

Opdrachtgevers:

Provincie Groningen, Provincie Fryslân,
Wetterskip Fryslân en Waterschap Noorderzijlvest

Watervisie Lauwersmeer

Quick Scan Gedempt getij

Auteurs: A.P.P. Termes
W.D. Eysink

Inhoud

Lijst van tabellen.....	ii
Lijst van figuren.....	iii
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doel.....	1
1.3 Leeswijzer	2
2 Antwoorden op de onderzoeksvragen.....	3
3 Hydraulica en morfologie Lauwersmeer.....	8
3.1 Inleiding.....	8
3.2 Beschikbare gegevens	8
3.3 Bestaande situatie	9
3.4 Nieuwe toestand met gedempt getij	10
3.4.1 Algemeen	10
3.4.2 Stroomsnelheden in de geulen.....	11
3.4.3 Zouttoestand in de geulen	11
3.4.4 Aanslibbing van de geulen	13
3.4.5 Afslag van plaatranden en mogelijkheden kweldervorming	14
3.4.6 Grondwater en kwelstromen	15
4 Hydraulica Lauwerssluizen	17
4.1 Inleiding.....	17
4.2 Beschikbare gegevens	17
4.3 Bestaande situatie	17
4.4 Nieuwe toestand met gedempt getij	19
4.4.1 Inleiding.....	19
4.4.2 Rekenmethode en randvoorwaarden.....	19
4.4.3 Waterstanden, afvoer en snelheid	21
4.4.4 Gevolgen voor de bodembescherming.....	32
4.4.5 Overige hydraulische gevolgen	32
5 Samenvatting en aanbevelingen.....	35
5.1 Samenvatting effecten Lauwersmeer.....	35
5.2 Samenvatting effecten Lauwerssluizen.....	37
5.3 Aanbevelingen.....	39
6 Referenties	40
Bijlage A: Theorie hydraulica Lauwerssluizen.....	42

Lijst van tabellen

Tabel 3-1	Relatie waterstand en wateroppervlak van het Lauwersmeer	8
Tabel 3-2	Chloriniteit in de geulen van het Lauwersmeer	12
Tabel 4-1	Gebruikte getijden voor de Waddenzeegetijden bij Lauwersoog.....	20
Tabel 4-2	Uitgevoerde berekeningen	20
Tabel 4-3	Samenvatting van de berekeningsresultaten.....	31

Lijst van figuren

Figuur 1-1	De Waddenzee (links) en het Lauwersmeer (rechts)	1
Figuur 1-2	Het natuurgebied rond het Lauwersmeer	2
Figuur 3-1	Overzichtskaart van het Lauwersmeer.....	9
Figuur 3-2	Definitie kwelderindeling (Bron: Dijkema, Alterra)	15
Figuur 3-3	Principe van de kwelstromen rond het Lauwersmeer	16
Figuur 4-1	Drie sluizencomplexen, spuikokers Lauwersmeer zijde, spuikokers Waddenzee zijde.....	17
Figuur 4-2	Overzicht en doorsnede van de Lauwerssluizen	18
Figuur 4-3	Schematisatie Lauwerssluizen in de rekenmethode	19
Figuur 4-4	Waterstandsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, 3 spuicomplexen.....	21
Figuur 4-5	Afvoer en snelheidsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, 3 spuicomplexen.....	22
Figuur 4-6	Getijprisma op het Lauwersmeer voor gemiddeld getijomstandigheden, 3 spuicomplexen	22
Figuur 4-7	Snelheidsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, 1 spuicomplex tijdens inlaten	23
Figuur 4-8	Getijprisma op het Lauwersmeer voor gemiddeld getijomstandigheden, 1 spuicomplex.....	23
Figuur 4-9	Waterstandsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, hefhoogte schuiven 1 m.....	24
Figuur 4-10	Snelheidsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, hefhoogte schuiven 1 m.....	24
Figuur 4-11	Getijprisma op het Lauwersmeer voor gemiddeld getijomstandigheden, hefhoogte schuiven 1 m.....	25
Figuur 4-12	Waterstandsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, verval beperkt tot 0,8 m.....	25
Figuur 4-13	Snelheidsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, verval beperkt tot 0,8 m.....	26
Figuur 4-14	Getijprisma op het Lauwersmeer voor gemiddeld getijomstandigheden, verval beperkt tot 0,8 m.....	26
Figuur 4-15	Snelheidsverloop voor verschillende getijomstandigheden, 3 spuicomplexen tijdens inlaten	27
Figuur 4-16	Getijprisma op het Lauwersmeer voor verschillende getijomstandigheden, 3 spuicomplexen	27
Figuur 4-17	Snelheidsverloop voor verschillende getijomstandigheden, 1 spuicomplex tijdens inlaten en 2 tijdens spuien	28
Figuur 4-18	Getijprisma op het Lauwersmeer voor verschillende getijomstandigheden, 1 spuicomplex tijdens inlaten en 2 tijdens spuien	28
Figuur 4-19	Gemiddeld getij op de Waddenzee, huidig, in 2030 en in 2100.....	29
Figuur 4-20	Snelheid bij gemiddeld getij in huidige situatie, in 2030 en in 2100	29
Figuur 4-21	Meerwaterstanden bij gemiddeld getij in huidige situatie, in 2030 en in 2100	30
Figuur 4-22	Getijprisma bij gemiddeld getij in huidige situatie, in 2030 en in 2100	30
Figuur A-1	Definitie hydraulische grootheden.....	42

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De doelstelling van het onderzoek Watervisie Lauwersmeer is om de effecten van een veranderend waterbeheer van het Lauwersmeer op de optredende waterstanden in het Lauwersmeer en de daarop afwaterende Friese- en Electraboezem inzichtelijk te maken. Ten aanzien van het waterbeheer van het Lauwersmeer is onderscheid gemaakt in een aantal scenario's.

Eén van de scenario's omvat een gedempt getij variant, waarbij zout water vanuit de Waddenzee vrij kan in- en uitstromen door de spuisluis bij Lauwersoog. In het onderzoek Watervisie Lauwersmeer is voor dit scenario het uitgangspunt gekozen dat de waterstand in het Lauwersmeer niet hoger mag worden dan NAP-0,53 m en een getijslag op het meer wordt toegestaan van maximaal 0,5 m. Tevens wordt uitgegaan van het middenscenario voor de zeespiegelstijging (60 cm stijging tot het zichtjaar 2100). In een kort onderzoek (Quick Scan) is het effect van een gedempt getij op het Lauwersmeer met deze uitgangspunten onderzocht op de hydraulische en morfologische omstandigheden in het meer. Eventuele afwijkingen van de genoemde uitgangspunten is een onderdeel van het totale onderzoek Watervisie Lauwersmeer.



Figuur 1-1 De Waddenzee (links) en het Lauwersmeer (rechts)

1.2 Doel

Het doel van het onderzoek is een verkenning van de hydraulische en morfologische gevolgen voor het Lauwersmeer als een gedempt getij vanuit de Waddenzee door kan dringen in het Lauwersmeer. De hydraulische en morfologische gevolgen worden onderzocht ten einde een antwoord te geven op de volgende onderzoeksvragen:

1. Wat zijn de gevolgen voor de sedimentatie en wat zijn de (on)zekerheden:
 - In welke mate vindt sedimentatie plaats en waar?
 - Kan de opslibbing de zeespiegelstijging bijhouden?
 - Wat zijn de effecten op het bodemleven?
2. In welke mate ontstaat er een zout-zoetgradiënt en wat zijn de (on)zekerheden?
3. Wat zijn de effecten op de uitwaterende sluis bij Lauwersoog:
 - Voldoet het huidige kunstwerk of welke aanpassingen zijn noodzakelijk?

- Welke onzekerheden zijn er?
 - Is de capaciteit groot genoeg?
4. Wat is de duurzaamheid van de estuarine variant:
- Hoe lang kan deze variant blijven werken als de meerwaterstand niet meegroeit met de zeespiegelstijging (in het zichtjaar 2030 en 2100) of wat zijn de gevolgen van meegroeien met de zee?
 - Wat zijn de gevolgen van het afnemende ecologische effect van de estuarine variant als platen (bijna) permanent onder water staan?
5. Wat is de functie van het Lauwersmeer als zoetwaterbuffer nu en in de toekomst?
6. Wat zijn de effecten van een gedempt getij in het Lauwersmeer op de omgeving, met name op de (zoute) kwel?

De resultaten van voorliggende Quick Scan worden gebruikt om een afweging te maken of de variant gedempt tij al dan niet wordt meegenomen in het verdere onderzoek Watervisie Lauwersmeer. Indien hiertoe wordt besloten zal in de watervisie een bredere beoordeling van het scenario worden uitgevoerd.

1.3 Leeswijzer

De antwoorden op de onderzoeksvragen zijn in hoofdstuk 2 opgenomen. De lezer kan dan direct kennis nemen van deze antwoorden en beziën in welke mate de antwoorden gevolgen hebben voor verdere stappen in de besluitvorming.

De achtergronden van het onderzoek, die hebben geleid tot de antwoorden, zijn de hoofdstukken 3 en 4 opgenomen. De analyse van de situatie in het Lauwersmeer in het geval dat de Lauwerssluizen geopend zijn, is gesplitst in twee onderdelen:

1. De analyse van de zout-zoet waterbeweging in het Lauwersmeer en de morfologische effecten van een gedempt getij in het meer zijn beschreven in hoofdstuk 3.
2. De analyse van de hydraulische omstandigheden rond de Lauwerssluizen is beschreven in hoofdstuk 4.

In hoofdstuk 5 zijn de conclusies en de aanbevelingen opgenomen.



Figuur 1-2 Het natuurgebied rond het Lauwersmeer

2 Antwoorden op de onderzoeksvragen

1. *Wat zijn de gevolgen van een estuarine situatie op het Lauwersmeer voor de sedimentatie en wat zijn de (on)zekerheden:*

- *In welke mate vindt sedimentatie plaats en waar?*
- *Kan de opslibbing de zeespiegelstijging bijhouden?*
- *Wat zijn de effecten op het bodemleven?*

In de periode na afsluiting van de Lauwerszee tussen 1969 en 2005 zijn de kleinere geulen zoals de (i) Raskes, (ii) het Dokkumerdiep en de (iii) Zoutkamperril aangeslibd als gevolg van het spuien van zoetwater vanuit de Friese en Groningse boezem. In die geulen zijn de verondiepingen over de periode 1978-2005 respectievelijk (i) 0,4 m tot 0,9 m, (ii) 1,5 m tot 2,5 m en (iii) 0,5 m tot 1,5 m.

In de nieuwe situatie zal slib, dat vanuit de Waddenzee wordt aangevoerd, vooral in de grote diepe geulen (zie figuur 3-1) worden afgezet. Minder sterke afzettingen zullen in de ondiepere gedeelten van het meer voorkomen. Geen opslibbing komt voor boven het maximum waterpeil in het Lauwersmeer.

In de nieuwe toestand met een getij op het Lauwersmeer zullen de diepere geulen ongeveer 0,20 tot 0,45 m per jaar aanslibben. Of te wel een 10 m diepe geul zal reduceren tot een diepte van 5 m in een periode van 25 tot 11 jaar. In de ondiepe delen van de geulen en op de platen is de aanslibbing veel minder.

De verwachte zeespiegelstijging in een periode van 25 jaar tot 2030 is 0,15 m en in een periode van 95 jaar tot 2100 is dat 0,6 m. De verwachte aanslibbing in de diepe geulen in het Lauwersmeer is, zoals hierboven vermeld, enkele decimeters per jaar, maar in de ondiepe gedeelten en op de platen zal de aanslibbing minder groot zijn en de zeespiegelstijging dus niet kunnen bijhouden. Als het maximum peil (NAP-0,53 m) in het Lauwersmeer wordt vastgehouden over de jaren, dan staat de situatie op het Lauwersmeer los van de zeespiegelstijging. Op de lange duur zal het Lauwersmeer verlanden.

De effecten van de aanslibbing op het bodemleven zal in de diepe geulen licht positief zijn. De geulen zijn nu zeer diep zodat onder in de geulen stagnant brak en zuurstofloos water aanwezig is. Met een getij op het meer wordt ten eerste het water onder in de diepere geulen regelmatig ververst en door de aanslibbing neemt de diepte af waardoor de lichtdoordringing en stroming nabij de slibbodem toenemen met mogelijk gunstige gevolgen voor het bodemleven.

Onzekerheden:

- De aanslibbing in het Lauwersmeer van ondiepe gedeelten van de geulen en op platen (de bodem tussen hoog- en laagwater, dus niet de oude getijplaten die nu begroeid zijn) hangt sterk af van het toegelaten getij op het meer en het optreden van windgolven. Door deze effecten zal de aanslibbing worden aangetast en losgewoeld slib zal naar diepere delen kunnen worden verplaatst.
- Onzeker is of het bodemleven zich op de slibafzettingen zal ontwikkelen. De stevigheid van de afzettingen op de bodem is zeer gering (300 kg/m³ droge stof) en nabij de bodem is het water voornamelijk zout gedurende het gehele jaar.

2. In welke mate ontstaat er een zout-zoetgradiënt en wat zijn de (on)zekerheden?

In de winterperiode, met geregeld grote lozingen van zoet boezemwater op het Lauwersmeer, zal in het meer een sterk gelaagde situatie ontstaan. Een min of meer zoete laag ligt op een zoute onderlaag.

In de zomerperiode als de lozingen vanuit de Friese en Groningse boezems gering zijn, zal het Lauwersmeer vrijwel geheel zout zijn.

De zoutindringing in het Lauwersmeer hangt af van de grootte van de zoetwaterlozingen vanuit de Friese en Groningse boezem. In de onderstaande tabel is de berekende diepte-gemiddelde chloriniteit van het water in het meer op verschillende locaties opgenomen. Zonder lozing van zoet water is het gehele meer zout en bij langdurige (extreme) zoetwaterlozingen ($100 \text{ m}^3/\text{s}$) neemt de chloriniteit van het water af in zuidelijke richting en is het water aan de zuidzijde van het meer, bij de lozingspunten, zoet.

Locatie	geen lozing van zoet water chloriniteit [g/l]	extreme lozing van zoet water chloriniteit [g/l]
Waddenzee	18	18
Spuisluis Lauwersoog (binnen)	18	13
Oostmahorn	18	11
Ezumazijl	18	8
Mond Dokkumerdiep en Zoutkamperril	18	0

Onzekerheden:

- De zout-zoetgradiënt wordt in zeer sterke mate bepaald door de hoeveelheid geloosd zoetwater vanuit de omliggende boezems en de duur van die lozingen. Een gradiënt kan alleen bestaan als geregeld zoetwater wordt geloosd. Incidentele zoetwaterlozingen zullen slechts tijdelijk een gradiënt laten ontstaan, die na een aantal getijden weer is verdwenen.

3. Wat zijn de effecten op de uitwaterende sluis bij Lauwersoog:

- *Voldoet het huidige kunstwerk of welke aanpassingen zijn noodzakelijk?*
- *Welke onzekerheden zijn er?*
- *Is de capaciteit groot genoeg?*

Voor het lozen van water vanuit het Lauwersmeer voldoen de Lauwerssluizen. Voor het inlaten van zeewater voldoen de sluizen in de huidige situatie hoogst waarschijnlijk niet. Een groot probleem is de hoogte van de stroomsnelheden in de constructie en boven de bodembescherming. De sluizen zijn ontworpen voor stroomsnelheden tot circa 4 m/s. Bij het inlaten van zeewater kunnen stroomsnelheden optreden tot 6 m/s. De bodembescherming aan de meerzijde van de Lauwerssluizen zal moeten worden gecontroleerd op stabiliteit onder die stromingsbelasting en waarschijnlijk zal een zwaardere bodembescherming aan de meerzijde moeten worden aangelegd tot een afstand van 100 m tot 200 m uit de sluis.

Opgemerkt wordt dat ongeacht de gekozen strategie van het beheer van de schuiven zich een situatie met een weigerende schuif kan voordoen. De kans van optreden daarvan is zeer klein aangezien de schuiven dubbel zijn uitgevoerd, maar het wordt hier gemeld aangezien in die

situatie door het grote verval over de constructie snelheden van 6 m/s of meer kunnen voorkomen in de constructie en boven de bodembescherming.

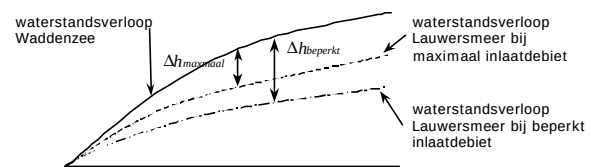
De capaciteit van de sluizen voor het laten ontstaan van een getij in het Lauwersmeer met een getijslag van 0,5 m is voldoende. Een mogelijk probleem is de vorm van het getij op het meer, dat niet lijkt op het zeegetij. De waterstanden op het meer nemen in 3 à 4 uur toe met 0,5 m, zijn dan 5 à 6 uur constant en nemen daarna in 3 à 4 uur weer af. Is een meer natuurlijk getij gewenst dan kan dat niet worden gerealiseerd door het beperken van het inlaatdebiet. Beperken van het debiet door de sluizen, door het verkleinen van de doorstroomopening (minder spuicomplexen of gedeeltelijk geheven schuiven), heeft de volgende nadelige gevolgen:

- De stroomsnelheden nemen verder toe als een gevolg van het trager vullen van het Lauwersmeer. De waterstand op het meer stijgt minder snel, dan met volledig open sluizen, terwijl zeewaterstand door het getij wordt opgelegd. Daardoor neemt het verval (Δh) over de sluizen toe en een direct gevolg daarvan is hogere stroomsnelheden. De hoogte van de stroomsnelheid (u) door de sluizen is evenredig met de wortel uit het verval ($\sqrt{\Delta h}$), dus $u \sim \sqrt{\Delta h}$.

Het beperken van het debiet tijdens het inlaten van zeewater heeft indirect gevolgen voor de optredende stroomsnelheden in de constructie. Het Lauwersmeer stroomt daardoor minder snel vol met als gevolg een sterker

toenemend verval over de constructie dan in het geval met volledig geopende sluizen. De binnenwaterstand stijgt minder snel waardoor het waterstandsverschil tussen de Waddenzee en het meer groter is en dus hogere stroomsnelheden door de constructie.

- Het te veel beperken van de doorlaatopening van de Lauwerssluizen (inzet van minder spuikokers of gedeeltelijk geheven schuiven) leidt in sommige gevallen tot een getijslag die kleiner is dan 0,5 m, maar vrijwel altijd tot (veel) hogere stroomsnelheden in de constructie tijdens het inlaten van zeewater.



Onzekerheden:

- De stroomsnelheden tijdens het inlaten van zeewater zijn veel hoger dan de ontwerp stroomsnelheden van de Lauwerssluizen. Dit heeft gevolgen voor de hydraulische belastingen van de spuikokers van de sluizen en de bodembescherming die voor en achter de sluizen aanwezig is. Dat aan de meerzijde een extra bodembescherming noodzakelijk is, is zeker, maar over welke afstand en hoe zwaar zal in een gedetailleerde studie moeten worden bepaald. Een indicatie voor de zwaarte van de bodembescherming is dat de diameter van de stortsteen afhangt van het kwadraat van de stroomsnelheid. Als de snelheden van 4 m/s toenemen tot 6 m/s is de factor 2,25 hoger, of te wel vergeleken met de aanwezige stortsteen, zijn stenen met een ruim tweemaal grotere diameter nodig.
- Een andere gevolg van de hogere stroomsnelheden is dat bij het openen en sluiten van de schuiven, maar ook bij het inlaten met gedeeltelijk geheven schuiven, de schuiven kunnen gaan trillen. Het snel stromende water kan de schuiven in de eigenfrequentie brengen waardoor de schuiven gaan trillen. Daardoor kunnen de schuiven vast te komen zitten of, op termijn, zelfs beschadigd raken. Het trilgedrag van de schuiven zal in een grondige studie moeten worden onderzocht.

