Opdrachtgever:

DG Rijkswaterstaat, RIZA

De invloed van warmtelozingen op de watertemperatuur van de Rijn

Rapport

augustus 2006

Q4214.00

Opdrachtgever

DG Rijkswaterstaat, RIZA

De invloed van warmtelozingen op de watertemperatuur van de Rijn

Joost Icke, Reinaldo Peñailillo en Martine Rutten

Rapport

augustus 2006

Inhoud

Samenvatting ..... **ii**

1 **Inleiding** ..... **1—1**

1.1 Aanleiding ..... 1—1

1.2 Doelstelling van het onderzoek ..... 1—1

1.3 Het studiegebied ..... 1—2

1.4 Aanpak ..... 1—3

2 Methodiek ..... **2—1**

2.1 Scenario's ..... 2—1

2.2 Het modelinstrument ..... 2—2

2.2.1 Schematisatie ..... 2—2
2.2.2 Waterbeweging ..... 2—4
2.2.3 Temperatuurmodel ..... 2—5

2.3 Invoergegevens ..... 2—9

2.3.1 Waterbeweging ..... 2—9
2.3.2 De watertemperatuur van de zijrivieren ..... 2—10
2.3.3 Warmtelozingen ..... 2—11
2.3.4 Meteorologie ..... 2—12

3 Modelkalibratie ..... **3—1**

3.1 Inleiding ..... 3—1

3.2 Kalibratie ..... 3—1

3.2.1 Aanpak ..... 3—2

3.3 Resultaat van de modelkalibratie ..... 3—3

4 Resultaten van de gevoeligheidanalyse ..... **4—1**

4.1 Inleiding ..... 4—1

4.2 De effecten van koelwaterlozingen ..... 4—1

4.2.1 Scenario 0: het referentiescenario ..... 4—1
4.2.2 Scenario 1: Zomer 2003 met lozingsrestricties. ..... 4—2
4.2.3 Scenario 2: Halveren lozingen traject Bodenmeer-Mannheim (Zuid-Duitsland) ..... 4—5
4.2.4 Scenario 3: Variatie lozingen traject Mannheim-Koblenz (Midden- Duitsland) ..... 4—7
4.2.5 Scenario 4: Halveren lozingen traject Koblenz-Noordzee ..... 4—12

4.3 Variatie in meteorologie en hydrologie ..... 4—13

4.3.1 Scenario 5: verhoging luchttemperatuur met 1°C ..... 4—13
4.3.2 Scenario 6: Variatie afvoer ..... 4—13

4.4 Bespreking van de simulatieresultaten ..... 4—16
5 Conclusies en aanbevelingen ..... 5—1
5.1 Conclusies ..... 5—1
5.2 Aanbevelingen ..... 5—2
6 Literatuur ..... 6—1

Bijlagen:

A Warmtelozingen
B Windfunctie voor verdamping F(W_a)
C Beschouwing van de verwaarloosde termen in de warmtebalans

Samenvatting

Inleiding

De watertemperatuur van de Rijn wordt beïnvloed door de meteorologische condities, de watertemperatuur en afvoer van de instromende zijrivieren en het grondwater, en door lozingen van koelwater. De afgelopen jaren is de problematiek van koelwaterlozingen en de hoge watertemperatuur van de Rijn regelmatig in de actualiteit geweest. De koelwaterproblematiek is een grensoverschrijdend vraagstuk in het stroomgebied van de Rijn. Als het rivierwater bovenstrooms teveel wordt opgewarmd dan beperkt dit de mogelijkheden voor koelwaterlozingen door de benedenstrooms gelegen industrie- en energiesector. Binnen de werkgroep Waterkwaliteit/Emissies van de Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn (ICBR) wordt momenteel de informatie over de warmtelozingen in het stroomgebied van de Rijn geactualiseerd. Nederland heeft aangeboden om op basis van deze informatie indicatieve berekeningen te maken van de invloed van de belangrijkste koelwaterlozingen op de temperatuur van het Rijnwater.
In 2005 is een Quick scan (WL, 2005) uitgevoerd naar de effecten van koelwaterlozingen op de watertemperatuur van de Rijn. Uit deze Quick scan bleek dat voor een warme en droge zomer zoals 2003 het effect van vergunde koelwaterlozingen op de watertemperatuur bij Lobith 2,2ºC bedraagt. Het vervolg op deze Quick scan is een gevoeligheidsanalyse waarvan de belangrijkste resultaten in deze samenvatting worden gepresenteerd.

Doelstelling van het onderzoek

De doelstelling van het onderzoek is het inzichtelijk maken van de natuurlijke opwarming van het Rijnwater onder invloed van de meteorologische condities en het kwantificeren van de effecten van koelwaterlozingen van bedrijven in Zwitserland, Duitsland, Frankrijk en Nederland op de watertemperatuur van de Rijn door middel van modelsimulaties (scenario's) voor de bijzonder droge en warme zomer van het jaar 2003.

Methode

De invloeden op de watertemperatuur van de Rijn worden berekend met een modelinstrument, dat de Rijn met enkele grote zijrivieren vanaf de Bodenmeer tot de Noordzee omvat. Dit modelinstrument bestaat uit twee gekoppelde delen: een model voor het riviertraject vanaf Bodenmeer tot Lobith, inclusief de zijrivieren Aare, Neckar, Main en Moezel (gebaseerd op het Rijn Alarm Model) en het Landelijk temperatuurmodel (SOBEK) voor het riviertraject van Lobith tot de Noordzee en omvat alle Rijntakken. Voor deze studie wordt voor het Nederlandse gedeelte alleen de tak van Lobith naar Maassluis bekeken. De kwaliteit van het modelinstrument is getoetst aan de hand van meetgegevens over de watertemperatuur van de Rijn in 2003 (juni – september). Bij de kalibratie van het model is de afkoeling als gevolg van instromend (koeler) grondwater en warmteoverdracht naar de bodem verwerkt in de uitwisseling met de atmosfeer. De berekening van de watertemperatuur voor de zomer van 2003 is het referentiescenario. Vervolgens zijn zes verschillende scenario's (zie tabel 1) doorgerekend met veranderingen in de koelwaterlozingen. Ook is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de effecten van veranderingen in luchttemperatuur en afvoer op de uitkomsten van de modelberekeningen.

De resultaten zijn voor een aantal locaties (Karlsruhe, Mainz, Lobith en Maassluis) bekeken Figuur 1-1.

Invoer data

Afvoer
Als basis voor de berekeningen is de afvoer van Rijn in de droge en warme zomer van 2003 gehanteerd. Het temperatuurmodel van het Rijn Alarm Model rekent met maandelijks constante debieten en waterstanden. Daarbij is gekozen voor de afvoer die overeenkomt met de 90% laagste waarde van de dagafvoeren bij Lobith gedurende de betreffende maand. Het Landelijk Temperatuurmodel voor Nederland rekent met in de tijd variërende debieten.

Watertemperatuur zijrivieren
De watertemperatuur van de zijrivieren is waar mogelijk gebaseerd op meetgegevens. Deze gegevens zijn afkomstig van de internetpagina's van DK Rhein, het Hydrologische Jaarboek van 2003 in Zwitserland en een Franse website over de Europese Kaderrichtlijn Water 2015 Rijn-Maas. Voor zijrivieren waarvoor geen gegevens beschikbaar waren, is aangenomen dat de watertemperatuur overeenkomt met die van de meest dichtbijzijnde zijrivier, waarvan wel gegevens beschikbaar waren.

Koelwaterlozingen
De in het model gehanteerde warmtelozingen in het Rijnstroomgebied zijn afkomstig van de inventarisatie van de vergunde lozingen als uitgevoerd door de werkgroep Waterkwaliteit/Emissies van de ICBR (ICBR, 2004; DBRM,2005). De Nederlandse lozingen zijn geïnventariseerd in 2006 (WL | Delft Hydraulics, in voorbereiding). Als gevolg van lozingrestricties in de zomer van 2003 zijn de werkelijk geloosde vrachten lager dan de vergunde lozingen. Gebaseerd op persberichten is in deze studie voor koelwaterlozingen in Zuid- en Midden-Duitsland een lozingsrestrictie van 20% aangenomen en benedenstrooms van Koblenz een lozingsrestrictie van 50%. Deze lozingsrestricties zijn alleen toegepast voor scenario 1 voor de maand augustus. Voor Nederland is van diverse locaties de werkelijk geloosde warmtevracht bekend en met deze gegevens is gerekend in het Landelijk Temperatuurmodel.

Meteorologie
Het temperatuurmodel gebruikt luchttemperatuur, luchtdruk, relatieve luchtvochtigheid, windsnelheid, zonuren en globale straling als input om de achtergrondtemperatuur van het rivierwater te berekenen. Met uitzondering van globale straling zijn de gegevens afkomstig van de Deutsche Wetterdienst (DWD) en het Koninklijke Nederlandse Meteorologische Instituut (KNMI). De globale straling is via een empirische vergelijking berekend. Voor deze studie zijn meer gegevens beschikbaar dan voor de Quick scan, welke invloed hebben op de resultaten.

Resultaten en discussie

De resultaten van de scenarioberekeningen zijn samengevat in Tabel 1, waarbij de effecten op de watertemperatuur worden gepresenteerd ten opzichte van het referentiescenario. In het referentiescenario (zomer 2003, **zonder** lozingrestricties) zijn de effecten van koelwaterlozingen op de watertemperatuur significant: bij Karlsruhe varieert de temperatuurverhoging door koelwaterlozingen 1,3 - 2,4 ºC en bij Mainz benedenstrooms van de grootste koelwaterlozingen 3,7 - 6,2 ºC. Bij Lobith is de range van verhoging kleiner: 2,4 - 3,5 ºC. Deze range ligt hoger dan de resultaten van de Quick scan. Dit heeft te maken met verandering van gegevensinput, zoals globale straling en windsnelheid. Verder benedenstrooms bij Maassluis varieert de temperatuurverhoging slechts tussen de 0,9 - 1,5 ºC. De minimale waarden voor alle locaties worden in september bereikt. De maximale waarden worden voor alle locaties in augustus bereikt.

Tabel 1 Scenario's voor de gevoeligheidsanalyse: Verandering van de riviertemperatuur ten opzichte van het referentiescenario op vier locaties in het Rijnstroomgebied. De scenario's in rood betekenen een verhoging in de riviertemperatuur, terwijl de rest een verlaging tonen.

	Scenario	**Variatie in de riviertemperatuur (ºC) ten opzicht van het referentiescenario (ΔT juni-september)**			
		Karlsruhe	*Mainz*	*Lobith*	*Maassluis*
0	Referentieberekening zomer 2003	-	-	-	
1	Zomer 2003 met lozingrestricties*	< 1	< 1,8	< 0,9	< 0,3
2	Halveren lozingen Bodenmeer-Mannheim	0,6 - 1,2	0,9 –1,5	0,4 - 0,5	< 0,2
3a	Halveren lozing Mannheim-Koblenz	-	0,9 -1,6	0,4 - 0,5	< 0,2
3b	Verwijderen lozing Mannheim-Koblenz	-	1,8 - 3,2	0,8 - 1,1	0,2 - 0,4
3c	Toename lozing Mannheim-Koblenz met 30%	-	0,5 - 0,9	0,2 - 0,3	< 0,1
4	Halveren lozingen traject Koblenz-Noordzee	-	-	0,4 - 0,6	< 0,2
5	Verhoging van de luchttemperatuur met 1ºC	0,4 - 0,6	0,5 - 0,7	0,5 - 0,7	0,5 - 0,6
6a	Effect van een verlaagde afvoer tot minimale dagafvoer per maand	< 0,4	0,5 - 1	< 0,3	-
6b	Effect van een verhoogde afvoer tot maximale dagafvoer per maand	< 0,2	0,3 - 0,5	< 0,2	-

**Effect op de riviertemperatuur in augustus.*

Scenario 1:

Lozingrestricties zoals in scenario 1 hebben een merkbare verlaging van de watertemperatuur van de Rijn tot gevolg. De hoogste temperatuurverlaging ten opzichte van het referentiescenario is te zien bij Mainz (1,8 ºC), maar ook bij Karlsruhe (<1 ºC) en Lobith (<0.9 ºC) zijn de effecten zichtbaar. Bij Maassluis is dit effect kleiner (<0,3 ºC), omdat in het Nederlandse deel van het model de lozingsrestricties al in de referentiescenario zijn opgenomen. In de figuren in Hoofdstuk 4 zijn de effecten van lozingrestricties te zien bij Karlsruhe, Mainz en Lobith t.o.v. het referentiescenario.

Scenario 2 en 3:
Het traject Bodenmeer-Mannheim kent de grootste totale warmtevracht (ca. 14.000 MW), die over het hele traject is verspreid. Het traject Mannheim-Koblenz heeft een vergelijkbaar warmtevracht (ca. 12.000 MW). De grootte en distributie van de warmtevracht is terug te vinden in de figuur in bijlage A. Veranderingen in de hoeveelheid geloosd koelwater op het traject Bodenmeer-Koblenz hebben een merkbaar effect op de watertemperatuur (scenario 2 en 3). Op het traject Worms-Düsseldorf is dit effect het grootst. Benedenstrooms van Lobith neemt dit effect af en bij Maassluis is het effect nog nauwelijks merkbaar, behalve in het scenario waarin de lozingen worden verwijderd (scenario 3b). Het effect van de verspreiding van de warmte hangt af van de grootte in warmtelozingen en de distributie van de lozingspunten op het traject. Dit verklaart de gelijkenis in de temperatuurverhoging in scenario 2 en in scenario 3a.

De resultaten van deze twee scenario's mogen niet bij elkaar worden opgeteld. Dus het effect bij Lobith van het halveren van de lozingen op het hele traject Bodenmeer-Koblenz is **niet** gelijk aan de som van de temperatuurverlaging van scenario 2 en 3a bij Lobith. Bij de afkoelingsprocessen spelen de warmteverdunning en de afkoeling door de wind een belangrijke rol. Deze componenten zijn niet constant over het gebied. Benedenstrooms van de lozingspunten neemt de watertemperatuur heel geleidelijk af als gevolg van warmteuitwisseling met de atmosfeer.

De resultaten van scenario 3a (halvering lozing) en scenario 3b verschillen een factor twee van elkaar. Dit geldt voor het gehele traject Mainz – Maassluis en suggereert een lineaire relatie tussen de veranderingen in de lozingen op dit traject en het effect in de riviertemperatuur ten opzichte van het referentiescenario. Het effect van een toename van de lozingen in dit traject met 30% (scenario 3c) betekent een verhoging in de temperatuur in vergelijking met het referentiescenario. De maximale verhoging in dit scenario betreft 0,9 ºC bij Mainz en 0,3 ºC bij Lobith.

Scenario 4:
Het halveren van de lozingen op het traject Koblenz-Noordzee heeft zoals verwacht een merkbaar effect op de riviertemperatuur op het traject Koblenz-Dusseldorf. Ook bij Lobith kan een duidelijk effect gezien worden. Vanaf hier neemt dit effect af en bij Maassluis is het verschil in de riviertemperatuur met het referentiescenario kleiner dan 0,2 ºC.

Scenario 5:
De verhoging van de luchttemperatuur met 1 ºC leidt tot een verhoging van de riviertemperatuur van 0,4 tot 0,7 ºC ten opzichte van het referentiescenario, gelijkmatig verdeeld over het gehele riviertraject. Verhoging van de luchttemperatuur heeft alleen een effect op de achtergrondtemperatuur en niet op de temperatuurverhoging als gevolg van koelwaterlozingen.

Scenario 6:
Het effect van variaties in afvoer ten opzichte van het referentiescenario is kleiner dan verwacht (<0,3 ºC bij Lobith en < 0,4 ºC bij Karlsruhe), behalve wanneer de meetlocatie heel dicht bij de lozingen ligt, zoals bijvoorbeeld bij Mainz. In dit laatste geval is het temperatuurverschil groter ten opzicht van het referentiescenario.

Conclusies en aanbevelingen

De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn:

- Het verminderen van de geloosde warmtevracht heeft een verlagend effect op de watertemperatuur bij Lobith. De opgelegde lozingsrestricties tijdens warme en droge perioden hebben zeker een effect op de watertemperaturen elders en kunnen daardoor extra ruimte bieden om calamiteiten in het stroomgebied te voorkomen. Een significant effect van veranderingen in lozingen is vooral merkbaar tot circa honderd kilometers van de lozingen. Maar ook tot 300-350 km is er nog sprake van enig effect.
- Benedenstrooms van de lozingspunten (vanaf Worms) neemt de watertemperatuur heel geleidelijk af als gevolg van warmteuitwisseling met de atmosfeer en toename van het debiet. Op dit traject wordt nog wel warmte geloosd, maar blijkbaar zorgen die lozingen niet voor een toename van de watertemperatuur t.o.v. de watertemperatuur bij Worms.
- De bijdrage van koelwaterlozingen (zonder restricties) aan de opwarming van de rivier is significant en varieert afhankelijk van de locatie en tijd tussen de 1 en 6 ºC.
- Het temperatuurverloop in de Rijn kent door de koelwaterlozingen op een aantal punten temperatuursprongen. Op sommige locaties lijken deze temperatuursprongen groter dan 1,5 ºC. Dergelijke temperatuursprongen kunnen problemen opleveren voor zalmachtigen.
- Temperatuursverhogingen t.g.v. koelwaterlozingen lijken maar een kleine component van de totale watertemperatuur van de Rijn. Echter natuurlijke omstandigheden (meteorologie en hydrologie) kunnen niet gestuurd worden, de temperatuurverhoging door koelwaterlozingen daarentegen wel.
- De natuurlijke veranderingen in de watertemperatuur zijn vooral het gevolg van de meteorologische factoren instraling, wind en luchttemperatuur. Het model is minder gevoelig voor luchtdruk, relatieve luchtvochtigheid, windrichting en zonuren.
- Hoewel het effect van de afvoervariaties in de watertemperatuur snel is bestudeerd, is een betere gevoeligheidanalyse van watertemperatuur voor de hydrologie en invloed van zijrivieren en grondwater aanbevolen.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De afgelopen jaren is de problematiek van koelwaterlozingen in relatie tot een hoge watertemperatuur van de grote rivieren regelmatig in de actualiteit gekomen. Als het rivierwater teveel is opgewarmd, dan beperkt dit de mogelijkheden voor koelwaterlozingen door de industrie en energiesector. Binnen de werkgroep Waterkwaliteit/Emissies van de Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn (ICBR) wordt momenteel de informatie over de warmtelozingen in het stroomgebied van de Rijn geactualiseerd. Nederland heeft aangeboden om op basis van deze informatie indicatieve berekeningen te maken van de invloed van de warmtelozingen op de temperatuur van het Rijnwater.

In 2005 is een verkennende studie (quick scan) uitgevoerd om de bijdrage van de koelwaterlozingen op watertemperatuur van de Rijn inzichtelijk te maken (WL | Hydraulics, 2005). Deze studie is een vervolg op de verkennende studie. In deze studie is het modelinstrumentarium verbeterd conform de aanbevelingen uit de verkennende studie. Bovendien zijn ook meer gegevens beschikbaar gekomen, zoals gegevens over de daadwerkelijk geloosde warmtevracht, de instraling en de watertemperatuur van de zijrivieren. Naast het uitvoeren van nieuwe modelberekeningen met een verbeterd modelinstrumentarium en nieuwe gegevens, was er ook een behoefte om meer inzicht te krijgen in de werking van het watersysteem en de warmtebalans van de Rijn, de afwenteling van de warmteproblematiek op benedenstrooms gelegen gebieden en de doorwerking van onzekerheden in de modelinvoer op het simulatieresultaat. Om dit inzicht te vergroten is een gevoeligheidsanalyse met het verbeterde temperatuurmodel uitgevoerd.

1.2 Doelstelling van het onderzoek

De hoofddoelstelling van het onderzoek is het inzichtelijk maken van gevoeligheid van de watertemperatuur van de Rijn voor zowel de natuurlijke opwarming onder invloed van meteorologische condities als voor antropogene bijdrage in de vorm van koelwaterlozingen door industrie en elektriciteitscentrales in Zwitserland, Duitsland, Frankrijk en Nederland.

De specifieke doelstellingen zijn:

- het verbeteren van het bestaande modelinstrumentarium voor het kwantificeren van de effecten van meteorologische condities en koelwaterlozingen.
- het verzamelen van meer gedetailleerde gegevens over de meteorologische condities en koelwaterlozingen
- het kwantificeren van de natuurlijke opwarming voor de bijzonder droge en warme zomer van het jaar 2003
- het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse voor het inzichtelijk maken van de invloed van koelwaterlozingen op de watertemperatuur en de waterbalans van de Rijn.

1.3 Het studiegebied

Het studiegebied is de Rijn vanaf het Bodenmeer tot aan de Noordzee (Figuur 1-1). De belangrijke zijrivieren die in de Rijn stromen zijn de Aare, de Neckar, de Main en de Moezel. Deze zijrivieren zijn in deze studie eveneens in beschouwing genomen. De Rijn stroomt door dichtbevolkte en sterk geïndustrialiseerde gebieden en is daardoor één van de belangrijkste rivieren in Europa. Zowel de industrie als de elektriciteitsbedrijven gebruiken het Rijnwater als koelwater. Totale warmtelozing naar de Rijn vanaf Bodenmeer tot aan de Noordzee is meer dan 37.000 MW per jaar (zie voor overzicht bijlage A).

Figuur 1-1 Studiegebied

1.4 Aanpak

Voor het in beeld brengen van de invloed van meteorologische condities en koelwaterlozingen op de watertemperatuur is met het modelinstrumentarium een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd. De gevoeligheidsanalyse beantwoordt aan meerdere doelen in deze studie. Allereerst vergroot de gevoeligheidsanalyse het inzicht in het functioneren van het watersysteem. Door de lozingen in het model op bepaalde trajecten te halveren, ontstaat een beeld van de afwenteling van de problematiek van koelwaterlozingen op verder benedenstrooms gelegen trajecten van de rivier.

Daarnaast is een gevoeligheidsanalyse een handig hulpmiddel om de gevoeligheid van het eindresultaat af te tasten *voor de onzekerheden in de modelinvoer*. Voorbeelden hiervan in deze studie zijn de onzekerheden in de meteorologische gegevens en in de afvoer van de Rijn (zie ook hoofdstuk 3) en de temperaturen van zijrivieren. Tenslotte kan een gevoeligheidsanalyse ook gebruikt worden om *mogelijke maatregelen* te onderzoeken, zoals het reduceren van de lozingen.

Voor het kwantificeren van de effecten van de natuurlijke opwarming en de koelwater-lozingen op de watertemperatuur van de Rijn wordt gebruik gemaakt van een voor de quick scan daartoe ontwikkeld modelinstrumentarium. Dit modelinstrumentarium bestaat uit twee modules: een waterkwantiteitsmodel waarmee de stroming van het water wordt gesimuleerd en een temperatuurmodel waarmee de temperatuur van het Rijnwater wordt berekend. Het modelinstrument maakt gebruik van informatie over de rivierafvoeren, de meteorologie en de warmtelozingen in het stroomgebied van de Rijn.

Daarnaast bestaat het temperatuurmodel uit twee componenten: het deel bovenstrooms van Lobith en het deel benedenstrooms van Lobith: dit deel is het Landelijk Temperatuurmodel.

In het korte tijdbestek waarin de quick scan is uitgevoerd, zijn vanwege het ontbreken van gegevens op een aantal punten concessies gedaan ten aanzien van de invoergegevens. Het temperatuurmodel voor de Rijn is daarom op een aantal punten verbeterd. In deze studie zijn de invoergegevens van het model op de volgende drie punten aangevuld voor de zomer van 2003:Waterbeweging, windsnelheid, globale straling, lokale watertemperatuur zijrivieren en actuele gegevens koelwaterlozingen voor Nederland.

2 Methodiek

2.1 Scenario's

De scenario's die voor de gevoeligheidsanalyse zijn voorgesteld door Rijkswaterstaat RIZA staan in Tabel 2-1. Als referentieperiode is de zomer van 2003 gekozen. Het referentiescenario (scenario 0) beschrijft de invloed van de meteorologische condities en de koelwaterlozingen op de watertemperatuur. In het referentiescenario is uitgegaan van de vergunde lozingen.

