur effect en de terug buiging van de wand door het opspaneffect.
5. Stap 5: bereken het gereduceerde opspaneffect.
6. Stap 6: met de in stap 5 berekende gereduceerde gronddruk kan de terug buiging van de wand worden berekend en stap 3 tot en met 5 worden herhaald totdat iteratief de vervormingen gelijk zijn.

Door Arcadis is dit als volgt weergegeven:



Figuur 4.1: Stappenplan berekening opspaneffect [13].

#### 4.2.3 Belastingcombinaties

Door Arcadis zijn in het programma SCIA de volgende belastingcombinaties berekend:

Combinatie No	Combinatiennaam	Belastingen
1	SLS - Permante belasting	Eigen gewicht + Gronddruk + Waterdruk
2	SLS - Zomer	Eigen gewicht + Gronddruk + Waterdruk + Temperatuur - Zomer
3	SLS - Opspaneffect - Onverhinderd	Eigen gewicht + Gronddruk + Waterdruk + opspaneffect - Onverhinderd
4	SLS – Opspaneffect - Na iteratie	Eigen gewicht + Gronddruk + Waterdruk + opspaneffect - Na iteratie

*Figuur 4.2: Belastingcombinaties.*

De effecten van de belastingen worden gecombineerd met een combinatiefactor van 1,0. Hierbij wordt uitgegaan van lineaire superpositie.

Uit de berekeningen van Arcadis blijkt dat het maximaal buigend moment in de wand, dat veroorzaakt wordt door het opspannen, in de iteratieve berekeningen 42% lager is dan in de berekening zonder iteraties.

Uit de berekeningen van Arcadis blijkt dat het totale maximaal buigend moment in de wand voor belastingcombinatie 4 circa 20% lager is dan voor belastingcombinatie 3.

## 5 Advies berekening gronddrukken tegen bestaande constructies

### 5.1 Berekening volgens ROK

Door wisselende horizontale verplaatsingen van constructies, veroorzaakt door factoren zoals fluctuerende temperaturen en waterstanden, kunnen de horizontale grondspanningen in de loop der tijd toenemen (opspannen). Door Rijkswaterstaat wordt voor het ontwerpen van nieuwe kunstwerken de Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken [12] (ROK) gehanteerd. In de ROK is een rekenregel opgenomen voor het berekenen van gronddrukken die door wisselende horizontale verplaatsingen tegen wanden in kunstwerken ontstaan.

Deze rekenregel kan ook gehanteerd worden voor bestaande constructies.

De rekenregel in de ROK geldt specifiek voor wanden in sluizen. Deze regel kan ook worden toegepast voor starre tunnel constructies, omdat daar net zoals bij sluizen het opspannen kan optreden.

Volgens NEN 9997-1\_2025+C1\_2025 nl [14] paragraaf 2.4.2 moet de belasting tegen een ondergrondse dak/wandconstructie worden berekend volgens schema B. Dit houdt in dat constructie in de SLS (bruikbaarheidsgrenstoestand) wordt berekend.

Op de aldus berekende gronddrukken moeten partiële belastingfactoren conform tabel A3, kolom 1 van NEN 9997-1\_2025+C1\_2025 nl worden toegepast. De gronddruk moet hierbij worden gezien als een veranderlijke belasting. De partiële factor bij nieuwbouw is afhankelijk van de veiligheidsklasse, namelijk 1.35 voor RC1, 1.5 voor RC2 en 1.65 voor RC3.

Voor de beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk is een Nederlandse norm [15] beschikbaar. Bij verbouw en afkeur zijn de aan te houden veiligheidsniveaus lager dan bij nieuwbouw. In deze norm [15] is dat verwerkt door de partiële belastingfactoren aan te passen.

De partiële factoren voor de veranderlijke belasting tegen de wand constructies zijn in Tabel 5.1 samengevat.

*Tabel 5.1: Partiële factoren voor veranderlijke geotechnische belastingen tegen geotechnische constructies (bijvoorbeeld een kelder of tunnelwand)*

	Nieuwbouw	Verbouw	Afkeuren
<b>Gevolgklasse 1a/b</b>	1,35	1,1	1,05
<b>Gevolgklasse 2</b>	1,5	1,3	1,15
<b>Gevolgklasse 3</b>	1,65	1,5	1,3

Het opspannen is het gevolg van wisselende verplaatsingen van de wand. Dit kan veroorzaakt zijn door fluctuerende temperaturen zoals bij open tunnelbakken of wisselende waterstanden, zoals bij sluizen.

In de rekenregel van de ROK is de gronddruk afhankelijk van de verplaatsing van de wand. Deze verplaatsing ontstaat in eerste instantie door de permanent aanwezige grond- en waterdrukken. Als gevolg van de wisselende belastingen verandert de verplaatsing van de wand en daarmee ook de gronddruk tegen de wand.