4. Wat is de duurzaamheid van de estuarine variant:

- *Hoe lang kan deze variant blijven werken als de waterstand niet meegroeit met de zeespiegelstijging (in het zichtjaar 2030 en 2100) of wat zijn de gevolgen van meegroeien met de zee?*
- *Wat zijn de gevolgen van het afnemende ecologische effect van de estuarine variant als platen (bijna) permanent onder water staan?*

De waterstanden op het Lauwersmeer mogen in de estuarine situatie variëren tussen NAP-0,53 m en NAP-1,03 m. De gemiddelde zeespiegel ligt op NAP-0,0 m en een gemiddeld getij varieert tussen NAP+1,02 m en NAP-1,29 m.

Door de verwachte klimaateffecten zal de zeespiegel in de komende eeuw gaan stijgen. De verwachting is dat in 2030 het gemiddelde zeeniveau 0,15 m hoger is dan nu en in 2100 ligt dat niveau 0,6 m hoger. Voor het getij op het Lauwersmeer heeft een zeespiegelstijging van 0,15 m nog geringe gevolgen. De getijslag wordt in geringe mate beperkt van 0,50 m tot 0,42 m door de beperking van het spuien rond laagwater. Met een zeespiegelrijzing van 0,6 m is de getijslag op het Lauwersmeer in 2100 gereduceerd tot 0,12 m in plaats van 0,50 m, mits het meerpeil niet meestijgt.

Als de waterstanden op het Lauwersmeer meegroeien met de zeespiegel, kan in principe het getij van 0,5 m op het meer blijven bestaan. De Lauwerssluizen hebben voldoende capaciteit om het getij op het meer mogelijk te maken in die situatie, al zal de constructie meer onderwater staan dan in de huidige situatie. Een ander probleem is het niveau van de dijken rond het Lauwersmeer. Bezien moet worden of het dijkniveau voor een gemiddelde peilstijging van 0,15 m tot 0,60 m geschikt is.

Als de lage delen van de voormalige platen door een verhoogd meerpeil vaker en langer onderwater komen te staan, dan heeft dat gevolgen voor de ecologie van de platen. Als zich kwelders hebben gevormd dan zullen die door hogere waterstanden (vergeleken met de huidige situatie) worden aangetast en daarmee de ecologie van de kwelders. Als de gebieden frequent, maar niet dagelijks, onderwater staan ontwikkelen zich kwelderpionierzones.

Als het maximum peil op het Lauwersmeer niet meegroeit met de zeespiegelstijging, dan neemt het getijprisma af (het volume zeewater dat per getij in en uit stroomt) omdat het minimum peil niet meer wordt gehaald door de beperkte spuimogelijkheden bij laagwater. Het water in het Lauwersmeer zal dan weer zoeter worden.

Onzekerheden:

- De Lauwerssluizen kunnen het zoute milieu waarin zij zich bevinden weerstaan. Maar in de situatie met getij is ook aan de binnenzijde van de constructie vrijwel continu zout water aanwezig. In hoeverre de betonconstructie en stalen schuiven in de nieuwe situatie sneller of vaker last hebben van het zout, is niet te zeggen. Dit zal wel moeten worden onderzocht.
- Hogere gemiddelde waterstanden in het Lauwersmeer hebben tot gevolg dat het wateroppervlak zal toenemen. Daarmee is de kans op hogere windgolven op het meer wat groter met als het gevolg een mogelijk sterkere golfbelasting van de ondiepe delen in het meer, oevers en dijken. Dit zal moeten worden onderzocht.

5. *Wat is de functie van het Lauwersmeer als zoetwaterbuffer nu en in de toekomst?*

Momenteel vormt het Lauwersmeer niet of in zeer geringe mate een zoetwaterbuffer voor het omringende gebied. Er wordt nauwelijks water vanuit het Lauwersmeer ingelaten in de omringende gebieden. Het water aan het oppervlak is in de huidige situatie zoet terwijl zich zout water onder in de diepe geulen bevindt. Met een gedempt getij op het Lauwersmeer zal gedurende een groot deel van het jaar (zeker in de zomer) het meer geheel zout zijn, zie tevens vraag 2. Met een zout Lauwersmeer zal een functie als zoetwaterbuffer van het Lauwersmeer helemaal uit beeld verdwijnen.

Onzekerheden:

- Onduidelijk is of het Lauwersmeer nauwelijks een rol heeft als zoetwaterbuffer door de waterkwaliteit (zoet tot brak water aan het oppervlak en onderin de geulen zout) of door de geringe vraag naar zoetwater vanuit het omringende gebied. Een studie daarnaar zou die rol duidelijker moeten maken.

6. *Wat zijn de effecten van een gedempt getij in het Lauwersmeer op de omgeving, met name op de (zoute) kwel?*

Zoals bij vraag 5 al beantwoord, zal een gedempt getij op het Lauwersmeer meer zoutwater in het meer brengen. Op de vroegere platen in het meer zullen door neerslag, zoetwaterbellen kunnen ontstaan (zoet grondwater drijft op zout grondwater).

De gemiddelde zeewaterstand is NAP+0,0 m en ligt hoger dan het streefpeil van het Lauwersmeer en de meeste polders langs de kust in Fryslân en Groningen. Daarmee bestaat er een kwelstroom van zoutwater vanuit de Waddenzee naar het Lauwersmeer en de omringende gebieden.

De streefpeilen in de polders rondom het Lauwersmeer varieert van NAP-2,65 m tot NAP-1,30 m. Met een huidig streefpeil op het Lauwersmeer van NAP-0.93 m bestaat dus een zoete kwelstroom van het Lauwersmeer naar de omliggende gebieden. In de situatie met een gedempt getij op het Lauwersmeer zijn de waterstanden op het Lauwersmeer gemiddeld hoger dan in de huidige situatie. Verder is het water van het meer gedurende lange perioden in het jaar zout. Het gevolg daarvan is dat de nu nog zoete kwelstroom vanuit het Lauwersmeer zal veranderen in een grotere kwelstroom die zout is. De precieze omvang van de zoute kwelstroom is alleen op basis van een meer gedetailleerde grondwaterstudie vast te stellen. Gezien de zoute kweldruk vanuit zee die zich in de huidige situatie ook al voordoet in de gebieden rondom het Lauwersmeer, mag worden verwacht dat het effect van een grotere kwelbelasting vanuit het Lauwersmeer die zout is alleen eventueel merkbaar zal zijn in een relatief smalle zone direct rondom het Lauwersmeer.

3 Hydraulica en morfologie Lauwersmeer

3.1 Inleiding

De dynamiek van de waterbeweging bij een gedempt getij op het Lauwersmeer is onderzocht, gericht op de optredende stroomsnelheden, de zoutindringing en de gelaagdheid van het water, de aanslibbing van de geulen en de erosie van platen. De beschouwingen zijn gebaseerd op de beschikbare informatie van het gebied en op basis van kennis en ervaring met de hydraulica en morfologie in het Waddenzeegebied.

In dit hoofdstuk zijn achtereenvolgens beschreven:

- de beschikbare gegevens in paragraaf 3.2,
- de bestaande hydraulische situatie in het Lauwersmeer in paragraaf 3.3,
- de nieuwe hydraulische en morfologische toestand met getij in het Lauwersmeer in paragraaf 3.4.

3.2 Beschikbare gegevens

De volgende gegevens zijn voor het onderzoek beschikbaar gesteld:

- Topografische kaart van het gebied.
- Hypsometrische kromme van het Lauwersmeergebied dat in open verbinding staat met de spuisluis te Lauwersoog. Uit de hypsometrische kromme zijn de volgende karakteristieke wateroppervlakken afgeleid bij verschillende waterstanden.

waterstand [m+NAP]	wateroppervlak [ha]
-1,03	2375
-0,93	2430
-0,90	2448
-0,80	2515
-0,70	2680
-0,60	3034
-0,53	3290

Tabel 3-1 Relatie waterstand en wateroppervlak van het Lauwersmeer

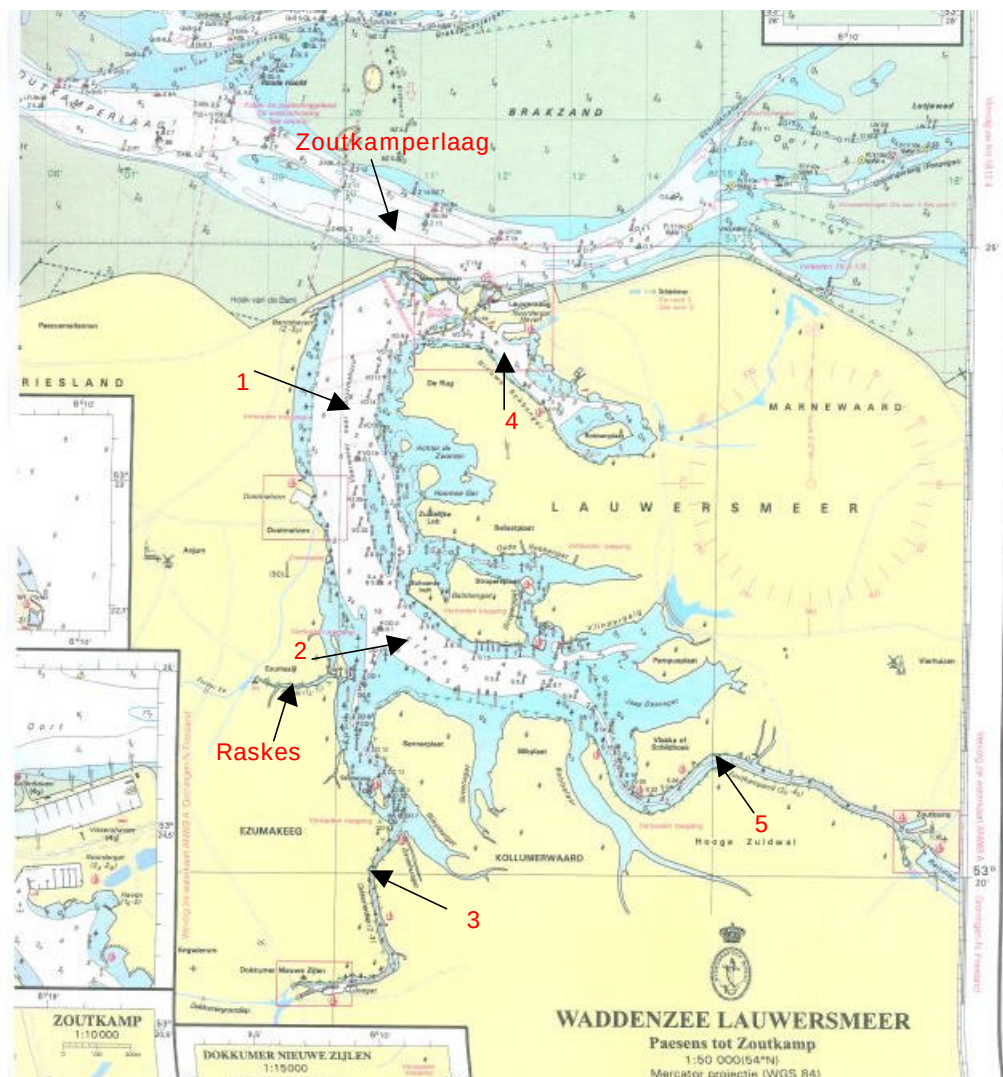
- Situatietekening en dwarsdoorsnede spuisluis te Lauwersoog.
- Lozingsgegevens van het Waterschap Electra (gemaal Waterwolf bij Zoutkamp) en van de Friese boezems (lozingen bij Zoutkamp en Engwierum) en van de polder Dongeradeel (lozing bij Ezumazijl), daggegevens over de jaren 1970-2002.
- IWACO-rapport, Verkenning Lauwersmeergebied, 21 juni 2001.
- IWACO-rapport, Natuurvriendelijke Waterhuishouding Lauwersmeer, 3 december 2001.
- HKV/ARCADIS-rapport, Watervisie Lauwersmeer, Eindrapport fase 1, september 2004.
- WL-rapport, Morfologie van de Waddenzee, Gevolgen van zand- en schelpenwinning, mei 1979.
- Hydrografische kaarten voor kust- en binnenwateren voor beroeps- en pleziervaart nummer 1812 Waddenzee (oostblad) en aangrenzende Noordzeekust, edities 1978, 1991 en 2005

Goede peilkaarten van de huidige situatie en van de situatie vlak na de afsluiting zijn opgevraagd, maar waren niet beschikbaar. Deze kaarten hadden betrouwbare informatie

kunnen geven betreffende de gemiddelde sedimentatie in de geulen sinds de afsluiting van de Lauwerszee.

3.3 Bestaande situatie

De huidige situatie is ontstaan na de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. De Lauwerszee was onderdeel van de vloedkom van de Zoutkamperlaag. Door de afsluiting werd een gebied van circa 105 km² van de Waddenzee afgesloten. Dit gebied (inclusief de Marnewaard) had een geulinhoud onder NAP van circa 85 à 90 miljoen m³ en een gemiddeld getijprisma van 105 à 110 miljoen m³/getij. Na de afsluiting was er geen getij meer in de voormalige Lauwerszee, maar waren de ruime getijgeulen nog steeds aanwezig. Bij de inrichting van het gebied is de Marnewaard grotendeels van de rest afgesloten.



Figuur 3-1 Overzichtskarta van het Lauwersmeer

In het resterende deel, het huidige Lauwersmeer, liggen de grote geulen:

1. Vaarwater naar Oostmahorn,
2. Slenk,
3. Dokkumerdiep,
4. Nieuwe Robbengat,
5. Zoutkamperil.

Deze geulen hebben maximum diepten variërend van 3 m tot lokaal meer dan 12 m onder Lauwersmeer zomerpeil (NAP-0,9 m). De indruk bestaat dat de huidige geuldiepten wat zijn afgenomen door sedimentatie van slib tussen 1969 en 2005. Harde bewijzen hiervoor zijn niet beschikbaar door het ontbreken van gedetailleerde peilkaarten.

Op het niveau van het maximum waterpeil (NAP-0,53 m) bestaat hiervan circa 3290 ha uit openwater. Op het niveau van het minimum peil (NAP-1,03 m) bedraagt het wateroppervlak circa 2375 ha.

De Groninger en Friese boezems lozen via de Zoutkamperril bij Zoutkamp (gemaal De Waterwolf, gemaal H.D. Louwes en Friese sluis bij Zoutkamp), via het Dokkumerdiep bij Engwierden (Dokkumer Nieuwe Zijlen) en via de Raskes bij Ezumazijl (gemaal Ezumazijl).

Het Lauwersmeer loost rond gemiddeld laagwater in de Waddenzee (NAP-1,29 m) via de Lauwerssluizen. De spuicapaciteit van het spuicomplex is circa 1900 m³/s. Op enige afstand ten oosten van de spuisluis ligt een schutsluis in de afsluitdijk, die uitkomt in de buitenhaven van Lauwersoog.

Mogelijke slibbronnen voor het Lauwersmeer zijn de zoetwaterlozingen vanuit de Friese en Groningse boezem op het meer, het doordringen van zeewater door lekkage via de spuisluis en door het schutten via de schutsluis bij Lauwersoog. Verwacht wordt dat het slibgehalte van het zoete spuiwater minder dan 5 mg/l bedraagt. In het binnendringende zeewater is dat vermoedelijk veel hoger. Geschat wordt dat het gewogen gemiddelde slibgehalte in het zeewater 100 à 200 mg/l kan bedragen. Daarnaast kan lokaal geproduceerd organisch materiaal bijdragen in de sedimentatie.

Via het lek- en schutwater door de sluizen in de afsluitdijk en via zoute kwel dringt ook zout in het Lauwersmeer door. In natte tijden wordt het meeste zout weer teruggespoeld naar de Waddenzee. In droge tijden, echter, stroomt het zoute water langs de bodem naar diepere putten in de grote geulen. Er kan dan een gelaagd systeem ontstaan met een zuurstofloze, zoute onderlaag. Pas tijdens stormen ontstaan er voldoende hoge driftstromen in de bovenlaag, die in staat zijn om de zoute onderlaag te "eroderen". In het algemeen is het Lauwersmeer momenteel een groot zoet meer met chloridegehalten lager dan 0,3 g/l in het zuiden tot enkele grammen per liter bij Lauwersoog. Ter vergelijking, het zeewater heeft een chloridegehalte van circa 18 g/l.

3.4 Nieuwe toestand met gedempt getij

3.4.1 Algemeen

In de nieuwe toestand met een gedempt getij, een getijverschil van maximaal 0,5 m (tussen 0,53 m en 1,03 m onder NAP), zal tweemaal daags een volume 10 tot 14 miljoen m³/getij via de openstaande Lauwerssluizen binnendringen en weer uitstromen. Dit zal effect hebben op:

- de stroomsnelheden in de geulen,
- de zouttoestand in de geulen,
- de aanslibbing van de geulen,
- de afslag van plaatranden,
- het zoutgehalte van het grondwater in het intergetijdegebied.

Bovengenoemde effecten zijn in de volgende paragrafen beschouwd.

3.4.2 Stroomsnelheden in de geulen

De peilen waartussen het getij op het Lauwersmeer mag fluctueren liggen onder de middenstand (NAP-0,0 m) van het getij in de Waddenzee. Uitstroming kan pas op zijn vroegst beginnen als de waterstand buiten onder het maximum toelaatbare peil binnen zakt en kan doorgaan tot de waterstand buiten en binnen gelijk zijn of als het minimum peil in het Lauwersmeer wordt bereikt. Hierdoor zal uitstroming in een periode van circa 4 uur of korter rond laagwater plaatsvinden. Instroming zal in het eerste geval aansluitend gebeuren met een toenemend debiet gedurende een beperkte periode tot de maximum waterstand binnen is bereikt. In het tweede geval zal de sluis enkele uren gesloten moeten worden en kan pas weer met inlaten worden begonnen als de waterstand buiten weer hoger is dan binnen. Dit alles leidt tot een vreemde 'getijsituatie' in het Lauwersmeer. In een periode van 2 tot 4 uur is er een vloodsituatie gevolgd door een periode van 6 tot 4 uur met stilstaand water en daarna een periode van circa 4 uur met een ebsituatie, zie paragraaf 4.4.3 voor meer details.

Opmerking: Plotseling afsluiten van de instroming kan leiden tot een translatiegolf in het Lauwersmeer. Dit kan worden voorkomen door de afsluiting tijdens het instromen geleidelijk binnen een minimum periode uit te voeren. In het verleden is hiernaar onderzoek uitgevoerd aangezien het te snel sluiten van de schuiven tot sterke waterstandsfluctuaties leiden op de ondiepe platen met mogelijk vervelende gevolgen voor recreanten. De huidige praktijk van het sluiten van de schuiven is zo dat de optredende translatiegolven zeer gering zijn. In paragraaf 4.4.5 is hierop verder ingegaan.