Tabel 2-1 Scenario's voor de gevoeligheidsanalyse

Scenario	**Verandering ten opzichte van de referentieberekening**
Scenario 0	Referentieberekening zomer 2003 (inclusief nieuwe gegevens en kalibratie)
Scenario 1	Zomer 2003 met lozingrestricties
Scenario 2	Halveren lozingen traject Bodenmeer-Mannheim (inclusief Aare en Neckar)
Scenario 3a	Halveren lozing traject Mannheim-Koblenz (inclusief Main en Moezel)
Scenario 3b	Verwijderen lozing traject Mannheim-Koblenz
Scenario 3c	Toename lozing traject Mannheim-Koblenz met 30%
Scenario 4	Halveren lozingen traject Koblenz-Noordzee
Scenario 5	Verhoging van de luchttemperatuur met 1ºC
Scenario 6a	Effect van een verlaagde afvoer tot minimale dagafvoer per maand
Scenario 6b	Effect van een verhoogde afvoer tot maximale dagafvoer per maand

In scenario 1 wordt vervolgens het effect getoond van de lozingen zoals die hebben plaatsgevonden in de zomer van 2003. In augustus was de werkelijke lozing van de centrales niet gelijk aan de vergunde lozingen, omdat de centrales vanwege de hoge rivierwatertemperaturen gedeeltelijk overschakelden op luchtkoeling via koeltorens en/of de productie hadden beperkt (ICBR, 2004b). Gebaseerd op berichten dat de grote centrales aan de Rijn bij Philipsburg en aan de Neckar hun productie tot 80 % moesten beperken (Neue Energie 9/2003) is in deze studie aangenomen dat deze lozingsrestrictie geldig was voor het traject Bodenmeer-Koblenz (Zuid- en Midden-Duitsland). Dezelfde bron meldde dat in die periode twee energiecentrales rond Duisburg en Dortmund (te weten Voerde en Walsum) hun vermogen met 50 % moesten reduceren. Op grond hiervan is in deze studie aangenomen dat de lozingsvracht op het traject Koblenz-Lobith 50% kleiner was dan vergund. De lozingsrestricties zijn alleen in augustus van kracht geweest en zo ook in dit scenario. Voor de koelwaterlozingen in Nederland is gebruik gemaakt van gegevens over de werkelijke warmtelozingen. Alleen voor de locaties waar deze informatie ontbreekt, is uitgegaan van de vergunde lozingen, waarbij voor de maand augustus een beperking van 50% is toegepast. Tabel 2-2 geeft een samenvatting van de aannames voor de restricties van de warmtelozingen in scenario 1.

In scenario 2 tot en met 4 worden de warmtevracht op verschillende trajecten van de Rijn gevarieerd. In scenario 4 zijn de warmtelasten vanaf Koblenz tot de Noordzee met 50% verlaagd. Dit is gedaan voor het temperatuurmodel bovenstrooms van Lobith op het traject Koblenz-Lobith. Voor het Nederlandse deel is dezelfde gegevens gehanteerd als in scenario 1.

Tabel 2-2 Aannames voor de restricties van de warmtelozingen in Duistland en Nederland in scenario 1

Traject	Vergunde warmtevracht (MW) per traject	Cumulatief vergunde warmtevracht (MW)	Afname vermogen (%)
Lobith-Noordzee	5.734*	37.391*	50**
Koblenz-Lobith	5.441	31.657	50
Mannheim-Koblenz	12.065	26.216	20
Bodenmeer-Mannheim	14.151	14.151	20

* Cumulatieve verdeling langs de Waal, de Lek en de Nederrijn

** Alleen voor die locaties waar geen gegevens beschikbaar zijn over de werkelijke warmtelozing

De meteorologische en hydrologische omstandigheden blijken een belangrijke rol met betrekking tot de riviertemperatuur te spelen. Luchttemperatuur is één van de belangrijke factoren die de opwarming van het water bepalen (scenario 5). De afvoer bepaalt de mate van verdunning van koelwaterlozingen en de gehele massa die opgewarmd of afgekoeld wordt.

In het model voor het Rijntraject bovenstrooms van Lobith wordt gerekend met een maandelijks constante waarde voor afvoer en waterstanden, zijnde de 90% laagste dagafvoeren bij Lobith voor de betreffende maand. In scenario 6 is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor deze aanname: in scenario 6a is daarbij uitgegaan van de laagste afvoer in die maand en in scenario 6b met de hoogste afvoer. De afvoergegevens zijn afkomstig uit het Rijn-Alarm Model.

De simulatieresultaten worden gepresenteerd op vier locaties in de Rijn (Karlsruhe, Mainz, Lobith en Maassluis), waarvoor ook de referentieberekening wordt gepresenteerd. Naast figuren van de variatie in de tijd, worden ook figuren langs de lengte-as van de rivier gemaakt voor scenario's 2, 3 en 4, met daarin de gemiddelde riviertemperatuur en de gemiddelde temperatuurverhoging in de referentieberekening en in het scenario.

2.2 Het modelinstrument

2.2.1 Schematisatie

Voor het Nederlandse deel van het studiegebied is voor de temperatuurmodellering het bestaande Landelijk SOBEK River model gebruikt (WL | Delft Hydraulics, 2006). Dit model omvat ondermeer de Overijsselse Vecht, de Rijntakken, de Maas en het Amsterdam-Rijnkanaal. Voor het studiegebied bovenstrooms van Lobith is een eenvoudige SOBEK-schematisatie aangemaakt, op basis van een bestaand Rijn-Alarm Model (WL | Delft Hydraulics, 2005). Het Rijn-Alarm Model bevat alleen de grootste zijrivieren: Aare, Neckar, Main en Moezel (vanaf Trier). Bovendien, het RAM bevat geen dwarsprofielen als zodanig, maar berekent deze bij elke afzonderlijke afvoer.

Figuur 2-1 toont de modelschematisatie van het geconverteerde Rijn Alarm Model. In de figuur stellen de rode knopen de bovenstroomse en benedenstroomse modelranden voor. De gele knopen zijn de laterale instroompunten, waar de kleinere zijrivieren in het model hun water direct op de hoofdstroom van de Rijn lozen.

Alle bronnen van water in het Rijn-Alarm Model zijn dus afkomstig uit oppervlaktewater, bijdragen aan het Rijndebiet vanuit het grondwater zijn niet geschematiseerd.

Figuur 2-1 Modelschematisatie van de Rijn en zijrivieren bovenstrooms van Lobith. De rode (□) knopen representeren de bovenstroomse en benedenstroomse randen van het model, terwijl de gele (◊) knopen de laterale debieten van de zijrivieren tonen. Rivier(traject)en: High Rhine (wit), Upper Rhine (licht blauw), Middle Rhine (blauw), Lower Rhine (donker groen), Aare (oranje), Neckar (licht groen), Main (bruin) en Moezel (lila).

2.2.2 Waterbeweging

Voor het model bovenstrooms van Lobith is de toestroming van water uit de zijrivieren en via de bovenstroomse randen afgeleid uit het Rijn-Alarm Model. Met het Rijn-Alarm Model kunnen alleen stationaire afvoeren berekend worden, op basis van gemeten waterstanden en/of debieten in de meetstations langs de Rijn. Door steeds het verschil te bepalen tussen het debiet op twee meetstations, kan het toestromende debiet op het tussenliggende station bepaald worden. De gegevens voor het Rijn-Alarm Model zijn opgevraagd bij het informatiecentrum Binnenwateren van Rijkswaterstaat RIZA.

Voor de zomer van het jaar 2003 is een tijdreeks opgebouwd met stationaire afvoeren voor de maanden juni, juli, augustus en september. Per maand is onderzocht wat de 90% laagste waarde was van de dagafvoeren bij Lobith (zie Tabel 2-3) en een dag gezocht waarop dit representatieve debiet optrad. Als invoer waterstanden en debieten voor het RAM model zijn de waarden behorend bij deze dag gebruikt.

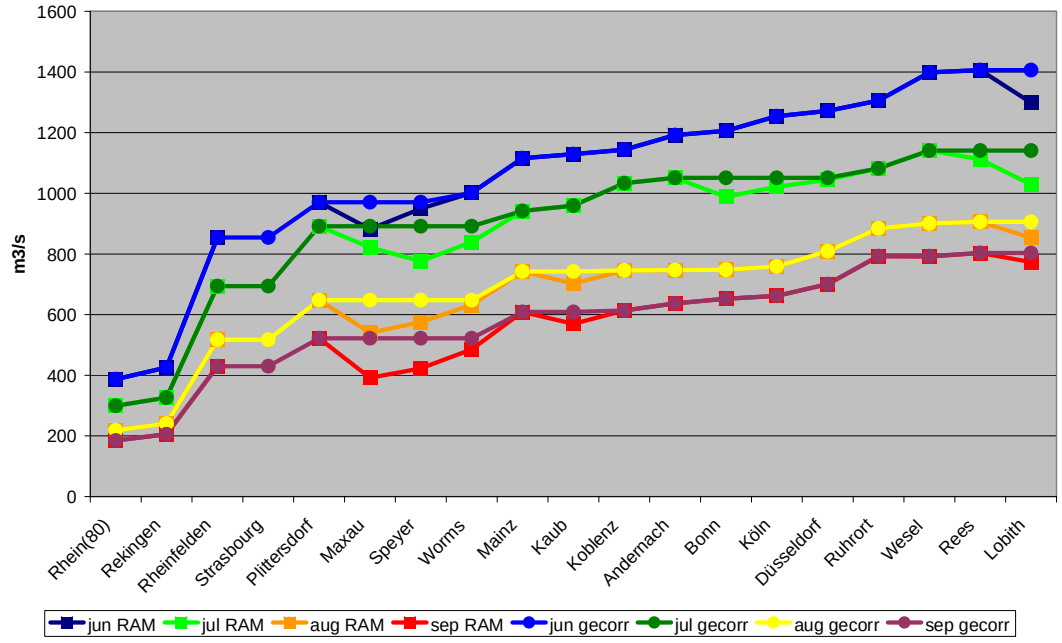
Tabel 2-3 Afvoer bij Lobith op de dagen waarvoor de stationaire afvoeren in het Rijnstroomgebied zijn bepaald met behulp van het Rijn Alarm Model.

periode	**representatieve afvoer bij Lobith (m^3/s)**	**dag waarvoor het Rijn Alarm Model is toegepast**
juni 2003	1351	28-06-2003
juli 2003	1104	22-07-2003
augustus 2003	901	28-08-2003
september 2003	797	27-09-2003

Het Rijn-Alarm Model rekent een stationaire situatie door. Deze momentopname leidt ertoe dat het debiet in een bovenstrooms gelegen traject soms hoger is dan op een benedenstrooms gelegen traject als gevolg van afvoergolven. In tegenstelling tot RAM maakt SOBEK niet-stationaire hydrodynamische berekeningen. Het debiet is de resultante van de aan- en afvoer van water en het oplossen van de stromingsvergelijkingen. Dit betekent dat op sommige trajecten een debietverlaging gemodelleerd moet worden met SOBEK en dit kan alleen door in het model als een onttrekking op te nemen. Daarom is besloten om de dalen benedenstrooms van de afvoergolf te compenseren. Waar een debietverlaging optrad, is het debiet van de bovenstrooms gelegen stations overgenomen voor dezelfde maanden. Figuur 2-2 toont het resultaat van deze methodiek. Als invoer voor het SOBEK-model zijn per maand de toenemende debieten gebruikt.

Door deze methode wordt het debiet in de hoofdstroom zo goed mogelijk beschreven. Voor een temperatuurmodel (en modellering van waterkwaliteit in het algemeen) is naast de hoeveelheid water ook de oorsprong van het water van belang. In de huidige versie van het model wordt geen rekening gehouden met de bijdrage van koud grondwater aan de hoofdstroom. Dat leidt er mogelijk toe dat het model de watertemperatuur overschat.

Het Rijn-Alarm-Model berekent de debieten van de Moezel vanaf Trier. Momenteel is in het model een verdeling gedefinieerd van het debiet bovenstrooms van Trier.



Figuur 2-2 Debieten uit het RAM (lijnen met vierkantjes) en gecorrigeerde debieten (lijnen met balletjes)

Het Landelijk Temperatuurmodel kent twee typen hydraulische randvoorwaarden: debiet en waterstanden. Langs de kust wordt het model aangestuurd met getijrandvoorwaarden voor waterstanden. Het betreft reeksen voor de zomer 2003 voor de locaties Haringvliet 10, Hoek van Holland, IJmuiden buitenhaven, Den Oever buiten en Kornwerderzand buiten. Bovendien wordt het model aangestuurd met drie debietrandvoorwaarden voor de Vecht (Emlichheim), Bovenrijn (Lobith) en Maas (Eysden), die ook reeksen kennen. De laterale debieten zijn op niveau van takken gedefinieerd. Een volledige beschrijving staat in het rapport *SOBEK landelijk Temperatuurmodel* (WL | Delft Hydraulics, 2004a).

2.2.3 Temperatuurmodel

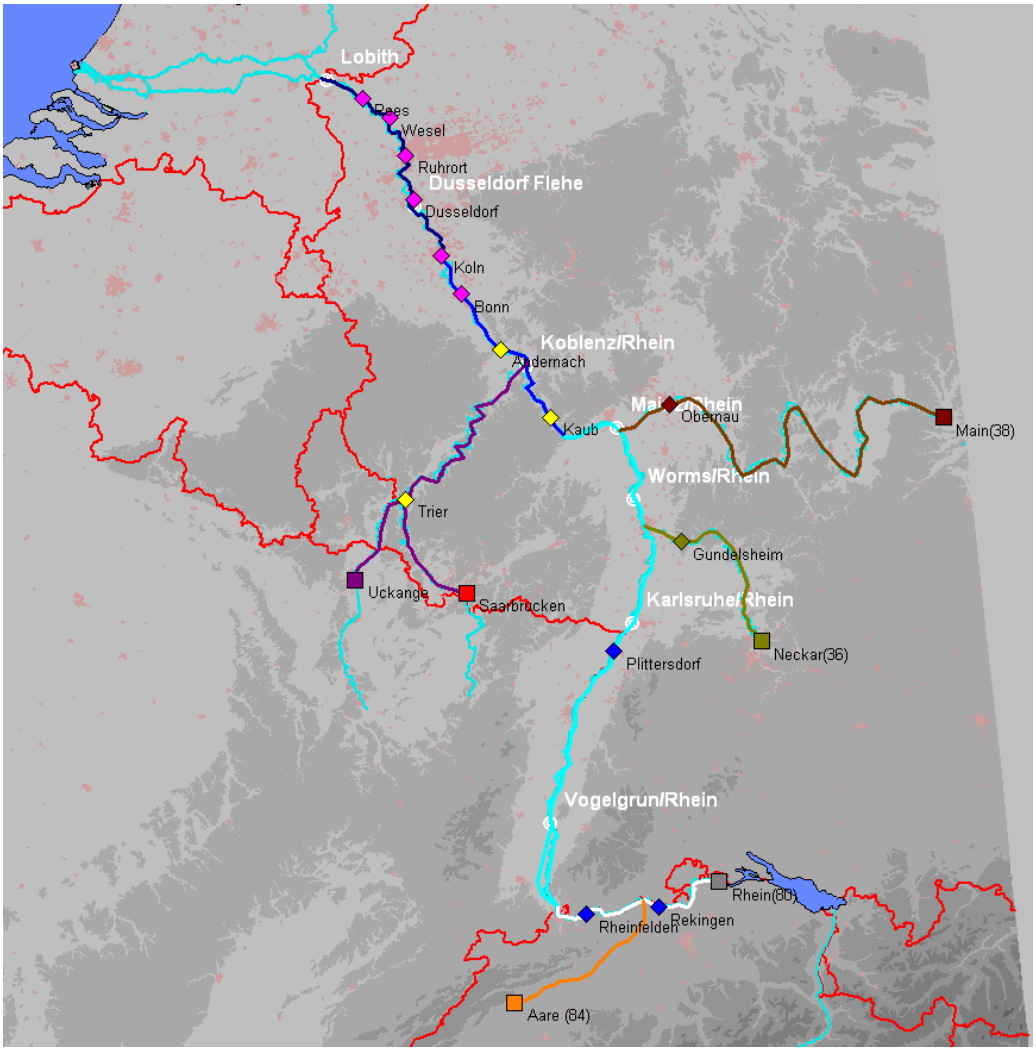
Voor de berekening van de watertemperatuur van de Rijn is gebruik gemaakt van de waterkwaliteitsmodule DELWAQ. Deze module voorspelt de watertemperatuur op basis van de aanvoer van warmte door instromend water en koelwaterlozingen en zijrivieren en de meteorologische condities. Voor een volledige beschrijving van het temperatuurmodel wordt verwezen naar voorgaande studies waarin het temperatuurmodel is toegepast (zie bijvoorbeeld WL | Delft Hydraulics, 2003b).

a. Temperatuur van de zijrivieren en de bron

Voor de watertemperatuur van de zijrivieren is in deze studie zoveel mogelijk gebruik gemaakt van meetgegevens voor de betreffende periode. Tabel 2-4 geeft een samenvatting van de gekozen meetstations voor de randvoorwaarden voor de watertemperatuur in het model. In de linker kolom van de tabel staan de namen van de laterale knopen en randen in SOBEK. In de rechter kolom is het meetstation gegeven, waar de temperatuurgegevens voor een bepaalde SOBEK knoop vandaan komen. Een overzicht van de meetlocaties voor het model bovenstrooms van Lobith is geven in Figuur 2-3.

Tabel 2-4 Overzicht van de meetstations die zijn gekozen als randvoorwaarden voor de watertemperatuur in het model.

Model	SOBEK- lateralen en randen	Meetstations
Bovenstrooms van Lobith	Rees, Wesel, Ruhrort, Düsseldorf, Köln en Bonn	Lippe (Landesumweltamt NRW)
	Andernach, Trier en Kaub	Kanzem/Saar (DK-Rhein)
	Saarbrücken	Saarbrücken/Saar (DK – Rhein)
	Uckange	Millery
	Obernau, Main (38)	Kahl a. Main/Main (DK-Rhein)
	Gundelsheim, Neckar (36)	Mannheim/Neckar (DK-Rhein)
	Pittersdorf, Rheinfelden en Rekingen	Rekingen (hydrologische Jaarboek Zwitserland)
	Rhein (80)	Ohningen (DK-Rhein)
Landelijk Temperatuurmodel	Lobith	LOBH (RIZA)
	Maas	EIJSDGS (RIZA)
	Noordzee	HARVSPT (RIZA) BOOVOT (RIZA)

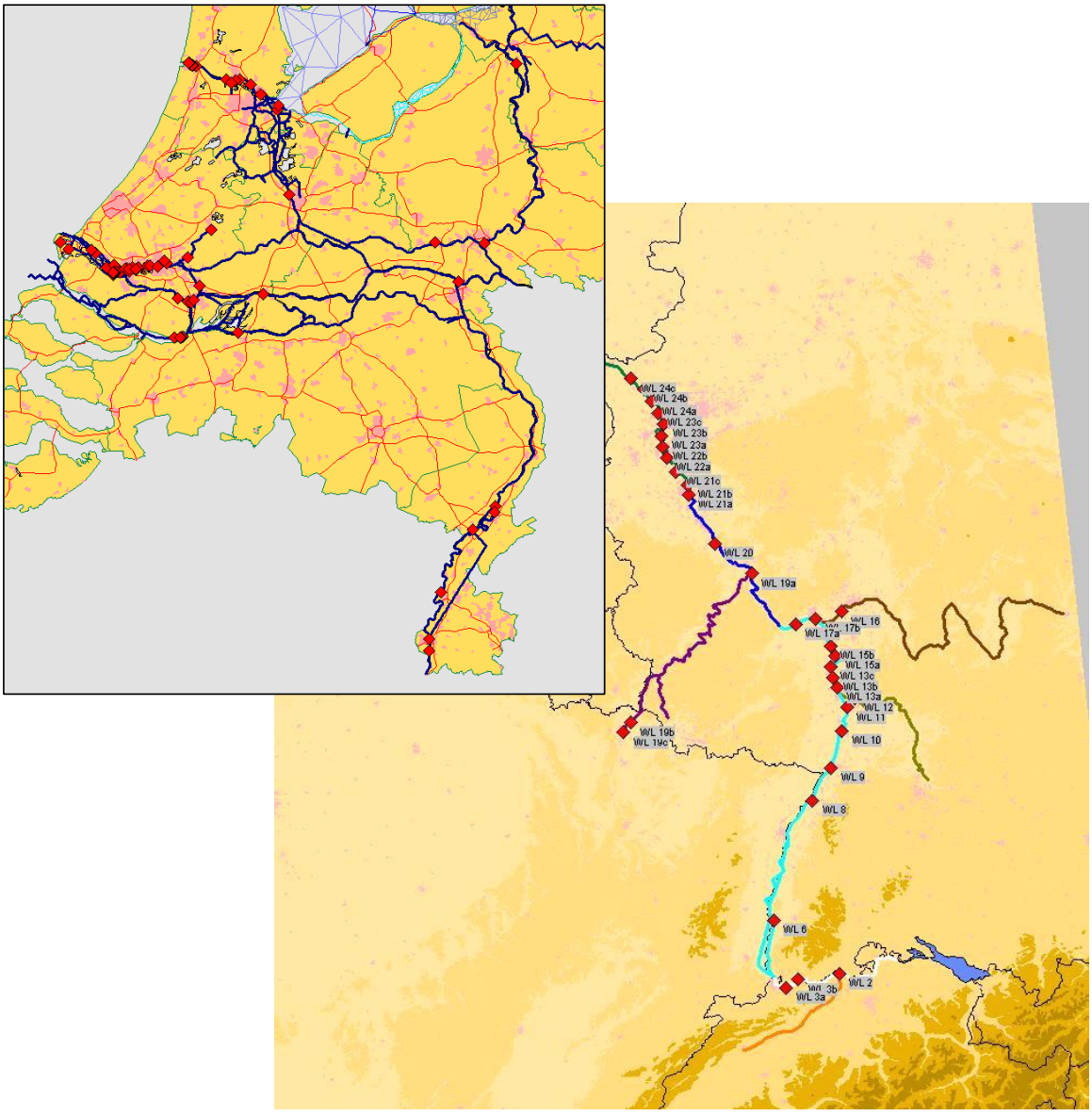


Figuur 2-3 Watertemperatuur van laterale toestromingen. Knopen met dezelfde kleuren hebben dezelfde temperatuurinformatie. De namen in wit geven de locatie waar de simulatieresultaten worden bekeken.

b. Warmtelozingen

De vergunde warmtelozingen in het Rijnstroomgebied bovenstrooms van Lobith zijn door de werkgroep Waterkwaliteit/Emissies van de Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn (ICBR) geïnventariseerd. Figuur 2-4 geeft een overzicht van locaties van de warmtelozingen op de Rijn zoals die in het model zijn opgenomen. De waarden van de warmtelozingen zijn in de modelcomponent benedenstrooms van Lobith voor het hele jaar ingevoerd als een constante, waardoor de invloed van eventuele seizoensfluctuaties en lozingsbeperkingen buiten beschouwing blijft.

De Nederlandse lozingen zijn recent geïnventariseerd (WL | Delft Hydraulics, 2006). Hiervoor zijn tijdsreeksen beschikbaar met de variatie van de warmtelasten op dagbasis voor de jaren 2000 tot en met 2004. Van een aantal lozingspunten is geen informatie beschikbaar. In die gevallen zijn de vergunde warmtelozingen gebruikt. Een overzicht van de warmtelozingen is terug te vinden in Bijlage A.



Figuur 2-4 Locatie van de warmtelozingen op de Rijn bovenstrooms en benedenstrooms van Lobith.

c. Meteorologie

In de quick scan studie is het temperatuurmodel bovenstrooms van Lobith met vier weerstations opgezet. In deze nieuwe studie zijn 9 stations opgenomen voor berekening van het bovenstroomse traject:

- De Bilt (NL)
- Eindhoven (NL)
- Konstanz (D)
- Karlsruhe (D)
- Frankfurt/airport (D)
- Nürburg (D)
- Würzburg (D)
- Düsseldorf (D)
- Trier (D)

Het Landelijk Temperatuurmodel maakt gebruik van gegevens van 10 weerstations:

- Den Helder (de Kooy)
- Amsterdam (Schiphol)
- De Bilt
- Leeuwarden
- Groningen (Eelde)
- Twente
- Vlissingen
- Rotterdam
- Eindhoven
- Maastricht (Beek)

De meteorologische condities zijn bepalend voor de uitwisseling van warmte tussen de atmosfeer en de rivier. In het model wordt de uitwisseling bepaald door de volgende meteorologische parameters:

- Luchttemperatuur (°C)
- Luchtdruk (mbar)
- Relatieve luchtvochtigheid (%)
- Windsnelheid (m/s)
- Zonuren (uur)
- Globale straling (W/m^2).

In de vorige studie is gebleken dat de gegevens van de globale straling voor de klimaatstations in Duitsland lastig te verkrijgen zijn en daardoor is voor het hele Rijnstroomgebied met gelijke globale straling met gegevens uit De Bilt. Maar de globale straling uit De Bilt onderschat de straling in Duitsland. In deze studie is de instraling voor de Duitse klimaatstations daarom met een empirische relatie benaderd.