In het voorbeeld van Arcadis (Hoofdstuk 4) is gerekend met het programma SCIA. De belasting op de wand is een temperatuurbelasting. Deze leidt tot een verplaatsing van de wand. In het SCIA model, dat Arcadis gebruikt, is de toename van de gronddruk door het opspannen (het verplaatsen van de wand) echter niet opgenomen. Door de verplaatsing van de wand neemt de gronddruk toe en die zorgt er weer voor dat de wand wordt teruggeduwd of eigenlijk minder verplaatst dan in de eerste aanzet wordt berekend. Om tot de juiste verplaatsing van de wand en drukken tegen de wand te komen is daarom een iteratieve procedure nodig. Dit is in het schema van de Paragraaf 5.2 beschreven.

## 5.2 Berekeningsprocedure

### 5.2.1 Berekening van opspannen door temperatuur invloed in open tunnelbakken met het programma SCIA

Voor het berekenen van de gronddruk als gevolg van opspannen tegen een wand van een open tunnelbak, die onderhevig is aan temperatuurwisselingen, kan het volgende schema worden gehanteerd:

1. Bereken de temperatuurbelasting. Door temperatuurvariaties ontstaan temperatuurverschillen tussen binnen- en buitenzijde van de wand. Hierdoor ontstaat een kromming van zowel de vloer als de wanden van de tunnelbak. Deze kromming leidt tot een horizontale verplaatsing van de wand.
2. Bereken de gronddruk die volgt uit de verplaatsing van stap 1. De door de temperatuur veroorzaakte extra druk (het opspaneffect) is de nu berekende gronddruk min de neutrale gronddruk. Deze gronddruk leidt tot een kleinere verplaatsing van de wand. Pas een iteratieve procedure toe om de verplaatsing van de wand in overeenstemming te brengen met de verplaatsing van de wand door de temperatuurbelasting.
3. Vermenigvuldig de aldus verkregen gronddruk door opspannen met de partiële belastingfactor. Deze factor is afhankelijk van het benodigd veiligheidsniveau. Dat hangt weer af van de situatie (Tabel 5.1). Bereken met deze factor op de gronddruk de krachten (buigende momenten/dwarskrachten) in de constructie in de uiterste grenstoestand (UGT). Deze krachten zijn het gevolg van het opspannen.

Voor het beoordelen van de verplaatsingen en krachten in de constructie moeten belastingcombinaties worden doorgerekend. In één van de belastingcombinaties moet de permanente belasting worden gecombineerd met de belasting door het opspaneffect. De permanente belasting bestaat uit gronddruk, waterdruk en eigen gewicht. De belasting door het opspannen geeft evenals de permanente belastingen een gronddruk. Er moet voor worden gewaakt dat dit alleen de gronddruk is door het opspannen en dus niet de gronddruk die al veroorzaakt door de permanente belasting. Anders vindt een dubbeltelling plaats.

In formule vorm van gronddrukcoëfficiënten [12]:

$$K_h(\text{mob}) = K_0 + (K_{ph} - K_0) * (v(z)/z) / (a + v(z)/z)$$

$K_h(\text{mob})$  = gronddruk veroorzaakt zowel door de permanente belasting als het opspannen  
 $K_0$  = neutrale druk coëfficiënt om de gronddruk veroorzaakt door de permanente belasting te berekenen.

$(K_{ph} - K_0) * (v(z)/z) / (a + v(z)/z)$  = gronddrukcoëfficiënt om de gronddruk veroorzaakt door het opspannen te berekenen.

## 5.2.2 **Berekening van opspannen door wisselende waterstanden in sluzen met het programma SCIA**

Een wand van een sluis is onderhevig aan wisselende waterstanden en temperatuurwisselingen. Hierdoor spant de grond achter de wand op, net zoals bij de wand die alleen onderhevig is aan temperatuurwisselingen.

Deze wand kan net zoals de wand van de open tunnelbak, worden berekend met SCIA.

Net zoals bij het voorbeeld van de open tunnelbak is de gronddruk afhankelijk van de verplaatsing van de wand. Er is dus net zoals in het voorbeeld van paragraaf 5.2.1 een iteratieve procedure nodig om tot de juiste gronddrukken tegen de wand en de juiste verplaatsingen van de wand te komen.

# 6 Conclusies en aanbevelingen

## 6.1 Conclusies

In de ROK is een rekenregel opgenomen voor het berekenen van gronddrukken die door wisselende horizontale verplaatsingen tegen constructies ontstaan. Deze rekenregel is gebaseerd op een literatuurstudie van GeoDelft uit 2007 [11]. Deze regel is van toepassing op nieuwe constructies.

Uit een studie naar de literatuur van na 2007 volgt dat er geen nieuwe inzichten zijn. De huidige rekenregel van de ROK gehandhaafd blijven.

Door Arcadis zijn met de rekenregel uit de ROK berekeningen voor een bestaande grondkerende constructie uitgevoerd. Op basis van deze berekeningen is een berekeningsprocedure ontwikkeld voor de berekening van horizontale gronddrukken die ontstaan door wisselende belastingen tegen bestaande constructies.