In de bovenstaande situatie wordt steeds een getijprisma van circa 14 miljoen m³ via de spuisluis in- en uitgelaten. Dit is veel minder dan in de oorspronkelijke situatie voor het afsluiten van de Lauwerszee, terwijl de oude getijgeulen nog niet zoveel zijn veranderd sinds 1969. Dit leidt tot een aanzienlijke reductie van de stroomsnelheden ten opzichte van de historische normale getijsituatie. Wel is er sinds de afsluiting enige sedimentatie opgetreden en ligt de middenstand circa 0,9 m lager (gemiddelde waterstand was NAP+0,0 m en is na de afsluiting NAP-0,93 m), waardoor het stroomvoerend profiel kleiner wordt en de reductie lager is. De reductie neemt nog wat verder af doordat de "eb- en vloedduur" bij een estuarine situatie korter is dan in een normale getijsituatie. Rekening houdend met deze verschillende aspecten wordt de maximum vloodsnelheid in het Lauwersmeer naar schatting niet hoger dan 0,2 à 0,4 m/s en de maximum ebsnelheid niet groter dan 0,15 à 0,2 m/s.

3.4.3 Zouttoestand in de geulen

Indien er gedurende een langere periode niet wordt gespuid, dan zal het Lauwersmeer in de estuarine situatie vrijwel volledig zout worden (chloridegehalte 16 à 18 g/l). Dit zal met name in de zomer kunnen gebeuren. In perioden met maximum lozing van zoet water vanuit de polderboezems, zal het zoute water naar verwachting grotendeels wegspoelen uit de kanalen Zoutkamperril, Dokkumerdiep en Raskes waarop de gemalen lozen en zal het water zeker in het zuidelijk gebied van het Lauwersmeer volledig zoet worden. In de grote geulen Slenk en Vaarwater naar Oostmahorn zal een geleidelijke gradiënt in het dieptegemiddelde zoutgehalte groeien.

Uit afvoergegevens van de gemalen blijkt dat in de winter, perioden van meer dan een week kunnen voorkomen met een totale zoetwaterlozing van meer dan 100 m³/s ofwel meer dan 4,5 miljoen m³/getij. In dat geval wordt dus een sterk gelaagd systeem in het Lauwersmeer

verwacht. Het water uit de zoute onderlaag wordt in die situatie wel regelmatig verversd door aanvoer van nieuw zeewater tijdens het inlaten via de Lauwerssluizen.

Het verloop van deze gradiënt kan voor een situatie met een constante bovenafvoer globaal worden geschat met de methode beschreven in het kader.

Rekenmethode voor het zoutgehalte

Door een dwarsdoorsnede wordt tijdens vloed een volume $P \cdot Q \cdot T/2$ aan zeewater aangevoerd en $P + Q \cdot T/2$ aan brakwater afgevoerd (al dan niet gelaagd). In totaal moet het volume $Q \cdot T$ zoet water worden afgevoerd. Hieruit kan worden afgeleid dat de gemiddelde zoutconcentratie van het brakke water is:

$$c_0 - c_1 = (c_0 - c_b) \cdot \frac{Q \cdot T}{\left(P + \frac{Q \cdot T}{2}\right)},$$

waarin :

- c_0 = zoutgehalte zeewater [g/l],
- c_1 = gemiddeld zoutgehalte in het uitstromende water [g/l],
- c_b = zoutconcentratie geloosd boezemwater [g/l],
- Q = bovenafvoer van een rivier [m^3/s],
- T = getijperiode [s],
- P = getijprisma [m^3].

Indien $QT/(P+QT/2) > 1$, dan geldt $c_1 = c_b$ en is het water zoet.

Uit een berekening voor het meer met de rekenmethode volgt dat zelfs onder extreme lozingsomstandigheden ($100 \text{ m}^3/\text{s}$ boezemwater) de dieptegemiddelde chloriniteit c_1 in de grote geulen ter hoogte van de spuisluis bij Lauwersoog rond een waarde van 13 g/l ligt, bij Oostmahorn rond 11 g/l en ter hoogte van de Ezumazijl rond 8 g/l. Bij de monden van het Dokkumerdiep en van de Zoutkamperril zou het water dan zoet zijn (0 g/l). In tabel 3-2 zijn deze resultaten van de berekening samengevat.

locatie	geen lozing van zoet water c_1 [g/l]	extreme lozing van zoet water c_1 [g/l]
Waddenzee	18	18
Spuisluis Lauwersoog (binnen)	18	13
Oostmahorn	18	11
Ezumazijl	18	8
Mond Dokkumerdiep en Zoutkamperril	18	0

Tabel 3-2 Chloriniteit in de geulen van het Lauwersmeer

Schultz en Simmons (1957) hebben een criterium ontwikkeld op basis waarvan een indruk kan worden gekregen of het zout in een estuarium goed gemengd is over de diepte, gedeeltelijk gemengd of dat er een sterke gelaagdheid in het estuarium zal optreden. Voor een normaal estuarium is het criterium:

- $0 < QT/P \leq 0,1$ het water is goed gemengd over de diepte,
- $0,1 < QT/P < 1$ het water is gedeeltelijk gemengd over de diepte,
- $QT/P \geq 1$ sterke gelaagdheid in het estuarium.

Dit criterium is gebaseerd op een normale relatie tussen het getijprisma en de geuldoorsnede. In het geval van een gedempt getij in het Lauwersmeer zijn de geulen veel te ruim voor het getijprisma en zijn de getijstroomsnelheden te laag. Het getijprisma van het Lauwersmeer veroorzaakt daardoor minder menging. Voor toepassing van het bovenstaande criterium wordt daarom een effectief getijprisma P_{eff} gebruikt, dat ongeveer een factor 5 lager is dan het werkelijke getijprisma, i.e. $P_{eff} = 2,8$ miljoen m^3 /getij. De factor is geschat op basis van het afgenomen getijverschil van circa 2,5 m in de historische situatie tot 0,5 m in de nieuwe situatie.

In de winterperiode met $Q = 100 m^3/s$ en $T = 12$ uur is $QT/P \approx 1$, hetgeen duidt op een sterke gelaagdheid terwijl in droge zomerperioden $QT/P < 0,1$ zal zijn, en het water in het meer dus volledig zout is.

3.4.4 Aanslibbing van de geulen

Gebaseerd op de beperkte dieptegegevens op de hydrografische kaarten uit 1978, 1991 en 2005 van het Lauwersmeer is het moeilijk om betrouwbare gegevens af te leiden van de aanslibbing in geulen in het gebied na de afsluiting in 1969. In het algemeen lijkt de aanslibbing mee te vallen door de beperkte slibbronnen in het gebied, te weten:

- Slib uit de Waddenzee dat via de schutsluis en de spuisluis bij Lauwersoog binnendringt (gering watervolume met relatief hoge slibconcentratie).
- Slib uit de polderboezems dat via de lozingen met het zoete water meekomt (groot watervolume met lage slibconcentraties).
- Organisch materiaal dat in het gebied zelf wordt geproduceerd (kleine hoeveelheden).

De situatie achter de spuisluis is tussen 1978 en 2005 veranderd als gevolg van aanpassing aan de nieuwe stroomcondities (ontgronding door aanstroming van de spuisluis of baggeren). Andere duidelijke verschillen zitten vooral in de opslibbing van de kleiner geulen, zoals Raskes, Dokkumerdiep en Zoutkamperril. De Raskes is tussen 1978 en 1991 tussen 0,4 m en 0,9 m ondieper geworden. Het Dokkumerdiep is tussen 1978 en 2005 rond 1,5 m tot 2,5 m ondieper geworden en de Zoutkamperril is ruwweg 0,5 m tot 1,5 m opgeslibd.

In de nieuwe situatie zal aanzienlijk meer slib via de spuisluis bij Lauwersoog in het Lauwersmeer binnendringen en bezinken. Via de zoute onderstroom zal het slib over het hele geulenstelsel kunnen worden verspreid. In kwantitatieve zin zijn de volgende grootheden van belang:

Getijprisma P :	14 miljoen m^3 /getij.
Aantal getijden per jaar:	705 getijden.
Gemiddelde sedimentconcentratie instromend zeewater (Eysink, 1979):	100 à 200 mg/l.
Geschat deel van het slib dat in het Lauwersmeer bezinkt:	80%.

Deze uitgangspunten leiden tot een sedimentatie van slib van circa 800 à 1600 miljoen kg/jaar. Het afgezette slib is slecht geconsolideerd en heeft een droge dichtheid van slechts circa 300 kg/m^3 . Dit betekent dat de afzetting een volume zal hebben van 2,7 à 5,3 miljoen m^3 /jaar.

Het slib zal zich vooral afzetten in de diepere geulen. Geschat wordt dat het oppervlak van de diepere geulbodems 1200 tot 1500 ha is. De gemiddelde verondieping van deze geulen zal dan ongeveer 0,20 à 0,45 m/jaar bedragen. Dit betekent voor een geul van 10 m diep een reductie van de diepte tot 5 m in een periode van 25 à 11 jaar.

3.4.5 Afslag van plaatranden en mogelijkheden kweldervorming

Plaatranden

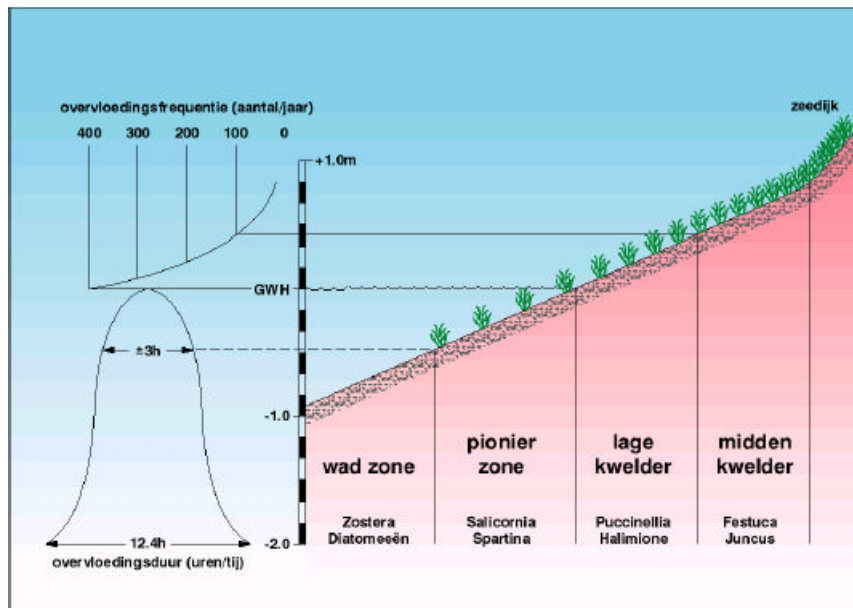
In de situatie met gedempt getij op het Lauwersmeer zal de getijslag maximaal 0,5 m bedragen. Ook zal het getij geen natuurlijk, sinusachtig verloop hebben, zie hoofdstuk 4. Indien alle spui-eenheden van de spuisluis zowel voor het inlaten als voor het lozen worden gebruikt, dan zal circa 3 uur nodig zijn voor het inlaten van het getijprisma en circa 3,5 uur voor het lozen. Het peil in het Lauwersmeer zal dan circa 6 uur op het maximum toelaatbare peil blijven staan. Dit geldt ongeacht het getijverschil in de Waddenzee; het getij op het Lauwersmeer zal dus geen springtij-doodtijcyclus kennen. De periode met een constant hoogwater kan worden gereduceerd door bij het inlaten slechts één spui-eenheid te gebruiken of de schuiven niet geheel te heffen. Dat kan echter tot stabiliteitsproblemen bij de huidige bodembescherming leiden, zie hoofdstuk 4.

Een langdurig voorkomend waterpeil op een constant niveau kan leiden tot oeverafslag of plaatafslag door windgolven. Verwacht wordt dat dit vooral geldt voor slikrijke bodems. Het introduceren van een beperkt getij zal dit niet stoppen; door het getij zal de aanval niet steeds op hetzelfde niveau plaatsvinden, waardoor vermoedelijk de afslag zal vertragen. Rond de zandplaat die ten zuidoosten van de Lauwerssluizen ligt, is dit probleem opgelost door de afslagranden te beschermen met stenen dammetjes op enige afstand voor de randen aan te leggen.

Opmerking: Met een gedempt getij, zonder al te lange perioden met een constante waterstand, zijn de genoemde nadelen te beperken. Door het beperken van de instroming naar het Lauwersmeer is dat te realiseren. Daarmee, zoals in paragraaf 4.4 behandeld, komen grotere stroomsnelheden voor rond de Lauwerssluizen. Er moet echter ook rekening worden gehouden met het weigeren van een schuif, zie paragraaf 4.4.5, waardoor ook grote stroomsnelheden kunnen optreden rond de constructie. Als de bodembescherming daarvoor is aangepast, is het ook mogelijk een meer natuurlijk getij op het Lauwersmeer te creëren door het beperken van de instroming.

Kwelderranden

Een ander aspect van de introductie van een gedempt getij is dat er mogelijk een vorm van kweldergroei op gang zou kunnen komen, zie figuur 3-2. Voldoende lang droogvallen en het aantal overvloedingen per jaar zijn hierbij belangrijke criteria.



Figuur 3-2 Definitie kwelderindeling (Bron: Dijkema, Alterra)

De pionierszone ligt volgens gegevens in de literatuur tussen het niveau dat circa 3 uur per getij droogvalt en gemiddeld hoogwater (GHW). De lage kwelder ligt tussen GHW en het niveau dat door stormvloed circa 100 keer per jaar wordt overspoeld met zout water. De middenkwelder ligt daarboven en loopt tot het niveau dat gemiddeld maar enkele keren per jaar wordt overspoeld. De hoge kwelder ligt zo hoog dat deze nog maar incidenteel tijdens extreme stormvloed wordt overspoeld. Het verschil in overvloedingsfrequentie leidt tot typische vegetatievormen voor de verschillende kwelderniveaus.

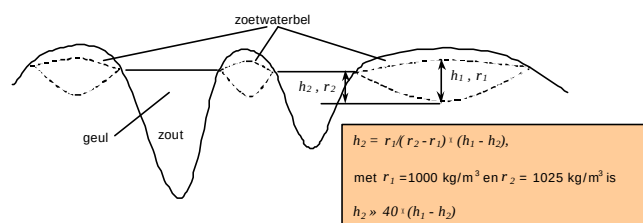
Bovengenoemde criteria zouden bij het typische getij in de estuarine variant van het Lauwersmeer leiden tot kwelders zonder pionierszone. Omdat in het Lauwersmeer geen sterke opwaaiing mogelijk is (relatief korte strijklengte voor windgolven en geen aanvoer van water vanuit de Waddenzee tijdens storm), zal hooguit een smalle kwelderzone kunnen ontstaan langs oevers die beschermd liggen tegen golfaanval.

Ook hier is het mogelijk, door de instroming per getij te beperken, een bredere pionierszone te creëren. Door instroming met de Lauwerssluizen over het jaar te variëren zouden bredere pionierszones kunnen ontstaan.

3.4.6 Grondwater en kwelstromen

Zoutgehalte van het grondwater in het Lauwersmeer

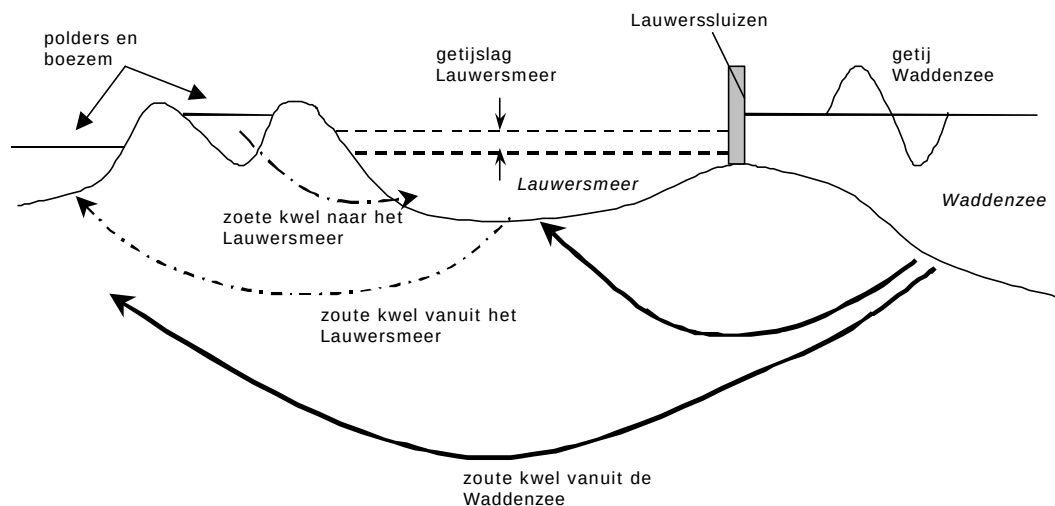
Uit het voorgaande blijkt dat het zoutwaterniveau in de geulen van het Lauwersmeer nooit hoger zal komen te staan dan incidenteel (bijvoorbeeld tijdens storm) lokaal enkele decimeters boven het maximum peil van NAP-0,53 m. In gebieden die hoger liggen, dan de gemiddelde zoutwaterstand in aangrenzende geulen, zal door regenval een zoetwaterbel in het grondwater ontstaan boven op het zoute grondwater in de onderlaag. Deze laag zal op een landstrook met enige breedte tussen twee geulen met zout water al gauw meerdere meters dik



zijn en bepalend zijn voor de wortelzone van de lokale vegetatie.

Kwelstromen

Over de kwelstromen kan op basis van de beschikbare informatie alleen in globale termen iets worden gezegd. Kwelstromen worden aangedreven door waterstandsverschillen. Er kunnen verschillende kwelstromen worden onderscheiden, zie onderstaande figuur. Voor het onderzoek is alleen de verandering van de kwelstroom van het Lauwersmeer naar de omliggende gebieden in relatie tot de totale kwelbelasting (met name vanuit zee) van die gebieden van belang.



Figuur 3-3 Principe van de kwelstromen rond het Lauwersmeer

De gemiddelde zeewaterstand is NAP+0,0 m en ligt hoger dan het streefpeil van het Lauwersmeer en de meeste polders langs de kust in Fryslân en Groningen. Daarmee bestaat er een kwelstroom van zoutwater vanuit de Waddenzee naar het Lauwersmeer en de omringende gebieden.

De streefpeilen in de polders rondom het Lauwersmeer varieert van NAP-2,65 m tot NAP-1,30 m. Met een huidig streefpeil op het Lauwersmeer van NAP-0,93 m bestaat dus een zoete kwelstroom van het Lauwersmeer naar de omliggende gebieden. In de situatie met een gedempt getij op het Lauwersmeer zijn de waterstanden op het Lauwersmeer gemiddeld hoger dan in de huidige situatie. Verder is het water van het meer gedurende lange perioden in het jaar zout. Het gevolg daarvan is dat de nu nog zoete kwelstroom vanuit het Lauwersmeer zal veranderen in een grotere kwelstroom die zout is. De precieze omvang van deze zoute kwelstroom is naast de waterstandsverschillen onder meer afhankelijk van de dikten en doorlatendheden van de watervoerende pakketten en de aanwezigheid van sloten achter de dijken rondom het Lauwersmeer, die kwelstromen goeddeels kunnen afvangen en afvoeren naar de gemalen. De precieze omvang van de zoute kwelstroom is alleen op basis van een meer gedetailleerde grondwaterstudie vast te stellen. Gezien de zoute kweldruk vanuit zee die zich in de huidige situatie ook al voordoet in de gebieden rondom het Lauwersmeer, mag worden verwacht dat het effect van een grotere zoute kwelbelasting vanuit het Lauwersmeer alleen eventueel merkbaar zal zijn in een relatief smalle zone direct rondom het Lauwersmeer.

4 Hydraulica Lauwerssluizen

4.1 Inleiding

De hydraulische omstandigheden rond de Lauwerssluizen is apart beschouwd aangezien de sluizen in de huidige situatie water vanuit de Friese en Groningse boezem op de Waddenzee spuien. In de nieuwe situatie, met gedempt getij op het Lauwersmeer, wordt zout water vanuit de Waddenzee via de sluizen ingelaten. De stroomrichting door de sluizen is dan ook omgekeerd ten opzichte van de spuisituatie. Een belangrijke vraag is of de sluizen en de aanwezige bodembescherming tegen deze 'omgekeerde' stromingsrichting bestand zijn.