Wanneer gegevens over de bewolkingsgraad en maximale en minimale temperatuur beschikbaar zijn, kan de Extended Hargreaves vergelijking gebruikt worden om de globale straling te berekenen (http://www.treemail.nl/privateers/radiaion/). Dit is het geval voor het Duitse gedeelte van het stroomgebied. Deze empirische relatie luidt:

$$R_g = R_a * (A_s * \sqrt{(T_{max} - T_{min})} + B_s * \sqrt{(1 - CC/8)}) + C_s$$

waar:

R_g	= *dagelijkse globale instraling*	$Jm^{-2}d^{-1}$
R_a	= *dagelijkse buitenaards instraling*	$Jm^{-2}d^{-1}$
CC	= *bedekkingsgraad van de bovenlucht*	*octa*
T_{max}	= *maximale temperatuur*	^oC
T_{min}	= *minimale temperatuur*	^oC
A_s	= *empirische constante*	$^oC^{-0.5}$
B_s	= *empirische constante*	-
C_s	= *empirische constante*	$Jm^{-2}d^{-1}$

De empirische constanten variëren per geografische locatie. Tabel 2-5 toont deze constanten voor de Duitse klimaatstations.

Tabel 2-5 Coëfficiënten in de Extended Hargreaves methode voor Duitse weerstations (http://www.treemail.nl/privateers/radiaion/).

Extended Hargreaves				**Weerstation**
Station Naam	**A_s**	**B_s**	**C_s**	
Bocholt	0,09	0,33	-0,42	Düsseldorf
Geisenheim	0,08	0,37	-0,61	Nürburg
Giessen	0,09	0,33	-0,51	Frankfurt am Main
Konstanz	0,10	0,36	-0,59	Konstanz
Mannheim	0,08	0,39	-0,84	Karlsruhe
Trier-Petrisberg	0,09	0,39	-0,71	Trier
Wuerzburg	0,08	0,37	-0,42	Würzburg

2.3 Invoergegevens

2.3.1 Waterbeweging

In deze studie worden meetgegevens gebruikt op de bovenstroomse modelranden. De debietgegevens van de Moezel zijn gegeven bij Uckange (Tabel 2-6) en afkomstig van de hydro banque voor meetgegevens in Frankrijk (http://hydro.rnde.tm.fr/accueil.html). Voor gegevens van het debiet in Saarbrücken (Tabel 2-7) is naar de Internet pagina van de Deutschen Kommission zur Reinhaltung des Rheins gekeken (www.dk-rhein.de).

Tabel 2-6 Debiet Moezel op bovenstroomse rand bij Uckange.

Uckange	**Gemiddeld debiet (m^3/s)**
juni	33,5
juli	27,2
augustus	22,6
September	23,2

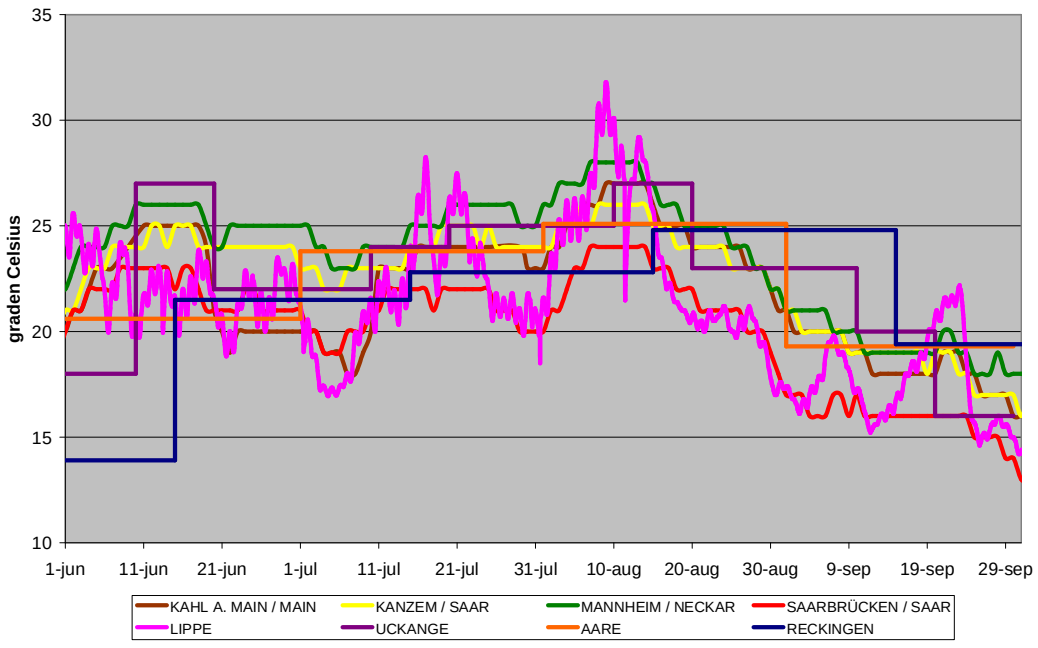
Tabel 2-7 Debiet Moezel op bovenstroomse rand bij Saarbrücken.

Saarbrücken	Debiet (m^3/s)
02-06-2003	16
16-06-2003	14
30-06-2003	15
14-07-2003	12
28-07-2003	12
11-08-2003	9.5
25-08-2003	12
08-09-2003	14
22-09-2003	11

2.3.2 De watertemperatuur van de zijrivieren

Figuur 2-5 toont de watertemperatuur op diverse locaties in de Rijn en zijrivieren. De volgende bronnen zijn gebruik voor het verzamelen van informatie:

- Deutschen Kommission zur Reinhaltung des Rheins (DK Rhein)
- Voor de bovenstroomse rand Uckange in de Moezel is de watertemperatuur voor het station Millery gebruikt. De gegevens zijn afkomstig van http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/fr/etat/district-rhin/page_03_02_08_01_c.php.
- De watertemperatuur bij Rekingen (Rijn) komt uit het Hydrologische Jaarboek van 2003 in Zwitserland (http://www.bwg.admin.ch/service/hydro/pdf/80450003.pdf). Deze temperatuur is ook voor de laterale knopen Rheinfelden en Pittersdorf gebruikt.
- Voor de laterale instroming bij Bonn, Köln, Düsseldorf, Ruhrort, Wesel en Rees is de watertemperatuur van de rivier Lippe gebruikt. Deze gegevens komen van Landesumweltamt Nordrhein Westfalen (NRW).
- RIZA Rijkswaterstaat (WL | Delft Hydraulics, 2006).



Figuur 2-5 De watertemperatuur op diverse locaties in de Rijn en zijrivieren.

2.3.3 Warmtelozingen

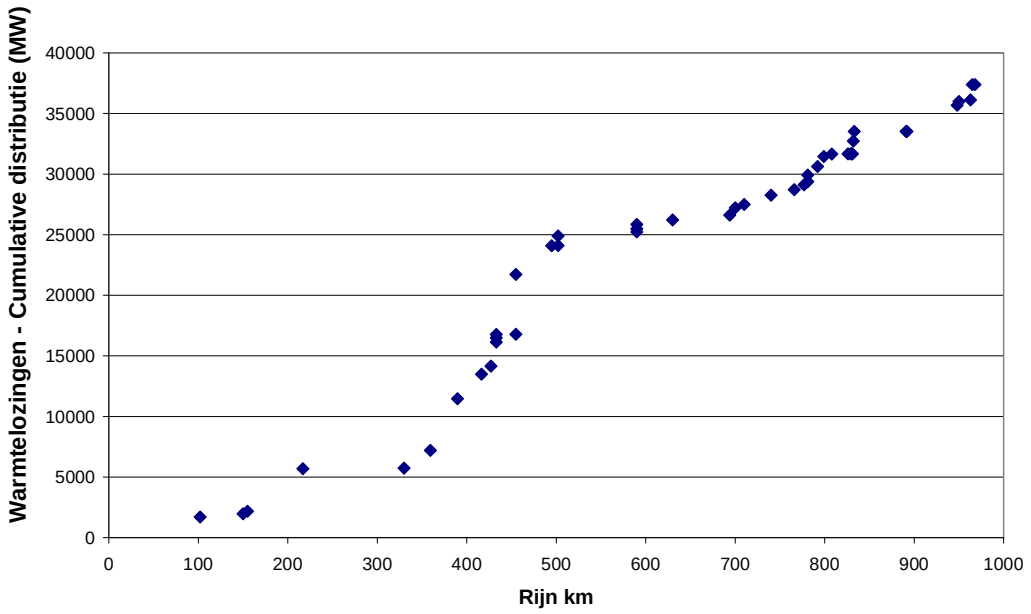
Een samenvatting van de cumulatieve verdeling van vergunde warmtelozing per traject inclusief de zijrivieren is in Tabel 2-8. weergegeven. De volledige informatie met warmtelozingen staat in Bijlage A. Figuur 2-6 geeft een beeld van de verdeling van de lozingen langs de Rijn. Deze warmtelozingen zijn overgenomen uit de volgende documenten, die door Rijkswaterstaat RIZA ter beschikking zijn gesteld:

- Inventar der Wärmeeinleitungen/ Inventaire des rejets thermiques. *S 19-04d.doc* (ICBR, 2004a);
- Eléments de mise a jour de l'inventaire des rejets thermiques sur le Rhin. Informations de la délégation française a destination du GT S de la CIPR le 24/10/05. *05 123 NT VB DBRM* (DBRM, 2005) ;
- SOBEK landelijk temperatuurmodel. Rapport nr. Q4161 (WL | Delft Hydraulics, project gaande).

Tabel 2-8 Cumulatieve verdeling van de vergunde warmtelozing (MW) per traject

Traject	**Cumulatieve warmtelozing (MW)**
Lobith-Noordzee	37.391*
Koblenz-Lobith	31.657
Mannheim-Koblenz	26.216
Bodenmeer-Mannheim	14.151

* Cumulatieve verdeling van de vergunde warmtelozing langs de Waal, de Lek en de Nederrijn



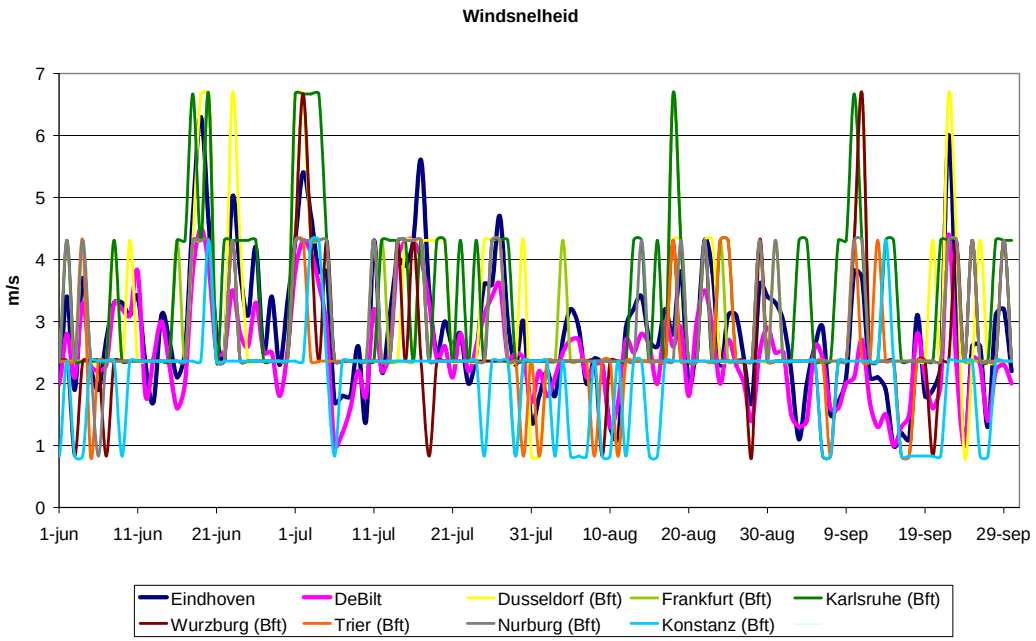
Figuur 2-6 Cumulatieve verdeling van de vergunde warmtelozingen langs de Rijn, in stroomafwaartse richting van Zwitserland tot de Noordzee.

2.3.4 Meteorologie

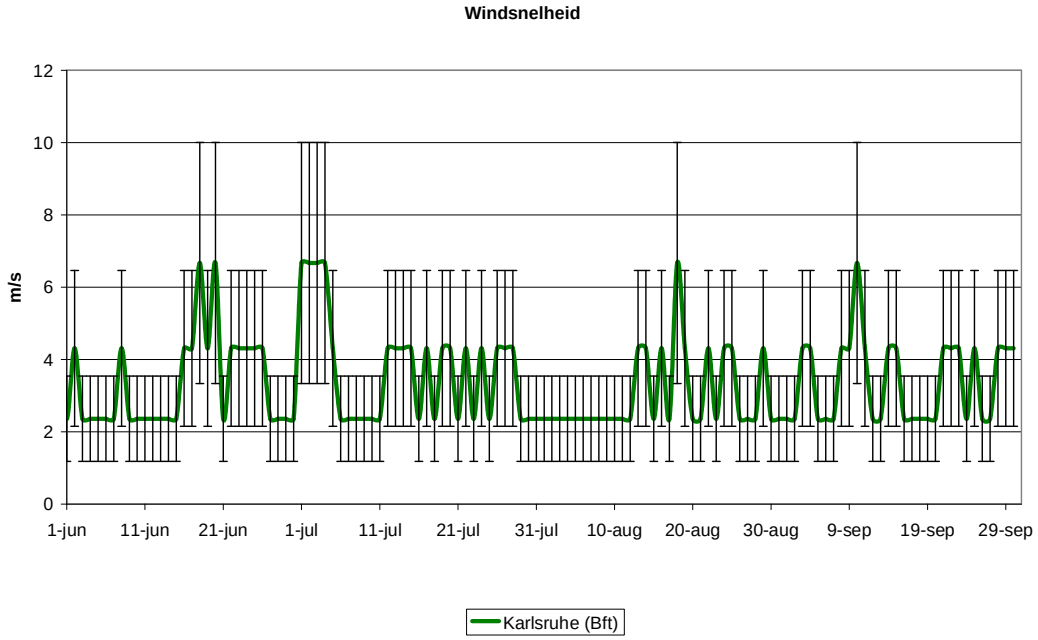
Voor het Landelijk temperatuurmodel zijn de meteorologische gegevens (luchttemperatuur, luchtdruk, windsnelheid, relatieve luchtvochtigheid, globale straling en zonuren) afkomstig van de KNMI (http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/download.cgi). Deze betreffen de periode van de zomer 2003. De meteorologische gegevens behalve globale straling voor de Duitse weerstations zijn afkomstig van de 'Deutscher Wetterdienst' (http://www.dwd.de/de/wir/Datenservice/Leistungen/Leistungen.htm). De windsnelheid is op deze internetpagina als gemiddelde windkracht volgens de schaal van Beaufort gegeven (Tabel 2-9). Figuur 2-7 toont de waarden van de windsnelheid voor de verschillende weerstations. De verschillen tussen de maximale en minimale waarden van het bereiken in de schaal van Beaufort zijn groot. In Figuur 2-8 wordt de bandbreedte voor het weerstation Karlsruhe geïllustreerd. Als invoer windsnelheid voor het model zijn de tussenliggende waarden in m/s gebruikt.

Tabel 2-9 Schaal van Beaufort.

kracht	benaming KNMI	benaming zeevaart	gemiddelde snelheid over 10 minuten (km/u)	SOBEK invoer (m/s)
0	stil	windstil	0-1	0,14
1	zwak	flauw en stil	1-5	0,83
2	zwak	flauwe koelte	6-11	2,36
3	matig	lichte koelte	12-19	4,31
4	matig	matige koelte	20-28	6,67
5	vrij krachtig	frisse bries	29-38	9,31

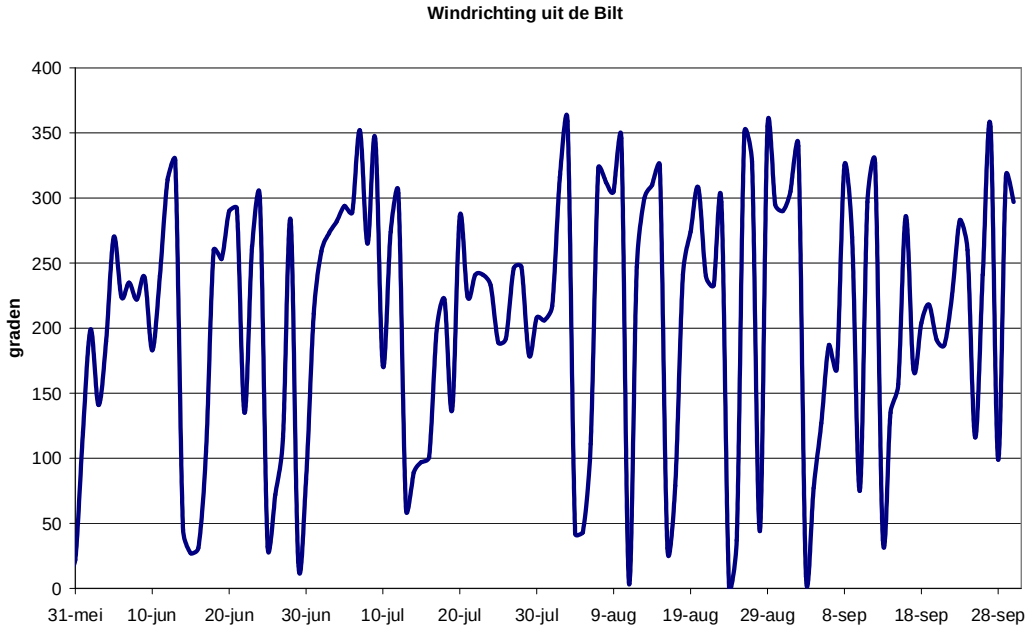


Figuur 2-7 De gemeten windsnelheid op diverse meetstations in Duitsland en Nederland.



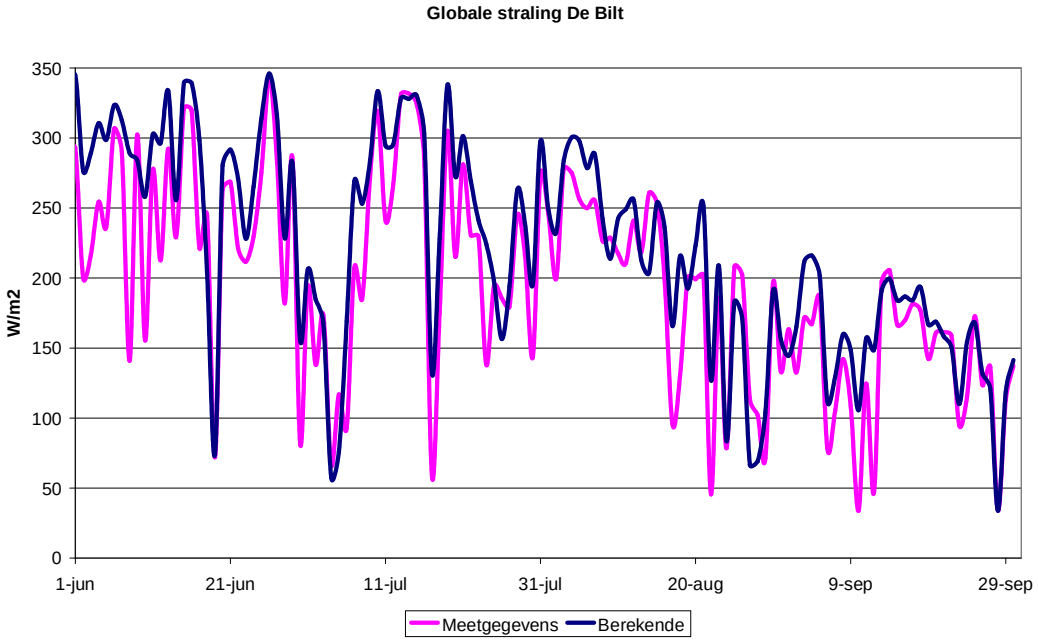
Figuur 2-8 Maximale en minimale meetwaarden volgens het bereik in de schaal van Beaufort bij het klimaatstation Karlsruhe.

De windrichting en de globale straling zijn bij de Deutscher Wetterdienst niet te krijgen. Omdat de windrichting geen belangrijk effect op de afkoeling heeft, is voor deze studie de gemeten windrichting van De Bilt gebruikt (zie Figuur 2-9).

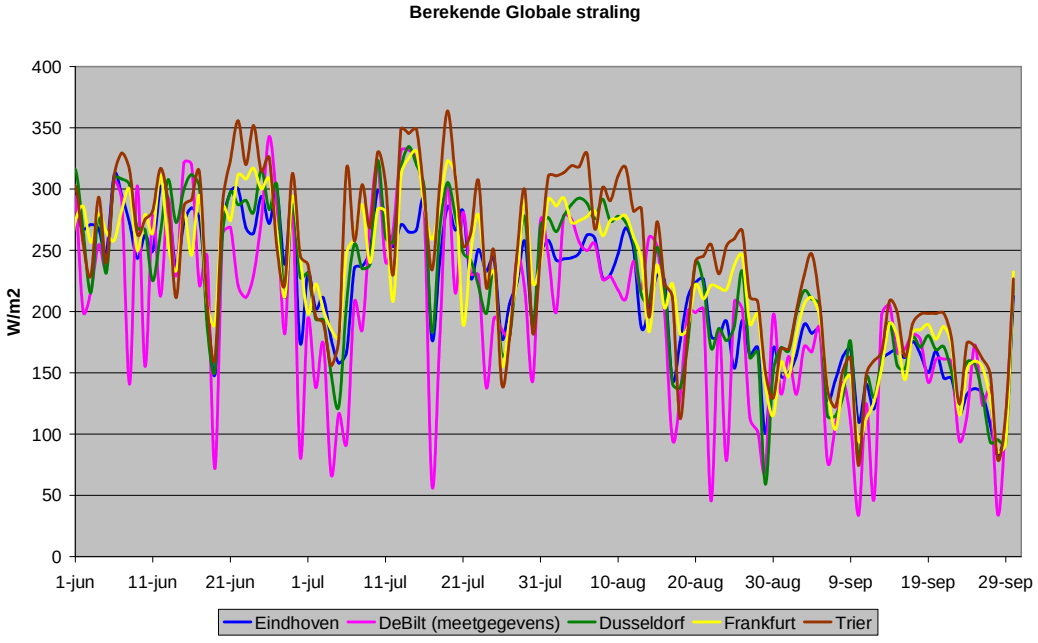


Figuur 2-9 De windrichting in de Bilt (KNMI) in de zomer van 2003.

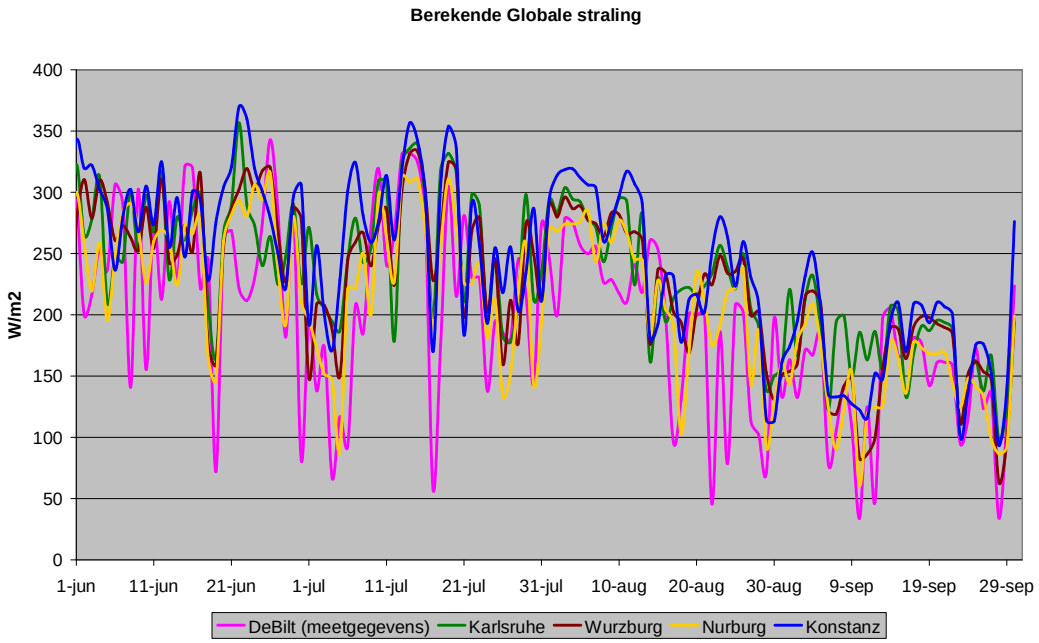
De globale straling is middels de Extended Hargreaves vergelijking berekend. Om een goed inzicht te krijgen in de empirische resultaten, zijn benaderingen voor De Bilt samen met de metingen uit De Bilt in Figuur 2-10 gepresenteerd. De berekende globale straling is in dezelfde orde van grootte als de metingen, maar mist de sterke dalingen. Het gevolg is dat in het model de instraling overschat wordt, waardoor de berekende watertemperatuur hoger wordt dan de metingen. Figuur 2-11 en Figuur 2-12 tonen de berekende straling voor de andere klimaatstations.