### 6.1.1 Aanbevelingen voor de tekst in de ROK/RBK

De tekst in de ROK/ luidt:

Als gevolg van fluctuerende temperaturen en eventueel waterstanden moet bij vrij uitkragende wanden het oplopen van gronddruk tot hogere waarden in de loop der tijd als volgt in rekening worden gebracht:

Voor de passieve gemobiliseerde druk geldt:

$$K_h (\text{mob}) = K_0 + (K_{ph}-K_0) * (v(z)/z) / (a + v(z)/z)$$

Hierin is:

- $K_h (\text{mob})$  = horizontale gronddrukcoëfficiënt als gevolg van het opspaneffect.
- $v(z)$  = verplaatsing van de wand op diepte  $z$  als gevolg van fluctuerende temperaturen of waterstanden.
- $z$  = diepte gemeten vanaf de bovenkant van de wand.

Opmerkingen bij de tekst:

1. Een deel van de gronddruk coëfficiënt  $K_h (\text{mob})$ , namelijk  $K_0$ , is veroorzaakt door de permanente belasting. Het opspannen veroorzaakt de toename van de gronddrukcoëfficiënt:  $+ (K_{ph}-K_0) * (v(z)/z) / (a + v(z)/z)$ .
2. De parameter  $a$  varieert tussen 0,01 voor vastgepakt zand en 0,1 voor losgepakt zand.
3. Voor wisselende verplaatsingen in actieve richting is een vergelijkbare uitdrukking afgeleid:  $K_{ah,mob} (z) = K_0 - (K_0-K_{ah}) * (v(z)/z) / (b + v(z)/z)$ . Voor de parameter  $b$  kan worden aangehouden:  $b=a/10$ .
4. De gronddrukken moeten worden berekend in de Bruikbaarheids Grens Toestand. Voor een toetsing van de Uiterste Grens Toestand moeten de gronddrukken vermenigvuldigd worden met partiële belastingfactoren. Voor nieuwe constructies staan deze in de norm NEN 9997 [14]. Voor bestaande constructies zijn de partiële belastingfactoren lager dan voor nieuwe constructies. Deze staan in de norm NEN 8700 [15].
5. De gronddrukken veroorzaakt door de permanente belastingen (eigen gewicht, gemiddelde waterdruk, neutrale gronddruk) moeten worden vermenigvuldigd met de partiële belastingfactor voor permanente belastingen. De gronddruk veroorzaakt door het opspan effect moet worden vermenigvuldigd met de partiële belastingfactor voor variabele belastingen.
6. De gronddruk veroorzaakt door het opspaneffect is afhankelijk van de verplaatsing van de wand. Indien gerekend wordt met een model waarin de gronddruk niet afhankelijk is

van de verplaatsing van de wand zijn meerdere iteraties nodig op de juiste gronddrukken tegen en de verplaatsing van de wand te berekenen.

De tekst voor de ROK kan worden opgenomen in de RBK. Het enige verschil tussen een bestaande en nieuwe constructie is namelijk de grootte van de partiële belastingfactor.

# A Literatuur

- Integral Bridges. A fundamental approach to the time-temperature loading problem, Highways Agency, Imperial College, Thomas Telford. First published 2000.
- Besonderheiten bei Entwurf und Bemessung integraler Betonbrücken. Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH&Co. KG, Berlin Beton- und Stahlbetonbau 99, Heft 4, 2004.
- Erddruckmessungen an der Kelleraußenwand eines mehrgeschossigen Massivbaus. D. Franke, M. Arnold, U. Bartl, L. Vogt. Bauingenieur, März 2003.
- Der Einfluss der Temperaturverformung auf den Erddruck hinter Bauwerkswänden. K. Hilmer, N. Vogt 1986.
- Auswertung einer zehnjährigen Messreihe an der Schleuse Eibach. N. Vogt, G. Chara, K. Hilmer, F. Nowack, G. Grimm. Bautechnik 9/1986.
- Schleuse Uelzen I – Hypoplastische Finite-Elemente-Analyse von zyklischen Vorgängen. P. von Wolfersdorf, R. Schwab. Bautechnik 78 (2001), Heft 11.
- Erddruck auf Schleusenammerwände. Baumesstechnik. Bericht VII 1978.
- Erwiderstandermittlung bei monotonen und wiederholten wandbewegungen in sand. Norbert Vogt. Baugrundinstitut Stuttgart. Mitteilung 22, 1984.
- Physical and numerical investigation of integral bridge abutment stiffness due to seasonal thermal loading. Transportation Geotechnics 42 (2023) 101064.
- Lock, R.J., (2002). "Integral bridge abutments", M.Eng. Project Report CUED/D-SOILS/TR320, London, UK.
- GeoDelft. Sluiskolkwanden in Maasbracht en Born. Advies horizontale druk tegen sluiskolkwanden. Kenmerk 4259990-0010. Mei 2007.
- Rijkswaterstaat, RTD 1001 Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken. Versie 2.0, 1 december 2021. Definitief.
- Arcadis. Memo. Beschrijving iteratieve procedure berekening opspaneffect. Projectnummer 30154371. 16 juli 2025.
- Nederlandse norm NEN 9997\_2025+C1\_2025 nl: Geotechnisch Ontwerp van Constructies. Deel 1: Algemene regels.
- Nederlandse norm. NEN 8700+A1 (nl). Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeur-Grondslagen. ICS 91.010.30; 91.080.01. augustus 2020.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)