In dit hoofdstuk zijn achtereenvolgens beschreven:

- de beschikbare gegevens in paragraaf 4.2,
- de bestaande hydraulische toestand rond de Lauwerssluizen in paragraaf 4.3,
- de nieuwe hydraulische toestand rond de Lauwerssluizen in paragraaf 4.4.

4.2 Beschikbare gegevens

De beschikbare gegevens van de Lauwerssluizen zijn:

- Een situatietekening uit een rapport van Provinciale Waterstaat van Groningen, bron onbekend.
- Een artikel uit het tijdschrift Land+Water, 10^{de} jaargang, nr. 6, 1966. 'Een kraan van noord Nederland', door ir. C. van der Burgt.
- Een artikel uit het tijdschrift OTAR van mei 1964, 'De kunstwerken in de afsluitdijk van de Lauwerzee', door ir. W. van der Kleij.
- Het rapport 'Uitwateringssluizen afsluiting Lauwerszee uit 1957, WL rapport M519.
- Getij informatie van de Waddenzee nabij Lauwersoog van RIKZ.

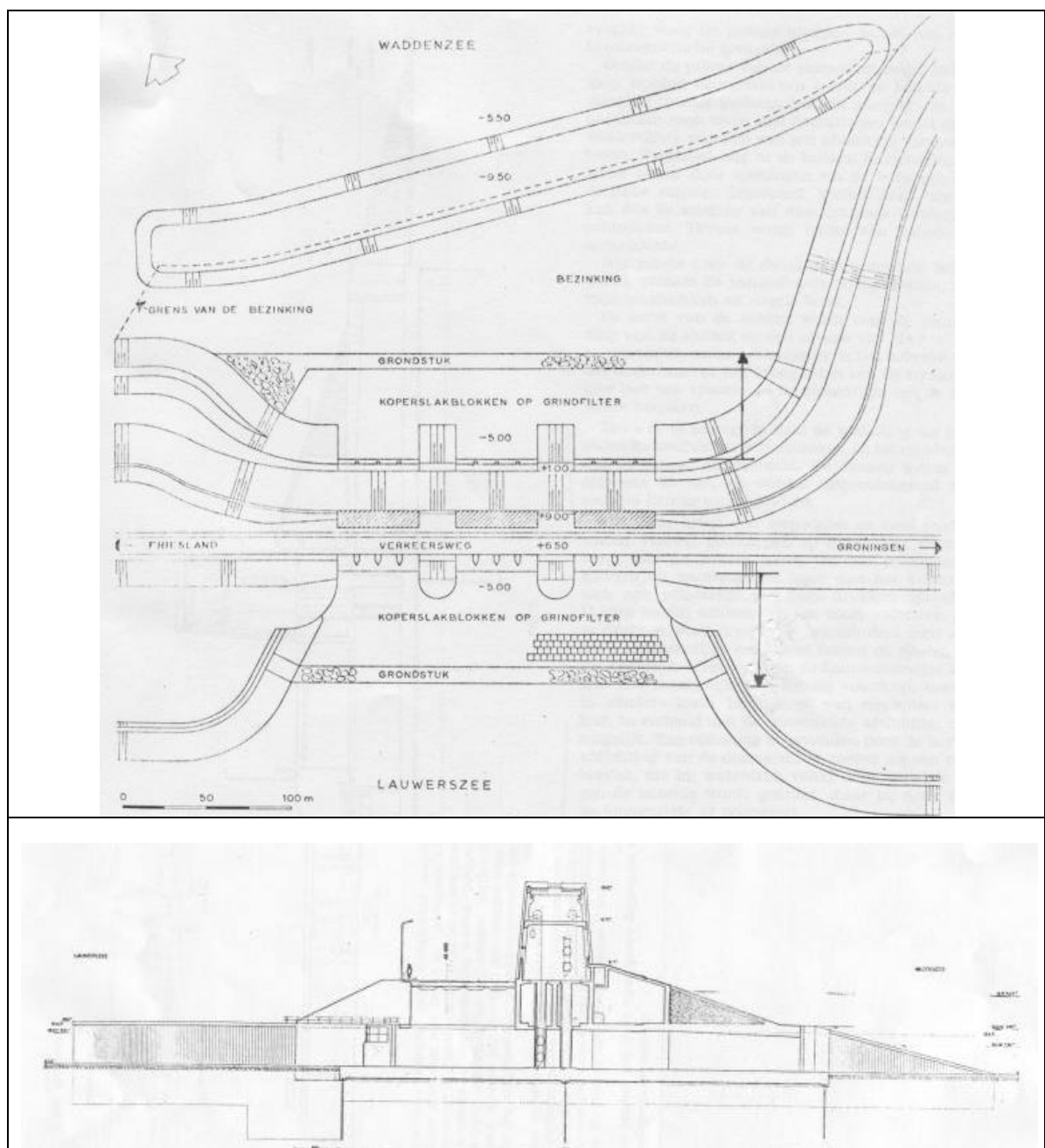
4.3 Bestaande situatie

De Lauwerssluizen zijn in 1969 in gebruik genomen teneinde overtollig water vanuit de Groningse en Friese boezem via het Lauwersmeer te spuien op de Waddenzee. Het streefpeil op het Lauwersmeer is NAP-0,9 m en bij voldoende lage waterstand op de Waddenzee worden de schuiven in de sluizen getrokken en begint het spuien.



Figuur 4-1 Drie sluizencomplexen, spuikokers Lauwersmeer zijde, spuikokers Waddenzee zijde

De Lauwerssluizen bestaan uit drie spuienheden met elk vier spuiokers. De breedte van een spuioker is 10 m en de bodem van de spuiokers ligt op NAP-5 m. Totaal is de spuibreedte dus maximaal 120 m. De sluisbodem is vlak, heeft geen drempels, en sluit aan op de bodem in de Waddenzee en het Lauwersmeer. Het plafond van de spuiokers ligt op NAP-0,5 m. Halverwege de kokers zijn twee schuiven aanwezig waarmee de koker kan worden afgesloten. Tijdens het spuien zijn beide schuiven geheel geheven. Aan de buiten- en binnenzijde van de sluizen ligt een bodembescherming die zich over een afstand van circa 65 m uitstrekt. De bodembescherming wordt met een grondstuk (damwand) afgesloten. De bodembescherming bestaat uit een zinkstuk met daarop een filterconstructie afgewerkt met koperslakblokken. De bodembescherming kan stroomsnelheden weerstaan van 4 m/s. Aan de Waddenzee zijde is een zinkstuk tot 50 m à 150 m uit het grondstuk gelegd. Daar buiten is een diepere geul aanwezig die dient als woelbak tijdens het spuien. In figuur 4-2 is een bovenaanzicht en een doorsnede van de Lauwerssluizen weergegeven.



Figuur 4-2 Overzicht en doorsnede van de Lauwerssluizen

De afmetingen van de sluizencomplexen is zo gekozen dat, als één van de drie complexen in onderhoud is, voldoende spuicapaciteit beschikbaar is. De 24 sluisdeuren wegen ieder ongeveer 35 ton en kunnen een statische waterdruk weerstaan bij een ontwerp buitenwaterstand van NAP+5,45 m. Opgemerkt wordt dat het huidige toetspeil bij Lauwersoog NAP+5,00 m is. De deuren zijn voorzien van rubber afsluitingen om lekkage in gesloten toestand zoveel mogelijk te beperken. De spuicapaciteit van de sluizen is circa 1900 m³/s bij een afvoercoëfficiënt $\mu = 1$ (gegeven door de beheerder).

4.4 Nieuwe toestand met gedempt getij

4.4.1 Inleiding

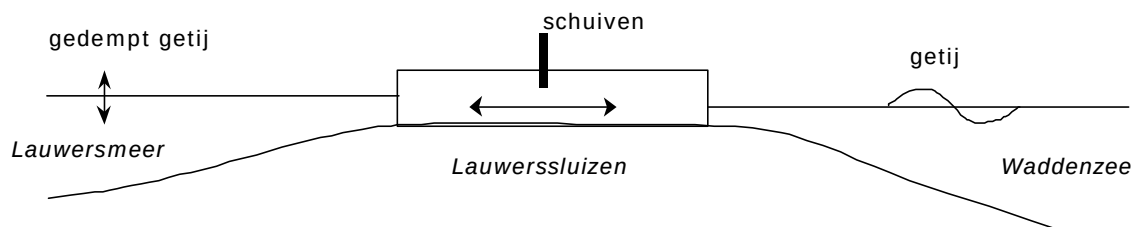
In de nieuwe toestand zal naast het spuien via de Lauwerssluizen ook zeewater worden ingelaten in het Lauwersmeer. Het doel van het inlaten van zeewater is onder meer het verkrijgen van een getij, met een beperkte getijslag, op het Lauwersmeer en het verversen van stagnant water in de diepe geulen.

In paragraaf 3.4 is op de hydraulische en morfologische effecten in en rond het Lauwersmeer ingegaan. In dit hoofdstuk is de hydraulische toestand van de constructies rond de Lauwerssluizen beschouwd. Naast de stabiliteit van de sluizen en schuiven is de stabiliteit van de bodembeschermingsconstructie onderzocht. Deze paragraaf bestaat uit de volgende sub-paragrafen:

- De rekenmethode en de randvoorwaarden, getijden op de Waddenzee en waterstanden op het Lauwersmeer zijn in paragraaf 4.4.2 opgenomen.
- De berekende afvoer en stroomsnelheden in de kokers en boven de bodembescherming zijn in paragraaf 4.4.3 weergegeven.
- De gevolgen voor de bodembescherming van met name het inlaten van zeewater zijn in paragraaf 4.4.4 opgesomd.
- In paragraaf 4.4.5 zijn de overige hydraulische gevolgen beschouwd zoals trillen van de schuiven en translatiegolven op het Lauwersmeer.

4.4.2 Rekenmethode en randvoorwaarden

De rekenmethode is gebaseerd op een eenvoudige hydraulische beschouwing van een lange overlaat. Aan de Wadenzeezijde van de overlaat wordt een getij opgelegd en aan de Lauwersmeerzijde wordt, gegeven de karakteristieken van de constructie, de waterstand berekend. In de onderstaande schets is het principe van de rekenmethode weergegeven.



Figuur 4-3 Schematisatie Lauwerssluizen in de rekenmethode

In bijlage A zijn de formules van de rekenmethode uitgewerkt. De rekenmethode is in een Excel-sheet opgenomen waarmee een aantal berekeningen is uitgevoerd.

De rekenmethode vereist het opleggen van een getij op de zeerand. Daarvoor zijn drie karakteristieke getijden voor Lauwersoog gebruikt in dit onderzoek:

- een gemiddeld getij,
- het springtij en
- het doodtij.

Daarmee is voor gemiddelde en twee extremere omstandigheden het stroombeeld in en rond de Lauwerssluizen onderzocht. Het gemiddeld getij geldt voor normale jaargemiddelde omstandigheden en geeft een beeld van de gemiddelde situatie rond de sluizen en op het meer. Het springtij en doodtij zijn bedoeld om inzicht te geven in extremere situaties die een aantal malen per jaar (ongeveer 2 maal per maand) kunnen voorkomen.

Voor het onderzoek is door het gebruik van deze drie karakteristieke getijden voldoende inzicht te verkrijgen in de grootte van de optredende stroomsnelheden in de Lauwerssluizen en het verloop van het gedempte getij op het Lauwersmeer. De gebruikte getijden zijn in tabel 4-1 weergegeven.

getij	max / min waterstand [m + NAP]	getijslag [m]
gemiddeld tij	1,02 / -1,29	2,31
springtij	1,17 / -1,45	2,62
doodtij	0,85 / -1,03	1,88

Tabel 4-1 Gebruikte getijden voor de Waddenzeegetijden bij Lauwersoog

Aan de Lauwersmeer zijde begint de berekening met het streefpeil. In de rekenmethode moet het in te laten watervolume in Lauwersmeer worden opgegeven. Voor het maximum peil is NAP-0,53 m gebruikt en voor het minimum peil NAP-1,03 m. De getijslag is dan 0,5 m. Met een gemiddeld wateroppervlak van het Lauwersmeer van circa 2800 ha, is het getijprisma ongeveer 14 miljoen m³. Verder kan het aantal in te zetten spuicomplexen worden gevarieerd. Bij het inzetten van één spuicomplex is de spuibreedte 40 m en bij drie spuicomplexen 120 m. De afvoercoëfficiënt is tijdens het spuien op 1 gesteld en tijdens het inlaten op 0,9 (minder gestroomlijnde kokeringen aan de zeezijde). De uitgevoerde berekeningen zijn in onderstaande tabel samengevat.

berekening	getij op de Waddenzee	aantal ingezette spuicomplexen		
		tijdens inlaten	tijdens spuien	opmerkingen
A1	gemiddeld	3	3	
A2	springtij	3	3	
A3	doodtij	3	3	
B	gemiddeld	1	3	
C1	gemiddeld	3 ¹	3	¹ schuiven gedeeltelijk geheven (1 m doorstroomhoogte)
C2	springtij	3 ¹	3	
C3	doodtij	3 ¹	3	
D1	gemiddeld	3 ²	3	² inlaten bij beperkt verval (0,8 m)
D2	springtij	3 ²	3	
D3	doodtij	3 ²	3	
E1	gemiddeld	1	2 ³	³ één spuicomplex in onderhoud
E2	springtij	1	2 ³	
E3	doodtij	1	2 ³	
F1	gemiddeld ⁴	3	3	⁴ in 2030 zeewaterstand 0,15 m hoger en in 2100 zeewaterstand 0,60 m hoger
F2	gemiddeld ⁴	3	3	

Tabel 4-2 Uitgevoerde berekeningen

4.4.3 Waterstanden, afvoer en snelheid

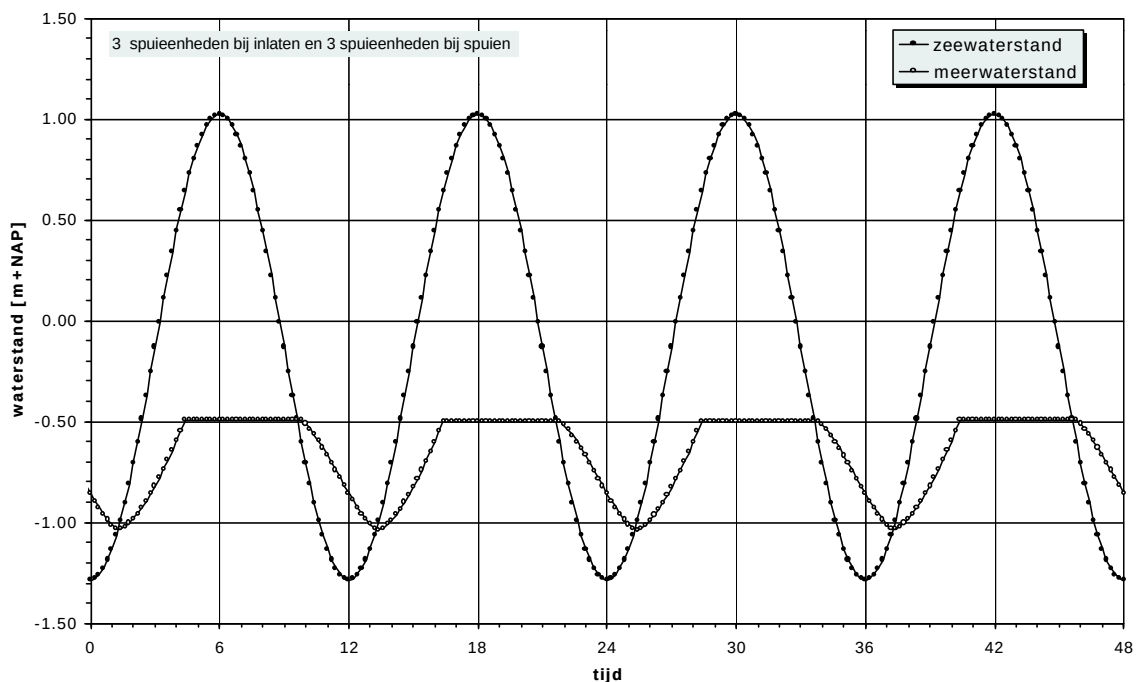
Voor de volgende situaties zijn de resultaten van de berekeningen geanalyseerd in deze paragraaf:

- A1: Inlaten en spuien met 3 spuicomplexen.
- B: Inlaten met één spuicomplex en spuien met 3 spuicomplexen.
- C1 t/m C3: Situatie met gedeeltelijk geheven schuiven.
- D1 t/m D3: Situatie met inlaten bij beperkt verval.
- A1 t/m A3: Situatie tijdens springtij en doodtij.
- E1 t/m E3: Onderhoudssituatie; inlaten met één spuicomplex en spuien met 2 spuicomplexen.
- F1 en F2: klimaateffect op gemiddelde zeewaterstand, 0,15 m hoger in het zichtjaar 2030 en 0,60 m hoger in het zichtjaar 2100.

Aan het eind van deze paragraaf zijn de berekeningsresultaten samengevat.

Inlaten en spuien met 3 spuicomplexen

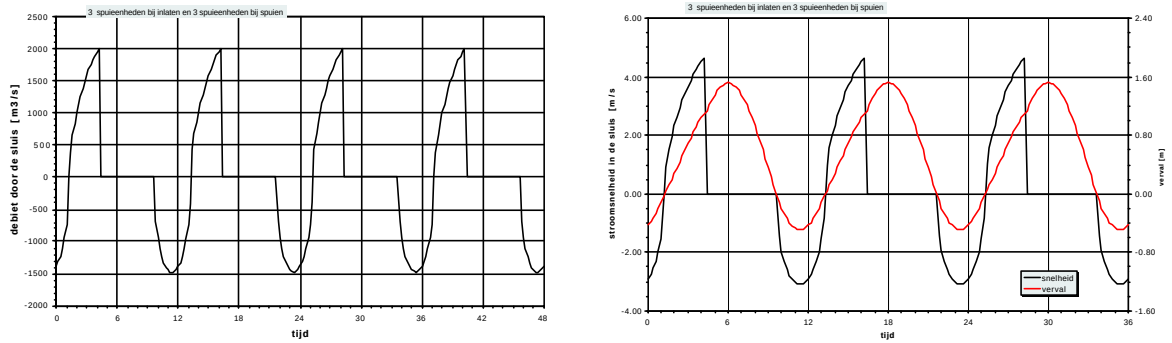
De resultaten van de berekeningen van de waterstanden en de afvoer door de Lauwerssluizen en de stroomsnelheid in de sluizen en boven de bodembescherming zijn weergegeven voor een gemiddeld getij en alle 12 spuikokers open. In figuur 4-4 is voor gemiddeld getij het waterstandsverloop in de Waddenzee en op het Lauwersmeer weergegeven.