Figuur 2-10 Gemeten en berekende globale straling bij De Bilt



Figuur 2-11 Berekende globale straling voor Eindhoven, de Bilt, Düsseldorf, Frankfurt en Trier.



Figuur 2-12 Berekende globale straling voor de Bilt, Karlsruhe, Würzburg, Nürburg en Konstanz.

3 Modelkalibratie

3.1 Inleiding

De resultaten van de eerste berekeningen met het verbeterde temperatuurmodel bovenstrooms van Lobith, zijn vergeleken met de meetgegevens van de watertemperatuur en met de uitkomsten van het oude model uit de quick scan. De resultaten van het niet gekalibreerde model gaven aan dat de fluctuaties van de gemodelleerde riviertemperatuur (Temp) redelijk overeen kwamen met de metingen, maar dat de berekende watertemperatuur hoger was dan de gemeten waarden. Een kalibratieslag was dus wenselijk. In dit hoofdstuk wordt de kalibratie van het temperatuurmodel voor de Rijn bovenstrooms van Lobith beschreven. Het model is gekalibreerd op metingen voor de situatie zonder lozingsrestricties, dus met de vergunde warmtelozingen.
Het warmtemodel benedenstrooms van Lobith voldoet goed en is ongewijzigd gebruikt.

3.2 Kalibratie

Voordat de kalibratie is uitgevoerd is eerst een inschatting gemaakt van de mogelijke oorzaken van (i) de systematische overschatting van watertemperatuur bij Lobith ten opzichte van de metingen en (ii) hogere modelvoorspelling ten opzichte van het oude model.

De volgende oorzaken verklaren waarom het huidige model de metingen bij Lobith overschat:

1. **Het nieuwe model overschat de instraling.**
De gebruikte methode om straling in Duitsland te berekenen (de empirische “extended Hargreaves” benadering) overschat de actuele straling zeer waarschijnlijk. Hoewel de berekende straling fluctuaties laat zien voor de hele periode, zijn de extremen niet even groot. In vergelijking met de stralinggegevens uit De Bilt, mist de berekende straling de sterke dalen die voor een lagere riviertemperatuur zorgen.

2. **Het model houdt geen rekening met de bijdrage van de instroom van koud grondwater**
In lage afvoersituaties is de bijdrage van grondwatertoestroom relatief belangrijk. De temperatuur van het grondwater dat mengt met het rivierwater en heeft een temperatuur van 8 tot 12 °C. Daardoor kan grondwaterkwel in werkelijkheid een significante bijdrage leveren aan de watertemperatuur bij Lobith. In bijlage C wordt geschat dat de bijdrage van grondwater aan de watertemperatuur bij Lobith minimaal 1°C bedraagt, mogelijk meer.

3. **Het model houdt geen rekening met de uitwisseling met de rivierbodem.**
Op het grensvlak met de bodem verliest het rivierwater warmte door geleiding naar de bodem. Het warmteverlies is evenredig met de diepte van de grondlaag die door het water opgewarmd wordt. Bijlage C geeft een indicatieve berekening voor deze componenten. Een diepte van de grondlaag van bijvoorbeeld 1 meter leidt tot een temperatuurverschil bij Lobith van maximaal 0,3 °C.

4. **Het model houdt geen rekening lozingsreducties**
In het model zijn de maximaal vergunde lozingen gebruikt. In de warme zomer van 2003 zijn warmtelozingen in het Rijnstroomgebied echter gereduceerd. In werkelijkheid golden in augustus 2003 lozingsrestricties en werd gebruik gemaakt van koeltorens. Het is niet mogelijk de reducties in het model precies te kwantificeren. De reducties zijn waarschijnlijk echter van korte duur geweest en kunnen daarom niet de langdurige overschatting (maanden) van de metingen verklaren. Een inschatting van de werkelijke lozingen (in scenario 1) laat echter zien dat het effect bij Lobith 1°C kan zijn.

Ten opzichte van het oude model berekent het nieuwe model een systematisch hogere watertemperatuur. Het verschil tussen beide modellen is het gevolg van:

5. **Het oude model onderschatte de straling**
In het oude model is de instraling over het gehele studiegebied gelijk aan de instraling in de Bilt gehouden. De instraling in Duitsland is hoger dan in de Bilt.

6. **Het oude model overschat de afkoeling door verdamping**
In het vorige model is uitgegaan van een constante dagelijkse windsnelheid (7 m/s) voor het hele studiegebied. Hierdoor was er in het vorige model sprake van een grotere afkoeling dan in werkelijkheid voorkomt.

Verder laten de invoergegevens een aanzienlijke onzekerheid zien in de volgende modelaspecten:

7. **Zijrivieren**
De meetgegevens van de lokale watertemperatuur voor de laterale toestroming waren niet verkrijgbaar voor alle zijriviertjes. Bijvoorbeeld, in Noord–Duitsland is de watertemperatuur van de rivier Lippe gebruikt voor de laterale toestroming bij Bonn, Köln, Düsseldorf, Ruhrort , Wesel en Rees.

8. **Hydrodynamica**
Het model maakt gebruik van een sterk vereenvoudigde hydrodynamica. Zo bevat RAM geen dwarsprofielen en berekent alleen stationaire afvoeren: de afvoeren worden over de tijd constant per maand aangenomen.

9. **Wind**
De windsnelheden waren alleen beschikbaar in de schaal van Beaufort. Deze klasses zijn vertaald naar windsnelheden in m/s. De klasses van de schaal van Beaufort zijn echter groot en de vertaling introduceert demping en onzekerheid. Het verdient aanbeveling in vervolgstudies windmetingen in m/s te gebruiken.

3.2.1 Aanpak

Het verdient aanbeveling om bovengenoemde verbeteringen (met name 1, 2, 7 en 8) door te voeren alvorens het model te evalueren en eventueel te kalibreren. Daartoe bestonden in deze studie echter niet de middelen en tijd. Daarom is ervoor gekozen om het **gelumpte** effect van bovengenoemde aspecten te verdisconteren in de belangrijkste afkoelingsterm in het model. Er is daarom gekalibreerd op de afkoeling als gevolg van wind.

Het model is met name gevoelig voor de windfunctie voor verdamping $F(W_a)$. De beschrijving van deze functie staat in Bijlage B. Het model kan gekalibreerd worden met de empirische coëfficiënten (c_1 en c_2), die de afhankelijkheidsrelatie tussen wind en verdamping bepalen. In de quick scan studie en in een eerdere temperatuurstudie voor de Maas worden de coëfficiënten (c_1 = 4,4 en c_2 = 1,82) volgens Sweers (1976) gebruikt. In de literatuur is echter een grote bandbreedte aan coëfficiënten te vinden (WL | Delft Hydraulics, 2003a). Om de afkoeling als gevolg van deze ontbrekende termen te verwerken in de uitwisseling met de atmosfeer, zijn voor deze studie hoge coëfficiëntenwaarden (c_1 = 10 en c_2 = 3,2) gekozen.

Bij de kalibratie is dus het effect van schematisatie, hydrodynamica en wind verwerkt in de coëfficiënten van de formule die de uitwisseling met de atmosfeer beschrijft. Daarmee ontstaat extra afkoeling die o.a. het ontbreken de invloed van grondwater compenseert. Hiermee moet rekening worden gehouden bij de interpretatie van de hydrodynamische scenario's (6a en 6b).

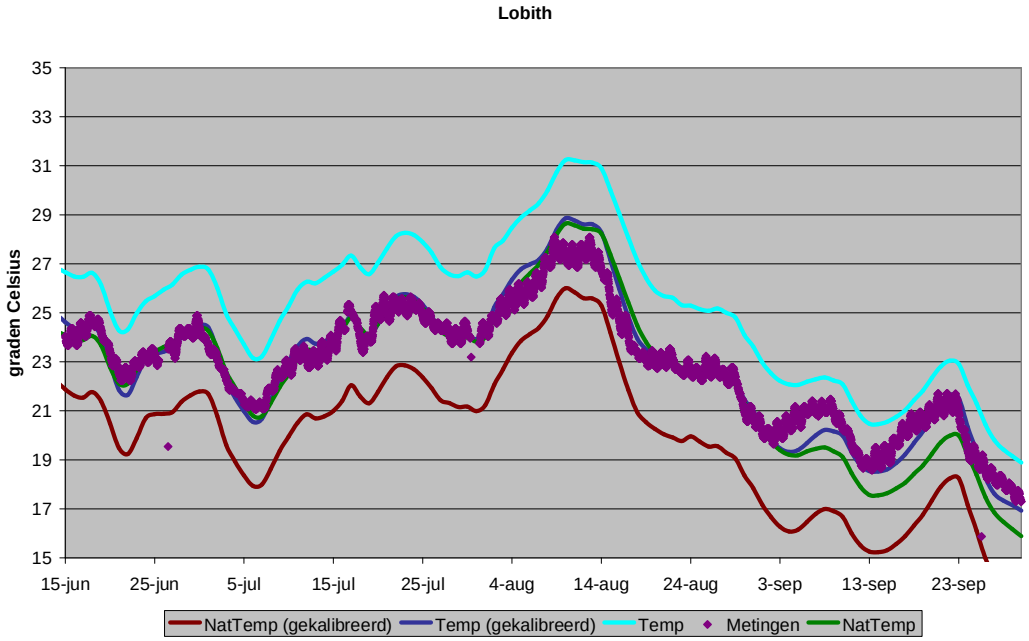
Het Landelijk temperatuurmodel is gevalideerd voor de periode van 2001 tot 2004 (WL | Delft Hydraulics, 2006). In deze studie is gebruikt gemaakt van dit gevalideerde model.

Resultaat van de modelkalibratie

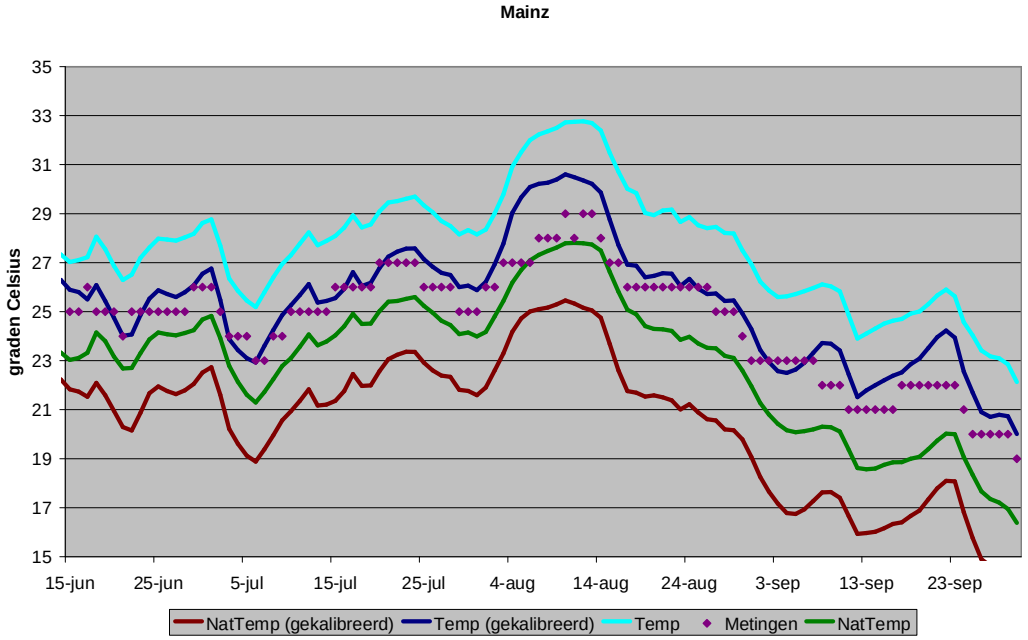
Na de kalibratie van het model komen voor Lobith de berekende riviertemperatuur en de metingen goed overeen (zie Figuur 3-1). Gedurende de hitteperiode (maand augustus) is de gekalibreerde riviertemperatuur wat aan de hoge kant ten opzichte van de metingen. Deze periode kent waarschijnlijk lozingsrestricties. Aangenomen wordt dat eind augustus de koelwaterbeperkingen voorbij zijn. Daarnaast kunnen de variaties in de grondwaterflux en grondwatertemperatuur de verschillen tussen de gekalibreerde resultanten en de metingen verklaren.

Een hoge riviertemperatuur kan ook gedurende de hitteperiode op de andere locaties, vooral Mainz (Figuur 3-2) en Koblenz (Figuur 3-3) worden gezien. Bij Karlsruhe (zie Figuur 3-4) komt echter in augustus de riviertemperatuur goed overeen met de metingen. Deze locatie zit in het model bovenstrooms van de warmtelozing (nummer 9, traject Seltz – Philippsburg) en daardoor is er ruimte voor de verdunning van de warmte.

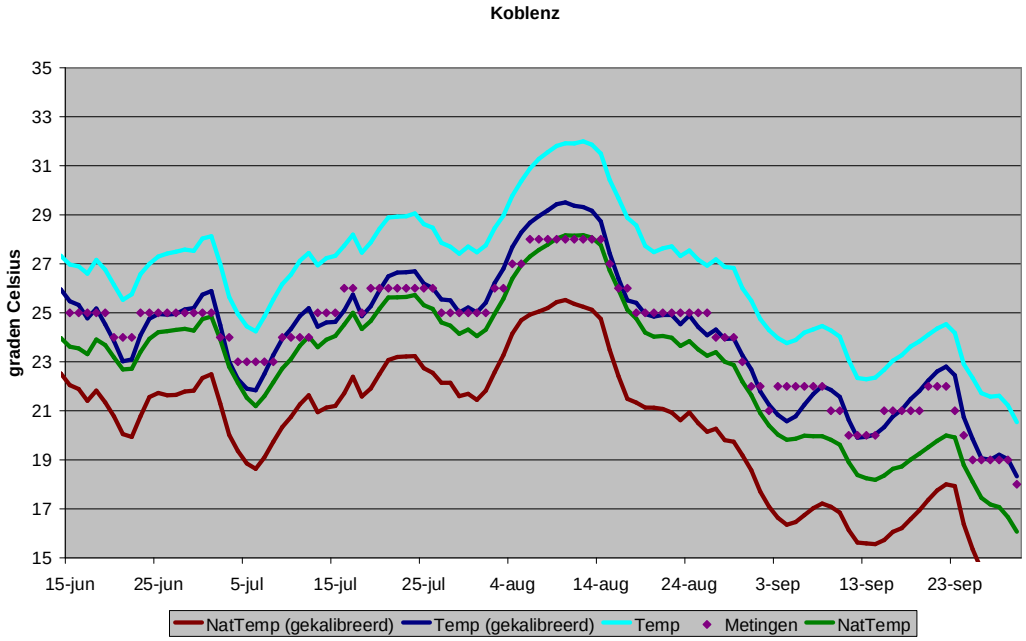
Bij Bovensluis (Figuur 3-5) kwamen de riviertemperatuur en de metingen al goed overeen. Bij Maassluis (Figuur 3-6) onderschat het model de temperatuur een beetje (minder dan 1°C) in de tweede helft van de zomer (bijvoorbeeld op 11 september). Het gekalibreerde model bovenstrooms Lobith onderschat de watertemperatuur bij Lobith begin september met dezelfde ordegrootte. In het Landelijk Model is het resultaat voor Maassluis beter omdat daar gebruik gemaakt wordt van gemeten waarden bij Lobith.



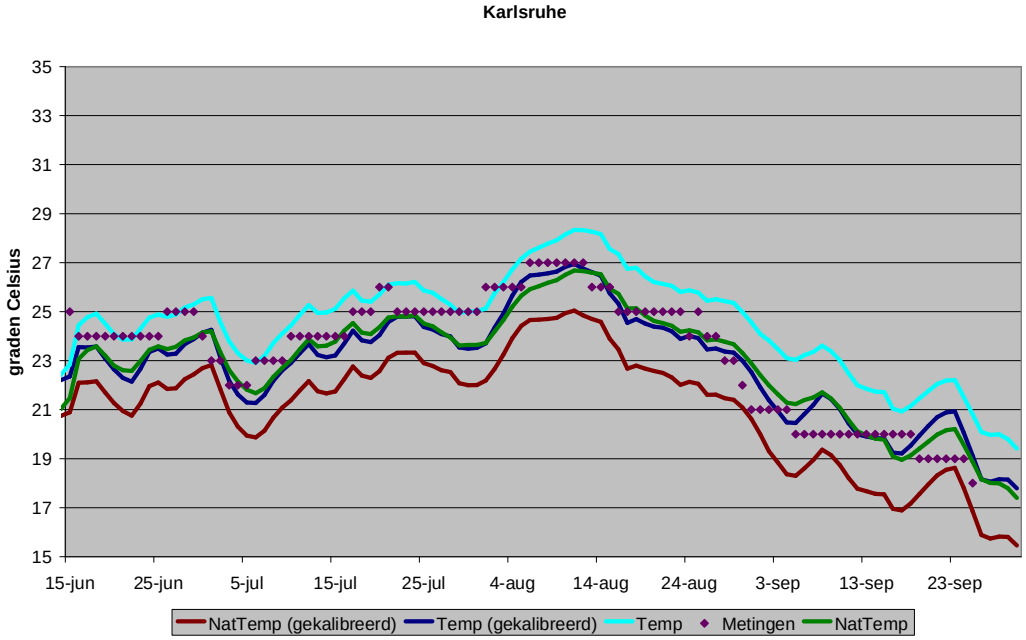
Figuur 3-1 Resultaten van het gekalibreerde model bij Lobith in vergelijking met de ongekalibreerde riviertemperatuur (Temp) en achtergrondtemperatuur (NatTemp). De blokjes in de figuur geven de gemeten riviertemperatuur



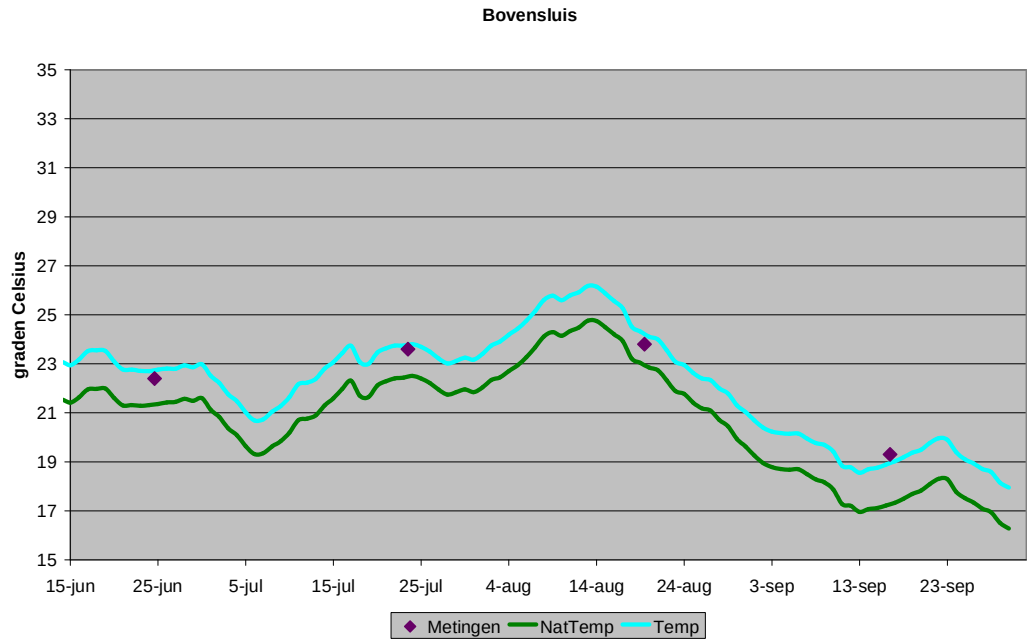
Figuur 3-2 Resultaten van het gekalibreerde model bij Mainz in vergelijking met de ongekalibreerde riviertemperatuur (Temp) en achtergrondtemperatuur (NatTemp). De blokjes in de figuur geven de gemeten riviertemperatuur



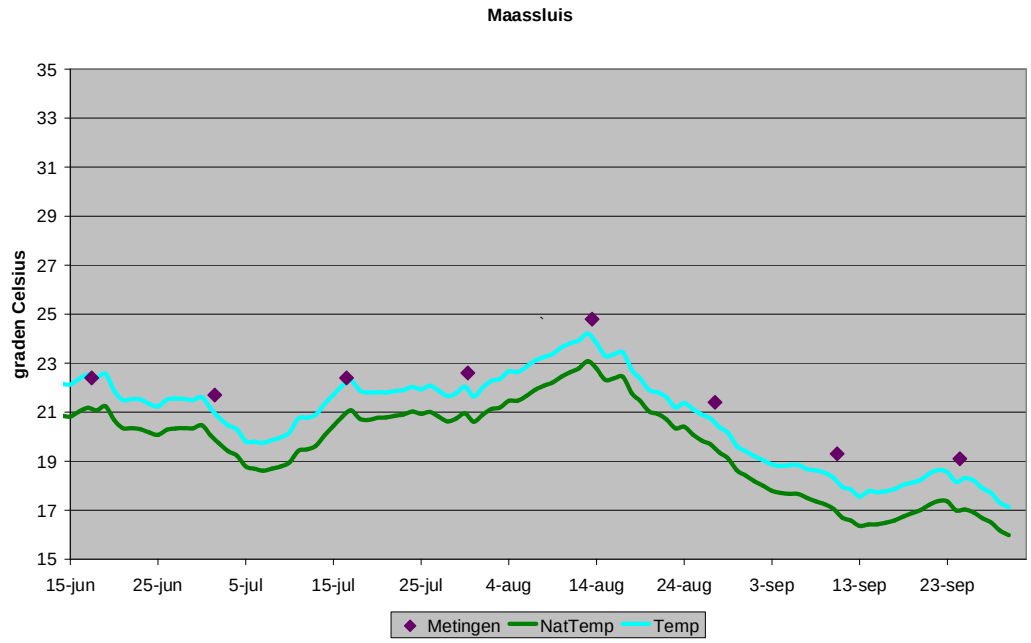
Figuur 3-3 Resultaten van het gekalibreerde model bij Koblenz in vergelijking met de ongekalibreerde riviertemperatuur (Temp) en achtergrondtemperatuur (NatTemp). De blokjes in de figuur geven de gemeten riviertemperatuur



Figuur 3-4 Resultaten van het gekalibreerde model bij Karlsruhe in vergelijking met de ongekalibreerde riviertemperatuur (Temp) en achtergrondtemperatuur (NatTemp). De blokjes in de figuur geven de gemeten riviertemperatuur



Figuur 3-5 Resultaten van het ongekalibreerde model bij Bovensluis. De blokjes in de figuur geven de gemeten riviertemperatuur



Figuur 3-6 Resultaten van het ongekalibreerde model bij Maassluis. De blokjes in de figuur geven de gemeten riviertemperatuur

4 Resultaten van de gevoeligheidanalyse

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de gevoeligheidsanalyse getoond. Scenario 0 is het referentiescenario voor de zomer 2003. In kader van de gevoeligheidsanalyse zijn de volgende scenario's doorgerekend:

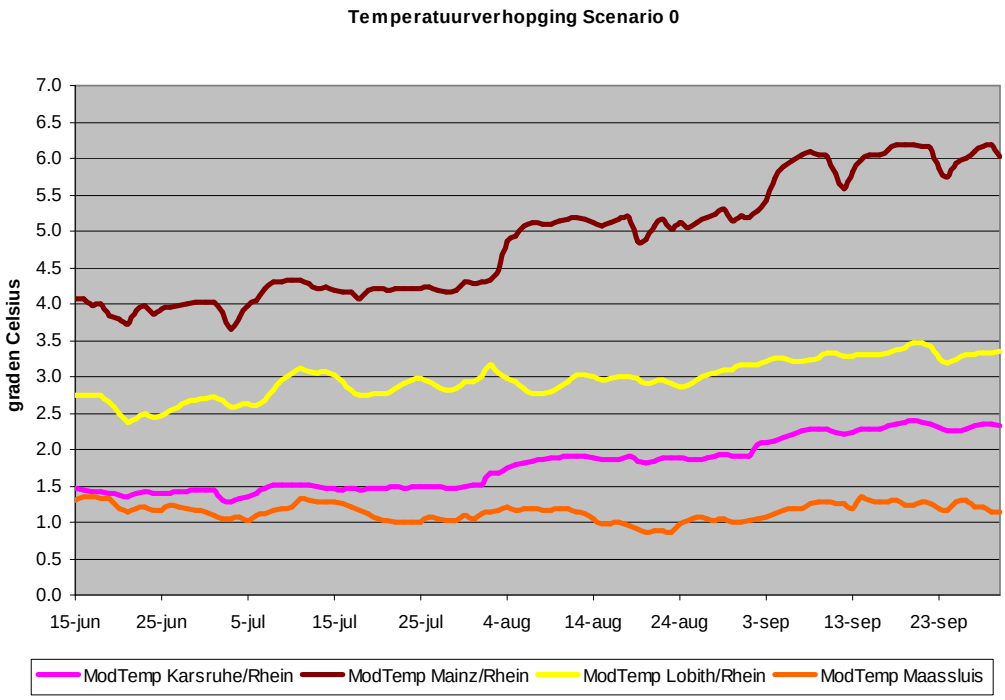
Tabel 4-1 Verschillende scenario's t.b.v. gevoeligheidsanalyse

Scenario	**Verandering ten opzichte van de referentieberekening (scenario 0)**
Scenario 1	Zomer 2003 met lozingrestricties
Scenario 2	Halveren lozingen traject Bodenmeer-Mannheim
Scenario 3a	Halveren lozing traject Mannheim-Koblenz
Scenario 3b	Verwijderen lozing traject Mannheim-Koblenz
Scenario 3c	Toename lozing traject Mannheim-Koblenz met 30%
Scenario 4	Halveren lozingen traject Koblenz-Noordzee
Scenario 5	Verhoging van de luchttemperatuur met 1ºC
Scenario 6a	Effect van een verlaagde afvoer tot minimale dagafvoer per maand
Scenario 6b	Effect van een verhoogde afvoer tot maximale dagafvoer per maand

4.2 De effecten van koelwaterlozingen

4.2.1 Scenario 0: het referentiescenario

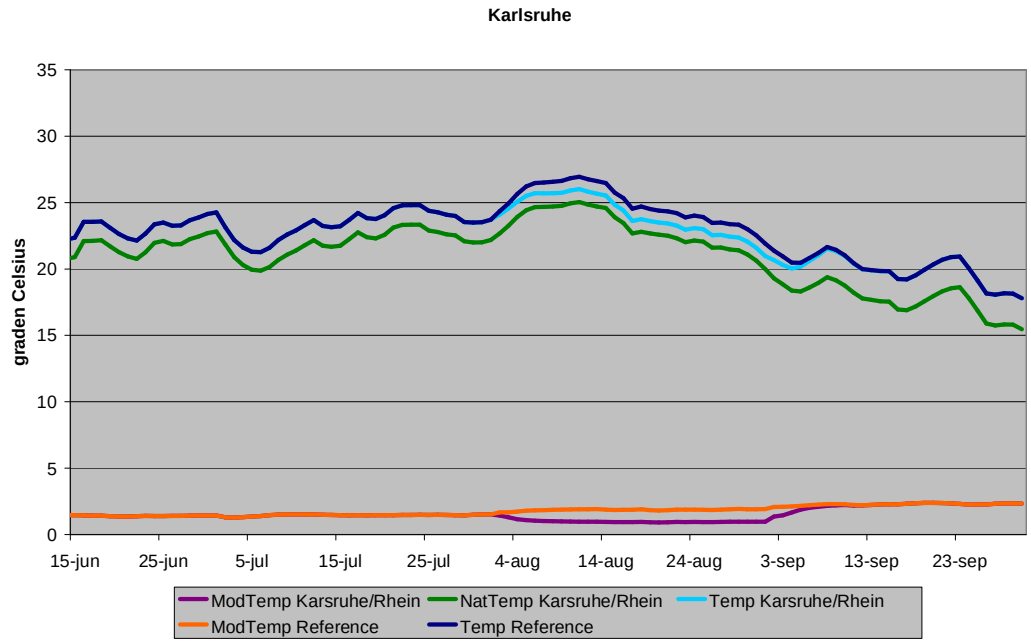
Het effect van de koelwaterlozingen is te zien in de temperatuurverhoging (ModTemp). Uitgaande van de vergunde warmtelozingen varieert de temperatuurverhoging bij Karlsruhe als gevolg van koelwaterlozingen bovenstrooms in het referentiescenario tussen de 1,3 en 2,4 ºC (zie Figuur 4-1). Bij Mainz, benedenstrooms van de grootste koelwaterlozingen, is er een temperatuurverhoging te vinden tussen de 3,7 en 6,2 ºC ten opzichte van de natuurlijke opwarming van het rivierwater. Bij Lobith is de verhoging constanter en kleiner tussen de 2,4 en 3,5 ºC en verder benedenstrooms bij Maassluis bedraagt de verhoging nog slechts 0,9 - 1,5 ºC. De variatie in de temperatuurverhoging bij een locatie ligt aan de variatie in afkoeling door de windsnelheden.



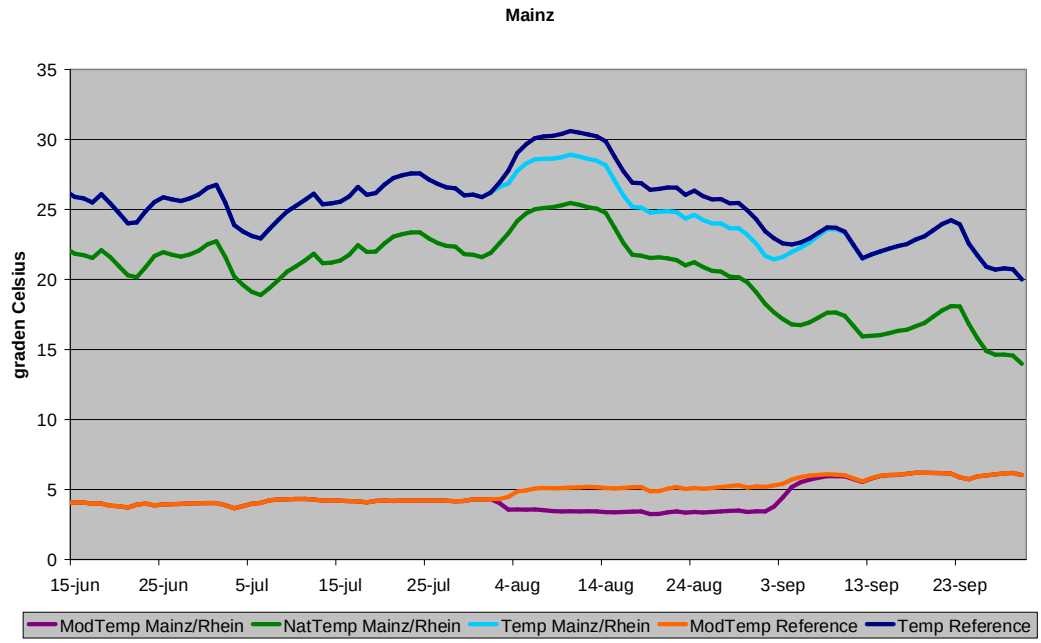
Figuur 4-1 Temperatuurverhoging als gevolg van warmtelozingen op de verschillende locaties Scenario 0.

4.2.2 Scenario 1: Zomer 2003 met lozingsrestricties.

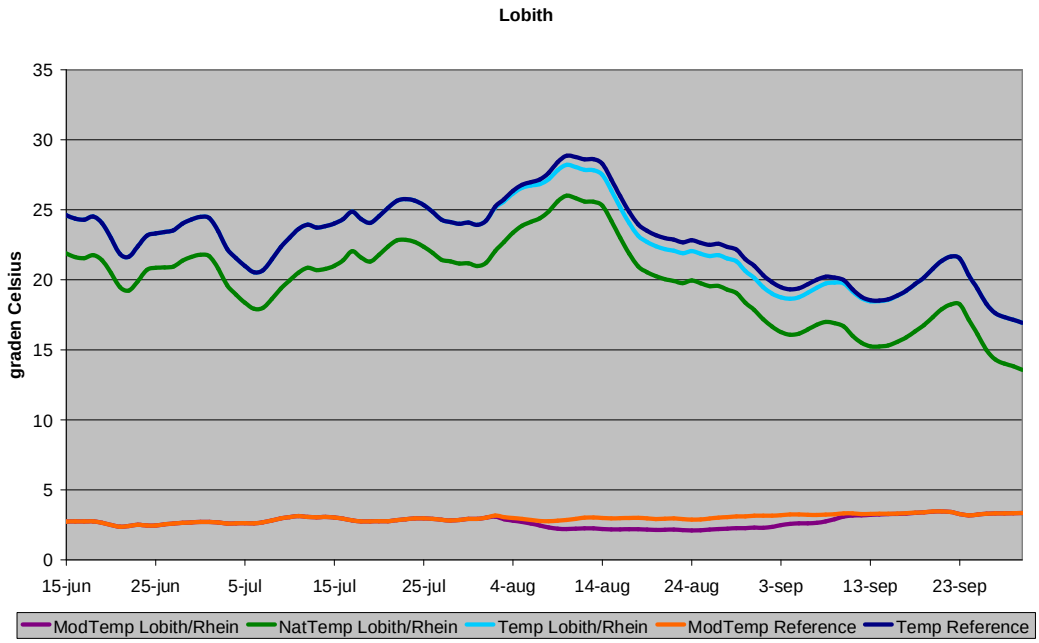
Figuur 4-2 tot en met Figuur 4-4 tonen het temperatuurverloop van de Rijn bij Karlsruhe, Mainz en Lobith. De effecten van de gereduceerde koelwaterlozingen op de riviertemperatuur tijdens de hitteperiode duidelijk te zien. Hoewel de opgelegde restrictie in het model tot en met 31 augustus geldig was, vertonen de temperatuurverhoging (ModTemp) en de riviertemperatuur (Temp) aan het begin van september nog steeds het effect van de restricties. Bij Mainz en Lobith benaderen de restricties de werkelijkheid goed. De hoogste temperatuurverlaging ten opzichte van het referentiescenario is te zien bij Mainz, maar ook bij Karlsruhe en Lobith zijn de effecten zichtbaar.



Figuur 4-2 Effect van lozingsrestricties op de watertemperatuur bij Karlsruhe in het jaar 2003.

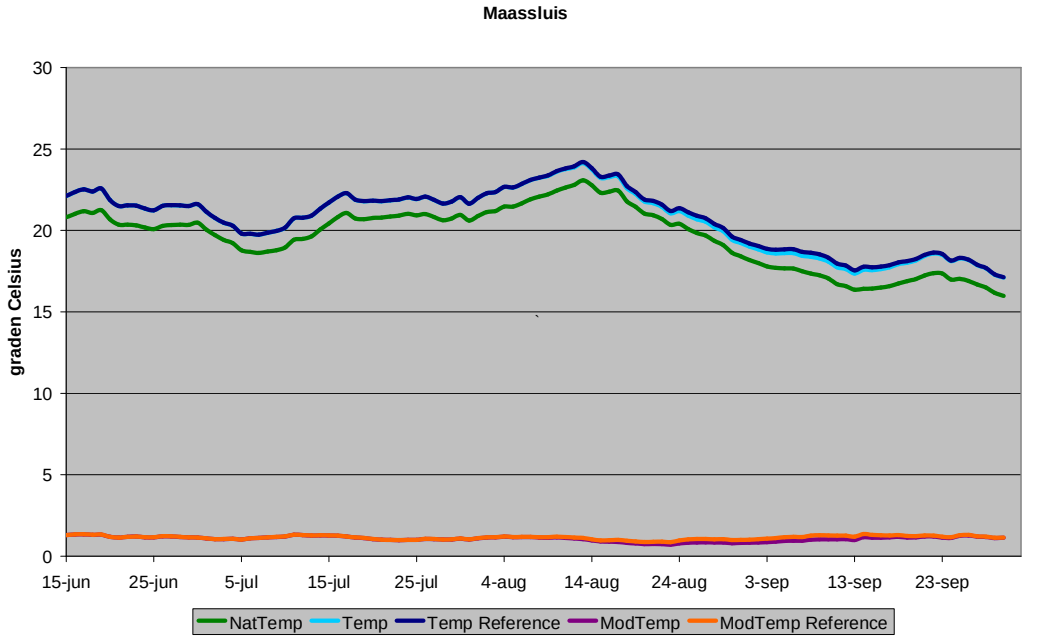


Figuur 4-3 Effect van lozingsrestricties op de watertemperatuur bij Mainz in het jaar 2003.



Figuur 4-4 Effect van lozingsrestricties op de watertemperatuur bij Lobith in het jaar 2003.

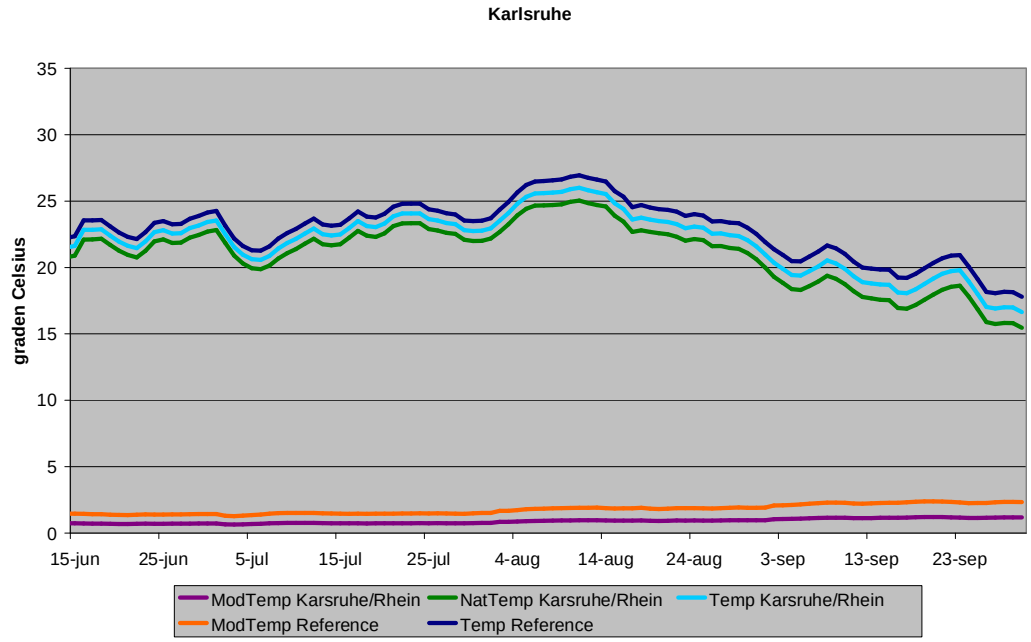
Figuur 4-5 laat zien dat bij Maassluis de riviertemperatuur (Temp) en de temperatuurverhoging (ModTemp) in scenario 1 overeenkomen met de resultaten van het referentiescenario (lijnen liggen op elkaar). Omdat het Landelijk Temperatuurmodel zowel in het referentiescenario als in de andere scenario's rekent met actuele lozingen, is bij Maassluis een klein verschil tussen beide scenario's tijdens de hitteperiode te zien.



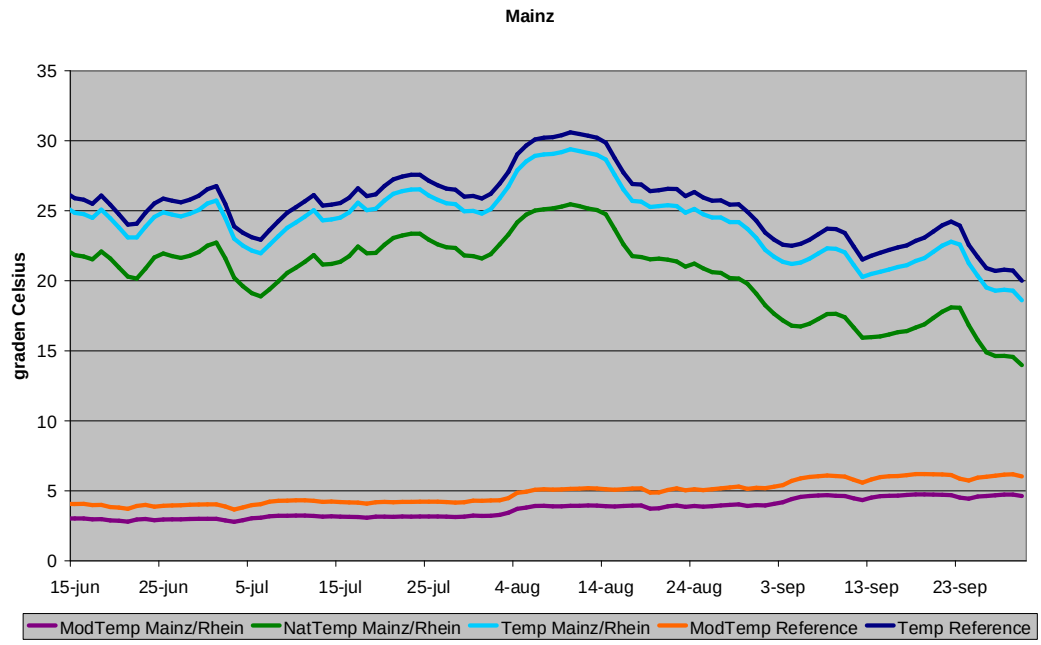
Figuur 4-5 Effect van lozingsrestricties op de watertemperatuur bij Maassluis in het jaar 2003.

4.2.3 Scenario 2: Halveren lozingen traject Bodenmeer-Mannheim (Zuid-Duitsland)

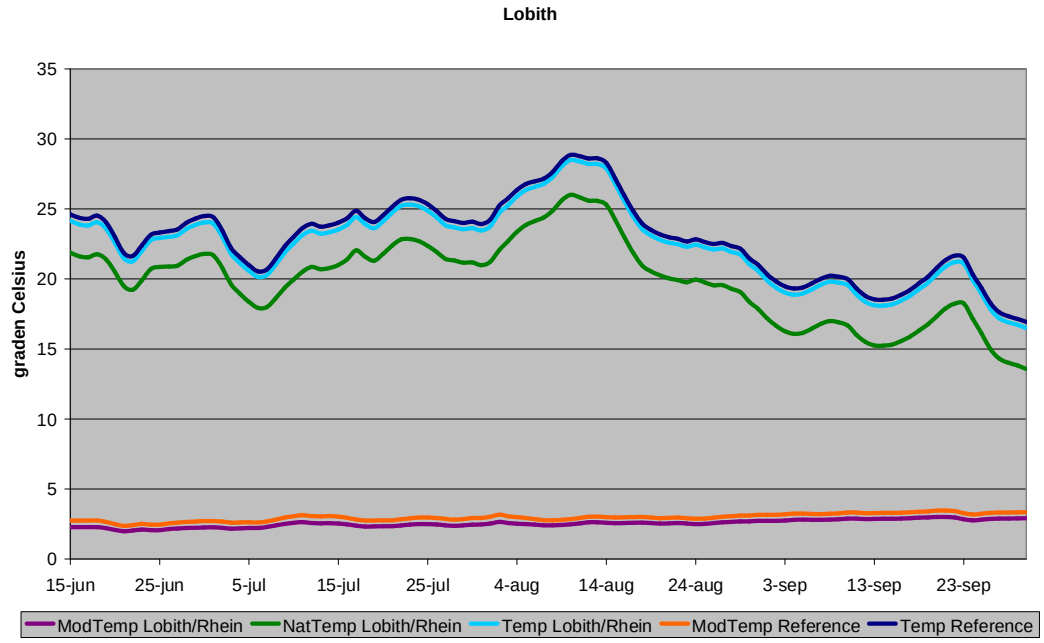
Het halveren van de lozingsvracht op het traject Bodenmeer-Mannheim leidt in ditzelfde gebied bij Karlsruhe (Figuur 4-6) tot een gemiddelde temperatuursverlaging van ongeveer 0,9 ºC ten opzichte van scenario 0. Verder benedenstrooms neemt het effect van de reductie af tot gemiddeld 0,5 ºC bij Lobith (Figuur 4-8). Bij Maassluis is dit effect nauwelijks te zien (Figuur 4-9).



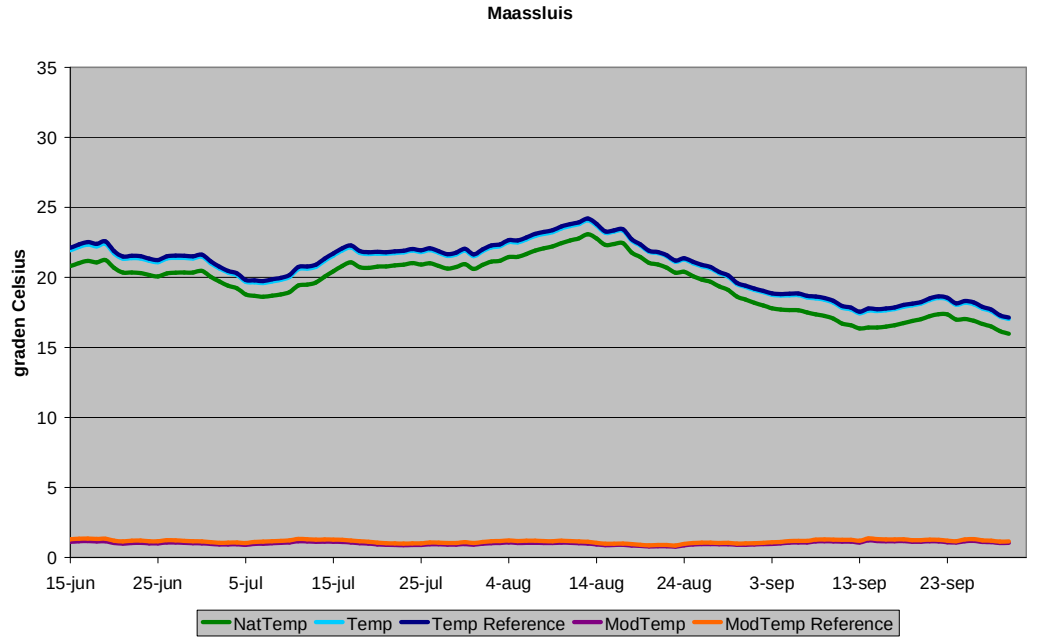
Figuur 4-6 Effect van het halveren van de lozingen op traject Bodenmeer-Mannheim op de watertemperatuur bij Karlsruhe in het jaar 2003.



Figuur 4-7 Effect van het halveren van de lozingen op traject Bodenmeer-Mannheim op de watertemperatuur bij Mainz in het jaar 2003.



Figuur 4-8 Effect van het halveren van de lozingen op traject Bodenmeer-Mannheim op de watertemperatuur bij Lobith in het jaar 2003.

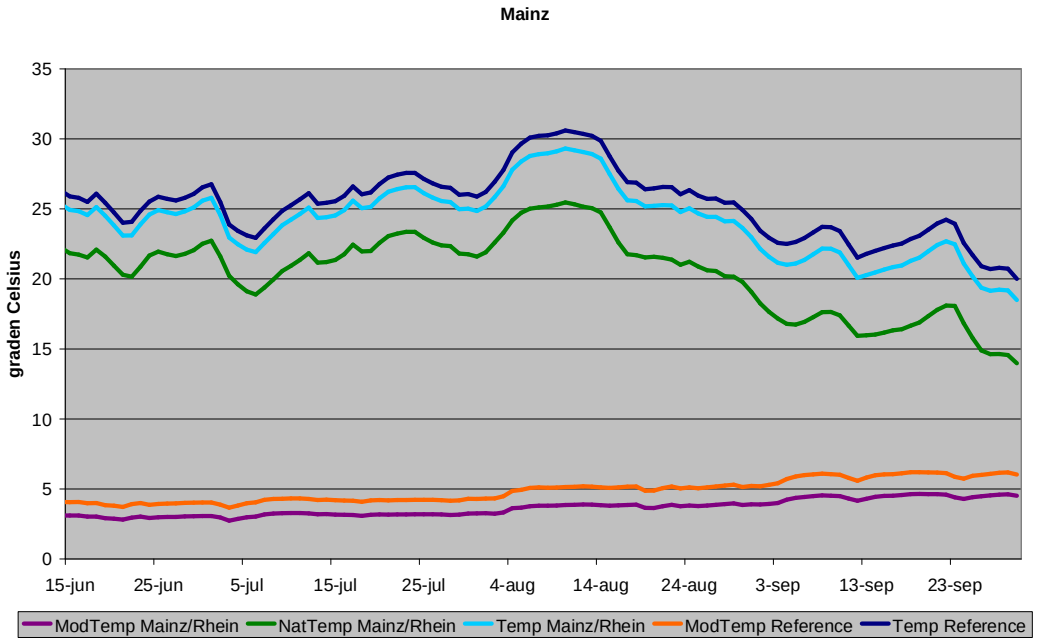


Figuur 4-9 Effect van het halveren van de lozingen op traject Bodenmeer-Mannheim op de watertemperatuur bij Maassluis in het jaar 2003.