Figuur 4-4 Waterstandsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, 3 spuicomplexen

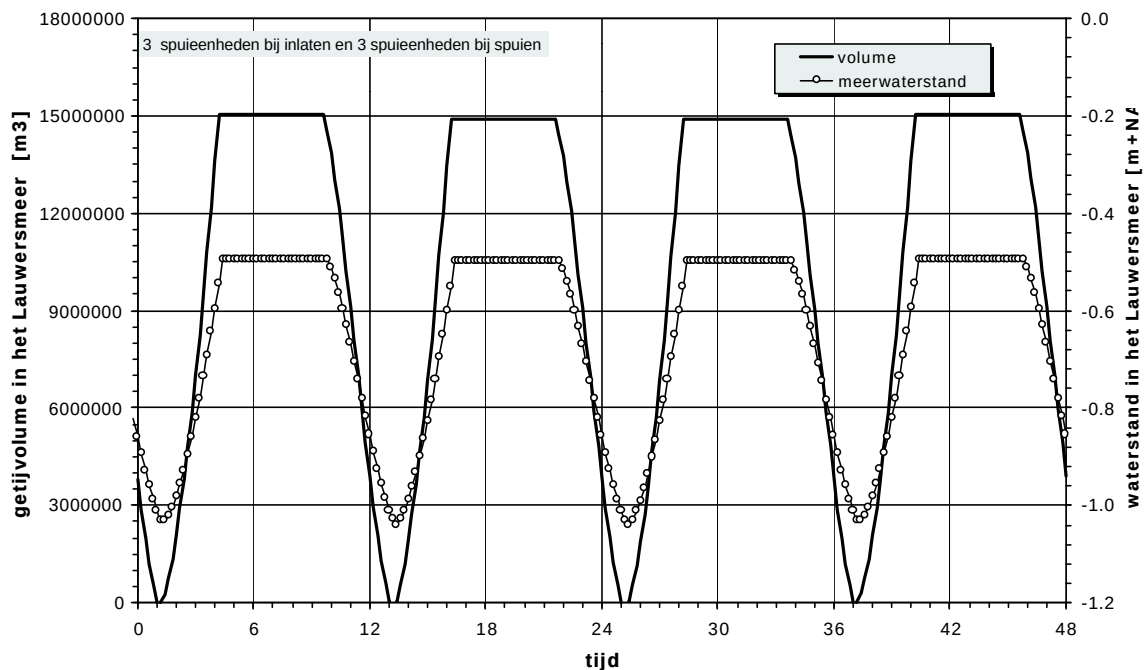
De waterstand in het Lauwersmeer neemt in ongeveer 3,5 uur toe tot NAP-0,5 m en is daarna circa 5,5 uur constant. Na ongeveer 3,5 uur spuien is de laagste waterstand op het Lauwersmeer bereikt.

De afvoer en de snelheid door de sluizen is in figuur 4-5 weergegeven. Bij het inlaten van zeewater is het maximum debiet door de sluizen ongeveer 2000 m³/s en bij het spuien maximaal 1500 m³/s. Dat betekent voor de stroomsnelheden in de constructie, maximum snelheden van bijna 4,7 m/s bij het inlaten en 3,1 m/s bij het spuien.



Figuur 4-5 Afvoer en snelheidsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, 3 spuicomplexen

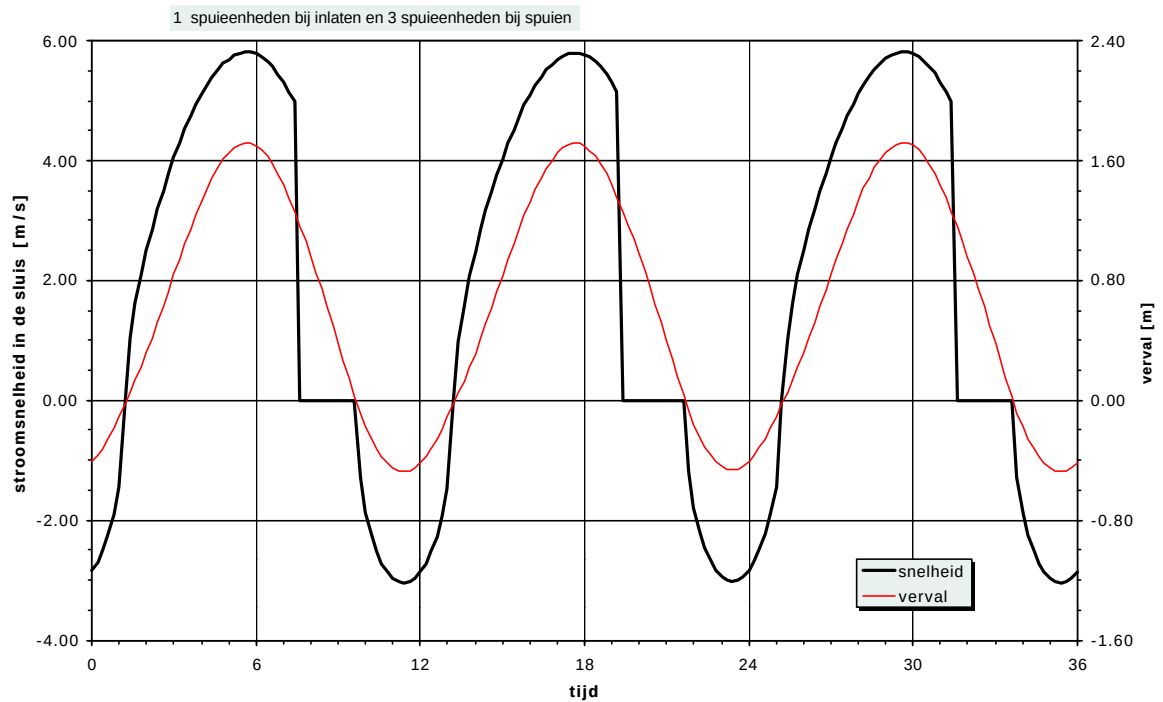
Het getijprisma op het Lauwersmeer wordt ruimschoots gehaald voor een gemiddeld getij, zie figuur 4-6. Het spuien wordt voor een gemiddeld getij vrijwel onmiddellijk gevolgd door het vullen van het Lauwersmeer. Tussen het vullen en ledigen van het Lauwersmeer is de waterstand ongeveer 5,5 uur constant.



Figuur 4-6 Getijprisma op het Lauwersmeer voor gemiddeld getijomstandigheden, 3 spuicomplexen

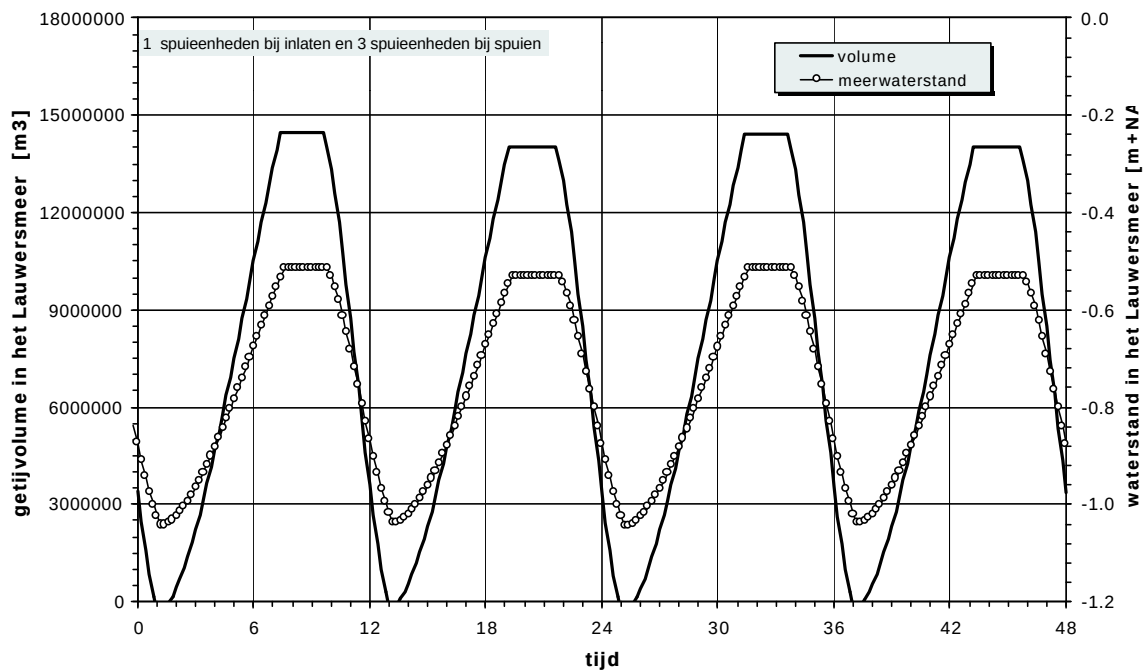
Inlaten met één spuicomplex en spuien met 3 spuicomplexen

Teneinde op het Lauwersmeer een getij te realiseren, kan het inlaten van zeewater over een langere periode worden gespreid door het beperken van het aantal in te zetten spuicomplexen. In figuur 4-7 is voor een situatie met één spuicomplex (4 spuikokers) tijdens het inlaten en drie tijdens het spuien (12 spuikokers), de stroomsnelheid weergegeven.



Figuur 4-7 Snelheidsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, 1 spuicomplex tijdens inlaten

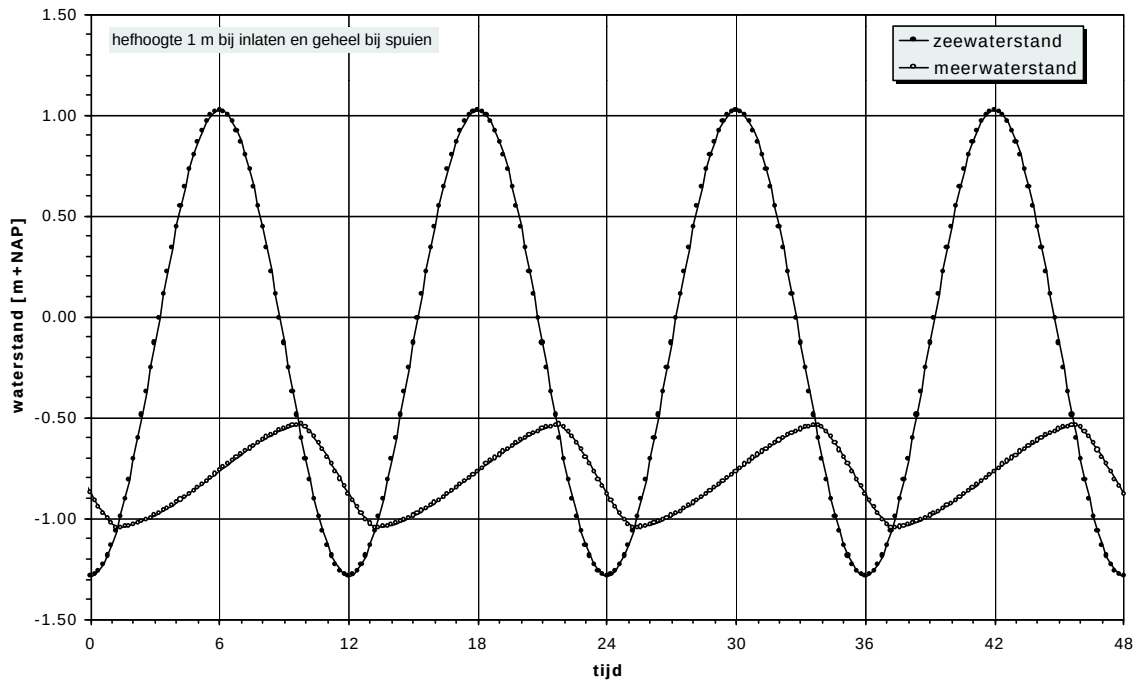
Wat direct opvalt is de veel hogere maximum stroomsnelheid in de constructie en boven de bodembescherming tijdens het inlaten van zeewater. Snelheden van bijna 5,8 m/s worden bereikt. Dit is een gevolg van het verval dat bij een beperkte inlaatcapaciteit (4 spuiokers) van de constructie groter wordt, aangezien de binnenwaterstand op het meer trager stijgt dan bij 12 geopende spuiokers. Daardoor is de stroomsnelheid in de constructie groter aangezien de snelheid evenredig is met de wortel uit het verval ($u \sim \sqrt{\Delta h}$). Het verloop van de waterstand in het Lauwersmeer in de tijd lijkt in deze situatie meer op een getij, zie figuur 4-8.



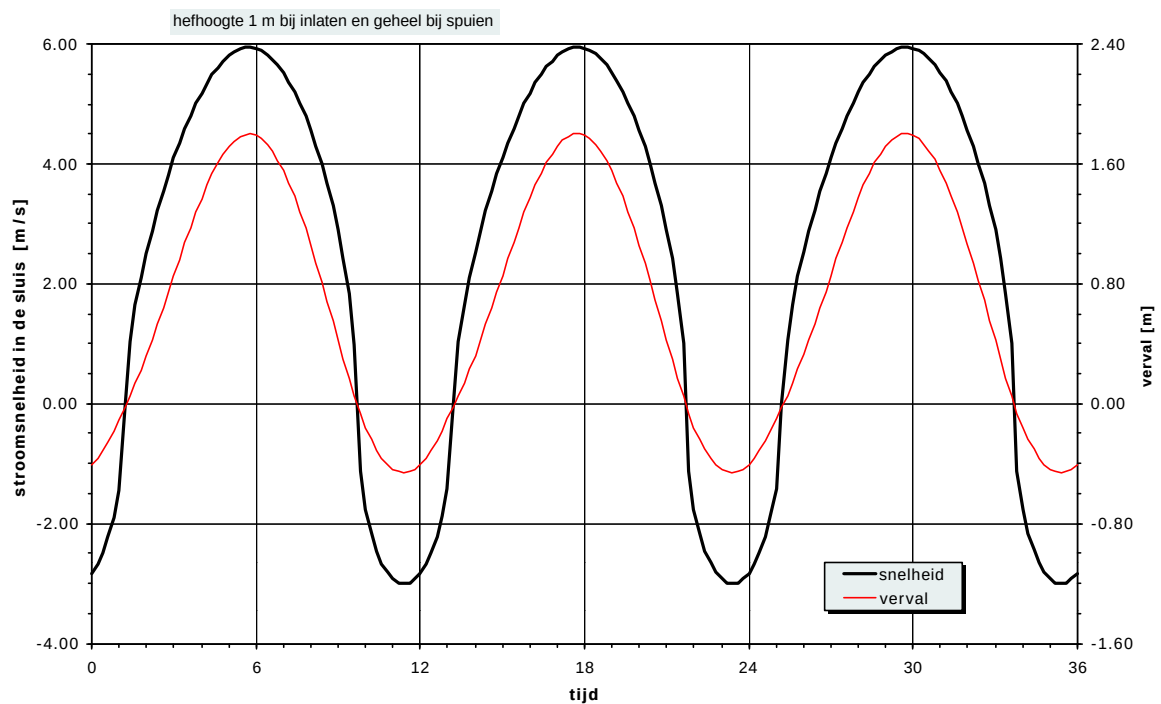
Figuur 4-8 Getijprisma op het Lauwersmeer voor gemiddeld getijomstandigheden, 1 spuicomplex

Situatie met gedeeltelijk geheven schuiven

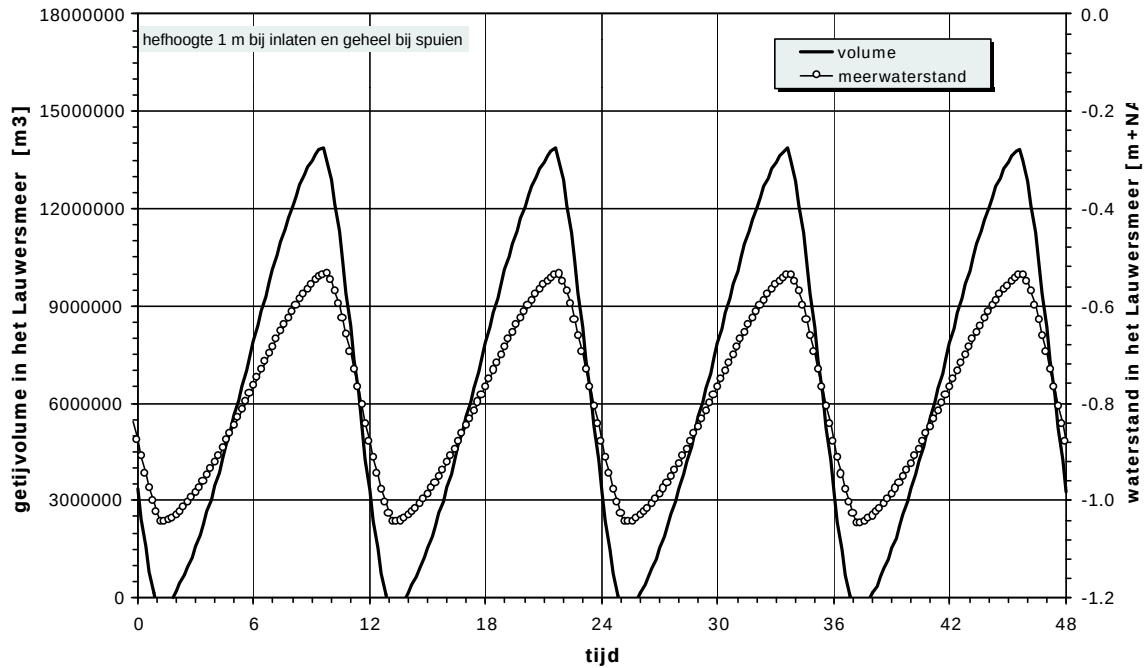
Met gedeeltelijk geheven schuiven (1 m doorstroomhoogte in plaats van 4 m) tijdens het inlaten van zeewater ontstaan een min of meer asymmetrisch getij op het Lauwersmeer. In figuur 4-9 zijn de waterstanden weergegeven. In figuur 4-10 zijn de intreesnelheden in de sluis opgenomen. Bij het inlaten komen stroomsnelheden van 6 m/s voor als gevolg van het grotere verval over de constructie in vergelijking met geheel geheven schuiven. Het Lauwersmeer vult zich gedurende 9 uur (in plaats van 3,5 uur) tot 14 miljoen m³/getij en stroomt dan vervolgens weer in 3,5 uur leeg. In figuur 4-11 is het verloop van het getijprisma weergegeven.



Figuur 4-9 Waterstandsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, hefhoogte schuiven 1 m



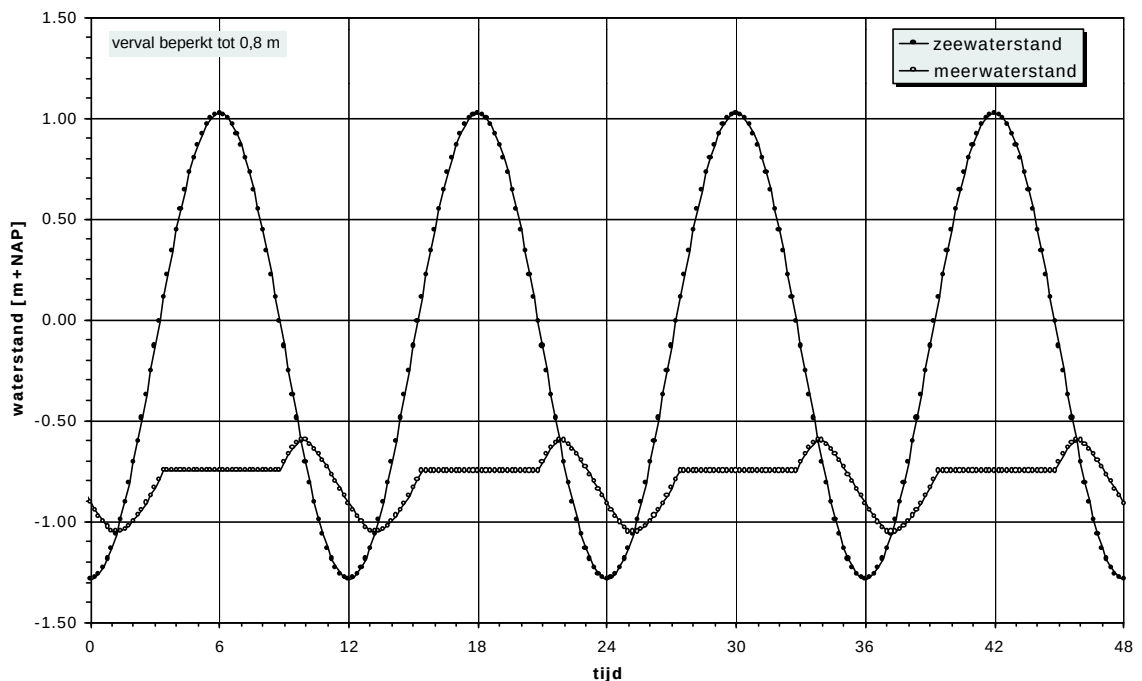
Figuur 4-10 Snelheidsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, hefhoogte schuiven 1 m



Figuur 4-11 Getijprisma op het Lauwersmeer voor gemiddeld getijomstandigheden, hefhoogte schuiven 1 m

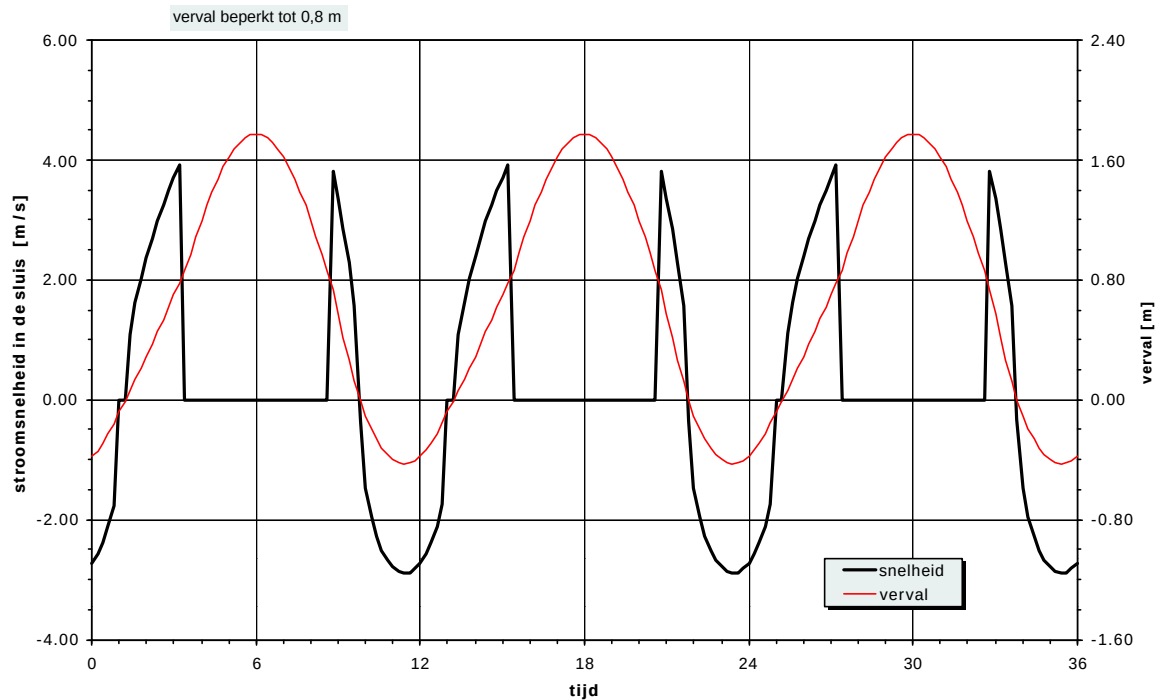
Situatie alleen inlaten met een beperkt verval

De stroomsnelheden in de kokers van de Lauwerssluizen en boven de bodembescherming kan worden beperkt, als een beperkt verval over de constructie wordt toegestaan tijdens het ingelaten van zeewater. Als de stroomsnelheden maximaal 4 m/s mogen zijn, dan is het maximum toegestane verval 0,8 m. Voor die situatie zijn de resultaten in figuur 4-12 weergegeven voor de waterstanden.

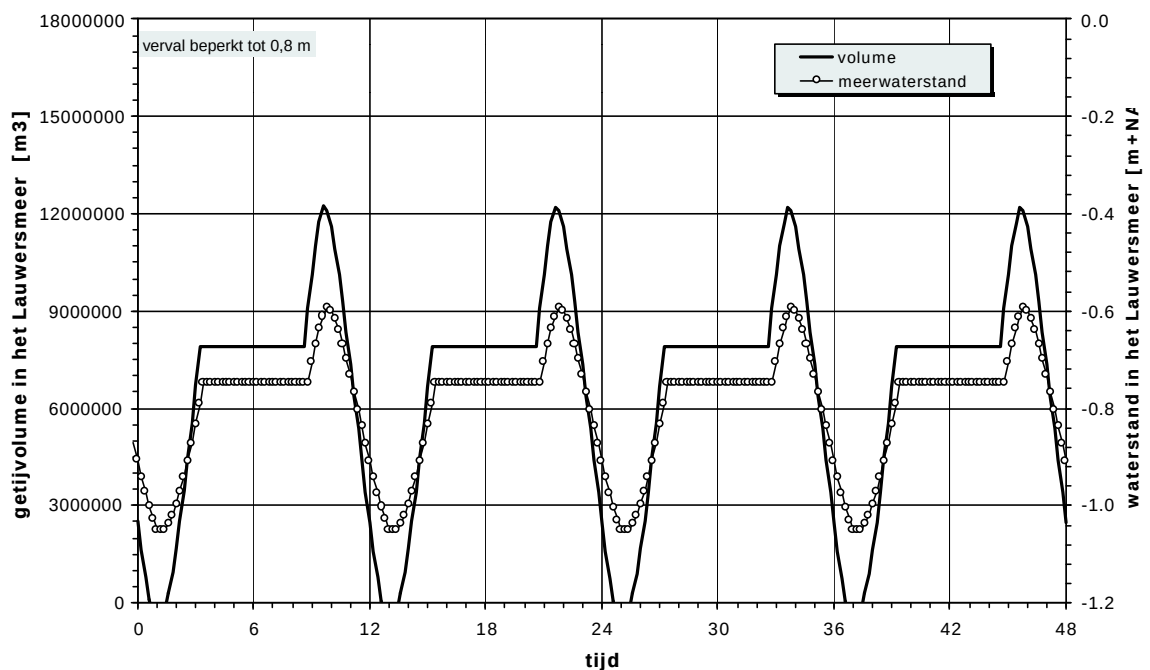


Figuur 4-12 Waterstandsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, verval beperkt tot 0,8 m

De waterstand op het Lauwersmeer verloopt dan discontinu 'stijgen-constant-stijgen-dalen'. Uit figuur 4-13 met daarin het verloop van de stroomsnelheden is duidelijk waarom. Het inlaten gebeurt tijdens opkomende vloed totdat het verval 0,8 m is en wordt daarna gestopt. Pas bij dalende zeewaterstand, als het verval weer gereduceerd is tot 0,8 m, worden de schuiven geopend om weer zeewater in te laten. Uit figuur 4-14 blijkt dat het getijprisma maximaal 12,2 miljoen m³/getij is en de getijslag maximaal 0,45 m in plaats van de gewenste 0,5 m.



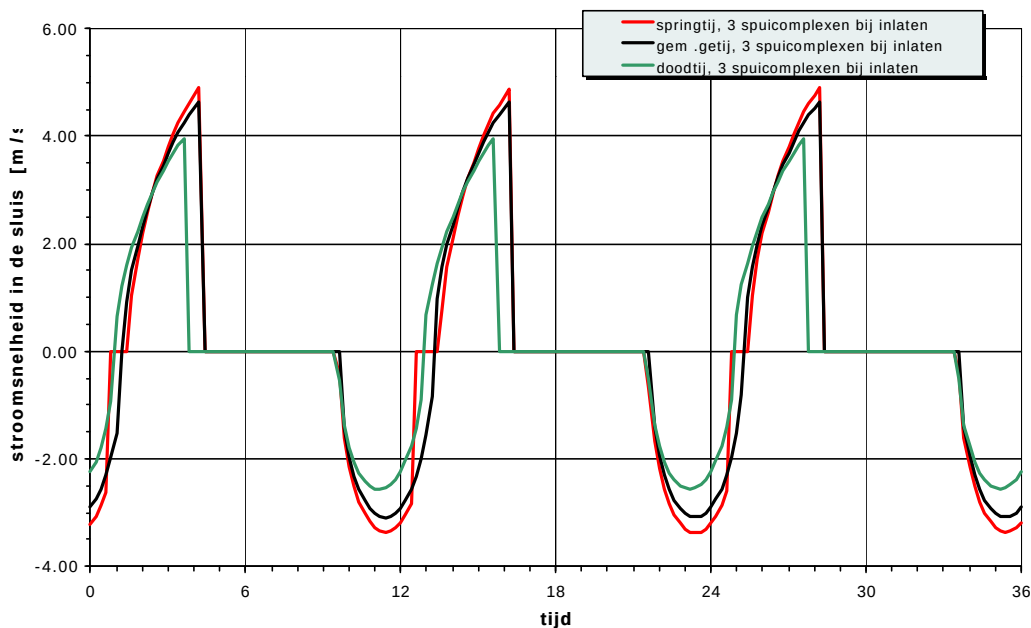
Figuur 4-13 Snelheidsverloop voor gemiddeld getijomstandigheden, verval beperkt tot 0,8 m



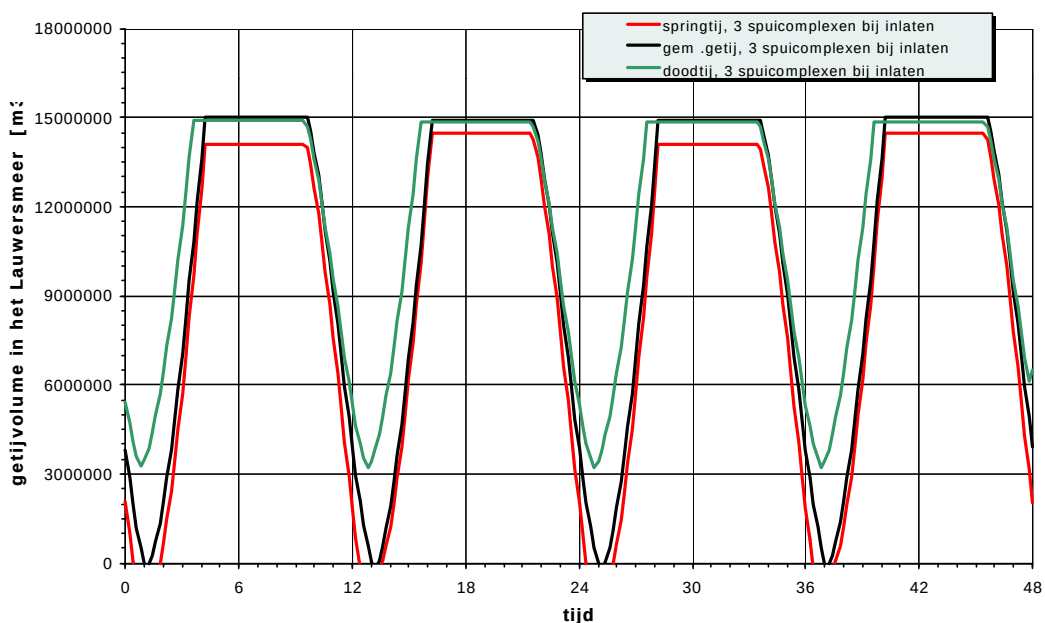
Figuur 4-14 Getijprisma op het Lauwersmeer voor gemiddeld getijomstandigheden, verval beperkt tot 0,8 m

Situatie tijdens springtij en doottij

De stroomsnelheden en de getijprisma's voor springtij en doottij zijn samen met het gemiddeld getij in figuur 4-15 weergegeven voor de situatie met geheel geheven schuiven en alle 3 de spuicomplexen (12 spuikokers) tijdens inlaten en spuien in gebruik. Het is duidelijk dat bij springtij hogere stroomsnelheden tot 4,9 m/s boven de bodembescherming aan de binnenzijde optreden, terwijl bij doottij de maximum stroomsnelheden beperkt blijven tot 4,0 m/s. Het grotere/kleinere verval onder springtij/doottij is de oorzaak voor de hogere/lagere stroomsnelheden in de constructie en boven de bodembescherming. Het getijprisma met een volume van 14 miljoen m³ wordt bij doottij niet gehaald, zoals blijkt uit figuur 4-16. Het Lauwersmeer loopt tijdens eb niet geheel leeg, er wordt maar circa 11,5 miljoen m³ water verversd en de getijslag is beperkt tot 0,4 m in plaats van 0,5 m. De waterstand op het Lauwersmeer bereikt dan een laagste niveau van NAP-0,9 m.



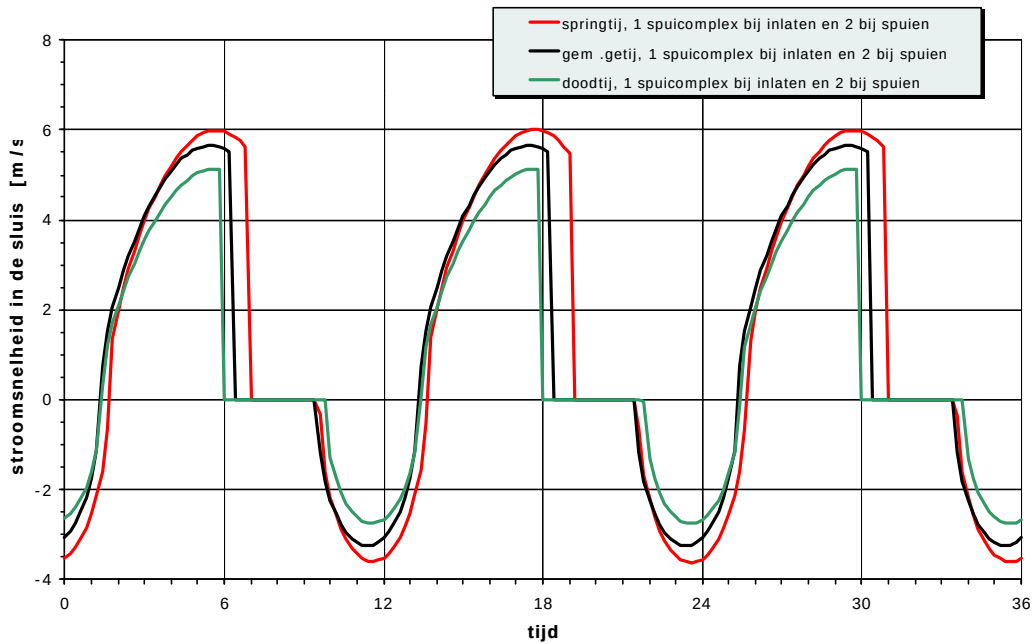
Figuur 4-15 Snelheidsverloop voor verschillende getijomstandigheden, 3 spuicomplexen tijdens inlaten



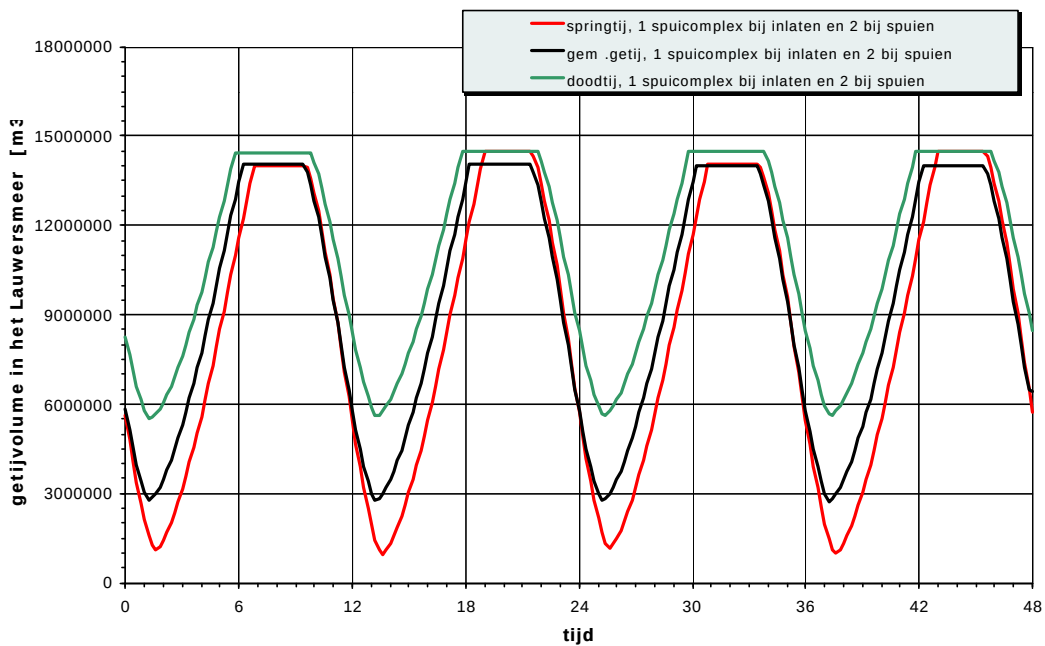
Figuur 4-16 Getijprisma op het Lauwersmeer voor verschillende getijomstandigheden, 3 spuicomplexen

Onderhoudssituatie; inlaten met één spuiccomplex en spuien met 2 spuiccomplexen

Een situatie is berekend waarin één spuiccomplex in onderhoud is. Het inlaten van zeewater gaat dan via één spuiccomplex (4 spuikokers) en het spuien met twee (8 spuikokers). De hoge stroomsnelheden zijn in figuur 4-17 weergegeven. Voor alle getijden treden stroomsnelheden tussen 5 m/s en 6 m/s op tijdens het inlaten van zeewater. Het getijprisma wordt voor alle drie de getijden niet gehaald, er wordt minder dan 14 miljoen m³ per getij verversd, zie figuur 4-18. De getijslag is beperkt tot 0,48 m voor springtij, tot 0,4 m voor gemiddeld getij en tot 0,3 m voor doottij. Dit is een tijdelijke situatie die hier is geanalyseerd aangezien in die situatie zeer hoge stroomsnelheden boven de bodembescherming kunnen optreden.