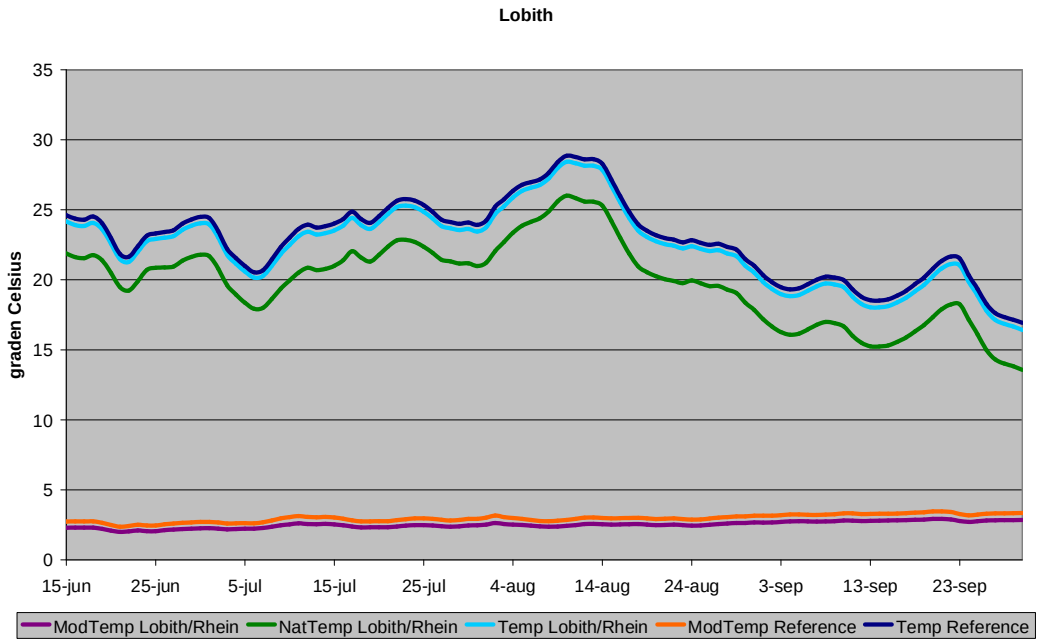
4.2.4 Scenario 3: Variatie lozingen traject Mannheim-Koblenz (Midden-Duitsland)

- **Scenario 3a: Halveren lozingen Midden-Duitsland**

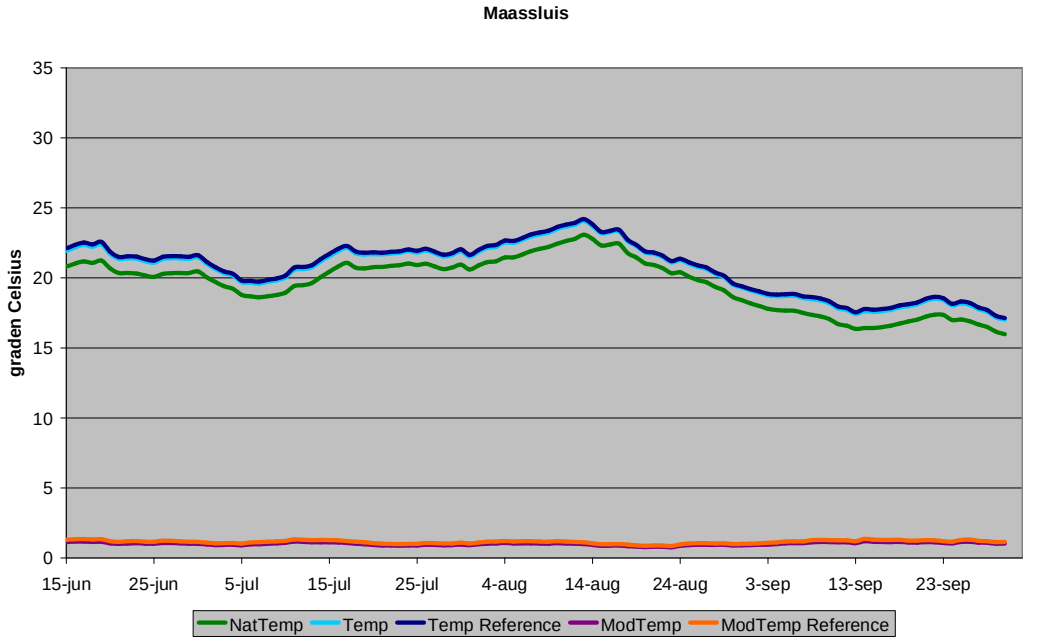
Het halveren van de lozing in Midden-Duitsland (Scenario 3a) heeft logischerwijs bovenstrooms van Mannheim geen effect op de watertemperatuur. Bij Mainz is het effect maximaal met 1,6 °C maximale verlaging ten opzichte van de referentieberekening (Figuur 4-10). Ter hoogte van Lobith is de afname echter beperkt tot minder dan 0,5 °C (Figuur 4-11) en bij Maassluis (Figuur 4-12) is geen effect zichtbaar. Het halveren van de lozing in Midden-Duitsland leidt tot vergelijkbare effecten in de watertemperatuur met scenario 2, vooral bij Mainz en Lobith.



Figuur 4-10 Effect van het halveren van de lozingen op het traject Mannheim-Koblenz (scenario 3a) op de watertemperatuur bij Mainz in het jaar 2003.



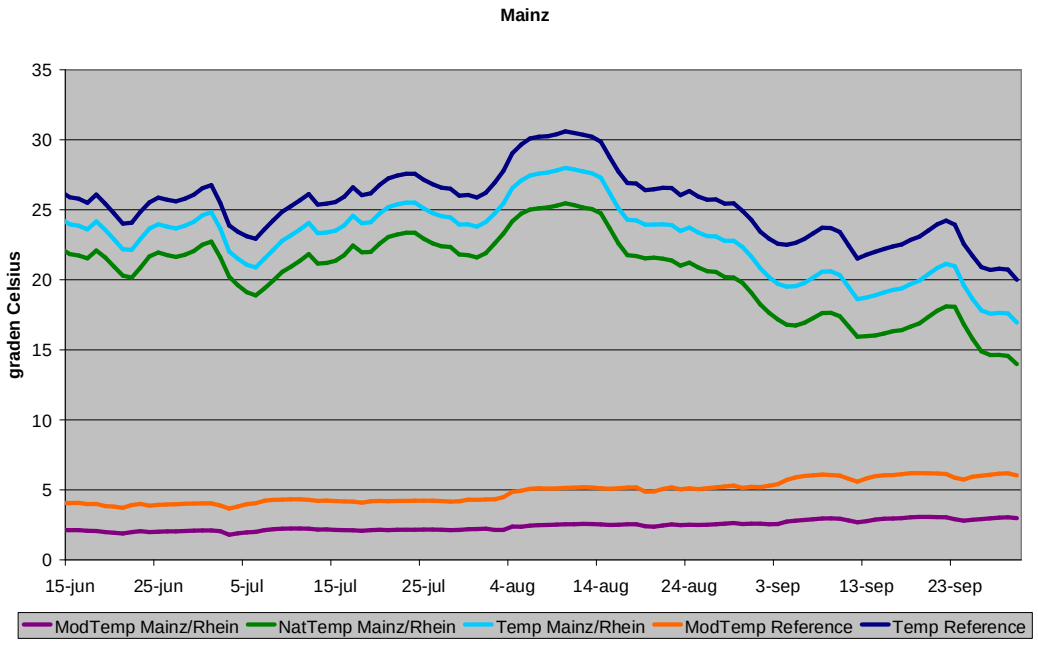
Figuur 4-11 Effect van het halveren van de lozingen op het traject Mannheim-Koblenz (scenario 3a) op de watertemperatuur bij Lobith in het jaar 2003.



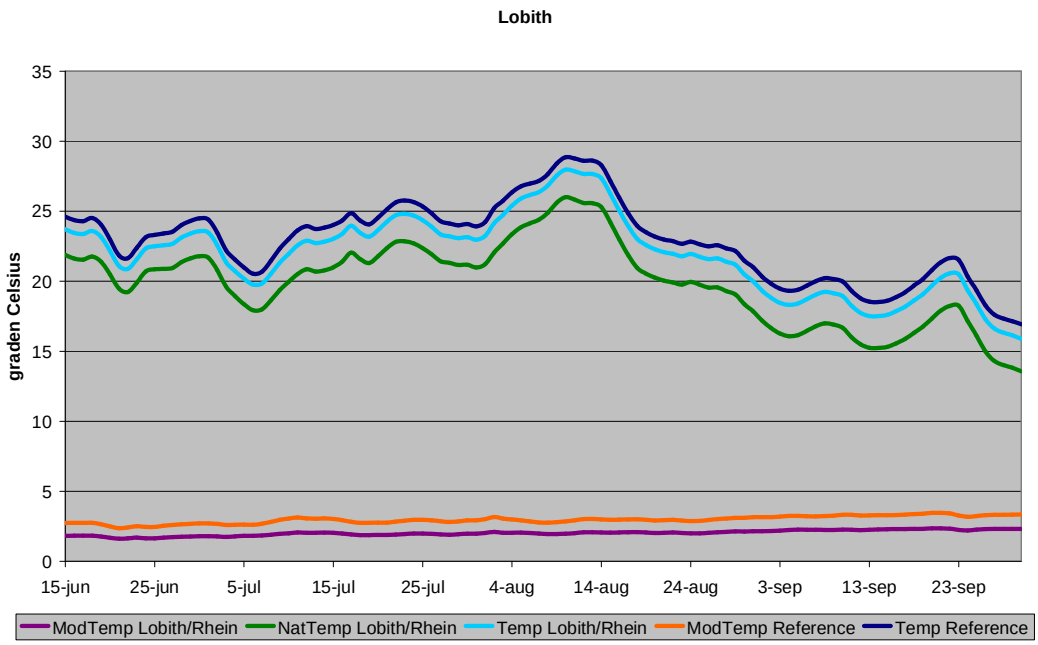
Figuur 4-12 Effect van het halveren van de lozingen op het traject Mannheim-Koblenz (scenario 3a) op de watertemperatuur bij Maassluis in het jaar 2003.

- **Scenario 3b: Verwijderen lozingen Midden-Duitsland**

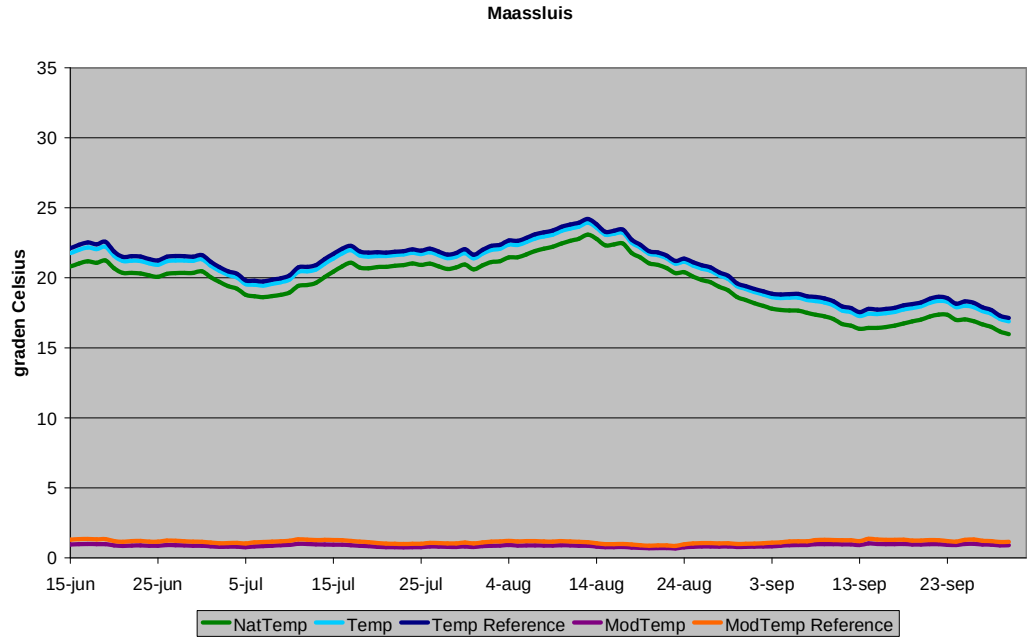
Dit scenario heeft geen effect bovenstrooms van Mannheim. Het verwijderen van de lozingen in Midden Duitsland leidt tot een temperatuurreductie in vergelijk met het referentiescenario tussen de 1,8 en de 3,2 °C bij Mainz (Figuur 4-13) en tussen de 0,8 en de 1,1 °C bij Lobith (Figuur 4-14). Dit scenario heeft het grootste effect bij Maassluis (Figuur 4-15) waar een verlaging in de temperatuur tot 0,4 °C optreedt.



Figuur 4-13 Effect van het verwijderen van de lozingen op het traject Mannheim-Koblenz (scenario 3b) op de watertemperatuur bij Mainz in het jaar 2003.



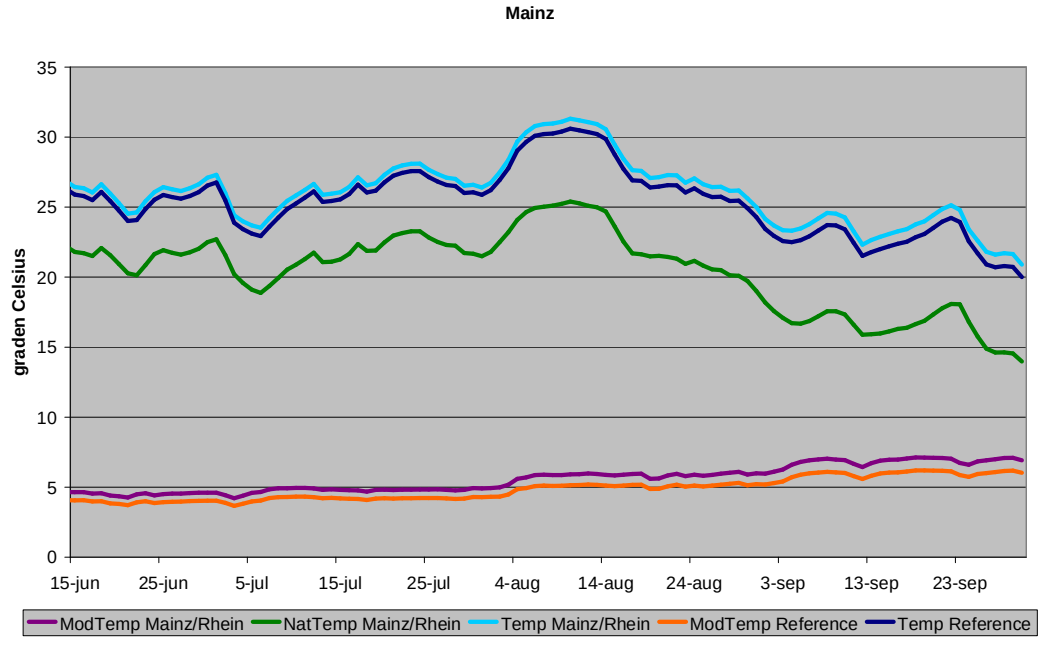
Figuur 4-14 Effect van het verwijderen van de lozingen op het traject Mannheim-Koblenz (scenario 3b) op de watertemperatuur bij Lobith in het jaar 2003.



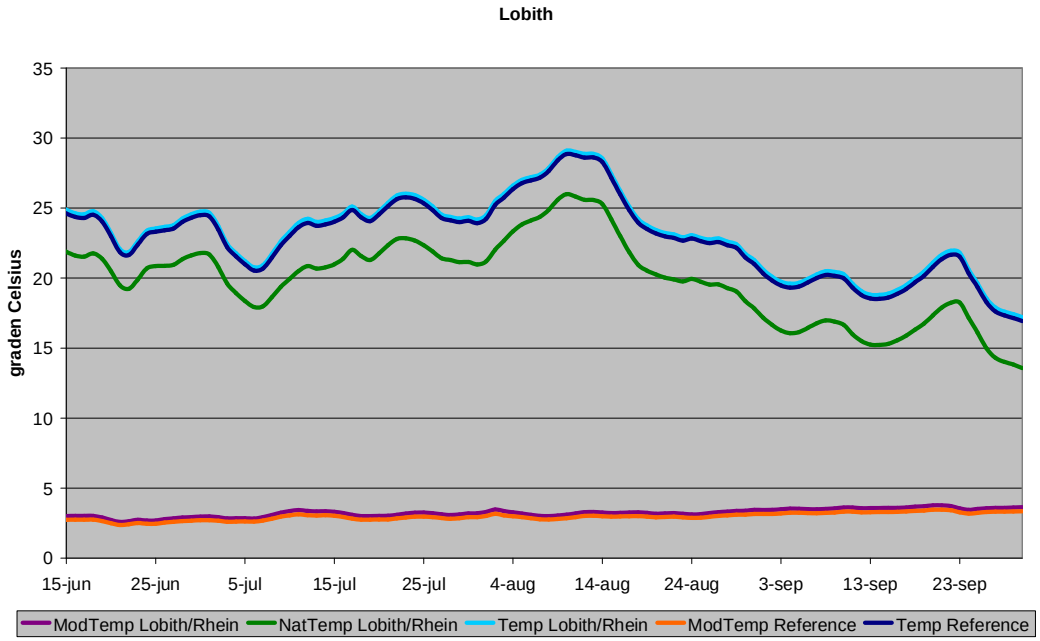
Figuur 4-15 Effect van het verwijderen van de lozingen op het traject Mannheim-Koblenz (scenario 3b) op de watertemperatuur bij Maassluis in het jaar 2003.

- **Scenario 3c: Toename van de lozingen Midden-Duitsland met 30%**

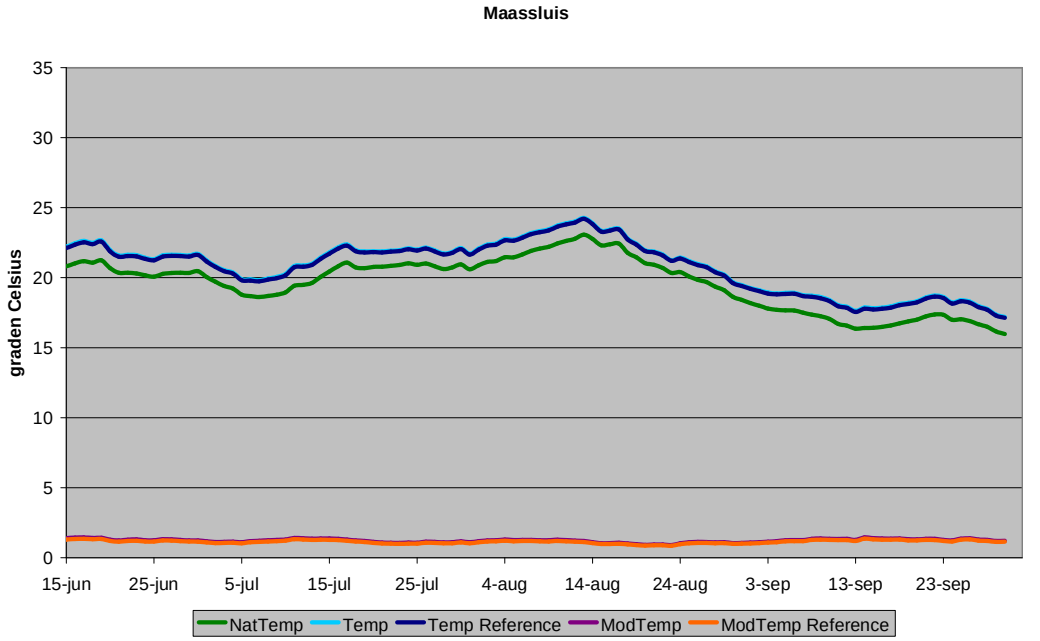
Ook dit scenario heeft geen effect bovenstrooms van Mannheim. Het effect van een toename van de lozingen in Midden Duitsland met 30% betekent bij Mainz een temperatuurverhoging ten opzichte van het referentiescenario van gemiddeld 0,7 °C (Figuur 4-16), terwijl het effect bij Lobith (Figuur 4-17) en Maassluis (Figuur 4-18) klein is.



Figuur 4-16 Effect van 30% toename van de lozingen op het traject Mannheim-Koblenz (scenario 3c) op de watertemperatuur bij Mainz in het jaar 2003.



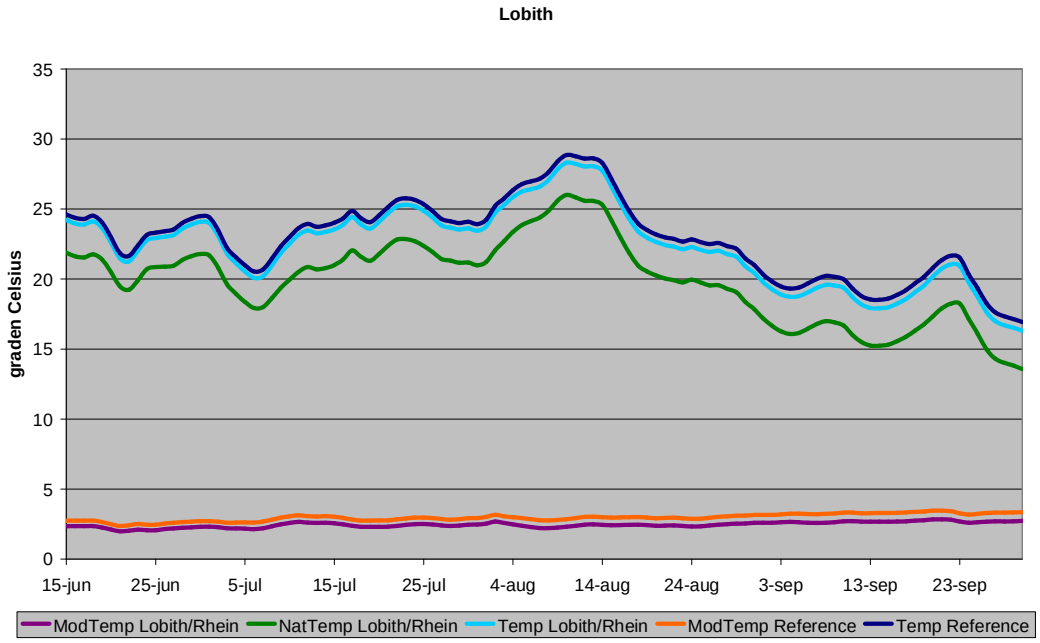
Figuur 4-17 Effect van 30% toename van de lozingen op het traject Mannheim-Koblenz (scenario 3c) op de watertemperatuur bij Lobith in het jaar 2003.



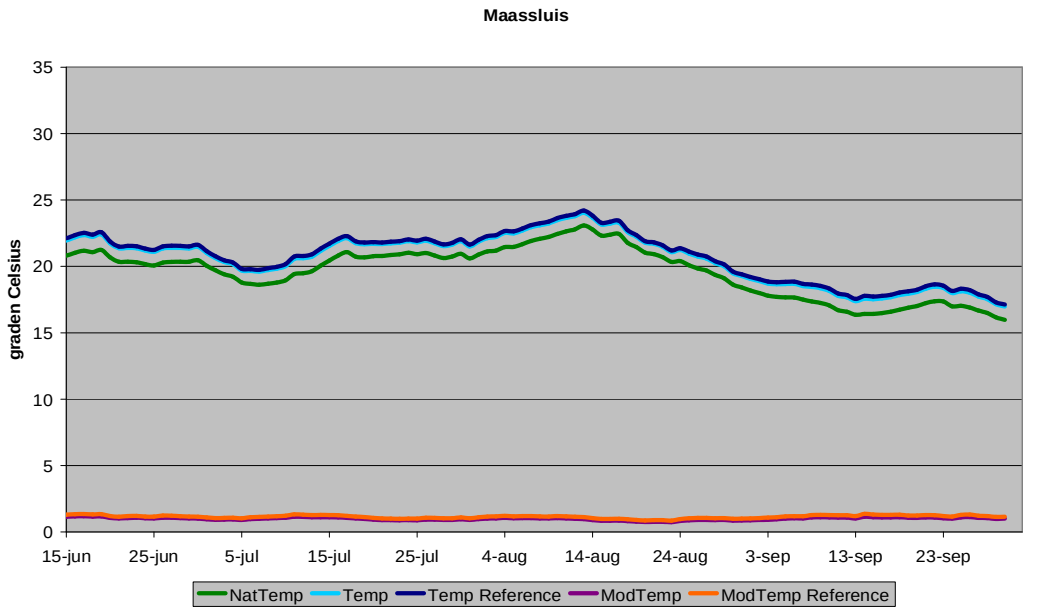
Figuur 4-18 Effect van 30% toename van de lozingen op het traject Mannheim-Koblenz (scenario 3c) op de watertemperatuur bij Maassluis in het jaar 2003.