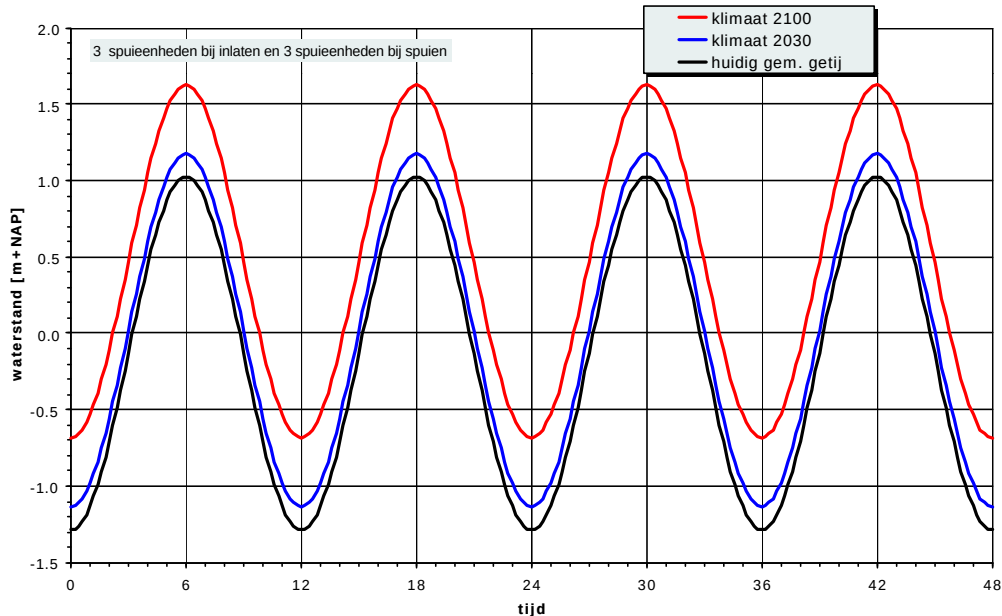
Figuur 4-17 Snelheidsverloop voor verschillende getijomstandigheden, 1 spuiccomplex tijdens inlaten en 2 tijdens spuien



Figuur 4-18 Getijprisma op het Lauwersmeer voor verschillende getijomstandigheden, 1 spuiccomplex tijdens inlaten en 2 tijdens spuien

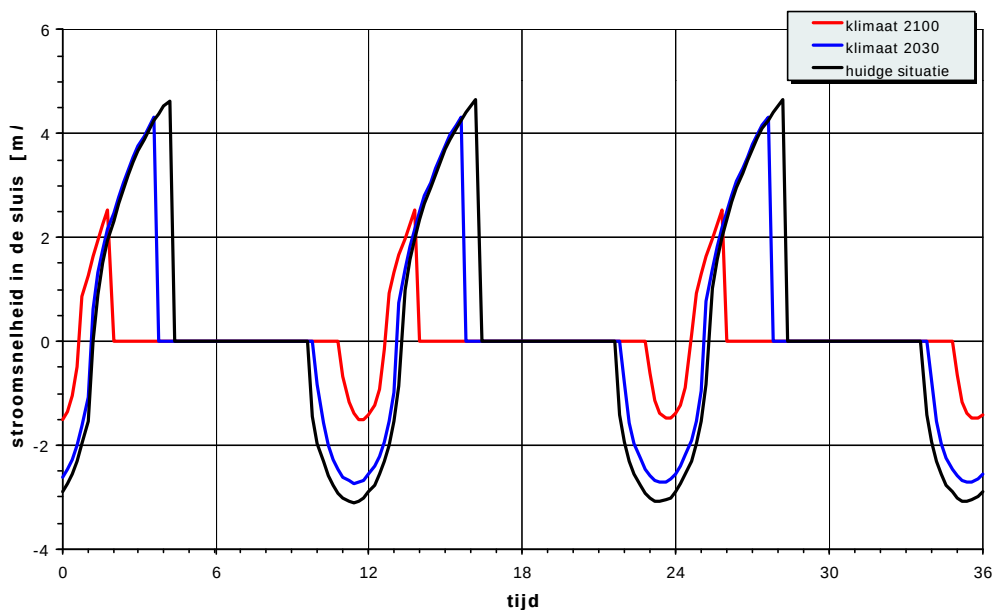
Klimaatteffect

Tot slot het is effect onderzocht van een stijgende gemiddelde zeewaterstand als gevolg van klimaat effecten in de zichtjaren 2030, waarin 0,15 m zeespiegelstijging is voorzien en in zichtjaar 2100 met 0,60 m stijging. Het Lauwersmeerpeil stijgt niet mee met de zeespiegelstijging. Het gemiddelde getij op de Waddenzee is in figuur 4-19 weergegeven.

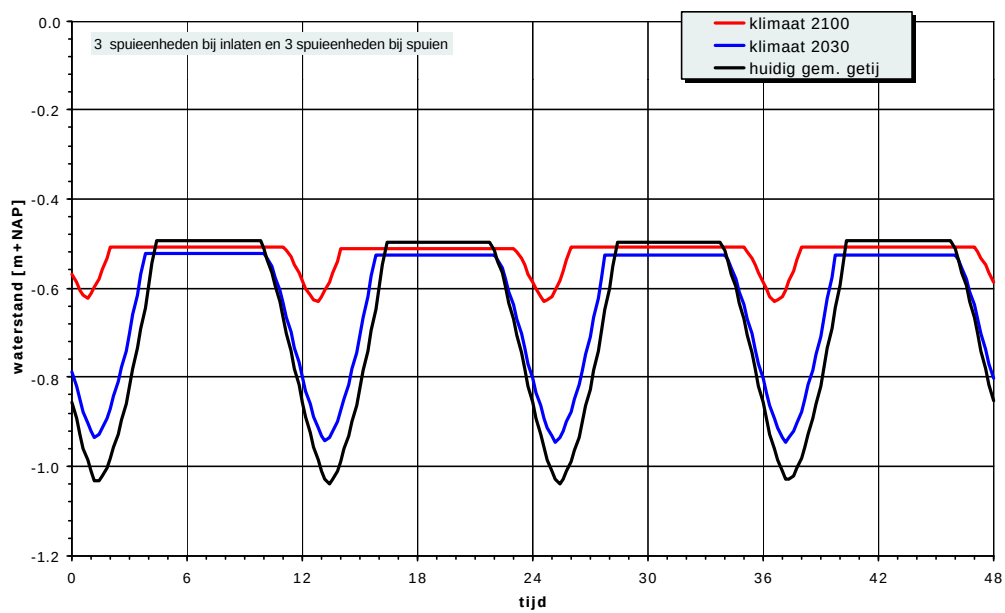


Figuur 4-19 Gemiddeld getij op de Waddenzee, huidig, in 2030 en in 2100

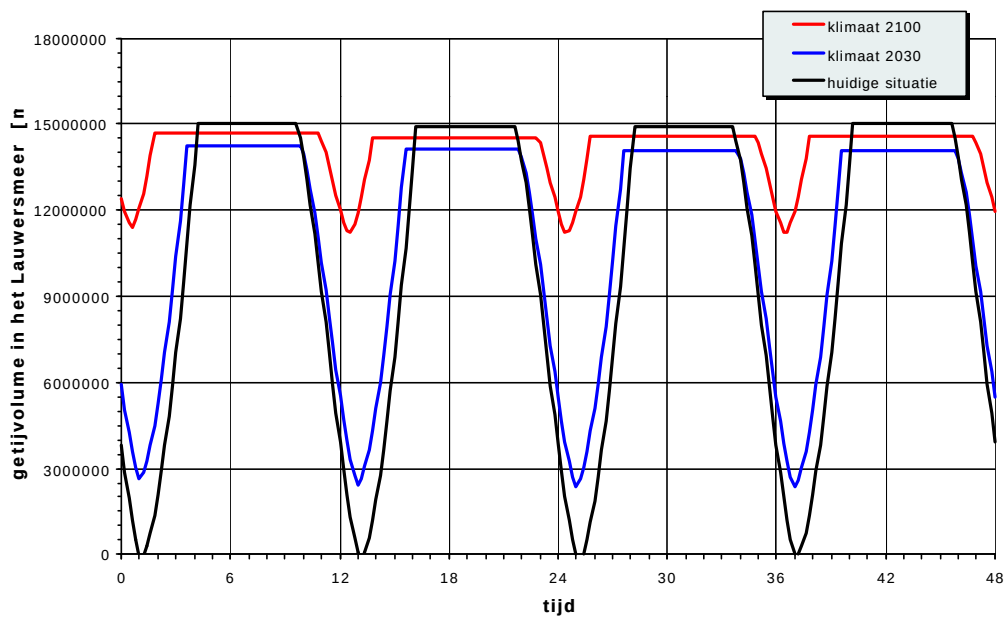
De snelheden in de spuikokers en boven de bodembescherming nemen af tot 2,5 m/s respectievelijk 4,3 m/s, zie figuur 4-20, als een gevolg van het afgenomen verval in de toekomstige situatie, zie figuur 4-21. De getijslag reduceert tot 0,42 m in het zichtjaar 2030 en tot 0,12 m in het zichtjaar 2100. Daardoor wordt het Lauwersmeer ook niet meer geheel gevuld. In figuur 4-22 is te zien dat het getijprisma bij gemiddeld getij in 2030 reduceert tot 11,5 miljoen m³/getij en in 2100 slechts tot 3,5 miljoen m³/getij.



Figuur 4-20 Snelheid bij gemiddeld getij in huidige situatie, in 2030 en in 2100



Figuur 4-21 Meerwaterstanden bij gemiddeld getij in huidige situatie, in 2030 en in 2100



Figuur 4-22 Getijprisma bij gemiddeld getij in huidige situatie, in 2030 en in 2100

Samenvatting berekeningsresultaten

De berekeningsresultaten zijn in een tabel samengevat. Naast de hydraulische condities zijn in tabel 4-3 tevens de maximum stroomsnelheid en de getijslag opgenomen.

berekening	omschrijving	max. snelheid [m / s]	getijslag [m]	opmerkingen
A1	Gemiddeld getij en alle spuicomplexen in bedrijf	4,7	0,50	5 uur constante waterstand op het meer
B1	Gemiddeld getij inlaten met 1 spuicomplex en spuien met 3 spuicomplexen	5,8	0,50	2,5 uur constante waterstand op het meer
C1-C3	Gemiddeld getij en schuiven 1 m geheven	6,0	0,50	geheel getij op het meer
D1-D3	Gemiddeld getij en inlaten tot max. verval van 0,8 m	4,0	0,45	Asymmetrisch getij met beperkte getijslag
A1-A3	Springtij en alle spuicomplexen	4,9	0,50	5 uur constante waterstand
	Doodtij en alle spuicomplexen	4,0	0,40	6 uur constante waterstand
E1-E3	Onderhoudsituatie:			
	Inlaten met 1 spuicomplex en spuien met 2 spuicomplexen			
	Springtij	6,0	0,48	2,5 uur constante waterstand
	Gemiddeld getij	5,7	0,40	3 uur constante waterstand
F1-F2	Doodtij	5,1	0,30	4 uur constante waterstand
	Klimaatteffect (zeespiegelstijging)			
	Gemiddeld getij 2030 (+0,15 m)	4,3	0,42	5 uur constante waterstand
	Gemiddeld getij 2100 (+0,60 m)	2,5	0,12	9 uur constante waterstand

Tabel 4-3 Samenvatting van de berekeningsresultaten

Op basis van deze berekeningen bieden de volgende situaties hydraulische gezien het meeste perspectief:

- Inzetten van alle spuicomplexen, waarbij de bodembescherming hydraulisch wordt belast met snelheden tot 4,7 m/s in plaats van 4 m/s.
- Inlaten met beperkt verval (0,8 m) waardoor de getijslag is beperkt tot 0,4 m en de maximum snelheden niet hoger zijn dan 4 m/s.

4.4.4 Gevolgen voor de bodembescherming

De bodembescherming van de Lauwerssluizen is ontworpen voor stroomsnelheden rond de 4 m/s. In het rapport van Van Riessen (1957) is alleen het spuien onderzocht voor het ontwerp van de Lauwerssluizen. In het rapport is geen informatie over de bodembescherming opgenomen.

Aangezien de bodembescherming volgens de tekeningen symmetrisch is, zou voor het inlaten van zeewater de bodembescherming aan de Lauwersmeerzijde ook snelheden van 4 m/s kunnen weerstaan. Aan de Waddenzeezijde ligt benedenstrooms van de bodembescherming nog een zinkstuk over 50 m à 150 m dat de bodem beschermt tijdens het spuien. Aan de meerzijde ontbreekt die bescherming voor zover bekend. Ernstiger is dat bij het inlaten van zeewater stroomsnelheden kunnen optreden die (veel) hoger zijn van 4 m/s. In sommige gevallen kunnen stroomsnelheden tot 6 m/s optreden. Dat is voor de aanwezige bodembescherming zeer waarschijnlijk te hoog.

Een indicatie voor de zwaarte van de bodembescherming is dat de diameter van de stortsteen afhangt van het kwadraat van de stroomsnelheid. Als de snelheden van 4 m/s toenemen tot 6 m/s is de factor 2,25 hoger, of te wel vergeleken met de aanwezige stortsteen, zijn stenen met een ruim tweemaal grotere diameter nodig.

Een analyse van de ontwerpcriteria voor de bodembescherming kan meer inzicht geven in de stabiliteit van de bodemconstructie onder die extreme stromingsomstandigheden.

4.4.5 Overige hydraulische gevolgen

Effecten die bij het gebruik van de Lauwerssluizen voor het inlaten van zeewater zouden kunnen optreden zijn:

- de mogelijkheid om de schuiven bij zeer hoge snelheden te sluiten,
- het optreden van translatiegolven in het Lauwersmeer en
- het trillen van de schuiven.

Verder zijn de gevolgen van de volgende omstandigheden kort beschreven:

- Inlaten van zeewater met gedeeltelijk geheven schuiven.
- Het weigeren tijdens het sluiten van één of meerdere schuiven.

Sluiten van de schuiven bij extreme snelheden

Bij de ontwerpuittreesnelheid van circa 4 m/s kunnen de schuiven worden gesloten, aangezien dat in de praktijk gebeurt tijdens eb in geval het spuivolume is bereikt. Of tijdens het inlaten bij uittreesnelheden van circa 6 m/s de schuiven probleemloos gesloten kunnen worden, is de vraag. De vorm van de onderzijde van de schuiven speelt een rol, het gewicht van de schuiven en de kans op het in trilling geraken van de schuiven. Aangezien het sluiten redelijk snel gebeurt, is de kans op het trillen van de schuiven wellicht wat beperkt, maar de hoge stroomsnelheden kunnen aanleiding zijn voor het in trilling geraken van de schuiven. Dit is niet verder in de quick scan gedempt getij onderzocht.

Translatiegolven

Translatiegolven kunnen optreden als de schuiven in de Lauwerssluizen te snel worden gesloten tijdens vloed als het getijprisma is bereikt. Juist op dat moment zijn stroomsnelheden hoog en kunnen translatiegolven ontstaan. Het effect is vergelijkbaar met waterslag in een waterleiding. Na het 'te snel' sluiten van de schuiven loopt met een snelheid van 4 m/s tot 7 m/s een translatiegolf met een amplitude van enkele centimeters vanuit het sluizencomplex in de richting van het Lauwersmeer. Als de translatiegolf de oever bereikt of de randen van platen

kan de golfhoogte toenemen (vergelijkbaar met een Tsunami), voor afslag van de oever zorgen en voor onplezierige gevolgen voor recreanten.

Ter voorkoming van hoge translatiegolven, translatiegolven treden altijd op tijdens het sluiten van de schuiven, zullen de schuiven langzaam moeten worden gesloten. De huidige sluitsnelheid van de schuiven is al dusdanig dat translatiegolven op het Lauwersmeer bij het sluiten aan het eind van het spuien zo veel mogelijk worden voorkomen.

Trillingen

Een andere fenomeen dat bij het sluiten van de schuiven tijdens hoge stroomsnelheden kan voorkomen is het trillen van de schuiven. Door de hoge stroomsnelheden in de kokers en rond de onderzijde van de schuiven, kan de schuif aangeslagen worden en in een 'eigenfrequentie' geraken. De schuif beweegt met de stroming mee, valt weer terug, enzovoorts. Deze dynamische belasting van de schuif wekt hoge krachten op in de schuifgeleiding en op de schuif. Het trillen van de schuif moet voorkomen worden omdat de constructie daarvoor niet ontworpen is. Het aanslaan van een schuif wordt onder andere bepaald door:

- de stroomsnelheid,
- de vorm van onderzijde van de schuif,
- de massa van de schuif,
- de elasticiteit van het schuifmateriaal,
- de schuifophanging en -geleiding.

Of bij het ontwerp van de schuiven het trilgedrag van de schuiven is onderzocht, is niet bekend, maar hoogst waarschijnlijk wel. Voor de ontwerpcondities zullen de schuiven niet in trilling geraken (is niet geconstateerd door de beheerder). De schuiven kunnen bij de ontwerp uittreesnelheid van circa 4 m/s, voor zover bekend is, worden gesloten aangezien het voor kan komen dat het spuibolume is bereikt tijdens eb. In die situatie is het verval over de sluisen groot en wordt daardoor een maximum uittreesnelheid bereikt.

Juist bij de nieuwe situatie met hogere stroomsnelheden, hoger dan de ontwerpsnelheid van 4 m/s en tevens een omgekeerde stroomrichting, is niet op voorhand te concluderen dat de schuiven niet gaan trillen. Het in trilling geraken van schuiven is een subtiel spel van stroomsnelheden, de constructievorm en de constructiemassa. Onderzoek van het trilgedrag van de schuiven, vergt een diepgaander studie dan bedoeld in de quick scan gedempt getij.

Gedeeltelijk geheven schuiven

Om op het Lauwersmeer een meer natuurlijk getij te creëren, kunnen tijdens het inlaten van zeewater de schuiven gedeeltelijk geheven worden. Daarbij is de doorstroomhoogte beperkt tot minder dan 4 m. In die situatie hangt de onderzijde van de schuiven in het snel stromende water. De snelheden kunnen oplopen tot 6 m/s, ook bij gedeeltelijk geheven schuiven aangezien de stroomsnelheid door de kokers door het verval wordt bepaald. De kans op het in trilling geraken van de schuiven zal toenemen. De oorzaken daarvoor zijn:

- De stroomrichting onder de schuiven is naar het Lauwersmeer gericht en is dus tegengesteld aan de normale (ontwerp) stromingsrichting naar de Waddenzee toe.
- De snelheden onder de schuif zijn veel hoger dan de ontwerpsnelheid van 4 m/s. Gezien de gevoeligheid van de eigenfrequentie van constructies voor de stroomsnelheid is niet zonder meer aan te nemen dat de schuiven niet zullen gaan trillen.

Beide oorzaken zijn niet binnen de quick scan gedempt getij onderzocht.

Weigerende schuiven

Tijdens het inlaten en spuien van water kunnen één of meerder schuiven weigeren te openen of te sluiten. De schuiven zijn per spuikoker dubbel uitgevoerd en de kans op het weigeren van beide schuiven in één spuikoker is zeer gering. Toch worden de gevolgen van het weigeren van schuiven hier wel genoemd aangezien de optreden stroomsnelheden in een voorkomend geval zeer hoog zijn (tot 6 m/s) met als gevolg een zeer hydraulische zware belasting van de constructie, kans op trillingen en hoge belasting van de bodembescherming.

Tijdens het weigeren van een schuif ontstaat tevens een asymmetrisch stroombeeld waardoor de bodembescherming nog sterker wordt belast dan onder normale omstandigheden. In Van Riessen (1957) wordt daarvan melding gemaakt.

Wat met name bij het weigeren een gevaar is, is het toenemen van de waterstand op het Lauwersmeer boven het maximale peil van NAP-0,53 m. Blijven één of meer schuiven open staan, dan zal de waterstand op het Lauwersmeer de waterstand op de Waddenzee gedempt volgen. De vloedpeilen op de Waddenzee liggen altijd boven NAP-0,53 m, zie tabel 4-1, zodat het meerpeil meer dan toegestaan kan toenemen.