4.2.5 Scenario 4: Halveren lozingen traject Koblenz-Noordzee

Het effect van dit scenario bij Lobith (Figuur 4-19) is een reductie in de temperatuur vergeleken met het referentiescenario tussen 0,4 en 0,6 °C. Bij Maassluis is het effect klein (Figuur 4-20). De temperatuur bij Maassluis is weinig afhankelijk van hetgeen bovenstrooms gebeurt. Bovendien, de lozingen op het traject van de Waal, die met een vergunde vracht zijn gedefinieerd en dus in dit scenario zijn gehalveerd, zijn relatief erg klein. Dit scenario heeft geen effect bovenstrooms van Koblenz.



Figuur 4-19 Effect van het halveren van de lozingen op het traject Koblenz-Noordzee op de watertemperatuur bij Lobith in het jaar 2003.



Figuur 4-20 Effect van het halveren van de lozingen op het traject Koblenz-Noordzee op de watertemperatuur bij Maassluis in het jaar 2003.

4.3 Variatie in meteorologie en hydrologie

4.3.1 Scenario 5: verhoging luchttemperatuur met 1°C

In dit scenario is de luchttemperatuur voor alle meteorologische stations met 1°C verhoogd. Dit resulteert voor alle meetstations in een redelijk constante toename van de achtergrondtemperatuur en ook van de riviertemperatuur. De toename varieert gemiddeld van 0,5 tot 0,7 °C ten opzichte van het referentiescenario en is per meetstation gegeven in Tabel 4-2. De maximale verhoging van de watertemperatuur ten opzichte van het referentiescenario's te zien bij Mainz, Koblenz, Düsseldorf en Lobith (gemiddeld 0,7 °C). Op dit traject is de Rijn dus gevoeliger voor opwarming door de luchttemperatuurverhoging dan elders. Dit verklaart ook het feit dat scenario's niet mogen opgeteld worden.

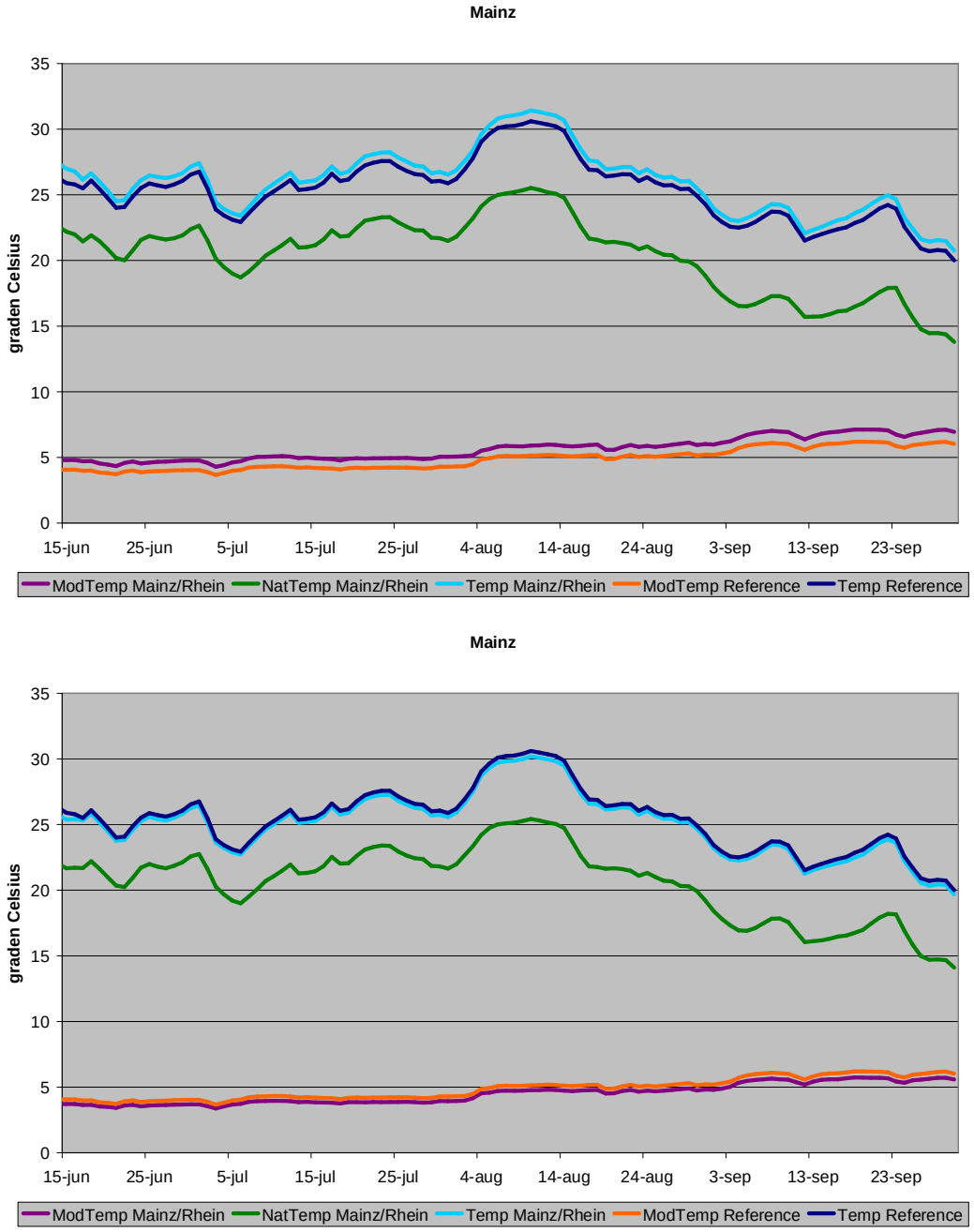
Tabel 4-2 Gemiddelde toename watertemperatuur van de Rijn bij de verschillende locaties

Locatie	**Toename riviertemperatuur (°C)**
Vogelgrün	0,5
Karlsruhe	0,5
Worms	0,6
Mainz	0,7
Koblenz	0,7
Düsseldorf	0,7
Lobith	0,7
Bovensluis	0,6
Maassluis	0,5

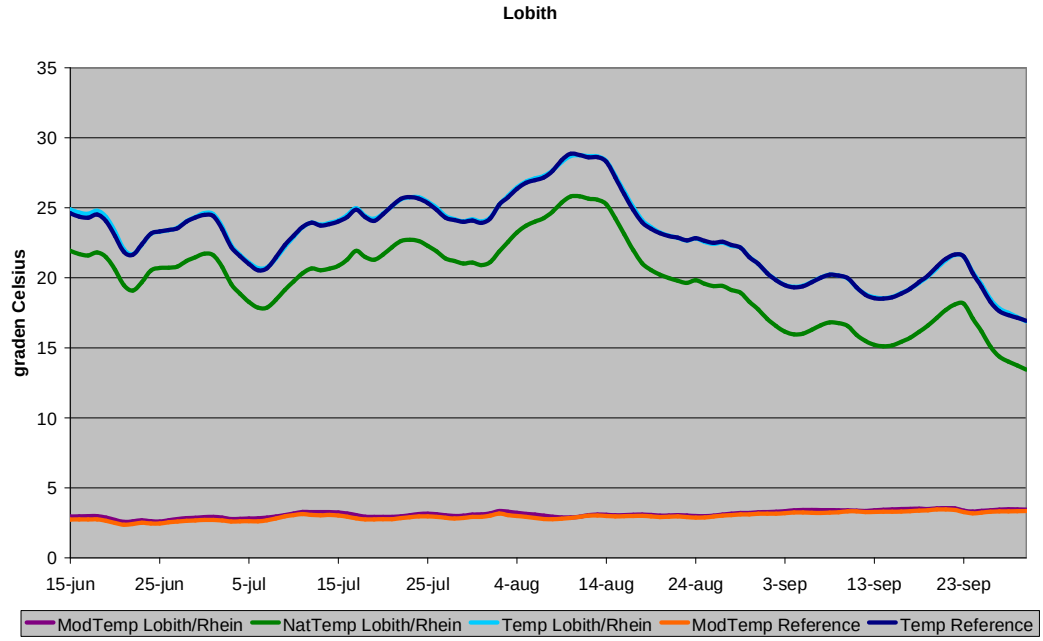
4.3.2 Scenario 6: Variatie afvoer

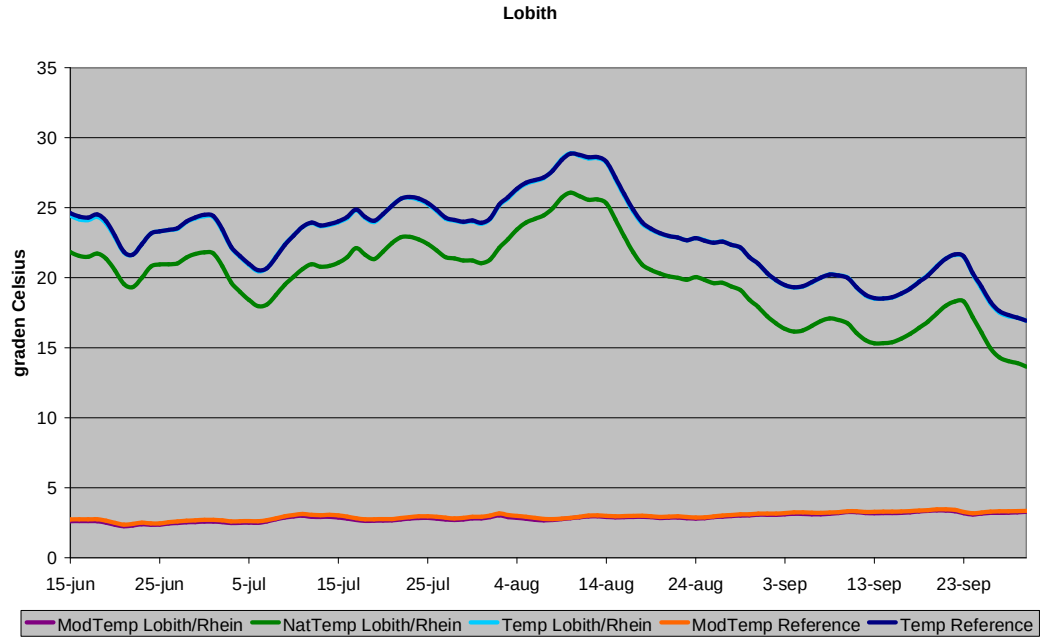
Het effect van de variaties in afvoer ten opzichte van het referentiescenario is significant. Wanneer de meetlocatie zich dichtbij de lozing bevindt, zoals bij Mainz het geval is, is het effect van de variatie in afvoer groter. In Mainz bevindt de meetlocatie zich namelijk dichtbij de lozingen van de Main (2366 MW). Figuur 4-21 toont bij Mainz een gemiddelde temperatuurreductie van 0,8 ºC in scenario 6a en een gemiddelde temperatuurverhoging van 0,4 ºC in scenario 6b. Hier heeft het debiet een grote invloed. Bij Karlsruhe en bij Lobith (Figuur 4-22) zijn echter de temperatuurverschillen tussen de beide scenario's klein.

In de modelcomponent benedenstrooms van Lobith zitten de variaties in afvoer op dagbasis en daardoor zijn deze scenario's voor het Landelijk temperatuurmodel niet berekend.



Figuur 4-21 Effect van het verlagen (a) en verhogen (b) van de afvoer op de watertemperatuur bij Mainz in het jaar 2003.





Figuur 4-22 Effect van het verlagen (a) en verhogen (b) van de afvoer op de watertemperatuur bij Lobith in het jaar 2003.

4.4 Bespreking van de simulatieresultaten

De berekende watertemperatuur bestaat uit twee componenten: de achtergrondtemperatuur en de temperatuurverhoging door warmtelozingen. De dagelijkse variatie in de gesimuleerde temperatuur van het rivierwater is voornamelijk het gevolg van variatie in de achtergrondtemperatuur (NatTemp). De variatie in temperatuurverhoging (ModTemp) is minder groot dan de variatie in achtergrondtemperatuur, omdat de opwarmende factor (warmtelozingen) constant blijft over de simulatieperiode. De resultaten van de scenarioberekeningen zijn samengevat in Tabel 4-3, waarbij de effecten op de watertemperatuur worden gepresenteerd ten opzichte van het referentiescenario. De hoogste variatie in de watertemperatuur voor alle scenarioberekeningen is te zien bij Mainz. Deze locatie ligt dichtbij de lozingen nummer 16 en 17. Bij Maassluis varieert de watertemperatuur weinig. De verdunning van de warmte en de uitwisseling met de atmosfeer spelen hierbij een grote rol. Daardoor mogen de resultaten van de scenario's ook niet bij elkaar worden opgeteld. Dus het effect bij Lobith van het halveren van de lozingen op het traject Bodenmeer-Koblenz is niet gelijk aan de som van de temperatuurverlaging van scenario 2 en 3a bij Lobith.

Tabel 4-3 Scenario's voor de gevoeligheidsanalyse: Verandering van de riviertemperatuur ten opzichte van het referentiescenario op vier locaties in het Rijnstroomgebied. De scenario's in rood betekenen een verhoging in de riviertemperatuur, terwijl de rest een verlaging toont.

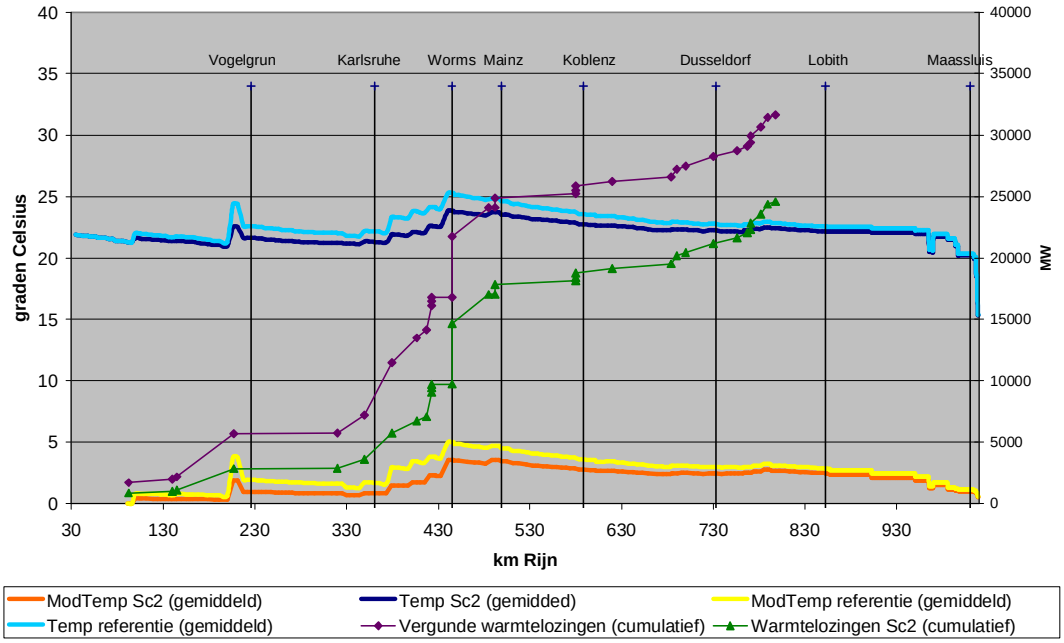
	Scenario	**Variatie in de riviertemperatuur (ºC) ten opzicht van het referentiescenario**			
		Karlsruhe	*Mainz*	*Lobith*	*Maassluis*
0	Referentieberekening zomer 2003	-	-	-	
1	Zomer 2003 met lozingrestricties*	< 1	< 1,8	< 0,9	< 0,3
2	Halveren lozingen Bodenmeer-Mannheim	0,6 - 1,2	0,9 -1,5	0,4 - 0,5	< 0,2
3a	Halveren lozing Mannheim-Koblenz	-	0,9 -1,6	0,4 - 0,5	< 0,2
3b	Verwijderen lozing Mannheim-Koblenz	-	1,8 - 3,2	0,8 - 1,1	0,2 - 0,4
3c	Toename lozing Mannheim-Koblenz met 30%	-	0,5 - 0,9	0,2 - 0,3	< 0,1
4	Halveren lozingen traject Koblenz-Noordzee	-	-	0,4 - 0,6	< 0,2
5	Verhoging van de luchttemperatuur met 1ºC	0,4 - 0,6	0,5 - 0,7	0,5 - 0,7	0,5 - 0,6
6a	Effect van een verlaagde afvoer tot minimale dagafvoer per maand	< 0,4	0,5 - 1	< 0,3	-
6b	Effect van een verhoogde afvoer tot maximale dagafvoer per maand	< 0,2	0,3 - 0,5	< 0,2	-

*Effect op de riviertemperatuur in augustus.

Lozingrestricties zoals in scenario 1 hebben een significante verlaging van de watertemperatuur van de Rijn tot gevolg. De modelresultaten met lozingsrestricties komen tijdens de hitteperiode beter met de gemeten waarden overeen dan de resultaten van het referentiescenario, behalve bij Karlsruhe. De maximale lozingstemperatuur is in Duitsland conform de Europese viswaterrichtlijn 28 ºC (CIW, 2004). De enige locatie waar de 28 ºC sterk wordt overschreden is Mainz (ongeveer 1ºC), maar deze locatie ligt dichtbij de lozingen. Voor Lobith en Koblenz wordt de viswaterrichtlijn met 0,2 ºC overschreden.

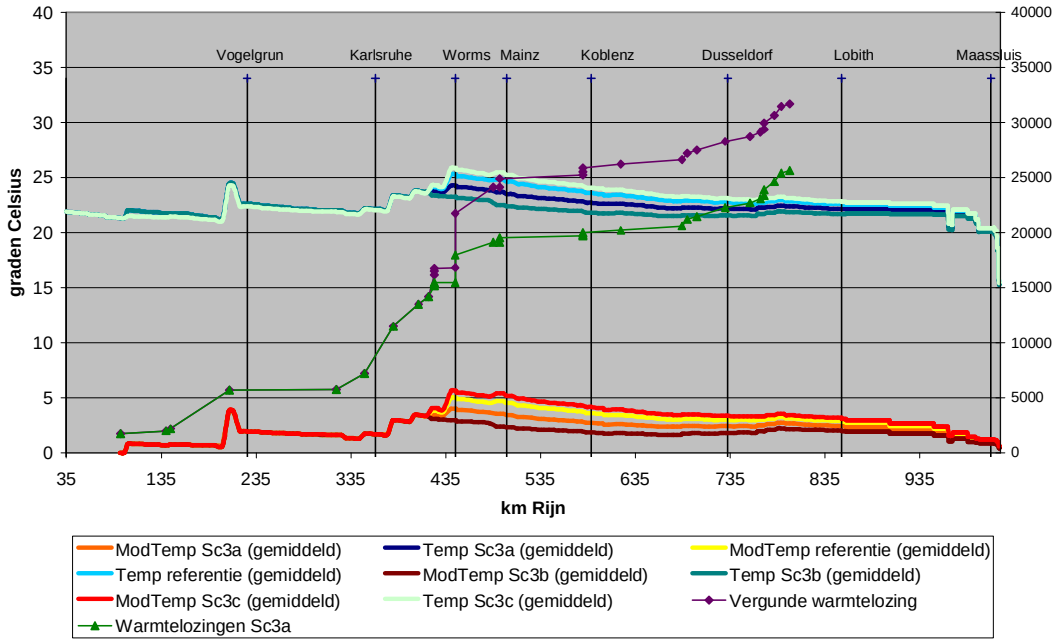
Op de overige locatie overschrijdt de watertemperatuur de 28 ºC niet. De aannamen van de lozingrestricties lijken goed. Benedenstrooms van Lobith is dit effect nauwelijks te zien, omdat in het Nederlandse deel van het model de lozingsrestricties al in de referentiescenario zijn opgenomen. Voor NL geldt onder normale omstandigheden ook 28 graden als maximaal temperatuur.

Veranderingen in de hoeveelheid geloosd koelwater in Zuid- en Midden-Duitsland hebben een merkbaar effect op de watertemperatuur. Figuur 4-23 en Figuur 4-24 illustreren de mate van afwenteling van de koelwaterproblematiek in de scenario's waarin de omvang van de lozingen varieert. Vlak bij de lozing zal het verschil tussen referentiesituatie en scenario het grootst zijn en dit effect neemt verder benedenstrooms af. De reductie van de lozingsvracht heeft slechts een beperkte invloed op de watertemperatuur bij Lobith. Halveren van de lozingen op een traject leidt tot een maximale watertemperatuur verlaging van 0,5 ºC bij Lobith. Alleen het verwijderen van de lozingen in Midden Duitsland (scenario 3b) leidt tot een grotere temperatuurreductie bij Lobith (1,0 ºC). Het traject Worms-Düsseldorf wordt het meeste beïnvloed. Benedenstrooms van Lobith neemt dit effect af en bij Maassluis is het effect nog nauwelijks merkbaar, behalve in het scenario waarin de lozingen worden verwijderd. Er zit een factor 2 in de mate waarin de watertemperatuur afneemt in het scenario waarin de lozingen worden gehalveerd en waarin de lozingen worden verwijderd. Dit geldt voor het gehele traject Mainz – Maassluis en suggereert een lineaire relatie tussen de veranderingen in de lozingen op dit traject en het effect in de riviertemperatuur ten opzichte van het referentiescenario. Het effect van een toename van de lozingen in dit traject met 30% (scenario 3c) betekent een verhoging in de temperatuur in vergelijk met het referentiescenario. De maximale verhoging is in dit scenario 0,9 ºC bij Mainz en 0,3 ºC bij Lobith.

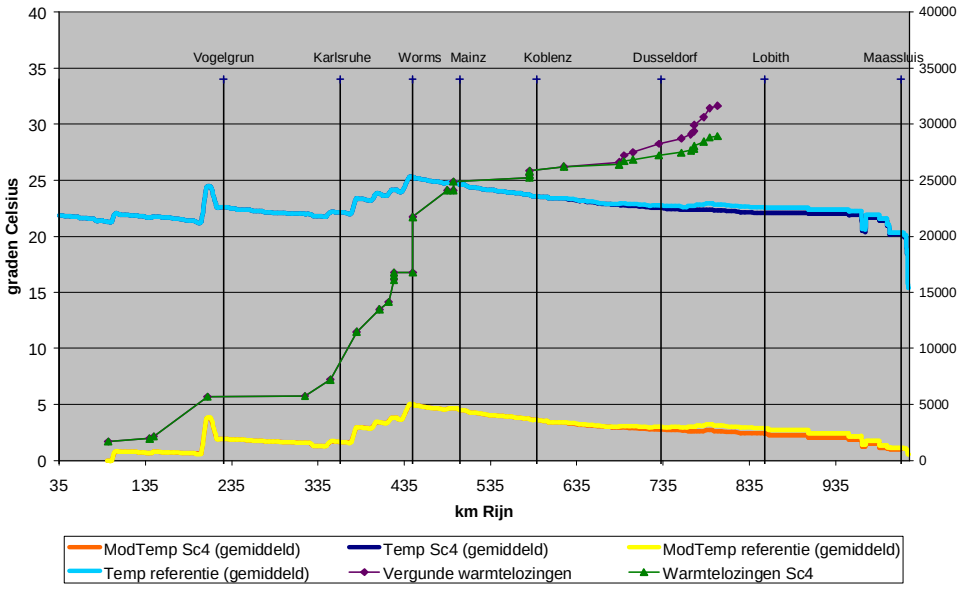


Figuur 4-23 Verloop van de gemiddelde riviertemperatuur (Temp) en gemiddelde temperatuurverhoging (ModTemp) van de Rijn in scenario 2 in vergelijking met het referentiescenario. In lila: de cumulatieve verdeling van de vergunde warmtevracht op de Rijn tot Lobith. In groen: de warmtevracht volgens scenario.

Het halveren van de lozingen op het traject Koblenz-Noordzee heeft zoals verwacht een merkbaar effect op de riviertemperatuur op het traject Koblenz-Dusseldorf (zie Figuur 4-25). Ook bij Lobith kan een duidelijk effect gezien worden. Het temperatuurverloop bij Lobith in scenario 4 is vergelijkbaar met het temperatuurverloop dat gevonden is in scenario 1 (met warmtelozingrestricties). Vanaf hier neemt dit effect af en bij Maassluis is het verschil in de riviertemperatuur met het referentiescenario kleiner dan 0,2 ºC.



Figuur 4-24 Verloop van de gemiddelde riviertemperatuur (Temp) en gemiddelde temperatuurverhoging (ModTemp) van de Rijn in scenario 3 in vergelijking met het referentiescenario. Dit figuur toont het halveren van de lozingen (scenario 3a), verwijderen van de lozingen (scenario 3b) en toename van de lozingen met 30% (scenario 3c) op het traject Mannheim-Koblenz. In lila: de cumulatieve verdeling van de vergunde warmtevracht op de Rijn tot Lobith. In groen: de warmtevracht volgens scenario 3a.



Figuur 4-25 Verloop van de gemiddelde riviertemperatuur (Temp) en gemiddelde temperatuurverhoging (ModTemp) van de Rijn in scenario 4 in vergelijking met het referentiescenario. In lila: de cumulatieve verdeling van de vergunde warmtevracht op de Rijn tot Lobith. In groen: de warmtevracht volgens scenario.

Het effect van het verhogen van de luchttemperatuur is aanzienlijk. Scenario 5 laat zien dat de verhoging van de luchttemperatuur met 1 ºC tot een verhoging van de watertemperatuur (Temp) met 0,4 tot 0,7 ºC leidt. Verhoging van de luchttemperatuur heeft alleen een effect op de achtergrondtemperatuur.

Het effect van variaties in afvoer ten opzichte van het referentiescenario niet erg groot maar wel significant (<0,3 ºC bij Lobith en < 0,4 ºC bij Karlsruhe). Het effect is absoluut gezien groter wanneer de meetlocatie dichtbij de lozingen ligt, zoals bij Mainz. Het effect op de watertemperatuur wordt volledig verklaard uit het effect van lozingen (ModTemp). De afwijking van het referentiedebiet gemiddeld over de hele zomer bedraagt een dergelijk ±16% (hoge afvoer is 1400 m3/s, lage afvoer is 1000 m3/s). In de referentie situatie is de bijdrage van alle lozingen bij Lobith een dergelijk 2ºC, de te verwachten variatie als gevolg van debiet is daar dan dus 16% van 2ºC, zo'n 0.3 ºC. Merk op dat het hydrodynamische scenario géén effect sorteert via de natuurlijke temperatuur (NatTemp). Als in het model grondwater opgenomen zou zijn en het aandeel grondwater in de hydrodynamische scenario's verandert dan kan het effect op de gemodelleerde temperatuur bij Lobith vele malen groter zijn dan met het huidige model berekend wordt.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Het gebruikte temperatuurmodel beschrijft na de kalibratie de natuurlijke temperatuur van het rivierwater en de effecten van de koelwaterlozingen op de watertemperatuur bovenstrooms van Lobith redelijk goed. Bij de kalibratie van het model is een aantal zaken, waaronder instromend (koeler) grondwater en warmteoverdracht naar de bodem verwerkt, in de uitwisseling met de atmosfeer. De natuurlijke veranderingen in de riviertemperatuur zijn vooral het gevolg van de meteorologische factoren instraling, wind en luchttemperatuur, en minder van luchtdruk, relatieve luchtvochtigheid en windrichting

De bijdrage van vergunde koelwaterlozingen (zonder restricties) aan de opwarming van de rivier (temperatuurverhoging) is significant en varieert afhankelijk van de locatie tussen de 1 en 6 ºC.

Het verminderen van de warmtevracht heeft een verlagend effect op de watertemperatuur bij Lobith (minder dan 0.5°C). De opgelegde lozingsrestricties tijdens warme en droge perioden hebben zeker een effect op de watertemperaturen elders en kunnen daardoor extra ruimte bieden om calamiteiten in het stroomgebied te voorkomen. Een significant effect van veranderingen in lozingen is vooral merkbaar tot circa honderd kilometers van de lozingen. Maatregelen, die leiden tot een halvering van de warmtevracht, hebben over een riviertraject van 300-350 kilometer een duidelijk effect. Na deze afstand heeft zich een nieuw evenwicht ingesteld als gevolg van warmteuitwisseling met de atmosfeer. De resultaten van de scenario's kunnen niet bij elkaar worden opgeteld. De verdunning van de warmte speelt hierbij een grote rol.

De temperatuurverlaging in scenario 3 is kleiner dan verwacht. Omdat het grootste deel van de warmtelozers zich op het traject Mannheim-Koblenz (Midden Duitsland) bevindt is de afwenteling van de warmteproblematiek in Midden Duitsland naar Nederland dus volgens de modelresultaten gering (0,5˚C). Het verminderen van de warmtelozingen op het traject tussen Koblenz en Lobith heeft een vergelijkbaar effect. Benedenstrooms van de lozingspunten (vanaf Worms) neemt de watertemperatuur heel geleidelijk af als gevolg van warmteuitwisseling met de atmosfeer en toename van het debiet. Op dit traject wordt nog wel warmte geloosd, maar blijkbaar zorgen die lozingen niet voor een toename van de watertemperatuur t.o.v. de watertemperatuur bij Worms.

Het temperatuurverloop in de Rijn kent door de koelwaterlozingen op een aantal punten flinke temperatuursprongen, die groter zijn dan de 1,5 graden temperatuursprong die zalmachtigen kunnen verdragen. Deze temperatuursprongen treden op als gevolg van de warmtelozingen.

Temperatuursverhogingen t.g.v. koelwaterlozingen lijken maar een kleine component van de totale watertemperatuur van de Rijn. Echter natuurlijke omstandigheden (meteorologie en hydrologie) kunnen niet gestuurd worden, de temperatuurverhoging door koelwaterlozingen daarentegen wel.

5.2 Aanbevelingen

Het huidige temperatuurmodel bovenstrooms van Lobith kent een aantal tekortkomingen in de invoer die de modelresultaten sterk beïnvloeden en relatief eenvoudig verholpen kunnen worden. Het verdient aanbeveling om deze als eerste te verhelpen. Het betreft:

- toevoegen van de bijdrage van grondwater aan de watertemperatuur;
- toevoegen van gemeten watertemperaturen op een aantal zijrivieren;
- gebruik van gemeten straling of gebruik van een verbeterde benaderingsmethode voor de straling;
- het gebruik van gemeten windmetingen in m/s in plaats van windgegevens die afgeleid zijn uit Beaufort schaalklasses.

In het huidige model zijn hydrologie en hydrodynamica sterk vereenvoudigd en dit vormt een beperking voor volledige kalibratie. De tekortkomingen van het Rijn-Alarm-Model zijn het ontbreken van dwarsprofielen, maandelijks constante debieten en een niet sluitende waterbalans. Het verdient aanbeveling om een volledig hydrodynamisch model in SOBEK op te zetten, een dergelijk model sluit dan ook beter aan bij het Landelijk Temperatuur model.

Volgens de modelstudie zorgen de koelwaterlozingen voor een min of meer constante temperatuurverhoging van het Rijnwater. In werkelijkheid zal de lozingsvracht meer aan schommelingen onderhevig zijn. Het verdient aanbeveling in samenwerking met de industrie het werkelijke lozingsgedrag te onderzoeken. Een mogelijkheid van modelinvoer zou zijn de energieproductie te benaderen als een functie van de tijd van het jaar en de weersomstandigheden.

Verdere verfijning van het warmtemodel, zoals de uitwisseling met de bodem, is pas aan te bevelen nadat bovengenoemde verbeteringen zijn doorgevoerd.

6 Literatuur

Commissie Intergraal Waterbeheer CIW (2004). *CIW beoordelingssystematiek warmtelozingen.* Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Conceptrapport.

Délégacion de bassin Rhin-Meuse DBRM (2005). *Eléments de mise a jour de l'inventaire des rejets thermiques sur le Rhin. Informations de la délégation française a destination du GT S de la CIPR le 24/10/05.* 05 123 NT VB DBRM.

Internationale Commissie ter Berscherming van de Rijn ICBR (2004a). *Inventar der Wärmeeinleitungen/ Inventaire des rejets thermiques.* S 19-04d.doc.

Internationale Commissie ter Berscherming van de Rijn ICBR (2004b). *Warmebelastung der Gewasser im sommer 2003.* IKSR- Bericht Nr 142d.

Koninklijk Nederlands *Meteorologisch Instituut KNMI (2000)*. Maandoverzicht van het weer in Nederland, 97e jaargang nummer 1-3 en 6-9. De Bilt

Koninklijk Nederlands *Meteorologisch Instituut KNMI (2003)*. Maandoverzicht van het weer in Nederland, 100e jaargang nummer 6-9. De Bilt

Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2003). *Rheinüberwachungs-Station Weil am Rhein. Jahresbericht 2003*

Neue Energie (9/2003). *Sommer 2003: Versorgungssicherheit der konventionellen Kraftwerke in Deutschland bei Hitze*. http://www.sfv.de/lokal/mails/phj/versorgs.htm

Sweers, H.E. (1976). *A monogram to estimate the heat echange coefficient at the air-water interface as a function of windspeed and temperature; a critical survey of some literture.* Journay of Hydrology, vol 30, pp.

WL | Delft Hydraulics (1995). *Technical Reference Manual Delwaq 4.*

WL | Delft Hydraulics (2003a). *Warmtelozing in oppervlaktewater en uitwisseling met de atmosfeer: een inventarisatie van rekenmethodieken en modellen.* Rapportnr. Q3315, 101 p. In opdracht van Rijkswaterstaat RIZA.

WL | Delft Hydraulics (2003b). *Temperatuurmodellering Maas.* Projectnr. Q3527, 109 p. In opdracht van Rijkswaterstaat RIZA.

WL | Delft Hydraulics (2004a). *SOBEK landelijk temperatuurmodel.* Rapportnr. Q3861. In opdracht van Rijkswaterstaat RIZA.

WL | Delft Hydraulics (2004b). *Mogelijkheden voor het opzetten van een meetplan voor koelwaterlozingen – memo.* Projectnr. Q3472.16, 10 p. In opdracht van Rijkswaterstaat RIZA.

WL | Delft Hydraulics (2005). *Quick scan warmtelozingen Rijnstroomgebied.* Rapportnr. Q4100. In opdracht van Rijkswaterstaat RIZA.

WL | Delft Hydraulics (2006). *Verificatie SOBEK landelijk temperatuur model.* Rapportnr. Q4161 (in voorbereiding). In opdracht van Rijkswaterstaat RIZA.

BIJLAGEN

A Warmtelozingen

Tabel 1 Inventarisatie van de vergunde warmtelozingen in 2004 bovenstrooms van Lobith, zonder rioolwaterzuiveringsinstallaties (ICBR, 2004; DBRM, 2005)

Rijntraject			**Lozingen**			
			in MW			
Nr	**Traject**	**rivier km**	**Totaal I + E < 200**			**> 200**
			D	CH	F	0
2	Aare lozing (Aare)	2 (Rijn km 102)				1700
3a	Aare – Village-Neuf	150	270			
3b	Aare – Village-Neuf	155		200		
6	Fessenheim – Breisach	215				3520
8	Straßburg – Seltz	330	46			
9	Seltz – Philippsburg	359				1465
10	Philippsburg – Mannheim	390				4265
11	Mannheim – Neckar	416,5				2027
12	Neckar lozing (Neckar)	2 (Rijn km 427)				658
13a	Neckar – Worms	433				1977
13b	Neckar – Worms	433	360			
13c	Neckar – Worms	433				280
15a	Biblis – Main	455	18			
15b	Biblis – Main	455				4940
16	Main lozing (Main)	2 (Rijn km 497)				2366
17a	Main – Kaub	502	14			
17b	Main – Kaub	502				785
19a	Moezel lozing (Moezel)	2 (Rijn km 593)				337
19b	Blenod (Moezel)	255 (Moezel)			255	
19c	Blenod (Moezel)	255 (Moezel)				360
20	Koblenz – Keulen	630	373			
21a	Keulen – Düsseldorf	694				394
21b	Keulen – Düsseldorf	700				611
21c	Keulen – Düsseldorf	710				268
22a	Düsseldorf – Duisburg	740				770
22b	Düsseldorf – Duisburg	766				461
23a	Duisburg – Walsum	777				390
23b	Duisburg – Walsum	781	264			
23c	Duisburg – Walsum	781				545
24a	Walsum – Lobith	792				710
24b	Walsum – Lobith	799				820
24c	Walsum – Lobith	808				208

Tabel 2 Inventarisatie van de warmtelozingen in Nederland (WL | Delft Hydraulics, 2006)

Nr	Naam	Locatie	Modelinvoer	waterlozing (vergunning) (MW)
1	AEB UIT	NZK	tijdreeks	314
2	Air Products	Chemiehaven	tijdreeks	3
3	Air Products Nederland Pernis	Nieuwe Maas	tijdreeks	88
4	Akzo	Chemiehaven	tijdreeks	
5	Akzo Nobel Base Chemicals	Chemiehaven	tijdreeks	75
6	Albemarle	Het IJ	tijdreeks	3,5
7	Amsterdam fertilizers UIT	Mercuriushaven NZK	vergunning	3,5
8	ATM	Hollandsch Diep	vergunning	4,5
9	Atofina (Cerexagri)	Nieuwe Maas	vergunning	4,1
10	AVR-Roteb	Maashaven	tijdreeks	84
11	AZN (AVI-Moerdijk)	Hollandsch Diep	vergunning	6,1
12	Boskalis Dolman (NBM - Bodemsanering)	Nieuwe Maas	vergunning	2,5
13	Cabot B.V. (vh. Ketjen Carbon)	St. Laurenshaven	tijdreeks	38,9
14	Carbon Black Nederland (Carblane)	Chemiehaven	tijdreeks	45
15	Cargill Margarinefabrieken B.V.	Botlekhaven	vergunning	8
16	Cargill Multiseed	Amerikahaven	vergunning	1
17	Cargill Soja	Mercuriushaven	tijdreeks	15
18	Centrale Gelderland UIT	Waal (haventje)	tijdreeks	794
19	Clauscentrale Roermond uit	Maas (haventje)	tijdreeks	1680
20	Corus Staal UIT 1	Staalhaven	tijdreeks	390
21	Corus Staal UIT 2	Staalhaven	tijdreeks	
22	Corus Tubes (vhHoogovens Buizen)	Develhaven	vergunning	4,5
23	Crown van Gelder UIT	NZK	tijdreeks	8,9
24	De Kleef via AWZI	IJssel	tijdreeks	5
25	DSM Agro UIT 1	Staalhaven/binnenkanaal	tijdreeks	56
26	DSM Agro UIT 2	1-rijksbinnen haven	tijdreeks	
27	DSM Food	Wim Thomassenhaven/NZK	vergunning	1
28	DSM-Special Products	Botlekhaven	vergunning	3,8
29	E.ON - Galileïstraat	Keilehaven	tijdreeks	156
30	E.ON - Maasvlakte	Europahaven	vergunning	7
31	E.ON-Roca	Hollandsche IJssel	tijdreeks	2,3
32	ENCI		vergunning	5,8
33	Essent (WKC-Moerdijk)	Hollandsch Diep	tijdreeks	322
34	Essent-Amer	Amer	tijdreeks	1545
35	Essent-Donge	Amer/Donge	tijdreeks	105,8
36	Exxon Chemical Holland Inc. (ROP)	Wezerhaven	tijdreeks	48,6
37	Fundia Nedstaal/Ovako Wire	Noord	vergunning	20
38	Grootint (Zwijndrecht)	Drechthaven;Develhaven	vergunning	8
39	Hercules	Oude Maas/Develhaven	tijdreeks	12
40	HIWA Rotterdam Port Cold Stores	IJsselhaven	vergunning	4,2
41	Hoekloos (vh. Cryoton/Akzo)	St. Laurenshaven	tijdreeks	77
42	Hunter Douglas Europe B.V.	Nieuwe Maas	vergunning	10
43	Huntsman (vh ICI Holland B.V).	Brittanniëhaven	vergunning	5
44	Ijsselcentrale UIT	Ijssel (haventje)	tijdreeks	670
45	Kappa Roermond	Maas km 14,317	tijdreeks	5
46	KerrMcGee (vh Kemira Pig/Tiofine)	Nieuwe Waterweg	tijdreeks	33,7

Tabel 3 Inventarisatie van de warmtelozingen in Nederland (vervolg)

Nr	Naam	Lokatie	Modelinvoer	Vergunde WL (MW)
47	Kuwait Oil Raffinaderij B.V.	5e Petroleumhaven	tijdreeks	39
48	Lage weide LW6	ARK	tijdreeks	200
49	Merwedecentrale M10/11/12	ARK	tijdreeks	355
50	N.V. Afvalverwerking Rijnmond	Laurenshaven	tijdreeks	370
51	N.V. Afvalverwerking Rijnmond	Nieuwe Waterweg	tijdreeks	
52	N.V. Nederlandse Gasunie	Mississippihaven	vergunning	20,5
53	Nestle (vh. Carnation)	Boven Merwede	vergunning	5,5
54	Norske SKOG UIT mtp2/3/4	Nederrijn (haventje)	tijdreeks	64
55	NUON Diemen UIT1		tijdreeks	249
56	NUON Diemen UIT2		tijdreeks	
57	NUON Power Buggenum WAC uit	Maas (haventje)	tijdreeks	308,7
58	Odfjell (vh. Paktank Botlek)	3e Petroleumhaven	vergunning	15
59	RECV (Intergen)	2e Petroleumhaven	vergunning	9
60	Resolution Europe BV	1e Petroleumhaven	tijdreeks	88
61	ROMI	Wilhelminahaven	vergunning	4,32
62	SABIC (voormalig DSM) uit	Maas km 36,02 (Grensmaas)	tijdreeks	30
63	Sappi B.V.	Maas km 80,970	tijdreeks	7
64	Shell Ned. Chemie Moerdijk	Hollandsch Diep	tijdreeks	970
65	Shell Nederland Chemie B.V.	1e Petroleumhaven	tijdreeks	266
66	Shell Nederland Chemie B.V.	2e Petroleumhaven	tijdreeks	40
67	Shell Nederland Raffinaderij B.V.	1e Petroleumhaven	tijdreeks	630
68	Shell Nederland Raffinaderij B.V.	2e Petroleumhaven	tijdreeks	50
69	Shin Etsu VC	Chemiehaven	tijdreeks	100
70	Shin-Etsu PVC	1e Petroleumhaven	tijdreeks	20
71	SNR en SNC metroriool	1e Petroleumhaven	tijdreeks	219
72	Suiker Unie	Oude Maas	tijdreeks	65
73	SVI-Moerdijk (slibverbr.)	Hollandsch Diep	vergunning	1,5
74	Unichema	Hollandsche IJssel	tijdreeks	10,8
75	Unilever Bestfood Ned. BV	Koningshaven	vergunning	15,6
76	Unimills	Oude Maas	tijdreeks	11
77	Velsen Centrale V25 UIT	binnenkanaal	tijdreeks	
78	Hemweg Centrale UIT	Jan van Riebeekhaven NZK	tijdreeks	1340
79	Velsen Centrale V24 UIT	binnenkanaal	tijdreeks	585

B Windfunctie voor verdamping $F(W_a)$

De windsnelheid is bepalend voor de afkoeling via evaporatie. In de kalibratie is naar de windfunctie voor verdamping $F(W_a)$ gekeken (vergelijking 1). Het model kan gekalibreerd worden met de empirische coëfficiënten (c_1 en c_2), die de afhankelijkheidsrelatie tussen wind en verdamping bepalen.

$$F(W_a) = c_1 + c_2 W_a \quad \text{(Vergelijking 1)}$$

$$W_a = W_m \frac{\log(a/k)}{\log(m/k)} \quad \text{(Vergelijking 2)}$$

waar:

W_a	= windsnelheid bij een meethoogte van 'a' meter bovengronds	m/s
W_m	= windsnelheid gemeten bij een meethoogte van 'm' meter bovengronds	
k	= roughness coëfficiënt gebruikt om de logaritmisch windprofile vlakbij de grond te berekenen	0.05
a	= hoogte waar de windsnelheid moet gemeten worden volgens de $F(W_a)$ definitie	10 m
m	= hoogte waar de windsnelheid is in werkelijkheid gemeten	10 m

C Beschouwing van de verwaarloosde termen in de warmtebalans

De module DELWAQ beschrijft de processen inzake de warmteuitwisseling met de atmosfeer. De uitwisseling op het andere grensvlak van de rivier, de bodem wordt echter verwaarloosd. Evans (1998) onderzocht de warmtefluxen van een kleine rivier en vond dat 15% van de warmteuitwisseling plaatsvond aan de bodem. In deze paragraaf worden de resultaten van korte indicatieve berekeningen voor de warmtegeleiding naar de bodem en de invloed van koude grondwaterkwel.

Warmtegeleiding naar de bodem

Om een indicatieve berekening van dit proces te maken worden de volgende aannames gedaan:

- Het water stroomt over een koude ondergrond. Van begin juni tot half juli 2003 (35 - 45 dagen) warmt het water met 9° C op.
- Een grondpakket met een dikte d_{grond} moet ook 9° C opwarmen in deze periode. De ondergrond heeft een warmtecapaciteit van 3 $MJ.m^{-3}.K^{-1}$.
- Het water dat van de Bodenmeer naar Lobith stroomt, heeft een verblijftijd van 10 dagen, een warmtecapaciteit van 4195 $J.kg^{-1}$. K, een gemiddelde diepte van 6 meter en dichtheid van 1000 $kg.m^{-3}$.

Dan kan het warmteverlies berekend worden volgens (WL | Delft Hydraulics, 2003a):

$$q_{grond} = \frac{\Delta T c_{grond} \rho_{grond} d_{grond}}{\Delta t} \quad (0.1)$$

$$\Delta T_w = \frac{q_{grond} t_{verblijf}}{d_w \rho_w c_w} \quad (0.2)$$

waar

q_{grond}	=	*Warmteflux naar de ondergrond*	$W.m^{-2}$
ΔT	=	*Temperatuursverschil*	*°C*
ρ_g	=	*Dichtheid grond*	$Kg.m^{-3}$
c_{grond}	=	*Warmtecapaciteit grond*	*C*
d_{grond}	=	*Dikte op te warmen laag*	*m*
Δt	=	*Tijd voor opwarmen*	*s*
ΔT_w	=	*Opwarming of afkoeling water*	*°C*
$t_{verblijf}$	=	*Verblijftijd water in systeem*	*s*
d_w	=	*Diepte waterkolom*	*m*
ρ_w	=	*Dichtheid water*	$Kg.m^{-3}$
c_w	=	*Warmtecapaciteit water*	$J.kg^{-1}.K^{-1}$

Het warmteverlies is evenredig met de diepte van de grondlaag die door het water opgewarmd wordt. Een diepte van de grondlaag van 1 meter lijkt een redelijke eerste aanname, in combinatie met een worst-case aanname voor Δt leidt dat tot een temperatuurverschil bij Lobith van maximaal 0.3 °C (zie tabel C-1).

Tabel C-1 Voorbeeld van een indicatieve berekening van de warmtegeleiding naar de bodem ($\Delta t=35d$)

Diepte grondlaag (m)	Totale energie (MJ)	Warmteflux (W)	Warmteverlies (MJ)	Watertemperatuurverschil (ºC)
0.25	6,75	2.23	1,9	-0.08
0.5	13,5	4.46	3,9	-0.15
1	27,0	8.93	7,7	-0.31
1.5	40,5	13.39	11,6	-0.46
2	54,0	17.86	15,4	-0.61

Natuurlijk worden in deze berekening de situatie versimpeld. Zo zal een warmteflux naar de bodem niet constant zijn over tijd en plaats, maar afhangen van het temperatuurverschil en het type ondergrond. Zo zal in het najaar zal de relatief warmte ondergrond weer warmte afgeven aan het water.

Invloed koude grondwaterkwel

Om een indicatieve berekening van dit proces te maken worden de volgende aannames gedaan:

- Grondwater heeft een redelijke constante temperatuur van 10 °C (mondelinge mededeling Toine Vergroesen, WL | Delft Hydraulics).
- Wanneer de rivierafvoeren laag bij Lobith zijn (1000 m^3/s) wordt de bijdrage van het grondwater op het traject Koblenz-Lobith geschat op 100 m^3/s (mondelinge mededeling Ron Passchier, WL | Delft Hydraulics). Een tiende deel van het debiet bij Lobith is dan afkomstig van koude grondwaterkwel.

Het 100 m^3/s grondwater met een temperatuur van 10 °C wordt gemengd met 900 m^3/s water van 20 °C. Wanneer andere warmtefluxen geen rol spelen is de resulterende temperatuur 19 °C. Het temperatuurverschil als gevolg van grondwater bij Lobith is dan dus zo'n 1.0 °C. Bij een debiet van 800 m^3/s en gelijkblijvend grondwaterdebiet wordt het verschil echter al 5°C!. Grondwaterkwel kan dus in werkelijkheid een significante bijdrage te leveren aan de watertemperatuur bij Lobith.

De koude grondwaterlozing kan ook vergelijken worden met de koelwaterlozingen. Om een debiet van 100 m^3/s 10 °C op warmen is een vermogen van 4200 MW nodig, bij een warmtecapaciteit en dichtheid als in de vorige paragraaf. Dit vermogen is van dezelfde ordegrootte als de totale warmtelast als gevolg van koelwaterlozingen op het traject Koblenz- Lobith (5800 MW).