5 Samenvatting en aanbevelingen

5.1 Samenvatting effecten Lauwersmeer

Aanslibbing

- In de periode na afsluiting van de Lauwerszee tussen 1969 en 2005 zijn de kleinere geulen, zie figuur 3-1, zoals de (i) Raskes, (ii) het Dokkumerdiep en de (iii) Zoutkamperril aangeslibd als gevolg van het spuien van zoetwater vanuit de Friese en Groningse boezem. In die geulen zijn de verondiepingen over de periode 1978-2005 respectievelijk (i) 0,4 m tot 0,9 m, (ii) 1,5 m tot 2,5 m en (iii) 0,5 m tot 1,5 m.
- In de nieuwe situatie zal slib, dat vanuit de Waddenzee wordt aangevoerd, vooral in de grote diepe geulen (zie figuur 3-1) worden afgezet. Minder sterke afzettingen zullen in de ondiepere gedeelten van het meer voorkomen. In de nieuwe toestand met een getij op het Lauwersmeer zullen de diepere geulen ongeveer 0,20 tot 0,45 m per jaar aanslibben. Of te wel een 10 m diepe geul zal reduceren tot een diepte van 5 m in een periode van 25 tot 11 jaar. In de ondiepe delen van de geulen en op de platen, tussen laag- en hoogwater, is de aanslibbing veel minder.
- De verwachte zeespiegelstijging in een periode van 25 jaar tot 2030 is 0,15 m en in een periode van 95 jaar tot 2100 is dat 0,6 m. De verwachte aanslibbing in de diepe geulen is groter, maar in de ondiepe gedeelten en op de platen zal de aanslibbing minder zijn en de zeespiegelstijging dus niet kunnen bijhouden.
- Als de lage delen van de voormalige platen door een verhoogd meerpeil vaker en langer onderwater komen te staan, dan heeft dat gevolgen voor de ecologie van de platen. Als zich kwelders hebben gevormd dan zullen die door hogere waterstanden (vergeleken met de huidige situatie) worden aangetast en daarmee de ecologie van de kwelders.

Onzekerheden:

- De aanslibbing van ondiepe gedeelten van de geulen en op platen hangt sterk af van het getij op het meer en het optreden van windgolven. Door deze effecten zal de aanslibbing worden aangetast en losgewoeld slib zal naar diepere delen kunnen worden verplaatst.
- Onzeker is of het bodemleven zich op de slibafzettingen zal ontwikkelen. De stevigheid van de afzettingen op de bodem is zeer gering (300 kg/m^3 droge stof) en nabij de bodem is het water voornamelijk zout gedurende het gehele jaar.

Waterstanden

- De waterstanden op het Lauwersmeer mogen in de estuarine situatie variëren tussen NAP-0,53 m en NAP-1,03 m, of te wel de getijslag is 0,5 m. Met een gemiddelde zeespiegel op NAP-0,0 m en een gemiddeld getij tussen NAP+1,02 m en NAP-1,29 m, is de getijslag op de Waddenzee 2,31 m. Door het tijdig sluiten van de Lauwerssluizen wordt de getijslag op het meer beperkt tot 0,5 m.
- Door de verwachte klimaateffecten zal de zeespiegel in de komende eeuw gaan stijgen. De verwachting is dat in 2030 het gemiddelde zeeniveau 0,15 m hoger is dan nu en in 2100 ligt dat niveau 0,6 m hoger. Voor het getij op het Lauwersmeer heeft een zeespiegelstijging van 0,15 m nog geringe gevolgen. De getijslag wordt in geringe mate beperkt van 0,5 m tot 0,42 m. Met een zeespiegelrijzing van 0,6 m is de getijslag op het Lauwersmeer in 2100 gereduceerd tot 0,12 m in plaats van 0,50 m, mits het meerpeil niet meestijgt.

- Als de waterstanden op het Lauwersmeer meegroeien met de zeespiegel, kan in principe het getij van 0,5 m op het meer blijven bestaan. De Lauwerssluizen hebben voldoende capaciteit om het getij op het meer mogelijk te maken in die situatie, al zal de constructie meer onderwater staan dan in de huidige situatie. Een belangrijker probleem is het niveau van de dijken rond het Lauwersmeer. Bezien moet worden of het dijkniveau voor een gemiddelde peilstijging van 0,15 m tot 0,60 m geschikt is.

Stroomsnelheden en zout-zoetgradiënt

- De stroomsnelheden in de diepe geulen van het Lauwersmeer zullen met een getij oplopen tot 0,2 à 0,4 m/s tijdens de instroming van zeewater en tot 0,15 à 0,2 m/s tijdens het spuien.
- In de winterperiode, met geregeld grote lozingen van zoet boezemwater op met Lauwersmeer, zal in het meer een sterk gelaagde situatie ontstaan. Een min of meer zoete laag ligt op een zoute onderlaag. In de zomerperiode als de lozingen vanuit de Friese en Groningse boezems gering zijn, zal het Lauwersmeer vrijwel geheel zout zijn. De zoutindringing in het Lauwersmeer hangt dus af van de grootte van de zoetwater lozingen vanuit de Friese en Groningse boezem. In de onderstaande tabel is de chloriniteit van het water in het meer op verschillende locaties opgenomen. Zonder lozing van zoet water is het gehele meer zout en bij langdurige (extreme) zoetwaterlozingen (100 m³/s) neemt de chloriniteit van het water af in zuidelijke richting en is het water aan de zuidzijde van het meer, bij de lozingspunten, vrijwel zoet.

Locatie	geen lozing van zoet water	extreme lozing van zoet water
	chloriniteit [g/l]	chloriniteit [g/l]
Waddenzee	18	18
Spuisluis Lauwersoog (binnen)	18	13
Oostmahorn	18	11
Ezumazijl	18	8
Mond Dokkumerdiep en Zoutkamperril	18	0

Onzekerheden:

- De zout-zoetgradiënt wordt in zeer sterke mate bepaald door de hoeveelheid geloosd zoetwater vanuit de omliggende boezems en de duur van die lozingen. Een gradiënt kan alleen bestaan als geregeld zoetwater wordt geloosd. Incidentele zoetwaterlozingen zullen slechts tijdelijk een gradiënt laten ontstaan, die na enkele getijden weer is verdwenen.

Platen en kwelders

- De randen van voormalige platen zullen door het getij op het Lauwersmeer worden aangevallen net zoals dat nu al door kleine windgolven gebeurt. Tevens zijn de waterstanden door het getij hoger dan in de huidige situatie waardoor de opgewekte windgolven hoger kunnen zijn (meer strijklengte).
- Langs de geulen kunnen met de beperkte getijslag kwelderranden ontstaan, maar de kwelderzones zullen smal blijven.

Kwelstromen

- Een gedempt getij op het Lauwersmeer zal meer zoutwater in het meer brengen. Op de platen in het meer zal door neerslag, zoetwaterbellen kunnen ontstaan (zoet grondwater drijft op zout grondwater). Door de hogere waterstanden op het Lauwersmeer en het zoute water van het meer zal de kwelstroom vanuit het Lauwersmeer naar de omringende

gebieden met lagere streefpeilen toenemen en zout(er) worden. In welke mate precies is niet af te leiden op basis van de quick scan. Vanwege de zoute kwelbelasting vanuit zee wordt verwacht dat een vergrootte zoute kwelstroom vanuit het Lauwersmeer alleen eventueel merkbaar zal zijn in een relatief smalle zone direct rondom het Lauwersmeer.

Onzekerheden:

- De huidige situatie van de kwelstromen en zoutindringing in het Lauwersmeer en omliggende gebieden is onvoldoende kwantitatief bekend. Het is van belang de veranderingen in de kwelstromen in het gebied meer gedetailleerd te kwantificeren als een gedempt getij op het Lauwersmeer wordt ingesteld.

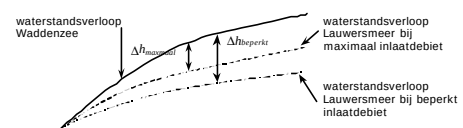
5.2 Samenvatting effecten Lauwerssluizen

Stroomsnelheden

- Voor het lozen van water vanuit het Lauwersmeer voldoen de Lauwerssluizen. Voor het inlaten van zeewater voldoen de sluizen in de huidige situatie hoogst waarschijnlijk niet. De sluizen zijn ontworpen voor stroomsnelheden tot circa 4 m/s. Bij het inlaten van zeewater kunnen stroomsnelheden optreden tot 6 m/s. De bodembescherming aan de meerzijde van de Lauwerssluizen zal waarschijnlijk niet voor deze stroomsnelheden ontworpen zijn.
- Beperken van de instroming van zeewater kan door het beperken van het aantal in te zetten spuicomplexen, het gedeeltelijk heffen van de schuiven en het inlaten bij een beperkt verval. In de eerste twee gevallen nemen de stroomsnelheden toe tot ver boven de 4 m/s. Met het alleen inlaten bij een beperkt verval blijven de stroomsnelheden beperkt tot 4 m/s, maar de getijslag op het Lauwersmeer is dan ook beperkt, 0,45 m in plaats van 0,5 m.
- Opgemerkt wordt dat ongeacht de gekozen strategie van het beheer van de schuiven zich een situatie met een weigerende schuif kan voordoen. In die situatie kunnen door het grote verval over de constructie snelheden van 6 m/s of meer ontstaan. Mocht de bodembescherming worden ontworpen voor een situatie met weigerende schuiven, dan is het ook mogelijk om met bijvoorbeeld één spuicomplex water in te laten aangezien de nieuwe bodembescherming dan ook voor die stromingssituatie stabiel is.
- De capaciteit van de sluizen voor het laten ontstaan van een getij met een getijslag van 0,5 m is voldoende. Een mogelijk probleem is de vorm van het getij op het meer dat niet lijkt op het zeegetij. De waterstanden op het meer nemen in 3 à 4 uur toe met 0,5 m, zijn dan 5 à 6 uur constant en nemen daarna in 3 à 4 uur weer af. Is een meer natuurlijk getij gewenst dan kan dat niet worden gerealiseerd door het beperken van het inlaatdebiet. Beperken van het debiet door de sluizen heeft de volgende nadelige gevolgen:

- De stroomsnelheden nemen nog meer toe. Dit is een gevolg van het langzamer toenemen van de waterstand op het meer in vergelijking met de zeewaterstand. Daardoor neemt het verval over de sluizen toe en een direct gevolg daarvan is hogere stroomsnelheden. De hoogte van de stroomsnelheid (u) door de sluizen is namelijk alleen afhankelijk van de wortel uit het verval ($\sqrt{\Delta h}$), dus $u \sim \sqrt{\Delta h}$. Het debiet door de sluizen kan worden beperkt door het reduceren van de doorstroomopening (minder spuicomplexen of gedeeltelijk geheven schuiven).

Bij het beperken van het debiet tijdens het inlaten van zeewater heeft indirect



gevolgen voor de optredende stroomsnelheden in de constructie. Het Lauwersmeer stroomt daardoor minder snel vol met als gevolg een sterker toenemend verval over de constructie dan in het geval met volledig geopende sluizen. De binnenwaterstand stijgt minder snel waardoor het waterstandsverschil tussen de Waddenzee en het meer groter is en dus hogere stroomsnelheden door de constructie.

- Het beperken van de instroomopening tijdens onderhoud van één of meer spuicomplexen kan de getijslag op het meer beperken. Daardoor wordt de gewenste getijslag van 0,5 m tijdelijk niet meer gehaald.
- Beperken van het debiet door de sluizen kan door het inzetten van minder spuicomplexen, bijvoorbeeld 1 in plaats van 3. Dit levert hogere stroomsnelheden op en wel een getijslag van 0,5 m voor een gemiddeld getij. Tijdens doottijd is de getijslag beperkt tot 0,4 m. Met het gedeeltelijk heffen van de schuiven kan het debiet ook worden beperkt, maar ook dan treden hoge stroomsnelheden op.

Bodembescherming

- Voor het lozen van water vanuit het Lauwersmeer voldoen de Lauwerssluizen. Voor het inlaten van zeewater voldoen de sluizen in de huidige situatie hoogst waarschijnlijk niet. Een groot probleem is de hoogte van de stroomsnelheden in de constructie en boven de bodembescherming. De sluizen zijn ontworpen voor stroomsnelheden tot circa 4 m/s. Bij het inlaten van zeewater kunnen stroomsnelheden optreden tot 6 m/s, dat is 50% hoger dan de ontwerpsnelheid van de bodembescherming.
De bodembescherming aan de meerzijde van de Lauwerssluizen zal moeten worden gecontroleerd op stabiliteit onder die stromingsbelasting en waarschijnlijk zal een bodembescherming aan de meerzijde moeten worden aangelegd over een afstand van 100 m tot 200 m.

Onzekerheden:

- De stroomsnelheden tijdens het inlaten van zeewater zijn veel hoger dan de ontwerp stroomsnelheden van de Lauwerssluizen. Dit heeft gevolgen voor de hydraulische belastingen van de spuikokers van de sluizen en de bodembescherming die voor en achter de sluizen aanwezig is. Dat aan de meerzijde een extra bodembescherming noodzakelijk is, is zeker, maar over welke afstand en hoe zwaar zal in een gedetailleerde studie moeten worden bepaald. Een indicatie voor de zwaarte van de bodembescherming is dat de diameter van de stortsteen afhangt van het kwadraat van de stroomsnelheid. Als de snelheden van 4 m/s toenemen tot 6 m/s is de factor 2,25 hoger, of te wel vergeleken met de aanwezige stortsteen, zijn stenen met een ruim tweemaal grotere diameter nodig.

Trillingen

- In alle situaties tijdens het inlaten van zeewater is er een kans dat de schuiven, tijdens het openen en sluiten of in de situatie met gedeeltelijk geheven schuiven, in trilling raken. De schuiven kunnen door het snel stromende water (snelheden groter dan 4 m/s tot zelfs 6 m/s) onder de schuiven door in de eigenfrequentie komen en gaan trillen. Daarmee kan het op en neer bewegen van de schuiven sterk worden beperkt (vastzitten) en op termijn kunnen de schuiven door vermoeiing van het staal beschadigd raken.

5.3 Aanbevelingen

- De huidige bodembescherming met name aan de meerzijde van de Lauwerssluizen moet worden gecontroleerd op stabiliteit in geval van hoge optredende stroomsnelheden tot 6 m/s, 50% hoger dan de ontwerpsnelheden van 4 m/s. De bouwtekeningen en rapporten van (schaalmodel)onderzoeken kunnen daarbij een waardevolle steun zijn.
- Het trilgedrag van de schuiven met name tijdens een situatie waarbij de stroming is gericht naar het Lauwersmeer moet worden onderzocht, teneinde vast te stellen of er kans bestaat op het in de eigenfrequentie raken van de schuiven tijdens het openen, sluiten of gedeeltelijk heffen van de schuiven. Het trilgedrag van de schuiven zal in een grondige studie moeten worden onderzocht.
- De Lauwerssluizen kunnen het zoute milieu waarin zij zich bevinden weerstaan. Maar in de situatie met getij is ook aan de binnenzijde van de constructie vrijwel continu zout water aanwezig. In hoeverre de betonconstructie en stalen schuiven in de nieuwe situatie sneller of vaker last hebben van het zout, is niet te zeggen. Dit zal wel moeten worden onderzocht.
- Hogere gemiddelde waterstanden in het Lauwersmeer hebben tot gevolg dat het wateroppervlak zal toenemen. Daarmee is de kans op hogere windgolven op het meer wat groter met als het gevolg een mogelijk sterkere golfbelasting van de ondiepe delen in het meer, oevers en dijken. Dit zal moeten worden onderzocht.
- Onduidelijk is of het Lauwersmeer nauwelijks een rol heeft als zoetwaterbuffer door de waterkwaliteit (zoet tot brak water aan het oppervlak en onderin de geulen zout) of door de geringe vraag naar zoetwater vanuit het omringende gebied. Een studie daarnaar zou die rol duidelijker moeten maken. Daarnaast wordt aanbevolen de effecten van een vergrootte zoute kwelstroom vanuit het Lauwersmeer op de omgeving te kwantificeren.

6 Referenties

Eysink W.D., Morfologie van de Waddenzee, Gevolgen van zand- en schelpenwinning. WL | Delft Hydraulics. Rapport R1336. Mei 1979.

Nortier I.W., Van der Velde H. Hydraulica voor Waterbouwkundigen. Technische Uitgeverij Stam, Culemborg. 1971.

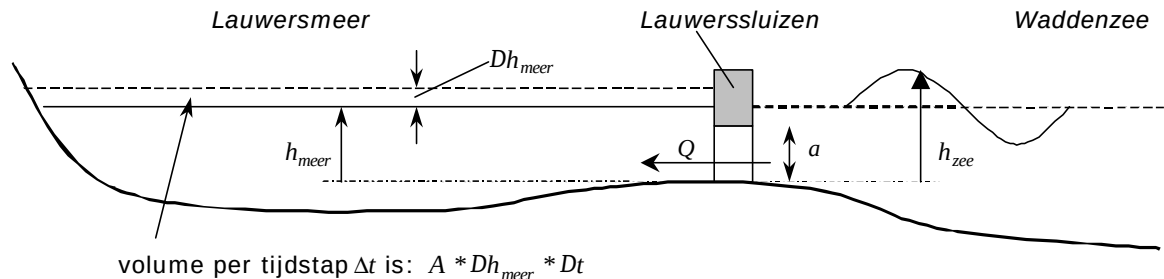
Riessen G. van. Uitwateringssluizen afsluiting Lauwerszee. Verslag modelonderzoek. Waterloopkundig Laboratorium, Delft. Rapportnr. M519, Juni 1957.

Schultz E.A., H.B. Simmons., Fresh water-salt water density currents, a major cause of siltation in estuaries. U.S. Army Committee on Tidal Hydraulics. Techn. Bull. No. 2. April 1957.

Bijlage

Bijlage A: Theorie hydraulica Lauwerssluizen

De vergelijking waarmee de waterstandsvariaties in de Lauwerszee kan worden berekend, ten gevolge van het inlaten van zeewater en vervolgens spuien via de Lauwerssluizen, is in deze bijlage afgeleid. De belangrijkste hydraulische grootheden zijn in figuur A-1 weergegeven.



Figuur A-1 Definitie hydraulische grootheden

Het debiet door de sluizen is positief gedefinieerd als het water vanuit de Waddenzee naar het Lauwersmeer stroomt. Het debiet is te berekenen als (Nortier en Van der Velde, 1971):

$$Q = m \cdot B \cdot a \cdot \sqrt{2g \cdot (h_{zee} - h_{meer})} , \quad (A-1)$$

waarin:

- Q = debiet door de spuikokers van de sluizen [m^3/s],
- m = afvoercoëfficiënt van de sluizen [-],
- B = breedte van de (in gebruik zijnde) spuikokers [m],
- a = hoogte van de spuikokers [m],
- g = zwaartekrachtsversnelling; $9,81 \text{ m/s}^2$,
- h_{meer} = waterstand op het Lauwersmeer (varieert in de tijd) [m+NAP] ,
- h_{zee} = waterstand op de Waddenzee (varieert in de tijd) [m+NAP].

Als gedurende enige tijd water naar het Lauwersmeer stroomt, stijgt de waterstand op het meer. Beschouwd per eenheid van tijd is dat uit te drukken als:

$$A \cdot [\Delta h_{meer}] = Q \cdot \Delta t , \quad (A-2)$$

waarin A het horizontaal natte oppervlak van het Lauwersmeer is. In principe varieert het natte oppervlak van het Lauwersmeer met de waterstand, bij stijgende waterstand neemt het oppervlak toe. Aangezien de getijslag tussen de toegestane laagste en hoogste peilen op het meer maar 0,5 m is, varieert het natte horizontale oppervlak slechts weinig. In de beschouwing is uitgegaan van een constant oppervlak. De waterstand in het Lauwersmeer, als gevolg van het instromen van zeewater, is te berekenen als:

$$\Delta h_{meer} = \frac{m \cdot B \cdot a}{A} \sqrt{2g \cdot [h_{zee} - h_{meer}]} \cdot \Delta t . \quad (A-3)$$

Voor spuien geldt vergelijking (A-3) ook, waarbij de absolute waarde van $h_{zee} - h_{meer}$ moet worden genomen en de waterstand op het meer per tijdstap Δt daalt met Δh_{meer} . In de berekening worden h_{zee} en h_{meer} per tijdstap aangepast aan de nieuwe waarden.